



Available online at www.sciencedirect.com

SCIENCE @ DIRECT®

C. R. Geoscience 336 (2004) 1099–1109



Géosciences de surface (Hydrologie–Hydrogéologie)

Comportement d'une source karstique soumise à une sécheresse prolongée : la source Bittit (Maroc)

Fouad Amraoui^a, Moumtaz Razack^{b,*}, Lhoussaine Bouchaou^c

^a Laboratoire d'hydrogéologie, faculté des sciences Ain Chock, université Hassan-II, BP 5366, Maarif, Casablanca, Maroc

^b Département d'hydrogéologie, UMR 6532, université de Poitiers, 40, av. du Recteur-Pineau, 86022 Poitiers cedex, France

^c Laboratory of geology appliquée et de géo-environnement, faculté des sciences Ibn-Zohr, BP 28/5, 80000 Agadir, Maroc

Reçu le 19 mai 2003 ; accepté après révision le 29 mars 2004

Présenté par Ghislain de Marsily

Résumé

Le comportement d'une émergence karstique (source Bittit, Moyen Atlas marocain) soumise à une sécheresse prolongée (> 20 ans), est analysé par des méthodes d'étude des hydrogrammes et des méthodes corrélatoires et spectrales. Deux séries de débit, correspondant à une période pluviométrique normale et à une période de sécheresse, sont analysées. Les résultats montrent que le système karstique est inertielle, avec des réserves très importantes. Cependant malgré le grand pouvoir régulateur des réserves, la longue période de sécheresse a eu pour conséquence une diminution significative des débits, du fait d'apports moins diversifiés et d'une réduction des réserves. **Pour citer cet article : F. Amraoui et al., C. R. Geoscience 336 (2004).**

© 2004 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Abstract

Behaviour of a karstic spring subjected to a long drought period: Bittit spring (Morocco). The behaviour of a karstic spring (Bittit spring, Middle Atlas, Morocco) subjected to a prolonged drought (> 20 yr), is analysed using spring hydrographs analysis methods and correlation and spectral methods. Two series of discharges, corresponding to a normal rainfall period and a drought period, are analysed. The results show that the karstic system is inertial, with very significant storage. However, in spite of the great regulating capacity of the storage, the long drought period significantly reduced the spring discharges, due to less diversified inputs, and to the karstic system storage depletion. **To cite this article: F. Amraoui et al., C. R. Geoscience 336 (2004).**

© 2004 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Mots-clés : source karstique ; Moyen Atlas ; Maroc ; sécheresse ; hydrogrammes ; analyses corrélatoire et spectrale

Keywords: karstic spring; Middle Atlas; Morocco; drought; hydrographs; correlation and spectral analysis

* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : moumtaz.razack@hydrasa.univ-poitiers.fr (M. Razack).

Abridged English version

1. Introduction

The object of this article is, from a general point of view, to characterize the hydrodynamic behaviour of large karstic systems according to their storage level. The study site is represented by the Bittit spring, located in the Middle Atlas, in Morocco. The reason for this choice is the large size of this system and its complexity, the existence of a long series of rainfall deficit and the availability of more than 70 yr of data. A better understanding of the evolution of such large karstic systems, taking into account their storage level, is particularly important within the context of climatic changes, evolving in the studied region towards aridity.

The plain of Sais is one of the great agricultural regions of Morocco. Its water resources are provided mainly by the karstic aquifer of the Liasic carbonate plateau of Middle Atlas (Fig. 1). This plateau is drained by a group of springs of which the most significant is the Bittit spring (average annual discharge = $1.3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) [1–3,5]. This spring is currently exploited to partly supply the town of Meknès with drinking water. The Middle Atlas area has undergone since two decades a regular rainfall deficit (Fig. 2A) with significant consequences on water resources (Fig. 2B).

The Middle Atlas plateau is made of limestone of Liasic age. Several springs are located along the contact between the carbonate plateau and the plain of Sais. The Middle Atlas plateau is the recharge area of the karstic system, which is drained by the springs. Fig. 2A represents the rainfall variations compared to the annual average rainfall, from 1934 to 2000. It confirms the irregularity of the rains and highlights a significant reduction since 1980. The total rainfall deficit since 1980 at the El Hajeb station is equivalent to three years of average rainfall.

The hydrogeologic system of Bittit has a very significant storage capacity, allowing storage of a significant recharge from rainfall and snow melting, without causing brutal floods. The spring discharge is indeed quite constant all the year around. The presence of sandy dolomites at the base of the Liasic aquifer suggests the existence of an aquifer with interstitial porosity and relatively slow flow. The Bittit spring is characterized by a high average discharge (1510 l s^{-1}

calculated over the period 1975–2001) and a reduced dispersion (standard deviation = 186 l s^{-1} ; CV = 12.3%). The spring thus presents a relatively stable discharge, indicating a good inter-annual regulation by the karstic system. Fig. 3 illustrates the discharge evolution, which shows a regular decrease since the beginning of the drought. The discharge time series of the Bittit spring, used in this work, cover respectively the periods 1975–1977 and 1995–1998.

2. Methods

Three methods have been used in this work to analyse the influence of the long drought period on the spring hydrodynamic behaviour. These methods are the discharge distribution analysis, the recession curves analysis and correlation and spectral analysis. Other methods, like the use of natural tracers [4,7] will be applied shortly.

The first method deals with the distribution of the discharge cumulative frequencies [11] and allows us to check (or not) the unity of the karstic systems. Thus, one can highlight sinks (or sources) out of (or into) the studied karstic system. These features appear as discontinuities on the frequency curve. The fitted probability distribution function is Gaussian. In practice, one plots the discharge frequencies on a Gaussian functional diagram. The observation on the diagram of several segments displays the existence of several flow regimes. These changes of flow regimes can have internal origins related to hydrodynamic modifications within the karstic system (storage and/or release of water; overflows), or external origins related to relationships with nearby systems resulting in water contributions or losses.

The recession curves analysis [11] allows us to characterize the behaviour of two subsystems: the unsaturated zone or infiltration subsystem and the saturated zone or drowned karst subsystem. The flood discharge shows how the infiltration zone is drained, whereas the base flow discharge characterizes the draining of the drowned karst. The interest of this method is to define the characteristics of each subsystem using some simple parameters.

Correlation and spectral methods are inspired by signal processing methods. Their application to karstic systems proved efficient to identify the organization and the dynamics of karstic systems [6,8,9,12,13].

The correlogram highlights the dependence between each other of successive events for increasing time intervals. Analytically, it shows the evolution of the autocorrelation coefficients r_k . If the correlogram decreases quickly, it indicates events independent from each other. On the other hand, a slow decrease characterizes events dependent on each other. The value $r_k = 0.2$ is a remarkable value, as the events can be considered independent when $r_k < 0.2$. The spectral analysis corresponds to a change from a time domain to a frequency domain by a Fourier transform of the correlogram. The spectral function $S(f)$ of density represents the decomposition of the time series variance in the frequency domain. Interpretation of this function consists in identifying the various peaks representing periodic phenomena, which helps to characterize the system. The weaker the cut-off frequency (the frequency such as $S(f)$ is almost null), the more inertial the system. The $S(f)$ function also allows the calculation of the regulation time of the system, which represents the influence of the duration of the input signal [$T_{\text{reg}} = S(F = 0)/2$]. The longer the regulation time, the more inertial the system.

3. Results and discussion

Frequency distributions of the discharge were analysed for two periods. The first corresponds to two hydrological cycles with normal rainfall 09/1975–08/1977 and the second with two hydrological cycles located in a drought period 09/1995–08/1997. The diagrams (Fig. 4) show three (period 1975–1977) to four (period 1995–1997) segments. This feature reveals that discharge evolution is different between normal and dry periods. Table 1 summarizes the results. The changes in flow regimes noted for a low discharge are explained by the passage from a flood flow (segment 2, Fig. 4) to a recession flow (segment 1, Fig. 4). The flow regime related to the first segment corresponds to a Maillet distribution [10]. The steeper slope of segment 1 of period 75/77 shows that in a normal period, the recession discharge is less dispersed. Segments 2, 3, 4 (period 1975–1977) and 2, 3 (period 1995–1997) represent the flood discharge. The larger number of segments in the normal period indicates that the origin of the water contributions is more diversified than in a dry period.

In the high-discharge domain, a discontinuity with a slope increase (segments 2 and 3, period 1975–1977) means water outlets outside the system and can suggest the probable existence of overflows (for example, a drain above the principal spring). In a dry period, one observes a discontinuity with reduction in slope between segments 2 and 3. This characteristic means the existence of a different water contribution to the system and can represent a temporary retention of a certain volume of water in additional structures at the time of the flood and its release at the beginning of the recession. The discontinuity between segments 3 and 4 of period 1975–1977 suggests the contribution of an external water volume only at the time of the flood periods (modification of the basin limits, snow melting, rain). During the period 1975–1977, the spring discharge was higher than at present and it was distributed in four segments. Recharge of the spring was more constant and probably more diversified before the years 1980 than during the current drought period. Indeed, if the groundwater level drops because of a reduction of the contributions, secondary drains become unsaturated and the recharge area is reduced. This can be seen on the frequency diagram by the reduction of the number of flow regimes (three segments instead of four). The modifications of the recharge area considered above are only assumptions, which could not be checked as no tracing tests [3] were performed in the system.

The choice of the various floods that were used for the recession analysis was made in such a way that they represent the maximum amplitudes of each hydrological cycle and they precede long periods of low water level (Fig. 5). The recession coefficients (Table 2) are low ($1.5 \times 10^{-4} \text{ d}^{-1}$) and seem similar from one recession to another, thus translating the difficulty for the system to drain stored water and consequently its facility to create reserves. Dynamic volumes are large and can be estimated at nearly a billion cube metres. It is significant to note the variation of the dynamic reserve between 1977 and 1996. Indeed, in 19 years, the system lost 179 Mm^3 , that is an average annual volume of 9.4 Mm^3 . This loss is to be connected directly with the drought that prevails in the area since 1981. The recession is generally spread out: 1 month to 45 days for the studied spring. This expresses a delayed response to the input signal represented by the rain.

The Bittit spring is the outlet of a wide and complex hydrogeologic system. The water volume sustaining recession is very significant (907 Mm³ in 1996), which implies a huge reservoir and places this aquifer among weakly karstified domains [11]. Sandy dolomites are porous systems with very high regulation capacity. Finally, the flood volume ($V_I = 0.5 \text{ Mm}^3$) is much less important compared to the dynamic volume V_r .

Spectral and correlation analysis is carried out with a daily time step and a 120-day truncation. Fig. 6 shows the discharge simple correlograms during the two periods. One notes a rather slow decrease, indicating a significant memory effect. The system modulates the input signal, it has a memory effect in relation with the regulating role of the reserves. During the period 1975–1977, the decrease is much slower ($r_k = 0.2$ for $k = 117$ days) than during the period 1995–1998 ($r_k = 0.2$ for $k = 37$ days). This highlights the effect of the groundwater reserve reduction on the damping of the input signal. This result also highlights the vertical heterogeneity of the karstic system and shows the significant influence of its storage level on input–output relations. The spectral density function (Fig. 7) shows narrow cut-off frequencies (0.11 d^{-1}), which confirms that the system is very inertial. The calculated regulation times are of 53 days over the period 1975–1977 and 37 days over the period 1995–1998. This result shows a significant reduction in the inertia of the system during the drought period due to the reserve decrease.

4. Conclusion

The various hydrodynamic methods used in this study show that the Bittit hydrogeologic system is very capacitive: significant storage, sustained discharge all year round, relatively slow flow because of the presence of a sandy dolomite base. However, in spite of the great storage capacity of this karstic aquifer, the spring discharge shows a regular and significant lowering tendency due to a long drought period that considerably reduced the aquifer recharge. The analyses of two discharge series allowed comparing the spring differential behaviour between a normal period and a dry period. This shows that the water deficit induced a reduction of the recharge area and of the reserve (estimated at $9.4 \text{ Million m}^3 \text{ yr}^{-1}$ on average), during the two last decades, and a change

in the input–output relations of the system, expressing the non-steadiness of the system. Thus, the drought phenomenon became a feature that should at present be taken into account for a sustainable management of water resources, particularly in semi-arid zones with irregular climates.

1. Introduction

L'objet de cet article est, d'un point de vue général, de caractériser le comportement hydrodynamique des grands systèmes karstiques en fonction de leur état de remplissage. Le site d'étude est représenté par la source de Bittit, localisée dans le Moyen Atlas marocain. Ce choix est lié à la grande taille de ce système et à sa complexité, à l'existence d'une longue série de pluies déficitaires et à la disponibilité de données sur plus de 70 ans.

La plaine du Sais est l'une des grandes régions agricoles du Maroc. Ses ressources en eau sont fournies en grande partie par l'aquifère karstique du Lias du plateau carbonaté du Moyen Atlas (Fig. 1). Ce cause se vidange par un groupe de sources dont la plus importante est celle de Bittit ($Q_{\text{moy annuel}} = 1,3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) [1–3,5]. Cette dernière est actuellement exploitée pour alimenter en partie la ville de Meknès en eau potable. Le Moyen Atlas marocain connaît, depuis une vingtaine d'années, un déficit pluviométrique chronique (Fig. 2A) dont les conséquences sont sensibles sur les ressources en eau (Fig. 2B). La région a été ainsi soumise, au cours de ces dernières décades, à un régime pluviométrique irrégulier.

Mieux comprendre l'évolution de ces grands systèmes karstiques, compte tenu de leur état de remplissage, revêt une importance particulière au moment où l'on parle de plus en plus de changements climatiques, allant, dans la région étudiée, vers l'aridification.

2. Région d'étude

Le Causse moyen-atlasique est constitué essentiellement de formations calcaires d'âge Liasique, qui reposent sur le Trias argileux et basaltique. Une dizaine de sources sont localisées le long du contact entre le plateau carbonaté et la plaine du Sais. Le cause moyen-atlasique constitue le secteur de recharge du

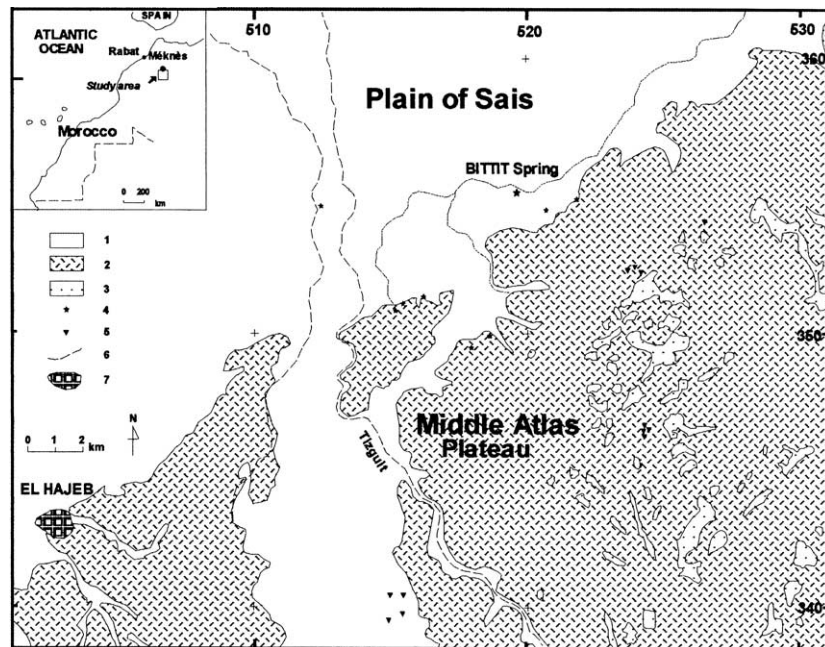


Fig. 1. Carte hydrogéologique de la bordure septentrionale du causses du Moyen Atlas (extrait de la carte géologique au 1/100 000 d'El Hajeb). 1, Formations mio-plio-quaternaires ; 2, affleurements carbonatés liasiques ; 3, dépressions karstiques à remplissage argilleux ; 4, source karstique ; 5, gouffres ou avens ; 6, faille ou flexure ; 7, cours d'eau ; 8, ville.

Fig. 1. Hydrogeological map of the northern border of the Middle Atlas Plateau (from the geological map of El Hajeb at 1/100 000). 1, Mio-Plio-Quaternary formations; 2, Liasic formations; 3, karstic depressions with argillaceous deposits; 4, karstic spring; 5, sink-holes; 6, fault; 7, River; 8, Town.

système karstique, qui est vidangé par les sources. Le régime des précipitations est du type méditerranéen. Le mois de décembre est en général le plus arrosé (83 mm en moyenne à El Hajeb), alors que les mois de juillet et d'août sont les plus secs (4 à 5 mm à El Hajeb). Des averses orageuses concentrées et brutales peuvent déclencher l'écoulement dans les vallées sèches.

La Fig. 2A représente les écarts pluviométriques par rapport à la pluie moyenne annuelle (612 mm) entre 1934 et 2000. Elle confirme l'irrégularité des pluies et met en évidence une diminution importante des apports depuis 1980. Le déficit cumulé des pluies depuis 1981 à El Hajeb équivaut à trois années moyennes.

L'émergence Bittit jaillit au pied de la flexure de Sidi Lmir, au sein d'une surface d'aplanissement recouverte par les basaltes quaternaires qui jouent le rôle d'un toit relativement imperméable. La source sort sous les basaltes en profitant probablement d'une

faille qui aurait guidé son installation. Les forages de reconnaissance creusés au voisinage de la source montrent que le Lias est peu épais à cet endroit et que le Trias marque une remontée, jouant ainsi un rôle de barrière, en empêchant l'écoulement de l'eau vers la plaine.

Le système hydrogéologique de Bittit jouit d'une capacité de stockage très importante, permettant d'emmagasiner une recharge importante provenant des pluies et des fontes de neige, sans provoquer de crues brutales. Le débit de la source est, en effet, bien soutenu durant toute l'année. La présence de dolomies sableuses à la base de l'aquifère liasique plaide en faveur de l'existence d'un aquifère à porosité d'interstices et à écoulement relativement lent. On aurait donc, dans l'ensemble, un système ayant un pouvoir de régulation qui permet d'amortir les pics de recharge et de restituer l'eau avec modération.

La source Bittit est caractérisée par un débit moyen élevé (1510 l s^{-1} calculé sur la période 1975–2001) et

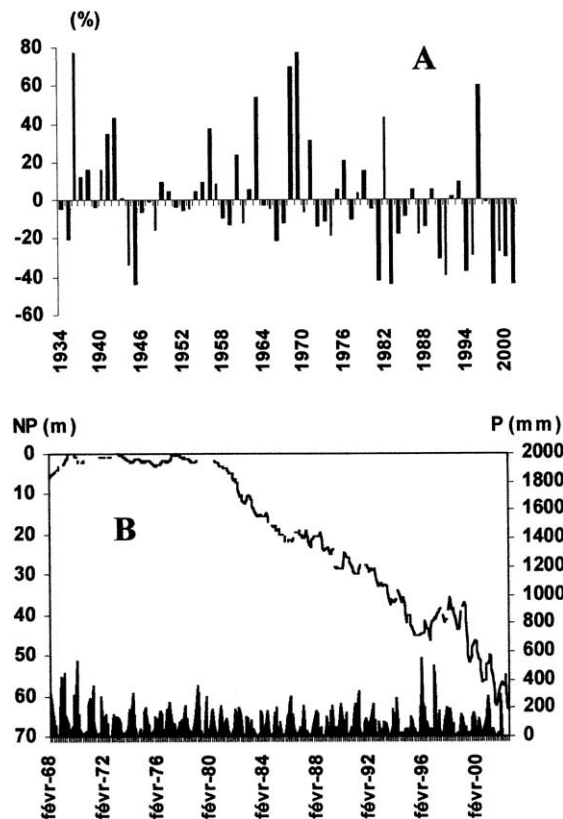


Fig. 2. Déficit pluviométrique et conséquences sur les ressources en eau. (A) Écarts pluviométriques relatifs (%) par rapport à la moyenne à El Hajeb (1934–2001). (B) Suivi piézométrique sur le forage 290/15 dans la plaine du Sais, montrant une baisse régulière du niveau de la nappe consécutive à la sécheresse.

Fig. 2. Rainfall deficit and its effects on water resources. (A) Relative deviations (%) from average rainfall at El Hajeb station (1934–2001). (B) Groundwater monitoring at borehole 290/15 in the plain of Sais showing a regular decrease of the water level due to the drought.

une dispersion réduite (écart type = 186 l s^{-1} ; CV = 12,3%). L'exutoire présente donc un écoulement relativement stable, témoignant d'une bonne régulation interannuelle par le système aquifère karstique. La Fig. 3 illustre l'évolution du débit de la source, qui marque une tendance baissière régulière depuis le début de la sécheresse. Les séries chronologiques des débits de la source Bittit, utilisées dans ce travail, recouvrent respectivement les périodes 1975–1977 et 1995–1998.

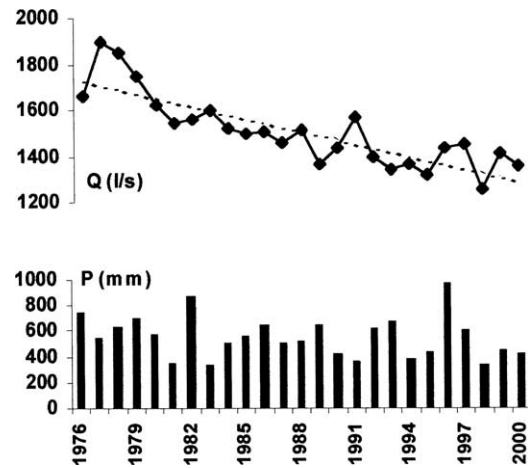


Fig. 3. Évolution du débit annuel de la source Bittit (A) et pluie annuelle à El Hajeb (B) (1976–2000).

Fig. 3. Annual discharge evolution of the Bittit spring (A) and annual rainfall at El Hajeb station (B) (1976/2000).

3. Méthodologie

3.1. Étude des débits classés

La méthode des débits classés [11] consiste à étudier la distribution des fréquences cumulées des débits observés à la source. Elle permet de caractériser la structure de l'hydrogramme unitaire. Cette méthode se révèle être un outil intéressant pour vérifier ou non l'unité des systèmes karstiques. Ainsi, on peut mettre en évidence une fuite ou un apport d'eau vers le système karstique étudié. Ceci se traduit sur la courbe par des discontinuités.

La loi de probabilité ajustée est la loi normale. En pratique, on reporte les fréquences cumulées de débits sur un diagramme fonctionnel. L'observation sur la courbe de plusieurs segments de droites traduit l'existence de plusieurs lois d'écoulement. Ces changements de loi d'écoulement peuvent avoir des origines diverses, liées soit à des modifications hydrodynamiques internes au système karstique, comme le stockage–déstockage des réserves ou l'entrée en fonctionnement de trop-pleins, soit à des interrelations avec un système voisin, qui se traduisent par des apports ou des fuites.

3.2. Étude des courbes de récession

L'étude des courbes de récession [11] permet de caractériser le comportement des deux sous-systèmes qui constituent le système karstique : la zone non saturée, ou sous-système « infiltration », et la zone saturée ou sous-système « karst noyé ». L'écoulement de décrue est représentatif de la manière dont s'effectue la vidange de la zone d'infiltration, alors que l'écoulement de tarissement caractérise la vidange du karst noyé. L'intérêt de cette méthode est de définir les caractéristiques de chaque sous-système à l'aide de quelques paramètres simples.

3.3. Analyses corrélatoires et spectrales

Les analyses corrélatoires et spectrales s'inspirent directement des méthodes de traitement du signal. Leur application à l'étude des systèmes karstiques s'est avérée tout à fait efficace pour identifier l'organisation et la dynamique des systèmes karstiques [6,8,9,12,13].

Le corrélogramme met en évidence la dépendance, les uns avec les autres, des événements successifs pour des intervalles de temps croissants. Analytiquement, il montre l'évolution du coefficient r_k d'autocorrélation. Si le corrélogramme décroît très vite, il indique des événements indépendants les uns des autres. En revanche, une décroissance lente caractérise des événements dépendants les uns des autres. La valeur $r_k = 0,2$ est une valeur remarquable, car des événements peuvent être considérés indépendants quand $r_k < 0,2$.

L'analyse spectrale correspond à un changement d'un domaine de temps à un domaine de fréquence par une transformée de Fourier du corrélogramme. La fonction spectrale $S(f)$ de densité représente la décomposition de la variance de la série chronologique dans le domaine des fréquences. Les phénomènes périodiques apparaissent sous forme de pics dans le graphe de $S(f)$. Quand ces pics caractérisent le signal de sortie, ceci montre comment le signal d'entrée a été modifié par le système. Plus la fréquence de coupure (la fréquence telle que $S(f)$ est presque nulle) est faible, plus le système est inertiel. La fonction $S(f)$ permet également le calcul du temps de régulation du système, qui représente la durée d'influence du signal d'entrée [$T_{\text{reg}} = S(f = 0)/2$]. Plus le temps de régulation est long, plus le système

est inertiel. L'inertie du système karstique est liée à son organisation de stockage (mise en réserve) et de drainage.

4. Résultats et discussion

4.1. Analyse des débits classés

Deux courbes des débits classés de la source Bittit ont été construites. La première correspond aux deux cycles hydrologiques à pluviométrie normale 09/1975–08/1977 et la seconde aux deux cycles hydrologiques situés en période de sécheresse 09/1995–08/1997.

Les graphiques des débits classés de l'émergence Bittit (Fig. 4) sont constitués de trois (période 1975–1977) à quatre (période 1995–1997) segments de droite. Cette organisation révèle que l'évolution des débits est différente entre période normale et période sèche. Il est important de tenter de comprendre les réalités hydrodynamiques sous-jacentes à ces différentes lois. L'interprétation ci-dessous distingue le comportement de l'émergence par rapport à son débit moyen pour les deux périodes étudiées. Le Tableau 1 résume les résultats obtenus.

Les changements des lois d'écoulement relevés au niveau des faibles débits s'expliquent par le passage d'un écoulement de décrue (segment 2, Fig. 4) à un écoulement de tarissement (segment 1, Fig. 4). La loi d'écoulement relative à ce premier segment de droite correspond à une loi de Maillet [10]. La pente plus importante du segment 1 de la période 1975–1977 montre qu'en période normale, les débits de tarissement sont moins dispersés.

Les segments 2–4 (période 1975–1977) et 2, 3 (période 1995–1997) représentent les débits de décrue. Le nombre de segments, plus grand en période normale, est une indication d'origines des apports, plus diversifiées qu'en période sèche.

Dans le domaine des débits élevés, une discontinuité avec augmentation de pente (segments 2 et 3, période 1975–1977), signifie une fuite d'eau vers l'extérieur du système et peut traduire l'existence probable de « trop-pleins » (par exemple un drain au-dessus de la source principale). En période sèche, on observe une discontinuité avec réduction de pente entre les segments 2 et 3. Cette particularité signifie un apport

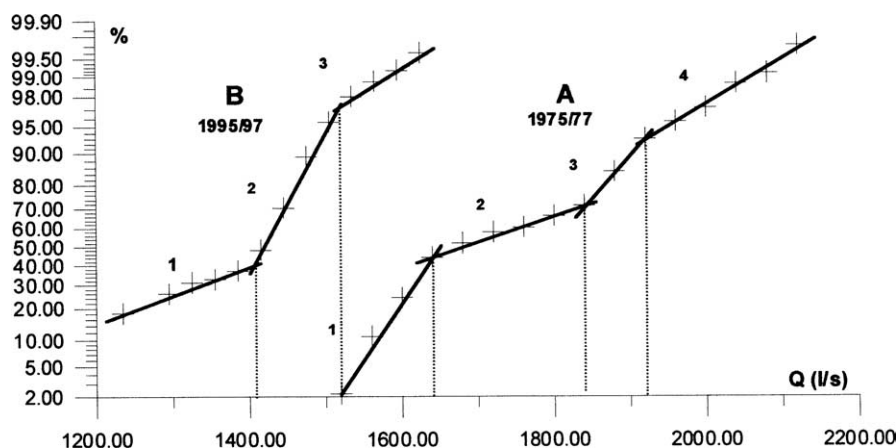


Fig. 4. Distribution des débits en période normale (A : 1975–1977) et en période sèche (B : 1995–1997).

Fig. 4. Discharges distribution during a normal period (A: 1975–1977) and a drought period (B: 95/97).

Tableau 1

Analyse de la distribution des débits ($l s^{-1}$)

Table 1

Analysis of the discharges ($l s^{-1}$) distribution

	Débit moyen ($l s^{-1}$) / Average discharge ($l s^{-1}$)	1 ^{er} intervalle / 1st interval	2 ^e intervalle / 2nd interval	3 ^e intervalle / 3rd interval	4 ^e intervalle / 4th interval
Chronique / Series 1975–1977	1737	< 1640	1640–1840	1840–1920	> 1920
Chronique / Series 1995–1997	1400	< 1400	1400–1515	> 1515	–

d'eau dans le système et peut traduire la mise en réserve temporaire d'un certain volume d'eau dans des structures annexes lors des crues et sa libération dès le début de la décrue.

La discontinuité entre les segments 3 et 4 de la période 1975–1977 traduit l'apport d'un volume d'eau extérieur, uniquement lors des périodes de crue (modification des limites du bassin, pluie, fonte de neige).

Durant la période 1975–1977, les débits de l'émergence étaient plus importants qu'actuellement et ils s'organisaient en quatre segments de droite. L'alimentation de la source était plus soutenue et probablement plus diversifiée avant les années 1980 que durant la période de sécheresse actuelle. En effet, si le niveau de l'aquifère baisse à cause d'une réduction des apports, des drains secondaires se retrouvent dénoyés et l'aire d'alimentation s'en retrouve réduite. Ceci se traduit sur le graphique des débits classés par la réduction des lois d'écoulement (trois segments au lieu de quatre) et par un changement vers des valeurs plus

faibles des limites des intervalles de débits. Les modifications d'impluvium envisagées ci-dessus sont des hypothèses, qui n'ont pu être vérifiées faute d'essais de traçage dans le système [3].

4.2. Analyse des courbes de récession

Le choix des différentes crues qui ont servi à l'analyse des courbes de récession a été fait de telle façon qu'elles représentent les amplitudes maximales de chaque cycle hydrologique et précèdent de longues périodes d'étiage (Fig. 5). Les coefficients de tarissement (Tableau 2) sont faibles ($1,5 \times 10^{-4} j^{-1}$) et semblent reductibles d'un tarissement à l'autre, traduisant ainsi la vidange lente des réserves et, par conséquent, la tendance au stockage. Les volumes dynamiques sont considérables et peuvent être estimés à près d'un milliard de mètres cube. Il est important de noter la variation de la réserve dynamique de la source entre 1977 et 1996. En effet, en l'espace de 19 ans, le système a perdu 179 millions de mètres

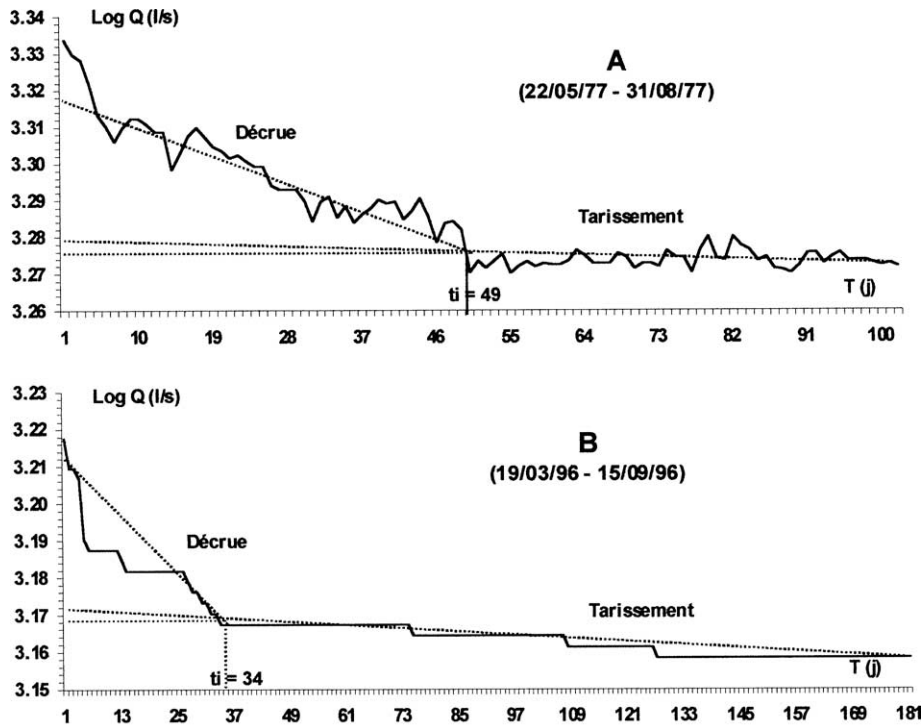


Fig. 5. Courbes de récession de la source Bittit en période normale (A) et en période sèche (B).

Fig. 5. Recession curves of the Bittit spring in a normal period (A) and in a drought period (B). 'décrue': flood recession; 'tarissement': baseflow.

Tableau 2
Analyse des courbes de récession

Table 2
Analysis of recession curves

Date début de décrue / Recession starting time	22/05/77	19/03/96
Durée de la décrue t_i (jour) / Flood recession (d)	49	34
Durée du tarissement (jour) / Baseflow recession (d)	> 53	147
Débit de début Q_0 de la décrue ($l s^{-1}$) / Flood starting discharge Q_0 ($l s^{-1}$)	2072	1630
Débit de base Q_{Ro} du tarissement ($l s^{-1}$) / Baseflow discharge Q_{Ro} ($l s^{-1}$)	1898	1477
q_0 ($l s^{-1}$) = $Q_0 - Q_{Ro}$	174	153
Débit Q'_{Ro} à la fin de la décrue ($l s^{-1}$) / Discharge Q'_{Ro} at the end of the flood ($l s^{-1}$)	1886	1470
Coefficient de tarissement α (10^{-3}) / Recession coefficient α (10^{-3})	0,15	0,14
Volume dynamique V_R (Mm^3) / Dynamic volume V_R (Mm^3)	1086,3	907,2
Volume de décrue V_i (Mm^3) / Flood volume V_i (Mm^3)	0,7	0,5

cube, soit un volume moyen annuel de 9,4 Mm^3 . Cette perte est à mettre en relation directe avec la sécheresse qui sévit dans la région depuis 1981. L'absence de forage sur le causse ne permet pas de visualiser la réaction de la nappe à cette sécheresse. L'aquifère du Lias se prolonge sous la plaine du Sais, vers le nord (Fig. 1), où il devient captif sous les formations mio-plio-quaternaires. Le suivi piézométrique dans le forage 290/22 ($X = 497,5$; $Y = 353,8$) depuis février 1968 (Fig. 2B) montre une baisse régulière de la charge de la nappe depuis 1980 ($-2,7$ m an^{-1} en moyenne).

La décrue est généralement étalée : 30 à 45 j pour la source étudiée. Ceci traduit une réponse retardée au signal d'entrée représenté par la pluie. Les durées des décrues peuvent varier d'une année hydrologique à une autre, en fonction de l'importance de l'impluvium et de sa répartition temporelle.

La source Bittit offre un système hydrogéologique étendu et complexe. Le volume d'eau soutenant le tarissement est très important (907 Mm^3 en 1996),

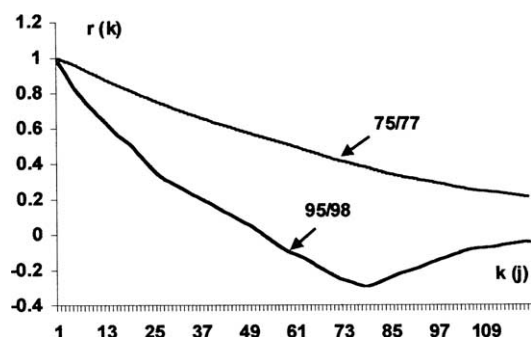


Fig. 6. Corrélogrammes simples des débits de la source Bittit ($m = 120$) (septembre 1975–août 1977 : $n = 731$ et décembre 1995–février 1998 : $n = 770$); l'abscisse est graduée en jours.

Fig. 6. Simple correlograms of the Bittit spring discharges ($m = 120$ d) (September 1975–August 1977: $n = 731$ and December 1995–February 1998: $n = 770$); the horizontal axis is in days.

ce qui implique un immense réservoir et place cet aquifère parmi les domaines peu karstifiés [12]. Les dolomies sableuses constitueraient un système poreux à pouvoir régulateur très élevé. Enfin, le volume de décrue ($V_i = 0,5 \text{ Mm}^3$) est insignifiant par rapport au volume dynamique V_r .

4.3. Analyse corrélatoire et spectrale

L'analyse est réalisée à court terme, avec un pas de temps journalier et une troncature de 120 j. La Fig. 6 montre les corrélogrammes simples des débits de la source durant les deux périodes d'observation. On note une décroissance assez lente, témoignant d'un effet mémoire important. Le système module le signal d'entrée; il a un effet mémoire qui est en relation avec le rôle régulateur des réserves. Durant la période 1975–1977, la décroissance est beaucoup plus lente ($r_k = 0,2$ pour $k = 117$ j) qu'au cours de la période 1995–1998 ($r_k = 0,2$ pour $k = 37$ j). Ceci traduit l'effet de la diminution de la réserve de la nappe sur l'amortissement du signal d'entrée. Ce résultat souligne l'hétérogénéité verticale des systèmes karstiques et montre l'influence significative de leur état de remplissage sur les relations entrées–sorties.

Les spectres de densité de variance de la source (Fig. 7) montrent des fréquences de coupure ou bandes spectrales étroites ($0,11 \text{ j}^{-1}$), et confirment qu'il s'agit d'un système inertiel. Les temps de régulation calculés sont de 53 j pour la période 1975/77 et 37 j pour la période 1995–1998. Ce résultat montre une réduction

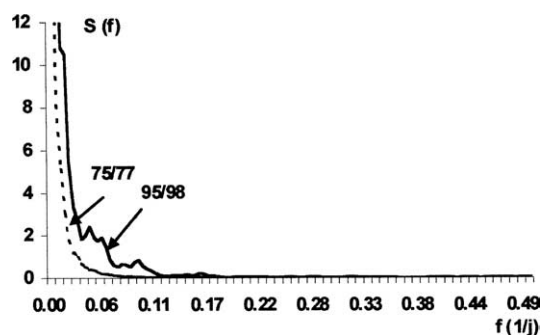


Fig. 7. Spectres de densité de variance des débits de la source Bittit ($m = 120$) (septembre 1975–août 1977 : $n = 731$ et décembre 1995–février 1998 : $n = 770$); l'abscisse est graduée en jours^{-1} .

Fig. 7. Spectral density functions of the Bittit spring discharges ($m = 120$ d) (September 1975–August 1977: $n = 731$ and December 1995–February 1998: $n = 770$); the horizontal axis is in days^{-1} .

sensible de l'inertie du système durant la période de sécheresse, due à la baisse des réserves.

Les paramètres obtenus en analysant les débits de la source montrent un effet mémoire grand à très grand (37 à 117 j), une bande spectrale étroite ($0,11 \text{ j}^{-1}$), et un temps de régulation de 37 à 53 j. Ces données peuvent être comparées à celles des aquifères carbonatés étudiés par ailleurs [6,11]. La source Bittit peut être classée parmi les aquifères à effet mémoire important de type Fontestorbes.

5. Conclusion

Les différentes méthodes hydrodynamiques utilisées dans cette étude montrent que le système hydrogéologique de Bittit est très capacitif : stockage important, débit régulé et soutenu durant toute l'année, écoulement relativement lent à cause de la présence à la base d'une assise de dolomies sableuses, karstification peu développée. Cependant, malgré la grande capacité de réserve de cet aquifère karstique, le débit à l'exutoire marque une tendance régulière et significative à la baisse, due à une longue période de sécheresse, qui réduit considérablement l'alimentation de l'aquifère.

L'analyse de deux chroniques de débits de l'émergence a permis de comparer le comportement différentiel de la source entre une période normale et une période sèche. Il en ressort que le déficit hydrique a produit une réduction de l'aire d'alimentation, une diminution des réserves estimée à 9,4 millions de mètres

cube par an en moyenne durant les deux dernières décennies et un changement dans les relations entrée–sortie du système, dû à l’influence significative de son état de remplissage, mettant en évidence son caractère non stationnaire.

Les méthodes mises en œuvre dans ce travail (étude des débits classés et des courbes de récession, analyses corrélatoires et spectrales) ont permis de mieux comprendre l’évolution d’un grand système karstique tel que celui de Bittit. D’autres méthodes, notamment les traceurs naturels [4,7], peuvent contribuer à cet objectif. Leur application fera l’objet d’un prochain travail.

Ainsi, le phénomène de sécheresse est devenu un paramètre dont il faut tenir compte pour une gestion durable de la ressource, notamment en zone semi-aride à climat irrégulier, où les changements climatiques tendent vers une aridification.

Remerciements

Ce travail a bénéficié du soutien financier de l’Action intégrée France–Maroc AI 221/STU/00. Les auteurs tiennent à remercier chaleureusement le Pr. G. de Marsily et le second réviseur anonyme, pour l’ensemble de leurs remarques et suggestions, qui ont permis d’améliorer cet article.

Références

- [1] F. Amraoui, L’aquifère karstique du Moyen Atlas tabulaire : problème de la turbidité affectant les sources du complexe Ribaa-Bittit (Maroc), Proc. 7th Conf. On Limestones Hyd. and Fissured Media, Besançon, France, Sci. Tech. Environ. 113 (2001) 45–48 (Mém. H.S.).
- [2] F. Amraoui, L’aquifère karstique du Moyen Atlas tabulaire : problème de la turbidité affectant les sources du complexe Ribaa-Bittit (Maroc), Les Cahiers de la Recherche, Éditions du Rectorat de Casablanca (Maroc), Série A, Sciences et Techniques 5 (2003) 81–92.
- [3] F. Amraoui, M. Razack, L. Bouchaou, Turbidity dynamics in karstic systems. Example of Ribaa and Bittit springs in the Middle Atlas (Morocco), Hydrol. Sci. J. 48 (6) (2003) 971–984.
- [4] C. Batiot, C. Emblanch, B. Blavoux, Carbone organique total (COT) et magnésium (Mg^{2+}) : deux traceurs complémentaires du temps de séjour dans l’aquifère karstique, C. R. Geoscience 335 (2) (2003) 205–210.
- [5] A. Benjbara, Observations sur les sources de la plaine de Fès-Meknès, Rev. Eau et Développement, in: Direction de l’Hydraulique (Maroc), 1987, pp. 31–37.
- [6] L. Bouchaou, P. Chauve, J. Mudry, J. Mania, Y. Hsissou, Structure et fonctionnement d’un hydrosystème karstique de montagne sous climat semi-aride : cas de l’Atlas de Beni-Mellal (Maroc), J. Afr. Earth Sci. 25 (2) (1997) 225–236.
- [7] A.M. Delaunay, M. Calleja, J.-P. Faillat, S. Pistre, P. Cour, Traçage pollinique naturel dans un hydrogéosystème karstique thermo-minéral, C. R. Acad. Sci., Ser. IIA 331 (7) (2000) 467–472.
- [8] D. Labat, R. Ababou, A. Mangin, Analyse multirésolution croisée de pluies et débits de sources karstiques, C. R. Geoscience 334 (8) (2002) 551–556.
- [9] M. Larocque, A. Mangin, M. Razack, O. Banton, Contribution of correlation and spectral analyses to the regional study of a large karst aquifer (Charente, France), J. Hydrol. 205 (3–4) (1998) 217–231.
- [10] E. Maillat, Essais d’hydraulique et fluviale, Hermann, Paris, 1905, 218 p.
- [11] A. Mangin, Étude des débits classés d’exutoires karstiques portant sur un cycle hydrologique, Ann. Spéléol. 26 (2) (1971) 283–329.
- [12] A. Mangin, Pour une meilleure connaissance des systèmes hydrologiques à partir des analyses corrélatoires et spectrales, J. Hydrol. 67 (1984) 25–43.
- [13] A. Padilla, A. Pulido-Bosch, Study of hydrographs of karstic aquifers by means of correlation and cross-spectral analysis, J. Hydrol. 168 (1995) 73–89.