



## Influences hydro karstiques du système sourcier Aïn Sebou-Timedrine-Ouamender Sur l'hydrologie de l'oued Sebou (Moyen Atlas, Maroc)

BRAHIM AKDIM, ABDELLAH SABAOU, MHAMED AMYAY, MOHAMED LAAOUANE,  
EMMANUEL GILLE et KHALID OBDA

avec 3 figures et 3 tableaux

**Résumé.** Les grandes sources de Aïn Sebou, Aïn Timedrine et Aïn Ouamender, au Haut Sebou ont été étudiées en tant que points d'interactions hydrologiques entre l'oued et le karst profond. Par leur fonctionnement hydro-karstique, ces sources influencent l'écoulement de l'Oued Sebou en aval. Mais elles s'individualisent en termes de fonctionnement. Aïn Sebou, en amont, est la plus importante en terme de débit et connaît des fluctuations saisonnières remarquables, contrairement aux deux autres sources situées en aval, qui connaissent un écoulement permanent et régulier. Ce dernier illustre l'importance du karst noyé et des diaclases et fissures abritant leurs nappes dans ce contexte à dominante calcaire et dolomitique. La grande source de Aïn Sebou quant à elle, émet un débit plus important, mais elle tarit en périodes de longues sécheresses. Suivant le phénomène de siphonage, sa gouffre se transforme alors en tunnel d'absorption des eaux superficielles provenant des sous bassins d'amont, comme le Mdez et le Guigou. Elle affaiblit davantage l'écoulement superficiel de l'oued Sebou en amont de la station Azzaba. Le débit jaugé dans cette station est donc à la fois influencé par le contexte climatique et morphostructural mais en période de fort étiage, le système karstique de la source de Aïn Sebou exerce une influence majeure sur l'hydrologie de l'oued.

*Mot-clés:* Sebou, hydrologie, karst, Maroc

**Summary.** The springs Aïn Sebou, Aïn Timedrine and Aïn Ouamender, in the upper wadi Sebou catchment, have been studied as points of hydrologic interactions between the wadi and the deep karst system. By their discharge and regime, these springs influence the outflow of the Sebou wadi, downstream. However, these springs individualize each from other. Aïn Sebou, upstream, have the most important discharge and knows remarkable seasonal hydrologic fluctuations, contrary to Aïn Timedrine and Aïn Ouamender, situated downstream. The last two springs are more regular in out-flow, illustrating the importance of the drowned karst. The Aïn Sebou spring, have a more important discharge but dries in periods of long droughts. Following the phenomenon of siphonage, the spring site becomes a tunnel of absorption of the superficial waters coming from the uphill catchment of Mdez and Guigou rivers. In such conditions, it weakens the superficial out-flow of the Sebou river as noted in the Azzaba station. The discharge measured in this station is therefore influenced at the same time by the climatic and morphostructural context, and the karstic system of the Aïn Sebou spring, which exercises a major influence on the hydrology of the river, mainly in periods of strong droughts.

*Key words:* Sebou, hydrology, karst, Morocco

## Introduction

L'oued Sebou draine des affluents issus du domaine montagnard rifain et moyen atlasique. Au Moyen Atlas, à l'amont de la station hydrométrique de Azzaba, les principaux affluents qui alimentent le bassin hydrologique du Haut Sebou sont les oueds Mdez, Maassère, Zloul et Guigou. Ces derniers jouent un rôle hydrologique essentiel et influencent le régime d'écoulement, notamment en période sèche (AKDIM & SARY 2001, OBDA et al. 2001). Les études spatialisées des phénomènes hydrologiques dans la partie amont de l'oued Sebou ont nuancé des contrastes hydrologiques évidents dans le Haut Sebou (NEJJARI 2004, OBDA 2004). Leurs spécificités ont été mises en évidence sur la base de campagnes hydrologiques de jaugeages et l'étude des facteurs physiographiques, climatique et anthropiques. Des hydrosystèmes différents par leur fonctionnement hydrologique ont été identifiés par la méthode des profils hydrologiques et de l'analyse des cartes des indigences des écoulements de l'oued Sebou en amont du barrage Allal Al Fassi (OBDA 2004).

Parmi ces hydrosystèmes, celui des émergences karstiques dans le secteur abritant les grandes sources de Ain Sebou, Ain Timdrine et Ain Ouamender (fig. 1). C'est un hydrosystème typique par son fonctionnement hydro-karstique et son influence majeure sur l'écoulement de l'Oued Sebou en aval. En effet, le fonctionnement hydrogéologique de ce système, affecté par ses apports, le régime hydrologique du Haut Sebou.

Ces trois sources principales sont géographiquement rapprochées et se situent à l'intérieur d'une aire globale d'environ 20 kilomètres carrés mais elles s'individuali-

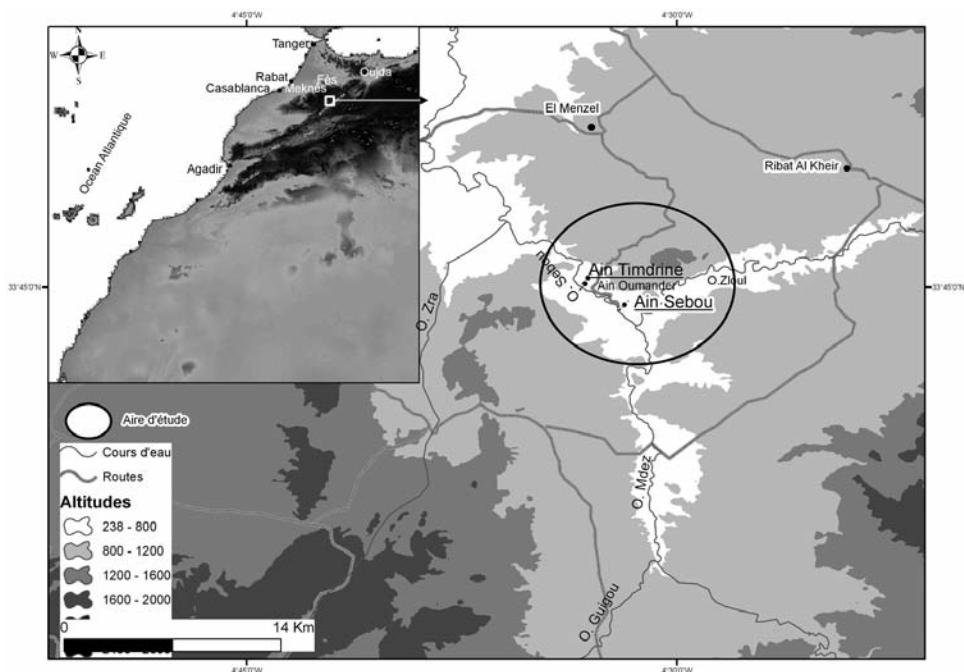


Fig. 1. Croquis de localisation du Haut Sebou et terrain d'étude.

sent en termes de fonctionnement. Aïn Sebou, en amont, est la plus importante en terme de débit (2.500 l/s en moyenne) mais elle connaît des fluctuations saisonnières remarquables et se rattache à un système karstique développé. Les deux autres sources se situent en aval et connaissent un écoulement permanent et régulier illustrant l'importance du karst noyé et des diaclases et fissures abritant leurs nappes dans ce contexte à dominante calcaire et dolomitique.

Ces sources traduisent, par l'importance de leur débit et la différence de leur régime, la problématique hydrokarstique locale. Aïn Sebou véhicule un important débit certes, mais elle s'assèche en périodes de longues sécheresses, et comme en 1995 sa gouffre se transforme en tunnel d'absorption des eaux superficielles provenant des sous bassins d'amont, comme le Mdez et le Guigou. Elle affaiblit davantage l'écoulement superficiel de l'oued Sebou en amont de la station Azzaba. Le débit jaugé dans cette station est donc à la fois influencé par le système karstique et le contexte climatique et morphostructural. Le régime rythmé des sources karstiques a été étudié dans d'autres régions marocaines comme à Aïn Bitit sur le Dir Moyen Atlasique (AMRAOUI et al. 2004), mais l'effet hydrologique des sources karstiques sur l'écoulement superficiel des oueds reste encore peu analysé au Maroc malgré son importance dans le domaine atlasique.

Ainsi, la spatialisation hydrologique en relation avec le karst et l'analyse des influences structurales et climatiques explicatives de ce système se posent.

Cet article présente les résultats de l'étude et a pour principaux objectifs de :

- présenter le contexte général de cet hydrosystème,
- présenter les résultats des analyses hydrologiques, hydrogéologiques et morphostructurales apportant des éclaircissements appropriés au fonctionnement hydrokarstique de ce système et discuter son fonctionnement à la lumière des hypothèses antérieures et des résultats du présent travail.

## *Le contexte géographique et géologique*

### *1 Localisation et contexte géographique*

Le bassin versant du Haut Sebou couvre la plus grande partie du Moyen Atlas avec une superficie de 4.640 km<sup>2</sup> à l'amont du barrage Allal El Fassi. Mais l'étude met l'accent sur le territoire centré dans le cercle d'El Menzel, administrativement géré par la Province de Sefrou. Il se situe en zone de contact entre le Causse d'El Menzel – Sefrou et le Moyen Atlas plissé. Il est traversé par l'oued Sebou, lui-même alimenté dans cette partie par ses affluents oued Zloul, oued Maasser, oued Guigou et d'autres petits cours d'eau d'écoulement saisonnier. Ces derniers n'ont d'importance qu'en période de crues.

Sur le plan de l'occupation humaine, l'aire de l'étude correspond au territoire de contact entre des groupements ethniques différents. Les Aït Saddene, les Aït Seghrouchene, les Aït Alahem (aux environs de Aderj), les Ighazranes (autours de Ahermoumou, Zloul), les Bni Yazgha et les Zrarda sont par exemple des tribus qui s'étendent sur des aires variables et exploitent les ressources en eau suivant des modes généralement traditionnels (puisage, irrigation, usage domestiques). Plus récemment, l'aire d'étude connut d'importantes mutations et des aménagements davantage consommateurs d'eau (modernisation progressive de l'habitat et de l'exploitation agricole, irri-

gation des rosacées en développement sur le causse d'El Menzel et dans la dépression du Zloul, autour de la station hydrométrique de Dar El Hamra, pompage des eaux souterraines et des oueds). Dans certains cas, comme à Ain Timedrine, le pompage des eaux se fait directement à partir de la source. Plus en aval, la construction du barrage Allal El Fassi est un aménagement principal qu'il faut considérer en termes d'étude et gestion des ressources en eau dans ce domaine. Les mutations spatiales sont souvent consommatrices d'eau et exigent en perspective, une meilleure gestion de la ressource.

## 2 *Grandes unités structurales*

Le bassin versant du Haut Sebou à l'amont du barrage Allal El Fassi couvre la plus grande partie du Moyen Atlas. Ce bassin montre une forme assez allongée aux édifices montagneux et structuraux orientés NE-SW (fig. 2).

Ce bassin est parcouru longitudinalement par l'accident nord moyen atlasique qui sépare deux domaines structuraux qui sont le Causse, au NW et le Moyen Atlas plissé, au SE. Le Causse montre essentiellement des terrains du Lias inférieur à moyen qui montrent un faciès carbonaté généralement lité. Leur structure est subhorizontale. Le Moyen Atlas plissé est plus déformé et caractérisé par une succession de longues rides anticlinales et de larges gouttières synclinales (fig. 3).

Les rides, dont l'ossature est constituée des terrains carbonatés du Lias, sont affectées de failles inverses à chevauchantes. A ces grandes lignes d'accidents directionnelles s'ajoutent d'autres qui sont transverses et de direction essentiellement NW-SE. Au niveau des synclinaux, les dépôts sédimentaires atteignent le Jurassique moyen et parfois le Néogène. Les rides peuvent disparaître en montrant des terminaisons périanticlinales. Ceci est bien marqué le long d'une trouée où coulent d'abord l'O. Taghzout, ensuite l'O. Mdez. Des formations argileuses, d'âge triasique, affleurent le long des grandes failles longitudinales et aussi sur les bordures des terrains paléozoïques des boutonnières de Bsabis et la partie orientale du Tazekka. Ces argiles constituant le soubassement imperméables des assises carbonatées du Jurassique. Elles expliquent l'extension des unités hydrogéologiques communicantes et par conséquent l'importance du débit de la source Aïn Sebou.

## 3 *Climat méditerranéen de montagne*

Le climat du Moyen Atlas septentrional est globalement méditerranéen, en raison de ses régimes thermiques et pluviométriques saisonniers. Comparé aux autres montagnes du Maroc, il est généralement mieux arrosé en pluies (certains sommets reçoivent en moyenne de 1.000 à 1.500 mm de pluie annuelle). Mais, vu son contexte globalement karstique les écoulements de surface sont rares et souvent liés à des émergences hydro-karstiques. Les vallées orientales sont beaucoup plus sèches. Le Moyen Atlas connaît des hivers rigoureux, avec un enneigement tenace au-dessus de 2.000 à 2.500 mètres (novembre/avril). Une tendance générale à l'assèchement du Moyen Atlas et ses grandes disparités hydriques internes ont été confirmées par les résultats d'études hydro-climatiques récentes (AKDIM & SARY 2001, NEJJARI 2004, OBDA 2004, AHBS – EC 2007). Les hydro-systèmes notamment karstiques, comme celui de Ain Sebou – Timedrine, Ouamender est important dans ce domaine, vu leurs rôles hydrologiques régulateurs de l'écoulement sur les plans spatial et temporel.

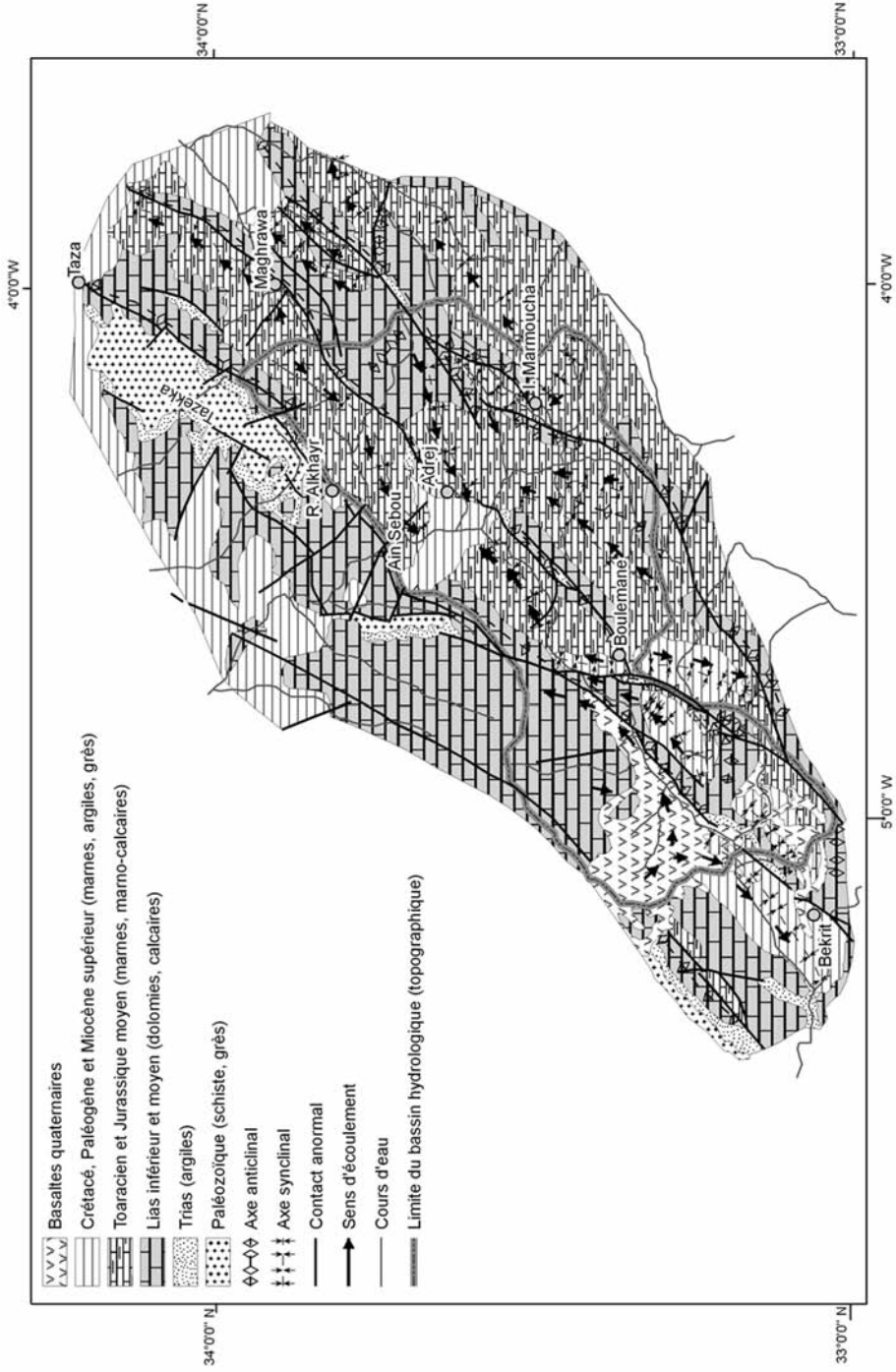


Fig. 2. Schéma structural et direction des écoulements dans l'aquifère.

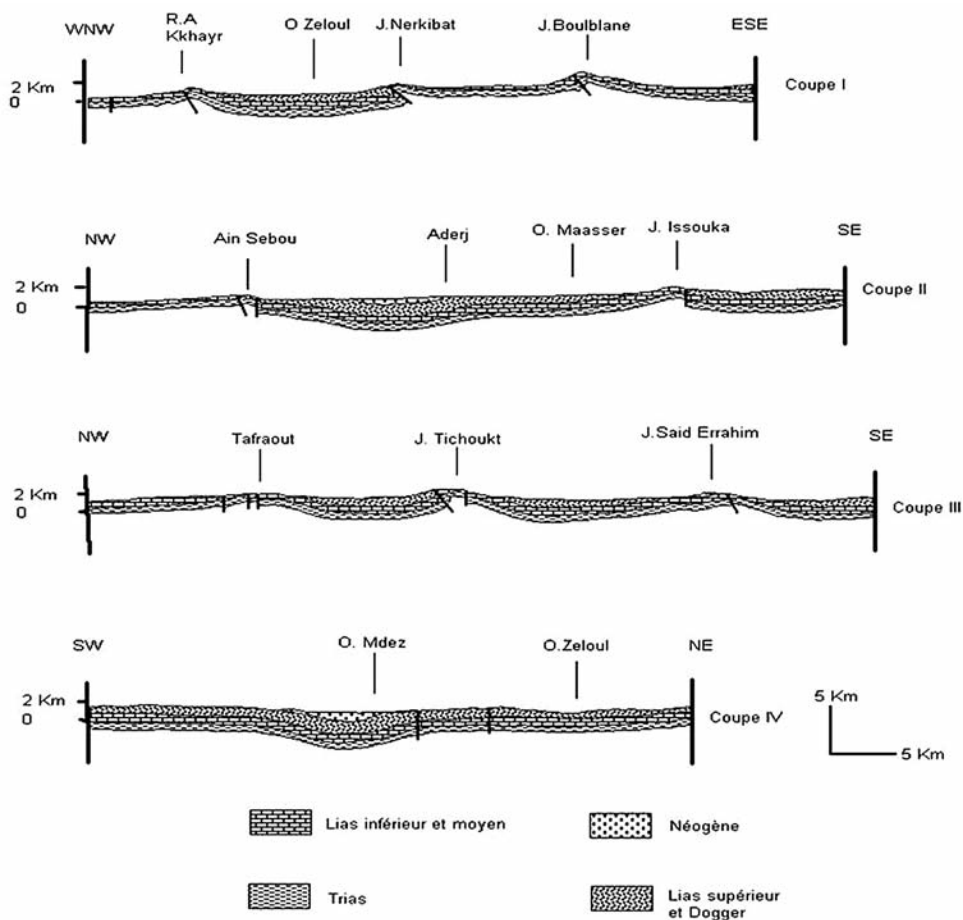


Fig. 3. Coupes géologiques à travers les différentes unités du Moyen Atlas.

### *Méthodes et techniques*

Les problématiques hydrogéologiques en milieu karstique ont été traitées par des méthodes variées comme l'intégration des données de terrain et des modèles numériques (EPTING et al. 2009), des études paléo morphologiques (ex. MARTINI 2005, MOCOCHAIN et al. 2006) et hydrologiques (ex. FIORILLO 2009) et des études basées sur l'analyse et l'interprétation fine des données microscopiques et hydrochimiques (ex. PERRIN et al. 2007). A la lumière des questions soulevées par la problématique d'identification du présent hydrosystème karstique du haut Sebou, plusieurs approches ont été adoptées pour mieux comprendre son fonctionnement. Les approches hydrologique et hydrochimique des eaux des sources et celles des eaux superficielles (eau du Sebou et eaux de ses affluents aux confluences) ont été associées aux analyses morphostructurales et tectoniques pour appréhender ce système. Ceci permet de



mieux comprendre les influences des paramètres géo- karstiques sur l'hydrologie de l'oued Sebou et le fonctionnement général de l'hydrosystème.

Les formes karstiques, surtout superficielles, ont été aussi prises en considération pour appréhender la problématique de l'étude en termes d'infiltration des eaux et d'orientation de l'écoulement. L'agencement des unités, leurs développements et leurs effets par rapport aux nappes, aux réseaux hydro-karstiques et aux sources principales de Aïn Sebou, Timedrine et Ouamender sont des volets abordés dans cette optique d'analyse multidisciplinaire appliquée.

L'approche hydrogéologique a mis l'accent sur la détermination de l'aquifère alimentant ce groupe de sources, son étendue, sa structure, son fonctionnement, ses exutoires et les conditions structurales de son alimentation et de réalimentation.

L'approche hydrologique a été adoptée dans le but de spatialiser les débits et rendements. Plusieurs jaugeages ont été effectués le long de l'oued Sebou en aval et en amont des sources, pour identifier les apports et les influences hydrologiques de ces sources sur l'oued. Ces jaugeages ont été réalisés par l'équipe mixte impliquée dans l'action intégrée franco-marocaine (AI. 1005/95) en utilisant des perches à intégration. Deux campagnes généralisées de jaugeages ont été effectuées. Le secteur séparant les deux stations hydrométriques de Aïn Timedrine et de Azzaba a été appréhendé à travers des jaugeages réalisés dans cinq points supplémentaires, permettant d'évaluer les apports sectoriels spatialisés de oued Zraa, Aïn Tazouta et Boufoul.

Ces approches se sont appuyées sur l'analyse de terrain et des échantillons d'eau et de sédiments analysés au laboratoire ainsi que sur la photo-interprétation et la cartographie appliquée.

## *Résultats analytiques*

### *1 Données hydrologiques*

Le secteur des sources Aïn Sebou, Aïn Timedrine et Aïn Ouamender est le secteur où l'oued Sebou connaît un écoulement relativement plus régulier, en raison des apports hydrologiques issus de ces grosses émergences (tab. 1).

Ce complexe hydrogéologique fournit en période stabilisée plus de la moitié des écoulements de l'oued Sebou. Ces sources amortissent considérablement l'effet des irrégularités habituelles du climat méditerranéen.

Elles soutiennent inlassablement le Sebou en période d'étiage. Cependant, suite à une longue période de sécheresse, Aïn Sebou qui est la source principale, peut connaître le phénomène de siphonage. Il s'en suit des étiages graves à la station de Azzaba en aval, car le gouffre de Aïn Sebou absorbe dans ce cas la presque totalité des eaux de l'oued Sebou provenant de l'amont.

Les résultats des jaugeages réalisés dans le cadre de l'action intégrée franco-marocaine (AI. 1005/95) et poursuivis par OBDA (2004) montrent que la contribution de ce complexe sourcier, dans les écoulements du Sebou est considérable (tab. 2). Elle varie entre 3.515 l/s (67 %) en période de basses eaux et d'étiage (juin 1998) et 6.833 l/s (48 %) en période des hautes eaux (avril-mai 1997).

La comparaison des résultats de jaugeage obtenus en amont du secteur des sources (au site S1 correspondant au Sebou, dans sa confluence avec l'oued Zloul)

permet d'abord de souligner le contraste entre les périodes printanières (avril–mai) montrant des valeurs supérieures à 7.200 l/s et les périodes d'été et d'automne où les débits s'abaissent à environ 1.700 l/s. En comparant ces données avec les résultats obtenus, plus en aval du secteur des sources, dans la station hydrométrique de Time-drine (S5), on observe l'important apport hydrologique de l'hydrosystème des sources karstiques. Celui-ci atteint des valeurs printanières de l'ordre de 24.640 l/s (en 1996) et 13.400 l/s (en 1997). Dans ce site, les débits du Sebou restent soutenus, même en été et en automne, avec des valeurs respectivement égales à 5.000 (1998) et 4.275 l/s (1997). Dans tous les cas, l'apport hydrologique de l'hydrosystème des émergences karstiques permet de doubler le débit de l'oued Sebou et même le tripler en période de hautes eaux.

Tableau 1. Caractéristiques hydrologiques des trois sources.

Nom de la source	Province	N° IRE	Débit Moyen en l/s	Coordon- née X	Coordon- née Y	Douar proche
Aïn Sebou	Sefrou	574/22	2.500	580.300	349.100	Tirza
Aïn Timedrine	Sefrou	573/22	900	578.500	350.350	Mellah Sidi
Aïn Ououmender	Sefrou	615/22	300	578.560	350.000	Mellah Sidi

Tableau 2. Les campagnes des mesures de débits (en l/s) dans l'hydrosystème d'émergence karstique.

Oued	Code de site	A km <sup>2</sup>	27–31 mai 1996	28 avril– 2 mai 1997	22–31 oct 1997	2–26 juin 1998
Mdez amont confluence Zloul	G31		4.628	6.458	1.679	647
Sebou aval confluence Zloul	S1		7.238	7.360	1.764	1.729
Aïn Sebou	S2d		NM	5.375	1.152	2.626
Aïn Ouamender	S3d		114	138	293	305
Aïn Timedrine	S4d		2.573	1.320	476	584
Sebou Station hydro. Timedrine	S5	4.375	24.640	13.400	4.275	5.000
Zrâa	S6g		NM	2	Sec	Sec
Zrâa	S6g1		NM	2	Sec	Sec
Aïn Tazouta	S6g2		28	33	27	37
Boufoul	S7g		NM	1	Sec	Sec
Sebou St. hydro. Azzaba	S8	4.640	26.400	14.400	4.875	4.927



A une échelle spatiale plus fine, la contribution partielle des différentes sources a été analysée à des saisons différentes. Parmi les trois sources principales de cet hydrosystème, Aïn Sebou (S2d) est la plus importante, avec des débits pouvant atteindre 5.375 l/s (cas d'avril 1997). Elle est suivie de Aïn Timedrine (2.573 l/s) et de Aïn Ouamender (305 l/s). Cet ordre de classement est maintenu, malgré les grandes variations temporelles des débits dans ces trois sources.

Les mesures hydrométriques montrent que le régime de l'oued n'est pas influencé. Les apports en eau, survenus dans ce secteur ne sont d'ailleurs pas isolés des influences karstiques de l'amont qui appartient au Causse moyen atlasique. L'alimentation provenant des émergences sous-alluviales est un phénomène bien connu des hydrologues. Ce qui permet ainsi de conclure qu'à partir de la station de Aïn Timedrine, l'oued Sebou a déjà acquis son identité caractéristique. Celle-ci est généralement maintenue jusqu'à la station de Azzaba, juste en amont du Barrage Allal El Fassi. Le rôle de l'hydrosystème des émergences karstiques y a été ainsi fondamental.

## 2 Quelques indicateurs hydrochimiques

Le rôle hydrologique majeur de l'hydrosystème des émergences karstiques ainsi mis en évidence à travers les campagnes de jaugeage a été interpellé par une investigation hydrochimique ciblée.

Plusieurs variables physico-chimiques ont été appréhendées (température, conductivité, ions majeurs, rapport  $Mg^{2+}/Ca^{2+}$ , etc.) dans le but de caractériser les eaux issues de l'hydrosystème des émergences karstiques, en comparaison avec les eaux de surface. Nous voulons en fait, en déduire des informations utiles à la compréhension de son fonctionnement hydrogéologique.

En effet, la comparaison des résultats issus des différentes campagnes de mesure est significative. Elle montre que les eaux souterraines issues de l'hydrosystème des émergences karstiques sont identifiables mais des variations spatiales et temporelles surviennent à ce niveau. La conductivité des eaux de l'oued Sebou change selon les saisons. En période des basses eaux, elle est souvent élevée en amont de l'hydrosystème des émergences karstiques. Puis elle s'abaisse suite aux mélanges d'eau provenant de ces émergences. Les deux campagnes de mesure d'octobre 1997 et juin 1998 confirment ce constat avec des conductivités consécutives de 968 et 717 micro-siemens au Mdez en amont de la confluence avec Zloul et 662, 673 micro-siemens dans les eaux de Aïn Sebou plus en aval. Mais la variation spatiale des conductivités peut changer au printemps. En effet, en avril 1997, la conductivité mesurée en amont (sur le point de jaugeage situé en aval de la confluence entre les oued Zloul et Sebou) enregistre le résultat de 500 micro-siemens. Celui-ci, influencé par la fonte des neiges, est inférieur au résultat de mesure de la conductivité dans les eaux de Aïn Sebou (tab. 3).

Dans tous les cas, la variation spatiale de la conductivité entre l'amont et l'aval change selon la saison. Mais une stabilité remarquable des valeurs de la conductivité s'observe dans les eaux de chacune des trois sources. Bien qu'en les comparant entre elles, Aïn Sebou montre des valeurs généralement inférieures (autours de 600), qui se distinguent des valeurs des sources de Aïn Timedrine et Ouamender (autours de 700).

Dans les eaux de Aïn Sebou, un rapport  $Mg^{2+}/Ca^{2+}$  inférieur à 0.2 a été calculé. Il est identique aux résultats calculés pour ce rapport dans la plupart des sources alimentées par l'aquifère dolomitique et calcaire du Lias dans Moyen Atlas plissé. Tan-

Tableau 3. La température (T °C) et la conductivité des eaux (en  $\mu\text{s/cm}$ ) dans l'hydrosystème des émergences karstiques.

Site	Code	A km <sup>2</sup>	27–31 mai 1996		28 avril–2 mai 1997		22–31 oct. 1997		2–26 juin 1998	
			Cond. T °C		Cond. T °C		Cond. T °C		Cond. T °C	
Mdez amont	G31						968	20.3	717	23.9
confluence Zloul										
Sebou aval	S1				500	20.7	957	20.3	690	24
confluence Zloul										
Aîn Sebou	S2d				605	15	662	15.7	673	15.7
Aîn Ouamender	S3d		700	18.6	808	18	776	18.6	798	18.5
Aîn Timedrine	S4d		687	19.1	806	18.8	768	18.7	792	18.5
Sebou St. hydro.	S5	4.375					806	19.2	709	18
Timedrine										
Zrâa	S6g						Sec	Sec	Sec	Sec
Zrâa	S6g1						Sec	Sec	Sec	Sec
Aîn Tazouta	S6g2		760	17.9			908	18.2	859	17.8
Boufoul	S7g						Sec	Sec	Sec	Sec
Sebou St. hydro.	S8	4.640					733	17.3	572	21.4
Azzaba										

dis que ce rapport est supérieur dans les eaux superficielles et aussi dans les sources dépendant de l'aquifère qui est surtout dolomitique dans le Causse.

### 3 Données géomorphologiques et morphostructurales

Le fonctionnement hydrologique et hydrogéologique traduit par les jaugeages et les caractéristiques hydrochimiques des eaux est influencé par le contexte géomorphologique et morphostructural de l'aire d'étude. L'ensemble de ces données apporte des éléments pertinents pour la compréhension de l'hydrosystème.

Avec une orientation perpendiculaire aux structures générales de la chaîne, le tracé de l'oued Sebou dans ce secteur, passe du Moyen Atlas plissé pour entrer dans le Causse. Ce passage se fait au niveau d'une cluse incisée dans une ride anticlinale qui fait apparaître des terrains carbonatés du Lias moyen.

A l'aval, l'oued Sebou traverse le Causse sous forme d'un canyon profond où il incise la totalité de la série carbonatée jurassique et des basaltes altérés du Trias. Le tracé du Sebou dans ce secteur est bien décrit par MARTIN (1981) qui rapporte que l'oued «recoupe en plusieurs unités structurales, le pli cassé du J. Tizi-n-Zid et du J. Bou-Zerzère; il longe le bassin synclinal de l'Oued Zraa, avant de recouper par des percées obséquentes les panneaux basculés du Jbel Lechraf et du J. Lemdik. Ce cours épigénique du Sebou s'explique, comme il est fréquent, à la fois par surimposition et par antécédence. Les mouvements tectoniques verticaux sont responsables de l'enfoncement antécédent du Sebou. La vallée s'est incisée sur le tracé d'accidents transversaux». Dans le détail, l'analyse du tracé de l'oued dans cette partie du causse est

clairement une association d'une multitude de segments de direction tantôt NE-SW et tantôt NW-SE. La succession de ces segments est reconnue à l'échelle à la fois métrique à décimétrique et cartographique (carte topographique d'El Menzel au 50.000). Ces deux directions correspondent aux deux familles de failles qui affectent le Causse (CHARRIÈRE 1989, SABAOU 1998). Ainsi, le tracé de l'oued a clairement été guidé par le réseau de fracturation qui est le facteur initial de la karstification.

Ce complexe d'émergences du Sebou est situé au voisinage et du côté SE de l'accident nord moyen atlasique qui sépare le Moyen Atlas tabulaire et le Moyen Atlas plissé. Dans ce secteur, d'autres accidents transverses ont été identifiés. La coupe géologique tirée de la carte géologique de Sefrou et les coupes géologiques (fig. 2), montrent le pli anticlinal séparant le causse et le Moyen Atlas plissé. Sur son flanc SE apparaissent les couches réservoir du Lias de nature carbonaté. Les couches argileuses du Trias constituent le cœur du pli et font barrage aux roches réservoirs karstifiées. De ce fait, les eaux souterraines émergent sous forme de grosses sources dans ce secteur. En effet, toutes ces émergences sont situées, sur la rive droite, dans la profonde vallée du Sebou. Aïn Sebou, située dans le lit de l'oued, jaillit à travers un profond puits, qui draine le réseau karstique suivant l'orientation des failles. Le recoupement de la nappe karstique est dû à l'encaissement de la vallée. Celui-ci est favorisé par les accidents transversaux. Ces sources drainent donc, la nappe encaissante dans les roches carbonatées aux points de recoupement de la nappe par la surface topographique de la vallée de Sebou.

### *Discussion et interprétation*

#### 1 *Spécificité hydrologique du complexe sourcier de Sebou dans un contexte hydro-karstique*

Les résultats de l'analyse hydrologique ont permis de souligner l'importance des sources Aïn Sebou, Aïn Ouamender et Aïn Tïmedrine, pour comprendre le fonctionnement hydrologique de l'oued Sebou. Leur effet principal se traduit à travers la pérennité de l'écoulement qu'elles assurent et sa pondération. Ces émergences soutiennent et atténuent la profondeur des étiages sauf en cas d'événements accidentels provoqués par le siphonage de la source de Aïn Sebou.

L'importance du débit de ces sources et la constance de la conductivité de leurs eaux les différencient des eaux superficielles de Oued Sebou et de ces affluents. Ainsi, ces caractéristiques ne peuvent être expliquées que par une alimentation dépendante d'un aquifère souterrain de grande capacité et de type karstique.

Selon les différentes hypothèses avancées jusqu'ici, l'alimentation des sources karstiques se fait par l'alimentation issue des sous bassins du Haut Sebou. D'après NICOD (1993), ces eaux proviennent de la nappe dolomitique du Causse (rive gauche). En se basant sur la différence de la lame d'eau précipitée et de la lame d'eau écoulée, NEJJARI (2002) rattache aussi cette source à l'alimentation de la rive gauche de l'oued c'est-à-dire au Causse. EL KHALKI (1990), quant à lui, suppose une alimentation à partir des reliefs de Bou Iblane. Si tous les auteurs sont d'accord sur le rôle que jouent les carbonates liasiques dans l'infiltration des eaux pluviales qu'ils drainent pour alimenter des réservoirs souterrains, les affleurements des massifs carbonatés signalés par les divers auteurs sont très réduits et non argumentés. Pour cela, l'ensemble des

affleurements impliqués dans l'alimentation d'un réservoir karstique doit être cherché sur une superficie plus grande et concernant plusieurs autres massifs.

## 2 *Circulation souterraine sous dépendance morphostructurale, tectonique et lithologique*

L'avancement des connaissances géologiques et morphostructurales, dans la région d'étude, permet de mieux appréhender l'extension de l'impluvium du complexe sourcier de Sebou à travers l'analyse de l'architecture des formations géologiques et les unités principales du système aquifère. Celui-ci correspond aux formations carbonatées du Lias inférieur et moyen qui constituent un aquifère de type karstique et fissural reposant sur la formation imperméable du Trias.

Si les limites du bassin hydrologique (ou lignes de partage des eaux) du Haut Sebou sont bien connues, celles de son bassin hydrogéologique restent encore mal définies. Vraisemblablement, dans la région du Sud et du Sud-Est de Timahdit (synclinaux de Bekrit, de Aïn Nokra, et Bou Angar), une partie des précipitations recueillies sur ces versants est détournée par le réseau souterrain pour alimenter le réservoir d'Oum Rbia (BEN TAYEB & LECLERC 1977). De ce fait, cette partie serait exclue du bassin d'alimentation de l'aquifère responsable des sources de Sebou, Timedrine et Ouamander. Des études détaillées de divers ordres (structurale, forage, géophysique) peuvent apporter des données précises sur la géométrie de la formation argileuse et imperméable du Trias sous-jacentes aux carbonates liasiques. Ce type d'analyse combiné à la méthode de traçage artificiel permet de préciser avec précision ce bassin hydrogéologique.

La structure de ce bassin, qui se situe dans le Moyen Atlas plissé correspond à une succession de rides anticlinales et de gouttières synclinales de direction générale NE-SW. Les rides montrent essentiellement des terrains dolomitiques et calcaires du Lias inférieur à moyen. En zones synclinales, la série sédimentaire atteint le Jurassique moyen qui est à dominante marno-calcaire à marneuse. Dans la dépression de Mdez, qui a connu une phase d'affaissement au Miocène supérieur, le jurassique est surmonté par plusieurs centaines de mètres de dépôts marins d'âge Miocène supérieur. A l'exception de la première ride anticlinale, qui sépare de façon continue le Causse et le Moyen Atlas plissé, les autres rides montrent des terminaisons périanticlinales de part et d'autre d'une ligne de direction NE-SW coïncidant avec le tracé des oueds Taghzout et Mdez. Les axes des plis, aussi bien anticlinaux que synclinaux, montrent un faible plongement vers le centre de la dépression de Mdez, en bordure de laquelle apparaissent les émergences karstiques. La formation argileuse du Trias, sous-jacente aux formations carbonatées du Lias, constitue une semelle imperméable et donc un obstacle hydrogéologique.

Au niveau d'une même ride anticlinale, ces argiles forment un écran imperméable empêchant tout écoulement d'un flanc à l'autre.

L'ensemble de ces dispositifs géométriques et structuraux favorise la formation d'un aquifère karstique guidant l'écoulement des eaux souterraines pour converger très progressivement vers le secteur de Mdez. Celui-ci est limité au NW par la ride anticlinale séparant le Causse et le Moyen Atlas plissé. Cette ride anticlinale dont l'intrados est constitué d'argiles triasiques empêche l'écoulement souterrain dans les deux sens entre le Causse au NW et le Moyen Atlas plissé au SE. D'ailleurs, l'analyse chimique des eaux de la source Aïn Sebou montre un rapport  $Mg^{2+}/Ca^{2+}$  inférieur à 0.2. Ce chiffre

traduit un bassin d'alimentation essentiellement calcaire. Alors que sur le Causse (source de Tazouta), où il y a dominance des dolomies, ce rapport est supérieur à 1.

Les sources de A. Sebou apparaissent au sein des terrains carbonatés du Lias moyen sur le flanc SE de cette ride anticlinale. L'affleurement de ces carbonates se situe à une altitude de 700 m correspondant à la valeur la plus basse à l'échelle du bassin du Haut Sebou en amont de Ain Sebou.

La présence principalement de deux familles de failles (NE-SW et NW-SE) aurait vraisemblablement contribué au drainage des eaux souterraines selon un réseau propice à la karstification en favorisant deux principales directions des conduits souterrains. La nature profonde de l'aquifère dans le bassin de Sebou ne permet confirmer cette idée. Dans la partie septentrionale du Moyen Atlas, drainé par oued Inaouène, au S de Taza, où l'aquifère liasique est en surface, nous constatons une nette concordance entre les directions principales de la fracturation (ROBILLARD 1981) et des galeries souterraines qui sont au nombre de plusieurs dizaines (Direction de l'hydraulique de RABAT 1981). A cela s'ajoute l'influence des fractures sur le tracé du lit de oued Sebou dans le causse en aval de Ain Sebou

L'alimentation du groupe de sources, est assurée par l'aquifère karstique, qui reçoit surtout les eaux infiltrées à sa surface sur les différents massifs carbonatés affleurant sur la majorité des grandes crêtes et rides anticlinales. La karstification de cette assise carbonatée qui se continue actuellement, aurait débuté au Jurassique moyen car la plus grande partie de ces rides étaient déjà individualisée. La quantité d'eau infiltrée, qui peut atteindre jusqu'à 40% du taux précipité, doit être plus importante sur les sommets qui connaissent un enneigement saisonnier relativement durable Bou-Iblane, Ich Nerkibat, Azrou Ouassès, Tichoukt, Ich Azzouz. Dans les dépressions synclinales, l'aquifère liasique est recouvert par d'autres formations géologiques imperméable à peu perméables du Lias supérieur, du Jurassique moyen et parfois du Miocène supérieur. De ce fait, cet aquifère se trouve alors sous une certaine pression qui a tendance à faire resurgir ses eaux au niveau des sources de A. Sebou à travers un réseau karstique complexe. En plus de cette disposition structurale et topographique ce réseau karstique est aussi dirigé par l'existence de lignes de cheminement, aménagés au niveau des plans de failles transverses (NW-SE) qui traversent la cluse de Ain Sebou et qui sont propices à la karstification. Bien que ces failles affectent la ride séparant le Causse et le Moyen Atlas plissé, la présence des argiles triasiques constituent une barrière infranchissable par les eaux de l'aquifère responsables des résurgences karstiques.

Il n'est pas exclu que dans l'ensemble du bassin qui alimente le réservoir aquifère une infiltration, mais de moindre importance, aurait lieu à travers les formations sus-jacentes aux carbonates liasiques. Ceci est rendu possible par la présence de roches à faciès essentiellement marneux et calcaireux et aussi de la fracturation tectonique plus ou moins élargies par la dissolution.

L'alimentation du groupe de sources karstique, est assurée à la fois sous l'effet de la pesanteur, qui permet à l'eau souterraine de s'écouler comme le fait l'eau de surface. Le freinage produit par le frottement dans les pores des roches carbonatées fait durer le phénomène de plusieurs mois parfois à quelques années. A cette lenteur peut contribuer aussi la dénivelée importante entre la profondeur de la semelle imperméable de l'aquifère et le niveau des émergences karstiques. En effet ce dénivelée, qui peut atteindre, par exemple dans la dépression de Mdez, jusqu'à plusieurs milliers de

mètres, favorise un colmatage du réseau profond par les carbonates dissous et aussi des argiles et des détritiques résiduels.

L'homothermie des eaux des sources prouve l'importance de ces réserves karstiques et une organisation karstique permettant circulation lente de l'eau à travers des fissures et interstices (BAKALOWICZ 1974, HAKIM 1982, AKDIM 1991, EL KHALKI 1990, MARTIN 1993). La température faible des eaux d'Aïn Sebou reste autour de 15°C et révèle l'importance des massifs enneigés plusieurs mois par ans dans l'alimentation du réservoir.

### 3 *Le siphonage fonctionne en période de fort étiage à Aïn Sebou*

Le système karstique souterrain est bien développé dans ce domaine et assure souvent la pondération du régime, car la réalimentation des nappes devient la règle dans un système aux composantes karstiques et tectoniques communicantes. Mais en période de sécheresse régionale prolongée, comme en 1995, la source tarie. Sa position dans le talweg lui permet alors de soutirer les eaux superficielles provenant d'amont. Le siphonage alors fonctionne.

C'est un phénomène bien connu en hydrologie karstique dans d'autres régions du monde. Il a été décrit depuis longtemps, dans de nombreux domaines karstiques (CORBEL 1952, LINHUA 1985, WHITE 1988, FORD & WILLIAMS 1989, BONACCI & BOJANIC 1991, JEANNIN 1996, KOMATINA & KOMATINA-PETROVIC 2003, BAILLY-COMTE 2009). Il permet en période d'étiage d'inverser le sens de l'écoulement des émergences karstiques. Il contribue à expliquer le fonctionnement hydrologique de Aïn Sebou. D'habitude, la source draine un débit très important, illustrant l'énorme bassin d'alimentation et les apports hydriques lointains par le biais de failles et d'autres manifestations morphotectoniques, mais en période de fort étiage elle tarit et commence à absorber les eaux de surface au fur et à mesure que le niveau piézométrique baisse.

La faible pression des eaux souterraines et l'abaissement des niveaux de nappes permettent aux eaux de surface d'entrer par le biais du gouffre profond qui caractérise la source. Le site de Aïn Sebou se transforme dans ces conditions, d'un site émissif en ponor. C'est un mode de recharge de la nappe phréatique à partir des eaux de l'oued. Cette situation a été souvent observée en périodes de sécheresse régionale accrue. L'évolution parfois brutale de la source de Aïn Sebou, qui se transforme d'un exutoire (émissif) à un ponor karstique absorbant une partie des eaux de l'oued Mdez par le phénomène de siphonage est donc notée après la succession de plusieurs années de sécheresse. C'est le cas par exemple de sécheresse des années quatre vingt du dernier siècle. Le lien est très fort entre les eaux souterraines et les eaux de surface dans ce système à siphonage. Les effets hydrologiques des pertes induites par le siphonage à Aïn Sebou deviennent clairement visibles dans le régime de l'oued Sebou en aval de la source.

### *Conclusion*

Le complexe sourcier de Sebou, Timedrine et Ouamender assurent la pérennité et la pondération du régime du Haut Sebou en amont de la station d'Azzaba. En l'état actuel des connaissances, les arguments structuraux, morphologiques, lithologiques, géochimique et hydrologiques nous permettent de montrer que l'alimentation du



groupe de sources de Sebou, est assurée par un aquifère karstique liasique très important. Ce système karstique reçoit les eaux infiltrées sur une surface nettement plus étendue que ce qui est admis jusqu'ici. Cet aquifère karstique, qui est libre dans les rides anticlinales, serait noyé dans les synclinaux au moins au niveau de la cuvette de Mdez qui montre dans sa bordure NW les émergences karstiques sous l'influence des facteurs surtout topographique et morphostructural.

Parmi les trois sources étudiées, Aïn Sebou s'individualise en période de fort étiage par son système de siphonage influençant clairement le débit de fort étiage de l'oued. Les deux autres sources plus en aval, ont un écoulement plutôt régulier.

Malgré ces résultats essentiellement axés sur les liens entre système karstique et eaux de surface, plusieurs questions restent posées sur ce système karstique car son extension et ses limites précises (notamment avec le bassin hydrogéologique de l'Oum Rbia) sont encore discutables. L'évaluation de l'importance des infiltrations aux niveaux des affleurements carbonatés du Lias et la délimitation des zones noyées ainsi que l'importance des réserves de l'aquifère et l'impact de son exploitation éventuelle dans l'avenir sur les sources karstiques nécessitent davantage d'analyses. Des investigations complexes et plus étendues dans le temps peuvent apporter plus de détail sur ce système. Elles doivent faire appel à la géophysique, aux forages comme sites d'essais et de traçages, aux études hydrodynamiques et géochimiques par exemple.

### Remerciements

Nous remercions les évaluateurs anonymes de la revue *Zeitschrift fur Geomorphologie*. Le soutien financier du comité Marocco-Français pour l'action intégrée 1005/95 a été bénéfique ainsi que le soutien de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques (contrat de recherche avec le réseau RELOR). Le projet a également bénéficié des soutiens financiers du CNRST (subvention accordée au réseau RELOR, à l'URAC54 et au projet SHS 2011/03). Le soutien financier apporté au LAGEA par l'Université Sidi Mohamed Ben Abdellah est apprécié.

### Bibliographie

- AHBS – EC 2007. State of the art of the Sebou basin in the frame of pilot establishment of WFD tools. Science-Policy interfacing in support of the water framework directive implementation SPI-Wate, contract no.044357. Deliverable 20b. Description Of The Selected Non-EU River, Basin Sebou (Morocco). Project co-funded by the European Commission within the Sixth Framework Programme (2002–2006).
- AKDIM, B. & SARY, M. (2001): La sécheresse hydrologique récente dans le bassin du Haut Sebou (Moyen Atlas, Maroc). – *Mosella* **25**(3–4): 71–84.
- AMRAOUI, F., RAZACK, M. & BOUCHAOU, L. (2004): Comportement d'une source karstique soumise à une sécheresse prolongée: la source Bittit (Maroc). – *C. R. Geoscience* **336**: 1099–1109.
- BAILLY-COMTE, V., JOURDE, H. & PISTRE, S. (2009): Conceptualization and classification of groundwater–surface water hydrodynamic interactions in karst watersheds: Case of the karst watershed of the Coulazou River (Southern France). – *J. of Hydrol.* **376**: 456–462.
- BÔGLI, A. (1980): *Karst Hydrology and Physical Speleology*. – Springer Verlag, Berlin.
- BONACCI, O. & BOJANIC, D. (1991): Rhythmic karst springs. – *Hydrological Sci. J.* **36**: 35–47.
- BOUCHAOU, L. & GAÏZ, A. (1990): Karst de l'Atlas de Beni Mellal: expérience de traçage. – *Eaux et dév.* **9**: 75–85.

- CORBEL, J. (1952): Travaux russes sur le karst. – *Annales de Géographie* **61**: 327: 377–378.
- Direction de l'Hydraulique de Rabat DRH (1977): Ressources en eau du Maroc. Tome III, Notes et Mémoires du Service géologique, Rabat, no. 231.
- Direction de l'Hydraulique de Rabat DRH (1981): Inventaire spéléologique du Maroc, (rapport inédit), 230 p.
- EL KAHLKI, Y. & HAFID, A. (2001): Contribution à l'étude hydrologique de quelques sources karstiques du Moyen Atlas: Ain Timedrine – Ouamender. – *Mosella* **25**: 153–164.
- EL KHALKI, Y. (1990): Etudes hydro-géomorphologiques au Haut Sebou. – Thèse de l'Université d'Aix-Marseille II.
- EPTING, J., ROMANOV, D., HUGGENBERGER, P. & KAUFMANN, G. (2009): Integrating field and numerical modeling methods for applied urban karst hydrogeology. – *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **13**: 1163–1184.
- FIORILLO, F. (2009): Spring hydrographs as indicators of droughts in a karst environment. – *J. of Hydrol.* **373**: 290–301.
- FORD, D.C. & WILLIAMS, P.W. (1989): *Karst Geomorphology and Hydrology*. – Unwin Hyman, London, UK.
- HAKIM, B. (1985): Recherches hydrologiques et hydrochimiques sur quelques karsts méditerranéens: Liban, Syrie et Maroc. – Thèse d'Etat, Aix-Marseille II, Beyrouth, 3 volumes, 560 p.
- JEANNIN, P.-Y. (1996): Structure et comportement hydraulique des aquifères karstiques. – Thèse Sciences, Université de Neuchâtel, 237 p.
- KOMATINA, M. & KOMATINA-PETROVIC, S. (2003): Some approaches to groundwater regulation in karst terrains. – *Mat. Geoenv.* **50**: 160–172.
- LAGEA-CEGUM (2001): Eaux et sociétés dans les montagnes du Maroc et des pays voisin. – Colloque international organisé à l'issue du projet AI-1005/95. *Mosella* **25**: 3–4.
- LATATI, A. (1988): Ressources en eau karstiques du Moyen Atlas. – *Eau et développement* **1**: 16–27.
- LINHUA, S. (1985): Evolution of Karst geomorphology and hydrogeology in South Dushan, Guizhou Province, China. – *Ann. Soc. Géol. Belg.* **108**: 227–231.
- MANGIN, A. (1982): Mise en évidence de la diversité des aquifères karstiques. – Colloque Hydrologie des pays calcaires, Univ. Besançon, *Géol. Mém.* **1**: 159–172.
- MARTIN, J. (1981): Le Moyen Atlas septentrional: étude géomorphologique. – *Mém. S. Géol., Rabat* **258**, 445 p.
- MARTINI, J. (2005): Étude des paléokarsts des environs de Saint-Remèze (Ardèche, France): mise en évidence d'une rivière souterraine fossilisée durant la crise de salinité messinienne. – *Karstologia* **45–46**: 1–18.
- MOCOCHAIN, L., BIGOT, J. Y., CLAUZON, G., FAVERJON, M. & BRUNET, P. (2006): La grotte de Saint-Marcel (Ardèche): un référentiel pour l'évolution des endokarsts méditerranéens depuis 6 Ma. – *Karstologia* **48**: 33–50.
- NEJJARI, A. (2004): La Sécheresse, l'eau et l'homme dans le Bassin Versant du Haut Sebou (Moyen Atlas Septentrional – Maroc). – Thèse de doctorat, CEGUM, Université de Metz, 350 p.
- NICOD, J. (1991): Du nouveau sur la Fontaine de Vaucluse et son karst. – *Annales de Géographie*, **100**, **559**: 333–339.
- OBDA KH, G.E. & AKDIM, B. (2001): Application de la méthodologie des profils hydrologiques dans la gestion des ressources en eau: cas des oueds Zloul (Moyen Atlas) et Nekor (Rif central). – *Mosella* **25**(3–4): 109–120.
- OROZCO, M., POCH, R. M., BATALLA, J. & BALASCH, J. C. (2006): Hydrochemical budget of a Mediterranean mountain basin in relation to land use (The Ribera Salada, Catalan Pre-Pyrenees, NE Spain). – *Z. Geomorph. N. F.* **50**(1): 77–94.
- PERRIN, J., JEANNIN, P.-Y. & CORNATON, F. (2007): The role of tributary mixing in chemical variations at a karst spring, Milandre, Switzerland. – *J. of Hydrol.* **332**: 158–173.

- ROBILLARD, D. (1978): Etude structurale du Moyen Atlas septentrional (région de Taza, Maroc). – Thèse 3<sup>e</sup> cycle, Lille, 178 p.
- SABAOU, A. (1998): Rôles des inversions dans l'évolution méso-cénozoïque du Moyen Atlas septentrional (Maroc). L'exemple de la transversale El Menzel – Riabt Al Khayr – Bou Iblane. – Thèse d'Etat, Rabat, 432 p.
- SCHMITT, L., MAIRE, G. & HUMBERT, J. (2001): La puissance fluviale: définition, intérêt et limites pour une typologie hydro-géomorphologique de rivières. – Z. Geomorph. N. F. **45**: 201–224.
- WHITE, W.B. (1988): Geomorphology and Hydrology of Karst Terrains. – Oxford Univ. Press, New York, USA.
- ZERYOUHI, I. (1977): Le Moyen Atlas plissé. Ressources en Eau du Maroc, T3. – Notes et Mém. du Serv. Géol. Maroc. **231**: 67–84.

Manuscript received: June 2011; accepted: August 2011.

Adresses des auteurs: Brahim Akdim, Mhamed Amyay, Mohamed Laouane, Khalid Obda, Université Sidi Mohamed Ben Abdellah, FLS, LAGEA (URAC 54), Fès, Maroc. E-Mail pour correspondances: akdimbrahim@yahoo.fr – Abdellah Sabaoui, Université Sidi Mohammed Ben Abdellah, FSDM, Géologie, Fès, Maroc – Emmanuel Gille, Université Paul Verlaine, CEGUM, Géographie, Metz, France.

