

Caractérisation hydrodynamique des sources karstiques : cas de la source de Ras El Maa (Rif Septentrional, Maroc)
Hydrodynamic characterization of karst springs: case of Ras El Maa Spring (Northern Rif, Morocco)

Rabie El Bardai, Kamal Targuisti and Khadija Aluni

Volume 27, Number 2, 2014

URI: <https://id.erudit.org/iderudit/1025564ar>

DOI: <https://doi.org/10.7202/1025564ar>

[See table of contents](#)

Publisher(s)

Université du Québec - INRS-Eau, Terre et Environnement (INRS-ETE)

ISSN

1718-8598 (digital)

[Explore this journal](#)

Cite this article

El Bardai, R., Targuisti, K. & Aluni, K. (2014). Caractérisation hydrodynamique des sources karstiques : cas de la source de Ras El Maa (Rif Septentrional, Maroc). *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 27(2), 139–153. <https://doi.org/10.7202/1025564ar>

Article abstract

In Morocco, the issue of water resources arises with clarity. In the 1960s, the Moroccan state adopted a strategy for the development and protection of this valuable resource. However, difficulties in water management increased as a result of demographic pressure on water resources, leading to problems of water scarcity in many areas of the Kingdom, especially in low-rainfall areas. The main objective of this study was to obtain a better knowledge of the hydrodynamic functioning of the karst aquifers that are found southeast of the city of Chefchaouen (northern Morocco). In this region, the karst groundwater is important for drinking water supply and irrigation. From the hydrogeological point of view, the karstic springs that are the subject of this study have considerable flows, which can exceed the $100 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ during flood periods. Aquifer recharge occurs primarily by rainwater and to some extent by snowmelt in the mountain peaks (for example the peak of Jbel Lakraa at 2,159 m, and that of Jbel Tissouka at 2,122 m). The springs with the greatest flow occur at the lower altitudes, especially at the dorsal-flysch contacts.

The hydrodynamic functioning of the Ras El Maa, Maggo and Chrafate springs showed a very inertial, poorly drained and poorly karstified system. The Maggo springs present a very high recession coefficient, which is likely due to the presence of karstic cavities in the Jbel Lakraa massif. The total volume of the groundwater reserves, obtained from the recession curves of the four springs, is approximately 10 million m^3 . Nevertheless the dynamic volumes from the Ras El Maa spring alone constitute 5 million m^3 .

CARACTÉRISATION HYDRODYNAMIQUE DES SOURCES KARSTIQUES : CAS DE LA SOURCE DE RAS EL MAA (RIF SEPTENTRIONAL, MAROC)

Hydrodynamic characterization of karst springs: case of Ras El Maa Spring (Northern Rif, Morocco)

RABIE EL BARDAI^{*}, KAMAL TARGUISTI[†] et KHADIJA ALUNI[†]

[†]Laboratoire de Géologie de l'Environnement et Ressources Naturelles,
Faculté des Sciences, Université Abdelmalek Essaâdi, B.P. 2121, Tétouan, Maroc

Reçu le 14 juillet 2013, accepté le 13 décembre 2013

RÉSUMÉ

Au Maroc, la question des ressources en eaux se pose avec acuité. L'état marocain a adopté, dès les années soixante, une stratégie de maîtrise et de valorisation de cette précieuse ressource. Cependant, des difficultés dans la gestion de l'eau ont augmenté suite à la pression démographique sur cette ressource, raison pour laquelle les problèmes de pénurie d'eau apparaissent dans plusieurs secteurs de Royaume, surtout ceux qui connaissent des apports pluviométriques très bas.

L'objectif prioritaire de cette étude était d'obtenir une meilleure connaissance du fonctionnement hydraulique des aquifères karstiques qui se trouvent au sud-est de la ville de Chefchaouen au nord du Maroc. Dans cette région, les eaux souterraines d'origine karstique jouent un rôle capital dans l'approvisionnement en eau potable et pour l'irrigation.

Du point de vue hydrogéologique, la région étudiée renferme des sources karstiques de grande importance, avec des débits qui dépassent $100 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ dans les périodes de crue. La recharge de la nappe se fait essentiellement par les eaux de pluie et par la fonte des neiges des sommets des montagnes (par exemple, la crête du Jbel Lakraâ à 2 159 m et celle de Jbel

Tissouka à 2 122 m). Les sources à gros débit émergent en basse altitude, surtout au niveau des contacts dorsale-flysch.

Le fonctionnement hydrodynamique des sources de Ras El Maa et Chrafate montre la présence d'un système très inertiel, mal drainé et peu karstifié. Pourtant, les sources de Maggo présentent un coefficient de tarissement très élevé traduisant un système peu inertiel lié particulièrement à la présence de plusieurs gouffres dans le massif de Jbel Lakraâ. Le volume total des réserves obtenu à partir des courbes de récession des quatre sources est d'environ 10 millions m^3 , pourtant les volumes dynamiques issus de la source de Ras El Maa constituent à eux seuls 5 millions de m^3 .

MOTS CLÉS : *karst, hydrogramme, courbes de récession, analyse spectrale et corrélateur, Rif*

ABSTRACT

In Morocco, the issue of water resources arises with clarity. In the 1960s, the Moroccan state adopted a strategy for the development and protection of this valuable resource.

However, difficulties in water management increased as a result of demographic pressure on water resources, leading to problems of water scarcity in many areas of the Kingdom, especially in low-rainfall areas. The main objective of this study was to obtain a better knowledge of the hydrodynamic functioning of the karst aquifers that are found southeast of the city of Chefchaouen (northern Morocco). In this region, the karst groundwater is important for drinking water supply and irrigation. From the hydrogeological point of view, the karstic springs that are the subject of this study have considerable flows, which can exceed the $100 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ during flood periods. Aquifer recharge occurs primarily by rainwater and to some extent by snowmelt in the mountain peaks (for example the peak of Jbel Lakraâ at 2,159 m, and that of Jbel Tissouka at 2,122 m). The springs with the greatest flow occur at the lower altitudes, especially at the dorsal-flysch contacts.

The hydrodynamic functioning of the Ras El Maa, Maggo and Chrafate springs showed a very inertial, poorly drained and poorly karstified system. The Maggo springs present a very high recession coefficient, which is likely due to the presence of karstic cavities in the Jbel Lakraâ massif. The total volume of the groundwater reserves, obtained from the recession curves of the four springs, is approximately 10 million m^3 . Nevertheless the dynamic volumes from the Ras El Maa spring alone constitute 5 million m^3 .

Key words: karst, spring hydrograph, recession curves, correlation, spectral analyses, Rif.

1. INTRODUCTION

Dans la province de Chefchaouen, les eaux souterraines provenant des aquifères carbonatés constituent le plus important réservoir d'eau du Rif Septentrional, assurant par conséquent l'approvisionnement en eau potable et pour l'irrigation de toute la population montagnaise. Les volumes des réserves hydriques obtenus à partir des courbes de récession des sources de Ras El Maa, Maggo et Chrafate sont estimés à plus de 10 millions de m^3 (EL BARDAI, 2010). Ce type de karst, encore très peu ou pas du tout exploité de manière active, n'a pas fait jusqu'à présent l'objet d'études très exhaustives permettant d'appréhender son fonctionnement hydrodynamique, à l'exception de quelques rapports inédits de l'Agence de Bassin Hydraulique de Loukkos (ABHL) et du travail d'AMRAOUI (1988).

Ainsi, plusieurs méthodes et approches ont été utilisées pour l'étude du fonctionnement hydrodynamique de ces systèmes karstiques, telles que l'analyse des hydrogrammes, l'analyse des courbes de récession et la classification dérivée selon MANGIN (1975), et les analyses corrélatoires et spectrales simples et croisées. Le principe de base de ces méthodes est d'assimiler le système karstique à un filtre qui laisse plus ou moins passer l'information contenue dans un signal d'entrée. La méthode consiste donc à analyser et à comparer les signaux d'entrée (précipitations) et de sortie (débit aux exutoires) du système (BAKALOWICZ, 1979). Autrement dit, un système qui possède une mémoire plus ou moins longue des entrées est alors plus ou moins inertiel (MARSAUD, 1997). Les chroniques des signaux d'entrée et de sortie peuvent être traitées séparément dans le domaine temporel (analyse corrélatoire simple) ou dans le domaine fréquentiel (spectre de densité simple) ou bien l'un par rapport à l'autre (analyse corrélatoire et spectrale croisée).

1.1 Situation géographique et contexte géologique

La région étudiée fait partie du domaine interne de la chaîne rifaine septentrionale. Elle appartient plus précisément à la dorsale calcaire externe située, d'une part, entre l'oued Laou et l'accident Jebha-Chrafate et, d'autre part, à l'ouest de l'accident du Jbel Lakraâ (Figure 1). Elle est subdivisée en trois unités fondamentales (Figure 2) qui correspondent à l'unité de Jbel Tissouka, l'unité de Jbel Lakraâ et l'unité de Jbel Bouslimane, appartenant toutes trois à la dorsale externe.

Les différentes unités géologiques se trouvent empilées en nappes et en écaillés à contacts anormaux et à pendage vers l'ouest (NOLD *et al.*, 1981). Elles sont séparées du massif du Jbel Tazout par l'accident du Jbel Lakraâ, orienté NO-SE. Le secteur d'étude présente à l'affleurement des terrains d'âge allant du Trias supérieur au Quaternaire (Figure 3).

En allant des formations plus anciennes vers les formations les plus récentes, (NOLD *et al.*, 1981) on décrit :

- des dolomies à stromatolithes et membres des marno-calcaires : il s'agit d'une formation du Trias supérieur dont l'épaisseur varie de quelques dizaines de mètres jusqu'à 900 m;
- des alternances calcaréo-dolomitiques d'âge Rhétien avec une épaisseur qui varie de 80 à 300 m;
- des formations carbonatées massives calcaires et/ou dolomitiques selon l'affleurement considéré. Leur attribution à l'Hettangien n'est pas strictement établie;

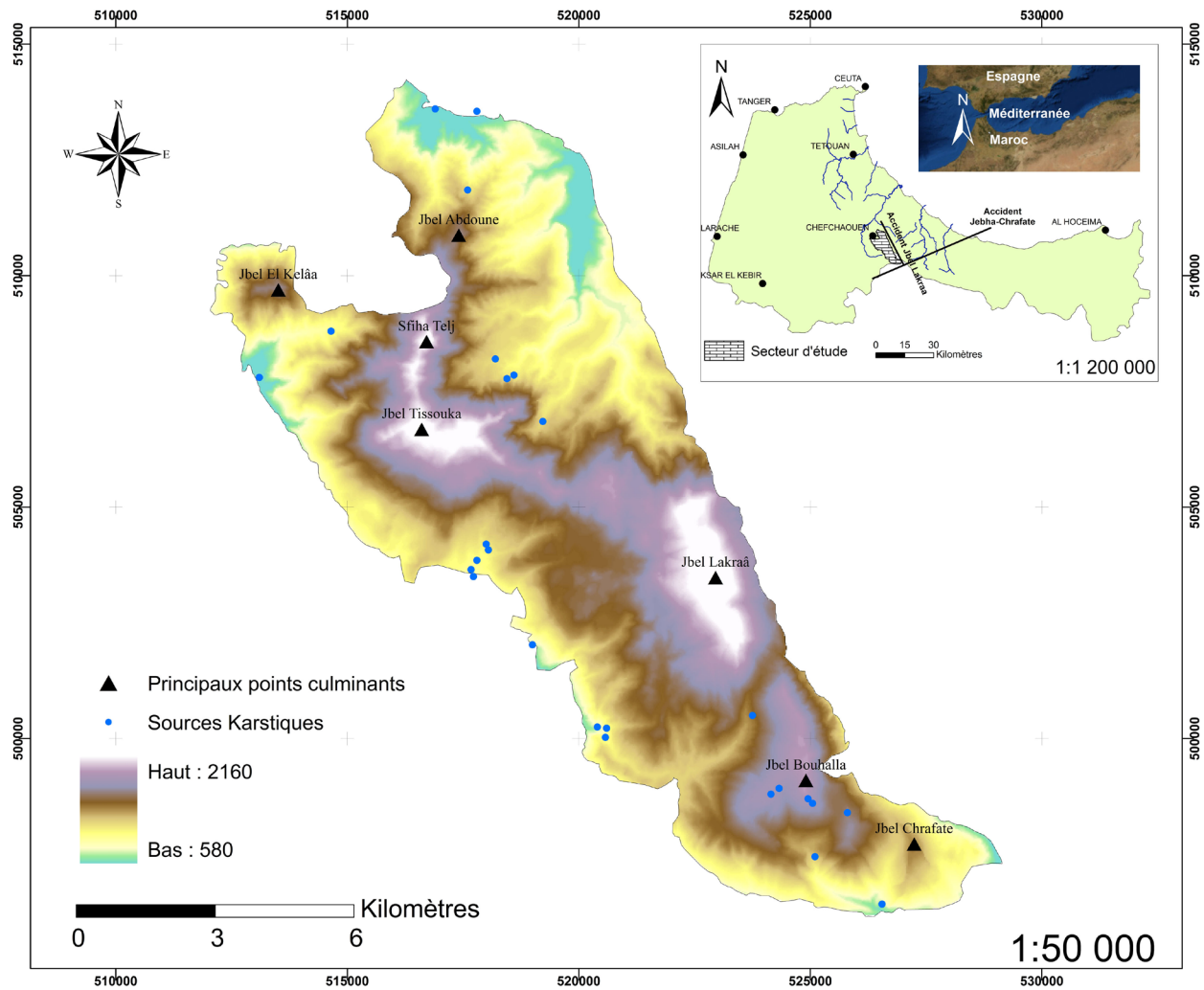


Figure 1. Situation géographique et esquisse topographique de la zone d'étude (Projection LAMBERT Nord Maroc, dans le système de référence géodésique MERCHICH).

Location map and topographic sketch of the study area (LAMBERT projection, datum Merchich, north Morocco).

- des calcaires à silex, avec des faciès bitumineux, marneux et des brèches intraformationnelles d'âge allant du Sinémurien au Pliensbachien, tandis que le Toarcien y est absent et apparaît dans le secteur septentrional (unité de Hafa en Nator);
- des formations conglomératiques et brèchiques attribuées au Tertiaire.

1.2 Contexte hydrogéologique

Du point de vue hydrogéologique, la zone étudiée est traversée par des cours d'eau superficiels, dont le plus important est l'oued Farda qui prend naissance dans l'unité du Jbel Lakraâ (Figure 2). De nombreuses sources jaillissent au pied de la Dorsale calcaire alors que les autres apparaissent entre les écaïlles de la Dorsale. Les plus importantes sont la source de Ras El Maa, située à l'ouest de l'unité du Jbel Tissouka et qui

prend naissance dans les calcaires à silex (Figure 4), les sources de Ahramen et Aayaden dans le village de Maggo, qui sourdent des formations carbonatées massives, et la source de Chrafate qui fait partie de l'unité du Jbel Bouslimane et qui prend naissance dans les calcaires à silex. Ces sources constituent, pour toute la région, les principales ressources en eau aussi bien pour l'alimentation en eau potable que pour l'irrigation.

Quant à la source de Ras El Maa, les relevés microtectoniques de terrain montrent que la famille de direction NE-SO est la plus prépondérante (Figure 5). Sachant que le pendage des formations calcaires est également de direction NE-SO, cela laisse supposer que la nappe de Jbel Tissouka est alimentée par des eaux souterraines provenant de la nappe de Jbel Tazout (Figure 2) et, par conséquent, que le sens d'écoulement des eaux souterraines est guidé par un réseau de fractures de direction NE-SO (EL BARDAI, 2010).

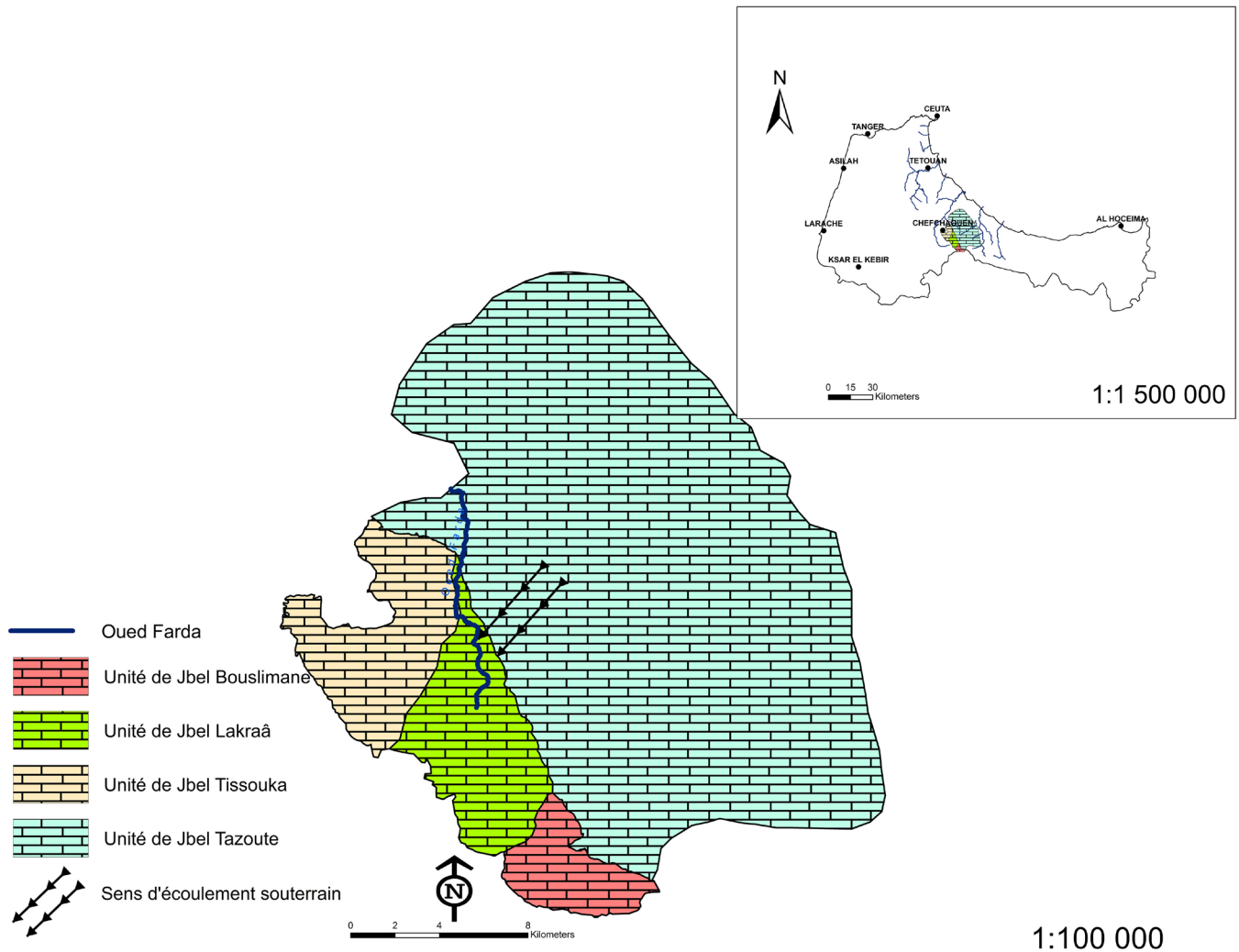


Figure 2. Schéma structurel de la zone d'étude (située à l'ouest de Jbel Tazoute, élaboré à partir de la carte géologique de Bab Taza, Carte du Maroc-1/50000, feuille NI-30-XIX-2b).

Schematic structural map of the study area (located west of Jebel Tazoute, drawn from the geological map of Bab Taza, Map Maroc-1/50000, sheet NI-30-XIX-2b).

2. MÉTHODOLOGIE

2.1 Analyse des hydrogrammes

En général, le terme hydrogramme dans le domaine de l'hydrologie est défini comme la courbe qui représente la variation dans le temps du débit mesuré lors d'un épisode pluvieux (débit d'un oued, débit d'une source, niveau piézométrique d'un sondage, etc.). Autrement dit, une averse, définie dans le temps et dans l'espace, tombant sur un bassin versant de caractéristiques connues, et dans des conditions initiales données, provoque à l'exutoire du bassin considéré un hydrogramme défini (MANGIN, 1975).

La réaction d'un système karstique vis-à-vis des précipitations peut informer sur les conditions de l'infiltration et de la circulation dans les différents conduits souterrains. L'analyse des courbes de récession porte essentiellement sur les phases de décrue et de tarissement, autrement dit la vidange de

l'aquifère. Le but de l'analyse est de distinguer et de définir les diverses composantes de l'écoulement responsables des régimes observés.

2.2 Analyse des courbes de récession selon la méthode de MANGIN (1975)

Le principe de cette méthode est basé sur la distinction les deux sous-systèmes établis à l'intérieur d'un système karstique représentant la zone noyée et la zone d'infiltration (MANGIN, 1975). De 1976 à 2004, on a étudié cinq courbes de récession pour la source de Ras El Maa, au pas de temps mensuel.

2.3 Analyses corrélatoires et spectrales

Les méthodes d'analyses corrélatoires et spectrales reposent sur les techniques de traitement du signal. Elles ont été définies

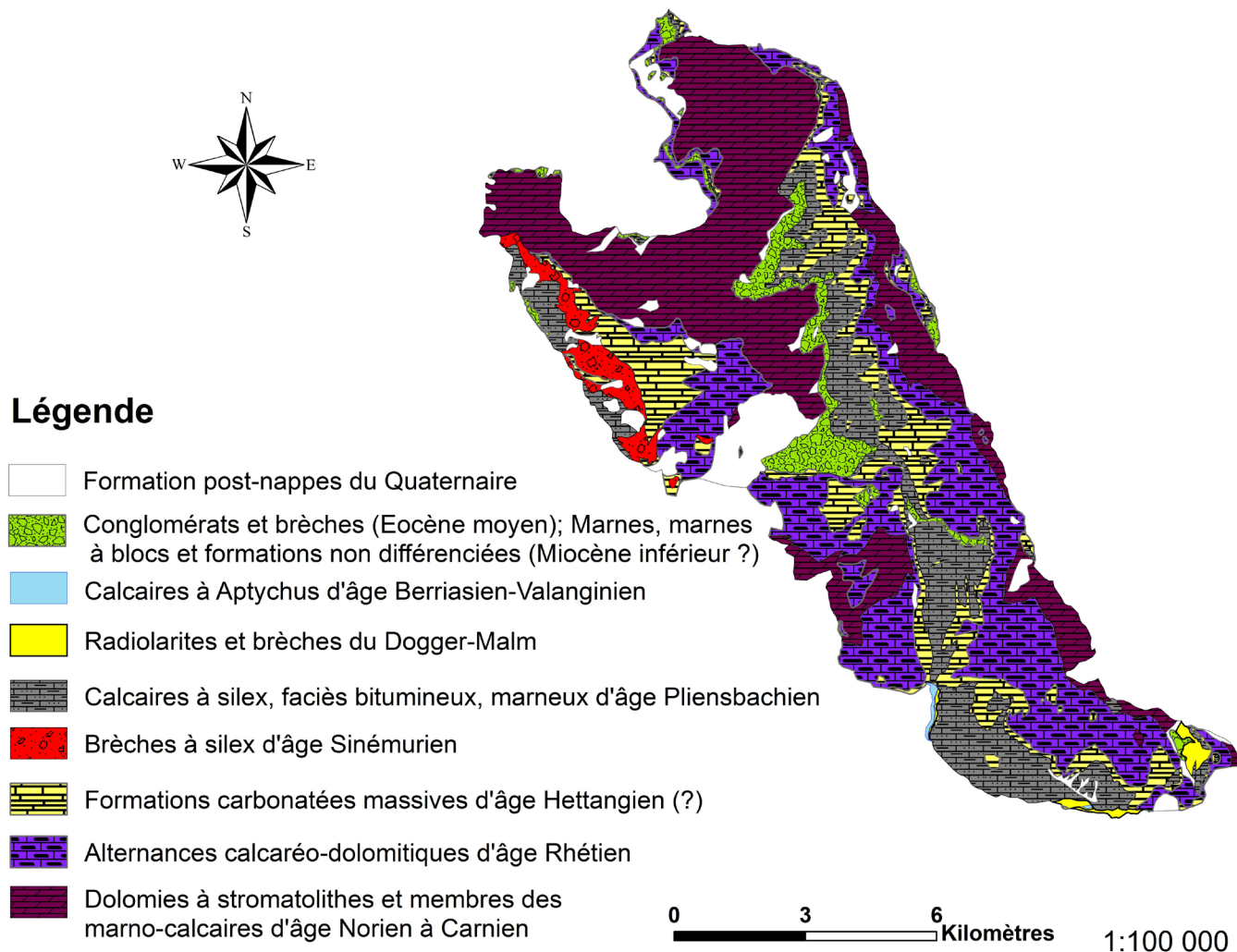


Figure 3. Carte géologique de la zone d'étude (élaborée à partir de la carte géologique de Bab Taza, Carte du Maroc-1/50000, feuille NI-30-XIX-2b).

Geological map of the study area (drawn from the geological map of Bab Taza, Map Maroc-1/50000, sheet NI-30-XIX-2b).

par JENKINS et WATTS (1968), BOX et JENKINS (1974) (dans MANGIN, 1984). Pour notre étude, nous avons utilisé le logiciel STOCHASTOS développé par Mangin et D'Hulst (D'HULST, 1978). Ce logiciel est destiné au traitement et à la modélisation des séries temporelles en hydrogéologie. La description des séries chronologiques de pluie et de débit sera effectuée dans le domaine temporel (corrélogramme) et dans le domaine fréquentiel (spectre de densité de variance). Puis nous verrons s'il existe une corrélation, et donc un lien de cause à effet, entre les pluies et les débits.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Pour l'analyse des hydrogrammes de la source de Ras El Maa, une série de 28 ans qui s'étend de septembre 1976 à septembre 2004 a été utilisée. Parmi les crues (Figure 6), sept seulement ont montré un débit supérieur à 2 000 L•s⁻¹.

La première crue était en décembre 1976 (2 080 L•s⁻¹) et la dernière crue en décembre 2001 (3 000 L•s⁻¹). Ces crues sont dues à une augmentation de la quantité d'eau précipitée sur le chaînon calcaire, en exprimant conséquemment le principe Cause-Effet.

3.1 Analyse des courbes de récession selon la méthode de MANGIN (1975)

Les valeurs moyennes présentées dans le tableau 1 montrent un coefficient de tarissement (α) très faible ($< 4.10^3 \cdot j^{-1}$), un coefficient d'infiltration (h) aussi très faible ($\approx 0,01 \cdot j^{-1}$) et un coefficient d'hétérogénéité (e) qui est également faible ($\approx 0,4 \cdot j^{-1}$). Tous ces coefficients traduisent le caractère inertiel, mal drainé et donc peu karstifié de ces systèmes.

Pour avoir une idée de l'état de la zone noyée au bout d'une période d'étiage, il est possible de calculer le pourcentage du volume dynamique écoulé après un temps t de tarissement :

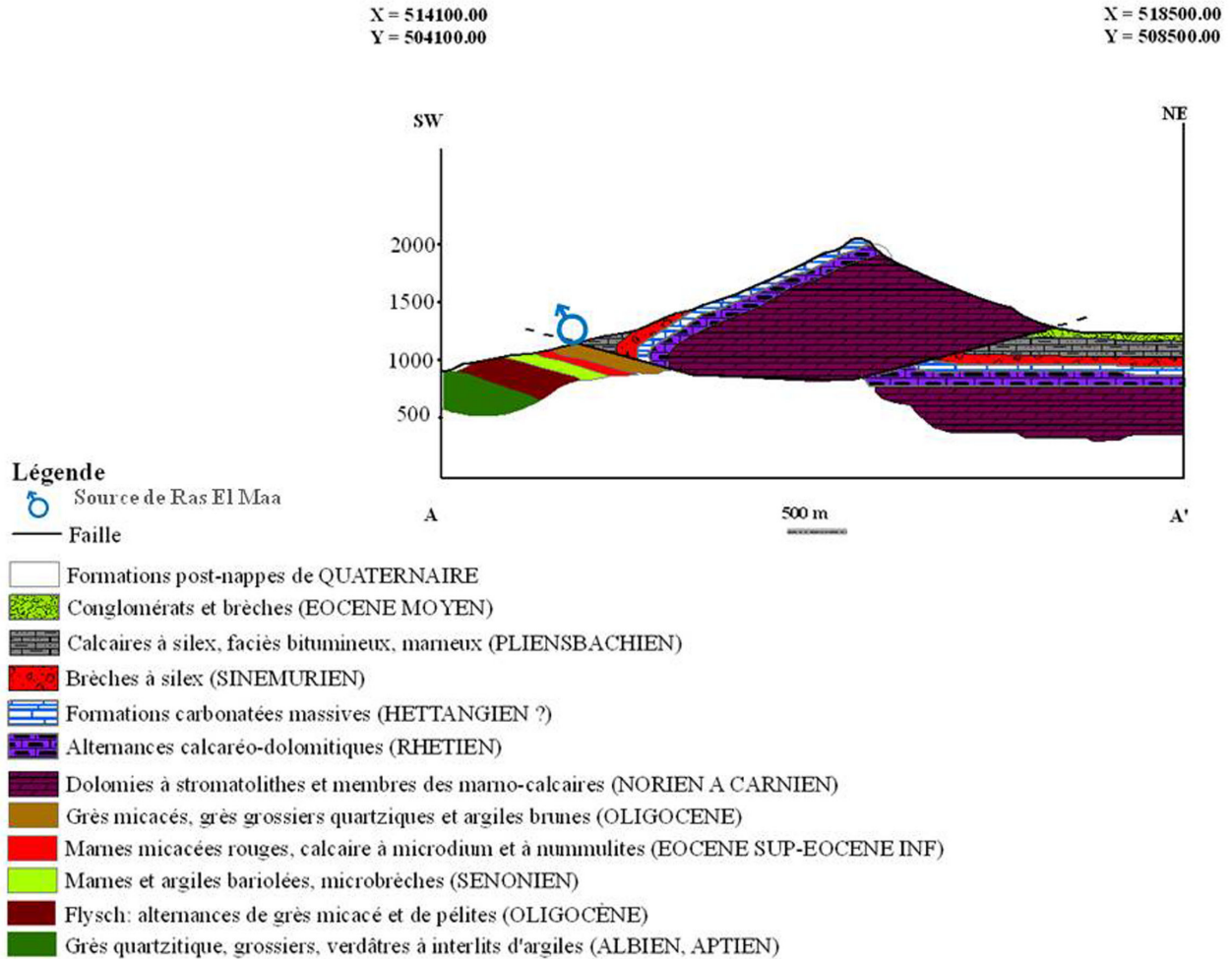


Figure 4. Coupe sériée dans l'unité du Jbel Tissouka.
Geological section of the Jbel Tissouka Unit.

$$\%Vd = (1 - e^{-\alpha t}) * 100 \quad (1)$$

Les volumes dynamiques déduits des cinq courbes de récession avoisinent $5.10^6 \cdot m^3$, ce qui montre l'importance de la réserve de tarissement (CASTANY et MARGAT, 1977).

Le tableau 2 résume les résultats des deux paramètres (i et k) de la classification de MANGIN (1975) obtenus à partir des courbes de récession de la source de Ras el Maa. Le paramètre i traduit les retards à l'infiltration d'un aquifère dont l'expression mathématique adaptée à la majorité des décrues est la suivante :

$$\Psi(t) = q_0(1 - \eta t) / (1 + \varepsilon t) \quad (2)$$

Il est d'autant plus faible que le système est bien drainé, et que la karstification forte.

Le paramètre k traduit le pouvoir régulateur d'un aquifère. Il reflète la capacité d'un système à stocker les précipitations et à les restituer au cours du temps. Il est calculé à partir de la fonction suivante :

$$\phi(t) = Vd / Vt \quad (3)$$

Le report de ces valeurs sur le diagramme de Mangin positionne la source de Ras el Maa dans le domaine I, comme Fontaine l'Évêque et Fontaine de Vaucluse en France, donc parmi les « systèmes complexes généralement de grandes dimensions et dont la structure est faite de nombreux sous-systèmes », en limite néanmoins du domaine II, correspondant à des « systèmes karstiques plus karstifiés à l'amont qu'à l'aval et avec des retards dans l'alimentation dus soit à la présence de terrains non karstiques, soit à une couverture neigeuse importante » (Figure 7).

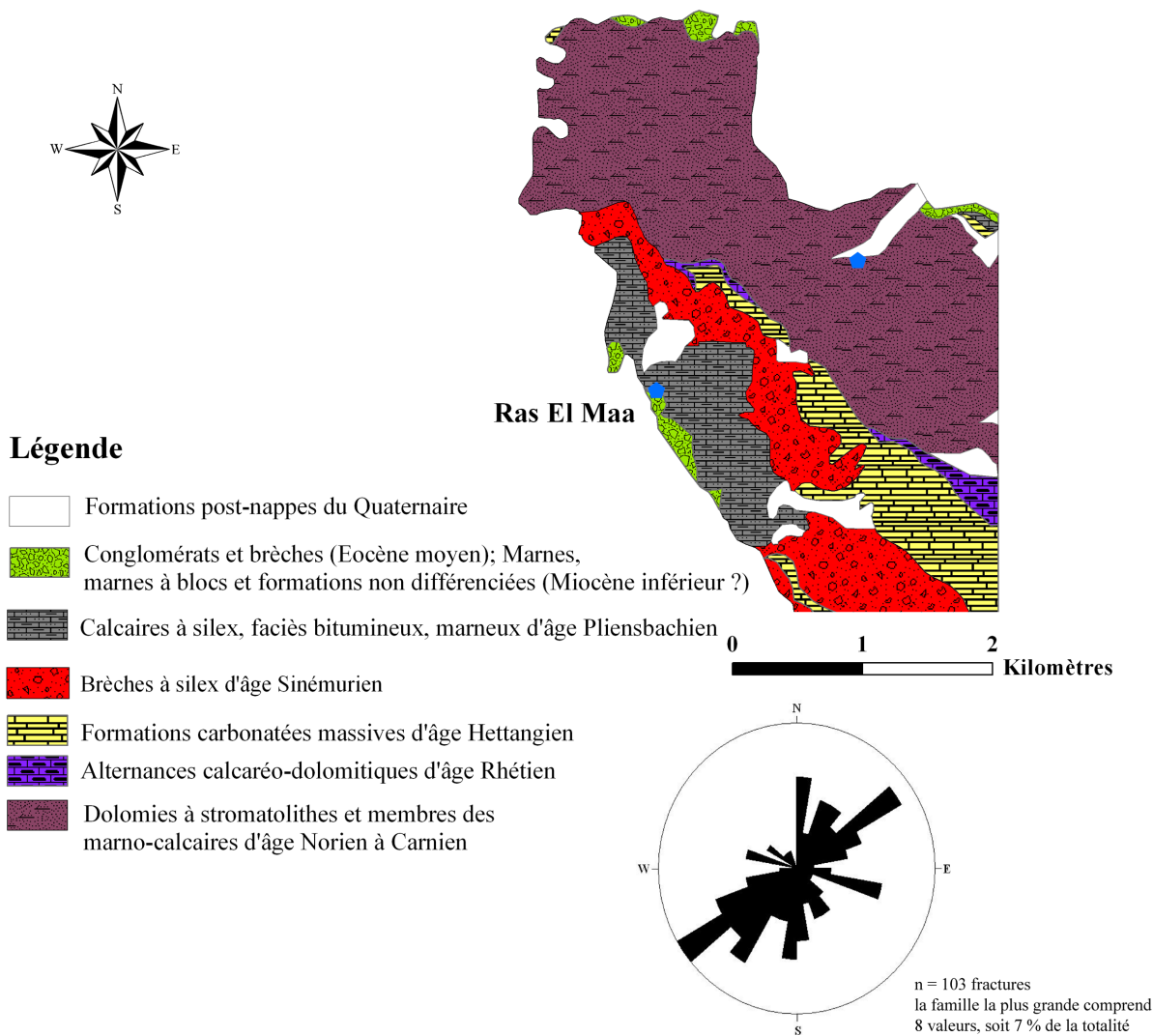


Figure 5. Extrait de la carte géologique de la zone d'étude et la rosace directionnelle de la station microtectonique de Ras El Maa.

Extract from the geological map of the study area and the rose diagram of the microtectonic station of Ras El Maa.

Tableau 1. Paramètres obtenus à partir des courbes de récession de la source de Ras El Maa.
Table 1. Parameters of the recession curves of the Ras El Maa spring.

Récession	Précipitations annuelles (mm)	α (j^{-1})	Vd (m^3)	η (j^{-1})	ϵ (j^{-1})
De juin à septembre 1977	783,7	0,00441709	5 094 064	0,01111	0,47778
De juillet à septembre 1979	623,0	0,00432733	5 201 704	0,00833	0,48333

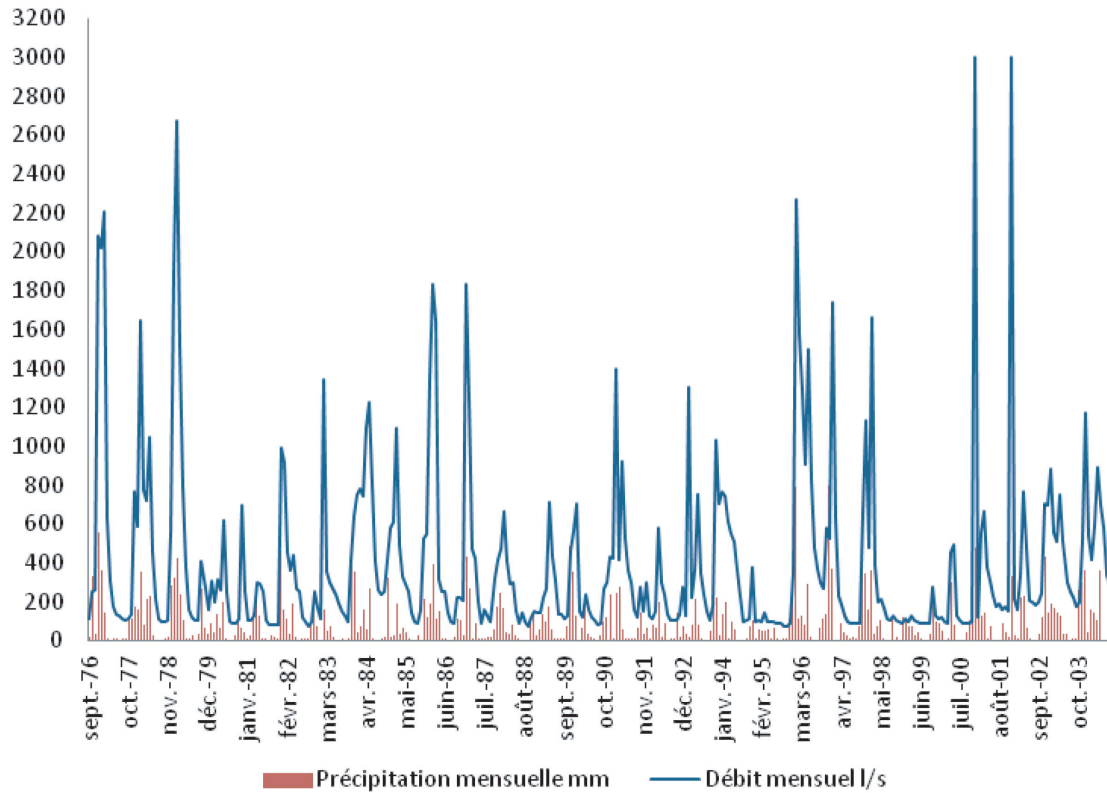


Figure 6. Source de Ras El Maa : Relation débit-précipitation (1976-2004).
Ras El Maa spring: flow and rainfall Relationships (1976-2004).

Tableau 2. Paramètres k et i de la classification de Mangin.
Table 2. i and k parameters of the Mangin classification.

Récession	Vd (m ³)	K	i
De juin à septembre 1977	5.094.064	0.39	0.60
De juillet à septembre 1979	5.201.704	0.40	0.60
De juillet à septembre 1986	5.284.263	0.41	0.60
De juin à septembre 1997	5.932.476	0.46	0.60
De juillet à août 1998	4.312.406	0.33	0.60

3.2 Analyses corrélatoires et spectrales

Les séries chronologiques analysées concernent, d'une part, les pluies brutes (totaux mensuels) et, d'autre part, les débits moyens mensuels pour la période septembre 1976 à septembre 2004.

3.2.1 Précipitations

Le corrélogramme simple de la chronique des précipitations à long terme avec une fenêtre d'observation de 112 mois et un

pas d'échelle d'un mois montre la présence d'un cycle annuel (présence d'un pic pour chaque année) (Figure 8). Ce cycle annuel est un fait parfaitement connu sous nos latitudes. Il est particulièrement commun sous climat méditerranéen qui comporte deux saisons sensiblement égales et bien tranchées : une saison pluvieuse, voire neigeuse en altitude, et une saison sèche, tout particulièrement en été.

Cette périodicité annuelle est confirmée aussi par l'allure de spectre de densité de la variance des précipitations à long terme (Figure 9).

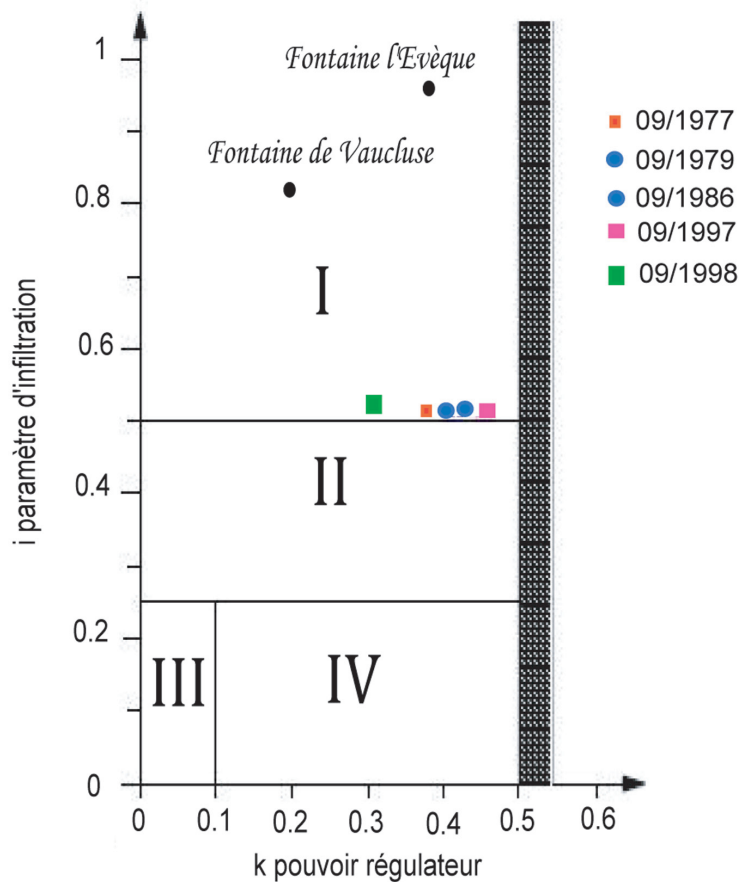


Figure 7. Classification des systèmes karstiques à partir de l'analyse des courbes de récession de la source de Ras el Maa.
Classification for karst aquifers based on the analysis of recession curves of the Ras el Maa spring.

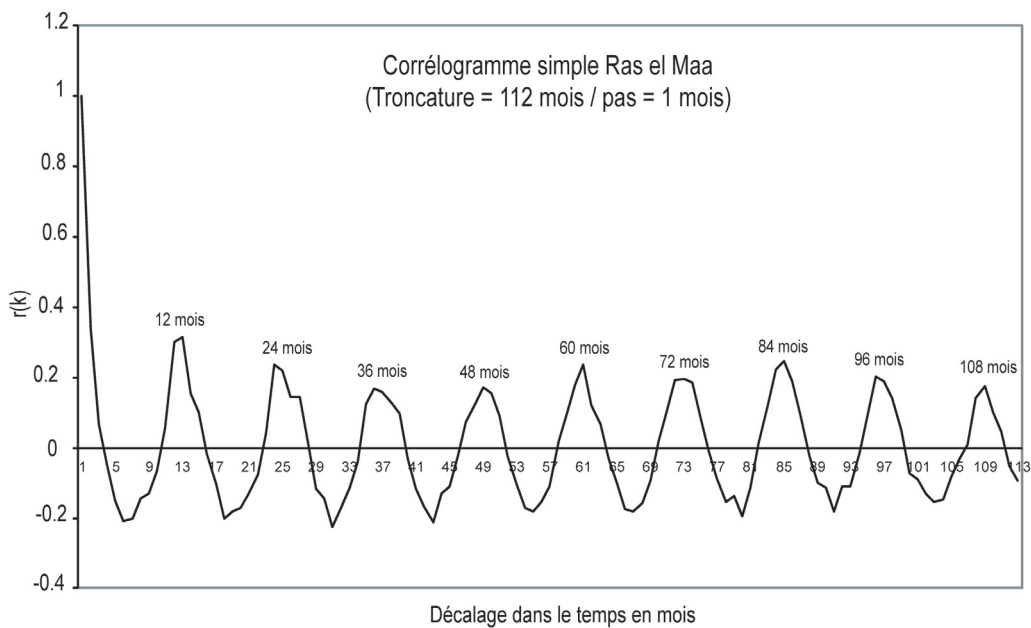


Figure 8. Corrélogramme simple des précipitations à Ras el Maa sur la période septembre 1976 - septembre 2004.
Results of correlation analysis of monthly precipitation data from the Ras el Maa station (September 1976 – September 2004).

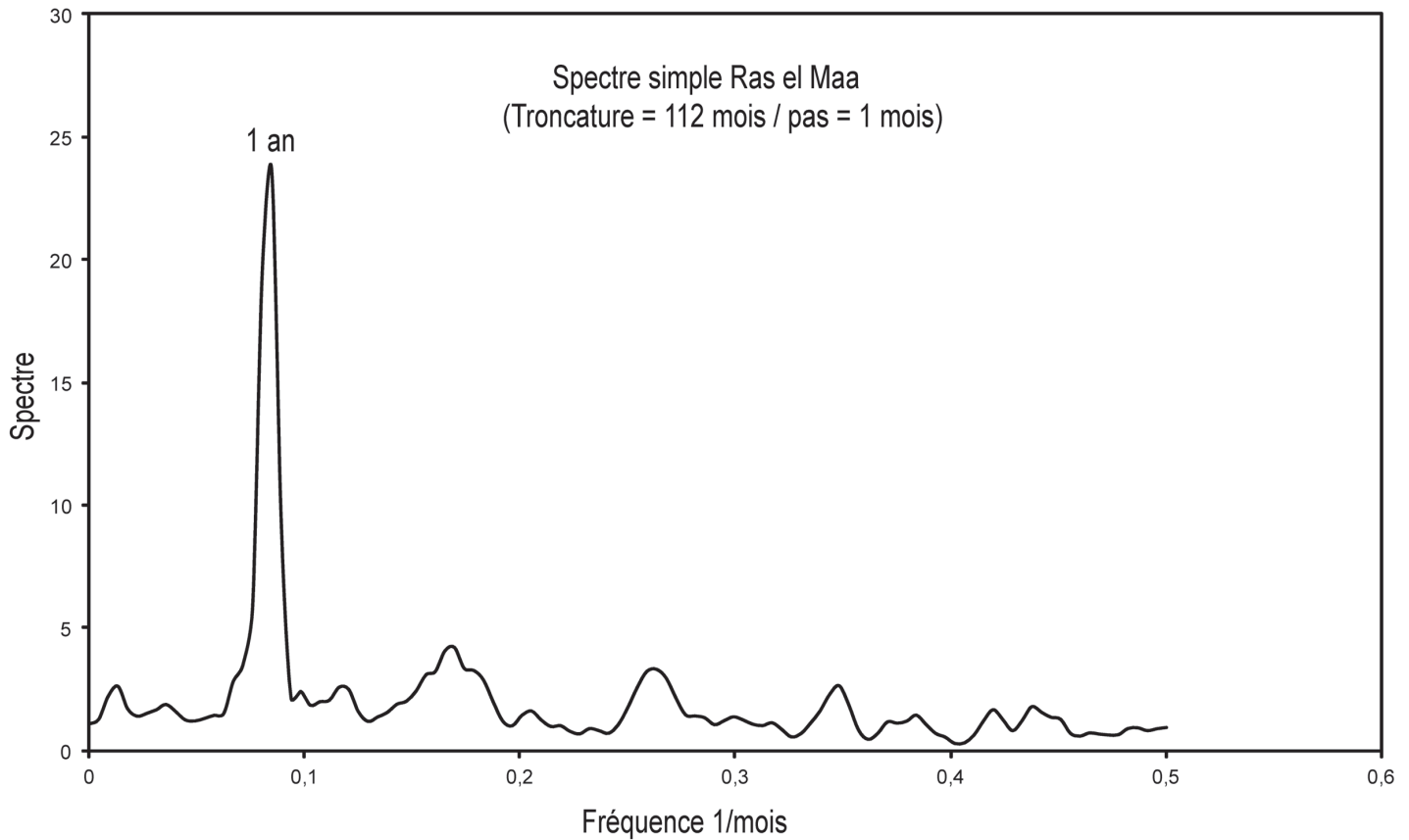


Figure 9. Spectre simple de la densité de variance des précipitations à Ras el Maa sur la période septembre 1976 - septembre 2004.
Results of spectral analysis of monthly precipitation data from the Ras el Maa station (September 1976 - September 2004).

3.2.2 Débits

Le corrélogramme simple des débits de la source de Ras el Maa à long terme, avec une fenêtre d'observation de 112 mois et un pas d'échelle d'un mois (Figure 10), décroît rapidement et fait apparaître une structure périodique annuelle. Ces périodicités sont clairement mises en évidence par le spectre de la densité de variance (Figure 11) avec une périodicité qui correspond au cycle hydrologique (pic à 365 jours).

À court terme, le corrélogramme simple de la chronique de débit décroît rapidement avec un effet de mémoire d'environ deux mois (l'effet de mémoire est déterminé sur le corrélogramme simple, il correspond à la valeur de k lorsque $r_k = 0,2$ (Figure 12) et indique ainsi un effet de filtrage lent. La même chose a été démontrée par l'analyse de la courbe de récession de la source de Ras el Maa (coefficient d'infiltration très faible $\approx 0,01 \cdot j^{-1}$).

Cet effet mémoire important traduit la forte dépendance dans le temps des événements affectant la chronique des débits. Cette dépendance peut être liée à la fonte de la neige, à une infiltration différée au sein de la zone non saturée, ou au fonctionnement du système aquifère, ce qui traduirait l'existence d'importantes réserves.

3.2.3 Analyse croisée pluie-débit

Sur la figure 13, le corrélogramme croisé présente un maximum à environ six jours, puis décroît et coupe l'axe au bout de trois mois. Dans la partie négative des axes, le corrélogramme devrait être nul, la déviation autour de la valeur zéro donne une information sur l'importance des erreurs de mesures. La durée de la réponse impulsionnelle semble être aux alentours de six mois. Ce corrélogramme croisé ne fournit pas une bonne image de la réponse impulsionnelle et de l'hydrogramme unitaire. Cela peut être expliqué par la perturbation du signal d'entrée à cause de la fonte de la neige, des pertes, des données au pas de temps mensuel, ou du fait que le signal d'entrée est filtré par le système.

La fonction d'amplitude est négligeable dans le domaine des hautes fréquences (Figure 14). Cela indique que la relation pluie-débit est valide dans le long terme et qu'elle est moins bonne dans le court terme. En d'autres termes, les événements pluvieux de courte durée ne provoquent pas une augmentation sensible du débit. Cette affirmation est néanmoins à modérer dans la mesure où l'on travaille au pas de temps mensuel.

La fonction de phase (Figure 15) permet de connaître le déphasage existant entre le signal d'entrée et celui de sortie. À partir de l'expression $T = \theta/2\pi f$, on peut quantifier ce

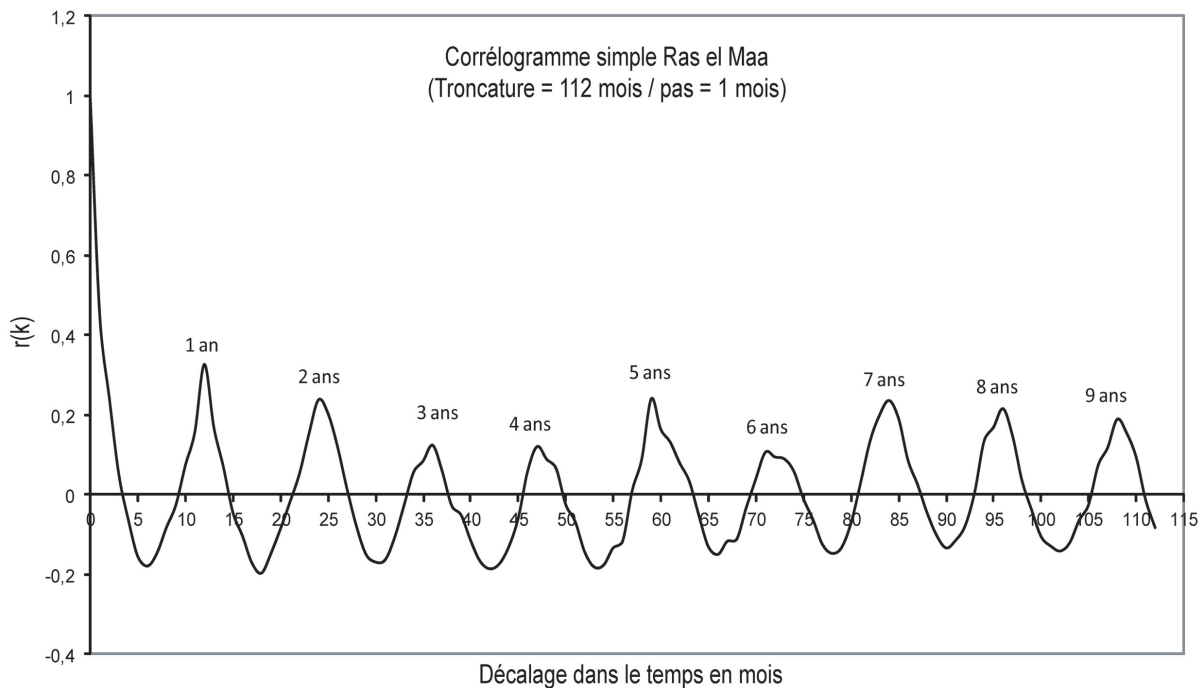


Figure 10. Corrélogramme simple des débits à Ras el Maa sur la période septembre 1976 - septembre 2004.
Result of correlation analysis for the monthly outflow series from the Ras el Maa spring (September 1976 - September 2004).

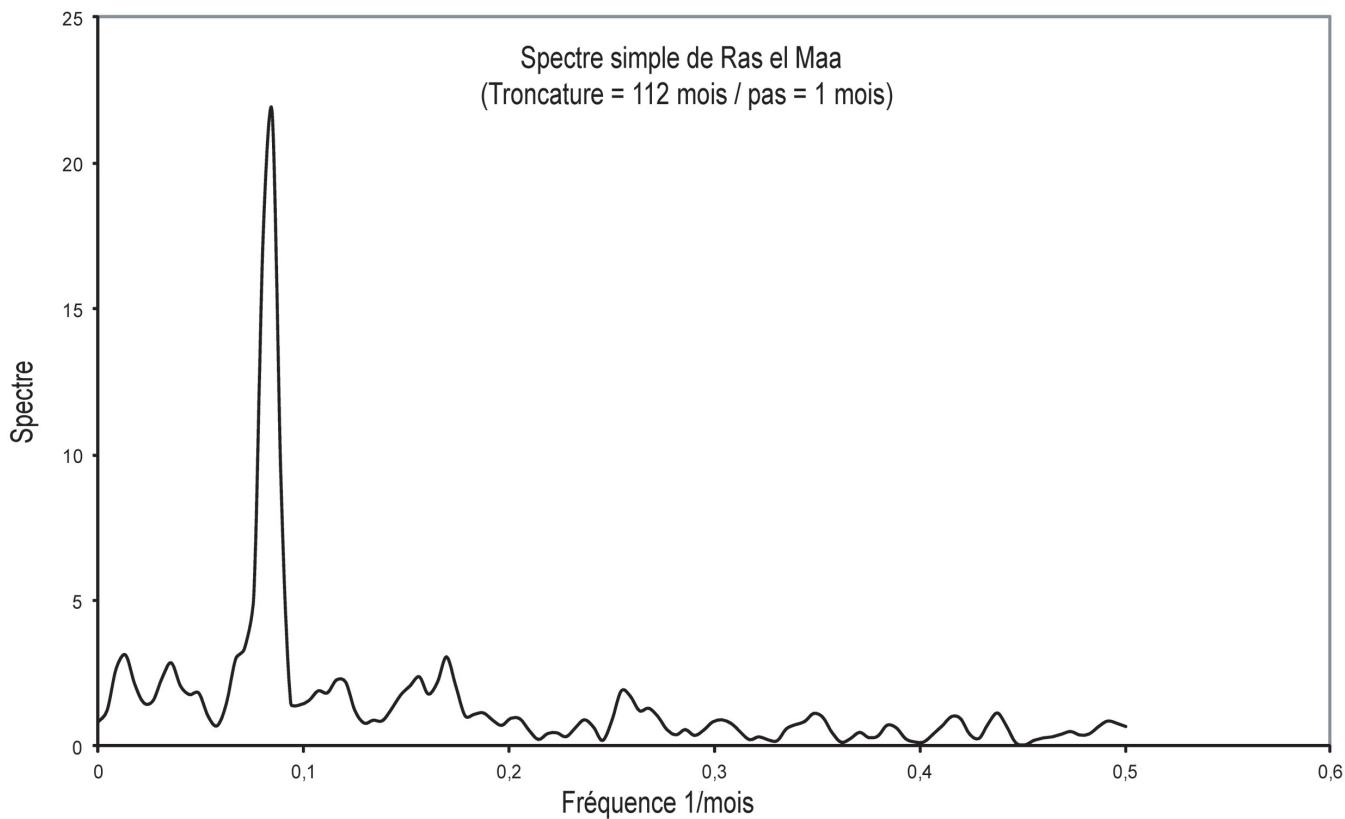


Figure 11. Spectre simple de la densité de variance des débits à Ras el Maa sur la période septembre 1976 - septembre 2004.
Results of spectral analysis of the monthly outflow series from the Ras el Maa spring (September 1976 - September 2004).

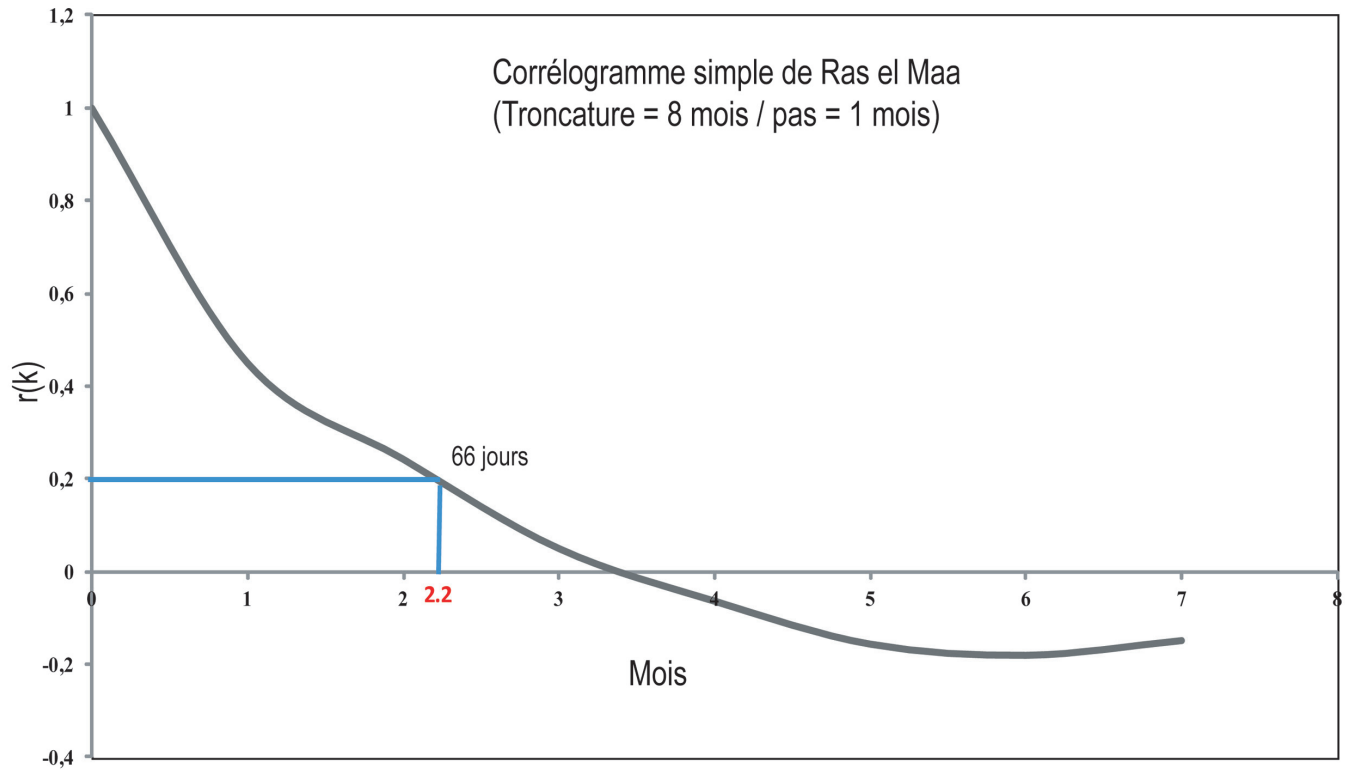


Figure 12. Corrélogramme simple du débit à court terme.
Results of short term correlation for the monthly outflow series.

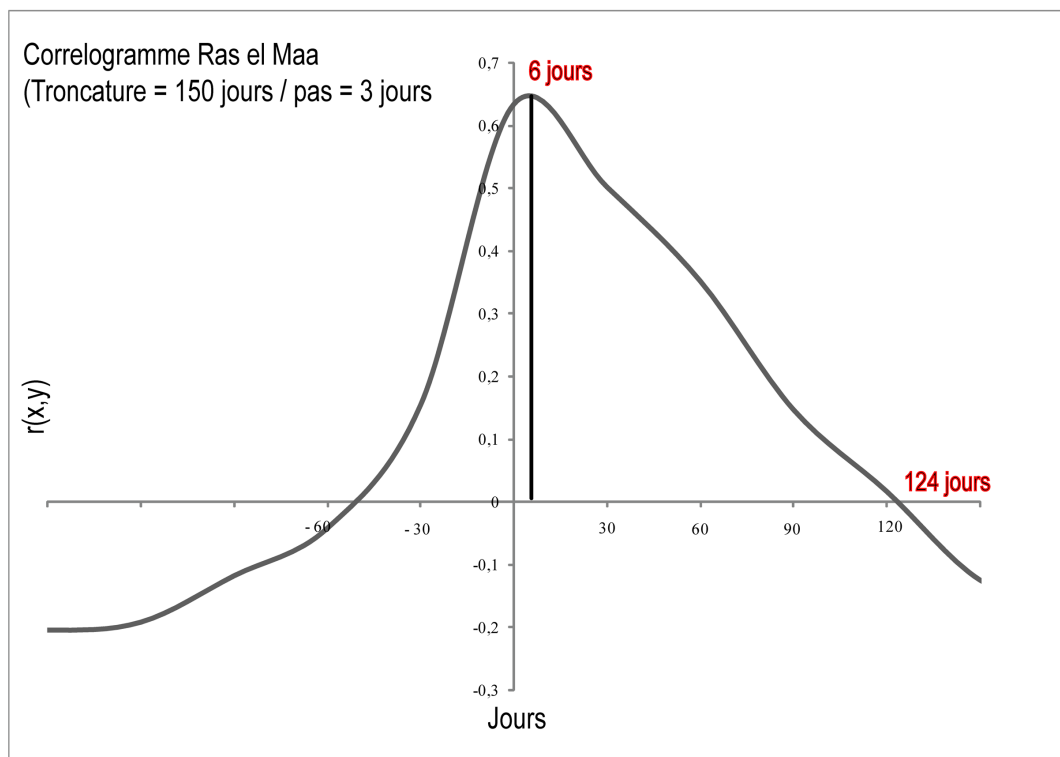


Figure 13. Corrélogramme croisé de Ras el Maa à court terme.
Short term cross-correlation of the Ras el Maa spring.

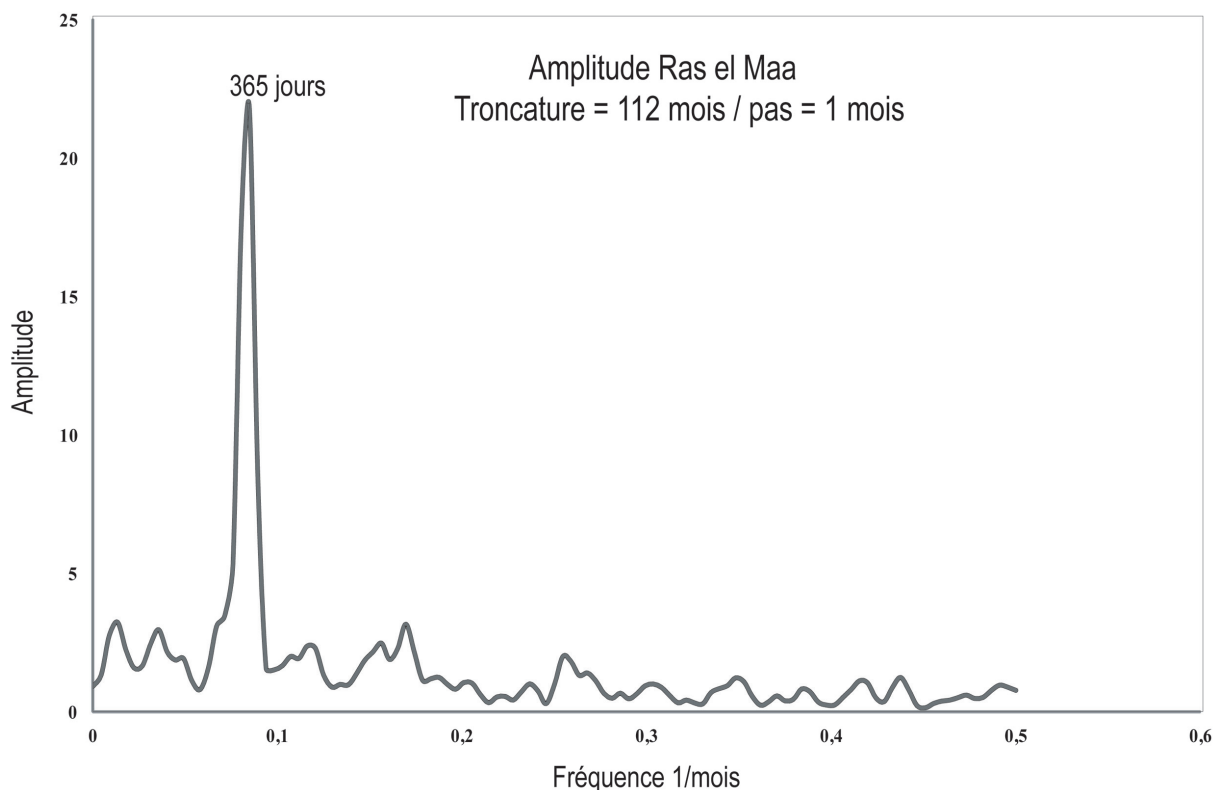


Figure 14. Fonction d'amplitude de Ras el Maa à long terme.
Long term amplitude function of the Ras el Maa spring.

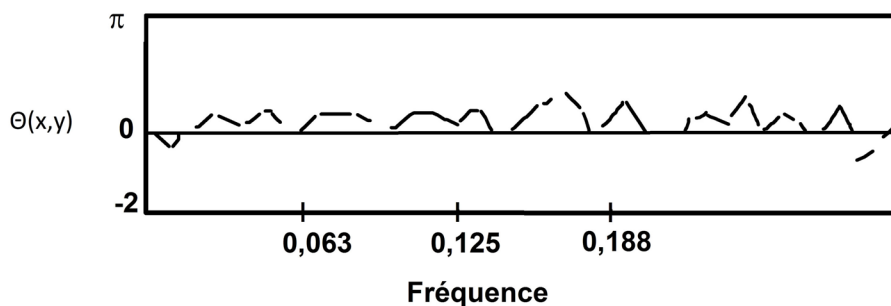


Figure 15. Fonction de phase de la source de Ras el Maa.
Phase function of the Ras el Maa spring.

déphasage (en jours), en fonction de la fréquence (f) et de la phase (θ). Pour la fréquence de coupure de 0,1071, la phase θ vaut 0,43 et le déphasage est de l'ordre de 20 jours, soit un mois environ. Cette valeur est relativement élevée et permet de conclure que l'effet de la pluie ne peut être ressenti à l'exutoire qu'après un mois environ. La disponibilité de données à un pas de temps plus faible (journalier par exemple) permettrait de préciser ce résultat.

La fonction de cohérence représente la variation de la corrélation entre les signaux d'entrée et de sortie du système en fonction de leur fréquence. Cette fonction caractérise la linéarité et la stationnarité des systèmes karstiques. Dans la

figure 16, la cohérence moyenne est faible et se trouve aux alentours de la valeur 0,5, ce qui caractérise un système peu karstifié où les eaux de pluie alimentant l'aquifère participent significativement à la reconstitution des réserves et moins aux écoulements immédiats.

Enfin, l'analyse de la fonction de gain (Figure 17) indique une atténuation très nette des hautes fréquences au profit d'une amplification à long terme. Le caractère saisonnier des précipitations est amplifié par le système (MANGIN, 1981a,b). Cela représente plutôt l'image d'un système capacitif où les mises en réserves sont importantes.

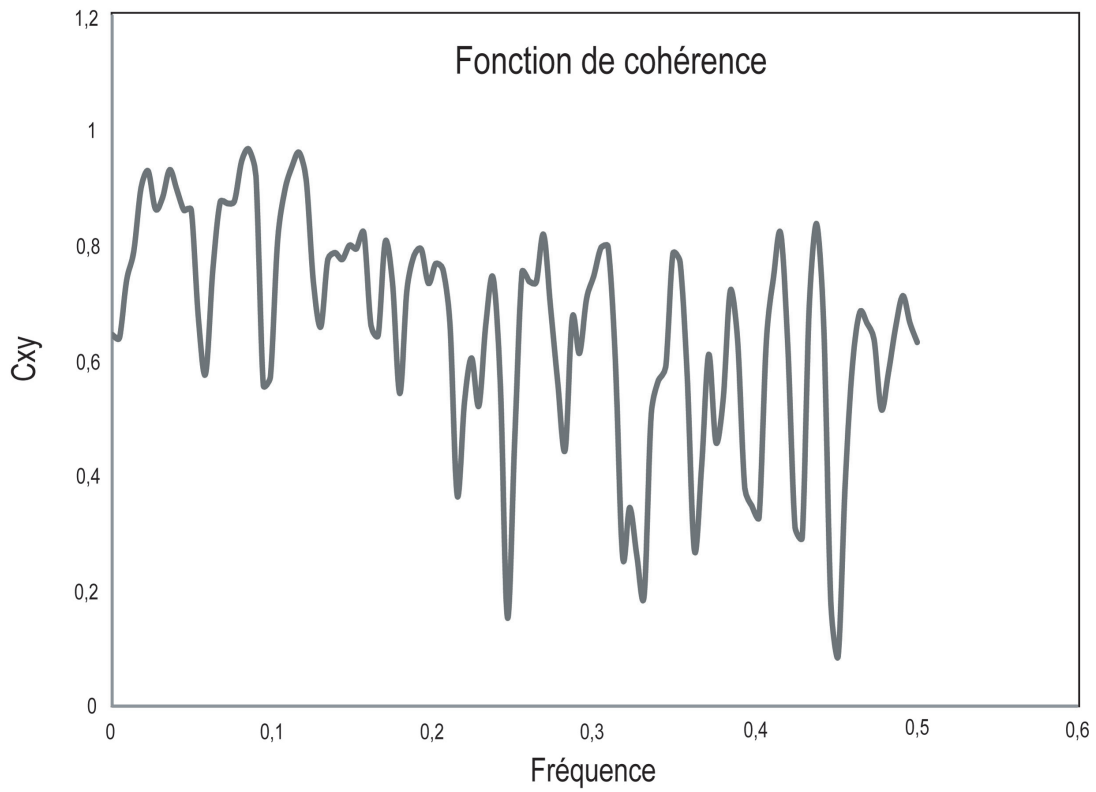


Figure 16. Fonction de cohérence de la source de Ras el Maa.
Coherence function of the Ras el Maa spring.

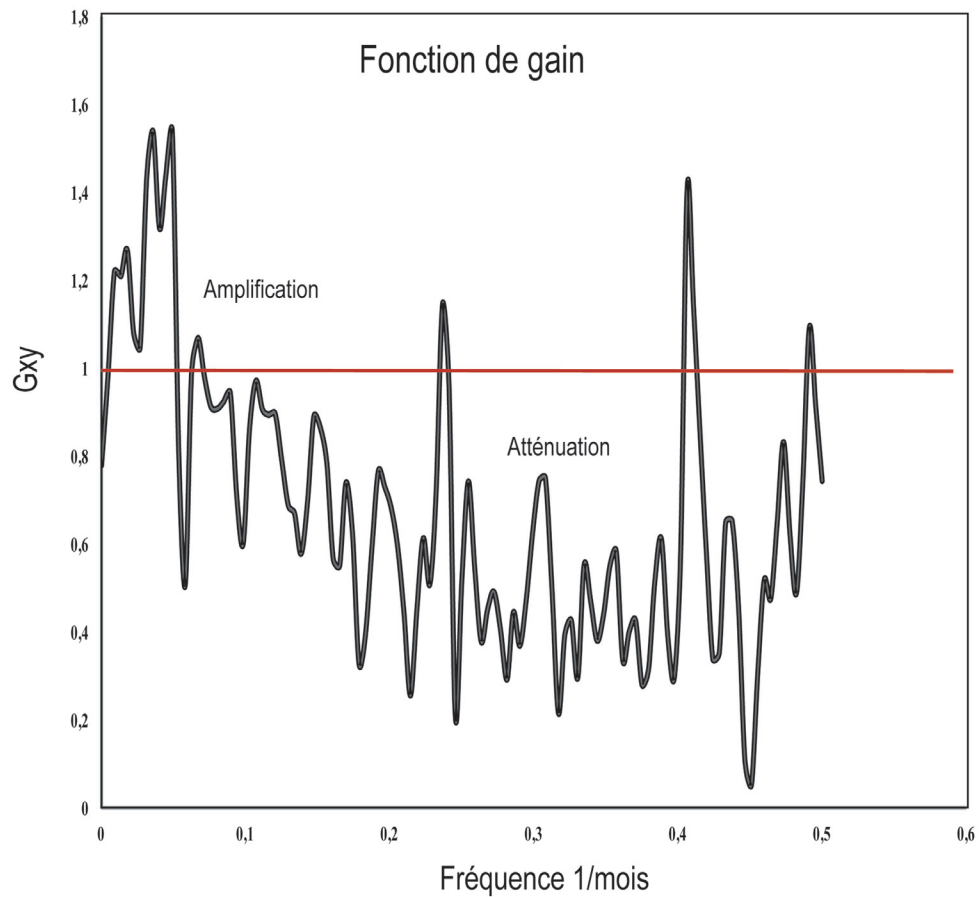


Figure 17. Fonction de gain de la source de Ras el Maa.
Gain function of the Ras el Maa spring.

4. CONCLUSION

L'analyse du fonctionnement hydrodynamique met en évidence le caractère mal drainé, très inertiel et donc peu karstifié de l'aquifère de la source de Ras el Maa. Le volume des réserves obtenu à partir des courbes de récession est très important, il est de l'ordre de 5.10^6 m^3 .

Pour toutes les récessions, les valeurs moyennes présentées dans le tableau 1 montrent un coefficient de tarissement (α) très faible ($< 4.10^{-3} \text{ j}^{-1}$), un coefficient d'infiltration (η) aussi très faible ($\approx 0,01 \text{ j}^{-1}$) et un coefficient d'hétérogénéité (ε) qui est également faible ($\approx 0,4 \text{ j}^{-1}$). Tous ces coefficients traduisent le caractère inertiel, mal drainé et donc peu karstifié de ces systèmes.

L'application des analyses corrélatoire et spectrale, simple ou croisée, à l'étude des systèmes karstiques repose sur le fait qu'un système possède un comportement de filtre. Elle permet de caractériser certains aspects des systèmes karstiques; on cite ici l'effet mémoire qui est en relation avec les réserves, leur temps de régulation et la relation entre la pluie et les débits (relation cause-effet). Cette méthode a été appliquée à la source de Ras el Maa. Les corrélogrammes simples et croisés des précipitations et des débits montrent la présence d'un cycle annuel caractéristique du climat méditerranéen, le même résultat était confirmé par l'allure du spectre de densité de la variance de la chronique de précipitation. Ils mettent en évidence que le système de Ras el Maa présente un effet mémoire de deux mois environ, un temps de régulation de deux mois aussi, un déphasage d'environ un mois et une cohérence moyenne d'environ 0,5. L'analyse de la fonction du gain indique que le caractère saisonnier des précipitations est amplifié par le système, ce qui reflète le pouvoir capacitif de la nappe. L'ensemble de ces paramètres est représentatif d'un système très inertiel, mal drainé et peu karstifié. L'interprétation des données à un pas de temps plus fin permettrait de préciser cette première approche au pas de temps mensuel.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AMRAOUI A. (1988). *Hydrogéologie de la dorsale calcaire du Rif (Maroc septentrional)*. Thèse de 3^e cycle, Université Joseph Fourier, Grenoble I, France, 209 p.

BAKALOWICZ M. (1979). *Contribution de la géochimie des eaux à la connaissance de l'aquifère karstique et de sa karstification*. Thèse de Doctorat d'État, Université Paris VI, Paris, France, 269 p.

BOX G.E.P. et G.M. JENKINS (1974). *Time series analysis: forecasting and control*. Holden Day, San Francisco, USA, 575 p.

CASTANY G. et J. MARGAT (1977). *Dictionnaire français d'hydrogéologie*. BRGM Service géologique national, Orléans, 249 p.

D'HULST D. (1978). *Manuel d'utilisation du logiciel STOCHASTOS version 3.0. Variables régionalisées et approche stochastique*. C.N.R.S. Lab. Souterrain. Moulis. Saint-Girons, 41 p.

EL BARDAI R. (2010). *Étude du fonctionnement hydrogéologique et de la vulnérabilité à la contamination des aquifères karstiques situés au sud-est de la ville de Chefchaouen (Rif septentrional, Maroc)*. Thèse de Doctorat ès Sciences, disc. Géologie., spéc. Hydrogéologie, Univ. Abdelmalek Essaâdi, Tétouan, Maroc, 228 p.

JENKINS G.N. et O.G. WATTS (1968). *Spectral analysis and its applications*. Holden Day, San Francisco, USA, 525 p.

MANGIN A. (1975). *Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques. Troisième partie: Constitution et fonctionnement des aquifères karstiques*. Thèse de Doctorat ès Sciences, Université de Dijon, France. *Ann. Spéléol.*, 1975, 30, 21-124.

MANGIN A. (1981a). Apports des analyses corrélatoire et spectrale croisées dans la connaissance des systèmes hydrologiques. *CR Acad. Sci.*, 293, 1011-1014.

MANGIN A. (1981b). Utilisation des analyses corrélatoire et spectrale dans l'approche des systèmes hydrologiques. *CR Acad. Sci.*, 293, 401-404.

MANGIN A. (1984). Pour une meilleure connaissance des systèmes hydrologiques à partir des analyses corrélatoire et spectrale. *J. Hydrol.*, 67, 25-43.

MARSAUD B. (1997). *Structure et fonctionnement de la zone noyée des karsts à partir des résultats expérimentaux*. Thèse de Doctorat, Orsay-Paris XI, BRGM, Orléans, France, 301 p.

NOLD M., J. UTTINGER et W. WILDI (1981). *Géologie de la Dorsale calcaire entre Tétouan et Assifane (Rif interne, Maroc)*. Notes et Mémoires, Service de Géologie, Maroc, 300, 233 p.