

Signification géo-environnementale des caractères physico-chimiques des eaux du bassin de l'oued Maarouf (Tunisie centrale)

K. LAHMAR^{1*}, J.P. LARUE²

¹Université de Monastir, Tunisie

²Université Paris Est, Créteil, France

*Corresponding author: lahmar_karim@yahoo.fr

Abstract - The chemical analysis of water of the catchment area of the Maarouf wadi shows a strong variability in the spatial distribution of the chemical elements. To explain it, it is necessary to take account of the natural factors but also to wonder about the role of the occupation of the grounds and the alteration work which touched almost the totality of the catchment area. The agriculture of the area knew fast changes and the strong use of the pesticides and artificial fertilisers is responsible for the strong concentration in chemical elements of the samples of water on which one made the tests. The concentrations of water of the dam Nebhana in various chemical elements result mainly from the chemical dissolution of the elements forwarded by the Maarouf wadi. Dissolution is supported by: a) the lithological structure which composes the area catchment of the Maarouf wadi and sandy texture allowing a strong infiltration, the mixing and the transfer of these chemical components; b) the bioclimatic conditions of which a tendency towards the aridity; c) alteration work supporting a fluid transfer of the chemical elements.

Keywords: Central Tunisia, sedimentation, soil and water conservation, SIG, hydro-chemical analysis.

Résumé - L'analyse chimique des eaux du bassin versant de l'oued Maarouf montre une forte variabilité dans la distribution spatiale des éléments chimiques. Pour l'expliquer, il faut tenir compte des facteurs naturels mais aussi s'interroger sur le rôle de l'occupation des sols et des travaux d'aménagement qui ont touché la presque totalité du bassin versant. L'agriculture a connu des mutations rapides et la forte utilisation des pesticides et des engrais chimiques est responsable de la forte concentration en éléments chimiques des échantillons des eaux sur lesquels on a fait les tests.

La composition chimique des eaux du barrage de Nebhana résulte principalement des apports par l'oued Maarouf. La dissolution sur le bassin versant est commandée par : a) la lithologie (roches sédimentaires variées) et par la texture souvent sableuse des sols, qui favorise l'infiltration ; b) les conditions bioclimatiques, marquées par une tendance vers l'aridité ; c) les travaux d'aménagement favorisant un transfert fluide des éléments chimiques.

Mots clés: Tunisie centrale, sédimentation, conservation des eaux et sol, SIG, analyse hydro-chimique.

1. Introduction

Dans tous les domaines climatiques, l'étude spatio-temporelle des paramètres physico-chimiques des eaux aide à la compréhension du fonctionnement des géosystèmes, que ce soit pour déterminer l'origine et la distribution des flux chargés d'éléments en solution ou pour analyser l'accumulation de ces produits susceptible de s'opérer dans les systèmes aval (Nasseh *et al.* 1996 ; Markovics *et al.* 2010).

Dans les géosystèmes semi-arides, la variation des paramètres physico-chimiques des eaux dépend étroitement de l'environnement, car les conditions hydrogéologiques, morphologiques, bioclimatiques et anthropiques sont déterminantes pour les phénomènes de dissolution et de précipitation (Bahri *et al.* 1983 ; Vaudour 1984 ; Gourari *et al.* 2000). L'aridité accroît la minéralisation des eaux, mais il est souvent difficile de distinguer ce qui est lié aux facteurs naturels et ce qui résulte des activités humaines. Ainsi la salinisation des ressources en eaux peut avoir une origine double : naturelle (géologique) et anthropique (activités humaines) (Boughriba, 2006). Meybeck (1986) souligne que la composition chimique des eaux courantes est facilement altérée par des influences anthropiques, même mineures,

comme les cultures, les rejets domestiques ou le salage des routes. Ces altérations peuvent inhiber la précipitation des carbonates et donc la formation de travertins (Gourari *et al.* 2000).

L'objectif de cette étude est de déterminer l'hétérogénéité spatiale des concentrations en éléments dissous dans le bassin versant de l'oued Maarouf. À travers la recherche de l'origine des éléments, nous aurons à préciser le rôle des activités anthropiques.

2. Matériel et Méthodes

2.1. Cadre de l'étude :

Le bassin versant de l'oued Maarouf a une superficie de 320 km². Il est limité au nord par les retombées sud des djebels Serdj, Belloutta et Bargou, à l'est par l'oued Kseub, à l'ouest par la plaine de Haffouz, et au sud par les djebels Ouesslat et Elouar (Fig. 1). Cette zone est située entre les 9^{ème} et 10^{ème} degrés de longitude Est et entre les 35^{ème} et 36^{ème} degrés de latitude Nord.

Les altitudes sont comprises entre 250 m, à l'est, et 1354 m, au nord, avec une sous-représentation des valeurs supérieures à 900 m. Les versants ont une inclinaison inférieure à 5 % sur 15 % du bassin versant, comprise entre 5 et 35 % sur 70 % du bassin et supérieure à 35 % sur le reste du terrain d'étude (Lahmar 2010).

Le relief est essentiellement constitué de chaînons montagneux, comme le Jbel Serdj, en limite nord du bassin versant, et de plateaux et de plaines, comme celle d'Eloueslatia, en limite ouest du bassin, à 300 m d'altitude en moyenne.

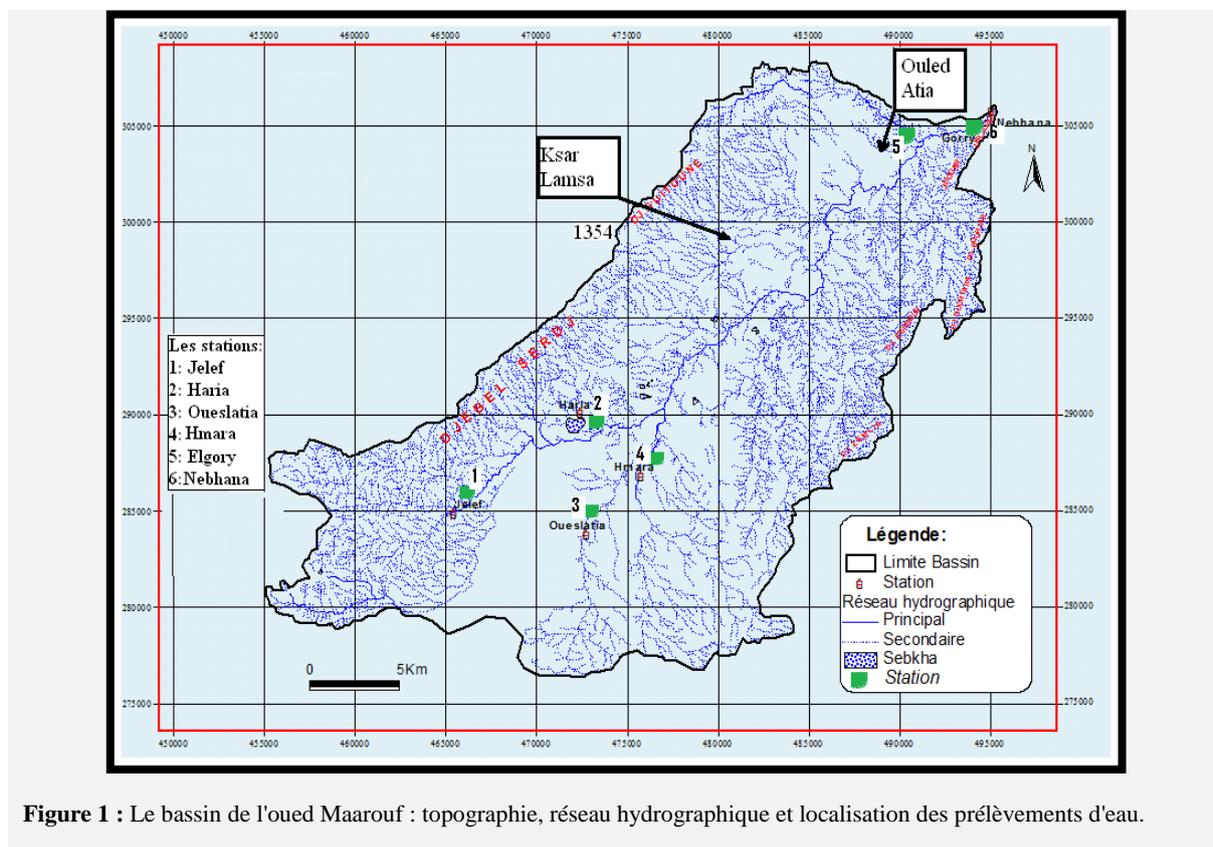


Figure 1 : Le bassin de l'oued Maarouf : topographie, réseau hydrographique et localisation des prélèvements d'eau.

Dans les cinq premiers kilomètres en aval de la source, l'oued Maarouf s'encaisse dans les roches résistantes des djebels Serdj et Essouatir (calcaires, dolomies et grès). Il parcourt ensuite des terrains de moins en moins résistant : d'abord des marno-calcaires, puis des marnes, des sables et des grès et enfin des dépôts sablo-marneux jusqu'à la zone de confluence avec l'oued Kseub au niveau du barrage de Nebhana (Fig. 2).

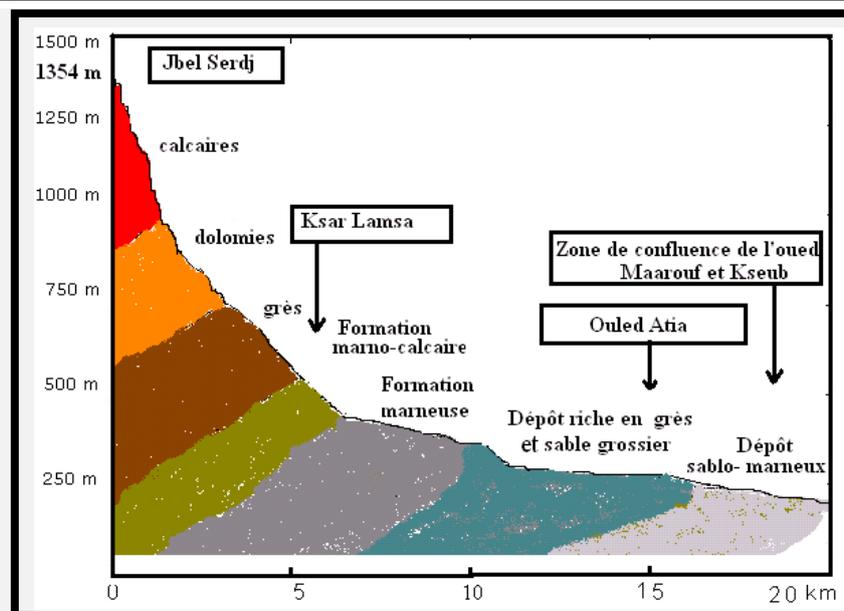


Figure 2 : Coupe des formations géologiques du bassin de l'oued Maarouf.

Soumis à un climat méditerranéen à tendance semi-aride, le bassin versant enregistre une pluviométrie annuelle moyenne de 395 mm (Bocquet 1993), mais les variations interannuelles sont fortes et des périodes sèches alternent avec des phases plus humides. Ainsi le déficit pluviométrique de la période 1977-1989 a-t-il été particulièrement marqué en Tunisie centrale (Kingumbi 1999). De plus, l'altitude introduit des variations spatiales : les djebels reçoivent plus de 450 mm en moyenne annuelle alors que la plaine d'Eloueslatia n'enregistre que 359 mm. La température annuelle moyenne est de 19,1 °C, avec un minimum de 10,4°C en janvier et un maximum de 28,6 °C en août (Bocquet 1993). Les moyennes des températures maximales journalières de la saison estivale avoisinent les 37°C et le maximum absolu 48,1°C a été enregistré en août 1986 (Mougou *et al.* 2011). L'évapotranspiration potentielle selon la méthode Penman, qui est très supérieure aux précipitations, est d'environ 1680 mm à Kairouan (Fakhfakh 1998 ; Mougou *et al.* 2011).

L'oued Maarouf présente un régime pluvial méditerranéen qui se caractérise par des écoulements en hiver et un assèchement presque total au cours de la saison estivale. Pendant l'hiver, les débits moyens sont de l'ordre de 28 m³/s au niveau du barrage de Nebhana (CRDA Kairouan). Au cours de la saison estivale, l'oued s'assèche progressivement de l'aval à l'amont à partir de mars.

Dans le bassin versant de l'oued Maarouf, les sols calcimorphes dominent (Fournet 1974 ; Delhoume 1980). Dans les parties hautes du bassin, les sols sont surtout des sols squelettiques, mais on trouve également des sols rouges méditerranéens peu profonds et fréquemment encroûtés. Ailleurs, les sols sont plus profonds. Il s'agit essentiellement de sols isohumiques, le plus souvent encroûtés. Si les horizons se distinguent mal dans les sols peu épais de la partie amont du bassin, ceux de la partie aval présentent généralement un profil à trois horizons, dans lequel la teneur en carbonate de calcium augmente de bas en haut (Delhoume 1980).

Les parties supérieures du bassin sont couvertes de forêt et maquis sévèrement dégradés, où de grandes surfaces ont été dénudées par le surpâturage et un défrichage très poussé. Ces deux actions ont provoqué la destruction de la végétation spontanée laissant la place à des broussailles et les espèces fourragères non pâturables. Dans les plaines et plateaux, l'anthropisation a fait disparaître complètement la végétation naturelle. De ce fait, la couverture végétale ne permet plus la protection du sol contre l'érosion.

2.2. Méthodologie :

Pour bien montrer l'évolution spatiale des paramètres physico-chimiques des eaux transitant dans le bassin versant, les lieux d'échantillonnage des eaux ont été choisis à l'amont, dans la zone de production, et à l'aval, dans la zone d'accumulation. La localisation des points de prélèvement des eaux est indiquée sur la figure 1.

Les quatre prélèvements amont ont été effectués dans des citernes de 3 m diamètre et de 2,5 m de profondeur, à ciel ouvert qui ont recueilli les eaux des oueds lors des crues du 22 juin 2007. Ils servent à caractériser les apports des oueds Jelef et Hmara qui confluent pour constituer l'oued Maarouf.

La température, la conductivité et le pH ont été mesurés sur le terrain : la température à l'aide d'un thermomètre YSI (précision : $\pm 0,25^{\circ}\text{C}$), la conductivité avec un conductimètre de terrain (WTW 1330, Norme AFNOR), le pH à l'aide d'un pH-mètre Orion Research après calibration de l'électrode (précision : $\pm 0,05$ unité). Les dosages des éléments chimiques majeurs (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{+} , NH_4^{+} , HCO_3^{-} , SO_4^{2-} , Cl^{-} , NO_3^{-} et PO_4^{3-}) ont été réalisés en laboratoire, en suivant les préconisations de Hoffman et Pellegrin (1996) : les échantillons récoltés dans des tubes bien fermés, à une température ne dépassant pas les 25°C pour éviter des éventuelles réactions chimiques, ont été transportés en un premier temps à l'école nationale des ingénieurs de Sfax (ENIS, Tunisie) où les analyses ont été faites au bout de huit jours, puis ils ont été envoyés, le 9 septembre 2007, à Avignon dans des boîtes maintenant la température à 20°C et ils ont été vérifiés deux semaines après à la Faculté des Sciences d'Avignon (France). Les deux séries de dosages, tous effectués par chromatographie ionique, ont donné des résultats très semblables. La précision des résultats est de l'ordre de 5 %.

3. Résultats

3.1. Analyses chimiques des eaux

Les tableaux I et II donnent des résultats des analyses d'eaux prélevées le 17 août 2007 à 13 h et à 20 h. Pour chaque élément, les concentrations sont exprimées en milliequivalents par litre (méq/l = concentration en mg/l divisée par le poids moléculaire de l'élément lui-même divisé par sa valence).

Tableau 1 : Résultats des analyses d'eau de l'oued Maarouf

Échantillons prélevés le 17 août 2007 à 13 h

Stations	T° en C	pH	Cond (μ S/cm)	Ca ⁺⁺ en meq/l	Mg ⁺⁺ en meq/l	Mg ⁺⁺ / Ca ⁺⁺	Na ⁺ en meq/l	K ⁺ en meq/l	HCO ₃ ⁻ en meq/l	SO ₄ ²⁻ en meq/l	Cl ⁻ en meq/l	PO ₄ ³⁻ en meq/l	NO ₃ ⁻ en meq/l
Jelef	39	7,7	513	1,731537	4,518	2,609	0,2175	0,04911	3,5728	0,394	0,637	0	
Elharia	38,5	7,6	523	1,806	5,497	3,043	0,2131	0,0087	3,9826	0,352	0,398	0,0001	
Oueslatia ville	38	7,8	522	1,961	5,159	2,6309	0,187	0,03427	4,6545	0,475	0,429	0,0009	0,003
Hmara	39,1	8	523	1,896	4,032	2,1264	0,2697	0,02097	4,9823	0,477	0,499	0,0015	
Gorry	39	7,5	555	1,707	5,431	3,1824	0,3219	0,02967	3,6384	0,479	0,516	0,0013	
Nebhana	37,9	7,4	599	1,846	6,04	3,2713	0,1827	0,03197	5,1954	0,323	0,322	0	0,009
Moyenne	38,6	7,7	539	1,821	5,11	2,8046	0,2319	0,02916	4,3382	0,416	0,468	0,0008	

Tableau 2 : Résultats des analyses des échantillons de l'oued Maarouf.

Échantillons prélevés le 17 août 2007 à 20 h

Stations	T° en C	pH	Cond (μ S/cm)	Ca ⁺⁺ en meq/l	Mg ⁺⁺ en meq/l	Mg ⁺⁺ / Ca ⁺⁺	Na ⁺ en meq/l	K ⁺ en meq/l	HCO ₃ ⁻ en meq/l	SO ₄ ²⁻ en meq/l	Cl ⁻ en meq/l	PO ₄ ³⁻ en meq/l	NO ₃ ⁻ en meq/l
Jelef	33	7,9	500	1,697	4,369	2,5754	0,1827	0,04271	3,2614	0,364	0,44	0	
Elharia	35	7,8	512	1,652	5,546	3,3579	0,1653	0,01535	3,9826	0,406	0,44	0,0001	
Oueslatia ville	35	7,5	476	1,602	5,268	3,2878	0,187	0,03069	4,0809	0,462	0,378	0,0003	0,001
Hmara	36	8	504	1,547	3,785	2,447	0,2131	0,00895	4,3431	0,429	0,358	0	
Gorry	34	7,4	523	1,857	5,382	3,2484	0,261	0,02839	3,4745	0,375	0,496	0,0013	
Nebhana	35,5	7,6	542	1,742	5,53	3,1752	0,1653	0,02302	4,9495	0,271	0,282	0	0,006
Moyenne	34,8	7,7	509	1,724	4,978	2,8876	0,1957	0,02481	4,0153	0,385	0,401	0,0003	

Les températures varient entre 28 °C et 39 °C dans les différentes stations du bassin de l'oued Maarouf où on a effectué le 17 août les prélèvements d'eau, la température moyenne de l'air pour cette journée est d'environ 37 °C. Les conductivités (de 513 à 599 $\mu\text{S}/\text{cm}/\text{cm}^2$ à 13h00 ; de 499 à 542 $\mu\text{S}/\text{cm}/\text{cm}^2$ à 20h00) traduisent une minéralisation des eaux assez élevée.

À 13 h comme à 20 h, le pH fluctue entre 7,4 à Elgorry et 8,0 à Hmara.

La concentration en éléments chimiques estimée à partir de la conductivité fluctue entre 325 mg/l à Jelef et 460 mg/l à Nebhana. Elle augmente de l'amont à l'aval, sauf entre Oueslatia et Hmara. Les valeurs maximales sont enregistrées vers l'accumulateur principal, c'est-à-dire le barrage de Nebhana. Les valeurs sont plus fortes pour les relevés de 13 h que pour ceux de 20 h. Cette variation est due probablement à la cinétique des réactions chimiques entre les différents éléments présents. La température catalyse les réactions entre les faciès chimiques.

Les teneurs les plus élevées en calcium Ca^{2+} sont enregistrées à Jelef avec une teneur de 34 mg/l à 20h et à Nebhana. Les concentrations en sodium (Na^+) sont faibles alors que celles en magnésium (Mg^{2+}) sont plus fortes. Les variations journalières des concentrations en sodium, en calcium et en ion sulfate (SO_4^{2-}) se font dans le même sens, montrant ainsi que ces trois éléments chimiques ont la même origine lithologique. Les ions nitrates (NO_3^-), qui n'ont été mesurés qu'à Oueslatia et Nebhana, sont présents en faible quantité, toutefois ils sont trois fois plus abondants à l'aval qu'à l'amont.

Pour les 130 échantillons d'eau prélevés par Ben Abdallah (2006) dans le lac de Nebhana, le diagramme de PIPER (Fig. 3) indique des faciès bicarbonatés-magnésiens-calciques.

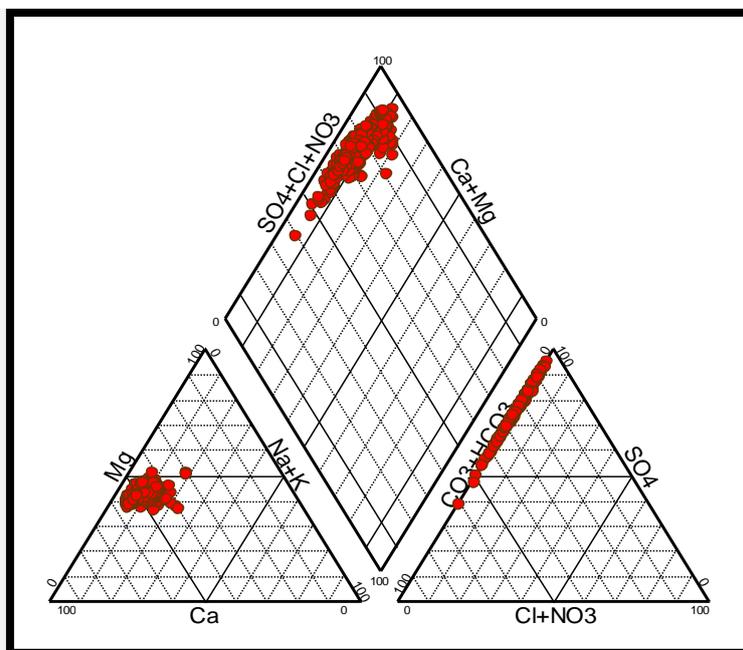


Figure 3 : Diagramme de Piper des faciès chimiques dans le lac de Nebhana

La répartition des points dans le diagramme de PIPER montre que la cinétique des réactions chimiques est très élevée dans l'eau du barrage. Les nuages de points présents dans le diagramme migrent vers les sommets des triangles. Ils se concentrent dans des valeurs qui dépassent les 60%. Pour évaluer cette réaction chimique, on a construit la courbe de corrélation entre les sulfates (SO_4^{2-}) et le groupe calcium-magnésium (Fig. 4).

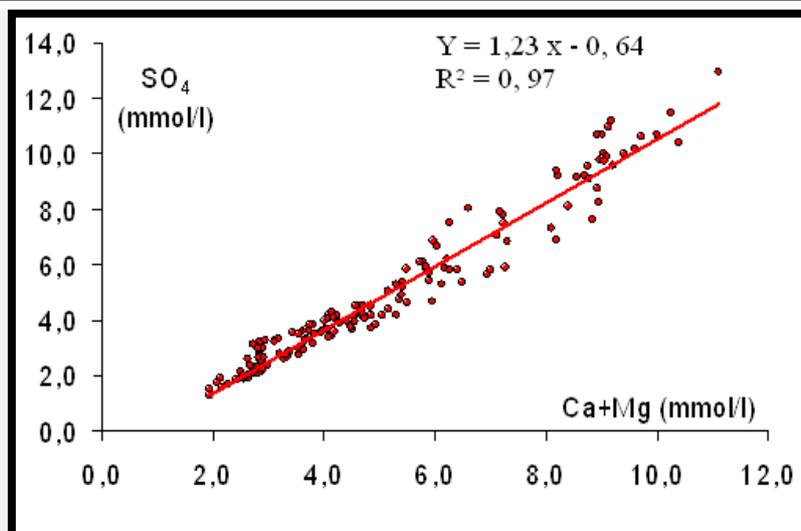


Figure 4: La corrélation et la proportionnalité entre les éléments chimiques dans le lac de Nebhana

La répartition en nuage sur la droite $Y = ax + b$ montre que la concentration de l'ion sulfate et la somme calcium + magnésium sont liées par une forte corrélation positive.

3.2. L'indice de saturation des minéraux carbonatés

L'indice de saturation exprime le degré d'équilibre chimique entre l'eau et le minéral testé (Bakalowicz 1979 ; Parkhurst et Appelo 1999) et peut être considéré comme une mesure du processus de dissolution et/ou précipitation (Drever 1997). Le logiciel WATEQ (Plummer *et al* 1984) a été utilisé pour calculer les indices de saturation de la calcite et de la dolomite (Tab. 3).

Tableau 3 : Les indices de saturation des éléments testés.

Paramètres	Minimum	Maximum	Moyenne
IS Calcite	1,18	1,01	1,09
IS Dolomite	1,22	1,04	1,13

Le calcul de l'indice de saturation des minéraux carbonatés dans le lac de Nebhana montre que les minéraux carbonatés pourraient précipiter surtout sous la forme de dolomite (Chemseddine 2009). Cette précipitation se traduit par la formation de travertins alluviaux à l'entrée du lac de Nebhana.

3.3. Représentation spatiale de la composition chimique des eaux

Les exemples ci-dessous montrent les représentations cartographiques de la distribution spatiale des éléments chimiques dans le bassin versant de l'oued Maarouf. Les cartes sont dressées par la méthode d'interpolation, opération mathématique qui permet de construire une courbe à partir d'un nombre fini de points ou à partir d'un nombre fini de valeurs. D'une façon générale, les concentrations des différents éléments majeurs augmentent de l'amont vers l'aval. Les cartes représentatives des éléments chimiques montrent des trames de couleurs dont les valeurs s'accroissent vers le barrage de Nebhana, c'est-à-dire vers l'aval.

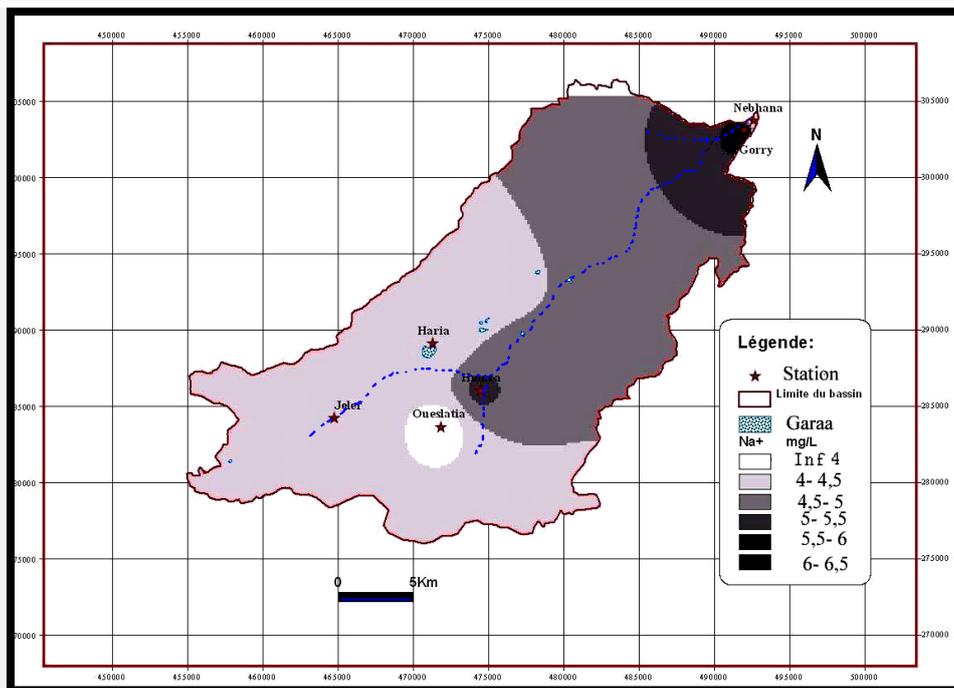


Figure 5 : Concentration en sodium Na⁺ dans le bassin de l'oued Maarouf : une concentration qui augmente de l'amont vers l'aval.

Les concentrations en Na⁺ ont des valeurs croissantes de l'amont vers l'aval. Les valeurs les plus faibles sont enregistrées dans les stations d'oued Jelf et au niveau d'Eloueslatia ville. Les trames de couleurs que présente la carte (Fig. 6) montre qu'une croissance des teneurs en sodium se produit en allant vers la partie aval. Les concentrations en Na⁺ peuvent atteindre des valeurs supérieures à 6,5 mg/l.

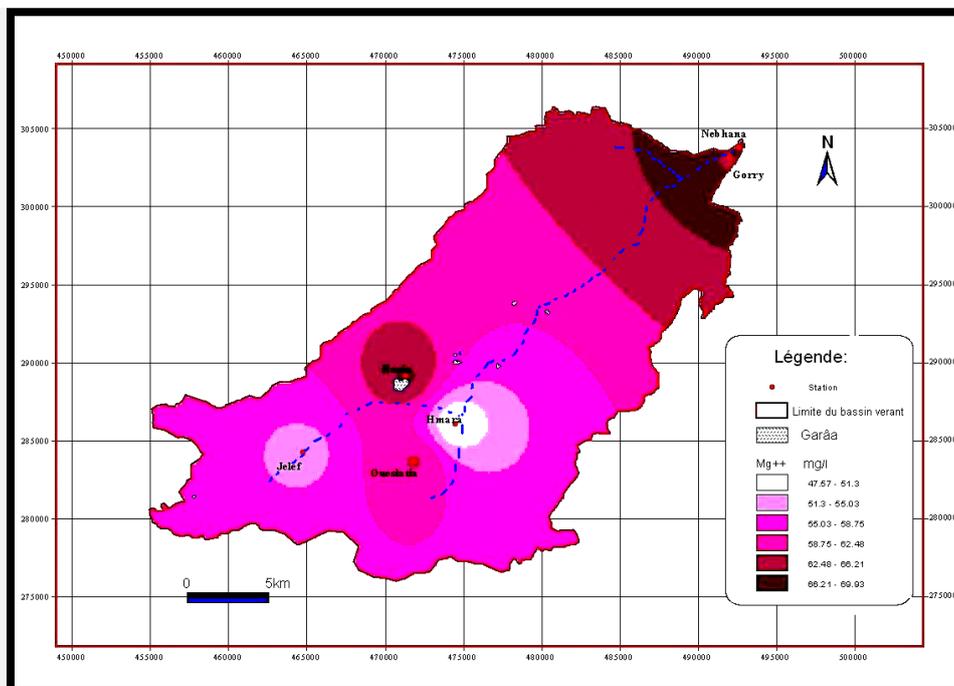


Figure 6 : Concentration en magnésium Mg⁺⁺ dans le bassin de l'oued Maarouf : une concentration qui augmente de l'amont vers l'aval.

Les concentrations en Mg^{++} révèlent aussi des valeurs croissantes de l'amont vers l'aval (Fig. 6). Cependant, on enregistre des anomalies locales : les valeurs apparaissent anormalement faibles au niveau des stations d'oued Jelef et d'Hmara, alors qu'elles sont plus fortes à Elharia.

Les concentrations en éléments dissous et leurs variabilités spatio-temporelles peuvent être expliquées par des facteurs naturels et des facteurs anthropiques.

4. Interprétations :

4.1. Les facteurs naturels

4.1.1. Facteurs géologiques et biogéographiques

Ainsi que l'on montré de nombreux auteurs, la lithologie imprime sa marque sur la géochimie des eaux (Ben Ammar *et al.* 2009 ; Gartet *et al.* 2001 ; Nasseh *et al.* 1996; Bouhlassa *et al.* 2008). Les fortes concentrations en éléments dissous enregistrés dans le bassin versant étudié s'expliquent en premier lieu par la nature lithologique des roches du bassin versant formé principalement de substrats carbonatés et argileux (Akdim 1991). Les substrats carbonatés sensibles à la dissolution fournissent les fortes teneurs en hydrogénéocarbonates et toute diminution de concentration journalière peut s'expliquer par une perte du gaz carbonique par évaporation. Les fortes teneurs en calcium et en magnésium enregistrées dans les stations de Jelef et d'Elharia sont dues à la dissolution karstique des calcaires des djebels. Le sodium et le magnésium proviennent pour une large part des argiles et formations carbonatées qui couvrent les deux tiers de la surface du bassin versant. Le faciès bicarbonaté-magnésien-calciqie trouvé ici ressemble à celui des retenues du bassin de la Medjerda, mais diffère du faciès sulfaté-calciqie caractérisant les lacs collinaires des bassins du Zeroud et du Merguellil (Bahri *et al.* 1983). L'alternance calcaire-marnes favorise le premier faciès, alors que la prédominance des formations riches en gypse explique le second. Les variations spatiales des concentrations en éléments majeurs sont dues secondairement aux différences biogéographiques liées à la pédologie et au degré de couverture végétale. Les sols et la végétation jouent un rôle important au niveau de l'infiltration de l'eau et des potentialités de dissolution. Une faible couverture végétale protège mal les sols contre l'érosion mécanique et favorise le ruissellement aux dépens de l'infiltration. Le couvert végétal plus dense en altitude rend plus agressives les eaux qui s'infiltrent dans les calcaires des djebels.

4.1.2. Facteurs climatiques

Le plus important est l'ensoleillement qui est favorisé par la position et l'exposition du bassin versant. Le fort ensoleillement permet, d'une part, une élévation de la température et un réchauffement rapide de l'eau et de l'atmosphère et, d'autre part, une évaporation des eaux et un départ du gaz carbonique dissous dans l'eau, ce qui est propice à la concentration des éléments dissous et à la précipitation des sels dans la zone de confluence. Cette dernière, qui présente un système de pentes moins accentuées, connaît une forte salinité et une forte concentration en éléments chimiques. Les températures élevées jouent un rôle important dans l'accélération des réactions chimiques entre les différents éléments présents dans les eaux du bassin de l'oued Maarouf. Ce facteur catalyseur ne pourrait en aucun cas être éliminé voire réduit.

4.1.3. Facteurs hydrologiques et morphologiques

Comme l'ont déjà remarqué S. Ben Ammar *et al.* (2009), les faciès géochimiques sont semblables pour l'eau des oueds et pour celle des nappes phréatiques. Cela indique des transferts rapides de l'amont vers l'aval et aussi des échanges verticaux entre les oueds et les nappes phréatiques.

La sédimentation des matières transitées se fait principalement dans la zone de confluence de l'oued Maarouf et Kseub et plus précisément au niveau du barrage de Nebhana. Cette sédimentation s'explique par une diminution de l'énergie cinétique des eaux, suite à un ralentissement brutal de la pente du lit fluvial induit par la topographie et par des travaux d'aménagement du barrage d'Elgorry.

Dans nos explications de la forte concentration des éléments chimiques dans le bassin versant et plus particulièrement en bicarbonate de calcium, on peut négliger l'apport atmosphérique. Cette négligence est due à l'absence d'usine capable de fournir un apport assez important pour qu'il soit quantifiable.

Les conditions naturelles sont donc propices à une forte dissolution karstique qui conduit à une saturation des eaux en carbonates dissous durant la saison estivale et à une précipitation de calcite sous forme de travertin en amont du lac Nebhana. La présence de sulfates ne peut qu'accentuer cette précipitation (T. MUXART).

4.2. L'action anthropique

4.2.1. L'érosion des sols et les aménagements récents

La forte réduction du couvert végétal et le développement agricole ont favorisé l'érosion des sols et l'augmentation de la turbidité de l'oued lors des averses de saison froide (Lahmar *et al.* 2010). Cette forte turbidité a pu limiter la précipitation des carbonates et la travertinisation qui nécessitent, outre la sursaturation en carbonate de calcium, l'action de micro-organismes (Pedley *et al.* 2009). En réduisant cette activité biologique, les crises rhexistatiques d'origine anthropique limitent la travertinisation, comme l'ont montré Olivier *et al.* (2009) dans plusieurs régions méditerranéennes.

Le poids des actions anthropiques n'est pas seulement négatif. Les premières interventions d'aménagement relatives au bassin de l'oued Maarouf ont débuté par des études d'impacts et de faisabilité d'un projet hydro-agricole depuis 1964 dans le cadre d'un projet lancé par le Ministère de l'Agriculture Tunisien et en collaboration avec le FAO.

Néanmoins, la mise en place des aménagements hydrauliques - le barrage de Nebhana, Elgorry, puis les différents lacs - diminuent les capacités de l'oued à évacuer les polluants car la dynamique fluviale est devenue très faible (El Morhit *et al.* 2008). Ces changements hydrodynamiques pourraient être à l'origine du confinement par l'ensablement massif de l'oued Maarouf à son embouchure, c'est-à-dire au niveau du barrage de Nebhana. Ceci risque d'entraîner une augmentation de la concentration des éléments chimiques et d'autres types de polluants.

Les aménagements hydrauliques peuvent être un facteur catalyseur à l'augmentation des concentrations chimiques. Elles deviennent aussi des éléments déclencheurs à une pollution riveraine. L'analyse des eaux de l'oued Maarouf présente un cas concret à cette théorie. Les concentrations des éléments chimiques augmentent de l'amont à l'aval, ceci coïncide avec les travaux de Gartet (2001) sur le bassin de l'oued Lebène (Maroc) et d'El Morhit *et al.* (2008) sur l'estuaire du Loukkos (côte atlantique, Maroc).

4.2.2. L'utilisation des engrais chimiques dans la région

L'utilisation des engrais azotés provoque une nitrification des eaux. Cette nitrification peut augmenter la dissolution du carbonate en Ca conformément aux réactions chimiques suivantes (Akdim, 1991) :

Cette nitrification peut conduire à une acidification des eaux comme cela a été décrit dans les eaux du Rhin et de la Garonne en France et du Dadès et M'goun au Maroc (Akdim, 1991), mais elle n'est cependant pas atteinte en été dans le bassin étudié. L'augmentation des teneurs en nitrate pendant les périodes d'activité agricole peut s'expliquer par l'utilisation des engrais ammoniac-nitriques. En effet, dans l'interaction du nitrate d'ammonium (NH_4NO_3) avec le complexe absorbant du sol, NH_4^+ est absorbé par le sol tandis que NO_3^- reste dans la solution et contribue à l'acidité des eaux (Mercier 1975) et par conséquent à la dissolution éventuelle du CaCO_3 .

L'utilisation des engrais phosphatés enrichit les eaux en orthophosphates (Alibou 2002). Ces derniers forment d'une part des complexes avec les ions Ca et inhibent d'autre part la précipitation biologique de la calcite. Cette inhibition se fait pour des concentrations supérieures à 0,05 mg/l (Akdim 1991). Le rôle de ces micro-organismes dans l'appréciation de la qualité et de l'état de la pollution des eaux a été montré par d'autres auteurs (Gosselin, 1973).

4.3. La pollution des eaux de l'oued Maarouf par les déchets solides

Ces fortes concentrations en éléments dissous peuvent provenir pour une part de la pollution des eaux et cette dernière contribue à limiter la précipitation des sels.

On peut ajouter à ceci l'importance des rejets de type organique qui forment des agents polluants (photos 1). Dans la région, il s'agit surtout de margines déversées par les nombreuses huileries. Cette pollution organique s'aggrave au cours de la saison sèche (Gebrati et Nejmedine 2002), parallèlement à la diminution des débits de l'oued Maarouf qui s'accompagne d'une réduction de l'autoépuration. Cette situation conduit à une raréfaction de l'oxygène dissous et au dégagement de très mauvaises odeurs durant l'été.

Cette pollution ralentit le développement des bactéries favorables à la précipitation des carbonates, en favorisant les Cyanophycées au détriment des organismes encroûtants (Gourari *et al.* 2000).

En revanche, la faiblesse du Cl peut s'expliquer par l'absence d'usine rejetant du chlore dans le bassin versant de l'oued Maarouf. On ne compte pas d'usine de produit de pesticide, ni d'usine de fabrication de produit à base de chlore dans la zone d'étude ou dans les communes contiguës.



Photo 1 : La pollution par les déchets organiques au niveau d'Eloueslatia dans l'oued Maarouf.

5. Conclusion

L'évaluation de la qualité des cours d'eau repose à la fois sur l'analyse physico-chimique de l'eau et des sédiments, sur l'analyse biologique de ces écosystèmes, sur la morphologie et l'hydrologie des cours d'eau. Ces approches sont complémentaires et indispensables. Pendant longtemps l'accent a été mis sur la qualité physico-chimique de l'eau permettant de mettre en évidence des pollutions. Cela ne suffit pas pour dire qu'un cours d'eau est en état de bon fonctionnement ou non. En effet, le milieu physique ou l'habitat (berges, lit) contribuent également au bon fonctionnement des cours d'eau. Le cadre environnemental du bassin versant de l'oued Maarouf, très favorable à une forte érosion, explique la concentration élevée en matières en suspension et en éléments dissous des eaux des oueds.

Les résultats acquis dans cette étude montrent que les analyses d'eau dans le bassin versant de l'oued Maarouf constituent un indice important permettant d'apprécier et d'évaluer l'impact anthropique sur le déséquilibre de l'environnement dans cette région de la Tunisie centrale. Nous avons montré qu'il y a une bonne communication amont/aval en terme chimique dans le bassin versant de l'oued Maarouf et que cette communication est favorisée par les aménagements hydrauliques (Lahmar 2010). Les eaux du bassin versant présentent une variation temporelle et spatiale en minéralisation. Le dosage des éléments chimiques ainsi que le calcul des indices de saturation en calcite et dolomite justifient le processus de la formation des dépôts travertineux à l'entrée du lac de Nebhana.

Remerciements : Cet article a bénéficié des suggestions et critiques constructives de Frédéric HOFFMANN.

6. Références bibliographiques :

- Akdim B (1991)** Genèse des carbonates terrestres dans la dépression d'Ouarzazate (Maroc méridional). Thèse Ph. D, École des Études Supérieures et de la Recherche, Université d'Ottawa, Canada, 304 p.
- Alibou J (2002)** Impacts des changements climatiques sur les ressources en eau et les zones humides du Maroc. Actes Table Ronde Régionale en Méditerranée. Athènes, p. 10-11.
- Bahri A, EL Amami S et Gallali T (1983)** Évolution géochimique des eaux et des solutions interstitielles au cours de leur concentration en Tunisie centrale. International Association of Hydrological Sciences Publication 146 :197-208.
- Bakalowicz M (1979)** Contribution de la géochimie des eaux à la connaissance de l'aquifère karstique et à la karstification. Thèse d'État, Laboratoire souterrain du CNRS, Moulis, 269 p.
- Ben Abdallah R (2006)** – Études géochimiques de la nappe phréatique d'Elalam Tunisie centrale, Mémoire de Master 2, ENIS, Sfax, 132 p.
- Ben Ammar S, Jeribi L, Favreau G, Zouari K, Leduc C, Oi M, M'barek J, Beji R (2009)** Évolution de la recharge de la nappe phréatique de la plaine de Kairouan (Tunisie centrale) déduite de l'analyse géochimique. *Sécheresse* 20(1) : 87-95.

- Bocquet V (1993)** Étude du lac collinaire d'El Ouazine. Bilan hydrologique. Impact socio-économique. Rapport scientifique. Multigr., ENSAR-ORSTOM, Tunis, 52 p.
- Boughriba M (2006)** Extension spatiale de la salinisation des ressources en eau et modèle conceptuel des sources salées dans la plaine des Triffa (Maroc nord-oriental). *C.R. Geoscience* 338 : 768–774.
- Bouhlassa S, Alechcheikh C et Kabiri L (2008)** Origine de la minéralisation et de la détérioration de la qualité des eaux souterraines de la nappe phréatique du Quaternaire du bassin-versant de Rheris (Errachidia, Maroc). *Sécheresse* 19(1) : 67-75.
- Chemseddine F, Abderrahmane B, Abdelkader R et Salameh E (2009)** Caractérisation hydrogéochimique des eaux souterraines du complexe aquifère Morsot-Laouinet (Région Nord de Tébessa, Sud-Est algérien). *Afrique Science* 5(2) : 217–231.
- Delhoume JP (1980)** L'épigénie calcaire en milieu méditerranéen semi-aride (Jebel Semmana-Tunisie centrale). Office de la Recherche scientifique et technique, Tunis, 10 p.
- Drever J F (1997)** The geochemistry of natural waters. 3^{ème} édition, New York Prentice Hall INC, 379 p.
- El Morhit M, Fekhaoui M, Serghini A, El Blidii S, El Abidi A, Yahyaoui A et Jbilou M (2008)** Impact de l'aménagement hydraulique sur la qualité des eaux et des sédiments de l'estuaire du Loukkos (côte atlantique, Maroc). *Bulletin de l'Institut Scientifique*, Rabat, section Sciences de la Terre, 30 : 39-47.
- Fournet A (1974)** Sols de Tunisie : étude pédologique de la Dorsale tunisienne. Bulletin de la Division des Sols, Ministère de l'Agriculture, Tunis, 179 p.
- Gartet A, et Garcia C (2001)** Hydrochimie des eaux, dissolution spécifique et salinité des cours d'eau dans le bassin versant de l'oued Lebène (Préfrif Central, Maroc septentrional). *Papelès de Geografia*, 34 : 143-161.
- Gebrati L, et Nejmedine A (2002)** Traitement photocatalytique et biodégradabilité des effluents textiles de la ville de Marrakech. Actes du Colloque International sur l'eau dans le bassin Méditerranéen: Ressources et Développement Durable. Monastir (Tunisie), 80-85 (330-334 p).
- Gosselin A (1973)** Exportation de produits dissous sur parcelles expérimentales d'érosion. Rapport de B.A., Département de géographie, Université de Sherbrooke, 22 p. (P. Clément).
- Gourari L, Alaoui M, Boushaba A et Fedan B (2000)** Variations des paramètres physico-chimiques des eaux de l'oued Aggai : significations géo-environnementales et conséquences sur la précipitation des travertins actuels (Causse de Sfrou, Moyen-Atlas-Maroc). *Journal of African Earth Sciences*, 30(2) : 283-293
- Hoffmann F et Pelledrin JC (1996)** Méthodologies hydrochimiques. *Travaux du Laboratoire de Géographie physique appliquée*, Université Bordeaux 3(14) : 13-79.
- Kingumbi A (1999)** Bilan et modélisation de la retenue du Barrage d'El Haouareb. Mémoire de diplôme d'études approfondies à l'ENIT, 110 p. + annexes.
- Lahmar K, Karray MR et Larue JP (2010)** Mesure de l'érosion et efficacité de l'aménagement des versants dans le bassin de l'oued Maarouf (Tunisie centrale). *Revue des Régions Arides*, n° sp. 24, p. 982-988.
- Markovics R, Kanduc T, Szramek K, Golobocanin D, Mmilacic R et Ogrinc N (2010)** Chemical dynamics of the Sava riverine system. *Journal of Environmental Monitoring*, vol. 12, p. 2165–2176.
- Mercier C (1975)** Environnement climatique de la région de Lac Mégantic. Rapport de B.A., Département de géographie, Université de Sherbrooke, 59 p. (J.-J. Boisvert).
- Meybeck M (1986)** Composition chimique des ruisseaux non pollués en France. *Sciences géologiques Bulletin*, 39 : 3-77.
- Mougou R, Mousour M, Iglesias A, Chebbi RZ et Battaglini A (2011)** Climate change and agricultural vulnerability: a case study of rain-fed wheat in Kairouan, Central Tunisia. *Regional Environmental Change* 11(1) : 137-142.
- Nasseh A et Verague J (1996)** Variabilité saisonnière des flux géochimiques dans un petit bassin versant tempéré : exemple de l'Orne (Calvados-France). *Géomorphologie : Relief, Processus, Environnement* 3 : 57-92.
- Ollivier V, Roiron P et Guendon JL (2009)** Milieux, processus, faciès et dynamiques morphosédimentaires des formations travertineuses quaternaires en relation avec les changements climatiques et les occupations humaines entre Méditerranée et Caucase. *Studie de Preistorie* 5 : 15-35.
- Parkhurst D Let Appelo CAJ (1999)** User's guide to PHREEQC version2: a computer program for speciation, batch-reaction, one dimensional transport and inverse geochemical calculations. *USGS, Water-resources investigations report* 99- 4259.
- Pedly M, Rogerson M et Middleton R (2009)** Freshwater calcite precipitates from in vitro mesocosm flume experiments: a case for biomediation of tufas. *Sedimentology*, vol. 56, p. 511-527.
- Plummer LN, Jones BF et Trusedall AH (1984)** WATEQ-A fortran IV version of WATEQ, A computer program for calculating chemical equilibrium of natural waters 1976 Revised 1978, 1984 Washington D.C .U.S Geol-Surv.-Water Res, n°76.
- Vaudour J (1984)** Les travertins de piémont : contribution à l'étude des géosystèmes karstiques méditerranéens, Montagnes et piémonts, Toulouse, Actes du colloque en hommage à F. Taillefer, 1982, p. 349-362.