



Université Sidi Mohammed Ben Abdellah

Faculté des Sciences et Techniques

www.fst-usmba.ac.ma



Année Universitaire : 2014-2015



Master Sciences et Techniques : Hydrologie de Surface et Qualité des Eaux

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'Obtention du Diplôme de Master Sciences et Techniques

**Etude hydrogéologique et hydrochimique des principales sources de
la dorsale calcaire méridionale, Ras El Ma et Chrafate
(Chefchaouen, Maroc)**

Présenté par:

Tarek AOURAGH

Encadré par:

Pr. Mina AMHARREF

Pr. Abdel-Ali CHAOUNI

Soutenu le 25 juin 2015 devant le jury composé de:

Pr. Mina Amharref

Pr. Abderrahim Lahrach

Pr. Lahcen Benaabidate

Pr. Mohammed Benabdelhadi

Pr. Abdel-Ali Chaouni

Stage effectué au : Laboratoire
Géoinformation et Aménagement du
Territoire, FST-Tanger en collaboration avec
l'ABHL





Université Sidi Mohammed Ben Abdellah

Faculté des Sciences et Techniques

www.fst-usmba.ac.ma



Mémoire de fin d'études pour l'obtention du Diplôme de Master Sciences et Techniques

Nom et prénom: Tarek Aouragh

Année Universitaire : 2014/2015

Titre: Etude hydrogéologique et hydrochimique des sources principales de la dorsale calcaire méridionale (Ras El Ma et Chrafate), Chefchaouen, Maroc

Résumé

Le travail qui fait objet de cette recherche concerne à l'hydrogéologie des sources karstiques situées dans le chaînon méridional, précisément aux alentours de la ville de Chefchaouen.

Une approche multidisciplinaire a été choisie pour améliorer les connaissances de leur fonctionnement. Premièrement, comprendre le contexte climatique de la zone d'étude et aussi de point de vue géologique, savoir quelles sont les principales familles de directions des fractures. En effet, la direction dominante des fractures correspond à la direction NE-SW qui coïncide également à l'orientation dominante du réseau hydrographique, c'est pour avoir une idée sur la nature des relations qui existe entre les différentes unités de la zone d'étude.

La partie qui fait suivre l'interprétation tectonique fait objet de l'étude hydrodynamique, une des bases de la connaissance du fonctionnement des systèmes karstique pour dresser des tableaux synthétiques des caractéristiques hydrogéologiques des sources (Ras El Ma et Chrafate), alors que l'étude des tarissement nous a révélé des coefficients qui varient avec les débits de drainage et nous a permis aussi de calculer les volumes dynamiques au niveau des 2 sources. D'après les résultats obtenus, le volume dynamique de Ras El Ma est très grand par rapport au volume dynamique de Chrafate.

L'étude des caractéristiques physico-chimiques des eaux souterraines a été menée dans un cadre local par un suivi hydrochimique sur un cycle hydrologique. Ainsi, l'interprétation de ces paramètres a montré une stabilité physico-chimique tout le long de l'année et une minéralisation moyenne avec un faciès bicarbonaté calcique, peu magnésien pour la source de Ras El Ma. Cette stabilité est probablement due aux faibles vitesses d'écoulement des systèmes karstiques et à un réseau de drainage souterrain peu développé.

Cette étude montre que globalement les eaux des sources sont en bon état et de bonne qualité. Toutefois, des menaces de pollution risquent de contaminer les aquifères karstiques à cause des actions de déboisement qui favorisent l'érosion des sols, les glissements de terrain et par conséquent peuvent charger les eaux souterraines en matières en suspension. Les engrais disséminés pour l'agriculture peuvent à eux aussi s'infiltrer et se concentrer dans la zone noyée de l'aquifère.

Mots clés: Hydrogéologie, Hydrochimie, Dorsale calcaire, méridionale, sources, Chefchaouen.

RESUME

Le travail qui fait objet de cette recherche concerne à l'hydrogéologie des sources karstiques situées dans le chaînon méridional, précisément aux alentours de la ville de Chefchaouen.

Une approche multidisciplinaire à été choisie pour améliorer les connaissances de leur fonctionnement. Premièrement, comprendre le contexte climatique de la zone d'étude et aussi de point de vue géologique, savoir quelles sont les principales familles de directions des fractures. En effet, la direction dominante des fractures correspond à la direction NE-SW qui coïncide également à l'orientation dominante du réseau hydrographique, c'est pour avoir une idée sur la nature des relations qui existe entre les différentes unités de la zone d'étude.

La partie qui fait suivre l'interprétation tectonique fait objet de l'étude hydrodynamique, une des bases de la connaissance du fonctionnement des systèmes karstique pour dresser des tableaux synthétiques des caractéristiques hydrogéologiques des sources (Ras El Ma et Chrafate), alors que l'étude des tarissement nous a révélé des coefficients qui varient avec les débits de drainage et nous a permis aussi de calculer les volumes dynamiques au niveau des 2 sources. D'après les résultats obtenus, le volume dynamique de Ras El Ma est très grand par rapport au volume dynamique de Chrafate.

L'étude des caractéristiques physico-chimiques des eaux souterraines a été menée dans un cadre local par un suivi hydrochimique sur un cycle hydrologique. Ainsi, l'interprétation de ces paramètres a montré une stabilité physico-chimique tout le long de l'année et une minéralisation moyenne avec un faciès bicarbonaté calcique, peu magnésien pour la source de Ras El Ma. Cette stabilité est probablement due aux faibles vitesses d'écoulement des systèmes karstiques et à un réseau de drainage souterrain peu développé.

Cette étude montre que globalement les eaux des sources sont en bon état et de bonne qualité. Toutefois, des menaces de pollution risquent de contaminer les aquifères karstiques à cause des actions de déboisement qui favorisent l'érosion des sols, les glissements de terrain et par conséquent peuvent charger les eaux souterraines en matières en suspension. Les engrais disséminés pour l'agriculture peuvent à eux aussi s'infiltrer et se concentrer dans la zone noyée de l'aquifère.

Mots clés: Hydrogéologie, Hydrochimie, Dorsale calcaire, méridionale, sources, Chefchaouen.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Mesures morphométriques des principaux cours d'eau	14
Tableau 2. Débits moyens mensuels de la source Ras El Ma (Sources ABHL/ Traitement Boulaajoul, 2006)	26
Tableau 3. Hydrométrie du bassin de l'oued Ras El Ma (Sources ABHL/ Traitement Boulaajoul, 2006)	27
Tableau 4. Volumes dynamiques de la source Ras El Ma	30
Tableau 5. Volumes dynamiques de la source Chrafate	32

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Cadre de la zone d'étude	3
Figure 2. MNT de la zone d'étude avec localités	4
Figure 3. Situation des postes pluviométriques sur la carte topographique au 1/500 000	6
Figure 4. Gradient thermique altitudinal	8
Figure 5. Courbes ombrothermiques des 5 stations (Tétouan, Bab Taza, Ben Karrich, Stehat et Nakhla	9
Figure 6. Moyenne mensuelle du nombre d'heures d'ensoleillement au niveau de la station Romane.....	10
Figure 7. Direction moyenne du vent au niveau de la station Ben Karrich	10
Figure 8. Comparaison multidade de l'indice de Végétation dans la province de Chefchaouen sur image Landsat (ETM+, 2001 et TM, 1987)	12
Figure 9. Réseau de drainage de la Dorsale calcaire	15
Figure 10. Réseau de drainage de la zone d'étude.....	16
Figure 11. Carte structurale de l'arc de Gibraltar avec le Rif et la Cordillère bétique.....	17
Figure 12. Carte de la géologie régionale du Rif (PIQUE, 1994)	18
Figure 13. Schéma structural de la dorsale calcaire (Nold et al., 1981).....	20
Figure 14. Coupe structurale synthétique de la nappe du J. Tissouka (El Kadiri 2010, document inédit).....	21
Figure 15. Synthèse de la disposition structurale schématique 3D (El Kadiri 2010, document inédit)	22
Figure 16. Carte de situation des failles dans la Dorsale calcaire (SOSSEY, 2005).....	24
Figure 17. Variations des débits moyens mensuels de la source Ras El Ma (Sources ABHL/ Traitement Boulaajoul, 2006)	26
Figure 18. Analyse de la décrue et du tarissement (BAKALOWICZ, 1999)	28
Figure 19. Courbe des débits initiaux et les coefficients de tarissement de Ras El Ma.....	30
Figure 20. Courbe des débits initiaux et les coefficients de tarissement de la source Chrafate	31
Figure 21. Variations de la température de l'eau de la source Chrafate	35
Figure 22. Variations du pH des eaux de la source Chrafate en fonction de la pluviométrie ..	36
Figure 23. Variations de la conductivité électrique et du bicarbonate des eaux de la source Chrafate	37
Figure 24. Variations temporaires du rapport Ca^{2+} / Mg^{2+}	37

Figure 25. Variations temporaires de la minéralisation de la source Chrafate	38
Figure 26. Diagramme de Piper de l'analyse des eaux de la source Chrafate	39
Figure 27. Evolution temporaire du pH de la source Ras El Ma	40
Figure 28. Variations de la conductivité électrique et des bicarbonates des eaux de la source Ras El Ma	41
Figure 29. Evolution temporaire du rapport $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ de la source Ras El Ma.....	41
Figure 30. Evolution temporaire de la minéralisation de Ras El Ma	42
Figure 31. Diagramme de Piper de la source Ras El Ma	43
Figure 32. Diagrammes Star avec évolution temporaire de la source Ras El Ma.....	44

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE 1

CHAPITRE I : PRESENTATION GENERALE DU CADRE PHYSIQUE DE LA ZONE D'ETUDE 3

1. Situation géographique de l'aire d'étude.....	3
2. Contexte climatique.....	5
2.1. Précipitations.....	5
2.2. Température.....	7
2.3. Courbes ombrothermiques.....	8
2.4. Ensoleillement.....	10
2.5. Vent.....	10
2.6. Evaporation.....	11
2.7. Végétation.....	11
3. Contexte hydrologique.....	Erreur ! Signet non défini.
4. Contexte géologique.....	17

CHAPITRE II : FONCTIONNEMENT HYDRODYNAMIQUE DE LA DORSALE CALCAIRE AU NIVEAU DES SOURCES RAS EL MA ET CHRAFATES 25

1. Source Ras El Ma.....	25
1.1. Présentation.....	25
1.2. Hydrogéologie.....	25
1.3. Caractéristiques de l'aquifère.....	27
1.4. Tarrisement.....	28
1.5. Calcul du volume dynamique.....	30
2. Source Chrafate.....	31
2.1. Présentation et Hydrogéologie.....	31
2.2. Tarrisement de la source Chrafate.....	31
2.3. Calcul du volume dynamique.....	32

CHAPITRE III : ANALYSES GEOCHIMIQUES 33

1. Introduction.....	33
2. Source Chrafate.....	35
2.1. Paramètres physiques.....	35
2.2. Analyse chimique.....	36
3. Source Ras Lma.....	40

3.1. Paramètres physiques	40
3.2. Analyses chimiques.....	40
Conclusion générale :	45
Références Bibliographiques	47

INTRODUCTION GENERALE

L'intérêt pour les ressources hydriques devient, ces dernières décades, de plus en plus croissant compte tenu de leur importance non seulement pour la survie et le développement durable de l'être humain, mais aussi pour assurer un juste équilibre des écosystèmes. Au Maroc, la question des ressources en eaux se pose avec lucidité. Pourtant, l'état marocain adopte, 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 survécu à la suite d'une pression démographique sur cette ressource; raison pour laquelle les problèmes de pénurie d'eau s'aperçoivent dans plusieurs secteurs de Royaume surtout ceux qui connaissent des apports pluviométriques très bas.

C'est ainsi que les eaux souterraines s'entachent d'un rôle prépondérant pour atténuer ce fléau surtout durant les années de sécheresse, et répondre à certains besoins locaux ou régionaux. En effet, les eaux souterraines qui proviennent des aquifères karstiques au Maroc représentent 70 % des ressources en eau (Aboufirassi et al., 1991).

Pourtant, les nappes karstiques, se trouvant au SE de la ville de Chefchaouen, constituent le plus important réservoir d'eau du Rif septentrional ; assurant ainsi l'approvisionnement en eau potable et d'irrigation pour toute la province de Chefchaouen. Les volumes des réserves hydriques obtenus à partir des courbes de récession des sources de Ras El Maa, Maggo et chrafate sont estimés à environ 10 millions de m³. Ce type de karst, encore très peu ou pas du tout exploité, 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.

Différentes approches et techniques d'études ont été utilisées pour aborder ces systèmes karstiques. En effet, les objectifs de ce travail de recherche visent à une meilleure compréhension du fonctionnement hydrogéologique des aquifères de la dorsale calcaire méridionale afin d'évaluer les ressources disponibles et la quantité des réserves.

Cette étude est réalisée en trois chapitres qui sont réparties comme suit après une introduction générale :

Premier Chapitre :

Ce chapitre est concentré sur la présentation générale du cadre physique de la zone étudiée. Il traite brièvement la situation géographique, contexte climatique, et géologique du domaine étudié.

Deuxième chapitre

L'étude du fonctionnement hydrodynamique de la zone d'étude, traite de son fonctionnement hydrogéologique, par une analyse des débits moyenne mensuels et calculer l'hydrométrie du bassin et en dernier lieu par l'étude des tarissements pour nous permettre d'évaluer les réserves des stocks dynamiques et l'aptitude de la nappe à affronter les périodes de sécheresse.

Troisième chapitre

L'analyse hydrochimique fait l'objet de cette partie dans laquelle est traitée par plusieurs méthodes, l'évolution spatio-temporelle des faciès des eaux des principales sources .

et une Conclusion générale

CHAPITRE I : PRESENTATION GENERALE DU CADRE PHYSIQUE DE LA ZONE D'ETUDE

1. Situation géographique de l'aire d'étude

Le chaînon dont l'étude hydrogéologique est entreprise fait partie du domaine interne de la chaîne rifaine septentrionale. Il appartient à la dorsale calcaire externe située d'une part entre Oued Laou et l'accident de Jebha-Chrafate et d'autre part à l'ouest de l'accident de Jbel Lakraâ (figure 1). Régionalement, il se situe au SE de la ville de Chefchaouen (dorsale calcaire méridionale) et à l'Est de la route nationale principale P. 2 qui relie les villes de Chefchaouen et d'Al Hoceima.

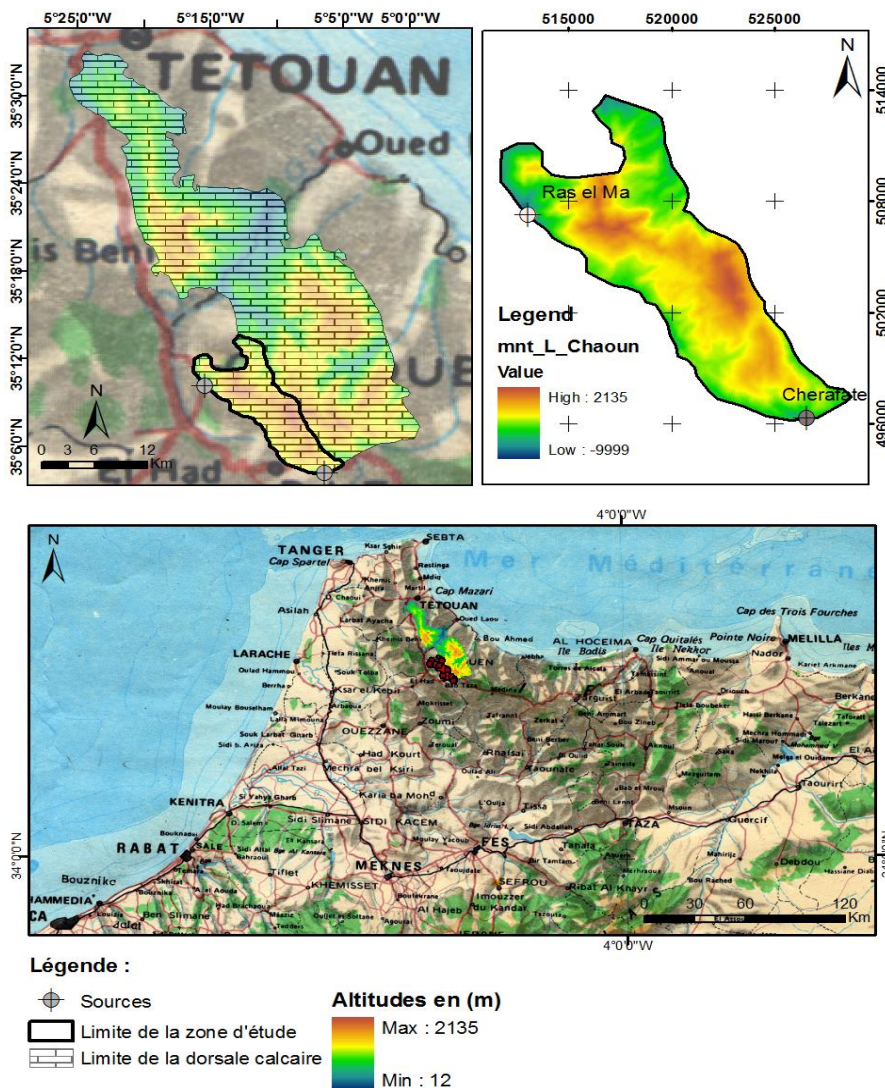
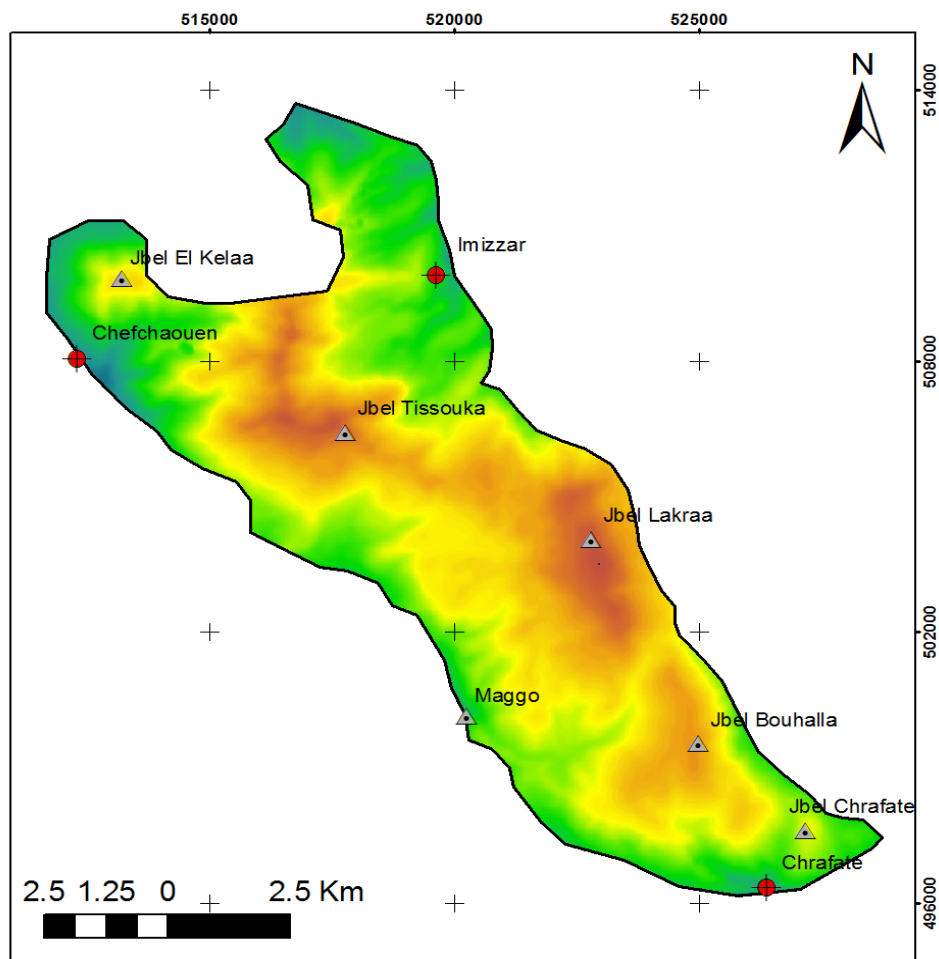


Figure 1. Cadre de la zone d'étude

Le secteur d'étude couvre une superficie d'environ 100 Km² avec des falaises raides et des crêtes très élevées qui dépassent les 2000 m d'altitude comme les cas de la crête de Jbel Tissouka (2122 m) et celle du Jbel Lakraâ (2159 m). Le périmètre de la zone d'étude est de l'ordre de 65,7 km dont la largeur maximale située dans la partie septentrionale est de l'ordre de 8,5 km. Tandis que la longueur maximale est de l'ordre de 21,3 km. Quant à la pente, 55 % des terrains à l'affleurement du secteur d'investigation présentent une pente de 10 à 30 %. (figure 2)



Légende :

Localité	▲ Jbel El Kelaa	● Chrafate	Altitudes en (m) Max: 2135 Min : 12
▲ Maggo	▲ Jbel Chrafate	● Chefchaouen	
▲ Jbel Tissouka	▲ Jbel Bouhalla		
▲ Jbel Lakraa	● Imizzar		

Figure 2. MNT de la zone d'étude avec localités

2. Contexte climatique

La position de la zone d'étude entre les latitudes Nord 35°20' et 35°40', qui est théoriquement une zone des hautes pressions, est imposée par les pressions régionales représentées par les hautes pressions des Açores qui forment le pivot essentiel de la circulation. Leurs avancées et leurs reculées saisonnières en latitudes déterminent un climat de type méditerranéen sur l'ensemble du Rif septentrional avec deux saisons bien distinctes : une saison pluvieuse et fraîche qui s'étale du mois de Novembre jusqu'au mois d'Avril et une deuxième saison estivale chaude et sèche entre le mois de Mai et le mois d'Octobre. La première est influencée par l'arrivée des masses d'air polaires et caractérisée par le recul de la haute pression vers des latitudes plus basses et/ou des valeurs des pressions atmosphériques plus faibles pour permettre à la Dorsale calcaire d'encaisser des précipitations records à l'échelle nationale et d'autre part la saison chaude et sèche de l'été marquée par l'avancée des hautes pressions vers des latitudes plus élevées et/ou des pressions atmosphériques plus élevées qui empêchent l'arrivée des masses d'air froides et humides. La région connaît alors des saisons humides avec des précipitations annuelles relativement élevées par rapport aux autres régions du pays (EL GHARBAOUI, 1981).

2.1. Précipitations

La chaîne rifaine possède une importante altitude qui l'expose aux influences pluviométriques et lui permet de recevoir des précipitations très élevées à l'échelle nationale, elle atteint une valeur record de 4019.6 mm à Ketama en 1962. Les précipitations neigeuses sont fréquentes et peuvent descendre jusqu'à des altitudes inférieures à 1000m, et durer les points culminants jusqu'à la fin du mois de Mai peuvent parfois même le dépasser. La Dorsale calcaire possède ainsi des aquifères qui présentent plusieurs particularités lui conférant une place prestigieuse parmi les différentes ressources en eaux dans la région.

La Dorsale calcaire reçoit des précipitations moyennes interannuelles qui varient entre 1000 et 2000 mm sur les hautes altitudes, elles peuvent descendre jusqu'à 400 mm du côté de la ville de Jebha située à l'Est de la zone étudiée. Cette influence se manifeste par la répartition spatiale de la pluviométrie qui diminue de l'Ouest vers l'Est et du Nord vers le Sud.

Les précipitations varient apparemment en fonction de la position et de l'exposition de la zone réceptrice et en fonction de l'origine des perturbations climatiques. La répartition des postes pluviométriques sur la zone d'étude, en particulier, n'est pas adéquate pour nous

révéler les pluies reçues et pour nous permettre de faire des analyses en composantes principales (ACP) qui nous permettront de déceler la relation entre les pluies reçues d'une part et les coordonnées des postes pluviométriques d'autre part. Dans la (figure3) nous présentons la répartition des postes pluviométriques situés dans le voisinage de la Dorsale calcaire.

Les mois les plus secs sont toujours les mois de Juillet et Août, alors que les maxima pluviométriques sont enregistrés généralement entre les mois de Décembre et de Janvier.

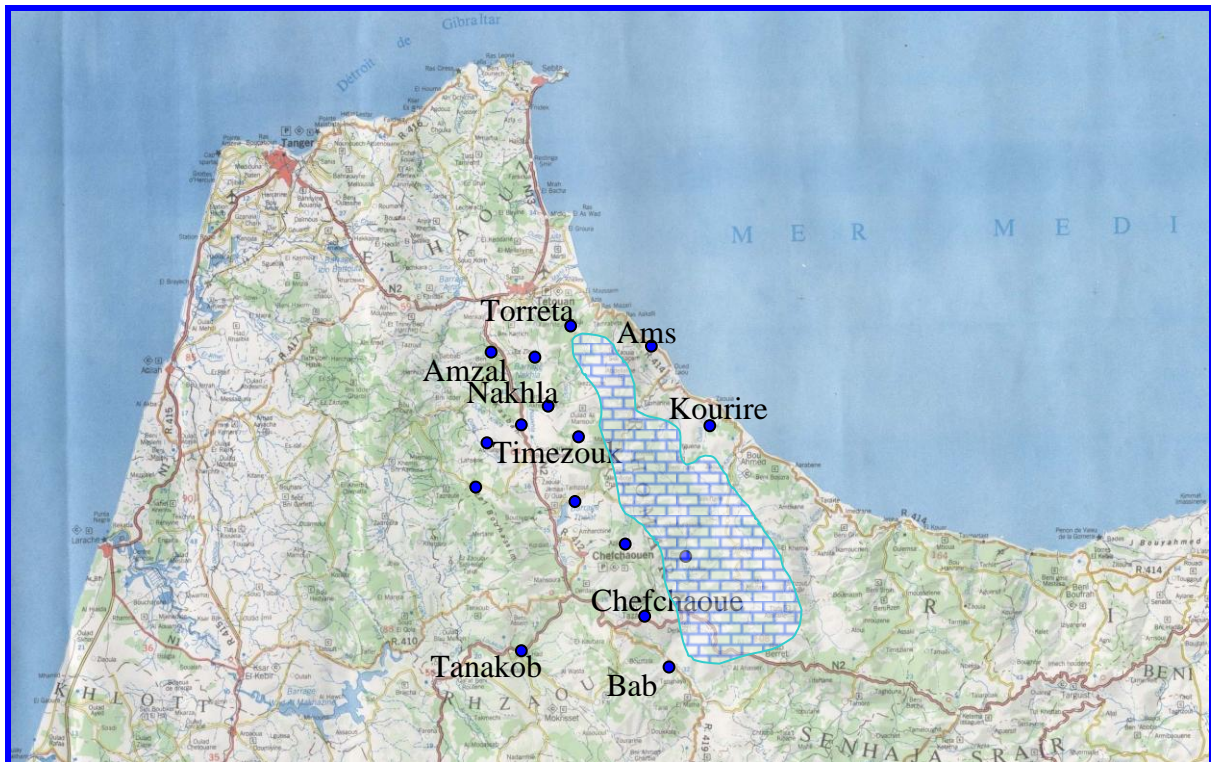


Figure 3. Situation des postes pluviométriques sur la carte topographique au 1/500 000

L'importance de la pluviométrie, le caractère orographique, le contexte topographique et les formations géologiques de la région d'étude, font que les eaux superficielles constituent l'essentiel des ressources en eau de la région Nord Ouest du pays avec un patrimoine hydrique de l'ordre de 4.3 Mm³/an soit 20 % du potentiel national. La concentration de la période pluvieuse en six mois est encore plus accusée au pas de temps journalier et horaire. Des averses de fortes intensités sont souvent enregistrées et génèrent parfois des crues violentes durant les périodes pluvieuses, citons par exemple : la crue des bassins de Fnidaq du 19 Décembre 19990 avec un débit spécifique de 20 m³/s/Km² qui a provoqué l'inondation du centre commercial de la ville et qui a causé des dégâts humains et matériels importants, la

crue l'Oued Laou du 6 février 1998, qui a donné un débit de pointe de 2550 m³/s au niveau de la station hydrologique Kouriren et la crue du 26 Décembre 2000 au niveau de la station hydrologique Torreta qui a un générée un débit de 3550 m³/s.

2.2. Température

L'influence des deux mers est nettement apparente en zone littorale. Cette action modératrice pénètre assez bien dans la chaîne calcaire. Les diverses crêtes et les vallées profondes créent des conditions thermiques particuliers à l'intérieur de la zone d'étude.

Les stations qui mesurent ce paramètre climatique sont rares dans la zone d'étude, elles sont implantées à des altitudes relativement faibles et réparties comme suit : la station Ben Karrich avec une altitude de 18m, le barrage Nakhla avec une altitude de 210m et la station de Bab Taza avec une altitude de 860m qui a récemment démarré les mesures de ce paramètre

Cependant l'influence de la position et de l'exposition se combine pour identifier des microclimats locaux où le froid, le gel et la neige d'hiver s'opposent à la chaleur et à la sécheresse d'été. Les postes existants actuellement permettant l'évaluation des températures de la zone étudiée sont : le poste de Tétouan, de Ben Karrich, du barrage Nakhla et de Bab Taza.

La représentation des températures moyennes mensuelles en fonction des altitudes des postes de mesures disponibles, avec des altitudes variant entre 3m pour Tétouan et 900m au niveau de Bab Taza figure nous permet de formuler la relation entre le gradient thermique en fonction de l'altitude. (figure 4)

Température= -0,0023 X Altitude + 25,041 pour Juillet le mois le plus chaud

Température= -0,0048 X Altitude + 18,379 La moyenne

Température= -0,0054 X Altitude + 12,599 pour Janvier le mois le plus froid

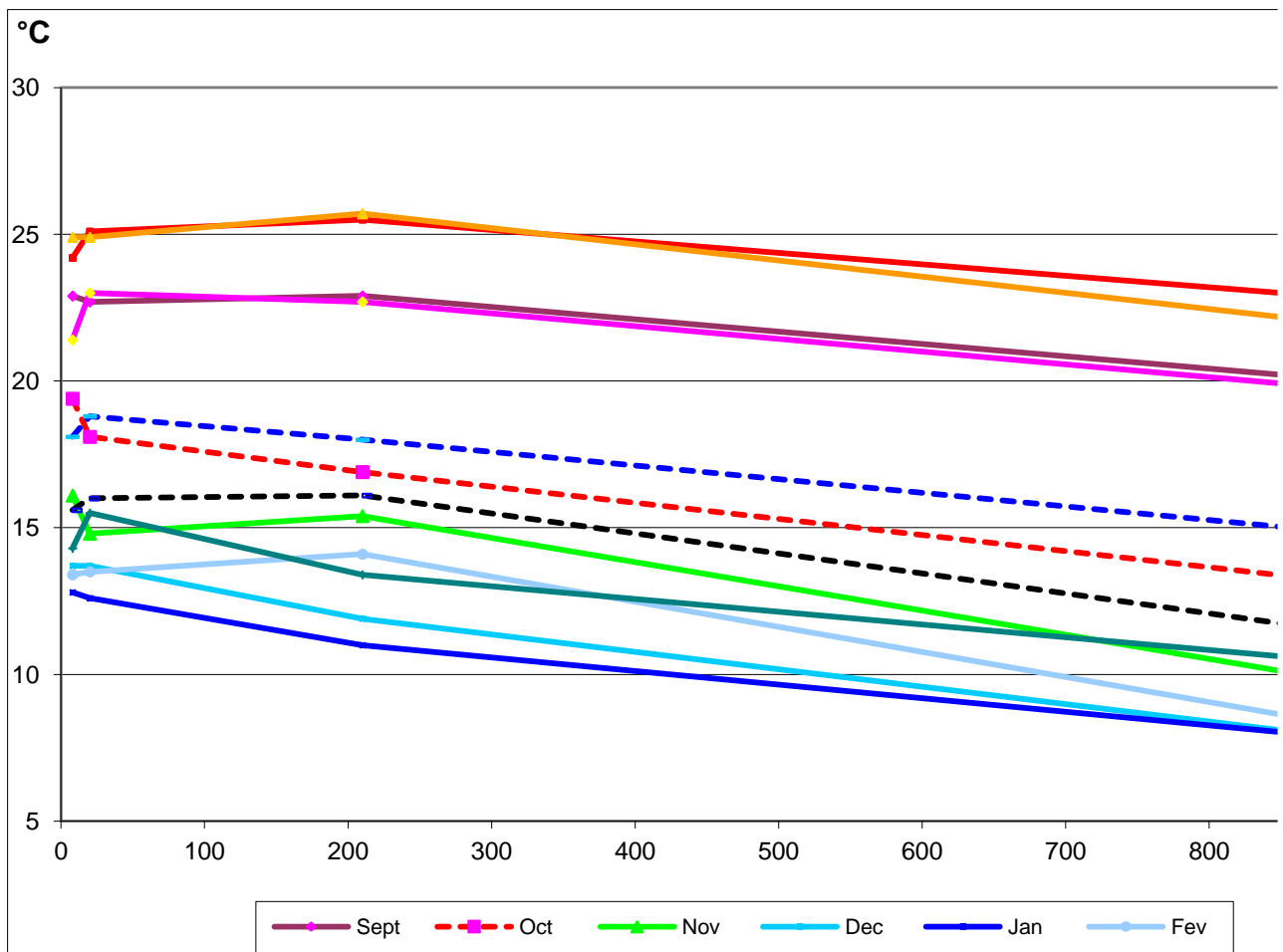


Figure 4. Gradient thermique altitudinal

Courbes ombrothermiques

La présentation des courbes ombrothermiques des stations limitrophes de la zone d'étude dans la (figure 5) prouve que la station de Tétouan possède cinq mois humides, quatre mois pour la station Ben Karrich, six mois environ pour Nakhla et Bab Taza alors que l'ombrotherme de Stehat est douteux et ne permet pas de faire un constat à cause des pluies moyennes mensuelles croissantes de Décembre à Avril et une température du mois de Janvier supérieure à celle de Décembre et de Février.

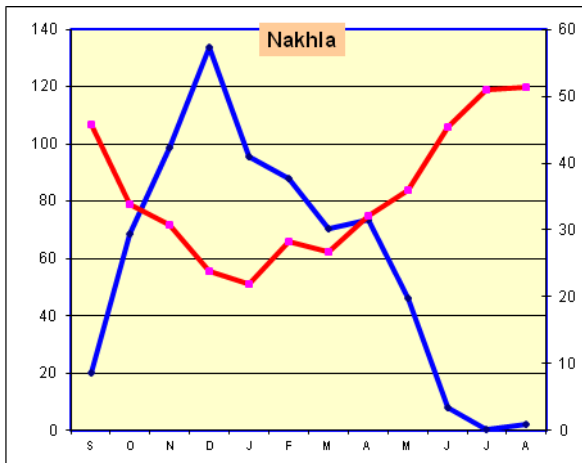
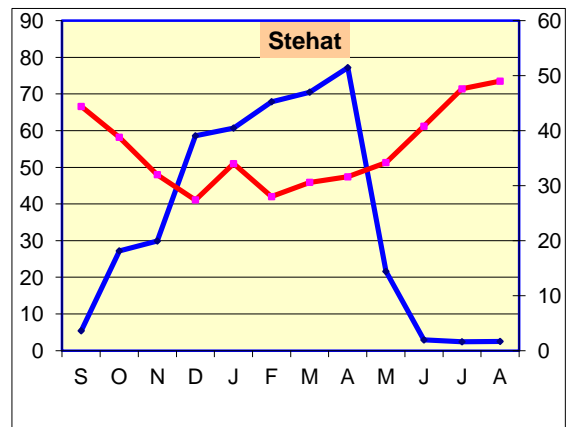
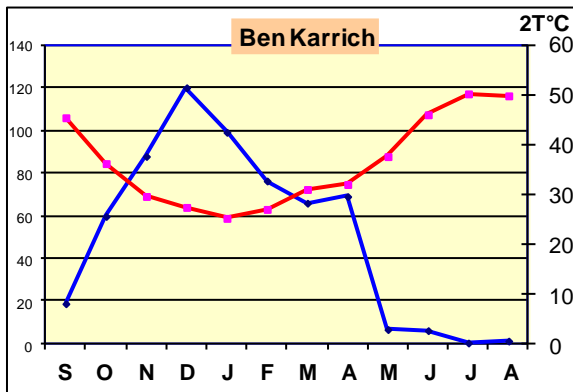
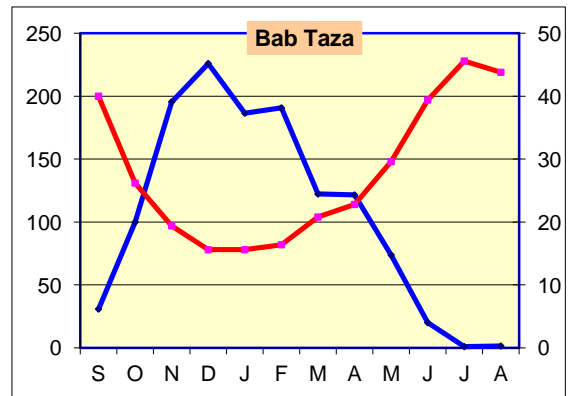
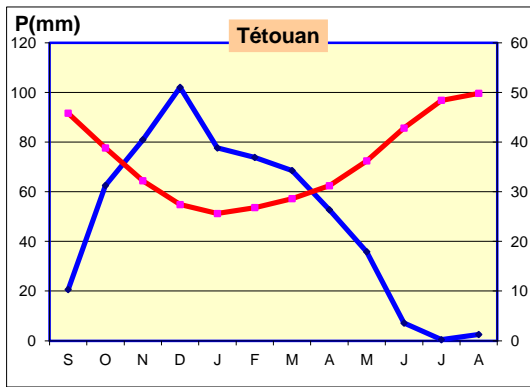


Figure 5. Courbes ombrothermiques des 5 stations (Tétouan, Bab Taza, Ben Karrich, Stehat et Nakhla)

2.3. Ensoleillement

Les moyennes mensuelles du nombre d'heures de soleil par jour enregistrées au niveau de la station Romane, la station climatologique la plus proche de la zone d'étude, sont représentées dans la (figure 6). on peut dire que les heures d'ensoleillement augmente dans la saison d'été jusqu'à 11 heures d'ensoleillement (mois juillet) alors que la saisons pluviale les heures diminue jusqu'à 5 heures d'ensoleillement par mois (janvier et décembre).

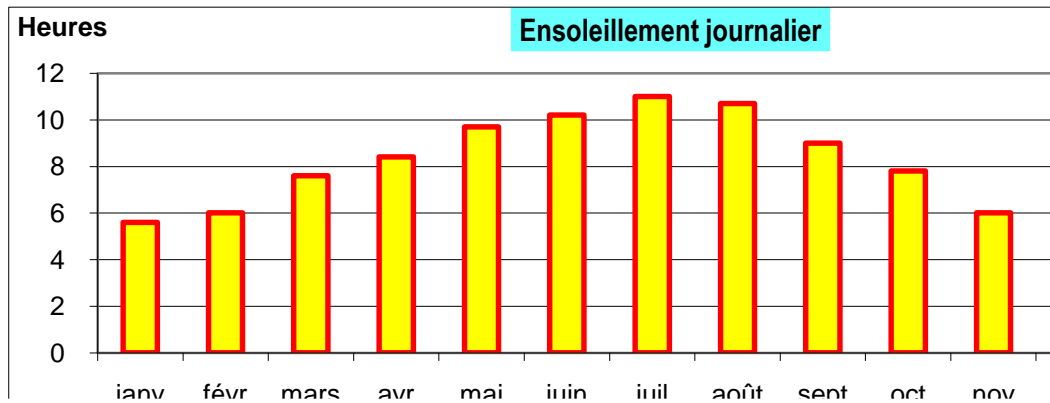


Figure 6. Moyenne mensuelle du nombre d'heures d'ensoleillement au niveau de la station Romane

2.4. Vent

La direction du vent est dictée par l'intensité des hautes pressions et par l'orographie. Le poste des mesures des directions du vent de la zone d'étude est la station Ben Karrich, les mesures réalisées entre les années 1990 et 2006 ont permis de tracer la direction moyenne du vent (figure 7).

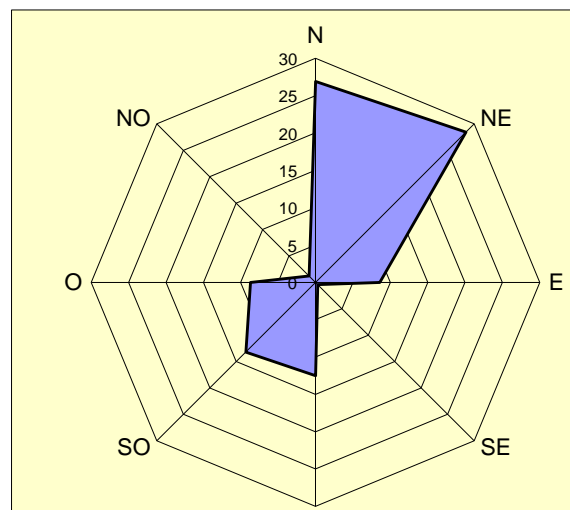


Figure 7. Direction moyenne du vent au niveau de la station Ben Karrich

Pour la la station Ben Karrich la rosace des vents montre la prédominance des vents de direction NE, N, ENE, W et WSW.

2.5. Evaporation

Sans chercher à déterminer la valeur de l'évapotranspiration (ETP), il est intéressant de connaître sa répartition temporelle et son intensité qui modifient le signal d'entrée du système constitué par la pluie. Sur les versants exposés aux vents de l'Ouest, les phénomènes d'évapotranspiration sont forts, d'autant plus que sur les bassins exposés aux vents de l'Est caractérisés par leurs hygrométrie relativement plus élevée. De ce fait, la pluie efficace est fortement modulée, entre autre, par une ETP variable en fonction des déficits hydriques saisonniers.

L'évaporation moyenne annuelle, mesurée par le bac carré dans la zone d'étude, varie entre 1400 mm et 1600 mm. Avec un minimum le mois de Janvier et un maximum en Juillet et Août. La saison sèche de Mai à Octobre totalise près de 75 % de l'évaporation annuelle qui se traduit par des pertes d'eau importantes dans les retenues des barrages.

Plusieurs formules permettent d'évaluer l'ETP à partir de différentes mesures climatologiques, la plus complète et la plus complexe est certainement la formule de Penman basée sur la notion du bilan énergétique. Cependant, le nombre de paramètres utilisés par cette formule (différentes températures, hygrométrie, rayonnement global, albédo, etc.) font que son emploi est rarement possible compte tenu de l'indisponibilité des mesures.

2.6. Végétation

La dorsale calcaire méridionale autrefois largement boisée a malheureusement perdu une grande partie de ses qualités forestières, mais elle a conservé la beauté de ses espaces qui ont une nature sauvage et majestueuse et offrent un véritable spectacle naturel. Elle a aussi pu préserver jusqu'à aujourd'hui une flore tout a fait exceptionnelle et qui est en voie de disparition. L'espèce *Abies Marocana*, derniers témoins d'un écosystème absolument unique sur le plan mondial, est aujourd'hui en grand péril (Benabid, 1982).

Le mode de vie de la population montagnaise est très difficile et se limite à l'agriculture de rares terrains sur les pentes et l'élevage de bétails dont essentiellement les bovins et les caprins. De ce fait, la forêt y reste un élément dominant du contexte économique local essentiellement à travers ses apports en énergie (bois de feu, bois de chauffage), en terrains arables et en matière d'alimentation pour les bétails (pâturage). Afin de savoir l'état de l'évolution de l'étendue de la végétation dans le secteur d'étude, on a fait appel à la télédétection en mesurant l'indice de végétation NDVI (Normalized Difference Vegetation

Index) des deux images satellitaires : l'image Landsat TM datée le 07-05-1987 et l'image Landsat ETM+ datée le 06-06-2001 prise pour la région de Chefchaouen.

Plus particulièrement, l'indice de végétation normalisé consiste à soustraire au canal infrarouge (où le couvert végétal a de fortes réflectances), le canal rouge (où les surfaces minéralisées ont de fortes réflectances). Le résultat d'un NDVI prend la forme d'une nouvelle image, la valeur de chaque pixel étant comprise entre 0 (sol nu) et 1 (couvert végétal maximal). C'est l'analyse de la palette de nuances qui s'étend entre ces valeurs extrêmes (très peu fréquentes) qui va renseigner l'observateur sur la densité du couvert végétal et la quantité de biomasse verte.

La réponse spectrale d'un couvert végétal dense est forte dans les longueurs d'ondes proche-infrarouges (à cause de l'activité chlorophyllienne) et faible dans les longueurs d'ondes rouges).

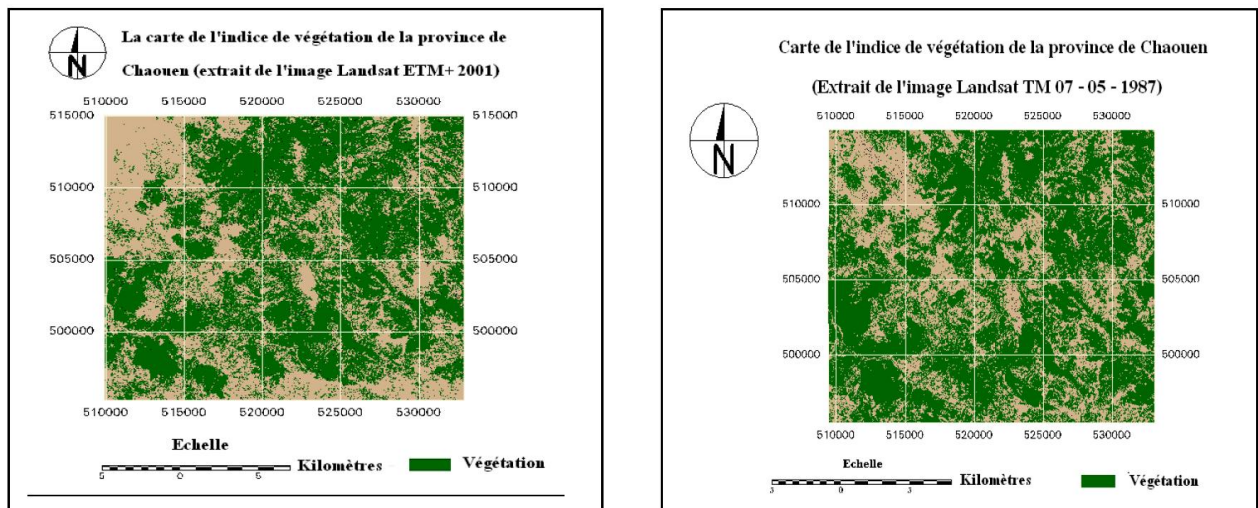


Figure 8. Comparaison multidecennale de l'indice de Végétation dans la province de Chefchaouen sur image Landsat (ETM+, 2001 et TM, 1987)

Sur la (figure 8), on remarque que la couleur verte qui indique la végétation a diminué de l'année 1987 à l'année 2001 malgré que la somme de précipitations enregistrée en 2001 (567,8 mm) est supérieure à celle enregistrée en 1987 (257,2 mm). Ceci témoigne que d'autres facteurs comme les feux de forêts, le surpâturage et le déboisement sont les responsables de la dégradation de ce patrimoine naturel. D'ailleurs un rapport de Haut Commissariat aux Eaux et Forêts et à la lutte contre la désertification affirme que les provinces les plus touchées par le fléau des incendies des forêts sont : Chefchaouen, Tétouan, Larache, Tanger, Taza, Taounat, Sidi Kassem, Kénitra et Khémisset.

3. Topographie des bassins versants :

La diversification du relief, la variation de sa pluviométrie et de la nature géologique des terrains sont à l'origine d'une grande variabilité des formes topographiques et des potentialités des eaux souterraines et surtout des eaux de surface qui sont à l'origine de la dissymétrie dans l'hydrographie entre le versant méditerranéen drainé par des cours d'eau courts avec des pentes fortes et le versant atlantique drainés par des oueds longs et très développés avec des pentes relativement faibles.

La Dorsale calcaire est drainée par les principaux cours d'eau suivants (Tab.1) :

- Oued Martil qui draine une superficie totale 1220 Km² dont seulement 100 Km² est située dans la Dorsale calcaire. Les mesures de débit de ce grand bassin versant méditerranéen, sont réalisés au niveau de plusieurs stations hydrométriques réparties le long de l'Oued Martil et ses affluents. Les points de mesures situés sur les cours d'eau qui drainent la dorsale calcaire sont de l'amont vers l'aval: La station de Timezouk sur l'Oued Nakhla avec un surface totale de 48 Km² et une superficie calcaire de 21km², le Barrage Nakhla avec une surface totale de 112 Km² et une superficie calcaire de 35 Km², la station de Ben Karrich et finalement la station du pont Torreta.
- Oued Laou avec un bassin versant d'une superficie totale de 920 Km² à l'embouchure est mesuré au niveau de la station principale Kouriren d'un bassin versant de 750 Km² dont 337 Km² située dans le domaine calcaire. D'autres points de mesures périodiques sont répartis dans le bassin de l'Oued Laou et en amont de la station hydrométrique Kouriren sont comme suit : source Ras Lma, source Magou, pont Dar dara, pont de Siflaou, Boumerouille, Talembote et Tassikiste.
- Oued Tihissasse avec un bassin versant de 622 Km² mesuré par l'intermédiaire de deux points périodiques situés sur ses deux principaux affluents qui sont l'Oued Bouhia et l'Oued El Kannar. Le bassin versant de l'Oued Bouhia avec une superficie de 397 Km² dont 99 Km² située dans le domaine calcaire alors que le bassin versant de l'Oued El Kannar avec une superficie de 194 Km² dont 145 Km² située dans la Dorsale calcaire.

- Oued Amsa qui draine une superficie totale de 127 Km² dont 49 Km² située dans la Dorsale calcaire, et qui est mesuré au niveau de la station hydrologique située au niveau du pont de la route secondaire 608 sur l'Oued Amsa.

Tableau 1. Mesures morphométriques des principaux cours d'eau

Bassins	Martil	Laou	Tihissasse	Amsa
Surface totale (Km ²)	1220	920	622	127
Surface calcaire (Km ²)	100	337	244	49
Périmètre (Km)	170	149	142	48
Coefficient de Gravelius	1.34	1.22	1.59	1.25
Longueur du Thalweg (Km)	60	70	46	25
Pluie moyenne (mm)	935	980	825	900
Altitude maximum (m)	1704	2159	2159	1588
Altitude minimale (m)	0	0	0	0
Pente moyenne (m/m)	0.028400	0.030843	0.046935	0.063520

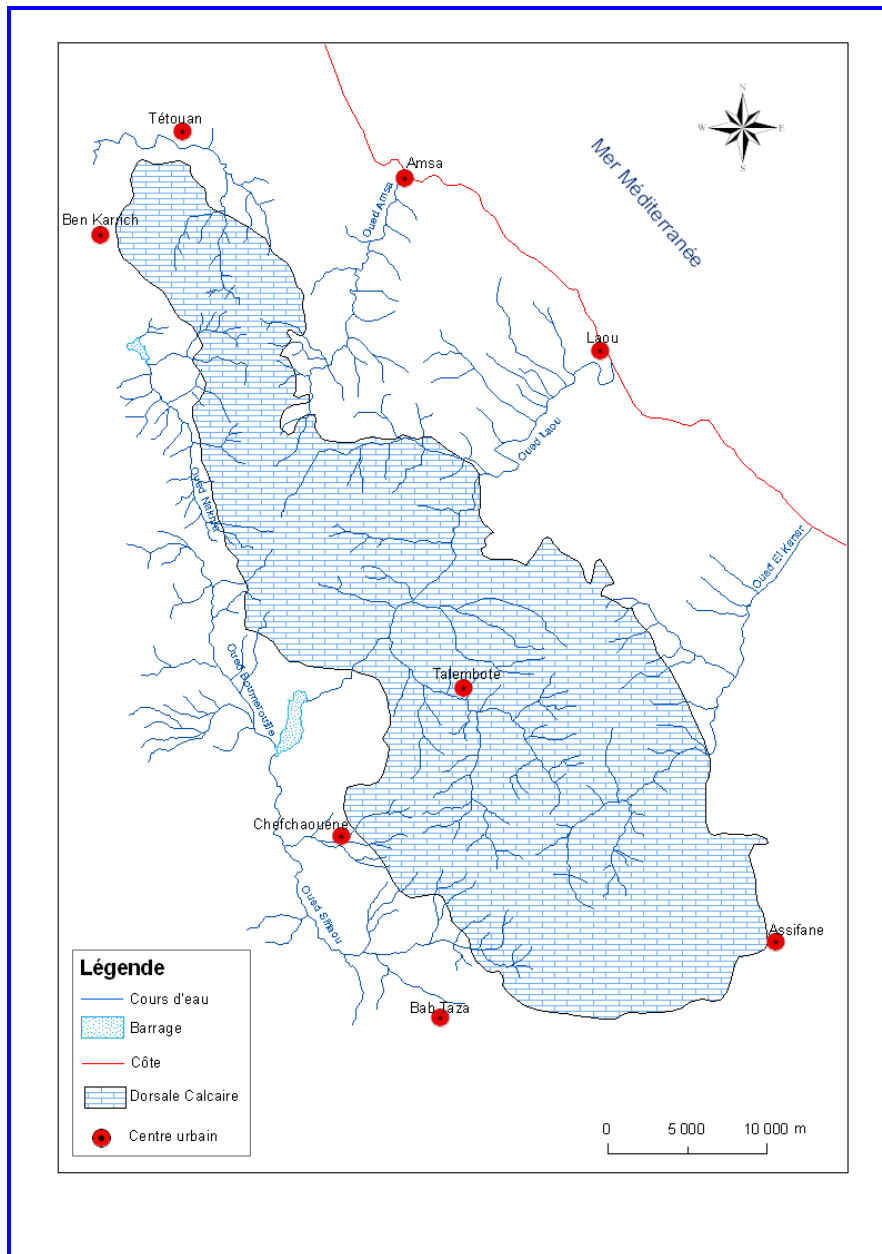
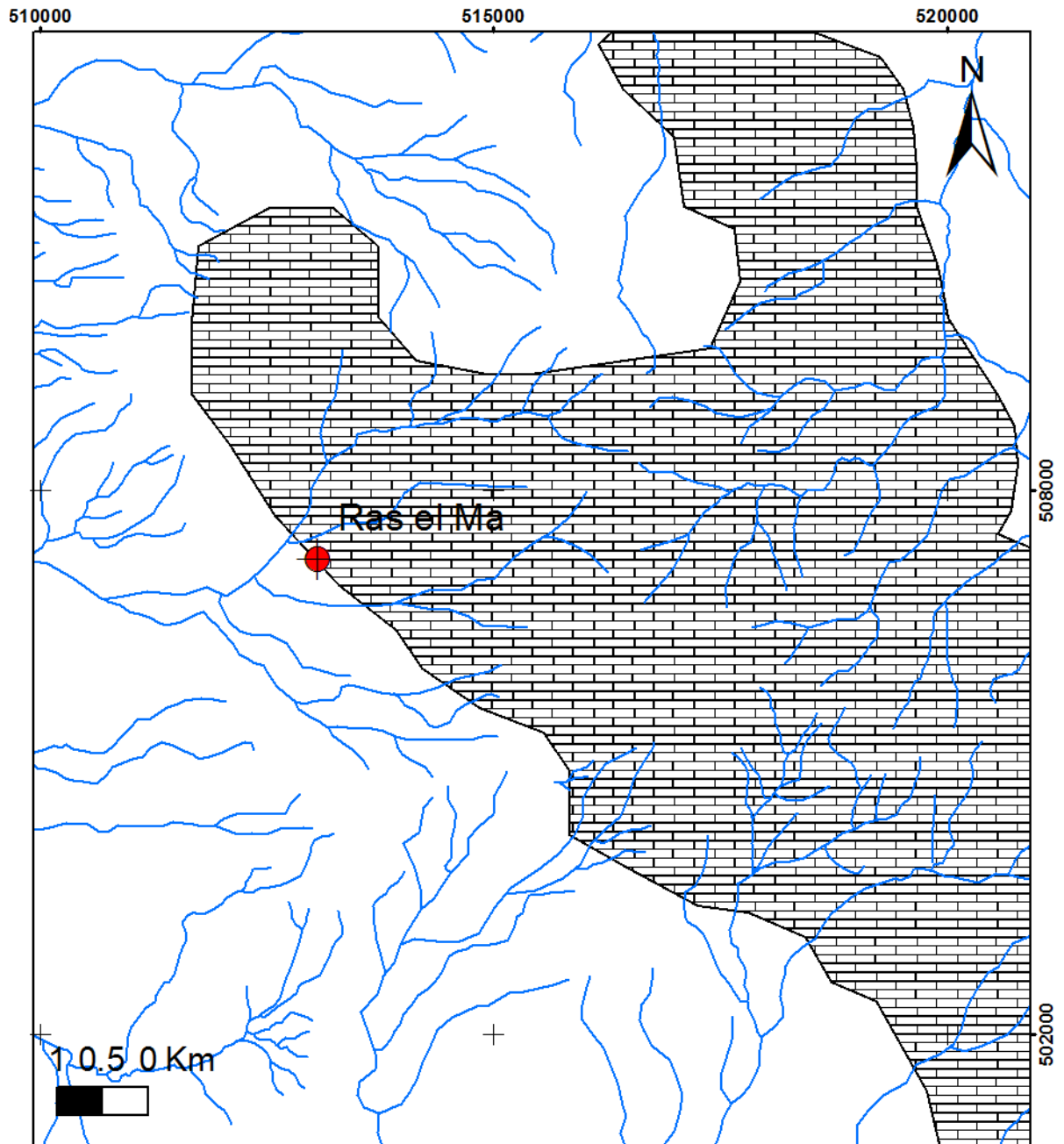


Figure 9. Réseau de drainage de la Dorsale calcaire



Légende :






-  R_Hydro
-  La zone d'étude
- Sources**
-  <all other values>
- Sources**
-  Cherafate
-  Ras el Ma

Figure 10. Réseau de drainage de la zone d'étude

4. Contexte géologique

La chaîne alpine qui se termine par l'arc de Gibraltar, borde le bassin de la méditerranée occidentale sur plus de 2000 km. Les directions générales des structures sont disposées quasi parallèle à la bordure de ce bassin. La chaîne alpine est alors formée de deux branches orientées sensiblement Est - Ouest; ces deux branches se réunissent pour former l'arc de Gibraltar. (MAATE, 1984).

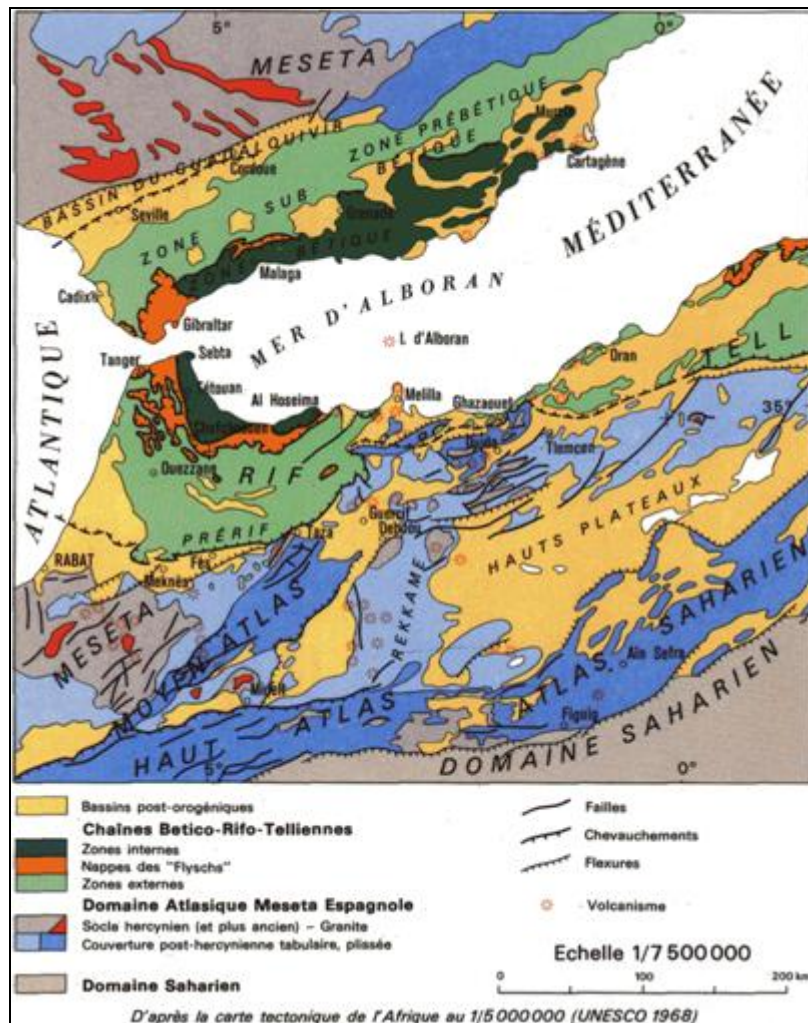


Figure 11. Carte structurale de l'arc de Gibraltar avec le Rif et la Cordillère bétique

La branche sud est formée par la chaîne du Rif située au Nord du Maroc, elle se prolonge vers l'Est dans le Tell Algéro-tunisien et dans l'arc calabro-péloritain au Sud de l'Italie. Vers le Nord, on trouve sa prolongation dans les Cordillères Bétiques au Sud de l'Espagne. Toutes ces chaînes ont une structure en nappes de charriages dite structure alpine.

Le Rif est un édifice montagneux occupant le promontoire NW de l'Afrique et représente son bord Nord. Avec sa forme arquée, le Rif a une convexité orientée vers le SW, sa vergence est variable d'un secteur à un autre, ainsi elle est dirigée vers le Sud dans le Rif oriental et vers le SW dans le Rif central et vers l'Ouest dans le Rif septentrional. Le Rif est formé du point de vue structural des 3 zones (SUTER, 1980 ; WILDI, 1983 ; PIQUE, 1994 ;...) (figure. 10) :

1.- **Le Rif interne** s'étend le long de la côte méditerranéenne depuis Sebta jusqu'à Jebha sur une longueur de 160 Km où il disparaît sous la mer, pour réapparaître plus loin dans le massif des Bokkoyas à l'ouest de la ville d'Al Houçema. Le Rif interne est constitué de trois grands ensembles structuraux : les Sebtides, les Ghomarides et la Chaîne calcaire ;

2.- **Le domaine des flyschs** est entièrement considéré comme allochtone (Nappe de Tisirène, Beni Ider, Melloussa, Chouamate, Numidiène) ;

3.- **Le Rif externe** qui comprend le Subrif et le Prérif. Le subrif est constitué par les unités intrarifaines (unités de Kétama et le Tanger) ainsi que le Mésorif interne et externe qui affleurent en fenêtres tectonique sous les unités intrarifaines. Le Prérif par contre est formé par les nappes d'Aknoul, Ouazzane et les rides prérfaines).

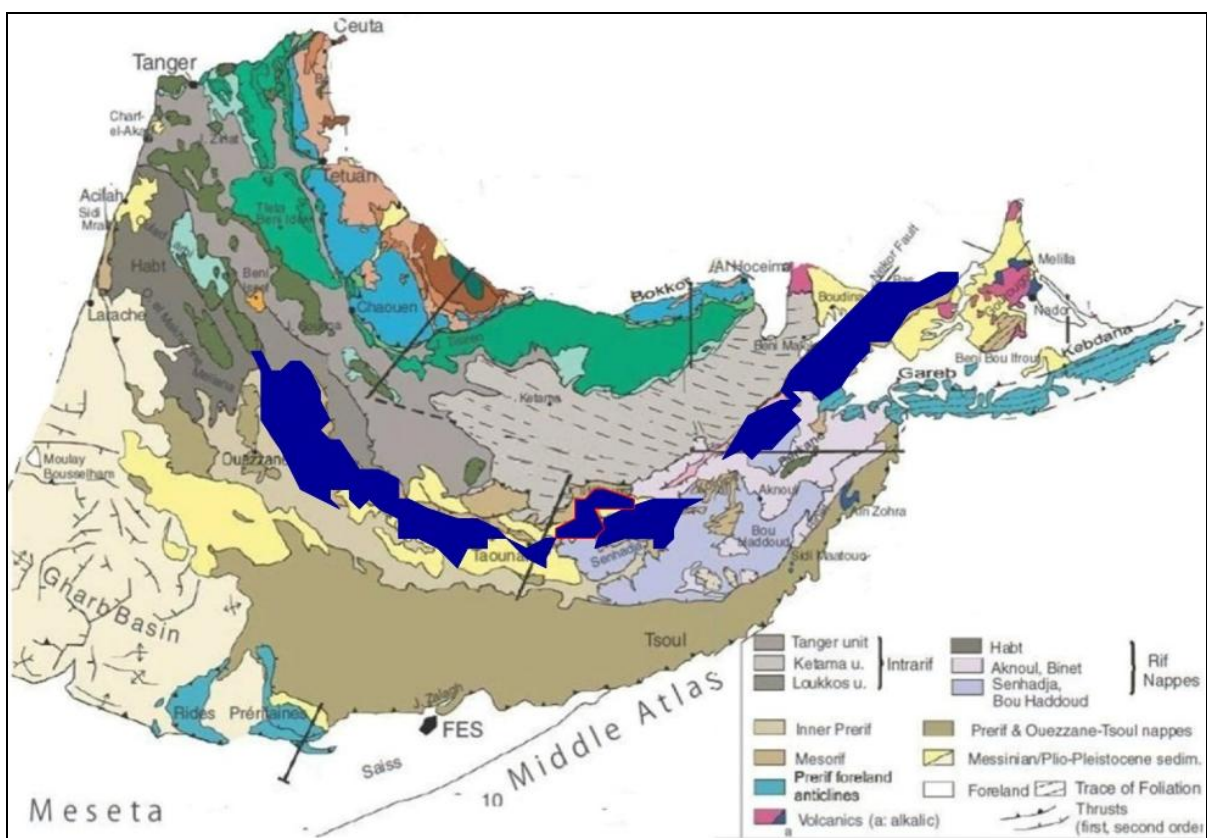


Figure 12. Carte de la géologie régionale du Rif (PIQUE, 1994)

La chaîne calcaire du Rif ou la dorsale calcaire au sens large, définie par Fallot en 1937, elle correspond à un ensemble d'unités et/ou nappes à séries non métamorphiques allant du Trias à l'Aquitainien (?) à matériel essentiellement carbonaté d'âge principalement Trias et Lias (NOLD et al, 1981). Elle constitue le front occidental de la plaque d'Alboran et limite ainsi vers le sud et vers l'ouest le restant des nappes du domaine interne. Ainsi, la chaîne calcaire est constituée par les trois segments suivants:

- Le chaînon du Haouz situé au nord de la chaîne calcaire entre Ceuta et la cluse de Tétouan sur une longueur de 40 Km, une largeur moyenne qui dépasse à peine de 2 Km et une surface de 103 Km² , Il est le siège de plusieurs résurgences des sources pérennes avec des débits qui dépassent les 30 l/s.

- La Dorsale calcaire au sens strict, constitue la segment central de la chaîne calcaire, elle est limitée au nord par l'accident de l'Oued Martil et au sud par la faille Jebha-Chrafat, elle s'étend sur une longueur de 120 Km entre Tétouan et Assifane, avec une largeur qui varie de 6 Km au nord de Koudiate aglalag à 30 Km au niveau de la ville de Chefchaouen avec des sommets dont les altitudes dépassent 2000 m ; Il constitue le segment le plus important spatialement avec une surface totale de 904 Km². Elle représente un potentiel hydraulique régional de taille avec des sources très importantes aussi bien quantitativement que qualitativement.

- Le massif des Bokkoya situé entre Bni Boufrah et la ville d'Al Houçeima, avec une longueur de 35Km, une largeur moyenne de l'ordre 8Km et une superficie de 230 Km², avec une hydrogéologie relativement timide par rapport au deux segments précédents.

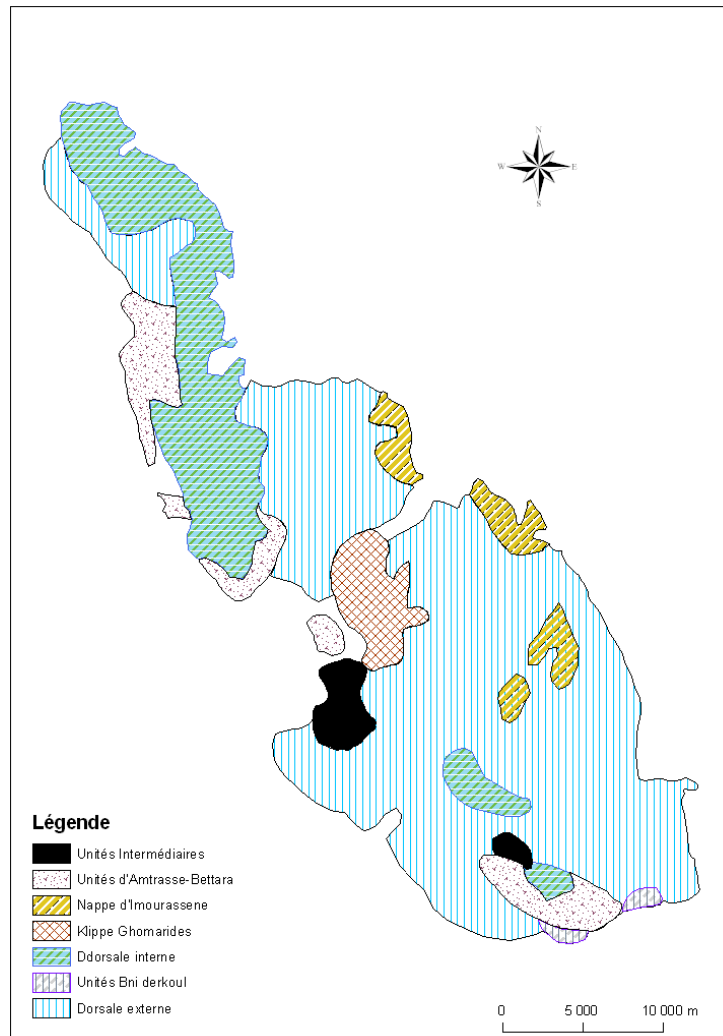


Figure 13. Schéma structural de la dorsale calcaire (Nold et al., 1981)

En plus des unités géologiques citées précédemment, la dorsale Calcaire est formée par trois autres unités géologiques qui totalisent une superficie de 95 Km² soit 10% de la superficie totale; et qui sont les unités d'Ametrasse Bettara, la nappe d'Imourassene située au Nord Est de la Dorsale Calcaire de part et d'autre du canyon de l'Oued Laou et Les unités de Bni Derkoul, dans la partie méridionale de la Dorsale calcaire, coincées entre les unités d'Ametrasse et la nappe des flyschs. (NOLD et al., 1981).

Notre zone d'étude est le tronçon central ou la dorsale calcaire. C'est le seul tronçon structurellement capable de comporter un aquifère profond potentiel compte tenu du nombre et de l'importance des sources qui ont des débits très importants aussi bien quantitativement que qualitativement. L'importance de cet aquifère est due à la présence des assises carbonatées triasiques et liasiques, avec des puissances qui atteignent plusieurs milliers de mètres, à cause

des plissements et des redoublements de séries par charriages, conjugués à une extension de ces calcaires en profondeur non précise pour le moment, et dont dépend le volume d'eau probablement en réserve de façon permanente.

La position structurale de ce domaine et surtout le plongement des masses calcaires sous les nappes paléozoïques qui forment une couverture peu perméable ou imperméable, laisse penser que cet aquifère est en charge et même artésienne dans les points bas. De plus, la couverture paléozoïque imperméable protège le réservoir contre toute intrusion marine : Nous admettons actuellement que la dorsale calcaire est chevauchante vers l'Ouest au dessus des flyschs crétacés et elle même chevauchée par les terrains primaires situés plus à l'Est (DURAND DELGA et OLIVIER, 1980 ; WILDI, 1983).

De point de vue tectonique, le déversement frontalier dans le massif de Kelâa se retrouve également dans la structure interne du massif de SfihaTtelj. La nappe d'Imensorene est de type Dorsale interne et se trouve à l'état de klippe sédimentaire dans les formations tertiaires. L'interprétation du soubassement profond de l'ensemble de cette structure polyphasée, est telles que les Ghomarides jouent le rôle de *back stop* portant la dorsale externe sur les nappes de flysch. La géométrie de la confrontation Ghomarides-Flysch conditionne dans une large mesure les potentialités des grands réservoirs aveugles.

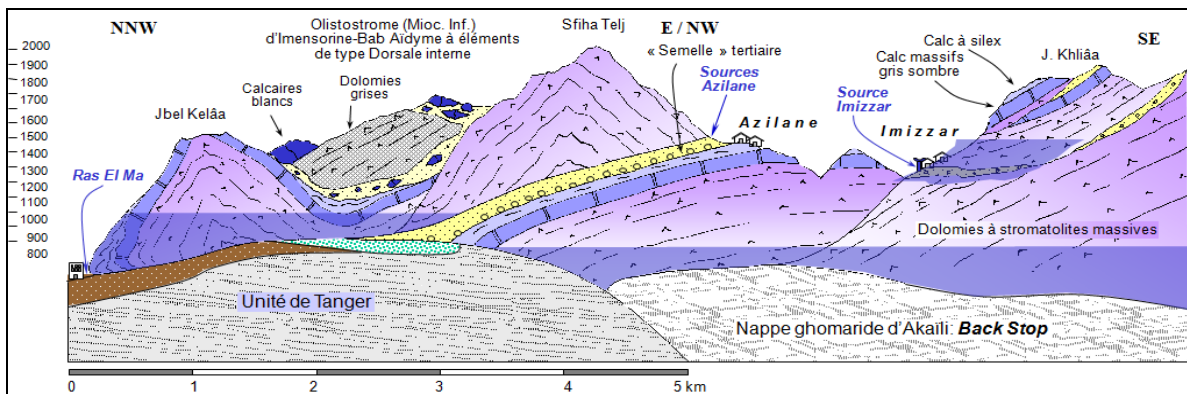


Figure 14. Coupe structurale synthétique de la nappe du J. Tissouka (El Kadiri 2010, document inédit)

Deux coupes transversales complémentaires situent le contexte d'émergence des sources de Ras El Ma, d'Imizzar et d'Anou. Le déversement des structures, le sens du basculement du plancher imperméable et le pendage de la stratification dans les dolomies massives sont les critères qui conditionnent les émergences en question. Nous ajoutons dans

le cadre de cette étude, la géométrie de la confrontation en profondeur du back-stop ghomaride par rapport au domaine des flysch. C'est un critère qui détermine certainement les réservoirs les plus grands de la Dorsale.

Bordée respectivement par les coupes D et E, la reconstitution de l'aquifère de la source Ras El Ma, offre une vision approximative de la géométrie de son réservoir et permet une évaluation du volume de son aquifère.

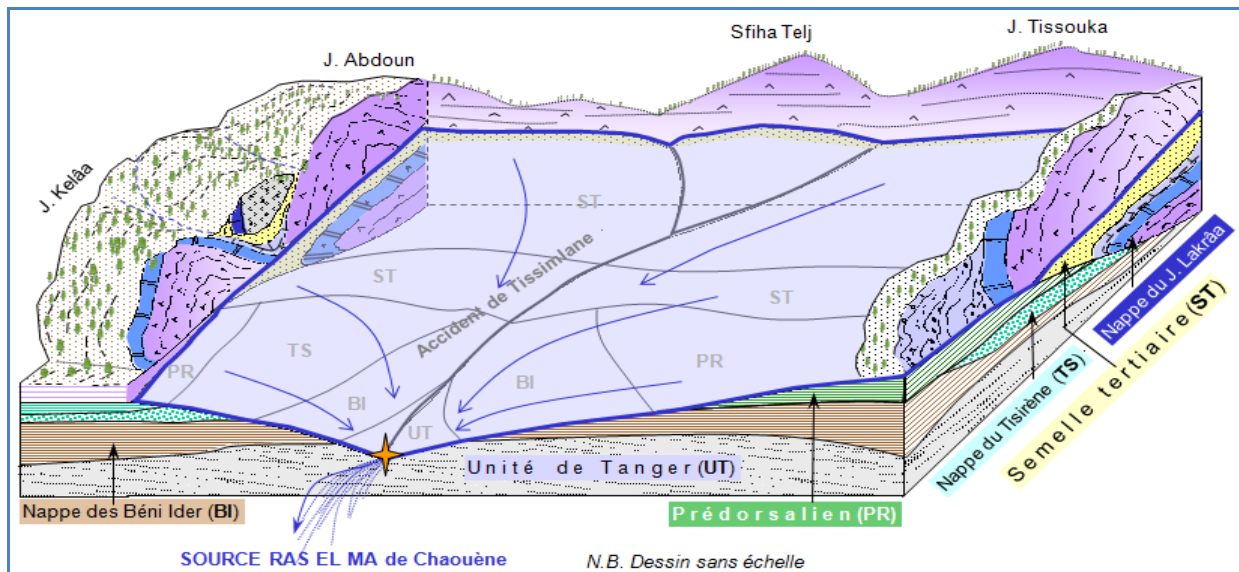


Figure 15. Synthèse de la disposition structurale schématique 3D (El Kadiri 2010, document inédit)

Les dimensions du réservoir de la source Ras El Ma sont comme indiqué dans la figure ci dessus, ce qui permet d'évaluer le volume V moyennant la formule suivante :

$$V = L \times P \times H$$

Avec

$$\left\{ \begin{array}{l} L = 1,50 \text{ km} \\ P = 4,00 \text{ km} \\ H = 0,75 \text{ km} \end{array} \right\} \quad \text{D'où } V_T = 4500 \text{ Mm}^3$$

Pour le coefficient d'emmagasinement (C_e) du karst il varie théoriquement entre 2 et 10 %, on supposant que le niveau piézométrique dans cet aquifère est horizontale on a alors un volume d'eau $Vol = L \times P \times H \times C_e$ dans l'aquifère ci-dessus schématisé et pour des saturations à 100 % qui varie entre le volume V_2 pour $C_e=2\%$ et le volume V_{10} pour $C_e=10\%$ calculés ci dessous :

$$V_2 = 1,5 \times 4 \times 0,750 \times 2\% = 90 \text{ Mm}^3$$

$$V_{10} = 1,5 \times 4 \times 0,750 \times 10\% = 450 \text{ Mm}^3$$

Pour des zones saturées qui représentent 10% de l'aquifère, on a les volumes suivants :

$$V_2=1,5 \times 4 \times 0,750 \times 2\% \times 10\%= 9 \text{ Mm}^3$$

$$V_{10}=1,5 \times 4 \times 0,750 \times 10\% \times 10\%= 45 \text{ Mm}^3$$

De point de vue relationnel entre la fracturation avec les résurgences des sources d'eau ainsi que le réseau hydrographique au niveau de la dorsale calcaire, les failles qui affectent celle-ci présentent différentes directions qui s'alignent tantôt avec les points d'émergence des sources et tantôt sont quasi parallèles avec les directions des cours d'eau qui drainent la dorsale calcaire (Chaouni, 1999). Au niveau de notre zone d'étude (figure.13) :

- La partie située au Nord du canyon de l'Oued Laou où les failles ont une direction Nord-Ouest /Sud-Est, avec des directions Nord Sud dans la partie Nord de la Dorsale interne ;
 - La partie centrale où les failles ont une direction parallèle au canyon de l'Oued Laou ;
- Dans le massif de Jbel Lachhab, les failles sont soit de direction quasi Est- Ouest soit parallèles à la direction des cours d'eau tel que : l'Oued Ras Lma et l'Oued El Kanar; alors que les failles qui délimitent l'unité de Tissouka et Talassemthane ont une direction Nord- Sud.

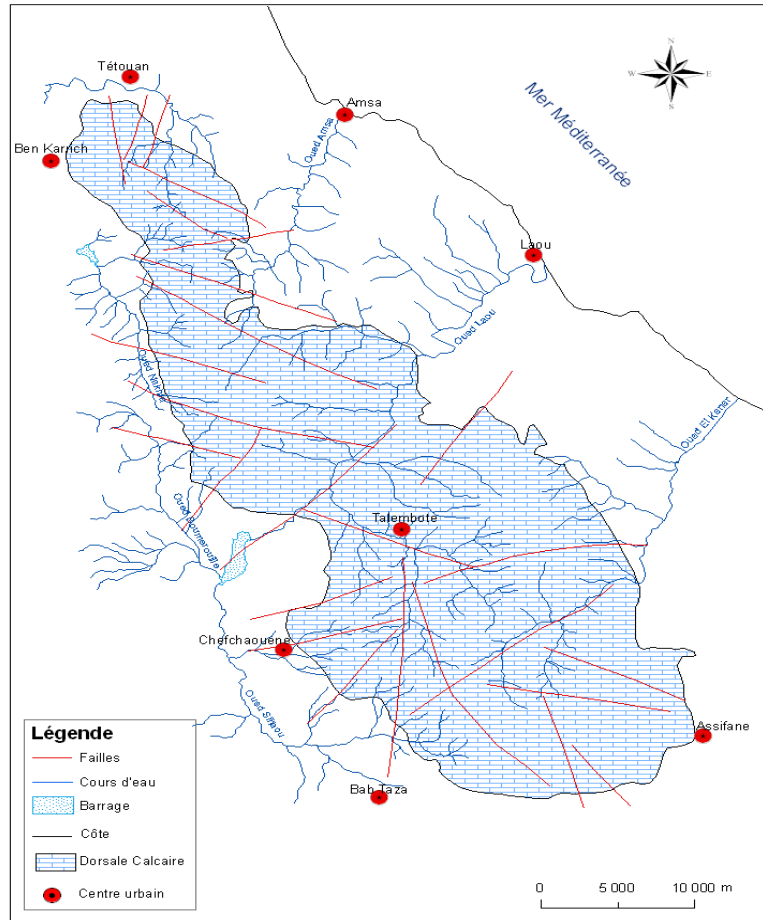


Figure 16. Carte de situation des failles dans la Dorsale calcaire (SOSSEY, 2005)

CHAPITRE II : FONCTIONNEMENT HYDRODYNAMIQUE DE LA DORSALE CALCAIRE AU NIVEAU DES SOURCES RAS EL MA ET CHRAFATES

Dans le Rif interne, les schistes paléozoïques sont hydrogéologiquement stériles, par contre la chaîne calcaire est le siège des résurgences de plusieurs grandes sources avec des débits qui dépassent plusieurs centaines de litres par seconde, pendant les saisons sèches. Ces chaînes présentent des discontinuités qui les subdivisent en trois tronçons : la chaîne du Haouz au Nord, la Dorsale calcaire entre Tétouan et Assifane et les Bokkoyas à l'Ouest de la ville d'El Houçema.

Le point d'émergence de cette source vaclusienne, correspond à un secteur tectonisé et karstifié qui permet aux eaux souterraines des aquifères de dolomies à stromatolithes d'âge Carnien à Norien de la nappe de Hafat Nator (dorsale externe) d'émerger à la faveur de fissures

1. Source Ras El Ma

1.1. Présentation

Située à l'Est de la ville de Chefchaouen son N°IRE 100/04, avec un débit moyen interannuel de 395 l/s et qui varie entre 90 l/s et 5000 l/s, avec un bassin versant topographique d'environ de 6,17 Km² qui s'étend sur les formations carbonatées de Jbel Tissouka. Elle constitue pour l'instant, en attendant l'achèvement du barrage Moulay Bouchetta, l'unique source d'alimentation en eau potable de la ville. Elle est également utilisée pour l'irrigation d'une petite et moyenne hydraulique locale, destinées principalement aux cultures maraîchères.

1.2. Hydrogéologie

Elle sourd au niveau des calcaires à silex d'âge Pleinsbachien de JbelTissouka, et ce grâce au contact chevauchant entre l'aquifère des formations carbonatées de la DC et l'aquiclude de l'unité de Tanger interne. Les formations carbonatées de l'unité de Jbel Tissouka (calcaires à silex Pleinsbachiens, brèches à silex Sinémuriens et dolomies à stromatolithes Noriens à Carniens) sont le siège d'un aquifère karstique. Le substratum est représenté par les marnes Turono-Sénoniennes de l'unité de Tanger interne qui affleurent sur les berges de l'oued Ras El Ma, en aval de la source.

La source sourd au pied d'une falaise. Le bassin d'alimentation est constitué par les formations carbonatées des JbelTissouka, Imensorene et BabAïdime. Ces formations constituent un aquifère caractérisé par un fort coefficient d'infiltration. Il représente 45 % des précipitations dont 50 % sont drainées par la source Ras El Ma et 50 % sont drainées vers le Nord par l'oued Talembote. L'écoulement principal de la nappe s'effectue vers le Nord. Deux familles de failles de directions NE-SW et NW-SE engendrent un écoulement vers l'Ouest.

Tableau 2. Débits moyens mensuels de la source Ras El Ma (Sources ABHL/ Traitement Boulaajoul, 2006)

	Sept	Oct.	Nov.	Déc.	Jan	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Aout
Moy	119	162	295	505	695	776	533	586	480	270	172	130
Max	300	405	1030	2080	2270	2678	1640	2899	1495	831	475	366
Min	70	70	74	91	105	98	90	100	95	85	87	39
E.T	54,0	85,2	235,7	417,4	646,7	676,4	422,2	526,7	367,1	186,2	91,9	66,4
V	1,9	2,1	3,2	3,9	3,1	3,3	2,9	4,8	2,9	2,8	2,3	2,5
R	4,3	5,8	13,9	22,9	21,6	27,4	18,2	29,0	15,7	9,8	5,5	9,4
V= Indice de variabilité de Meinzer $V=(Max-min)/moyenne$												
R= Indice de variabilité de Schoëller $R=Max/min$												

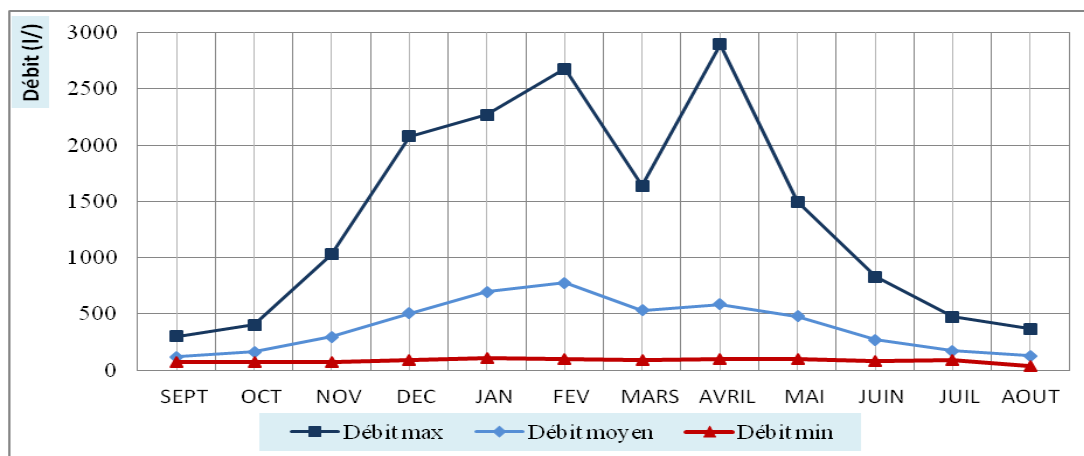


Figure 17. Variations des débits moyens mensuels de la source Ras El Ma (Sources ABHL/ Traitement Boulaajoul, 2006)

La synthèse des jaugeages réalisés au niveau de la source Ras El Ma, depuis 1970 jusqu'à 2004 sont présentées dans le (tableau 3). Le débit maximum mesuré est de 2899 l/s il a été mesuré pendant le mois d'avril 1971. Les très grands débits, ne sont pas mesurables au niveau de cette source, des fortes crues avec des débits énormes, des vitesses d'eau remarquablement importantes et une forte pente du lit du cours d'eau, la source a donc enregistré des débits bien supérieurs au maximum mesurés et présentés dans le tableau précédent, surtout que l'oued Tissemlale s'ajoute aux autres sources de débordements.

1.3. Caractéristiques de l'aquifère

Le calcul des débits moyens mensuels et la pluviométrie moyenne du bassin versant et le calcul de l'évaporation par la formule de Turc, nous permis de dresser le tableau synthétique des caractéristiques hydrogéologiques de la source Ras El Ma, présenté ci-dessous :

Tableau 3. Hydrométrie du bassin de l'oued Ras El Ma (Sources ABHL/ Traitement Boulaajoul, 2006)

Caractéristiques	Ras El Ma
SBV	6,17 Km ²
Pluie moyenne	1551,1 mm
ETR (Turc)	682,0 mm
Lame écoulée	869,1 mm
Lame Infiltrée (40%)	620,4 mm
Débit moyen observé	395 l/s
Lame observée	2018,9 mm
Lame importée	1398,5 mm
Bassin d'import	20,08 Km ²
BV Hydrogéologique	26,25 Km²

1.4. Tariesement

L'hydrodynamique des terrains calcaires est particulièrement bien explorée par les études des vidanges. La prévision des pénuries sur les cours d'eau consiste, sur le plan technique, à prévoir le débit d'étiage d'un cours d'eau donné en un point donné et à un instant donné, par l'exploitation d'une série de données de préférence suffisamment longue. Le but également de l'étude des tariesements est de connaître les caractéristiques du système de nappes qui alimentent cette émergence, car chaque nappe est caractérisée par un coefficient de tariesement (α) et par un débit de drainage initial (Q_0).

Pour démontrer l'existence de réserves exploitables, il faut procéder à l'analyse des séries temporelles des débits et l'analyse des hydrogrammes de décrues et de tariesements. Cette méthode a été proposée par MANGIN en 1970 dans le but d'estimer le volume dynamique des réservoirs (MATHEVET, 2002).

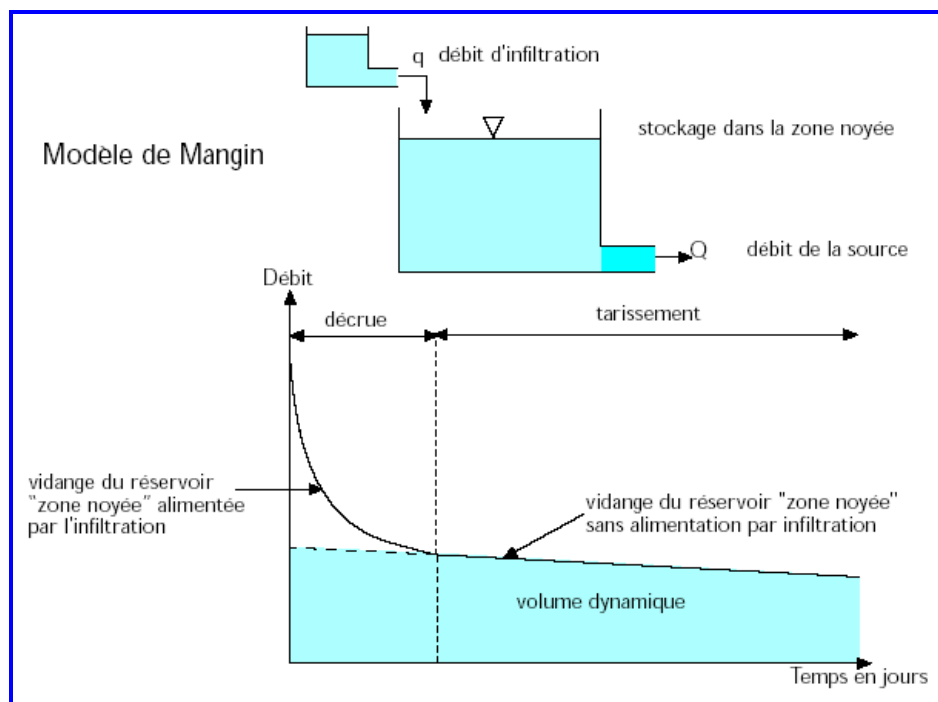


Figure 18. Analyse de la dérive et du tariesement (BAKALOWICZ, 1999)

Pour déterminer la loi de tariesement d'une source pendant une période donnée, la formule la plus classiquement utilisée est celle qui considère la décroissance exponentielle du débit en fonction du temps, et ce en absence de toutes précipitations qui risquent de perturber l'allure de la courbe, et en absence également des pompages et des prélèvements en amont des points de mesures. Le débit en un temps t est donné alors par la formule de Maillet ci-dessous.

Les courbes de type de Maillet correspondent approximativement au cas d'un réservoir souterrain de forme parallélépipédique qui se vide par un bouchon poreux (LARRAS, 1972).

La formule de Maillet : $Q_t = Q_0 \times e^{-\alpha t}$

Où

Q_0 = Le débit à l'instant $t=0$

Q_t = débit à un instant t

e = base du logarithme népérien

α = coefficient de tarissement de la source, cette valeur est calculée à partir de la pente de la courbe de tendance $\text{Log } Q=f(t)$.

$$Q = Q_0 \times e^{-\alpha(t-t_0)}$$

$$\frac{Q}{Q_0} = e^{-\alpha(t-t_0)} \Rightarrow t - t_0 = \frac{\text{Log}\left(\frac{Q_0}{Q}\right)}{\alpha}$$

Pour le débit de demi tarissement c'est-à-dire le cas où $Q=Q_0/2$ et qui sera atteint après le temps $T=(t-t_0)$

L'équation précédente deviendra alors sous la forme suivante :

$$T = (t - t_0) = \frac{\text{Log}2}{\alpha} = \frac{0.6931}{\alpha}$$

Tarissement de la source Ras El Ma

La représentation graphique (figure 19) des débits initiaux de drainage et les coefficients de tarissement correspondant nous ont permis de tracer la courbe de tendance et formuler l'équation de tarissement, ci- dessous.

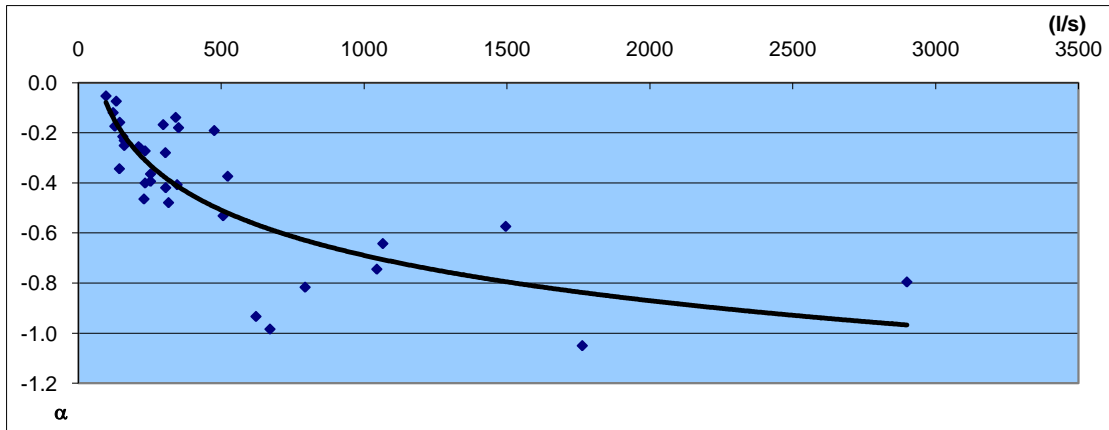


Figure 19. Courbe des débits initiaux et les coefficients de tarissement de Ras El Ma

$$\alpha = -0.261 \ln(Q_0) + 1.114$$

1.5. Calcul du volume dynamique

L'intégration de la formule de Maillet nous a permis d'évaluer le volume dynamique des sources dans le système des réservoirs karstiques à l'instant t et à partir d'un débit de drainage Q_t correspondant à ce même instant t.

$$V_s = \int_t^{\infty} Q_t = \int_t^{\infty} Q_0 e^{-\alpha t} dt \Rightarrow V_s = \frac{Q_0}{\alpha}$$

Tableau 4. Volumes dynamiques de la source Ras El Ma

Source	Paramètres	Qmax	Qmin	Qmoy
Ras El Ma	Débit (m ³ /s)	2,900	0,127	0,396
	Coefficient de tarissement (jours ⁻¹)	0,7953	0,1732	0.310
	Temps de demi-tarissement (jours)	26,15	120,06	67.07
	Volume dynamique (m³)	25.683.039,51	5.166.364,22	9.000.417,99

2. Source Chrafate

2.1. Présentation et Hydrogéologie

Elle est située à l'extrême sud de la Dorsale calcaire elle sourde à proximité des structures cassantes orientées Nord-Sud au niveau des éboulis calcaires qui couvrent les formations calcaréo-dolomitiques du Malm au Carnien-Norien (calcaires à silex Pleinsbachien, brèches à silex Sinémurien et dolomies à stromatolithes Noriens à Carniens). Ces formations se présentent sous la forme d'un anticlinal couché, pincé entre les unités de Tanger interne au Sud et Jbel Bou Slimane au Nord.

La source Chrafate est formée par un groupe de petites sources avec des écoulements qui tarissent peu de temps après la période des pluies, seul un griffon principal est pérenne avec un débit d'été qui dépasse cent litre par seconde. Tout aménagement de cette source par un limnimètre qui permettrait un suivi rigoureux de l'évolution temporaire de son débit et par un mur de protection pour l'isoler contre la pollution, s'avère difficile à réaliser du fait de son mode d'exploitation archaïque et de sa situation dans un cours d'eau et près d'une falaise.

2.2. Tarissement de la source Chrafate

La représentation graphique (figure20) des débits initiaux de drainage et les coefficients de tarissement correspondant nous a permis de tracer la courbe de tendance liant ces deux paramètres pour aboutir en fin de compte à la formulation de la relation entre le coefficient de tarissement et le débit initiale de drainage.

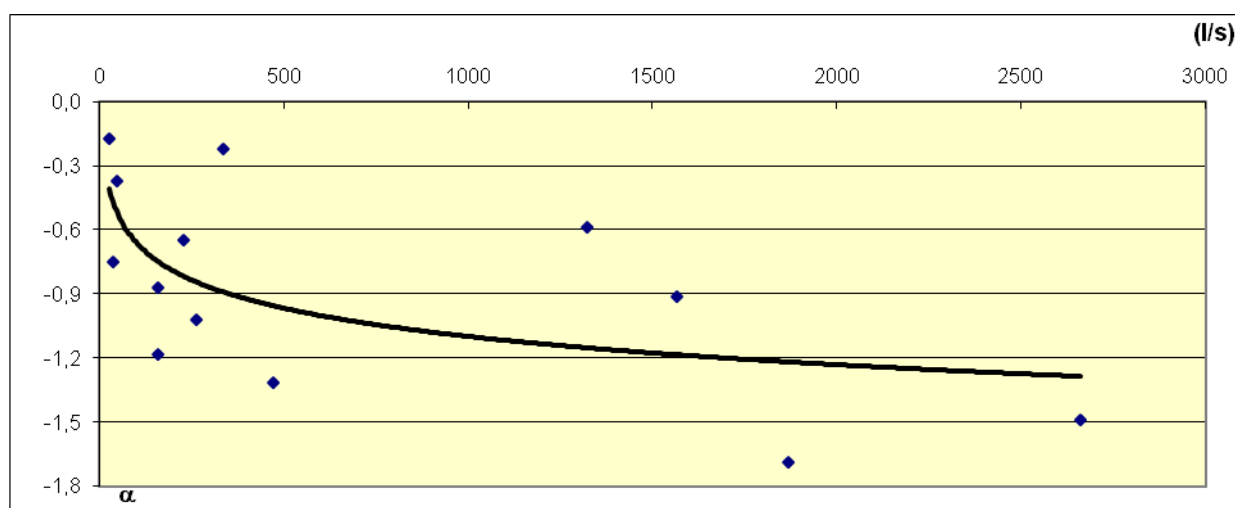


Figure 20. Courbe des débits initiaux et les coefficients de tarissement de la source Chrafate

$$\alpha = -0.191 \ln(Q_0) + 0.2197$$

2.3. Calcul du volume dynamique

L'intégration de la formule de Maillet nous a permis d'évaluer le volume dynamique des sources dans le système des réservoirs karstiques à l'instant t et à partir d'un débit de drainage Q_t correspondant à ce même instant t.

$$V_s = \int_t^{\infty} Q_t = \int_t^{\infty} Q_0 e^{-\alpha t} dt \Rightarrow V_s = \frac{Q_0}{\alpha}$$

Tableau 5. Volumes dynamiques de la source Chrafate

Source	Paramètres	Qmax	Qmin	Qmoy
Chrafate	Débit (m ³ /s)	2,660	0,027	0.150
	Coefficient de tarissement (jours ⁻¹)	1,4917	0,1757	0.2559
	Temps de demi-tarissement (jours)	13,94	118,35	81.25
	Volume dynamique (m ³)	12.479.549,51	1.075.451,34	4.101.666.57

L'étude de tarissement de débits nous a révélé l'existence d'un système de nappes très complexe avec différents types de vidange et qui nous a permis également de faire des évaluations des réserves dynamiques.

CHAPITRE III : ANALYSES HYDROCHIMIQUES

1. Introduction

Nous avons passé en revue dans les chapitres précédents, la répartition des unités géologiques de la dorsale calcaire ainsi que le comportement hydrodynamique au niveau des points de mesures des principaux drains de la zone d'étude. L'étude hydrochimique nous permet d'orienter et de renforcer les maillons faibles des constats concernant le fonctionnement du système karstique.

L'étude hydrodynamique apporte des informations sur la manière dont les transferts d'énergie de la charge hydraulique, se font à l'intérieur d'un système Karstique. Par contre, l'étude hydrochimique des eaux, constitue depuis plusieurs années un moyen d'investigation privilégié de la structure et du fonctionnement hydrodynamique des aquifères, en s'intéressant aux contraintes thermodynamiques et cinétiques de l'acquisition de la charge dissoute et à son transit dans le Karst. Ces observations apportent d'autres informations sur la structure et le fonctionnement des systèmes Karstiques, notamment grâce à l'identification des modalités d'infiltration. Les notations de transfert et de transit étant très nettement dissociées dans les systèmes Karstiques, l'hydrochimie des eaux apporte donc des renseignements complémentaires sur le fonctionnement des systèmes Karstique (GRASSO, 1998).

Les ions majeurs généralement utilisés pour les analyses hydrogéologiques sont cités ci-dessous avec une note explicite. Dans le cadre de cette étude, nous avons utilisé la chronique des concentrations des ions majeurs mesurés au niveau des principales sources de la Dorsale calcaire, essentiellement constituée de formations calcaro-dolomitiques plissées, pour faire une corrélation des faciès chimiques des eaux souterraines analysées avec les paramètres géologiques au niveau des résurgences.

Calcium - Ca²⁺ : Le calcium fait partie des éléments majeurs, c'est un élément qui peut être retrouvé naturellement à de fortes concentrations dans les eaux selon leurs origines géologiques. Cet élément est plus ou moins soluble dans l'eau, il a toujours une origine interne au système. Il est un des composants principaux de la dureté avec le magnésium et il nous permet principalement d'évaluer le temps de séjour de l'eau.

Magnésium - Mg²⁺ : Cet élément a toujours une origine interne au système. Sa présence témoigne de la dissolution des dolomies, de calcaires, ou d'un apport de matière en

suspension, issues du décolmatage de paléo réseaux. La cinétique de dissolution de cet élément étant lente, ce paramètre Mg^{2+} est par excellence un bon indicateur des eaux à temps de séjour prolongé (MATHEVET,2002).

Chlore -Cl⁻ : Il existe dans toutes les eaux à des concentrations très variables, généralement comprises entre 10 et 20 mg/l et peuvent atteindre plus de 100 mg/l au contact de certaines formations géologiques comme le Trias. Leur teneur dépend de l'origine de l'eau et de la nature du terrain qu'elle traverse, cet élément a généralement une origine météorique. C'est un élément conservatif, concentré au niveau des horizons de surface par évaporation. Les autres apports du Chlore (Cl⁻) sont facilement identifiables, tels que les évaporites et les activités anthropiques. Le Chlore est aussi un bon traceur des activités anthropiques comme le salage et la pollution agricole (BAKALOWICZ, 1997).

Sodium Na⁺ et Le Potassium K⁺ : Ce sont des éléments d'origine principalement externe non conservatifs. Ils peuvent provenir de l'altération des minéraux silicatés présents dans le système. Comme pour le Chlore, ces ions sont concentrés au niveau des horizons de surface par le phénomène de l'évapotranspiration. Cependant, le comportement du potassium k^{+} est plus difficile à interpréter à cause de sa participation au cycle de la matière vivante au niveau du sol.

Nitrates (NO₃) et les Nitrites (NO₂⁻): L'azote est un élément chimique présent dans les composés organiques, il peut se présenter sous plusieurs formes : L'azote organique lié avec d'autres éléments, l'azote ammoniacal (NH₄⁺), les nitrites et les nitrates stade final de l'oxydation de l'azote. Les nitrates proviennent du lessivage des engrais, de l'azote reminéralisé sur les zones de culture, des eaux usées domestiques, et parfois des eaux usées industrielles. Ils constituent l'un des éléments nutritifs majeurs des végétaux, directement assimilables par les plantes, ils participent à la croissance des végétaux dans l'eau, étouffant les autres organismes vivants et provoquant ainsi le phénomène d'eutrophisation. Ils constituent donc un danger pour la faune et la flore lorsqu'ils sont présents en quantité trop importante. Les concentrations en nitrates d'origines naturelles dans les eaux de surface et souterraines ne dépassent pas quelques mg/l. Nombreuses sont les eaux souterraines dans lesquelles on observe une augmentation des nitrates en raison de la pollution agricole.

La méthodologie Hydrochimique adoptée pour déterminer l'évolution des faciès chimique de l'hydrogéologie de la dorsale calcaire consiste à réaliser les mesures des

paramètres physiques qui ne sont pas conservables et qui sont réalisables in situ par des appareils légers facilement transportables tels que la Température, le pH et la conductivité électrique, et de faire des prélèvements d'eau dans des flacons appropriés qui seront transportés et conservés selon les normes en vigueur et qui seront analysés ultérieurement au laboratoire. Les sources ciblées sont Chrafate et Ras El Ma.

2. Source Chrafate

2.1. Paramètres physiques

Les mesures des paramètres physiques des eaux de la source Chrafate ont donné les résultats présentés ci-dessous :

- Température : La variation de la température de l'eau de la source présentée dans la (figure 21) montre que l'amplitude thermique entre le mois d'Avril et le mois d'Octobre est de 3,7°C. Elle augmente légèrement entre le mois d'Avril et le mois de Mai, elle reste quasi stable entre le mois de Mai et le mois de Juin probablement à cause de la pluie enregistrée au mois de Mai. Elle augmente encore entre Juin et Juillet et se stabilise puis diminue après la période pluvieuse. Ce changement est dû apparemment à la chasse d'une eau chaude ayant séjourné dans le système annexe de l'aquifère suivie par l'eau de surface relativement froide.

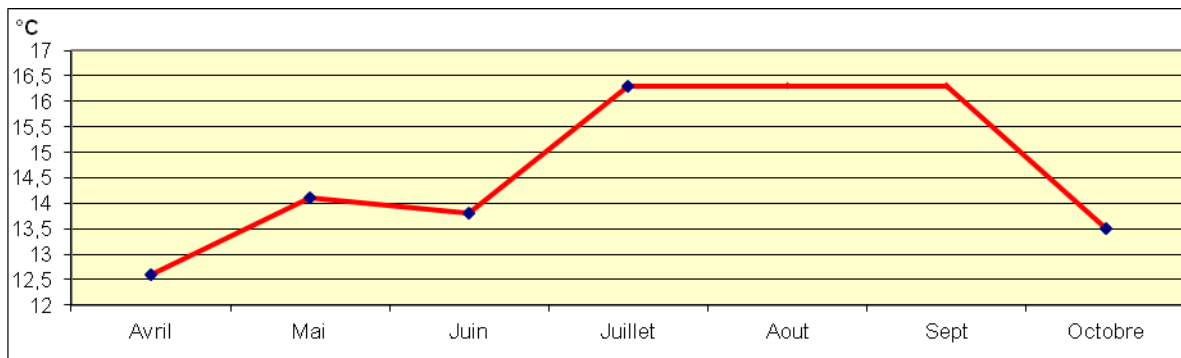


Figure 21. Variations de la température de l'eau de la source Chrafate

- **pH**: Les variations du pH des eaux de la source a une valeur minimale de 7.65 pendant les mois secs et accuse une augmentation pendant les mois pluvieux pour atteindre une valeur maximale de 7.80, soit un écart de 0.15 comme illustrer dans la (figure 22).

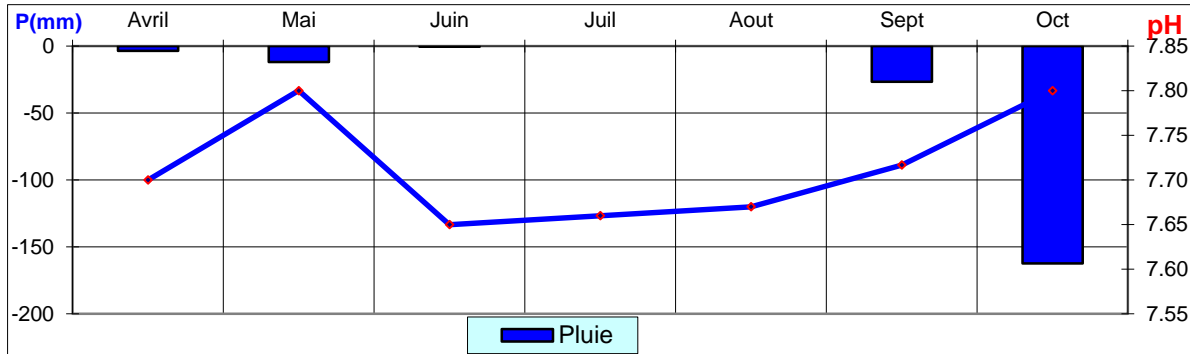


Figure 22. Variations du pH des eaux de la source Chrafate .

- **Conductivité**: L'évolution de ce paramètre suit bien le schéma classique des milieux karstiques, comme décrit par certains auteurs (BAKALOWICZ, 1979); qui suite à une averse, l'eau des résurgences diminue en minéralisation. Sur la (figure 23) Les faibles valeurs de la conductivité sont mesurées pendant la saison pluvieuse s'étendant d'octobre à Avril et les fortes valeurs pendant la saison sèche de Juin à Septembre. Cependant on note un décalage du phénomène de dilution et le pic de crue, ce qui s'explique par l'effet "piston flow".

2.2. Analyse chimique

- **Bicarbonates (HCO_3)**: Sa courbe d'évolution suit une allure proche de celle de la conductivité, qui a des valeurs faibles pendant la période des hautes eaux et valeurs élevées en étiage. La brutalité du redressement de la courbe vers la fin de l'année des réalisations des mesures peut s'expliquer par la reprise de la végétation qui a favorisé l'augmentation de la pression partielle du CO_2 au niveau du sol.

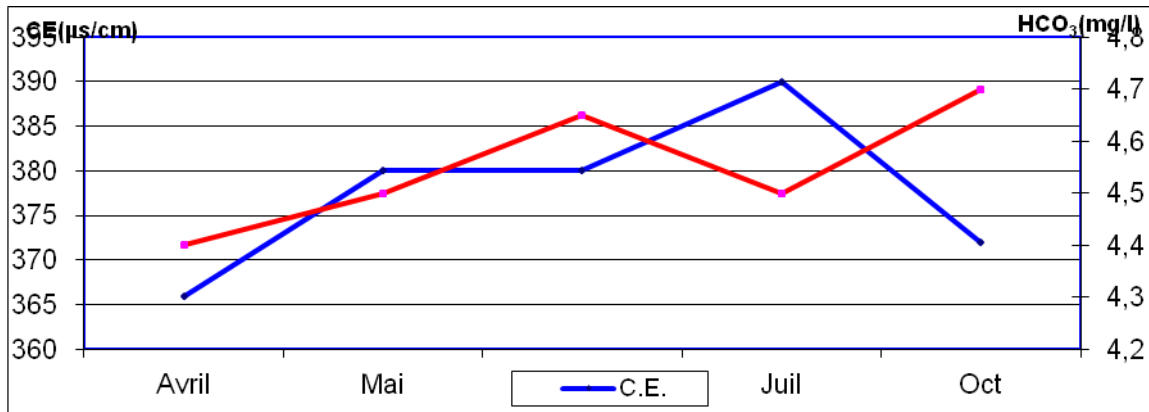


Figure 23. Variations de la conductivité électrique et du bicarbonate des eaux de la source Chrafate

- Rapport Calcium Magnésium (Ca^{2+} / Mg^{2+}) : les valeurs de Ca^{2+} et de Mg^{2+} sont exprimées en mg/l. La moyenne de ce rapport est de 1,61, il varie entre un maximum de 2,06 au mois d'Avril et un minimum de 1,01 au mois de Juillet. La courbe de variation représentée dans la (figure 24) montre que le rapport augmente beaucoup en période humide puis diminue au début de la saison sèche. Ce qui implique que le réservoir noyé est plus dolomitique que la zone d'infiltration.

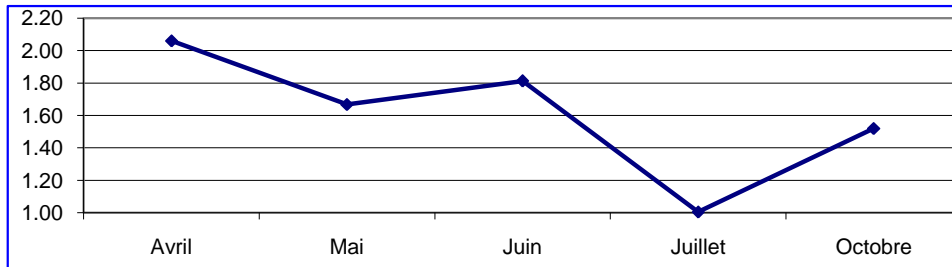


Figure 24. Variations temporaires du rapport Ca^{2+} / Mg^{2+}

- Sodium (Na^+) et Chlore (Cl^-) : Pendant cette période de suivi relativement courte, les variations sont quasi identiques (figure 25), ce qui peut s'expliquer par une origine commune de ces deux éléments comme des terrains salifères.

- Nitrates (NO_3) et Sulfates (SO_4) : Ces deux éléments montrent une évolution similaire (figure 25) avec une légère élévation des teneurs en période hivernale, notamment sans provoquer des pollutions appréciables, puisque leurs concentrations respectives ne dépassent

pas 1 mg/l et 6.5 mg/l. Leur évolution accuse également une baisse des concentrations au printemps et au début de l'été avec des concentrations de 0.4 mg/l pour les nitrates et de 5 mg/l pour les sulfates. Par sa position en amont du village, la source est apparemment épargnée de toute pollution entropique malgré la grande densité de la population limitrophe à la source.

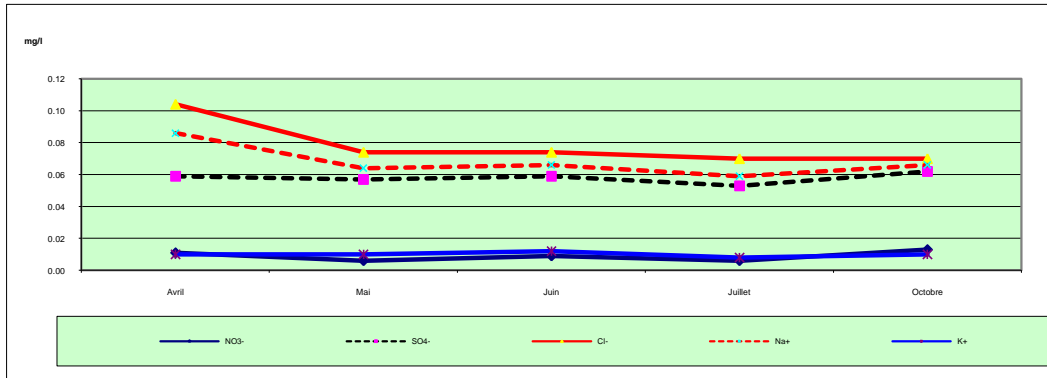


Figure 25. Variations temporaires de la minéralisation de la source Chrafate

- Diagramme de Piper : Le diagramme de Piper montre que le faciès chimique de la source Chrafate est bicarbonaté calcique comme représenté dans la (figure 26)

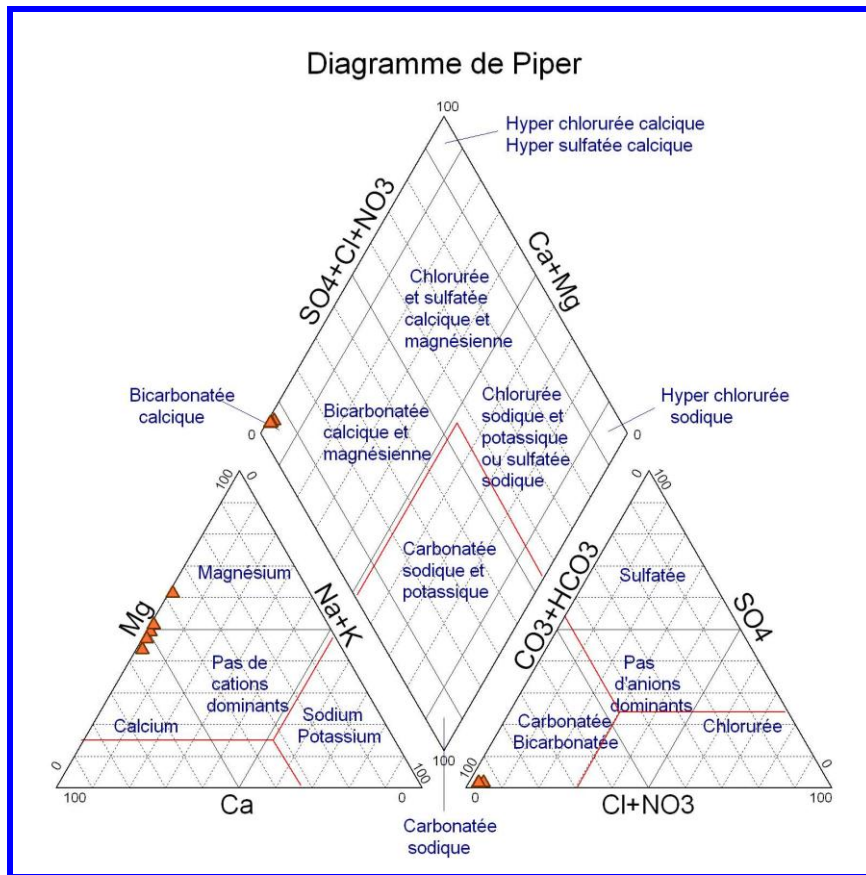


Figure 26. Diagramme de Piper de l'analyse des eaux de la source Chrafate

L'origine des sulfates peut être attribuée aux terrains marneux et évaporitiques qui affleurent à l'amont de cette source. Alors que les nitrates leur origine peut être due soit à une activité agricole et l'épandage du fumier sur les terrains destinés à la culture soit à une origine naturelle comme l'humus forestier.

L'eau circule au contact de ces argiles du Crétacé supérieur, où elle se charge en Chlorure de Sodium et en Sulfate avant d'atteindre la barre dolomitique d'où sourd la source sur le versant sud de la structure de Jbel Bou Slimane. L'influence des crues est très visible sur l'évolution de la conductivité, du rapport calcium magnésium, les bicarbonates, les sulfates et les chlorure de sodium.

L'étude des variations des paramètres physico-chimiques de la source Chrafate, montre que celle-ci est liée à un aquifère karstique essentiellement calcaro-dolomitique. L'hétérothermie de la source montre qu'il s'agit d'un aquifère dont les réserves est plus ou moins sensible aux variations thermiques ambiantes. Ceci implique une circulation peu

profonde, expliquant la minéralisation globale moyenne et des températures variables en fonction des saisons.

3. Source Ras El Ma

3.1. Paramètres physiques

- **Température** : L'eau de cette source est légèrement froide, sa température est de l'ordre de 12°C. L'écart entre les températures élevées et les températures basses est très faible, cette stabilité thermique témoigne apparemment de l'importance de la dimension du réservoir.

- **pH** : L'eau de la source Ras Lma possède un pH maximum 7.88 pendant le mois d'Avril et accuse une légère baisse pour atteindre une valeur minimale de 7.24 au mois de Mai, puis se stabilise entre les mois de Juin et d'Octobre autour de la valeur de 7.43 (figure 27).

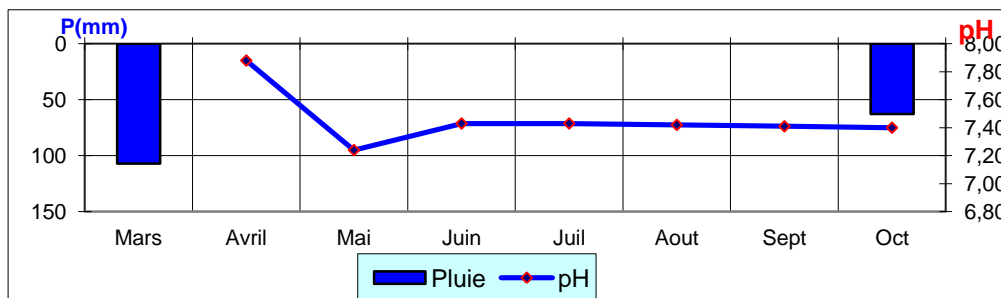


Figure 27. Evolution temporaire du pH de la source Ras El Ma

- **Conductivité** : elle varie en fonction des périodes de crue ou d'étiage, elle diminue en période pluvieuse et augmente en étiage. Cette variation est causée par la vidange des Systèmes Annexe de Drainage (SAD). (figure28)

3.2. Analyses chimiques

- **Bicarbonates (HCO_3^-)** : Sa courbe d'évolution montre une augmentation en période humide et une diminution en période estivale (figure 28), l'amplitude de variation reste faible, il est de l'ordre de 0.3 mg/l. On note un redressement de la courbe des concentrations en bicarbonates qui s'explique par l'augmentation des pressions partielles du CO_2 au sol.

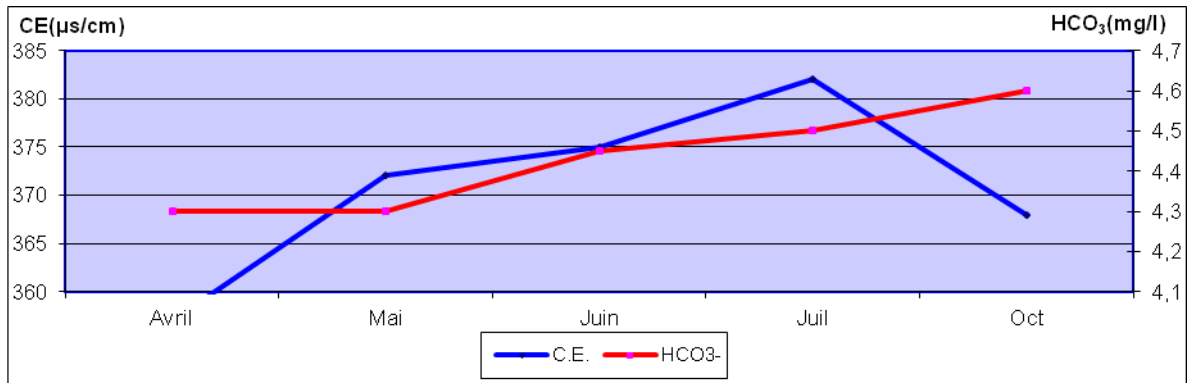


Figure 28. Variations de la conductivité électrique et des bicarbonates des eaux de la source Ras El Ma

- Rapport Calcium Magnésium : Sa variation avec une moyenne de 1.29, oscille entre un maximum de 1,39 enregistré au de Mai et un minimum de 1.17 enregistré en Octobre (figure29); il augmente à la suite d'une averse intense et soutenue par les pluies précédentes enregistrée pendant les mois de Novembre et Décembre, puis se stabilise à un maximum pendant les mois de Mai et de Juin et accuse une diminution entre le mois de Juin et celui de Juillet pour se stabiliser jusqu'à Octobre autour de 1.17.

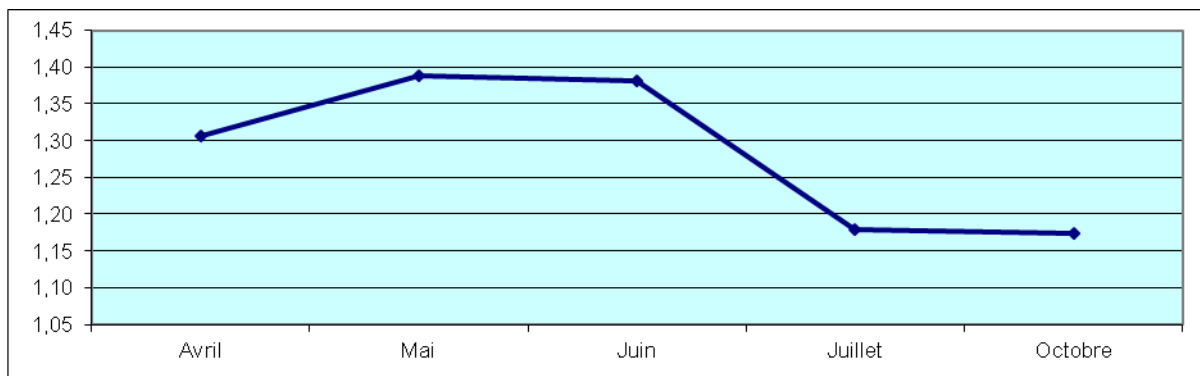


Figure 29. Evolution temporelle du rapport Ca²⁺/Mg²⁺ de la source Ras El Ma

- Sodium et Chlore : Ils sont présents en quantités très faibles, leur évolution montre une augmentation relative des teneurs au cours de la saison pluvieuse suivie d'une légère diminution en période d'été (figure30). L'essentiel des apports proviendrait du lessivage des terrains marneux du Crétacé supérieur et des apports atmosphériques.

- Sulfates : Ils présentent des pics variant de 6 mg/l en période d'été et une baisse des concentrations en hiver et au début du printemps avec des teneurs de l'ordre de 5.55 mg/l

(figure30). La majorité des apports proviendrait du lessivage du substratum représenté par les marnes Turono-Sénoniennes de l'unité de Tanger interne qui affleurent en aval de la source et sur les berges de l'Oued Ras Lma.

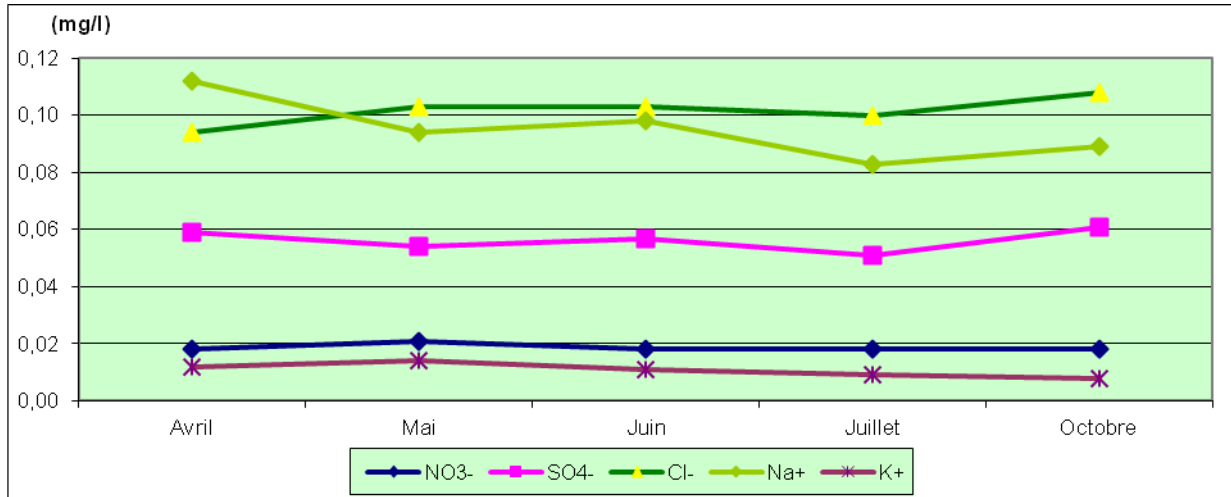


Figure 30. Evolution temporaire de la minéralisation de Ras El Ma

-Diagramme de Piper : L'eau de la source Ras El Ma est caractérisée par un faciès bicarbonaté calcique.(figure 31)

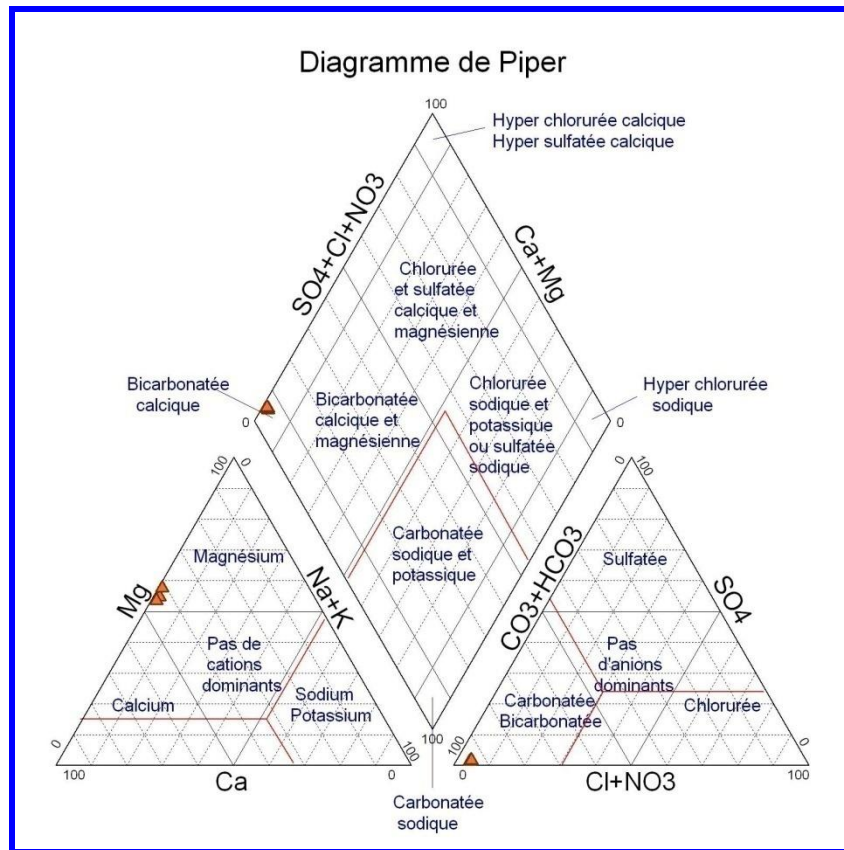


Figure 31. Diagramme de Piper de la source Ras El Ma

- **Diagramme Star** : On a représenté les pourcentages des variations mensuelles, des ions majeurs de l'eau de la source Ras El Ma par la méthode Star dans les diagrammes de la figure pour mieux visualiser les variations temporaires de la minéralisation de cette source.

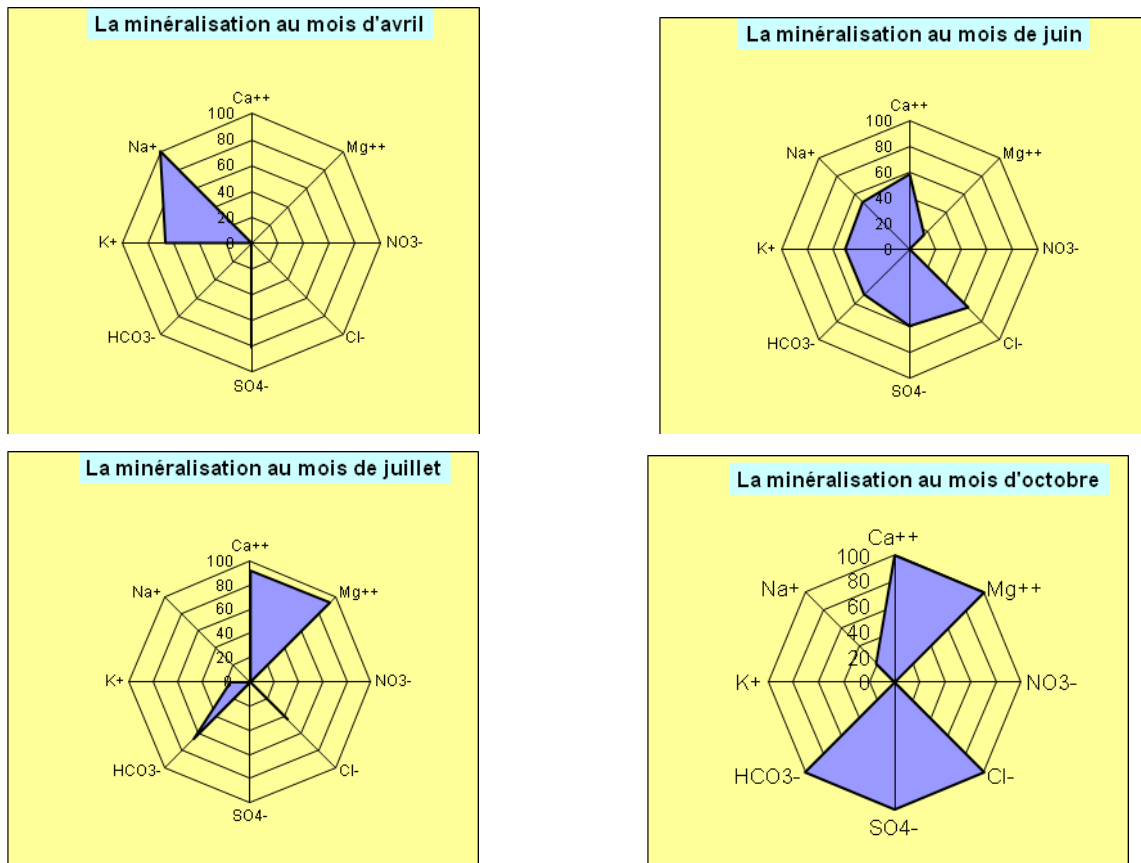


Figure 32. Diagrammes Star avec évolution temporelle de la source Ras El Ma

L'étude des variations du chimisme des eaux de la source Ras El Ma montre que celle-ci est liée à un aquifère karstique essentiellement calcaro-dolomitique. Les terrains marneux sus-jacents fournissent les sulfates et les chlorures de sodium. Ces éléments sont abondants en période des hautes eaux, suite au lessivage des eaux de pluie. La stabilité thermique de ses eaux, avec une température moyenne de l'ordre de 12°C, soupçonne l'importance de la réserve.

Conclusion générale :

A l'issue de la synthèse des résultats, cette partie serait consacré à tirer des conclusions. L'approche pluridisciplinaire mise en œuvre a permis d'aborder l'étude des sources Ras El Ma et Chrafate, sous plusieurs aspects :

La description de l'évolution des contextes géologique et climatologique et de la fracturation, et le fonctionnement hydrodynamique et l'étude hydrochimique.

A l'échelle régionale, le climat du secteur étudié est humide à sub-humide. L'évolution des paramètres tels que la précipitation et la température a montré l'existence de deux périodes dominantes ayant des impacts directs et indirects sur l'hydrogéologie des systèmes: Une période pluviale durant laquelle les nappes Karstiques sont alimentées directement par les précipitations ou indirectement par la fonte de neige, une période estivale pendant laquelle les aquifères se trouvent dans un état de tarissement.

L'étude de la fracturation a apporté que 4 familles de directions principales qui ont été déterminées: NW-SE, N-S, E-W et NE-SW. La famille de direction NE-SW est la plus dominante et coïncide avec celle de l'analyse de réseau hydrographique ce qui laisse supposer que la fracturation guide en surface les principaux cours d'eau.

L'étude des tarissements nous a révélé l'existence de systèmes de nappes avec des coefficients de tarissement variant avec le débit de drainage et nous a permis également de réaliser les évaluations des réserves dynamiques au niveau des sources disposant des séries de mesures adéquates.

L'analyse physico-chimique des eaux, a révélé que ces différentes émergences semblent se rattacher à des systèmes restreints influencés par leurs caractères lithologiques.

La stabilité thermique prouve l'importance de la réserve dynamique pour la source Ras El Ma, Alors que la source Chrafate montre qu'elle est liée à une réserve sensible aux variations thermique ceci implique une circulation peu profonde.

Le diagramme de Piper nous a permis de déterminer : des faciès bicarbonatés-calcaiques très abondants. Ainsi, ce constat peut être expliqué par la circulation des eaux dans des réservoirs calcaires avec des alternances calcaro-dolomitiques. Des faciès bicarbonatés magnésiens témoignent soit une prédominance de circulation dans des réseaux dolomitiques, soit

l'importance du temps de séjour, soit tout simplement d'une action anthropique par l'installation des carrières aux voisinages des émergences des sources.

Les minéralisations montrent un minimum en période de crue causé probablement par la dilution des eaux de pluie et un maximum en période d'été où l'eau est en équilibre avec son environnement minéralogique.

Les variations saisonnières des paramètres physico-chimiques ont souligné l'influence de la lithologie et du temps du séjour des eaux dans l'aquifère dans l'acquisition du chimisme des sources.

Références Bibliographiques

- AMRAOUI A.** (1988) - Hydrogéologie de la Dorsale calcaire du Rif. Thèse de troisième cycle, Grenoble, (209 pages).
- ABOUFIRASSI M., EL-HEBIL A., EL-MANDOUR A., AMRHAR M., BAHIR M., ERROUANE S., FAKIRY., LAFTOUHI N.E., QUORTOBI M.,** (1991) - Hydrologie des milieux fissurés: Milieux carbonatés et milieux de socle. Eau Développement 11, 62-68.
- BAKALOWICZ.M.** (1999) - Connaissance et gestion des ressources en eaux souterraines dans les régions karstiques, CNRS, (44 pages).
- BENABID A.** (1982) - "Etudes phytoécologique, biogéographique et dynamique des associations et séries sylvatiques du Rif Occidental" - Thèse Université de Sciences Aix-Marseille 3.
- BOULAAJOU M.** (2002) - Approche du bilan hydrologique par modèle mathématique, cas des bassins de Laou et El Kebir . Direction de la région hydraulique, Tétouan, (129 pages).
- CHAOUNI A.** (1999) - Relation entre la circulation des eaux, les instabilités des bassins versants avec la fracturation dans la rive sud du détroit de Gibraltar (Rif Septentrional, Maroc). Doctorat, Faculté des Sciences et Techniques Fès, juillet 1999, 301p.
- Durand Delga M.,** Hottinger L., Marçais J., Mattauer M., Milliard Y., & Suter G., (1960-62) - Données actuelles sur la structure du Rif. Liv. Mém. Prof. FALLOT. Mém. Hors sér. Soc. Géol. France, 1, pp. 399-422.
- EL GHARBAOUI A.** (1981) - La terre et l'homme dans la péninsule tingitane. Travaux de l'institut scientifique de Rabat, 362 p.
- EI HATIMI** (1991), Rifting Mésozoïque sur la bordure occidentale du Rif interne (Maroc). Evolution géodynamique d'un secteur de la marge ouest – Téthysienne. Thèse. Doct. d'état. Univ. De Pau et des pays de l'Adour, 317p
- EL KADIRI K.** (1991) - La Dorsale calcaire (Rif interne, Maroc) : Stratigraphie, sédimentologie et évolution géodynamique d'une marge alpine durant le mésozoïque. Mise en évidence d'un modèle. Thèse de doctorat. Faculté des sciences Tétouan, Tétouan, (332 pages).
- GRIFFON J.C.** (1966) - La Dorsale calcaire au sud de Tétouan. Notes et mémoires N°184 Ministère d'Energie et des Mines, Maroc, (54pages).
- HLILA R.** (2005) - Evolution tectono sédimentaire tertiaire au front Ouest du domaine d'Alboran, Ghomarides et Dorsale calcaire, Rif septentrional, Maroc. Thèse de doctorat, Faculté des sciences de Tétouan, Tétouan, (314 pages).
- LARRAS J.** (1972) - Prévision et prédétermination des étiages. Edition Eyrolles. Paris, (159 pages).
- MAATE A.** (1996) - Estratigrafia y evolucion paleogeografica alpina del dominio gomaride , Rif interno, Marruecos). Thèse de doctorat. Facultad des ciencias, Universidad de Granada, Espana, Granada, (397pages).

- MATHEVET. T.** (2002) - Analyse du fonctionnement du système Karstique de Bange-L'eau- Morte. Mémoire de DEA, Université de Pierre et Marie Curie, Paris, (59 pages).
- MICHARD A.** (1976) - Elément de géologie du Maroc . Editions Ministère des mines, Rabat, (252 pages).
- GRASSO D. A.** (1998) - Interprétation des réponses hydrauliques et chimiques des sources karstiques, Essai d'interprétation de la structure des systèmes karstiques. Thèse de doctorat, Université Neuchâtel, Faculté des sciences, Centre d'hydrogéologie, Suisse, (120 pages).
- NOLD M. UTTINGER J. et WILDI W.** (1981) - Géologie de la Dorsale calcaire entre Tétouan et Assifane (Rif interne, Maroc). Ministère de l'Energie et des Mines, Editions du service géologique du Maroc, Rabat, (205 pages).
- PIQUE A.** (1994) - Géologie du Maroc. Editions Imprimerie El Maarif el jadida, Rabat, (277 pages).
- SOSSEY ALAOUI F.** (2005) - Traitement et intégration des données satellitaires optiques et radar dans un SIG en vue de l'élaboration des cartes de l'aléa liées aux instabilités de terrain dans la péninsule de Tanger (Rif Septentrional, Maroc). Thèse de doctorat, Université Mohamed V, Rabat, (230 pages).
- SUTER G.** (1980) - Carte géologique et structurale de la chaîne Rifaine au 1/500000 ;Notes et Mém. Serv. Géol. Maroc, 245 p.
- TARGUISTI K.** (1994) – Petrologia y geoquímica de los macisos ultramáficos de Ojen (Andalucía) y de Ben Bousera (Rif Septentrional, Maruecos). Tesis. Universidad Granada.