

# وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

BADJI MOKHTAR- ANNABA UNIVERSITY  
UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR- ANNABA



جامعة باجي مختار-عناية  
Année 2015

Faculté des sciences de la Terre  
Département de Géologie

## THESE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de  
DOCTORAT EN SCIENCES

**Caractérisation physico-chimique des eaux souterraines dans la  
région de Guelma, Nord-Est Algérien.**

Option: Hydrogéologie

Par : BENMARCE Kaddour

**DIRECTEUR DE THESE :**

**CHOUABBI Abdelmadjid**

**M.C.A., U.B.M.A., Annaba**

**CO-DIRECTEUR DE THESE :**

**BOUABSA Lakhdar**

**Pr. U.B.M.A., Annaba**

**DEVANT LE JURY**

**PRESIDENT :**

**HANI Azzedine**

**Pr. U.B.M.A. Annaba**

**EXAMINATEURS :**

**MAOUI Ammar**

**Pr. U. 8 Mai 45 Guelma**

**FEHDI Chemseddine**

**Pr. U. Larbi Tebessi Tebessa**

**BAALI Fethi**

**M.C.A. U. Larbi Tebessi Tebessa**

## الخصائص الفيزيوكيميائية للمياه الجوفية في مقاطعة قالمة الشمال الشرقي الجزائري

### ملخص

تنتمي منطقة الدراسة إلى الجهة الشرقية للسلسلة المغاربية (Maghrébides)، وتتكون من الناحية الجيولوجية من ثلاث نطاقات كبرى :

- النطاق ما بعد الطبقات المتحركة و يتكون من طمي العصر الرابع (Quaternaire)،
- اترافرتين لحوض قالمة – ترافرتين لحوض عين مخلوف و الكلس الحجري البحيري.
- النطاق المتقل و الذي يتكون من التكونات النوميديّة، الطبقة التلية العليا و الطبقة التلية.
- النطاق المحلي و الذي يتكون من تكوينات سلاوة و تكوينات النيريتيكي.

إن الغاية من هذه الدراسة المتكونة من مرحلتين تدور حول إبراز علاقة الماء بالصخر. في المرحلة الأولى تم تحديد التكوينات الجيولوجية ميدانيا و التي قسمت إلى مناطق صغيرة و في المرحلة الثانية تم اختيار ثلاثين منبع و بئر واحد للدراسة.

حيث أخذنا عينات ماء للتحليل في فصل الأمطار (ماي 2009) وفصل الجفاف (أوت 2009). تكمن منهجية العمل في إبراز الخصائص الفيزيوكيميائية للعينات من خلال دراسة الخصائص الفيزيائية: الموصلية الكهربائية، درجة الحرارة، قدرة الحموضة (pH)، قدرة التأكسد و تحلل (Eh)، الأكسجين المحلل و صلابة الماء والخصائص الكيميائية : العناصر الكبرى و العناصر الصغرى.

سمحت دراسة مختلف النتائج المتحصلة بتحديد الخصائص الفيزيوكيميائية للمياه الجوفية، و ساعد البرنامج التبياني (STIFF) في إبراز الأيونات المسؤولة في التصنيف الكيميائي و المصدر الجيولوجي للمياه. كما ساعد برنامج التحليل الرئيسي (ACP) على تشخيص العناصر المؤثرة في التركيبة الكيميائية للمياه.

**كلمات المفتاح :** مائي- صخري، رسوبيات، ترافرتين، النوميدي، التلي، تكوينات سلاوة، النيريتيكي، السحنة الكيميائية، قالمة، الجزائر.

# Physico-chemical characterization of groundwater in Guelma area, North-Eastern of Algeria

## Abstract

The study area is part of the north-eastern termination of the Alpine chain (Maghrebides). It consists geologically three main areas:

- Post-plies field, which includes the recent formations (Quaternary alluvium, travertine basin of Guelma, travertine basin of Ain Makhoul and lake limestone),
- The immigrant field that includes training thrusts (Numidian, ultra-Tellian and Tellian) and
- Para-native field, which includes Sellaoua and Neritic carbonate formations.

The purpose assigned to this study in two phases is based on the detection of water-rock interaction. In the first phase, geological formations have been explored, identified and delineated in areas in the second phase, a number of thirty water points (twenty nine sources and drilling), the most representative said formations were selected and samples were taken into two periods; in high water (May / 2009) and low water (August / 2009).

The methodology of work consists of the physico-chemical characterization of water sampled by the interpretation of physical parameters: electrical conductivity ( $\mu\text{s/cm}$ ), T ( $^{\circ}\text{C}$ ), pH, Eh (mv), dissolved oxygen (mg/l) and hardness ( $^{\circ}\text{F}$ ) and, chemical parameters: major and minor elements.

The interpretation of the different results obtained was used to determine the physical and chemical properties of groundwater. The use of water graphical diagrams (Stiff diagram) has defined the dominant ions responsible for water chemical facies and geological formations in the origin of these facies.

The principal component analysis (PCA) as a tool to assist in interpretation, allowed to know the key factors that represent the different processes involved in water chemistry.

**Keywords:** water-rock, alluvium, travertine, Numidian, Tellian, Sellaoua, Neritic, chemical facies, Guelma, Algeria.

# Caractérisation physico-chimique des eaux souterraines dans la région de Guelma, Nord-Est Algérien

## Résumé

La zone d'étude fait partie de la terminaison nord-orientale de la chaîne des (Maghrébides). Elle est constituée géologiquement de trois grands domaines :

- Le domaine Post-nappes, qui comprend les formations récentes (alluvions quaternaires, travertins du bassin de Guelma, travertins du bassin d'Ain Makhlouf et les calcaires lacustres) ;
- Le domaine allochtone qui comprend les formations charriées (numidiennes, ultra-telliennes et telliennes) ;
- Le domaine para-autochtone, qui comprend les Sellaoua et le Néritique.

Le but assigné à cette étude menée en deux phases, s'articule autour de la mise en évidence de l'interaction eau-roche. Dans la première phase, les formations géologiques ont été prospectées, identifiées et délimitées en sous zones, dans la deuxième phase, un nombre de trente points d'eau (vingt neuf sources et un forage), les plus représentatifs des dites formations ont été sélectionnés et échantillonnés en deux périodes ; en hautes eaux (mai/2009) et en basses eaux (août/2009).

La méthodologie du travail consiste en, la caractérisation physico-chimiques des eaux échantillonnées par l'interprétation des paramètres physiques : conductivité électrique ( $\mu\text{s}/\text{cm}$ ),  $T^{\circ}\text{C}$ , pH, Eh (mv), oxygène dissous (mg/l) et dureté ( $^{\circ}\text{F}$ ) et, les paramètres chimiques : éléments majeurs et éléments mineurs.

L'interprétation des différents résultats obtenus, a permis de déterminer les propriétés physiques et chimiques des eaux souterraines. L'utilisation de diagrammes de représentation graphique des eaux (diagramme de Stiff) a permis de définir les ions dominants responsables des faciès chimiques des eaux et les formations géologiques à l'origine de ces faciès. L'analyse en composantes principales (ACP), comme outil d'aide à l'interprétation, a permis de connaître les principaux facteurs qui représentent les différents processus intervenant dans la composition chimique des eaux.

**Mots clés :** Eau-roche, alluvions, travertins, numidien, Tellien, Sellaoua, Néritique, faciès chimiques, Guelma, Algérie.

## **REMERCIEMENTS**

Les travaux de recherche présentés dans le cadre de ce mémoire, ont été effectués en deux étapes. La première a été consacrée aux travaux de terrain pour la sélection des sources les plus représentatives des différents formations situées dans la zone d'étude et la seconde, à l'échantillonnage des eaux des sources sélectionnées et leurs analyses au niveau du laboratoire de chimie de l'université du 8 mai 45 de Guelma.

Arrivé à terme de la rédaction de ce mémoire, je voudrais témoigner ma gratitude et présenter mes sincères remerciements à toutes ces personnes :

- A mes parents d'abord, à toute ma famille, proches et amis pour leur soutien moral ;
- Monsieur Abdelmadjid CHOUABBI, mon directeur de thèse et ami de toujours, docteur d'état à l'université de BADJI Mokhtar d'Annaba, pour tous les efforts qu'il a fournis, sur le terrain comme au bureau pour l'aboutissement aux objectifs souhaités ;
- Monsieur Pr. BOUABSA Lakhdar co-directeur de thèse pour ses orientations précieuses dans l'interprétation des différents résultats d'analyses;
- Monsieur : Azzedine HANI, Professeur à l'université de BADJI Mokhtar d'Annaba qui a toujours manifesté sa disponibilité à aider, orienter et proposer le fruit de sa longue expérience et savoir faire.
- Messieurs les membres du jury qui ont accepté de lire et de critiquer objectivement mon travail de recherche pour le valoriser ;
- Monsieur Salah CHAAB, M.C.A., à l'université de BADJI Mokhtar d'Annaba qui n'a ménagé aucun effort pour me faire partager son savoir faire en matière de manipulation de logiciels et de m'avoir reçu dans son équipe de recherche dans le cadre du plan national de recherche.

Mes remerciements aux enseignants du département de géologie et amis de toujours pour leur soutien moral, pour leurs conseils et orientations pendant toute la période de mon travail :

- Monsieur Bachir SAAIDIA, M.C.A., à l'université de BADJI Mokhtar d'Annaba ;
- Monsieur Kamel KANCHOUL, Pr. à l'université de Badji Mokhtar d'Annaba ;
- Monsieur BENHAMZA Moussa, docteur d'état à l'université de Badji Mokhtar d'Annaba ;
- Monsieur Azzedine MEBARKI, professeur, université Mentouri, Constantine.

Mes remerciements vont également à mes collègues de travail à la D.R.E.W de Guelma, aux techniciens des différents laboratoires pour bien avoir voulu mettre à ma disposition tout le matériel nécessaire en réactifs et instruments pour les analyses physico-chimiques dans les meilleures conditions :

- Monsieur, le Professeur Mohamed GUENFOUD, directeur de laboratoire du département de génie civil de l'université du 8 Mai 45, de Guelma.
- Monsieur Amar NEMOUCHI, ingénieur de laboratoire du département de chimie de l'université du 8 Mai 45, de Guelma.

A toutes ces personnes, je témoigne mes remerciements les plus sincères

## TABLBE DES MATIÈRES

	<b>Page</b>
ملخص	II
<b>Abstract</b>	III
<b>Résumé</b>	IV
<b>Remerciement</b>	V
<b>Table des matières</b>	VI-XI
<b>Liste des tableaux</b>	XII-XV
<b>Liste des figures</b>	XVI-XVII
<b>Liste des abréviations</b>	XVIII

### Chapitre I : CADRE GÉNÉRAL DE LAZONE D'ÉTUDE

I. INTRODUCTION	2
I.1. Situation géographique de la zone d'étude	2
I.2. Géomorphologie générale	2
I.3. Hydrologie	3
I.4. Contexte socio-économique	4

### Chapitre II : CADRE GÉOLOGIQUE DE LA ZONE D'ETUDE

II. Etude géologique	6
II.1. Introduction	6
II.2. Cadre géologique régional	6
II.3. Stratigraphie des différentes unités structurales	6
II.3.1. Les formations récentes	7
II.3.1.1. Quaternaire	7
II.3.1.1.1. La basse terrasse	7
II.3.1.1.2. La moyenne terrasse	7
II.3.1.1.3. La haute terrasse (Salétien)	8
II.3.1.2. Mio-Pliocène	8
II.3.2. Le domaine allochtone	8
II.3.2.1. La nappe numidienne	8
II.3.2.2. La nappe des Flyschs	8
II.3.2.2. 1.Sénonien	8
II.3.2.2.2. Cénomaniens – Turonien	8
II.3.2.2.3. Crétacé inférieur	8
II.3.2.3. La nappe tellienne	9
II.3.2.3.1. La nappe ultra-tellienne	9
II.3.2.3.1.1. La nappe ultra-tellienne du Djebel Haouara	9
II.3.2.3.1.2. La nappe ultra-tellienne de Djebel bou sbaa	9
II.3.2.3.2. Les unités telliennes sensu stricto	9
II.3.2.3.2.1. La nappe tellienne de Hammam Ouled Ali	9
II.3.2.3.2.2. La nappe tellienne de la région de Ras El Agba-Sellaoua Announa	9
II.3.2.3.2.2.1. L'unité tellienne à Globigérines	9

II.3.2.3.2.2.2. L'unité tellienne à nummulites	9
II.3.3. Le domaine para-autochtone	10
II.3.3. 1. La nappe néritique constantinoise	10
II.3.3.1.1. A l'Est de Djebel Debar	10
II.3.3.1.1.1. Les niveaux siliceux	10
II.3.3.1.1.2. Les calcaires massifs organo-détritiques	10
II.3.3.1.1.3. Les dolomies noires	10
II.3.3.1.2. A Hammam Ouled Ali	11
II.3.3.3.1.3. Au Douar Bouzitoune-Héliopolis	11
II.3.3.1.4. A la station Nador	11
II.4. Le cadre structural	11
II.4.1. La phase fini-éocène dite "atlasique"	11
II.4.2. La phase miocène inférieure	11
II.4.3. La phase tectonique post-nappe	11
II.5. Reconstitution paléogéographique:	11
Conclusion	12

### Chapitre III : CARACTÉRISTIQUES HYDROLOGIQUES ET CLIMATIQUES

III. Etude Hydro-climatique de la zone d'étude	14
Introduction	14
III.1. Les précipitations météoriques	14
III 1.1. Les variations des précipitations	14
III.2. Les températures	15
III.2. 2. Les variations des températures	15
III 3. Le Bilan hydrique	16
III.3.1. Etablissement d'un bilan Hydrique par la méthode de Thornthwaite	16
III.3.2. Estimation du ruissellement	19
III.3.3. Estimation de l'infiltration	19
Conclusion	20

### Chapitre IV : ÉTUDE HYDROGÉOLOGIQUE

IV. Etude hydrogéologique (description hydrogéologique des différents aquifères)	22
IV.1. L'aquifère des alluvions quaternaires du bassin de Guelma	23
IV.1.2. Directions des écoulements	25
IV.1.3. Piézométrie de l'aquifère alluvionnaire de Guelma	25
IV.2. L'aquifère des formations carbonatées dans la région d'Héliopolis-El Fedjoudj	27
IV.2.1. Directions des écoulements	27
IV.2.2. Piézométrie dans l'aquifère des formations carbonatées dans la région d'Héliopolis-Fedjoudj	28
IV.3. L'aquifère des formations carbonatées de la région de Ras El Agba-Sellaoua Announa	28
IV.3.1. Directions des écoulements dans l'aquifère des formations carbonatées de la région de Ras El Agba-Sellaoua-Announa	29
IV.3.2. Piézométrie dans l'aquifère des formations carbonatées de la région de Ras El	29

Agba-Sellaoua-Announa	
IV.4. L'aquifère des formations carbonatées de la région de Bouhachana–Ain Larbi	29
IV.4.1. Directions des écoulements dans L'aquifère des formations carbonatées de la région de Bouhachana–Ain Larbi	30
Conclusion	30-31

## Chapitre V : CARACTÉRISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DES EAUX SOUTERRAINES

V. Caractéristiques physicochimiques des eaux souterraines	33
V.1. Généralités hydrogéochimiques	33
V.2. Méthodologie de travail	33
Méthodes d'analyses	34
V.3. Présentation des résultats	35
V.4. Situation des sources dans leur cadre lithologique	36
V.4.1. Les formations récentes	37
V.4.1.1. Les alluvions	37
V.4.1.2. Les Travertins Mio-Pliocène du bassin de Guelma	37
V.4.1.3. Les travertins Mio-Pliocène du bassin d'Ain Makhlouf	38
V.4.1.4. Les calcaires lacustres (Mio-Pliocène)	38
V.4.2. Le domaine allochtone	38
V.4.2.1. Les formations numidiennes	38
V.4.2.2. Les formations Ultra-telliennes	38
V.4.2.3. Les formations telliennes	39
V.4.2.3.1. Les formations telliennes à Globigérines	39
V.4.2.3.2. Les formations telliennes à Nummulites	39
V.4.3. Le domaine para-autochtone	39
V.4.3.1. Les formations Sellaoua	39
V.4.3.2. Les formations néritiques	39
V.5. Discussion et interprétation des résultats	40
V.5.1. Les formations récentes	40
V.5.1.1. L'aquifère alluvionnaire du bassin de Guelma	40
V.5.1.1.1. Les paramètres physiques	40
V.5.1.1.2. Les paramètres chimiques	42
V.5.1.1.2.1. Teneurs en cations	42
V.5.1.1.2.2. Teneurs en anions	44
V.5.1.1.2.3. Eléments mineurs naturels	47
V.5.1.1.3. Détermination des principaux faciès chimiques	48
V.5.1.1.4. Répartition spatiale des faciès chimiques	49
V.5.1.1.5. Acquisition de la minéralisation des eaux souterraines	49
V.5.1.1.6. Analyse en composantes principales des eaux souterraines	51
Conclusion	54-55
V.5.1.2. Les travertins du bassin Mio-Pliocène de Guelma	56
V.5.1.2.1. Les paramètres physiques des eaux souterraines des travertins du bassin Mio-Pliocène de Guelma	56
V.5.1.2.2. Les paramètres chimiques des eaux souterraines des travertins du bassin de Guelma (mai et aout/2009)	57

V.5.1.2.2.1. Teneurs en cations cations	57
V.5.1.2.2.2. Teneurs en anions anions	57
V.5.1.2.2.3. Teneurs en éléments mineurs	58
V.5.1.2.3. Détermination des principaux faciès chimiques des travertins du bassin de Guelma (mai-aout/2009)	59
V.5.1.2.4. Répartition spatiale des faciès chimique des eaux des travertins du bassin de Guelma (mai-aout /2009).	60
V.5.1.2.5. Acquisition de la minéralisation des eaux souterraines des travertins du bassin de Guelma	60
V.5.1.2.6. Analyse en composantes principales des eaux souterraines des travertins du bassin de Guelma	61
Conclusion	64
V.5.1.3. Les travertins Mio-Pliocène du bassin d'Ain Makhlouf	65
V.5.1.3.1. Les paramètres physiques des eaux souterraines des travertins du bassin d'Ain Makhlouf (mai-aout/2009)	65
V.5.1.3.2. Paramètres chimiques des eaux souterraines des travertins du bassin d'Ain Makhlouf (mai-aout/2009)	66
V.5.1.3.2.1. Teneurs en cations cations	66
V.5.1.3.2.2. Teneurs en anions	66
V.5.1.3.2.3. Teneurs en éléments mineurs	67
V.5.1.3.3. Détermination des faciès chimiques des eaux souterraines des travertins du bassin d'Ain Makhlouf	68
V.5.1.3.4. Répartition spatiale des faciès chimiques des eaux souterraines des travertins du bassin d'Ain Makhlouf	68
V.5.1.3.5. Acquisition de la minéralisation des eaux souterraines des travertins du bassin d'Ain Makhlouf	69
V.5.1.3.6. Analyse en composantes principales des eaux souterraines des travertins du bassin d'Ain Makhlouf (mai-aout/2009)	70
Conclusion	72-73
V.5.1.4. Les calcaires lacustres	74
V.5.1.4.1 Les paramètres physiques des eaux souterraines des calcaires lacustres	74
V.5.1.4.2. Les paramètres chimiques des eaux souterraines des calcaires lacustres (mai-aout/2009).	74
V.5.1.4.2.1. Teneurs en cations cations	74
V.5.1.4.2.2. Teneurs en anions anions	74
V.5.1.4.2.3. Teneurs en éléments mineurs	75
V.5.1.4.3. Détermination des faciès chimiques des eaux souterraines des calcaires lacustres	75
V.5.1.4.5. Acquisition de la minéralisation des eaux souterraines	76
Conclusion	77
V.5.2. Le domaine allochtone	78
V.5.2.1. Les formations numidiennes	78
V.5.2.1.1. Paramètres physiques des eaux souterraines dans le Numidien (mai-aout/2009)	78
V.5.2.1.2. Paramètres chimiques des eaux souterraines dans le Numidien (mai-aout/2009)	79
V.5.2.1.2.1. Teneurs en cations cations	79

V.5.2.1.2.2. Teneurs en anions anions	79
V.5.2.1.2.3. Teneurs en éléments mineurs	80
V.5.2.1.3. Détermination des faciès chimiques des eaux souterraines du Numidien	80
V.5.2.1.4. Répartition spatiale des faciès chimiques des eaux souterraines du Numidien (mai-aout/2009).	81
V.5.2.1.5. Acquisition de la minéralisation des eaux souterraines dans le Numidien (mai-aout/2009)	81
Conclusion	82
V.5.2.2. Les formations Ultra-telliennes	83
V.5.2.2.1. Paramètres physiques des eaux souterraines dans les formations ultra-telliennes	83
V.5.2.2.2. Paramètres chimiques des eaux souterraines dans les formations ultra-telliennes	84
V.5.2.2.2.1. Teneurs en cations	84
V.5.2.2.2. Teneurs en anions	84
V.5.2.2.2.3. Teneurs en éléments mineurs	85
V.5.2.2.3. Détermination des faciès chimiques des eaux souterraines des formations ultra-telliennes	86
V.5.2.2.4. Répartition spatiale des faciès chimiques des eaux souterraines dans l'Ultra-Tellien	87
V.5.2.2.5. Acquisition de la minéralisation	88
V.5.2.2.6. Analyse en composantes principales	89
Conclusion	93
V.5.2.3. Les formations telliennes	95
V.5.2.3.1. Les formations telliennes à Globigérines	95
V.5.2.3.1.1. Paramètres physiques des eaux souterraines dans le Tellien à globigérines (mai-aout/2009).	95
V.5.2.3.1.2. Paramètres chimiques des eaux souterraines dans le Tellien à globigérines (mai-aout/2009).	96
V.5.2.3.1.2.1. Teneurs en cations	96
V.5.2.3.1.2.2. Teneurs en anions	97
V.5.2.3.1.2.3. Teneurs en éléments mineurs	98
V.5.2.3.1.3. Détermination des faciès chimiques eaux souterraines dans le Tellien à globigérines (mai-aout/2009).	98
V.5.2.3.1.4. Répartition spatiale des faciès chimiques eaux souterraines dans le Tellien à globigérines (mai-aout/2009).	100
V.5.2.3.1.5. Acquisition de la minéralisation des eaux souterraines dans le Tellien à globigérines (mai-aout/2009).	100
V.5.2.3.1.6. Analyse en composantes principales	101
Conclusion	104
V.5.2.3.2. Les formations telliennes à Nummulites	105
V.5.2.3.2.1. Paramètres physiques des eaux souterraines dans le Tellien à Nummulites (mai/2009).	105
V.5.2.3.2.2. Paramètres chimiques des eaux souterraines dans le Tellien à Nummulites (mai-aout/2009).	106
V.5.2.3.2.2.1. Teneurs en cations	106
V.5.2.3.2.2.2. Teneurs en anions	107

V.5.2.3.2.2.3. Teneurs en éléments mineurs	107
V.5.2.3.2.3. Détermination des faciès chimiques eaux souterraines dans le Tellien à Nummulites (mai-aout/2009).	108
V.5.2.3.2.4. Répartition spatiale des faciès chimique des eaux souterraines dans le Tellien à Nummulites (mai-aout/2009).	109
V.5.2.3.2.5. Acquisition de la minéralisation des eaux souterraines dans le Tellien à Nummulites (mai-aout/2009).	109
V.5.2.3.2.6. Analyse en composantes principales eaux souterraines dans le Tellien à Nummulites (mai-aout/2009).	110
Conclusion	113
V.5.3. Le domaine para-autochtone	114
V.5.3.1. Les formations Sellaoua	114
V.5.3.1.1. Paramètres physiques des eaux souterraines dans les Sellaoua (mai-aout/2009)	114
V.5.3.1.2. Paramètres chimiques des eaux souterraines dans les Sellaoua (mai-aout/2009)	115
V.5.3.1.2.1. Teneurs en cations	115
V.5.3.1.2.2. Teneurs en anions	115
V.5.3.1.2.3. Teneurs en éléments mineurs	116
V.5.3.1.3. Détermination des faciès chimiques des eaux souterraines dans les Sellaoua (mai-aout/2009)	116
V.5.3.1.4. Répartition spatiale des faciès chimiques des eaux souterraines dans les Sellaoua	117
V.5.3.1.5. Acquisition de la minéralisation des eaux souterraines dans les Sellaoua	117
Conclusion	118-119
V.5.3.2. Les formations néritiques	120
V.5.3.2.1. Paramètres physiques des eaux souterraines dans le Néritique (mai-aout/2009)	120
V.5.3.2.2. Paramètres chimiques des eaux souterraines dans le Néritique (mai-aout/2009).	121
V.5.3.2.2.1. Teneurs en cations	121
V.5.3.2.2.2. Teneurs en anions	122
V.5.3.2.2.3. Teneurs en éléments mineurs	123
V.5.3.2.3. Détermination des faciès chimiques des eaux souterraines dans le Néritique (mai-aout/2009).	123
V.5.3.2.4. Répartition spatiale des faciès chimiques	124
V.5.3.2.5. Acquisition de la minéralisation des eaux souterraines dans le Néritique	125
V.5.3.2.6. Analyse en composantes principales	126
Conclusion	128-129

<b>Conclusion générale...</b> .....	130-131
<b>Bibliographie</b> .....	132-136

## Liste des tableaux

Tableau 1. Caractéristiques des stations météorologiques	14
Tableau 2. Variations mensuelles des précipitations (Station de Guelma : 71/72-08/09)	15
Tableau 3. Variations mensuelles des précipitations (Station d'A. Larbi : 71/72-08/09)	15
Tableau 4. Variations mensuelles des précipitations (Station de H. Débagh : 71/72-08/09)	15
Tableau 5. Températures extrêmes moyennes mensuelles (1986/87-2008/09)	15
Tableau 6. Bilan hydrique selon Thornthwaite. Station de Guelma (86/87-08/09)	17
Tableau 7. Bilan hydrique selon Thornthwaite. Station d'A. Larbi (86/87-08/09)	17
Tableau 8. Bilan hydrique selon Thornthwaite. Station de Hm. Débagh (86/87-08/09)	18
Tableau 9. Paramètres du bilan hydrique dans la zone d'étude (mm) Période (86/87 - 08/09)	19
Tableau 10 : Répartition des lames d'eau dans la zone d'étude	20
Tableau 11. Description hydrogéologique des formations de la plaine de Guelma	24
Tableau 12. Piézomètres dans l'aquifère alluvionnaire de Guelma (mai-aout/2009)	26
Tableau 13. Inventaire des forages et piézomètres dans la nappe alluvionnaire de Guelma (aout/2009)	26
Tableau 14. Inventaire des forages réalisés dans la zone d'Héliopolis-Fedjoudj (2009)	28
Tableau 15. Inventaire des forages réalisés dans la région de Ras El Agba-Sellaoua. Announa	29
Tableau 16. Inventaire des forages réalisés dans la région de Bouhachana-Ain Larbi (2009)	30
Tableau 17. Paramètres physiques des eaux souterraines des alluvions quaternaires du bassin de Guelma (mai-aout/2009)	41
Tableau 18. Classification des eaux d'après leur dureté (O.M.S, 2005)	41
Tableau 19. Teneurs en cations (mg/l) des eaux souterraines des alluvions du bassin de Guelma (mai-aout/2009)	42
Tableau 20. Variations des valeurs de l'indice d'échange de base des eaux souterraines des alluvions du bassin de Guelma (mai-aout/2009)	44
Tableau 21. Teneurs en anions (mg/l) des eaux souterraines des alluvions du bassin de Guelma (mai-aout/2009)	47
Tableau 22. Teneurs en éléments mineurs (mg/l) des eaux souterraines des alluvions du bassin de Guelma (mai-aout/2009)	47
Tableau 23. Indices de saturation des minéraux des eaux souterraines dans les alluvions de Guelma (mai/2009)	50
Tableau 24. Indices de saturation des minéraux des eaux souterraines dans les alluvions de Guelma (aout/2009)	50
Tableau 25. Matrice de corrélation des eaux souterraines des alluvions du bassin de Guelma (mai/2009)	52
Tableau 26. Matrice de corrélation des eaux souterraines des alluvions du bassin de Guelma (aout/2009)	54
Tableau 27. Paramètres physiques des eaux souterraines des travertins du bassin Mio-Pliocène de Guelma (mai-aout/2009)	56
Tableau 28. Teneurs en cations (mg/l) des eaux souterraines des travertins du bassin de Guelma (mai et aout/2009)	57

Tableau 29. Teneurs en anions (mg/l) des eaux souterraines des travertins du bassin de Guelma (mai et aout/2009)	58
Tableau 30. Teneurs en éléments mineurs (mg/l) des eaux souterraines des travertins du bassin de Guelma (mai et aout/2009)	59
Tableau 31. Indices de saturation des eaux souterraines des travertins du bassin de Guelma (mai/2009)	61
Tableau 32. Indices de saturation des eaux souterraines des travertins du bassin de Guelma (aout/2009)	61
Tableau 33. Matrice de corrélation des eaux souterraines des travertins du bassin de Guelma (mai/2009)	62
Tableau 34. Matrice de corrélation des eaux souterraines des travertins du bassin de Guelma (aout/2009).	64
Tableau 35. Paramètres physiques des eaux souterraines les travertins du bassin d'Ain Makhlouf (mai-aout/2009)	65
Tableau 36. Teneurs en cations (mg/l) des eaux souterraines les travertins du bassin d'Ain Makhlouf (mai-aout/2009)	66
Tableau 37. Teneurs en anions (mg/l) des eaux souterraines les travertins du bassin d'Ain Makhlouf (mai-aout/2009)	67
Tableau 38. Teneurs en éléments mineurs (mg/l) des eaux souterraines des travertins du bassin d'Ain Makhlouf (mai-aout/2009)	67
Tableau 39. Indices de saturations des eaux souterraines des travertins du bassin d'Ain Makhlouf (mai/2009)	69
Tableau 40. Indices de saturations des eaux souterraines des travertins du bassin d'Ain Makhlouf (aout/2009)	69
Tableau 41. Matrice de corrélation des eaux souterraines des travertins du bassin d'Ain Makhlouf (mai/2009)	71
Tableau 42. Matrice de corrélation des eaux souterraines des travertins du bassin d'Ain Makhlouf (aout/2009)	72
Tableau 43. Paramètres physiques des eaux souterraines des calcaires lacustres	74
Tableau 44. Teneurs en cations (mg/l) des eaux souterraines des calcaires lacustres (mai-aout/2009)	74
Tableau 45. Teneurs en anions (mg/l) des eaux souterraines des calcaires lacustres (mai-aout/2009)	75
Tableau 46. Teneurs en éléments mineurs (mg/l) des eaux souterraines des calcaires lacustres (mai-aout/2009)	75
Tableau 47. Indices de saturation des eaux souterraines des calcaires lacustres (mai/2009)	76
Tableau 48. Indices de saturation des eaux souterraines des calcaires lacustres (aout/2009)	76
Tableau 49. Paramètres physiques des eaux souterraines dans le Numidien (mai-aout/2009)	78
Tableau 50. Teneurs en cations (mg/l) des eaux souterraines dans le Numidien (mai-aout/2009)	79
Tableau 51. Teneurs en anions (mg/l) des eaux souterraines dans le Numidien (mai-aout/2009)	80
Tableau 52. Teneurs en éléments mineurs (mg/l) des eaux souterraines dans le Numidien (mai-aout/2009)	80

Tableau 53. Indices de saturation des eaux souterraines dans le Numidien (mai/2009)	82
Tableau 54. Indices de saturation des eaux souterraines dans le Numidien (aout/2009)	82
Tableau 55. Paramètres physiques des eaux souterraines dans les formations ultra-telliennes (mai-aout/2009)	83
Tableau 56. Teneurs en cations (mg/l) des eaux souterraines dans les formations ultra-telliennes (mai-aout/2009)	84
Tableau 57. Teneurs en anions(mg/l) des eaux souterraines dans les formations ultra-telliennes (mai-aout/2009)	85
Tableau 58. Teneurs en éléments mineurs(mg/l) des eaux souterraines dans les formations ultra-telliennes (mai-aout/2009)	86
Tableau 59. Indices de saturation des eaux souterraines dans les formations ultra-telliennes (mai/2009)	88
Tableau 60. Indices de saturation des eaux souterraines dans les formations ultra-telliennes (aout/2009)	88
Tableau 61. Matrice de corrélation des eaux souterraines dans les formations ultra-telliennes (mai/2009)	91
Tableau 62. Matrice de corrélation des eaux souterraines dans les formations ultra-telliennes (aout/2009)	93
Tableau 63. Paramètres physiques des eaux souterraines dans le Tellien à globigérines (mai-aout/2009)	96
Tableau 64. Teneurs en cations (mg/l) des eaux souterraines dans le Tellien à globigérines (mai-aout/2009)	97
Tableau 65. Teneurs en anions(mg/l) des eaux souterraines dans le Tellien à globigérines (mai-aout/2009)	98
Tableau 66. Teneurs en éléments mineurs (mg/l) des eaux souterraines dans le Tellien à globigérines (mai-aout/2009)	98
Tableau 67. Indices de saturation des eaux souterraines dans le Tellien à globigérines (mai/2009)	101
Tableau 68. Indices de saturation des eaux souterraines dans le Tellien à globigérines (aout/2009)	101
Tableau 69. Matrice de corrélation des eaux souterraines dans le Tellien à globigérines (mai/2009).	102
Tableau 70. Matrice de corrélation des eaux souterraines dans le Tellien à globigérines (aout/2009).	103
Tableau 71. Paramètres physiques des eaux souterraines dans le Tellien à Nummulites (mai-aout/2009)	106
Tableau 72. Teneurs en cations (mg/l) des eaux souterraines dans les eaux souterraines dans le Tellien à Nummulites (mai-aout/2009)	106
Tableau 73. Teneurs en anions (mg/l) des eaux souterraines dans le Tellien à Nummulites (mai-aout/2009)	107
Tableau 74. Teneurs en éléments mineurs(mg/l) des eaux souterraines dans le Tellien à Nummulites (mai-aout/2009)	108
Tableau 75. Indices de saturation des eaux souterraines dans le Tellien à Nummulites (mai/2009)	109
Tableau 76. Indices de saturation des eaux souterraines dans le Tellien à Nummulites (aout/2009)	110
Tableau 77. Matrice de corrélation des eaux souterraines dans le Tellien à Nummulites	111

(mai/2009).	
Tableau 78. Matrice de corrélation des eaux souterraines dans le Tellien à Nummulites (aout/2009).	113
Tableau 79. Paramètres physiques des eaux souterraines dans les Sellaoua (mai-aout/2009)	114
Tableau 80. Teneurs en cations (mg/l) des eaux souterraines dans les Sellaoua (mai-aout/2009)	115
Tableau 81. Teneurs en anions (mg/l) des eaux souterraines dans les Sellaoua (mai-aout/2009)	116
Tableau 82. Teneurs en éléments mineurs (mg/l) des eaux souterraines dans les Sellaoua (mai-aout/2009)	116
Tableau 83. Indices de saturation des eaux souterraines dans les Sellaoua (mai/2009)	118
Tableau 84. Indices de saturation des eaux souterraines dans les Sellaoua (aout/2009)	118
Tableau 85. Paramètres physiques des eaux souterraines dans le Néritique (mai-aout/2009)	121
Tableau 86 Teneurs en cations (mg/l) des eaux souterraines dans le Néritique (mai-aout/2009)	122
Tableau 87. Teneurs en anions (mg/l) des eaux souterraines dans le Néritique (mai-aout/2009)	122
Tableau 88. Teneurs en éléments mineurs (mg/l) des eaux souterraines dans le Néritique (mai-aout/2009)	123
Tableau 89. Indices de saturation des eaux souterraines dans le Néritique (mai/2009)	125
Tableau 90 Indices de saturation des eaux souterraines dans le Néritique (aout/2009)	125
Tableau 91. Matrice de corrélation des eaux souterraines dans le Néritique (mai/2009).	127
Tableau 92. Matrice de corrélation des eaux souterraines dans le Néritique (aout/2009).	128

## LISTE DES FIGURES

Figure 1. Situation géographique de la zone d'étude	2
Figure 2. Réseau hydrographique	3
Figure 3. Schéma structural des Maghrébides (M. Durand Delga et J-M. Fontboté, 1980)	6
Figure 4. Carte géologique de la région de Guelma (Vila, 1980, modifiée)	7
Figure 5. Plan de position et coupures stratigraphiques des séries néritiques constantinoises (Vila, 1980)	10
Figure 6. Bilan hydrique selon la méthode de Thornthwaite. Station de Guelma (1986/87-2008/09).	17
Figure 7. Bilan hydrique selon la méthode de Thornthwaite Station de A. Larbi (1986/87- 2008/09).	18
Figure 8. Bilan hydrique selon la méthode de Thornthwaite. Station de Hm. Débagh (1986/87- 2008/09).	18
Figure 9. Localisation des différents aquifères dans la zone d'étude.	22-23
Figure 10. Photo satellite montrant les terrasses de l'aquifère alluvionnaire de Guelma	25
Figure 11. Carte piézométrique de l'aquifère alluvionnaire de Guelma (avril/2009).	27
Figure 12. Carte piézométrique de l'aquifère alluvionnaire de Guelma (avril/2009).	28
Figure 13. Situation des sources dans leur cadre lithologique (Vila, 1980 ; modifiée)	36
Figure 14. Les alluvions quaternaires de Guelma	37
Figure 15. Photo satellite montrant les terrasses au niveau de la plaine de Guelma	37
Figure 16. Coupe schématique (S-N) depuis Dj. Mahouna jusqu'à Dj. Sbaa	38
Figure 17. Coupe schématique (N-S) traversant le plateau de Hammam Belhachani dans le bassin d'Ain Makhoulf.	38
Figure 18. Faciès chimiques des eaux souterraines des alluvions du bassin de Guelma (mai-aout/2009).	48-49
Figure 19. Projection des variables et des individus: Alluvions de Guelma (mai/2009).	52
Figure 20. Projection des variables et des individus : Alluvions de Guelma (aout/2009).	53
Figure 21. Faciès chimiques des eaux souterraines des travertins du bassin de Guelma (mai-aout /2009).	60
Figure 22. Projection des variables et des individus des eaux souterraines des travertins du bassin de Guelma (mai/2009).	62
Figure 23. Projection des variables et des individus des eaux souterraines des travertins du bassin de Guelma (aout/2009).	63
Figure 24. Faciès chimiques des eaux souterraines des travertins du bassin d'Ain Makhoulf (mai-aout/2009).	68
Figure 25 Projection des variables et des individus des eaux souterraines des travertins du bassin d'Ain Makhoulf (mai/2009)	70
Figure 26. Projection des variables et des individus : des travertins du bassin d'Ain Makhoulf (aout/2009).	72
Figure 27. Faciès chimiques des eaux souterraines des calcaires lacustres (mai-aout/2009)	76
Figure 28. Faciès chimiques des eaux souterraines du Numidien (mai-aout/2009).	81
Figure 29. Faciès chimiques des eaux souterraines de l'Ultra-Tellien (mai-aout/2009)	87
Figure 30. Projection des variables et des individus des eaux souterraines dans l'Ultra-	90

Tellien (mai/2009)du bassin d' Ain Makhlouf (aout/2009).	
Figure 31. Projection des variables et des individus des eaux souterraines dans l'Ultra-Tellien (aout/2009)	92
Figure 32. Faciès chimiques eaux souterraines dans le Tellien à globigérines (mai-aout/2009).	99-100
Figure 33. Projection des variables et des individus des eaux souterraines dans le Tellien à globigérines (mai/2009).	102
Figure 34. Projection des variables et des individus des eaux souterraines dans le Tellien à globigérines (aout/2009).	103
Figure 35. Faciès chimiques des eaux souterraines dans le Tellien à Nummulites (mai-aout/2009).	108-109
Figure 36. Projection des variables et des individus des eaux souterraines dans le Tellien à Nummulites (mai/2009).	111
Figure 37. Projection des variables et des individus des eaux souterraines dans le Tellien à Nummulites (aout/2009).	112
Figure 38. Faciès chimiques des eaux souterraines dans les Sellaoua (mai-aout/2009)	117
Figure 39. Faciès chimiques des eaux souterraines dans le Néritique (mai-aout/2009).	124
Figure 40. Projection des variables et des individus des eaux souterraines dans le Néritique dans le Néritique (mai/2009).	126
Figure 41. Projection des variables et des individus des eaux souterraines dans le Néritique (aout/2009).	128

## LISTE DES ABREVIATIONS

ABH.	: Agence des Bassins Hydrographiques
DPAT.	: Direction de la Programmation et de l'Aménagement du Territoire
Sogréah	: Société française d'ingénierie
P :	: Précipitation
T :	: Température
ETP.	: Evapotranspiration Potentielle
ETR.	: Evapotranspiration Réelle
BH.	: Bilan Hydrique
DA.	: Déficit Agricole
I.	: Infiltration
R.	: Ruissellement
O.M.S.	: Organisation Mondiale de la Santé
ACP.	: Analyses en Composantes Principales
I.E.B.	: Indice d'échange de base
I.S	: Indice de saturation

# Physico-chemical characterization of groundwater in Guelma area, North-Eastern of Algeria

## Abstract

The study area is part of the north-eastern termination of the Alpine chain (Maghrebides). It consists geologically three main areas:

- Post-plies field, which includes the recent formations (Quaternary alluvium, travertine basin of Guelma, travertine basin of Ain Makhoulouf and lake limestone),
- The immigrant field that includes training thrusts (Numidian, ultra-Tellian and Tellian) and
- Para-native field, which includes Sellaoua and Neritic carbonate formations.

The purpose assigned to this study in two phases is based on the detection of water-rock interaction. In the first phase, geological formations have been explored, identified and delineated in areas in the second phase, a number of thirty water points (twenty nine sources and drilling), the most representative said formations were selected and samples were taken into two periods; in high water (May / 2009) and low water (August / 2009).

The methodology of work consists of the physico-chemical characterization of water sampled by the interpretation of physical parameters: electrical conductivity ( $\mu\text{s}/\text{cm}$ ), T ( $^{\circ}\text{C}$ ), pH, Eh (mv), dissolved oxygen (mg/l) and hardness ( $^{\circ}\text{F}$ ) and, chemical parameters: major and minor elements.

The interpretation of the different results obtained was used to determine the physical and chemical properties of groundwater. The use of water graphical diagrams (Stiff diagram) has defined the dominant ions responsible for water chemical facies and geological formations in the origin of these facies.

The principal component analysis (PCA) as a tool to assist in interpretation, allowed to know the key factors that represent the different processes involved in water chemistry.

**Keywords:** water-rock, alluvium, travertine, Numidian, Tellian, Sellaoua, Neritic, chemical facies, Guelma, Algeria.

# Caractérisation physico-chimique des eaux souterraines dans la région de Guelma, Nord-Est Algérien

## Résumé

La zone d'étude fait partie de la terminaison nord-orientale de la chaîne des (Maghrébides). Elle est constituée géologiquement de trois grands domaines :

- Le domaine Post-nappes, qui comprend les formations récentes (alluvions quaternaires, travertins du bassin de Guelma, travertins du bassin d'Ain Makhoulouf et les calcaires lacustres) ;
- Le domaine allochtone qui comprend les formations charriées (numidiennes, ultra-telliennes et telliennes) ;
- Le domaine para-autochtone, qui comprend les Sellaoua et le Néritique.

Le but assigné à cette étude menée en deux phases, s'articule autour de la mise en évidence de l'interaction eau-roche. Dans la première phase, les formations géologiques ont été prospectées, identifiées et délimitées en sous zones, dans la deuxième phase, un nombre de trente points d'eau (vingt neuf sources et un forage), les plus représentatifs des dites formations ont été sélectionnés et échantillonnés en deux périodes ; en hautes eaux (mai/2009) et en basses eaux (août/2009).

La méthodologie du travail consiste en, la caractérisation physico-chimiques des eaux échantillonnées par l'interprétation des paramètres physiques : conductivité électrique ( $\mu\text{s}/\text{cm}$ ),  $T^{\circ}\text{C}$ , pH, Eh (mv), oxygène dissous (mg/l) et dureté ( $^{\circ}\text{F}$ ) et, les paramètres chimiques : éléments majeurs et éléments mineurs.

L'interprétation des différents résultats obtenus, a permis de déterminer les propriétés physiques et chimiques des eaux souterraines. L'utilisation de diagrammes de représentation graphique des eaux (diagramme de Stiff) a permis de définir les ions dominants responsables des faciès chimiques des eaux et les formations géologiques à l'origine de ces faciès.

L'analyse en composantes principales (ACP), comme outil d'aide à l'interprétation, a permis de connaître les principaux facteurs qui représentent les différents processus intervenant dans la composition chimique des eaux.

**Mots clés** : Eau-roche, alluvions, travertins, numidien, Tellien, Sellaoua, Néritique, faciès chimiques, Guelma, Algérie.

## **Chapitre I**

### **CADRE GÉNÉRAL DE LA ZONE D'ÉTUDE**

## INTRODUCTION GÉNÉRALE

### I. INTRODUCTION

#### I.1. Situation géographique de la zone d'étude

La région de Guelma est située à 116 km à l'est de Constantine, à 65 km au sud-ouest d'Annaba, à 77 km à l'ouest de Souk Ahras et à 537 km à l'est d'Alger, (cf., fig. 1). Elle culmine à la cote de 290 m et recouvre une superficie de 4 101 km<sup>2</sup> (A.B.H, 2005).

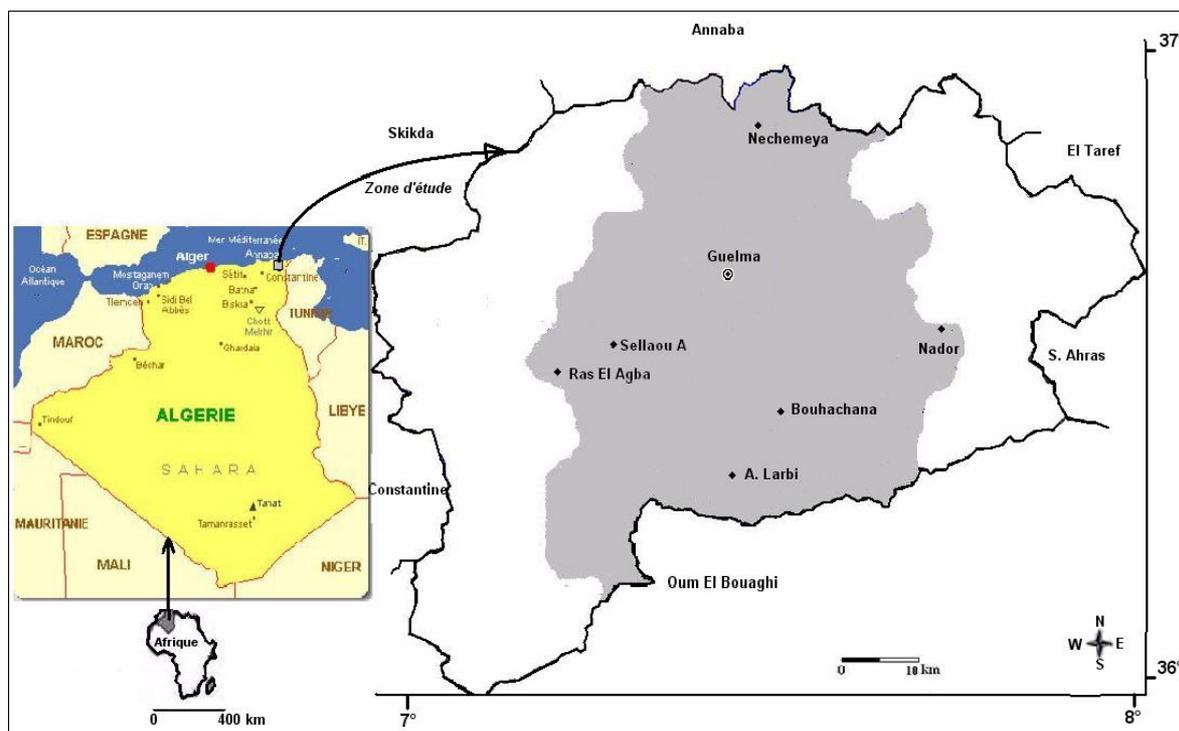


Figure 1. Situation géographique de la zone d'étude.

#### I.2. Géomorphologie générale

Le relief est composé dans sa majorité de (32,82%) de montagnes, dont les principales sont :

- Mahouna qui culmine à 1411 m,
- Houara qui culmine à 1 292 m,
- Taya (Bouhamdane) qui culmine à 1208 m,
- Débar qui culmine à 1060 m.

Le reste du relief est composé de plaines et de plateaux (27,22%) de collines et de piémonts (26,29%). Le sud de Guelma comporte la chaîne centrale de la Medjerda où s'impose l'important massif du Ras El Alia : série d'entablements de calcaires éocènes, dont les principaux sont : le Dj. Bardou (1261m) et le Dj. Zouara (1292m). Vers le sud-est la haute chaîne se poursuit par les massifs calcaires sénoniens du Dj. El Arous (1160m) et calcaires éocènes du Dj. Safiet, puis par les monts d'Ain Seymour couverts par les grès numidiens. Tout le massif constituant la haute chaîne centrale des monts de la Medjerda s'ennoie sous les plaines de Sellaoua au sud-ouest de la zone d'étude.

A l'est, les montagnes boisées du versant septentrional des monts de la Medjerda s'abaissent rapidement par gradins vers la vallée de l'oued Seybouse, dont kef Erramoul (797m) et kef Djemmel (812m). La majeure partie du versant est recouverte par l'épaisse

formation gréso-argileuse du Numidien qui caractérise le paysage jusqu'à la frontière algéro-tunisienne. Les sommets sont arrondis sans alignement net, les formes massives et les vallées sont peu profondes. Il en est de même pour les formations triasiques d'Ain Seymour-Nador qui s'élèvent en massif sans vigueur au dessus de la plaine de Bouchegouf. Au nord, s'étendent les monts d'Ain Berda qui séparent la dépression de Guelma de celle du lac Fetzara, au-delà des limites septentrionales de la zone d'étude.

Au nord-ouest, les derniers abrupts calcaires du chaînon du Débar (1060m) viennent s'envoyer dans les formations marneuses ou gréseuses à relief plus mou. Une autre chaîne de calcaire, Dj. Taya (1208m) continue vers l'ouest, séparant le bassin d'oued Safsaf au nord de l'oued Bouhamdane au sud.

L'ouest de la zone d'étude comprend des régions très variées, allant de large et profonde vallée de l'oued Cherf en amont, qui s'écoule du sud au nord, des plaines élevées de la région de Ain Makhlouf, Ras El Agba (700 – 800 m) vers les vallées profondes de Guelma à l'aval.

### I.3. Hydrologie

Le réseau hydrographique est très dense. Il est constitué principalement de l'oued Seybouse et de ses affluents (cf., fig. 2) et draine une superficie de 6471 km<sup>2</sup>, pour se jeter dans la méditerranée à l'est de la ville d'Annaba. Le sous bassin de Guelma fait partie du bassin versant de la Seybouse (A.B.H., 2005).

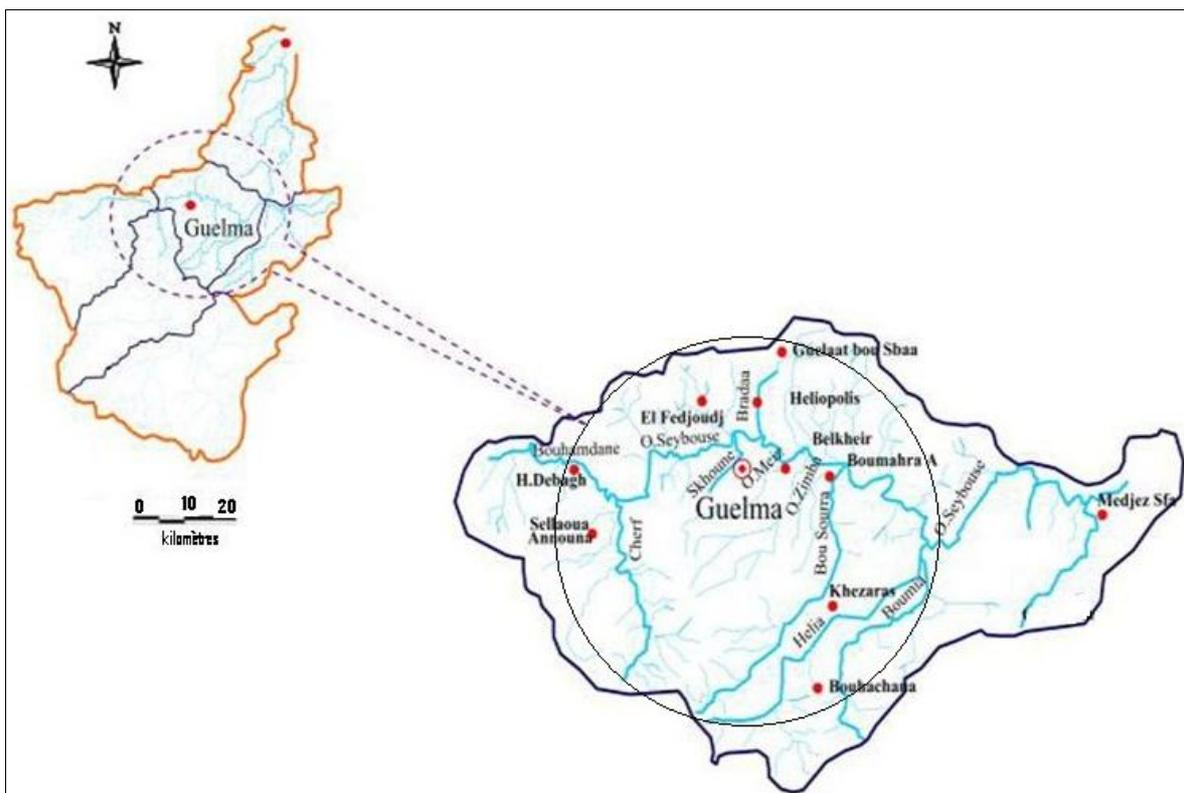


Figure 2. Réseau hydrographique (ABH, 2005).

Le réseau hydrographique emprunte surtout les axes des principaux plissements dans les couches marneuses facilement érodables. Situé dans la région nord-est du territoire national, le bassin de la Seybouse s'étend sur une longueur de 240 km. Il touche près de 86

communes sur 7 wilayas de l'est du pays : Annaba, El Tarf, Skikda, Oum El Bouaghi, Constantine, Souk Ahras et Guelma.

Les principaux cours d'eau (A.B.H., 2005) qui constituent le réseau hydrographique sont :

- L'Oued Seybouse (57,15 km, second oued d'Algérie après l'oued Chéelif), présente l'axe de drainage du bassin versant. Il a un apport annuel de  $408 \text{ Hm}^3/\text{an}$  à la station de Boudaroua et prend naissance dans les hautes plaines de Haracta, Ain Abid et Sedrata et se jette dans la Méditerranée après un parcours de 160 km (Debbieche, 2002). Son débit non régulier varie de 0 à  $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , mais peut atteindre des valeurs de  $630 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  (observées le 01/01/1985, selon l'Agence Nationale des Ressources Hydriques d'Annaba). Ses principaux affluents sont (cf, fig. 2) :

- L'oued Bouhamdane (45,37km), constitué des oueds Sabath et oued Zénati, apporte  $96 \text{ Hm}^3/\text{an}$  à la station de Medjez Amar II (point de confluence avec l'oued Cherf).

- L'Oued Cherf (36,46 km), au sud-ouest, apporte  $107 \text{ Hm}^3/\text{an}$  à la station de Medjez Amar I.

- L'Oued Mellah au sud-est a un apport de  $151 \text{ Hm}^3/\text{an}$  à la station de Bouchegouf.

#### **I.4. Contexte socio-économique**

La région de Guelma est une zone à vocation agro-sylvo-pastorale (une Surface agricole totale de 266 000 ha et une surface agricole utile de 187 338 ha pour une superficie totale de  $3\,686,84 \text{ km}^2$ ).

Le territoire est fortement montagneux (38% de la superficie totale). Les montagnes et bassins versants de Houara, Mahouna, Débar et la forêt de Béni salah offrent d'importantes opportunités de développement rural. Sur une superficie forestière de 105.295 ha (28,45 %), les forêts (calcaires et denses) occupent une superficie de 29 950 ha dont 24 437 ha en chêne-liège d'où des opportunités de traitement, d'exploitation et de transformation de liège (DPAT, 2006).

Les terres à grand potentiel agricole se situent dans le sud-ouest (plaines de Oued zénati et Tamlouka réputées par la céréaliculture et l'élevage). Quant à la vallée de l'Oued Seybouse qui s'étend sur près de 45 km, elle offre toutes les conditions nécessaires à la production des cultures intensifiées en irrigué et de l'élevage bovin.

Le sol du territoire de Guelma recèle également d'importantes richesses minières qui sont principalement le marbre, le kaolin, l'argile, les agrégats...et qui ont permis l'existence d'une industrie des matériaux de construction, susceptible d'être davantage développée. Quant aux richesses touristiques, elles sont importantes et diversifiées (thermes Hammam Débagh, de Hammam Ouled Ali, de Hammam N'bails, de Hammam Guerfa et Belhachani), offrant de grandes possibilités de développement du thermalisme et du tourisme.

A cela, s'ajoutent les sites naturels (réserve de Béni Salah, forêts de Mahouna et Haouara, plans d'eau des barrages et retenues collinaires), et historiques (les dolmens et grottes de Roknia, les ruines romaines de Sellaoua Announa et théâtre romain de Guelma qui sont des atouts pour l'épanouissement du de la région.

## **Chapitre II**

### **CADRE GÉOLOGIQUE DE LA ZONE D'ETUDE**

## II. Etude géologique

### II.1. Introduction

La connaissance des aquifères existant dans la région de Guelma et en particulier dans la zone d'étude, a nécessité le recours aux outils suivants : géologique, géophysique, hydrogéologique et données des sondages. L'apport de chaque outil est un complément de connaissances pour l'identification des aquifères, objet de cette étude.

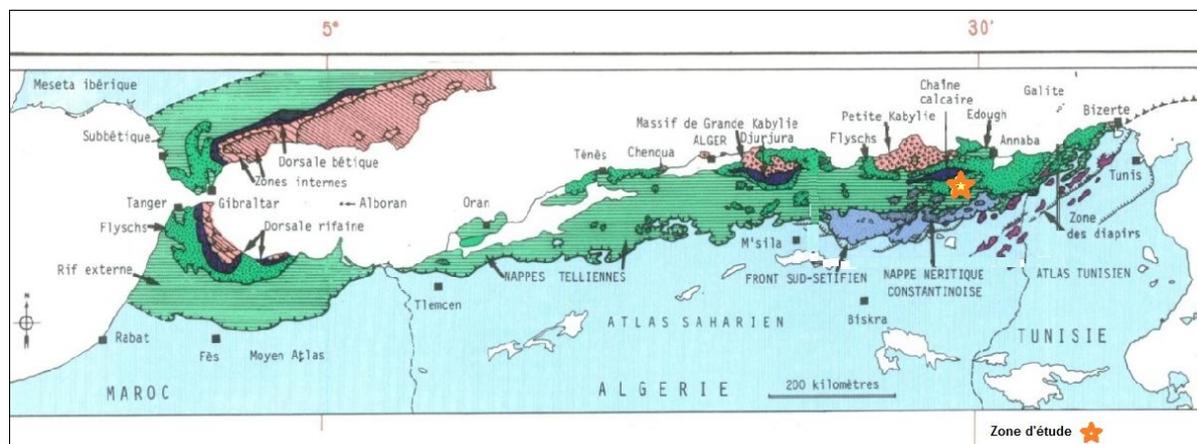
La région de Guelma a suscité l'intérêt de beaucoup de chercheurs : J. Blayac, (1912) ; J.M. Vila et Magné, (1969) ; J.M. Vila, (1978, 1980) ; J.C. Lahondère, (1987) ; A. Chouabbi, (1987) ; Daresté de la Chavane, (1910) ; L. Joleaud, (1912) ; J. Flandrin, (1948) ; M. Roubault, (1934) ; P. Deleau, (1952) et Bouilin, (1986).

### II.2. Cadre géologique régional

La région de Guelma fait partie de la chaîne des Maghrébides d'Algérie orientale (la chaîne alpine d'Afrique du Nord) (cf., fig. 3). Cette chaîne fait partie de l'orogène alpin péri-méditerranéen (Durand Delga, 1969), d'âge Tertiaire. Elle s'étend de l'Ouest à l'Est sur 2000 km, depuis le sud de l'Espagne (Andalousie) jusqu'à la Calabre (Italie) et englobe notamment ; le Rif marocain, l'Atlas littoral d'Algérie (kabylie et Tell), de Tunisie (kroumirie- Nefza) et enfin la Sicile Calabre (Italie) (Lahondère, 1987 ; Chouabbi, 1987).

Elle se trouve prise entre la paléomarge de la plaque Afrique (au Sud) et la plaque Europe (au Nord). Dans ce domaine en forme d'anneau très aplati, on distingue classiquement les zones internes, situées à l'intérieur de l'anneau et représentées aujourd'hui par différents massifs, dispersés le long de la côte méditerranéenne et, les zones externes situées à sa périphérie.

La chaîne des Maghrébides a connu des phases de déformations méso-cénozoïques aboutissant à la mise en place de l'Atlas tellien. C'est le domaine des nappes de charriage ou domaine allochtone.



**Figure 3.** Schéma structural des Maghrébides (Vila, 1980).

### II.3. Stratigraphie des différentes unités structurales

La zone d'étude appartient à l'ensemble géologique du Tell externe. On distingue de haut en bas : le Quaternaire, le Mio-Pliocène, la nappe numidienne, les nappes des flyschs, la nappe ultra-tellienne, la nappe tellienne, les écaillés des Sellaoua et enfin la nappe nérétique constantinoise (cf., fig. 4).

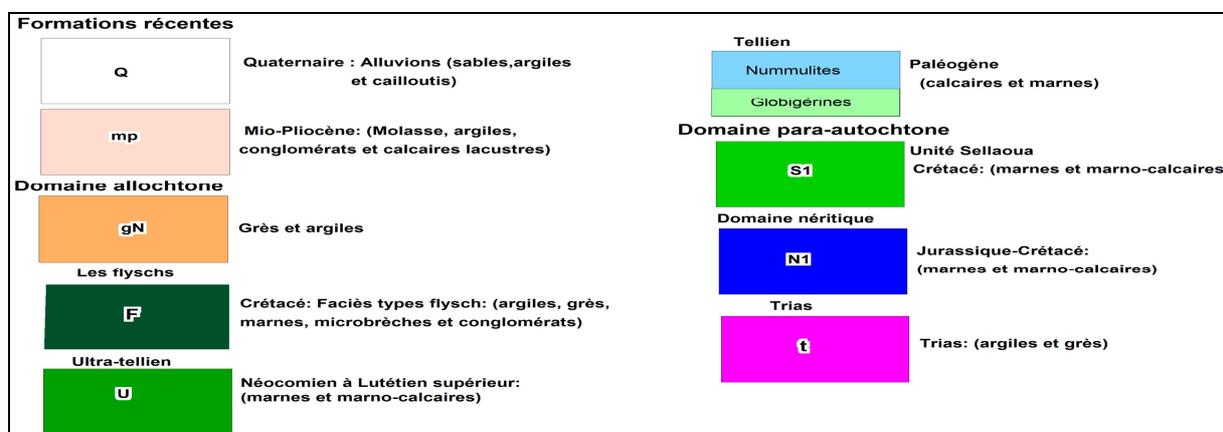
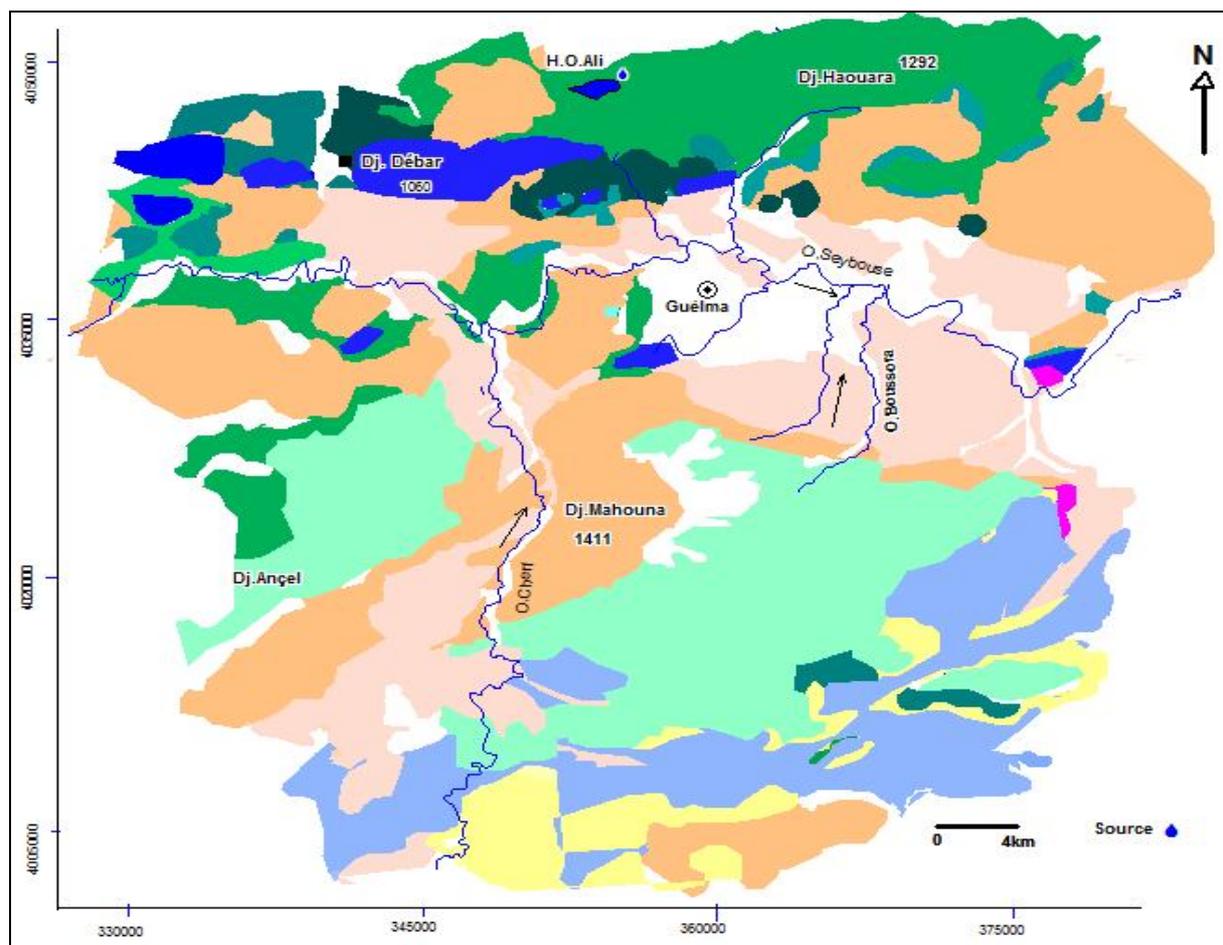


Figure 4. Carte géologique de la zone d'étude (Vila, 1980, modifiée).

### II.3.1. Les formations récentes (Poste-nappes)

#### II.3.1.1. Quaternaire :

Les formations d'âge Quaternaire sont localisées le long de la vallée de l'oued Seybouse et représentées par les terrasses:

**II.3.1.1.1. La basse terrasse (Soltanien) :** Elle est constituée des alluvions du lit de l'Oued actuel avec 15 m d'épaisseur (limons et cailloux enroulés brun clair ou grisâtres).

**II.3.1.1.2. La moyenne terrasse** (Tensiftien) : Elle est située surtout entre 30 à 50 m d'altitude et constituée de sable et limons et des blocs roulés dans une matrice argileuse de couleur ocre.

**II.3.1.1.3. La haute terrasse** (Salétien) : Ce sont des formations qui présentent un épandage en pente douce. Elles sont constituées de gros galets de type (*Ranà*) dans le djebel Zemzouma au Nord et peuvent atteindre les 100 m d'épaisseur. Au Sud, ce sont des calcaires lacustres et tufs d'âge Pliocène supérieur à Quaternaire ancien qui occupent de grandes surfaces. Les croûtes calcaires qui apparaissent aussi au centre d'Héliopolis sont parfois tuffacés ou massifs gris à blanc rosé riches en oogones de (*Charophytes*) (Vila, 1980).

Ces terrasses sont en général emboîtées mais peuvent être étagées et laissent apparaître le substratum marneux gypsifère qui les sépare, comme c'est le cas entre l'Oued Maiz et le centre du village de Belkheir.

### **II.3.1.2. Mio-Pliocène :**

Ce sont des argiles grises avec intercalations de marno-calcaires et gypse en couches minces. Elles surmontent des argiles et des conglomérats rouges.

La mollasse de Guelma : c'est une épaisse série d'intercalations d'argile et de sable jaunâtres friables bien développée au Sud et à l'Est de Guelma.

## **II.3.2. Le domaine allochtone**

On distingue de haut en bas :

### **II.3.2.1. La nappe numidienne :**

Elle constitue les sommets des reliefs, en l'occurrence de Djebel Haouara, Beni Mezline et Mahouna. Elle est marquée par un faciès argilo-gréseux. La base de la série numidienne, représentée par des argiles à (*Tubotomaculum*), d'âge Oligocène moyen à supérieur (Lahondère et al, 1979) et surmontée par une épaisse série gréseuse d'âge Aquitanien. A Dj. Mahouna Vila (1980), signale des séries renversées.

### **II.3.2.2. La nappe des Flyschs**

Sous le faciès argilo-gréseux de la nappe numidienne affleurent des formations attribuées au domaine des flyschs à Dj. Haouara. On distingue:

**II.3.2.2. 1. Sénonien :** C'est une série conglomératique et argileuse d'une cinquantaine de mètres d'épaisseur. Les bancs les plus épais (50 à 60 cm) montrent des figures de convolute bedding. Ce sont les faciès les plus méridionaux du flysh. Dans les affleurements des talus ouest de la route Guelma-Annaba (col d'El Fej), (Vila, 1966), la microfaune est représentée par (*Globotruncana Sheegansi*) et de rares (*orbitoides Tissoti*).

**II.3.2.2.2. Cénomaniens - Turonien :** Il est représenté par des niveaux bréchiques clairs bien classés en bancs à bandes silicifiées blanches. Ces formations sont datées par (*Rotalipora* sp), (*Thalmaninella* sp) et (*Globotruncana helvética*).

**II.3.2.2.3. Crétacé inférieur :** Flysh de type Guerrouch : C'est une série gréseuse à intercalations argilo-schisteuses grises ou brunâtres. Elle affleure à Ain Sefra au pied-mont de Mahouna. A la base, elle montre quelques bancs calcaires à (*Nannoconus*).

- Le complexe de base avec calcaires fins: C'est une série argilo-gréseuse à intercalations de biomicrites claires en bancs centimétriques très froissés à (*Nannoconus*). Ces affleurements apparaissent dans la partie Sud de la pointe orientale du Djebel Debar.

### II.3.2.3. La nappe tellienne :

La nappe tellienne correspond au domaine tellien externe constitué de formations paléogènes (cf, fig. 3). Il s'agit de séries épaisses à dominante marneuse issues du sillon tellien.

On distingue trois grandes unités :

**II.3.2.3.1. La nappe ultra-tellienne :** Sous le terme ultra-tellien, Durand Delga (1969), désigne les séries superposées anormalement au Crétacé néritique constantinois du Djebel Débar et du Douar Bouzitoune dans la région de Guelma. Ces séries sont définies par le critère simple de dominance des faciès clairs durant tout le Crétacé.

**II.3.2.3.1.1. La nappe ultra-tellienne du Djebel Haouara :** Ce sont de vastes affleurements qui se situent entre la forêt des Beni Ahmed et celle des Beni Mezline, au Nord du Kef Ras Bardou et du Djebel Haouara. Les formations sont constituées par l'alternance de marnes claires beiges ou jaunes et de marno-calcaires en petits bancs de même teinte, riches en (*Rosalines*). L'âge de la série est compris entre le Barrémien supérieur qui contient (*Phylloporachyeras Barodense Cop*) et le Sénonien inférieur.

**II.3.2.3.1.2. La nappe ultra-tellienne de Djebel bou Sbaa,** (Lahondère, 1987) : L'âge de la série est compris entre l'Aptien et le Lutétien. Elle est développée essentiellement dans la région de Guelma Bou Sbaa. On trouve aussi des témoins de cette série près de Medjez Amar au Tebiebe Amar, au Sud-Ouest de Guelma et près de la station de Nador à l'Est. On peut citer entre autres, un affleurement avec une microfaune à (*Truncorotalia gr*), visible sur la berge est de l'Oued Seybouse près de Medjez Amar avec (*Globorotalia rex Martin*) et au nord de Djebel Débar dans les marno-calcaires à cassure noire fétide et bitumineuse (Vila et al, 1968) avec (*G.cf. Velascoensis*)

### II.3.2.3.2. Les unités telliennes sensu stricto (s.s)

Ce sont les unités méridionales à Globigérines et à Nummulites.

**II.3.2.3.2.1. La nappe tellienne de Hammam Ouled Ali :** Elle affleure au pied du Djebel Bou Sbaa et autour du pointement néritique du Djebel Débar. Cette unité regroupe tous les terrains situés sur la série néritique constantinoise et sous la nappe ultra-tellienne du djebel Bou Sbaa (Vila, 1971). Ce regroupement est justifié par une remarquable dominante des teintes noires dans les faciès. La microfaune est représentée par (*Globotruncana stuartiformis*), (*Rotalipora sp*) et (*Hedbergella Washitensis*)

**II.3.2.3.2.2. La nappe tellienne de la région de Ras El Agba-Sellaoua Announa :** Elle correspond au domaine tellien externe constitué de formations paléogènes. On distingue :

**II.3.2.3.2.2.1. L'unité tellienne à Globigérines** qui comprend un Paléocène constitué de marnes, un Yprésien à calcaires en bancs à lumachelles et à (*Globigérines*) et un Lutétien inférieur à moyen avec des marnes noires à débris d'huîtres et à boules jaunes carbonatées (Kef Er Rih, Bouhachana).

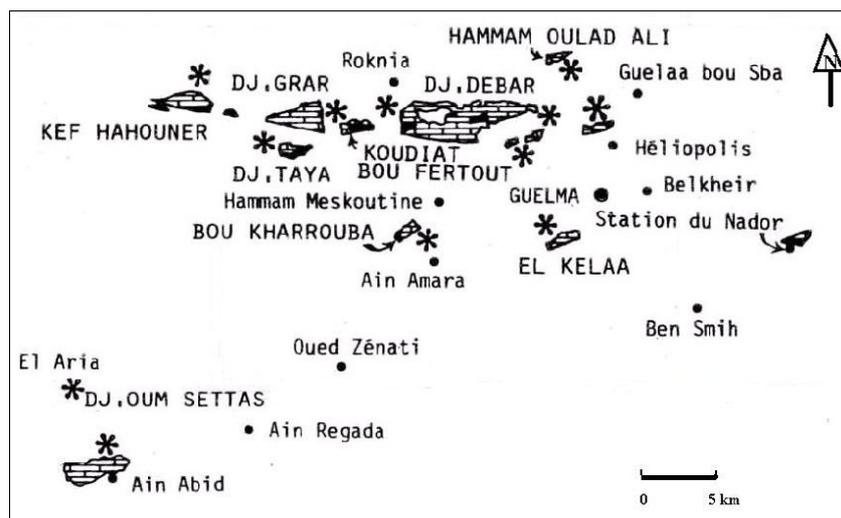
**II.3.2.3.2.2.2. L'unité tellienne à Nummulites** qui comprend un Paléogène à marnes noires et un Eocène calcaire massif à Nummulites surmontés par une puissante série marneuse à boules jaunes et à huîtres d'âge Lutétien (Dj. Bardou).

### II.3.3. Le domaine para-autochtone

#### II.3.3. 1. La nappe néritique constantinoise

La néotectonique a dispersé les affleurements des séries néritiques constantinoises en massifs isolés de taille variable (Vila, 1978, 1980), (cf., fig. 5), étudiés par plusieurs auteurs avant que la micropaléontologie des milieux de plate-forme ait été mise au point. Seuls les massifs septentrionaux ont fait l'objet d'études récentes (Vila et Magné, 1969 ; Vila, 1970, 1972) et d'une première tentative de biozonation.

Parmi ces massifs, c'est le groupe nord-oriental qui est traité dans cette étude. La corrélation et la description lithologique sont résumées dans la figure 5.



**Figure 5.** Plan de position et coupures stratigraphiques des séries néritiques constantinoises (Vila, 1980)

Les affleurements néritiques dans la région de Guelma, représentent la terminaison orientale du domaine néritique. Ces affleurements sont isolés et de tailles variables. Ils apparaissent au Djebel Débar, à Hammam Ouled Ali, au Douar Bouzitoune, à la piscine romaine d'Héliopolis et enfin à l'Ouest de la station ferroviaire de Nador.

##### II.3.3.1.1. A l'Est de Djebel Debar

Le djebel Débar qui fait partie du mole néritique constantinois présente des terrains autochtones d'âge Jurassique et Crétacé supportant les formations allochtones des unités telliennes.

Les formations autochtones essentiellement carbonatées correspondent à des dépôts de plateforme interne parfois confinés avec une nette tendance à l'ouverture au crétacé supérieur.

On distingue de haut en bas :

**II.3.3.1.1.1. Les niveaux siliceux :** Ce sont des roches très minéralisées et mal stratifiées résultant d'une silicification au niveau d'une zone de broyage entre le calcaire à silex du sommet du Sénonien supérieur et les calcaires à silex de l'Eocène allochtone tellien.

**II.3.3.1.1.2. Les calcaires massifs organo-détritiques** à (*orbitoides cf. Média*) D'ARCH attribués au Campanien.

**II.3.3.1.1.3. Les dolomies noires** à la base, épaisses de 250 à 300 m largement cristallines supportent toute la série.

### **II.3.3.1.2. A Hammam Ouled Ali**

A l'Est de la station thermale, affleure une fenêtre d'une série à faciès carbonatés biodétriques d'âge Sénonien sous les marno-calcaires de la série ultra-telliennne.

### **II.3.3.3.1.3. Au Douar Bouzitoune-Heliopolis:**

Ces affleurements présentent une série complète où sont datés : l'Aptien supérieur à (*Orbitolina Subconcava Parocoskinolina Sunnilandensis*), le Vraconien-Cénomanienn inférieur à (*Orbitolines*) roulées et à (*Mélobésiées*) et le Sénonien transgressif sur des niveaux à (*orbitoides Medina*), (*Sidérolites Vidali*), (*Globotruncana Linnei*) du Campanien ou du Maestrichtien basal.

### **II.3.3.1.4. A la station Nador**

Près de la gare ferroviaire de Nador, sous les calcaires massifs à (*Rudistes*) du Barrémien, les niveaux à (*Favreina Salevensis*) et (*F.Prusensis*) au dessus d'un ensemble de couches pélitiques ou gréseuses rouges attribuées au Trias moyen et supérieur témoignent du passage Jurassique Crétacé (Ilavsky et Snopkova, 1987).

## **II.4. Le cadre structural**

La structure actuelle de la région d'étude est la conséquence d'une série de mouvements tectoniques. Les différentes phases mises en évidence peuvent se résumer ainsi :

### **II.4.1. La phase fini-éocène dite "atlasique"**

Elle marque la fin d'un grand cycle de sédimentation dans le bassin maghrébin qui a commencé avec les dépôts du Trias supérieur jusqu'au Lutétien. Elle est responsable de la genèse des flyschs et des nappes telliennes, y compris les plus méridionales où sont enregistrés des plis couchés spectaculaires.

### **II.4.2. La phase miocène inférieure**

Elle est responsable de la naissance de l'édifice actuel.

- Ecaillage et charriage des nappes telliennes vers l'avant-pays.
- Ecaillage de l'avant pays

### **II.4.3. La phase tectonique post-nappe**

Du Tortonien à l'actuel, la région a connu le jeu de plusieurs déformations plicatives et cassantes qui se sont succédées et/ou sont combinées, (Vila, 1980). Ces accidents ont dessiné un réseau spectaculaire de failles de direction atlasique (NE-SW). L'accident qui borde au Nord du bassin Mio-Pliocène de Guelma est bien défini de direction Est-Ouest. Cette grande faille est interceptée par de petites failles qui lui sont perpendiculaires.

Le bassin de Guelma a connu plusieurs cycles de remplissage liés à la tectonique régionale. On peut remarquer que les sources thermo minérales se situent le long des failles de direction (NE-SW et Nord-Sud). Dans la première direction, il s'agit de la tectonique de mise en place des nappes, dans la deuxième orientation (N-S), c'est la tectonique de réajustement de l'édifice et la naissance du relief actuel.

## **II.5. Reconstitution paléogéographique**

Le paysage de la région d'étude a dû être édifié suite à la manifestation de phases tectoniques, donnant la disposition actuelle des différentes unités allochtones. La genèse du

relief actuel a débuté pendant le Miocène inférieur suite à la compression de l'édifice et une transgression de la mer miocène. Le résultat a donné la mise en place des unités telliennes allochtones dans le sillon écaillé de Sellaoua et sur le domaine néritique. Les formations numidiennes viennent ensuite pour couronner tout l'ensemble. A partir du Miocène supérieur ; la mer miocène a connu une régression synchrone avec des mouvements de réajustement de l'édifice. Ces derniers ont conduit à la naissance du bassin actuel de Guelma. Ce phénomène d'éventrement vers le début du Quaternaire est facilité par l'existence de grands reliefs endossant le bassin au Nord par Djebel Haouara et au Sud par la Mahouna. L'érosion continue à laquelle était exposé cet édifice a mis à jour les alluvions couvrant toute la vallée et formé les terrasses :

- Miocène supérieur: naissance et remplissage du bassin
- Plio-Quaternaire : éventrement du bassin- naissance de la vallée de la Seybouse
- Quaternaire : - écoulement - érosion dans le bassin
- Quaternaire récent : dépôts des alluvions

### **Conclusion :**

La zone d'étude fait partie du domaine externe de la chaîne des Maghrébides de l'Algérie orientale. Les terrains qui constituent le sol et le sous sol sont variés et leurs âges oscillent entre le Trias et le Quaternaire. Du point de vue géomorphologique, la région d'étude correspond à une dépression à valeur de bassin allongé d'Est en Ouest dans laquelle se sont accumulés des dépôts du Néogène et du Quaternaire.

Ce bassin est adossé au Nord comme au Sud à des reliefs appartenant pour l'essentiel au domaine tellien constitué de marnes et de carbonates d'âge méso-cénozoïque et dont la sédimentation de mer ouverte, s'est effectuée en domaine pélagique (unités telliennes).

Les formations néritiques constantinoises qui représentent la terminaison orientale du domaine, apparaissent à la faveur de fenêtres, à Djebel Débar, à l'Est de Hammam Ouled Ali, à Héliopolis et à Nador. D'Ouest en Est ces formations carbonatées constituent le substratum des nappes telliennes de Guelma.

## **Chapitre III**

# **CARACTÉRISTIQUES HYDROLOGIQUES ET CLIMATIQUES**

### III. Etude Hydro-climatique de la zone d'étude

#### Introduction

L'étude hydro climatique permet de dresser un bilan hydrique dans lequel ressortent et les différentes franges d'eau réparties dans la zone, notamment la quantité infiltrée dans le sol et le sous sol qui lessive et dissout les éléments minéraux contenus dans les différentes formations rocheuses identifiées. Cette quantité de sels dissouts dans les eaux souterraines influencera leur composition chimique.

Les paramètres climatiques étudiés dans ce volet sont principalement ; la pluie, la température, l'évapotranspiration, l'humidité relative, les vents,.....

La zone d'étude est caractérisée par un climat de type méditerranéen, son régime climatique dépend de deux paramètres principaux ; la précipitation et la température.

La pluie est un paramètre fondamental pour évaluation et la quantification des différentes franges d'eau de surface, souterraines et dans l'atmosphère. La température est un facteur qui provoque l'évapotranspiration des plantes. Elle intervient aussi dans le déficit d'écoulement saisonnier et annuel.

La connaissance des conditions climatiques de la zone d'étude, des caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère et des directions d'écoulement des eaux souterraines, joue un rôle important dans la compréhension de l'évolution des éléments minéraux et l'influence de la lithologie sur la composition chimique des eaux.

#### III.1. Les précipitations météoriques :

Les données pluviométriques et de température ont été collectées dans les stations météorologiques de Guelma, Hammam Dèbagh et Ain Larbi, situées respectivement au centre, à l'Ouest et au Sud de la zone d'étude. Les caractéristiques de ces stations sont illustrées dans le tableau 1.

Les séries d'observation s'étendent de 1971-72 à 2008-09 pour les données pluviométriques et de 1986/87 à 2008/09 pour les températures.

**Tableau 1.** Caractéristiques des stations météorologiques

Station	Longitude	Latitude	Altitude (m)	Période d'observation	
				Précipitations	Températures
Guelma	07° 28' E	36° 26' N	227	1971/72 - 2008/09	1986/87 - 2008/09
H. Dèbagh	07° 15' E	36°27' N	350	1971/72 - 2008/09	1986/87 - 2008/09
A. Larbi	5° 64' E	40° 9' N	930	1971/72 - 2008/09	1986/87 - 2008/09

#### III.1.1. Les variations des précipitations

Les tableaux 2, 3 et 4, montrent que la précipitation moyenne dans la zone d'étude varie entre 250 et 600 mm par an. La saison hivernale est la plus pluvieuse dans les trois stations, avec des moyennes respectives de 79,16 mm par mois dans la station de Guelma, 82,1 mm par mois dans la station d'A. Larbi et 81,4 mm par mois dans celle de H. Dèbagh et un pic au mois de décembre pour la première et troisième station située sur la même ligne ouest-est et, au mois de mars pour la station d'A. Larbi. Ce qui produit une recharge dans les nappes et par conséquent une dilution des éléments chimiques. Par contre, l'été est sec avec une faible recharge entre 8 et 14 mm par mois, ce qui produira une évaporation rapide et une concentration en éléments minéraux. L'écart type entre les valeurs des précipitations mensuelles est plus important pendant le mois de décembre (60,9 mm).

**Tableau 2.** Variations mensuelles des précipitations (Station de Guelma : 71/72-08/09).

Mois	S	O	N	D	Jan	F	M	A	M	J	J	A	Ann.
Moyenne	30,6	49	64	85	84	69	67	58	41	16	5,2	8,8	536,3
Max	88	148	184	292	234	212	230	187	120	51	37	46	827
Min	0	3	1	5	10	2	5	5	5	0	0	0	257,3
Ecart type	25,5	39,3	53,7	60,9	56,8	51,3	50,2	43,2	33,9	17,1	8,59	11,3	168,8
Saison	Automne			Hiver			Printemps			Eté			
Moyenne	47,72			79,16			61,03			10,05			

**Tableau 3.** Variations mensuelles des précipitations (Station d'A. Larbi: 71/72-08/09).

Mois	S	O	N	D	Jan	F	M	A	M	J	J	A	Ann.
Moyenne	31,2	50,8	62,5	74,6	93	78,7	81,5	69	48	13	3	9	561,3
Max	97	198	172	214,6	221,6	271,4	328,5	20	226	59	26	43,7	833
Min	0	0	3,2	8	9	12	20	12	3,5	0	0	0	353
écart type	29,6	48,3	47,2	61,6	69,9	56,2	60	46,6	52,5	15,3	5,8	14,7	120,2
Saison	Automne			Hiver			Printemps			Eté			
Moyenne	48,2			82,1			66,2			8,3			

**Tableau 4.** Variations mensuelles des précipitations (Station de H. Débagh: 71/72-08/09).

Mois	S	O	N	D	Jan	F	M	A	M	J	J	A	Ann.
Moyenne	34,2	42,2	59,6	94,5	73,8	75,8	66,5	50,97	48,16	17,7	20,5	9,87	572,2
Max	114	111,2	186	192,6	209	243	147	126,4	140,7	105	31,7	63	747
Min	0	0	9	20,1	11	9,8	9,5	9	2,5	0	0	0	314,8
Ecart type	41,4	28,5	19	61,6	69,9	35,2	82,5	39,6	41,7	8,6	5,5	8,9	147,3
Saison	Automne			Hiver			Printemps			Eté			
Moyenne	45,3			81,4			55,2			48,09			

### III.2. Les températures

Les données sur la température dont on dispose, sont des valeurs moyennes mensuelles mesurées dans les trois stations sur une période (1986/87-2008/09).

### III.2. Les variations des températures

**Tableau 5:** Températures extrêmes moyennes mensuelles (1986/87-2008/09).

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Moyenne
St. Guelma	25	22	12	11	7,5	8	12	14	22	24	27	29	17,80
St.A.Larbi	23	19	13	12	7	10	12	13	22	24	28	28	17,60
St.Hm. Déb	25	21	15	12	8	11	14	16	20	25	29	29	19

Les différentes valeurs de température du tableau 5, indiquent que la zone d'étude est caractérisée par un climat doux et humide en hiver et chaud et sec en été, caractérisant un climat méditerranéen. Les moyennes mensuelles les plus élevées sont observées essentiellement pendant la période d'été (Juin – Septembre), avec des températures entre 24 et 29 °C. Par contre les températures les plus basses, de 7 à 14 °C, sont observées pendant la période d'hiver (décembre à mars) avec un minimum pendant le mois de janvier (7 °C). Les autres mois présentent des températures intermédiaires (14 à 25 °C).

D'un point de vue hydrochimique, les valeurs de la température, indiquent que pendant la période d'été, on observera une évaporation de l'eau et en même temps une augmentation de la concentration en éléments chimiques dans la nappe.

### III.3. Le Bilan hydrique

Le bilan hydrologique naturel peut se calculer par la formule suivante (Castany, 1982) :

$$P = ETR + R + I$$

- ETR : l'évapotranspiration annuelle (mm).
- I : infiltration, - P : précipitation, - R : ruissellement.

#### III.3.1. Etablissement d'un bilan Hydrique par la méthode de Thornthwaite.

Les études de Thornthwaite (Gaston Réménieras, 1993 ; Laborde, 2000) ont porté sur ce qu'il appelle l'évapotranspiration potentielle, qui est définie comme l'évapotranspiration à partir d'une surface qui serait suffisamment approvisionnée en eau pour permettre l'évaporation de la quantité maximale d'eau permise par les conditions climatiques.

Cette méthode est utilisée pour les climats sub-humide et semi-aride et, vu les caractéristiques intermédiaires du climat méditerranéen, cette formule a été appliquée. Elle est basée sur la notion de réserve d'eau facilement utilisable (RFU). On admet que la hauteur d'eau stockée dans le sol qui est reprise par l'évapotranspiration est de 100 mm au maximum. La méthode de Thornthwaite (1948), permet de calculer l'évapotranspiration potentielle à partir des données de base (précipitation, température (T°C), le coefficient thermique mensuel (K) et l'indice thermique mensuel (i) selon la relation suivante :

$$ETP = 16. (10 T / I)^a \cdot K$$

Où  $I = \sum i = \sum (T / 5)^{1.514}$  et  $a = 0,016 I + 0,5$

Le principe de calcul du bilan hydrologique de Thornthwaite est le suivant :

- si pour un mois  $P \geq ETP$  on pose que l' $ETP = ETR$ , la quantité d'eau qui reste ( $P - ETR$ ) va alimenter la RFU jusqu'à son maximum (100 m) et si elle dépasse cette valeur il y aura un excès (WS) qui va partir soit sous forme d'infiltration efficace vers la nappe, soit sous la forme de ruissellement.
- si  $P < ETP$ , la valeur de  $ETR = P + RFU$ , jusqu'à égalisation avec ETP.
- si la RFU est nulle, il va se produire un déficit agricole  $Da = ETP - ETR$ , ce dernier paramètre représente alors le besoin des cultures à l'irrigation.

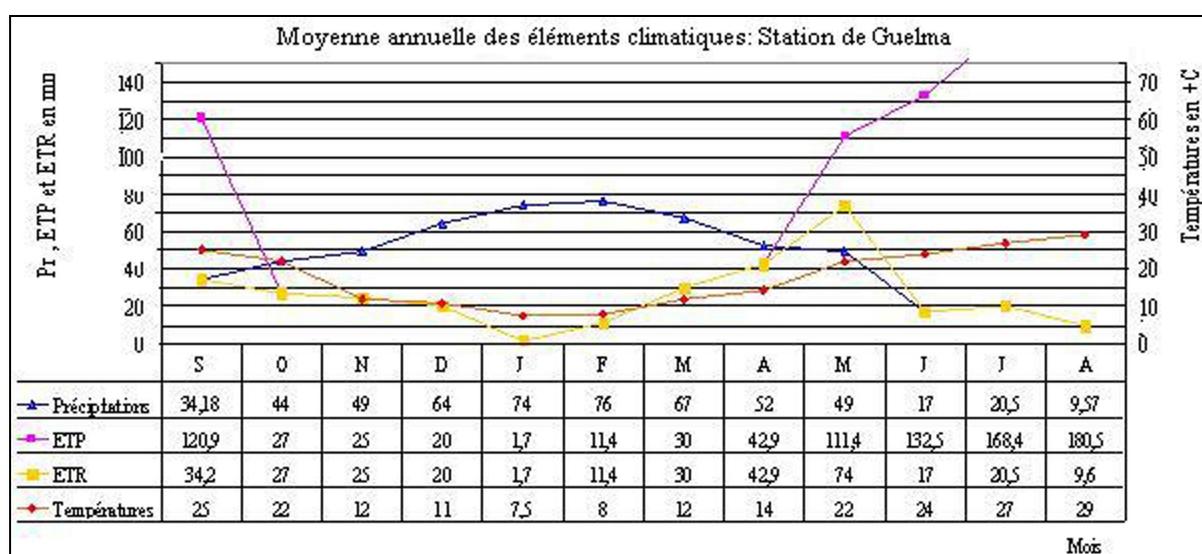
Les pertes d'eau d'un sol atteignent l'ETP si elles sont supérieures ou égales au stock d'eau de la RFU. En cas d'insuffisance elles sont limitées à une quantité plus petite, cette limite est appelée l'évapotranspiration réelle (Castany, 1982). Cette estimation se fera à partir des formules de Turc et de Thornthwaite.

Les valeurs de l'ETP mensuelle calculées, sont multipliées au moyen d'un coefficient d'ajustement mensuel (K) qui tient compte du nombre de jours et d'heures réelles entre le lever et le coucher du soleil. Ces coefficients utilisés par la station météorologique de Guelma sont tirés d'abaques.

Les résultats obtenus des différents paramètres du bilan hydrique sont récapitulés dans les tableaux 6, 7 et 8 et, les figures 6, 7 et 8.

**Tableau 6:** Bilan hydrique selon Thornthwaite. Station de Guelma (1986/87-2008/09).

	Tp	IT	k	ETPC	Pr	BH	CH	VR	RU	ETPR	Def	Exc
S	25	11,4	1,03	120,9	34,18	-86,7	-0,7	0,0	0,0	34,2	86,7	0,0
O	22	9,4	0,97	27,0	44	17,1	0,6	17,1	17,1	27,0	0,0	0,0
N	12	3,8	0,86	25,0	49	24,0	1,0	-17,1	0,0	25,0	0,0	0,0
D	11	3,3	0,81	20,0	64	44,0	2,2	25,0	25,0	20,0	0,0	0,0
J	7,5	1,8	0,87	1,7	76	72,3	41,5	0,0	25,0	1,7	0,0	0,0
F	8	2,0	0,85	11,4	74	64,6	5,6	0,0	25,0	11,4	0,0	0,0
M	12	3,8	1,03	30,0	67	37,0	1,2	0,0	25,0	30,0	0,0	0,0
A	14	4,8	1,10	42,9	52	9,1	0,2	0,0	25,0	42,9	0,0	0,0
M	22	9,4	1,21	111,4	49	-62,4	-0,6	-25,0	0,0	74,0	37,4	0,0
J	24	10,7	1,22	132,5	17	-115,5	-0,9	0,0	0,0	17,0	115,5	0,0
J	27	12,6	1,24	168,4	20,5	-147,9	-0,9	0,0	0,0	20,5	147,9	0,0
A	29	14,5	1,16	180,5	9,57	-170,9	-0,9	0,0	0,0	9,6	170,9	0,0
Annuel	17,8	87,6	88,9	871,7	556,3	-315,5				313,2	558,5	0,0

**Figure 6.** Bilan hydrique selon la méthode de Thornthwaite. Station de Guelma (1986/87- 2008/09).**Tableau 7:** Bilan hydrique selon Thornthwaite. Station d'A. Larbi (1986/87- 2008/09).

	Tp	IT	CL	ETPC	Pr	BH	CH	VR	RU	ETPR	Def	Exc
S	23	10,1	1,03	104,0	34	-70,0	-0,7	0,0	0,0	34,0	70,0	0,0
O	17	6,4	0,97	68,7	41	-27,7	-0,4	0,0	0,0	41,0	27,7	0,0
N	15	5,3	0,86	30,1	49	19,0	0,6	0,0	0,0	30,1	0,0	0,0
D	12	3,8	0,81	24,4	65	40,6	1,7	25,0	25,0	24,4	0,0	0,0
J	7	1,7	0,87	9,6	72	62,4	6,5	0,0	25,0	9,6	0,0	0,0
F	11	3,3	0,85	18,2	76	57,8	3,2	0,0	25,0	18,2	0,0	0,0
M	13	4,2	1,03	31,0	66	35,0	1,1	0,0	25,0	31,0	0,0	0,0
A	15	5,3	1,10	38,4	53	14,6	0,4	0,0	25,0	38,4	0,0	0,0
M	18	7,0	1,21	112,5	49	-63,5	-0,6	-25,0	0,0	74,0	38,5	0,0
J	25	11,4	1,22	133,3	18	-115,3	-0,9	0,0	0,0	18,0	115,3	0,0
J	27	12,6	1,24	180,5	19	-161,5	-0,9	0,0	0,0	19,0	161,5	0,0
A	28	14,5	1,16	168,9	9,3	-159,6	-0,9	0,0	0,0	9,3	159,6	0,0
Annuel	17,6	85,5		919,6	551,3	-368,3				347,0	572,6	0,0

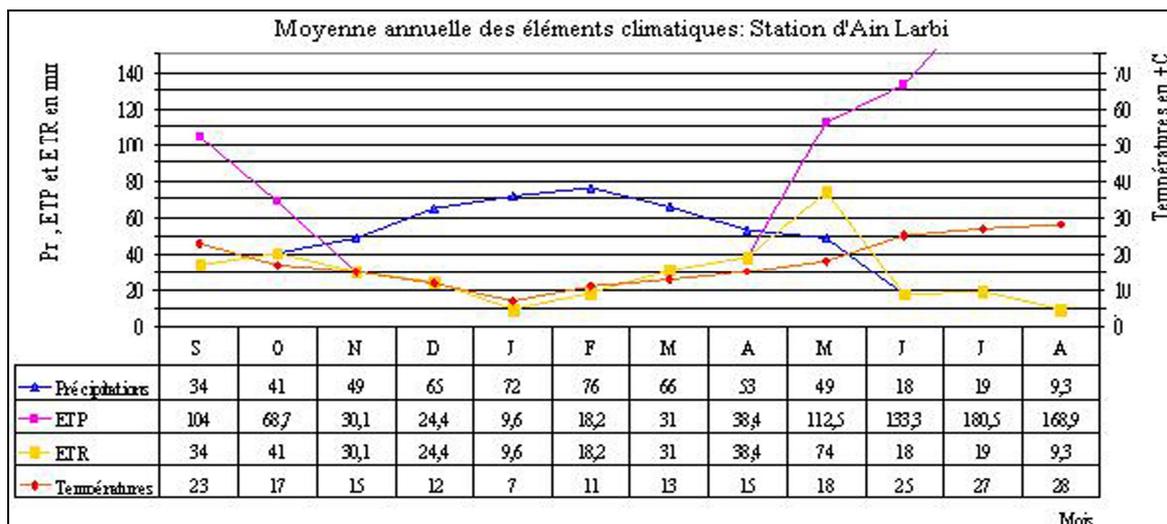


Figure 7. Bilan hydrique selon la méthode de Thornthwaite Station de A. Larbi (1986/87-2008/09).

Tableau 8: Bilan hydrique selon Thornthwaite. Station de Hm. Débagh (1986/87- 2008/09).

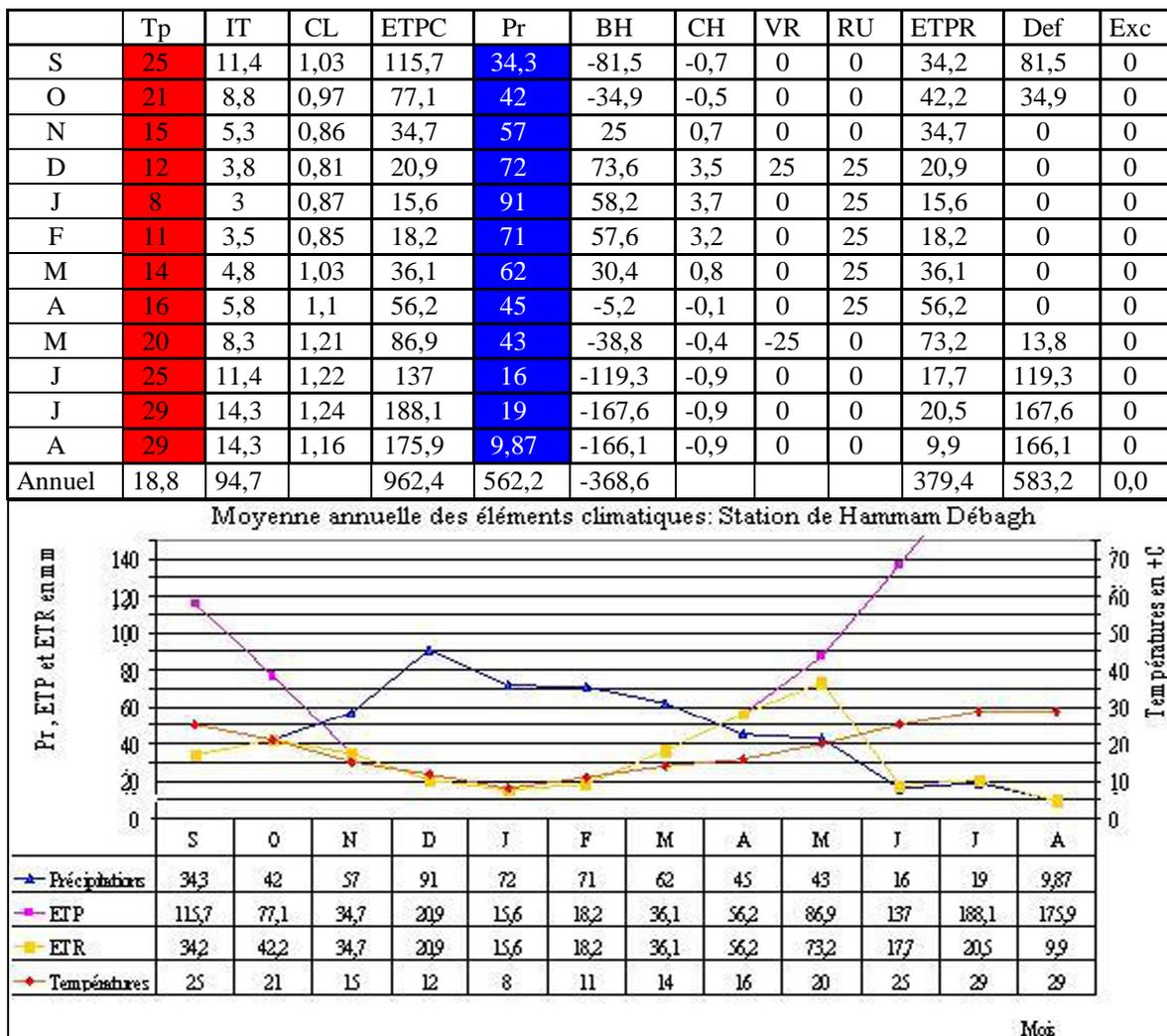


Figure 8. Bilan hydrique selon la méthode de Thornthwaite. Station de Hm. Débagh (1986/87- 2008/09).

**Tableau 9** : Paramètres du bilan hydrique dans la zone d'étude (mm) (1986/87- 2008/09).

Station	P	T°C	ETP	ETR	Déficit	BH	Excédent.
Guelma	556,30	17,80	871,70	313,20	558,50	- 315,40	0,00
A.Larbi	551,33	17,60	919,60	347,00	572,60	- 368,30	0,00
Hm.Débagh	562,20	18,90	962,40	379,40	583,20	- 368,60	0,00

Le bilan hydrique (BH) a été établi selon la méthode de Thornthwaite parce qu'elle est la plus appropriée au climat semi aride de la zone d'étude.

Au vu des données illustrées dans le tableau 9 et les figures 6, 7 et 8, les observations et conclusions suivantes peuvent être tirées:

- A l'échelle mensuelle, la zone d'étude accuse une période de sécheresse qui se traduit par un déficit agricole (Da) totalisant 558,50 mm au centre de la zone d'étude, 572,60 mm au sud et 583,20 mm à l'ouest. Cette sécheresse sévit à partir du mois de mai jusqu'au mois d'octobre avec une valeur maximale au mois d'août (170,90 mm) au nord et, au mois de juillet avec des valeurs respectives de (167,60 mm) à l'ouest et (161,50 mm) au sud.

- L'approvisionnement en eau de la R F U commence à partir du mois de novembre et n'atteint que 25 mm et s'étend jusqu'au mois de mai.

Une période de décharge de la R F U, qui se manifeste à partir du mois de mai, après quoi l'irrigation devient nécessaire jusqu'au mois d'octobre.

- La température et l'ET P sont au minimum (janvier pour les stations de Hm. Débagh et A. Larbi), avec respectivement des températures de 8 °C et 7°C et une ETP de 15,60 mm et 9,60 mm. Les précipitations sont au maximum avec 91 mm et 76 mm. Dans la station de Guelma, ces minimums sont respectivement 7,5 °C et 1,70 mm, pour une précipitation de 76 mm.

### III.3.2. Estimation du ruissellement :

Le coefficient de ruissellement "R" renseigne sur la quantité d'eau ruisselée durant la période 1986 / 2009. Il est calculé par la formule Tixeront Berkaloff :

$$\bar{R} = P^3 / 3 \times (ETP)^2$$

R : Ruissellement (mm) ;  $\bar{P}$  : Pluviométrie annuelle moyenne (mm) ;  
ETP: Evapotranspiration potentielle (mm).

### III.3.3. Estimation de l'infiltration

Dans notre cas et par manque de données de tous ces paramètres, nous estimons l'infiltration par l'équation du bilan hydrique (1986/87- 2008/09), tel que :

$$I = \bar{P} - ETR - R$$

Où; I: infiltration (mm) ;  $\bar{P}$  : Précipitation annuelle moyenne (mm)  
ETR : Evapotranspiration réelle selon Thornthwaite ; R: Ruissellement

La répartition de la pluie en lames d'eau est illustrée dans le tableau 16.

On remarque dans le tableau 16, que les quantités d'eau ruisselées et infiltrées sont très faibles comparées à celles évaporées.

**Tableau 10** : Répartition des lames d'eau dans la zone d'étude.

Station	P (mm)	ETP (mm)	R (mm)	I (mm)
Guelma	556,30	871,70	75,52	167,58
A. Larbi	551,33	919,59	66,05	138,28
Hm. Débagh	562,20	962,40	63,94	118,86

Dans le bilan hydrique établi selon la méthode de Thornthwaite, les valeurs des paramètres déterminées et déduites nous renseignent sur la répartition des quantités d'eau dans le sol, le sous-sol et l'atmosphère durant la période (1986/87- 2008/09), (cf., tab. 10).

Pour une précipitation moyenne de 556 mm, on enregistre une ETP moyenne très élevée de l'ordre de 920,0 mm et une ETR moyenne de l'ordre de 450,00 mm. Contre des lames d'eau moyennes de 68 mm ruisselées et 141,90 mm infiltrées.

La reconstitution des réserves en eau commence à partir du mois de novembre et s'achève au mois de mai. Suit alors une période de sécheresse nécessitant une irrigation pour combler un déficit moyen de 570 mm.

### Conclusion

Dans la zone d'étude, le bilan hydrique établi selon la méthode de Thornthwaite à partir des données climatiques recueillies au niveau des trois stations météorologiques donne les lectures suivantes :

- A l'échelle mensuelle, on enregistre une période de sécheresse qui se traduit par un déficit agricole (Da), totalisant 558,50 mm au niveau de la station de Guelma (centre de la zone d'étude), 572,60 mm au niveau de celle d'Ain Larbi au Sud et 583,20 mm au niveau de celle de Hammam Débagh à l'ouest.
- Cette sécheresse sévit à partir du mois de mai jusqu'au mois d'octobre, avec une valeur maximale au mois d'août (170,90 mm) au centre et, au mois de juillet avec des valeurs respectives de (167,60 mm) à l'ouest et (161,50) mm) au sud.
- L'approvisionnement en eau de la R F U commence à partir du mois de novembre et atteint un maximum de 25 mm dans toute la zone d'étude et s'étend jusqu'au mois de mai.
- Une période de décharge de la R F U, qui se manifeste à partir du mois de mai, après quoi l'irrigation devient nécessaire jusqu'au mois d'octobre.
- La température et l'ETP sont au minimum (janvier pour les stations de Hm. Débagh et A. Larbi), avec respectivement des températures de 8 °C et 7°C et une ETP de 15,60 mm et 9,60 mm. Les précipitations sont au maximum avec 91 mm et 76 mm. Dans la station de Guelma, les minimums sont respectivement 7,5 °C et 1,70 mm, pour une précipitation de 76 mm.
- Pour une précipitation moyenne de 556 mm, on enregistre une ETP moyenne très élevée de l'ordre de 920,0 mm et une ETR moyenne de l'ordre de 450,00 mm. Contre des lames d'eau moyennes de 68 mm ruisselées et 150 mm infiltrées.

Dans le cadre de cette étude, la lame d'eau infiltrée depuis le sol, le sous-sol jusqu'aux eaux souterraines et à l'émergence, acquiert une composition chimique qui reflète fidèlement la nature des terrains traversés. C'est dans cette optique, que le chapitre v, traitera les paramètres pour déterminer les caractéristiques physiques et chimiques des eaux souterraines, à partir des trente points d'eau (sources et forage), recensés dans la zone d'étude.

## **Chapitre IV**

# **ÉTUDE HYDROGÉOLOGIQUE**

#### IV. Etude hydrogéologique (description hydrogéologique des différents aquifères)

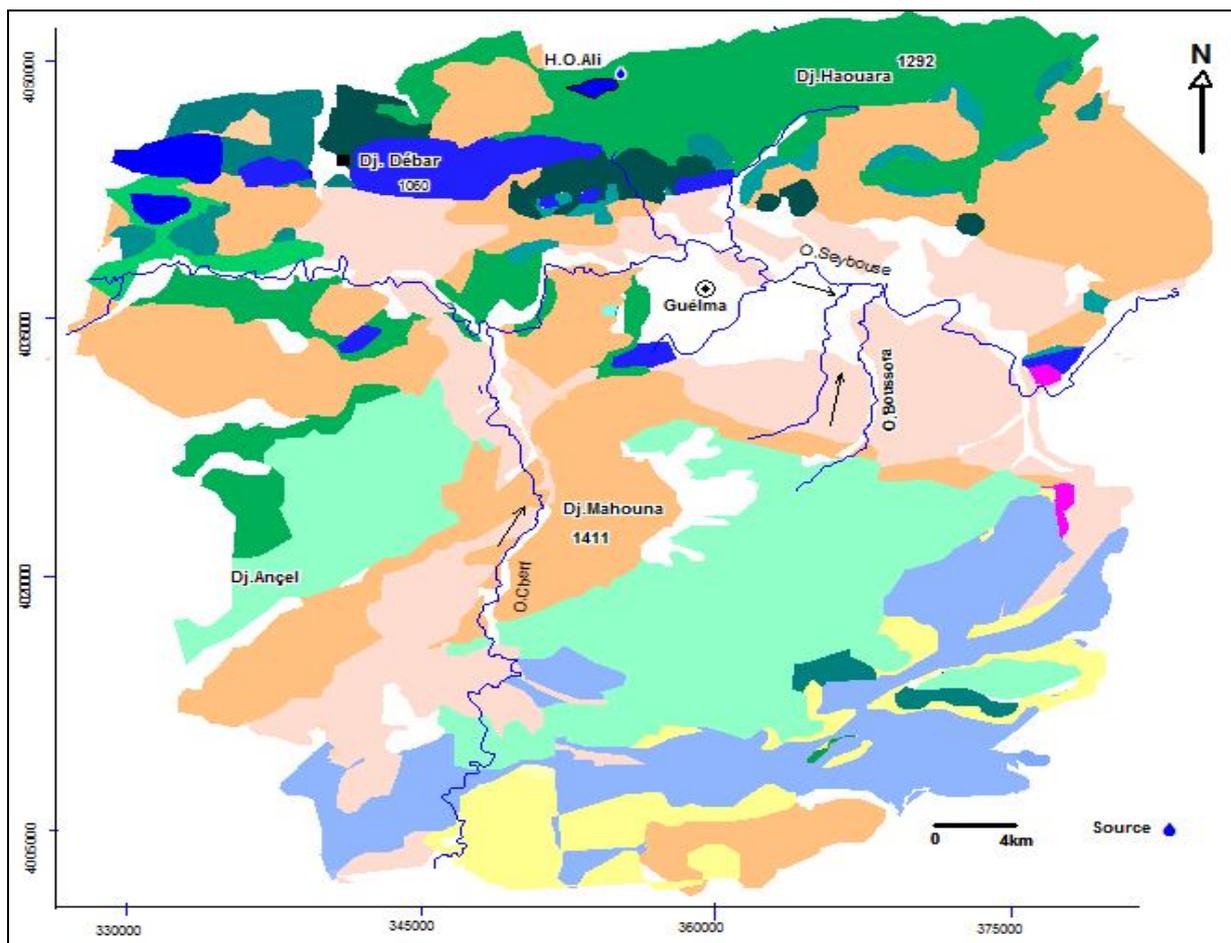
La description des différentes formations géologiques fournie par l'outil géologique a été confrontée aux renseignements fournis par l'interprétation des logs stratigraphiques des forages de prospection et d'exploitation réalisés dans la zone d'étude par la D.R.E W. Guelma d'une part et, aux coupes géo-électriques recueillies dans les différentes études élaborées par d'autre part. L'exploitation de ces informations a permis de sélectionner quatre aquifères qui sont les plus importants dans la zone d'étude (cf, fig. 9).

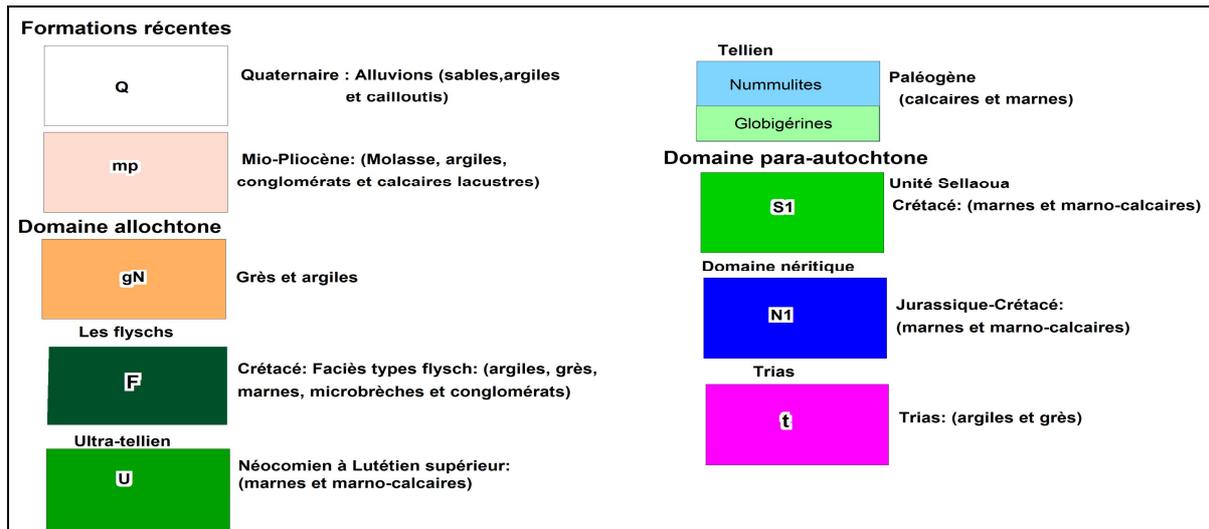
**IV.1.** L'aquifère des alluvions Mio-Plio-Quaternaires de Guelma ; Il est situé au centre de la zone d'étude ;

**IV.2.** L'aquifère des calcaires néritiques d'âge sénonien (Bouzitoun) et marno-calcaires du Maestrichtien (Guelat Bou Sbaa) dans la région d'Héliopolis-Fedjoudj ; Il est situé au Nord de la zone d'étude ;

**IV.3.** L'aquifère des formations carbonatées d'âge Eocène de la région Ras El Agba-Sellaoua Announa : Il est situé à l'Ouest.

**IV.4.** L'aquifère des formations carbonatées de la région de Bouhachana-Ain Larbi (Ex Gounod) d'âge Yprésien : Il est situé au Sud-est de la zone d'étude.





1- L'aquifère alluvionnaire de Guelma (au centre), 2- L'aquifère des formations carbonatées d'Héliopolis-Fedjoudj Néritique, (au nord), 3- L'aquifère des formations carbonatées de Ras El Agba-Sellaoua Announa (à l'ouest), 4- L'aquifère des formations carbonatées de Bouhachana-A. Larbi (au sud).

**Figure 9.** Localisation des différents aquifères dans la zone d'étude.

#### IV.1. L'aquifère des alluvions quaternaires du bassin de Guelma

L'aquifère alluvionnaire de Guelma d'âge Mio-Plio-Quaternaire (Sogréah, 2005), est un bassin d'effondrement de 106 km<sup>2</sup> de superficie, constitué de terrasses (cf., fig. 10) que l'on peut décrire comme suit:

- Aquifère des hautes terrasses (50 Km<sup>2</sup>), constitué de deux nappes superposées (cf., tab. 11) ; une nappe libre entre 0 et 50 m dans les galets, sables et graviers du Quaternaire et une nappe semi-captive entre 70 et 100 m dans les alluvions grossières pliocènes. Les deux nappes sont séparées par endroits, par une couche argileuse de 10 à 20 m d'épaisseur. Dans la nappe libre les transmissivités varient entre 10<sup>-3</sup> et 10<sup>-2</sup> m<sup>2</sup>/s et les coefficients d'emménagement entre 4 et 10 % et peuvent être assimilés à la porosité (Castany, 1982). Dans la nappe semi-captive, ils sont de l'ordre de 10<sup>-3</sup> m<sup>2</sup>/s et 1 % (le coefficient d'emménagement est 10 à 100 fois plus petit que la porosité) (Banton and Bangoy, 1999). Selon l'axe de l'ancienne vallée (N-S), le remplissage atteint 100 m d'épaisseur au centre alors que vers le Sud, au-delà de la route Guelma-Sedrata, il se réduit à un placage de 5 à 10 m de puissance (Sogréah, 2005).

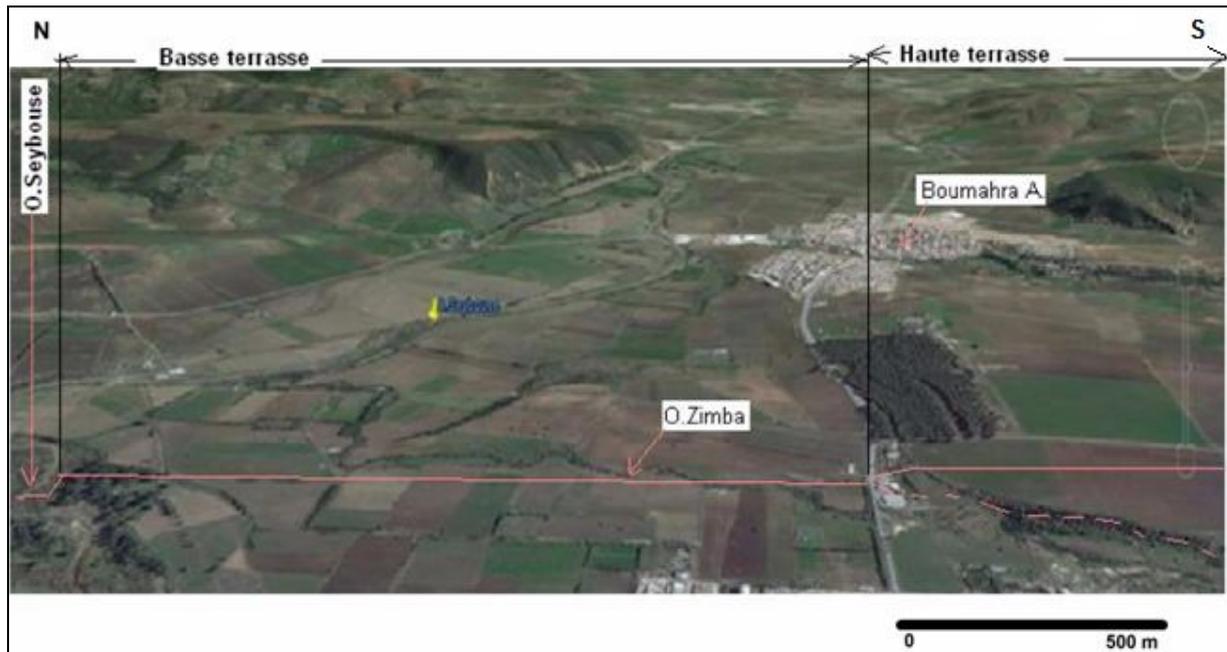
D'après les études antérieures (Sogréah, 2005), le système aquifère obéit à deux types de conditions aux limites communément connues à savoir, les limites imperméables représentées par les marnes du Miocène, les argiles du Numidien et les molasses et grès du Miocène qui sont très peu perméables. Le deuxième type de condition est la limite d'alimentation représentée par les grès du Numidien et les travertins. La longueur de contact avec l'aquifère des travertins (7 km) et le volume d'eau qui en provient restent faibles.

- Aquifère de la vallée actuelle (44 Km<sup>2</sup>), située au nord et dont l'épaisseur varie entre 10 et 15 m et la transmissivité entre 10<sup>-3</sup> et 8,9 10<sup>-3</sup> m<sup>2</sup>/s. Elle est exploitée par des puits ordinaires.

- Aquifère des travertins, au Sud de la ville de Guelma et de la haute terrasse et, dont la surface totale est de 27 km<sup>2</sup> (la surface des travertins contenant une nappe n'est que de 12,5 km<sup>2</sup> et leur épaisseur de 55 m).

**Tableau 11.** Description hydrogéologique des formations de la plaine de Guelma.

Ere	Système	Lithologie	Epaisseur (m)	Intérêt hydrogéologique	
				perméabilité	type d'aquifère
Quaternaire	récent	-Alluvions actuelles : galets, calcaires, limons, travertins  -Alluvions anciennes : <u>Basse terrasse :</u> sables, cailloutis, limons.  <u>Moyenne terrasse :</u> sables, cailloutis, galets, limons, conglomérats.  <u>Haute terrasse :</u> galets, conglomérats, limons. sables	<u>8 - 16</u>  <u>30 - 50</u>  <u>100</u>	Perméables	<u>Aquifère de la basse terrasse</u>  <u>Aquifère de la moyenne terrasse</u>  <u>Aquifère de la haute terrasse</u>
	ancien	tufs calcaires	-		perméable
Tertiaire	Mio-Pliocène	argile à gypse	-	impermeable	substratum
	Pliocène	Travertins	12 - 55	perméable	Aquifère des travertins



**Figure 10.** Photo satellite montrant les terrasses de l'aquifère alluvionnaire de Guelma.

#### IV.1.2. Directions des écoulements

Pour l'aquifère de la vallée actuelle, on note un drainage général par l'Oued Seybouse, les gradients hydrauliques moyens sont de l'ordre de 0,0043 en période de hautes eaux et de 0,004 en période de basses eaux.

Pour l'aquifère des hautes terrasses et des alluvions pliocènes, l'écoulement général se fait vers le Nord, avec un gradient qui varie entre 0,09 et 0,01, en diminuant dans le sens de l'écoulement.

L'aquifère des travertins présente le même sens d'écoulement que l'aquifère des hautes terrasses et fait penser qu'il alimente en partie ce dernier. Les échanges entre les différents aquifères se résument en une alimentation de l'aquifère des alluvions par celui des travertins, le déversement de l'aquifère des hautes terrasses en direction de la vallée actuelle au dessus du seuil des marnes à gypse d'une part et en direction de la vallée de l'Oued Boussorra au dessus des marnes jaunes à poudingues.

On remarque ainsi, l'existence de trois axes de drainage d'orientation générale Sud-Nord matérialisés le long des trois affluents de l'oued Seybouse: (O. Boussora et O. Meklouka, à l'Est, O. Zimba, au centre et O. Maiz à l'Ouest), (cf., fig. 9). Cette disposition fait ressortir trois lignes principales de partage des eaux dans l'aquifère. La première, située entre oued Boussora et chaabet Meklouka, la deuxième située entre oued Zimba et oued Maiz et la troisième située à l'ouest de oued Skhoun.

#### IV.1.3. Piézométrie de l'aquifère alluvionnaire de Guelma

Dans l'aquifère alluvionnaire de Guelma, quatre (04) piézomètres (cf., tab. 12) et 23 forages d'exploitation (cf., tab. 13) ont été implantés. Les résultats des campagnes piézométriques ont permis de dresser une carte piézométrique de l'aquifère (cf., fig. 11).

Sur la figure 11, l'espacement des isopièzes dans la partie sud de l'aquifère indique un écoulement souterrain laminaire divergeant vers les cours d'eau (affluents de l'Oued Seybouse). Dans la partie est, on observe une limite étanche et dans sa partie nord ouest on note une convergence vers une zone de pompage excessif. L'écoulement général dans

l'aquifère se fait du Sud vers le Nord. L'aquifère des travertins alimente en partie celui des alluvions.

**Tableau 12.** Piézomètres dans l'aquifère alluvionnaire (mai-aout/2009).

Piézoètre	X (km)	Y (km)	Z (m)	Nd (m) mai/2009	Nd (m) aout/2009	Z-N (m) (mai/09)	Z-N (m) (aout/09)
P1	927,346	360,896	236	13,9	14,21	222,1	221,79
P2	927,073	361,376	240	12,7	13,45	227,3	226,55
P3	928,862	360,477	248	21,9	22,98	226,1	225,02
P4	929,931	359,511	250	6,28	7,96	243,72	242,04

**Tableau 13.** Inventaire des forages et piézométrie dans la nappe alluvionnaire de Guelma (aout/2009).

Nom	X (Km)	Y (Km)	Z (m)	NS (m)	ND(m)
OM1	926,900	361,950	238	8,50	12,00
O Mcal	926,800	361,900	250	8,70	17,40
OMDra	926,750	361,850	240	8,00	11,00
OM2	926,600	361,600	213	4,58	8,00
Frm R	926,350	362,050	237	21,00	24,00
Sgedia	926,200	361,800	242	8,20	13,00
Jrdon	926,650	361,800	245	23,30	26,00
Sonac	925,250	362,000	245	18,00	22,00
SNIC	925,600	362,100	246	17,50	21,60
SNTR	928,400	360,850	233	15,00	48,87
BK1	928,170	361,350	226	5,50	10,00
BK2	927,750	360,450	235	28,00	35,00
G5 Bis	928,100	359,000	270	46,00	56,10
BA2	929,500	358,500	235	41,00	60,90
BA3	929,300	360,400	270	29,00	43,00
Capra	927,800	361,000	232	28,00	35,00
G4	928,200	361,300	242	9,38	41,90
Sgdia	930,700	360,400	2443	9,38	41,00
BA1	930,800	361,000	246	9,00	24,50
BA5	930,260	360,100	256	13	23
Oravie	930,700	360,100	250	7,00	27,50

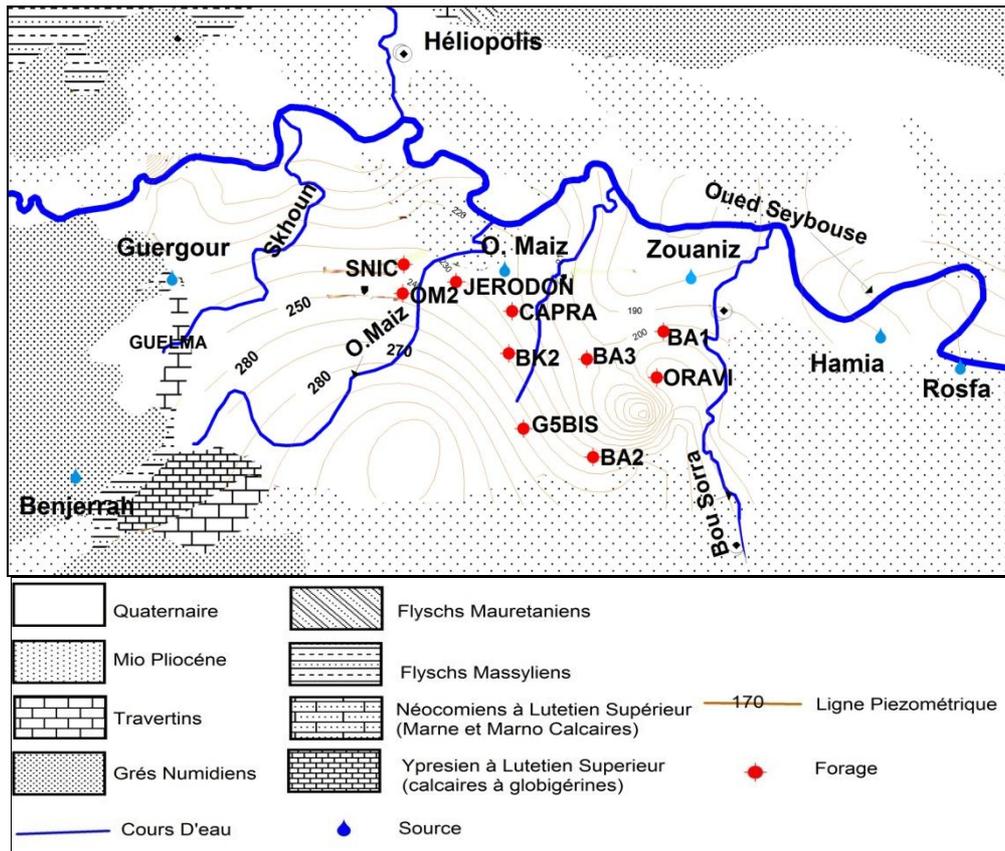


Figure 11. Carte piézométrique de l'aquifère alluvionnaire de Guelma (avril/2009).

## IV.2. L'aquifère des formations carbonatées dans la région d'Héliopolis-El Fedjoudj,

Les formations carbonatées sont représentées par les calcaires néritiques qui font partie de l'ensemble nord oriental des séries néritiques constantinoises (cf., fig. 5).

Cet aquifère est constitué essentiellement par des formations calcaires bio-détritiques ou micritiques et calcaro-dolomitiques du Sénonien supérieur, susceptibles d'être aquifères (De Marsily, 1981 ; Backalowitch et Mangin, 1980).

Les affleurements néritiques sont visibles dans le Djebel Débar qui culmine les 1411m et peuvent être la zone d'alimentation des autres affleurements qui apparaissent en mamelons au sud de Hammam Meskhoutine, à Hammam Brédaa (Héliopolis), au sud ouest de Guelma et à l'ouest de Nador (Vila, 1980). Les limites en profondeur de la nappe sont inconnues.

D'après les logs stratigraphiques et les pertes partielles et notamment totales enregistrées lors de la réalisation des forages, le néritique du secteur d'étude recèle une karstification très intéressante (située à des profondeurs variables entre 50 et 350 m) du point de vue étude et exploitation du système.

L'aquifère est exploité à ce jour par une dizaine de forages (cf., tab. 4) totalisant un débit de 357 l/s, soit 11,25 Hm<sup>3</sup>/an.

### IV.2.1. Directions des écoulements

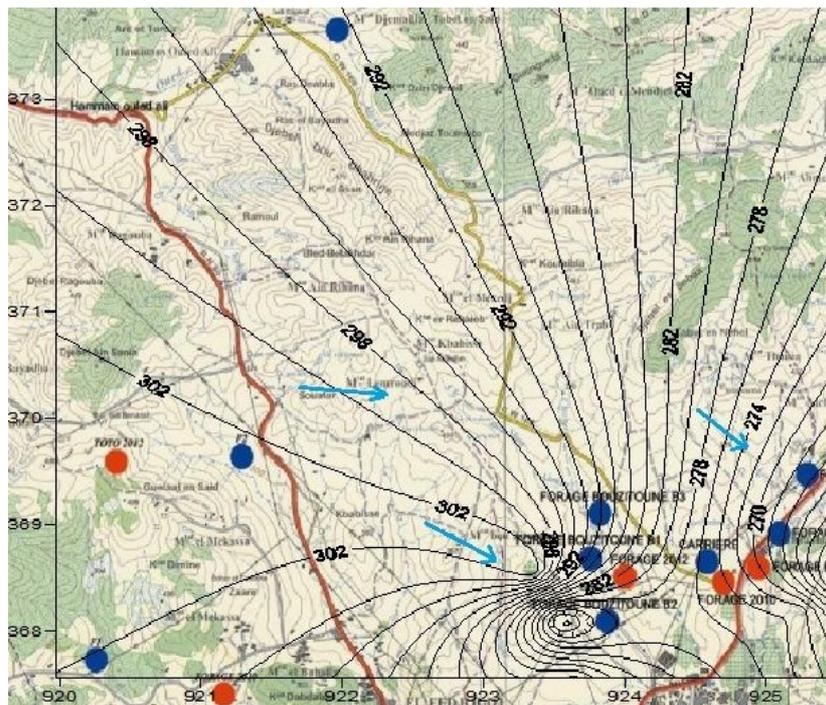
Les différentes campagnes piézométriques ont montré un écoulement général de l'ouest vers l'est (cf., fig. 12). Cette direction d'écoulement a été mise en évidence par un rabattement significatif au niveau de la source romaine et du forage N2 de Hammam Bredaa (situés à l'est) et ce, suite à la mise en service des deux forages Bouzitoune 1 et 2 situés à deux

kilomètres à l’ouest. Avant la mise en service de ces deux forages, le débit de la source romaine était de 50 l/s.

**IV.2.2. Piézométrie dans l’aquifère des formations carbonatées dans la région d’Héliopolis-Fedjoudj**

**Tableau 14.** Inventaire des forages réalisés dans la zone d’Héliopolis-Fedjoudj (2009).

Commune	Nom	X (Km)	Y (Km)	Z (m)	Prof. (m)	Qex. (l/s)	NS (m)	ND (m)	aquifère	
									toit	mur
Héliopolis	(PiscineHB2) N3	925,250	368,200	280	50	33	2,80	15,00	10	>50
	HB1(carrière) N5	924,750	368,150	285	146	33	8,70	19,70	18	
	Bouzitoune B1	923,550	368,100	320	242	27	34,00	71,00	102	242
	Ham Ouled Ali	919,970	373,870	230	173	18	9,42	14,5		
	Ham bradaa HB4	925,500	368,500	282	177	45	25,50	50,00	110	170
	Bouzitoune B2	923,650	367,550	322	202	56			98	>200
	Bouzitoune B3	923,350	368,550	325	400	60	36	54	370	400
	Maachou N2 (HB3)	925,900	369,100	360	410	33	23,50	57,76		
El Fedjoudj	El Fedjoudj F1	915,400	366,500	410	180	9	4,00	52,00	44	125
	El Fedjoudj F2	919,220	369,050	290	226	43	56,80	59,44	200	>220



**Figure 12.** Carte piézométrique de l’aquifère des formations carbonatées dans la région d’Héliopolis-Fedjoudj (mai/2009)

Sur la figure 12, les écoulements se font vers deux zones de forages ; l’une au niveau de Bouzitoune et l’autre dans la zone de Hammam Bredaa.

**IV.3. L’aquifère des formations carbonatées de la région de Ras El Agba-Sellaoua Announa:**

Dans cette zone on distingue deux unités géologiques différentes :

- L'unité géologique appartenant à la nappe tellienne : Les formations éocènes de faciès marno-calcaires renferment des niveaux aquifères. On observe quelques sources à la base de la barre calcaire yprésienne.

Ces formations calcaires font partie des séries du Paléogène tellien (Vila, 1980). Trois forages de reconnaissance et d'exploitation réalisés à Ain Brinis, ont permis de distinguer de haut en bas l'alternance ; (1) - des marnes grises d'âge Lutétien, (2) - des calcaires massifs d'âge yprésien et (3) - des marnes noires d'âge Paléocène. La source Ain Sbaa, située à l'Ouest de Ras El Agba dont le débit varie entre 0,4 l/s et 2 l/s et les autres sources de moindre importance, qui se situent entre le Djebel Announa et Bled Ben Tounsi à l'Ouest de la région d'étude (Deleau, 1952) indiquent l'existence d'un aquifère à la base des grès oligocènes aux potentialités hydriques faibles.

- L'unité géologique appartenant aux Sellaoua : Les sources sortant de ces calcaires sont plus importantes que celles de l'unité tellienne, les principales sont Ain Beida et A. Karma (Sellaoua Announa).

#### IV.3.1. Directions des écoulements dans l'aquifère des formations carbonatées de la région de Ras El Agba-Sellaoua-Announa:

Les écoulements s'effectuent suivant des directions différentes selon le niveau d'eau dans les forages et leur localisation (cf., tab. 15). Dans le flanc nord (unité Sellaoua), ils s'effectuent vers l'Oued Cherf (affluent sud de l'Oued Seybouse) et dans le flanc ouest (unité tellienne) ils s'effectuent vers l'Oued Bouhamdane (affluent ouest de l'Oued Seybouse).

#### IV.3.2. Piézométrie dans l'aquifère des formations carbonatées de la région de Ras El Agba-Sellaoua-Announa:

**Tableau 15.** Inventaire des forages réalisés dans la région de Ras El Agba-Sellaoua.

Commune	Nom	X (Km)	Y (Km)	Z (Km)	Pro	Q	NS (m)	ND (m)	aquifère	
					fond	Exp			toit	mur
Ras EL Agba	A. Brinis 1	904,100	351,000	700	216	10	12,75	26,72		
	A. Brinis2bis	902,600	350,300	711	76	10	2,50	36,00		
Ain Hssainia	HALIMI	910,500	356,000		92	4				
	Ghaloum Salah	900,440	358,130		85	3				
Ras el Agba	SERHANI	902,200	352,000		48	8				
Bouhamdene	Beloucif	899,500	356,500		120	5				
	Zaidi	365,000	901,000		48	3				
Sellaoua Announa	Gribissa	908,400	348,150	670	135	12				

Le nombre de forages privés pour la majorité n'a pas permis d'établir une campagne de piézométrie (faute d'accès), néanmoins le peu d'informations disponibles exploité a permis de discerner au moins deux sens d'écoulement souterrain.

Un écoulement Sud-nord, au niveau du flanc Nord de Dj. Announa, où émergent les sources Ain Karma et Ain Beida et un écoulement vers l'Ouest où émerge la source Ain Sbaa.

#### IV.4. L'aquifère des formations carbonatées de la région de Bouhachana-Ain Larbi

Dans l'aquifère des calcaires yprésiens de Bouhachana-Ain Larbi, les neuf forages exploités totalisent un débit de 143 l/s soit 4,5 Hm<sup>3</sup>/an. Les formations calcaires affleurent par endroits notamment sur la rive droite d'Oued Halia (Bouhachana) et constituent la continuité des séries de Sellaoua Announa. Les logs stratigraphiques des forages indiquent la présence de zones fissurées et karstifiées entre 70 et 100 m de profondeur en moyenne d'après les

perdes d'eau et absence de remontée des cuttings durant la réalisation des forages. Ces formations carbonatées constituent un aquifère important, qui alimentait la ville de Guelma avant l'exploitation des eaux du barrage Hammam Débagh. L'ancienne source de Halia qui débitait près de 100 l/s avant la réalisation des premiers forages en est l'indice.

#### IV.4.1. Directions des écoulements dans L'aquifère des formations carbonatées de la région de Bouhachana–Ain Larbi

En l'absence d'une campagne piézométrique, la carte piézométrique de l'aquifère n'a pas été établie. D'après les niveaux d'eau enregistrés dans les différents forages réalisés (cf., tab. 16), les écoulements souterrains se font du sud vers le nord, en direction de l'Oued Seybouse.

**Tableau 16.** Inventaire des forages réalisés dans la région de Bouhachana–Ain Larbi (2009).

Commune	Nom	X (m)	Y(m)	Z (m)	Pro	Q	NS	ND	aquifère	
					fond	Exp.	(m)	(m)	toit	mur
Khezaras	K1	929600	347550			14	7,70	33,86	26	>150
	K2	929,300	347,700		100	7	32,00	60,00		
	Herga AE Hak	932,380	384,600		180	2				
Bouhachana	OH2	928,800	343,700		100	5	13,50	51,00	15	>100
	OH1	928,570	345,000		100	70	3,68	7,80	0	>100
	OH5	929,900	343,600		116	18			15	100
	Bazina	930,450	342,400		120	5				
Ain Larbi	Ain Alouage F1	929,200	339,600		85	10	6,39	39,00	0	78
Ain Sandel	Maarouf	933,800	389,700		255	12				

#### Conclusion

La zone d'étude recèle des potentialités hydriques importantes réparties sur quatre aquifères que l'on peut décrire comme suit :

- L'aquifère des alluvions Mio-Plio-Quaternaires de Guelma ; Il est situé au centre de la zone d'étude ;
- L'aquifère des calcaires néritiques d'âge sénonien (Bouzitoun) et marno-calcaires du Maestrichtien (Guelat Bou Sbaa) dans la région d'Héliopolis-Fedjoudj ; Il est situé au Nord de la zone d'étude ;
- L'aquifère des formations carbonatées d'âge Eocène de la région Ras El Agba-Sellaoua Announa : Il est situé à l'Ouest.
- L'aquifère des formations carbonatées de la région de Bouhachana-Ain Larbi (Ex Gounod) d'âge Yprésien : Il est situé au Sud-est de la zone d'étude.

L'aquifère alluvionnaire de Guelma d'âge Mio-Plio-Quaternaire est un bassin d'effondrement de 106 km<sup>2</sup> constitué de terrasses ; haute, moyenne et basse, disposées en gradins essentiellement sur la rive droite de l'Oued Seybouse. Les terrasses sont constituées d'alluvions qui recèlent des potentialités hydriques importantes. Elles sont alimentées en partie par l'aquifère des travertins situé à leur amont. L'aquifère est drainé par l'Oued Seybouse, qui sillonne le bassin d'Ouest en Est.

L'aquifère néritique est constitué essentiellement par des formations calcaires bio-détritiques ou micritiques et calcaro-dolomitiques du Sénonien supérieur, susceptibles d'être aquifères. Le néritique du secteur d'étude recèle une karstification très intéressante (située à des profondeurs variables entre 50 et 350 m) du point de vue étude et exploitation du système. Il est exploité à ce jour par une dizaine de forages totalisant un débit de 357 l/s, soit 11,25 Hm<sup>3</sup>/an. L'écoulement général de l'ouest vers l'est a été mis en évidence par un rabattement significatif au niveau de la source romaine et du forage N2 de Hammam Bredaa (situés à l'Est) suite à la mise en service des deux forages Bouzitoune 1 et 2 situés à deux kilomètres à l'ouest.

L'aquifère de Ras El Agba-Sellaoua Announa est constitué de deux unités géologiques différentes :

- L'unité géologique appartenant à la nappe tellienne d'âge éocène qui renferme des niveaux aquifères importants matérialisés par de nombreuses émergences à la base de la barre calcaire yprésienne.

Les trois forages de reconnaissance et d'exploitation réalisés à Ain Brinis, ont permis de distinguer de haut en bas l'alternance (1) des marnes grises d'âge Lutétien, (2) des calcaires massifs d'âge yprésien et (3) des marnes à débris d'âge Paléocène.

- L'unité géologique appartenant aux Sellaoua : les sources sortant de ces calcaires sont plus importantes que celles de l'unité tellienne, les principales sont Ain Beida et A. Karma (Sellaoua Announa).

Les écoulements s'effectuent suivant des directions différentes selon le niveau d'eau dans les forages et leur localisation. Dans le flanc nord (unité Sellaoua), ils s'effectuent vers l'Oued Cherf (affluent sud de l'Oued Seybouse) et dans le flanc ouest (unité tellienne) ils s'effectuent vers l'Oued Bouhamdane (affluent ouest de l'Oued Seybouse).

Dans l'aquifère des formations carbonatées de la région de Bouhachana–Ain Larbi, les formations calcaires affleurent par endroits notamment sur la rive droite d'Oued Halia (Bouhachana) et constituent la continuité des séries de Sellaoua Announa. Dans l'aquifère des calcaires yprésiens de Bouhachana-Ain Larbi, les neuf forages exploités totalisent un débit de 143 l/s soit 4,5 Hm<sup>3</sup>/an. Les logs stratigraphiques des forages indiquent la présence de zones fissurées et karstifiée entre 70 et 100 m de profondeur en moyenne, d'après les pertes et absence de remontée des cuttings durant la réalisation des forages. Ces formations carbonatées constituent un aquifère important. D'après les niveaux d'eau enregistrés dans les différents forages réalisés les écoulements souterrains se font vers le nord, en direction de l'Oued Seybouse.

## **Chapitre V**

# **CARACTÉRISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DES EAUX SOUTERRAINES**

## V. Caractéristiques physico-chimiques des eaux souterraines

### V.1. Généralités hydrogéochimiques

L'eau de pluie fraîchement tombée possède une certaine réactivité. Elle est le principal facteur d'altération des sols et des roches en climat tempéré chimique (Guillaume P. et al, 2005). D'autre part, les roches sont composées de différents types de minéraux plus ou moins "altérables". Les éléments chimiques libérés sont spécifiques de la composition minéralogique des roches traversées, les ions majoritairement présents dans une eau reflètent les roches rencontrées (Tardy, 1980 ; M-Solange, 2009). L'altération des roches produit une lente destruction chimique des minéraux et entraîne des matières dissoutes dans les eaux souterraines et dans les rivières (Glynn and Plummer, 2005). Au cours de son parcours souterrain, l'eau acquiert progressivement une charge en éléments dissous selon des concentrations croissantes, jusqu'à atteindre un état d'équilibre qui caractérise son "faciès" (Shoeller, 1941 ; Detay, 1993, 1997).

La nature du sol détermine la composition chimique des eaux souterraines (Noiriel, 2005). L'eau est constamment en contact avec la roche sur laquelle elle stagne ou circule, ainsi l'équilibre se développe entre la composition de la roche et celle de l'eau.

Bon nombre d'études visent à mieux comprendre les processus de transfert d'eau et solutés dans les milieux poreux (Oostrom *et al.*, 1992 ; Bragan *et al.*, 1997 ; Pandey *et al.*, 1997 ; Silliman *et al.*, 2002 ; Schmalz *et al.*, 2003 ; Danquigny *et al.*, 2004). Les principales caractéristiques des eaux souterraines sont : une turbidité faible, une température et une composition chimique constantes et, absence presque totale d'oxygène. Les eaux souterraines peuvent avoir de grandes variations de composition avec l'apparition de pôles dominants.

#### **Facteurs d'agressivité de l'eau vis à vis des roches rencontrées :**

##### **- Facteurs endogènes**

L'agressivité chimique de l'eau dépend de : sa température, son pH, sa charge en éléments dissous, temps de contact eau/roche (notion de temps de renouvellement de l'eau dans le réservoir aquifère par les apports d'eau météorique).

##### **- Facteurs exogènes**

Type d'aquifère : nappe libre ou captive, superficielle ou profonde ;

Par définition, les nappes dites "libres" sont en équilibre avec l'atmosphère et présentent des teneurs en oxygène dissous de l'ordre de 5 à 10 mg/l. Les nappes dites "captives" présentent un déficit en oxygène dissous, celui-ci étant consommé par l'oxydation de la matière organique ou des sulfures présents dans l'aquifère et n'est pas renouvelé (faute de contact avec l'atmosphère via la zone non saturée).

De même, la teneur des eaux en oxygène dissous est également influencée par la profondeur de la nappe. La limite entre aquifères profonds et peu profonds se situe approximativement à 30-40 m par rapport à la surface. Les conditions de pression et de température varient proportionnellement avec la profondeur de la nappe et influencent cette teneur.

### V.2. Méthodologie de travail

L'étude géochimique que nous entreprenons, a pour objectif :

- De caractériser à l'échelle régionale les eaux sur la base de l'hydrofaciès : cela apporte des informations précieuses sur l'identification des unités aquifères et sur la circulation des eaux souterraines ainsi que sur les conditions de recharge.

- De caractériser à l'échelle locale, les eaux sur la base de leur potabilité et des problèmes pratiques que certains paramètres hydrochimiques donnent sur chaque point d'eau (dureté, nature corrosive et agressive de l'eau), afin de déterminer le type de matériaux à choisir pour les installations d'exploitation.

L'étude de la chimie des eaux souterraines est une méthode de prospection hydrogéologique qui permet la caractérisation des aquifères. En effet, la composition chimique des eaux souterraines dépend en grande partie du type de roche encaissante, des évolutions hydrodynamiques des écoulements de la nappe, de la profondeur de la circulation et de la zone climatique. La base de l'étude hydrochimique est la classification des eaux souterraines en faciès hydrochimiques.

### Méthodes d'analyses

Les prélèvements de trente points d'eau (29 sources et un forage) ont été effectués dans des bouteilles en polyéthylène, pendant les hautes eaux (mai / 2009) et les basses eaux (août / 2009). Au total, soixante échantillons ont été prélevés.

Les mesures "in situ" ont concerné cinq paramètres physiques ( $T^\circ$ , pH, Eh, conductivité, Oxygène dissous) à l'aide d'un appareil multiparamètres wtw, le titre hydrotimétrique a été déterminé à l'aide de formules empiriques.

Une analyse complète des éléments chimiques de soixante échantillons a été effectuée au niveau du laboratoire de chimie de l'université de Guelma : les éléments ciblés sont ceux naturellement présents dans les eaux souterraines : ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ) pour les cations, ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ), pour les anions, le cycle de l'azote ( $\text{NO}_3^-$ ), les éléments mineurs en traces ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) et les éléments métalliques en traces ( $\text{Fe}$  (total),  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ).

Beaucoup d'études récentes (Chiodini et al, 1995 ; Gemici et al, 2002 ; Gumudsson et Arnorsson, 2002 et Gokgoz et Tarcan, 2006 ; in Thiebaud, 2008 ; Fedrigoni et al., 2001) se sont basées sur les analyses de ces paramètres pour la mise en évidence de l'interaction eau-roche. Ces analyses permettent de définir les faciès des eaux à l'aide de diverses représentations graphiques (Piper, Schoeller Berckaloff et Stiff). Les données sont traitées à l'aide d'analyses statistiques telles que l'Analyse en Composante Principale. Les indices de saturation (IS) sont calculés à l'aide de logiciels spécifiques (Phreeq, Netpath,...).

Pour la présente étude nous avons préconisé la même approche pour le traitement et l'interprétation des différents résultats.

Les méthodes d'analyses utilisées sont tirées de Rodier, (2009) :

- Les ions calcium et magnésium sont déterminés par complexométrie par titrage avec le sel disodique de l'EDTA (Ethylen Diamine tétra-acétique).
- La dureté calcique est déduite de la dureté totale et magnésienne.
- L'alcalinité : la mesure de l'alcalinité est basée sur la neutralisation d'un certain volume de l'échantillon par l'acide sulfurique ( $\text{H}_2\text{SO}_4$  N/50).
- Les chlorures sont déterminés par la méthode de Mohr (Argentimétrie).
- Les sulfates sont déterminés par précipitation par le chlorure de baryum. C'est la mesure turbidimétrique sur le trouble obtenu à  $\lambda = 435$  nm à l'aide d'un spectromètre du type : SE 120. KARL KOLB.
- Les nitrates sont obtenus par méthode de réduction au cadmium. La lecture est automatique sur appareil auto-analyseur de type SKALAR à  $\lambda = 540$  nm.
- Le sodium et le potassium sont déterminés par spectrophotomètre à émission de flamme sur appareil de type : JENWAY.PFP7.
- Fe,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ , par spectrophotomètre visible, NV202. Ret. RG232. Etuve Binder, balance analytique: 0,1 mg Sartorius, agitateur magnétique : agimatique,
- $\text{Al}^{3+}$ , par volumétrie inverse.
- L'analyse statistique (ACP) des données obtenues a été effectuée par le logiciel SPAD 5.5.

### Application de l'Analyse en Composantes Principales (ACP)

L'ACP est une méthode statistique multidimensionnelle descriptive, utilisable comme outil d'aide à l'interprétation d'une matrice de données (Hotelling, 1933, *In* : Nagabhsushan et Kumar, 2007; Husson et al., 2010). La matrice des données physico-chimiques comporte (m) analyses (ou éléments mesurés). Cette méthode, en cherchant les directions préférentielles d'allongement d'un nuage de points sur ces directions préférentielles (axes factoriels) lesquelles, sont des combinaisons linéaires des variables de départ. Chaque variable contribuant au facteur intervient avec un coefficient appelé vecteur propre. Pour l'analyse des teneurs chimiques, dont les gammes de variations peuvent être disparates, il convient de dépendérer ces variables en les centrant et en les réduisant. Les teneurs sont ainsi centrées sur une moyenne nulle et divisées par l'écart type. La variance apportée par chacune des variables est dès lors égale à 1 et donc l'inertie (variance) totale du nuage de points égale à (1xn) variables sur (m) individus. Le premier axe factoriel est celui qui explique le plus grand pourcentage de cette variance totale, le second explique ensuite le plus grand pourcentage de variance résiduelle.

### V.3. Présentation des résultats

Les résultats d'analyses en hautes eaux (mai /2009) et en basses eaux (aout /2009) de chaque point d'eau sont comparés aux normes de potabilité (O.M.S et algériennes).

La réglementation OMS :

- L'Organisation Mondiale de la Santé (OMS, 2005) fixe, via des recommandations, un cadre pour la sécurité sanitaire des eaux (valeurs guides, valeurs limites et valeurs indicatives).
- Selon les normes algériennes, conformément au décret exécutif n° :11-125 du 22 mars 2011 correspondant au 17 Rabie Ethani1432, relatif à la qualité de l'eau de consommation humaine, une valeur guide est une estimation de la concentration d'une substance dans l'eau de boisson qui ne présente aucun risque pour la santé d'une personne qui consommerait cette eau toute sa vie, une valeur limite est une maximale fixée pour certains paramètres chimiques, radionucléides et microbiologiques et dont le dépassement constitue un danger potentiel pour la santé des personnes.

Les valeurs indicatives : valeurs de référence fixées pour certains paramètres organoleptiques et physico-chimiques à des fins de contrôle du fonctionnement des installations de production, de traitement et de distribution d'eau et d'évaluation des risques pour la santé des personnes.

Dans la présente étude, on a jugé plus explicite de traiter les paramètres physico-chimiques des eaux de chaque unité géologique qui peut être localisée ou répartie dans l'espace géographique et qui peut contenir un point d'eau ou plus.

### V.4. Situation des sources dans leur cadre lithologique

Dans le cadre de ce travail, trente points d'eau ont été sélectionnés dans la zone d'étude (cf., fig. 13), regroupés selon leur appartenance lithologique. Ci-après, une description sommaire des domaines considérés et des formations lithologiques dans lesquelles émergent lesdits points d'eau.

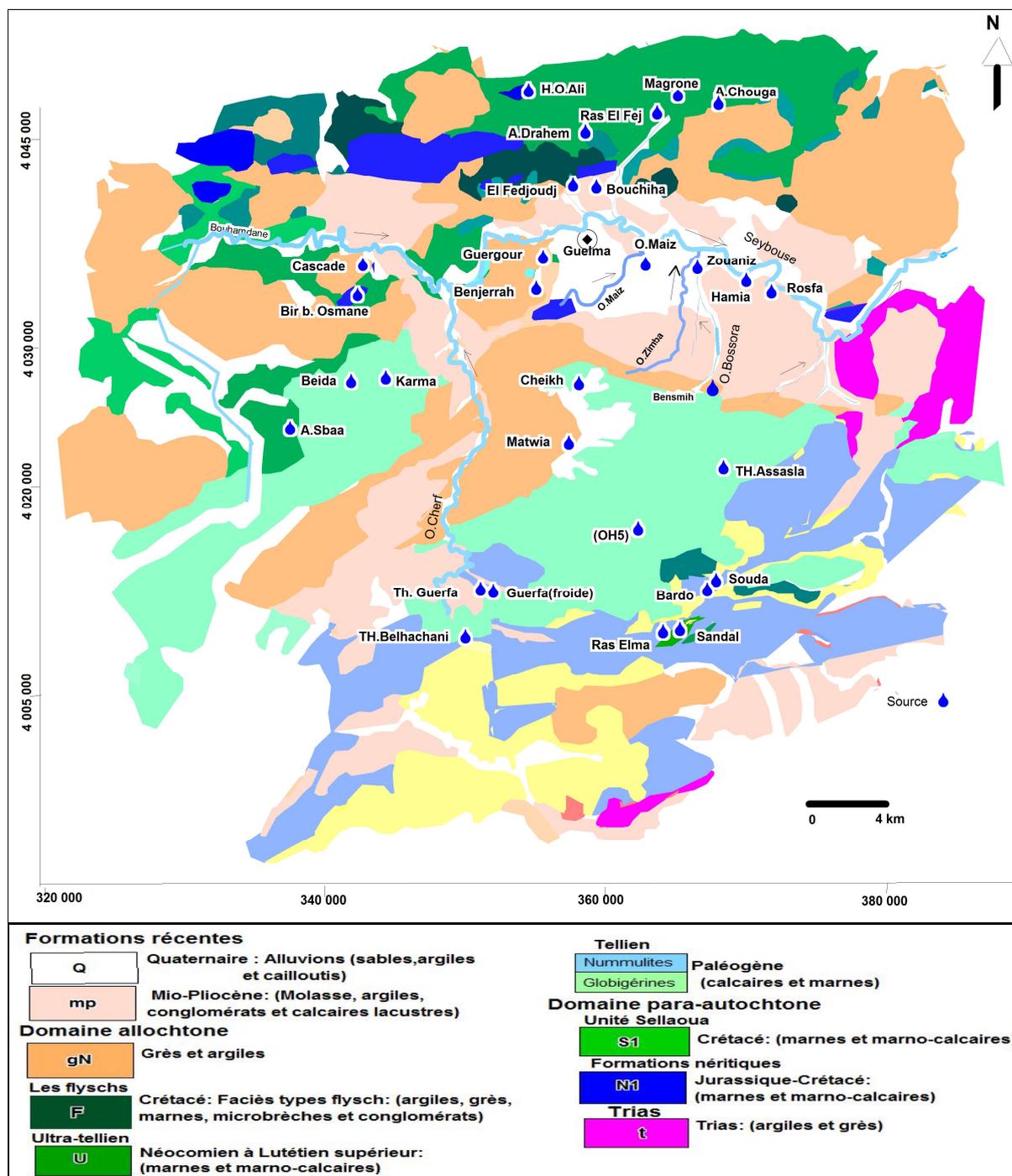
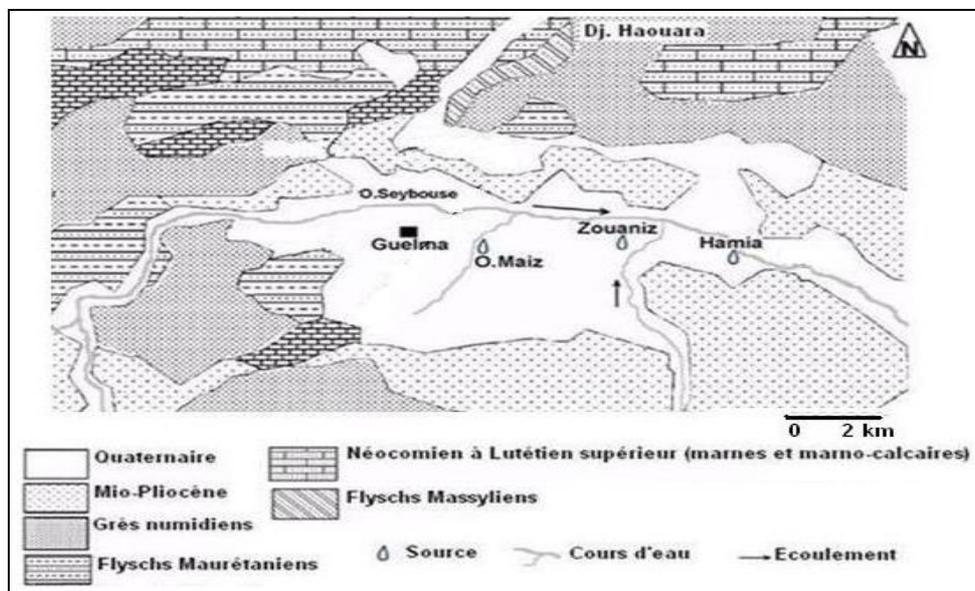


Figure 13. Situation des sources dans leur cadre lithologique (Vila, 1980 ; modifiée)

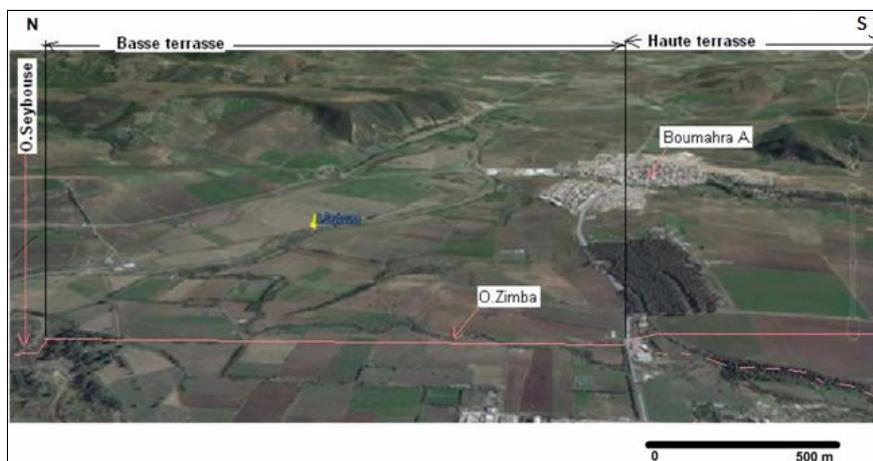
On distingue trois domaines principaux dans la zone d'étude : 1- Les formations récentes (domaine post-nappes), 2- le domaine allochtone et, 3- le domaine para-autochtone

#### V.4.1. Les formations récentes (domaine post-nappes):

**V.4.1.1. Les alluvions quaternaires ;** Ils sont représentés par des sables, des argiles et des cailloutis (cf., fig. 14). Les sources O. Maiz, Ain Zouaniz et Ain Hamia disposées en lignes émergent sur la rive droite de l'O. Seybouse à la limite de la haute terrasse avec la terrasse actuelle (cf., fig. 15).

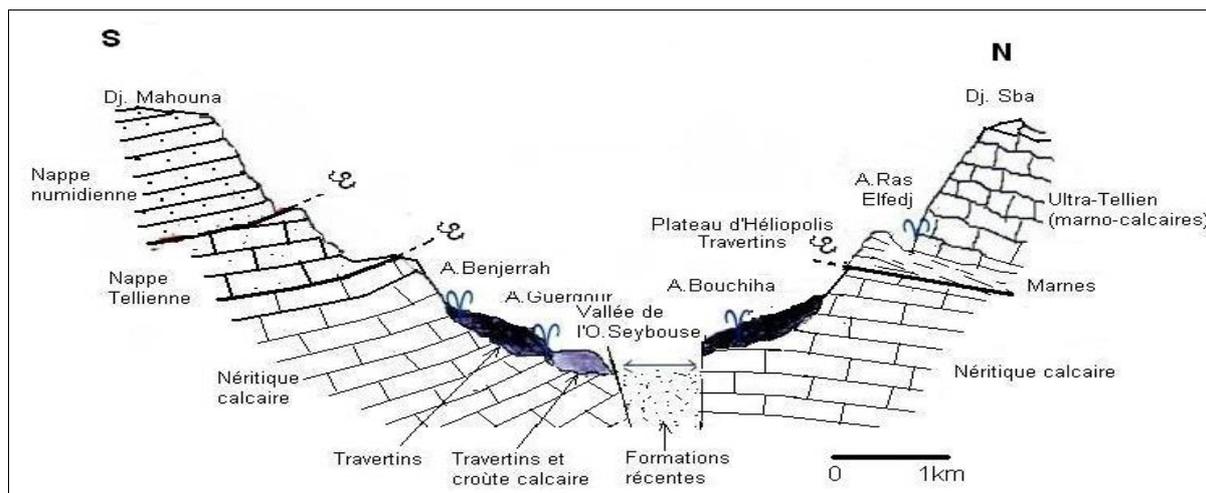


**Figure 14.** Les alluvions quaternaires de Guelma



**Figure 15.** Photo satellite montrant les terrasses au niveau de la plaine de Guelma.

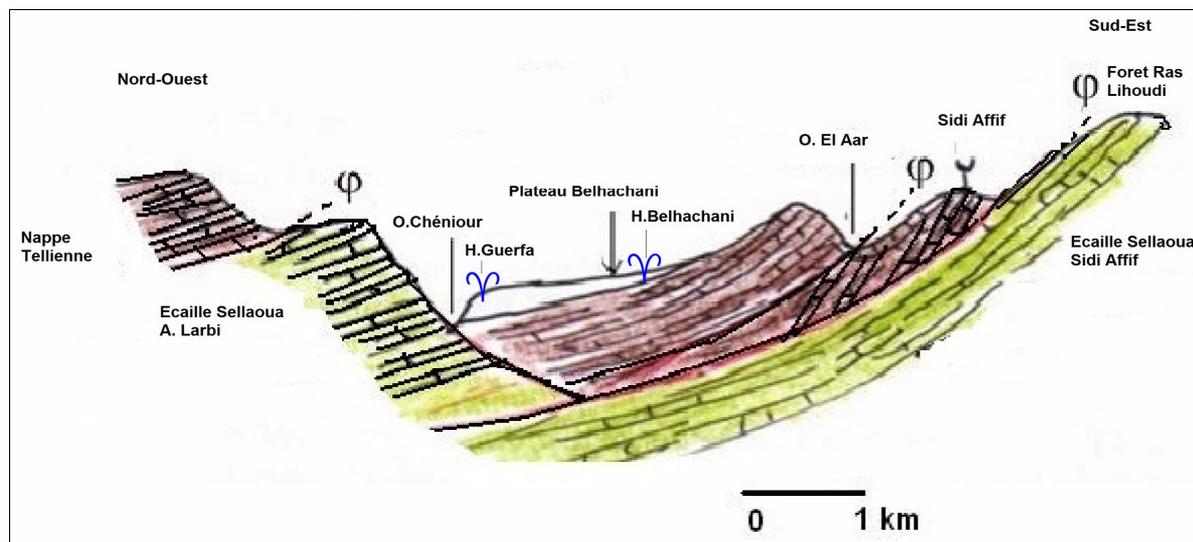
**V.4.1.2. Les Travertins Mio-Pliocène du bassin de Guelma ;** Les sources Ain Guergour, Ain Benjerrah, Ain Bouchiha émergent au contact des travertins avec les argiles.



**Figure 16.** Coupe schématique (S-N) depuis Dj. Mahouna jusqu'à Dj. Sbaa

#### V.4.1.3. Les travertins Mio-Pliocène du bassin d'Ain Makhlouf (cf., fig. 17)

Ce sont des calcaires lacustres qui reposent sur des argiles rouges et noires bitumineuses visibles suite à des travaux d'aménagement pour l'exploitation de la source chaude (65 °C) et gazeuse de Hammam Belhachani. Dans le même sens d'écoulement de ce plateau de travertins (S-N), émergent ; la source chaude Hammam Guerfa (57 °C) et la source froide Ain Guerfa située à 400 m à l'est.



**Figure 17.** Coupe schématique (N-S) traversant le plateau de Hammam Belhachani dans le bassin d'Ain Makhlouf.

**V.4.1.4. Les calcaires lacustres (Mio-Pliocène) :** Ils sont représentés par la source Rosfa qui émerge dans les calcaires lacustres et les argiles rouges.

#### V.4.2. Le domaine allochtone :

**V.4.2.1. Les formations numidiennes (Oligo-Miocène inférieur) :** Elles sont représentées par des grès d'âge Aquitaniens au sommet qui reposent sur des argiles d'âge Oligocène. Les sources Ain Bensmih et Ain Matouia émergent au contact argile-grès.

**V.4.2.2. Les formations Ultra-telliennes :** Elles sont représentées par les marnes et marno-calcaires d'âge allant du Barrémien au Lutétien. Les sources Ain Drahem Ras El Fedj, Ain Magrone, Ain Choga, et Ain El Fedjoudj émergent au contact des marno-calcaires avec les marnes.

**V.4.2.3. Les formations telliennes :** Ce sont des calcaires d'âge yprésien (Eocène). On distingue :

**V.4.2.3.1. Les formations telliennes à Globigérines ;** (Paléogène) où émergent les sources Ain Beida, Ain Karma, Ain Cheikh, la source chaude Ain Assasla et le forage O. Halia (OH5).

**V.4.2.3.2. Les formations telliennes à Nummulites** (Paléogène) où émergent les sources Ain Souda, Ain Bardo et Ras El Ma.

#### **V.4.3. Le domaine para-autochtone**

**V.4.3.1. Les formations Sellaoua :** Elles sont représentées par les marno-calcaires du Crétacé supérieur et dans lesquels émergent les sources Ain Sbaa et Ain Sandal.

**V.4.3.2. Les formations néritiques :** Elles sont représentées par les calcaires (Jurassique–Crétacé) dans lesquels émergent les sources chaudes Hammam Meskhoutine, Hammam O. Ali et les eaux froides de Bir Ben Osmane.

## V.5. Discussion et interprétation des résultats

L'interprétation des résultats est abordée par source ou groupement de sources appartenant à la même formation géologique. C'est une approche qui permet la mise en évidence de l'interaction eau-roche et met en exergue l'empreinte de l'encaissant ou le parcours de l'eau depuis la zone de recharge jusqu'à l'émergence.

### V.5.1. Les formations récentes (domaine Post-nappes)

#### V.5.1.1. L'aquifère alluvionnaire de Guelma

##### V.5.1.1.1. Paramètres physiques (cf., tab. 17)

La température ( $T$  °C) de l'eau qui émerge est une des caractéristiques d'une source. Elle régit la presque totalité des réactions physiques, chimiques et biologiques (Chapman et al., 1996, *in* : Derwich E. et al, 2010).

L'aquifère alluvionnaire est un aquifère libre dans sa totalité même s'il se comporte en aquifère captif par endroits limités, compte tenu de la présence des lentilles argileuses en intercalation (cf., fig. 14), (Sogréah, 2005).

En hautes eaux, la température des eaux souterraines varie entre 17 et 19,5 °C, avec une moyenne de 18,16 °C et un écart type de 1,258 °C. En basses eaux, elle est légèrement en hausse et varie entre 19 et 20 °C, avec une moyenne de 19,43°C et un écart type de 0,513 °C. Dans les deux périodes elle est proche de la température ambiante, parce que le niveau d'eau dans l'aquifère est soumis à l'influence de la pression atmosphérique, ce qui engendre un équilibre thermique.

Le potentiel d'Hydrogène (pH) : Les valeurs du pH se situent dans la gamme de 6 et 8,5 dans les eaux naturelles (Chapman et al, 1996). Il diminue en présence des teneurs élevées en matière organique et augmente en période d'étiage, lorsque l'évaporation est importante (Meybeck et al., 1996, *In* : Derwich E. et al., 2010).

Les valeurs de pH des eaux souterraines de l'aquifère alluvionnaire varient entre 8,8 et 10,7 avec une moyenne de 9,6 et un écart type de 0,985, donnant ainsi un caractère alcalin aux eaux souterraines en période de hautes eaux, en revanche, en période de basses eaux, ces valeurs oscillent entre 7,1 et 7,3 avec une moyenne de 7,2 et un écart type de 0,1, ce qui attribue aux eaux un caractère proche de la neutralité.

Ces résultats permettent de conclure que les quantités en ions  $\text{OH}^-$  sont relativement supérieures aux ions  $\text{H}^+$  notamment en hautes eaux, suite à la mise en solution des éléments évaporitiques (Ca, Na, Cl et  $\text{SO}_4$ ) présents dans les formations aquifères (marnes gypsifères, lentilles argileuses et travertins).

Le potentiel d'oxydoréduction (Eh) : Ce paramètre permet de prévoir l'état des ions chimiques dans l'eau et la direction des réactions chimiques (oxydation ou réduction). Son effet apparaît surtout sur l'évolution des éléments chimiques sensibles aux variations du Eh, par l'apparition ou la disparition de certains éléments chimiques (oxydation : à l'amont ou dans la zone non saturée à caractère libre, réduction : à l'aval ou dans la zone saturée à caractère captif).

Les eaux de l'aquifère alluvionnaire sont marquées par une grande variation de l'Eh (-135 et -10) mv, avec un écart type de 71,60 mv et une moyenne de (- 52,3) mv en hautes eaux et, un écart type de 58,055 mv et une moyenne de (-118,67) mv en basses eaux, ce qui montre que ce paramètre est très lié à l'effet d'oxygénation par les eaux de pluies (Debbieche, 2002) en période de hautes eaux.

L'oxygène dissous (O.D) : La quantité d'oxygène en solution dans une eau régit les réactions d'oxydoréduction et présente une évolution identique à celle du Eh (Joseph O, 1991-1994).

Les valeurs de l'oxygène dissous des eaux souterraines des alluvions varient entre 1,82 et 3,16 mg/l, avec une moyenne de 2,7 mg/l et un écart type de 0,7624 mg/l, en période de hautes eaux. Cet apport en oxygène est fourni par les eaux de pluie.

En période de basses eaux, les concentrations en oxygène dissous oscillent entre 0,8 et 2,7 mg/l, avec une moyenne de 2,016 mg/l et un écart type de 1,056 mg/l. Les teneurs en oxygènes dissous les plus élevées sont enregistrées en hautes eaux, par apport des eaux de pluie. La conductivité électrique (C.E en  $\mu\text{s/cm}$ ) : durant les deux campagnes d'analyses, les valeurs des conductivités présentent des déviations considérables par rapport à la norme de 1500  $\mu\text{s/cm}$  corrigée à 25°C, avec un écart type de 464,3  $\mu\text{s/cm}$  en hautes eaux et 501,1  $\mu\text{s/cm}$  en basses eaux. Mais en période de basses eaux, les valeurs de la conductivité (1163-2160)  $\mu\text{s/cm}$  sont relativement supérieures à celles enregistrées en hautes eaux (1092-2020)  $\mu\text{s/cm}$ . Cette augmentation serait due à la concentration en sels par évapotranspiration en cette période de chaleur d'une part et, aux lessivages des fertilisants et des formations lithologiques par les eaux d'irrigation d'autre part, le sol étant un périmètre irrigué à activité agricole intense.

D'après le tableau 17, les grandes valeurs de la conductivité sont observées à l'aval de l'aquifère, dans le sens de l'écoulement. Les variations des concentrations de la conductivité d'un point à l'autre témoignent d'une distribution spatiale dans l'aquifère et d'un bon drainage (Bakalowicz, 1996 ; Raëisi, 1997).

La dureté totale ou degré hydrotimétrique (TH F°) : les eaux souterraines de l'aquifère alluvionnaire de Guelma comparées aux normes (O.M.S, 2005) de classifications illustrées dans le tableau 18, sont des eaux douces, que ce soit en hautes eaux ou en basses eaux. Les valeurs les plus élevées sont inférieures à 18 °F. Cependant, on constate une augmentation progressive de la dureté totale des eaux vers l'aval, à l'Est de l'aquifère (Zouaniz, Hamia) en période de hautes eaux, ce qui traduit une mise en solution des ions calcium et magnésium à partir des travertins situés à l'amont et du substratum marneux gypsifère.

D'une manière générale, les eaux étudiées peuvent être classées comme eaux douces d'où leur utilisation pour la consommation humaine.

**Tableau 17.** Paramètres physiques des eaux souterraines des alluvions quaternaires du bassin de Guelma (mai-aout/2009)

Période	Hautes eaux						Basses eaux					
	C.E ( $\mu\text{s/cm}$ )	pH	Eh (mv)	T (°C)	O.D (mg/l)	TH (°F)	C.E ( $\mu\text{s/cm}$ )	pH	Eh (mv)	T (°C)	O.D (mg/l)	TH (°F)
O.Maiz	1092	10,7	-135	17	1,82	17,5	1163	7,2	-184	19,3	0,8	12,25
A.Zouaniz	1585	8,8	-12	18	3,12	10,41	1750	7,3	-73	19	2,7	13,5
A.Hamia	2020	9,3	-10	19,5	3,16	9,83	2160	7,1	-99	20	2,55	6,95
Min	1092	8,8	-135	17	1,82	9,83	1163	7,1	-184	19	0,8	6,95
Max	2020	10,7	-10	19,5	3,16	17,5	2160	7,3	-73	20	2,7	13,5
Moy.	1566	9,6	-52,3	18,17	2,7	12,58	1691	7,2	-118,67	19,43	2,016	10,9
Ecart type	464,3	0,985	71,6	1,258	0,76	4,27	501,1	0,1	58,055	0,513	1,0563	3,477
<b>Norme</b>	<b>1500</b>	<b>6,5-9,5</b>	<b>/</b>	<b>25</b>	<b>5 &lt;</b>	<b>&lt; 18</b>	<b>1500</b>	<b>6,5-9,5</b>	<b>/</b>	<b>25</b>	<b>5 &lt;</b>	<b>&lt; 18</b>

**Tableau 18.** Classification des eaux d'après leur dureté (O.M.S, 2005).

Degré hydrotimétrique En F°	Dureté de l'eau
Inférieur à 18	Douce
Compris entre 18 et 25	Peu dure
Compris entre 25 et 35	Dure
Supérieur à 35	Très dure

### V.5.1.1.2. Paramètres chimiques des eaux souterraines des alluvions du bassin de Guelma

Les réactions majeurs reconnues comme responsables d'enrichissement ou d'appauvrissement des éléments dans les eaux souterraines sont l'échange  $\text{Ca}^{2+} - \text{Mg}^{2+}$  dû à l'interaction eau-roches carbonatées, l'échange de base  $\text{Na}^+ - \text{Ca}^{2+}$  ou  $\text{Na}^+ - \text{Mg}^{2+}$ , la réduction ou la dissolution des sulfates (Fidelibus et Tulipano, 1996).

#### V.5.1.1.2.1. Teneurs en cations (mg/l) (mai-aout/2009), (cf., tab. 19).

**Tableau 19.** Teneurs en cations (mg/l) des eaux souterraines des alluvions du bassin de Guelma (mai-aout/2009).

Période	Hautes eaux				Basses eaux			
	$\text{Ca}^{++}$	$\text{Mg}^{++}$	$\text{K}^+$	$\text{Na}^+$	$\text{Ca}^{++}$	$\text{Mg}^{++}$	$\text{K}^+$	$\text{Na}^+$
O.Maiz	130	40	3	65	133	36	2	156
A.Zouaniz	150	35	2.2	60	150	72	4	60
A.Hamia	200	90	5	126	120	75	3	90
Min	130	35	2,2	60	120	36	2	60
Max	200	90	5	126	133	75	4	156
Moy.	176,67	71,66	5	104	134,33	61	3	102
Ecart type	35,642	28,0046	1,442	33,61	15,044	21,703	1	49,112
<b>Norme</b>	<b>100</b>	<b>50</b>	<b>12</b>	<b>200</b>	<b>100</b>	<b>50</b>	<b>12</b>	<b>200</b>

Le calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) est l'un des éléments majoritaires des roches carbonatées calcaires [ $\text{CaCO}_3$ ], dolomies [ $\text{Ca,Mg}(\text{CO}_3)_2$ ] et craies [ $\text{CaCO}_3$ ]. Il est également abondant dans d'autres types de roches sédimentaires telles que le Gypse [ $\text{CaSO}_4, 2(\text{H}_2\text{O})$ ] ou l'anhydrite [ $\text{CaSO}_4$ ], ainsi que dans certaines roches magmatiques.

Dans les aquifères carbonatés, les teneurs en calcium sont de l'ordre de la centaine de mg/l. Dans les aquifères gypsifères, les concentrations en  $\text{Ca}^{2+}$  peuvent atteindre plusieurs centaines de mg/l.



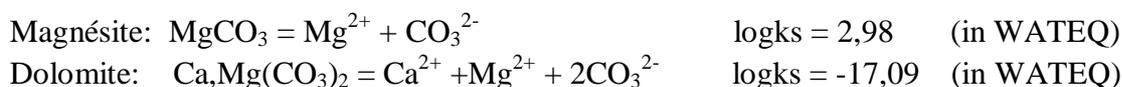
Dans les roches magmatiques, les concentrations sont généralement plus faibles, de quelques mg/l à quelques dizaines de mg/l.

Dans l'aquifère alluvionnaire de Guelma les teneurs en calcium (cf, tab. 19), sont d'une manière générale inférieures ou égales à la norme de potabilité. En hautes eaux, elles varient entre 130 et 200 mg/l, avec une moyenne de 176,67 mg/l et un écart type de 35,642 mg/l.

En basses eaux les teneurs varient entre 120 et 150 mg/l, avec une moyenne de 134,3 mg/l et un écart type de 15,04 mg/l. On remarque que les teneurs en calcium sont plus élevées en hautes eaux et présentent des variations plus significatives qu'en basses eaux. D'après la figure 11, l'écoulement se fait depuis l'aquifère des travertins vers celui des alluvions. L'ion  $\text{Ca}^{2+}$  proviendrait de deux origines naturelles différentes qui sont : la dissolution des formations travertineuses situées à l'amont de l'aquifère des alluvions et la dissolution des formations gypseuses constituant le substratum.

Le magnésium ( $\text{Mg}^{2+}$ ) : D'un point de vue chimique, le magnésium s'apparente au calcium (Bakalowicz, 1996 ; Batiot, 2002). Il est donc souvent présent dans les roches carbonatées (calcaires dolomitiques, dolomies), les roches évaporitiques (sels de magnésium

[MgSO<sub>4</sub>]) et les roches magmatiques. Les minéraux magnésiens sont moins solubles que les minéraux contenant du calcium. Dans les roches carbonatées magnésiennes (dolomies), les concentrations en Mg<sup>2+</sup> sont de l'ordre de quelques dizaines de mg/l. Les aquifères évaporitiques riches en minéraux magnésiens peuvent contenir de fortes teneurs en magnésium, de quelques centaines de mg/l à quelques g/l.



D'après les valeurs consignées dans le tableau 19, l'écart type (28,004 mg/l) indique une variabilité très significative des teneurs en magnésium, en période de hautes eaux. Les valeurs varient de 35 mg/l à Ain Zouaniz et à 90 mg/l à Ain Hamia) avec une moyenne de 50 mg/l. Les teneurs en basses eaux varient entre 36 mg/l à O. Maiz et 75 mg/l à Ain Hamia avec une moyenne de 60 mg/l.

Ces variations d'une période à l'autre indiquent une mise en solution du magnésium par lessivage des travertins d'abord (amont), puis des marnes gypsifères (Batiot, 2002) et transfert du front de concentration progressive dans le sens des écoulements en période de hautes eaux.

Le sodium (Na<sup>+</sup>) et chlorure (Cl<sup>-</sup>) : ce sont des éléments conservatifs (le chlorure plus que le sodium), ils ne subissent pas de changements chimiques et d'apports secondaires excepté dans les aquifères évaporitiques.



Le sodium est essentiellement présent dans les roches magmatiques. Dans les roches sédimentaires, il est moins abondant mais les minéraux auxquels il s'incorpore peuvent être très solubles (halite [NaCl] par exemple).

D'après les teneurs en Na<sup>+</sup> consignées dans le tableau 19, les concentrations varient entre 60 et 126 mg/l en hautes eaux avec une moyenne de 104 mg/l et un écart type de 33,61 mg/l). En période de basses eaux, elles oscillent entre 60 et 156 mg/l, avec une moyenne 102 mg/l et un écart type de 49,112 mg/l.

On constate une légère augmentation des concentrations en période de basses eaux, due à une évapotranspiration. Les marnes miocènes gypsifères, qui constituent le substratum sont également à l'origine des concentrations élevées en ions sodium et ceci par des phénomènes de lessivage, d'évaporation et par échange de base, (Schoeller, 1962). L'écoulement a favorisé l'acquisition de ces teneurs, car les eaux souterraines qui s'écoulent suivant la direction S-N, se chargent progressivement au fur et à mesure que l'on se déplace vers l'aval. Ceci explique les fortes concentrations, qui atteignent les 156 mg/l enregistrées au niveau de la source d'O. Maiz.

Le potassium (K<sup>+</sup>) : Malgré son abondance dans certaines roches magmatiques et certaines roches sédimentaires (argiles, grés), le potassium est généralement peu concentré dans les eaux souterraines. Les concentrations ne dépassent généralement pas 10 mg/l. De plus fortes teneurs peuvent cependant être observées dans des eaux ayant traversées des formations évaporitiques riches en sylvite [KCl]. Il résulte également de l'altération des argiles potassiques et de la dissolution des engrais chimiques (NPK) qui sont utilisés par les agriculteurs et au déversement des eaux usées domestiques des riverains.

D'après les valeurs consignées dans le tableau 19, les teneurs en K<sup>+</sup> seraient d'origine naturelle et on assiste à une augmentation progressive de la concentration en K<sup>+</sup> en période de hautes eaux, enregistrée surtout au niveau de la source Ain Hamia (5 mg/l). Cette teneur élevée proviendrait sans nul doute des engrais et fertilisants utilisés dans cette zone à vocation agricole.

Le potassium et le sodium des argiles peuvent être échangés contre le calcium et le magnésium de l'eau selon la formule de l'indice d'échanges de base (I.E.B) défini par H. Schoeller, (1934).

$$I.E.B = \frac{rCl - (rNa + rK)}{rCl}$$

Cet indice définit le sens d'échanges ioniques entre l'eau et les terrains encaissants :

Si ;

- I.E.B = 0 pas d'échanges

- I.E.B < 0, Ca<sup>++</sup> et Mg<sup>++</sup> de l'eau sont échangés par Na<sup>+</sup> et K<sup>+</sup> du terrain

- I.E.B > 0, Na<sup>+</sup> et K<sup>+</sup> de l'eau sont échangés par Ca<sup>++</sup> et Mg<sup>++</sup> du terrain

Tableau 20. Variations des valeurs de l'indice d'échange de base

IEB	Hautes eaux	basses eaux
O. Maiz	0,17	0,06
A.Zouaniz	0,5	0,46
A. Hamia	0,43	0,29

Dans le tableau 20, les valeurs de l'indice d'échange de base sont positives pendant les deux périodes. Ce qui veut dire que les ions Na<sup>+</sup> et K<sup>+</sup> de l'eau sont échangés par Ca<sup>++</sup> et Mg<sup>++</sup> du terrain et que les teneurs en Ca<sup>++</sup> et Mg<sup>++</sup> sont relativement en excès par rapport aux teneurs en N<sup>+</sup> et K<sup>+</sup>. La dissolution des minéraux contenus dans l'encaissant a donc contribué à la teneur en ions calcium et magnésium de l'eau.

#### V.5.1.1.2.2. Teneurs en anions (mg/l) (mai-aout/2009) (cf., tab. 21).

Les bicarbonates (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) : Les ions bicarbonates se forment à partir de la dissolution des minéraux carbonatés par des eaux météoriques qui se chargent en CO<sub>2</sub>, lors de leur percolation à travers le sol. Dans les aquifères carbonatés, les teneurs en bicarbonates sont de quelques centaines de mg/l. Certaines eaux minérales drainant des roches magmatiques présentent des teneurs encore plus élevées (quelques mg/l), sous l'influence de CO<sub>2</sub> d'origine profonde ou liée à la décomposition de la matière organique des engrais (Stitou et Pulido-Bocsh, 1995 ; In : Hani, 2003). La somme des équations de dissolution est donnée comme suit:



D'après les valeurs du tableau 21, les teneurs en bicarbonates varient entre 335 et 448 mg/l en hautes eaux, avec une moyenne de 410,33 mg/l et un écart type de 57,53 mg/l. En période de basses eaux, elles varient entre 305 et 366 mg/l, avec une moyenne de 333,67 mg/l et un écart type de 30,66 mg/l.

On enregistre une augmentation des teneurs en bicarbonates d'Ouest (O. Maiz et Ain Zouaniz) en Est (Ain Hamia), en période de hautes eaux (sens d'écoulement général dans l'aquifère alluvionnaire). Ce phénomène est dû à une concentration de la composition chimique par mise en solution par lessivage et mélange des eaux provenant de l'aquifère des travertins avec celles des alluvions. Cette augmentation verse dans l'alimentation de l'aquifère alluvionnaire par les travertins.

Les chlorures (Cl<sup>-</sup>) : L'ion chlorure est un élément conservé, ne participe pas aux interactions eau-roche, caractérise l'origine de la salinité des eaux, constitue un traceur de

mélange et reste très mobile (Fidelibus et Tulipano, 1996). C'est un traceur parfait de par sa propriété d'exclusion anionique en raison des phénomènes de répulsion électrostatique au voisinage des particules argileuses (chargées négativement) ; ainsi les anions et en particulier le chlorure (plus rapide que les molécules neutres) vont circuler au centre des pores et conduits où la vitesse de l'eau est plus rapide (Rice et al, 1986 ; James et Rubin, 1986 ; Wieranga et Van Genuchten, 1992 ; Porro et al, 1993a ; Schoen et al, 1999 ; Magesen et al, 2003). Sa présence est due à différents phénomènes. Les sources issues de formations triasiques présentent naturellement de fortes teneurs en chlorures et sont impropres à la consommation humaine. Il en est de même pour des secteurs où d'anciens marais ont été asséchés. Mais le cas le plus couramment rencontré est celui des nappes côtières sur le pourtour méditerranéen où existe un biseau salé (remontée d'eau salée dans la nappe) qui entraîne des contraintes d'exploitation. Ce phénomène naturel peut d'ailleurs être accentué par une exploitation excessive de la nappe. Quelle que soit la lithologie, les teneurs en chlorures sont généralement faibles dans les eaux souterraines.

Dans les aquifères libres, la concentration en chlorures est directement liée à la teneur en chlorures des précipitations. Les concentrations généralement mesurées dans les nappes libres sont de quelques mg/l et dépendent finalement plus de la distance à la côte que de la lithologie. La dissolution d'halite [NaCl] ou bien la présence d'un biseau salé (aquifère côtier) peuvent éventuellement engendrer des teneurs en chlorures élevées (de quelques centaines de mg/l à quelques g/l).

Les chlorures des eaux souterraines de l'aquifère alluvionnaire de Guelma, varient entre 125 et 354 mg/l en période de hautes eaux, avec une moyenne de 277,67 mg/l et un écart type de 116,60 mg/l et entre 180 et 250 mg/l en période de basses eaux, avec une moyenne de 210 mg/l et un écart type de 36,05 mg/l. Ces teneurs relativement élevées peuvent avoir plusieurs origines :

- Les marnes gypsifères formant le substratum du Mio-Plio-Quaternaire;
- le déversement des rejets domestiques des riverains des oueds Maiz, Zimba et Maamora qui sillonnent l'aquifère du sud vers le nord et les rejets industriels de la zone d'activité industrielle située à l'amont de l'aquifère.

On remarque qu'au niveau de la source Ain Hamia, la teneur en chlorures est nettement supérieure à la norme (O.M.S) de potabilité et peut altérer la qualité de l'eau de cette source.

Les nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ) : L'ion nitrate est la forme la plus oxydée de l'azote. Les sources naturelles de nitrate sont principalement les pluies et les interactions avec le sol et la végétation. Les nitrates constituent la forme azotée la plus dominante dans les cours d'eau et dans les nappes d'eau souterraine. Ils proviennent généralement de la décomposition de la matière organique par oxydation bactérienne des nitrites et constituent ainsi l'ultime produit de la nitrification. En milieu naturel, sa concentration dépasse rarement 0,45 mg/l et dépend du temps de transfert et de la nature de la roche (Derradji et al, 2004). On admet généralement qu'une teneur supérieure à 10 mg/l traduit un apport anthropique (lessivage d'engrais, rejets domestiques ou industriels, ...). Des valeurs supérieures indiquent des rejets d'eaux usées dans les milieux aquatiques superficielles et souterraines et, surtout une utilisation excessive de fertilisants utilisés en agriculture, (Chapman et al. 1996).

La structure géologique et hydrogéologique n'entraîne pas pour le bassin de Guelma de contaminations des eaux souterraines, mais la présence de nitrates dans l'aquifère est liée en particulier à certaines activités agricoles de type intensif. Il y a cependant des risques associés à ces pratiques culturales puisque l'utilisation excessive des engrais chimiques et organiques peut entraîner le lessivage de nitrates vers l'eau souterraine (Refsgaard et al. 1999).

Partout dans le monde, des observations et des études indiquent un lien étroit entre l'agriculture intensive et les fortes concentrations en nitrates dans l'eau souterraine (Ayraud,

2005 ; Primeau et Grimard, 1989; Bergström et Jarvis, 1991; Andrews *et al.*, 1997; Lasserre *et al.*, 1999; Sidd, 2003).

L'aquifère alluvionnaire de Guelma fait partie intégrante du grand périmètre d'irrigation de Guelma, où la production de céréales, maraichages, maïs, etc..., utilise les fertilisants et produits phytosanitaires. Les valeurs des nitrates, varient entre 23 et 98 mg/l en hautes eaux, avec une moyenne de 70,33 mg/l et un écart type de 37,93 mg/l. En basses eaux elles varient entre 80 et 89 mg/l, avec une moyenne de 83 mg/l et un écart type de 5,196 mg/l. Les teneurs élevées en nitrates de l'aquifère enregistrées surtout en basses eaux seraient d'origine anthropique. Les activités agricoles étant annuelles, le recours aux engrais organiques pour l'amélioration des récoltes et l'irrigation par aspersion en basses eaux favorisent le transit des nitrates vers les eaux souterraines. Donc, ces teneurs hors norme contribuent à l'altération des eaux souterraines.

Les sulfates ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) : La présence de sulfates est liée, sauf cas particuliers, à la nature géologique des formations géologiques traversées par les eaux (gypse du Trias essentiellement). Le soufre se combine à l'oxygène pour donner l'ion sulfate, présent dans certains minéraux : gypse, baryte...

La transformation réversible des sulfates en sulfures se fait grâce au cycle du soufre (Peck, 1970 ; in : Derwich E et al, 2010). Les eaux de surface contiennent des teneurs très variables de sulfates. Leur concentration est généralement comprise entre 2,2 et 58 mg/l. Meybeck *et al.*, (1996) ; Greenwood et Earnshaw, (1984), ont étudié les sulfates et ont constaté que les valeurs élevées de ce paramètre peuvent être observées dans les cours d'eau pollués au niveau des zones de rejets industriels (industrie minière, fonderie, usines de pâtes et papiers, usines de textiles, tanneries...). Dans les nappes libres, la présence de sulfate est généralement liée à l'oxydation de pyrite [ $\text{FeS}_2$ ] : minéral riche en soufre que l'on rencontre dans tous les types de lithologie (calcaires, sables, roches magmatiques). Dans ce contexte, les concentrations en sulfates sont de l'ordre de quelques mg/l. Dans les nappes captives, le soufre est également présent mais sous sa forme réduite [ $\text{H}_2\text{S}$ ]. Les sulfates peuvent également provenir du lessivage de formations évaporitiques (ex : gypse [ $\text{CaSO}_4, 2(\text{H}_2\text{O})$ ]). Dans ce cas, les teneurs en sulfates sont très fortes (quelques centaines de mg/l à quelques mg/l).

Dans le tableau 21, les teneurs en sulfates présentent des variations importantes en hautes eaux. Elles varient entre 58 et 230 mg/l, avec une moyenne de 172,66 mg/l et écart type de 90,007 mg/l. En basses eaux par contre, elles varient entre 98 et 200 mg/l, avec une moyenne de 154,67 mg/l et un écart type de 51,96 mg/l. Les valeurs les plus élevées sont observée à l'aval au niveau de la source Ain Hamia, sans atteindre la concentration maximale admissible. Les valeurs élevées en hautes eaux seraient attribuées au lessivage des sables et marnes gypsifères. En basses eaux, on assiste à une concentration par évapotranspiration.

**Tableau 21.** Teneurs en anions (mg/l) des eaux souterraines des alluvions du bassin de Guelma (mai-aout/2009).

Période	Hautes eaux				Basses eaux			
	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>
O. Maiz	335	125	23	98	366	250	89	98
A.Zouaniz	335	150	98	58	305	180	80	166
A. Hamia	448	354	90	230	330	200	80	200
Min	335	125	98	58	366	180	80	98
Max	448	354	23	230	305	250	89	200
Moy.	410,333	277,67	70,33	172,66	333,66	210	83	154,66
Ecart type	57,5368	116,6	37,93	90,007	30,6649	36,0555	5,19615	51,9359
<b>Norme</b>	<b>250</b>	<b>200</b>	<b>50</b>	<b>250</b>	<b>250</b>	<b>200</b>	<b>50</b>	<b>250</b>

**V.5.1.1.2.3. Teneurs en éléments mineurs (mg/l) (cf., tab. 22)**

Le phosphate (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>) : Le phosphate peut se trouver sous différentes formes oxydées, méta HPO<sub>3</sub>, pyro H<sub>4</sub>P<sub>2</sub>O<sub>7</sub> et ortho H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, en milieu aqueux, les formes méta et pyro tendant vers la forme ortho pour des pH de 5 à 8 (Boers, 1991). Le phosphate est facilement fixé par le sol. Sa présence dans les eaux naturelles dépend des terrains traversés et de la décomposition de la matière organique. Le phosphate est un nutriment essentiel et son abondance favorise une activité biologique qui fixe le phosphore dans le corps des organismes (Beaudoin, 2006).

Pour les eaux souterraines de l'aquifère alluvionnaire, les concentrations en phosphate varient entre 0,27 et 0,33 mg/l, avec une moyenne de 0,30 mg/l et un écart type de 0,0321 mg/l. Ces valeurs sont inférieures à la norme de potabilité. Les valeurs du tableau 42 ne présentent pratiquement pas de variations significatives d'une période à l'autre. Leur origine serait attribuable aux activités agricoles.

L'aluminium (Al<sup>3+</sup>) : On trouve couramment l'aluminium sous la forme de silicate d'aluminium ou combiné avec d'autres éléments, tels que le sodium, le potassium, le fer, le calcium et le magnésium.

Les concentrations en aluminium des eaux souterraines varient entre 2,7 et 5,4 mg/l, avec une moyenne de 3,6 mg/l et un écart type de 1,5588 mg/l. Durant les deux périodes, les teneurs sont constantes, les mécanismes qui provoquent ces concentrations sont donc les mêmes et peuvent s'expliquer par un lessivage des lentilles argileuses, par les eaux de pluie en hautes eaux et, par les eaux d'irrigation en basses eaux.

**Tableau 22.** Teneurs en éléments mineurs (mg/l) des eaux souterraines des alluvions quaternaires du bassin de Guelma (mai-aout/2009)

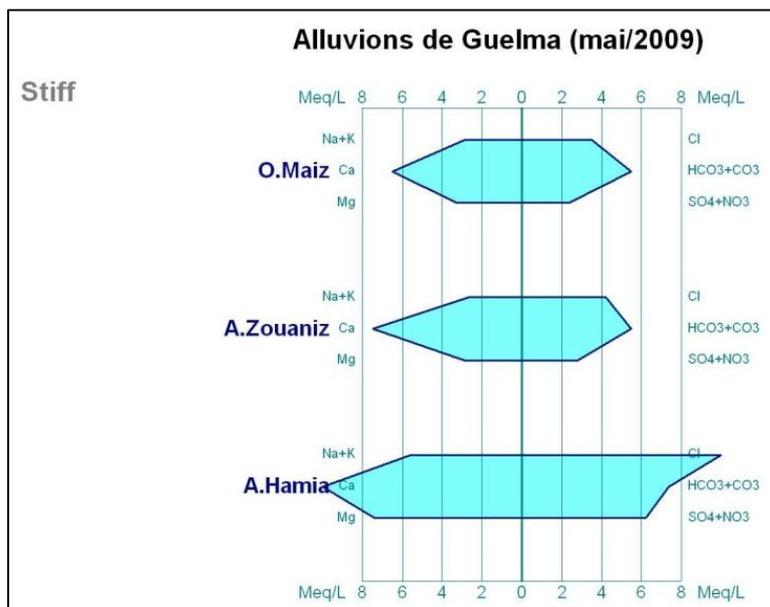
Période	Hautes eaux		Basses eaux	
	Al <sup>3+</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	Al <sup>3+</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>
O.Maiz	2,7	0,33	2,7	0,33
A.Zouaniz	2,7	0,32	2,7	0,32
A.Hamia	5,4	0,27	5,4	0,27
Min	2,7	0,27	2,7	0,27
Max	5,4	0,33	5,4	0,33
Moy.	3,6	0,3066	3,6	0,3066
Ecart type	1,5588	0,0321	1,558	0,032
<b>Norme</b>	<b>0,2</b>	<b>2</b>	<b>0,2</b>	<b>2</b>

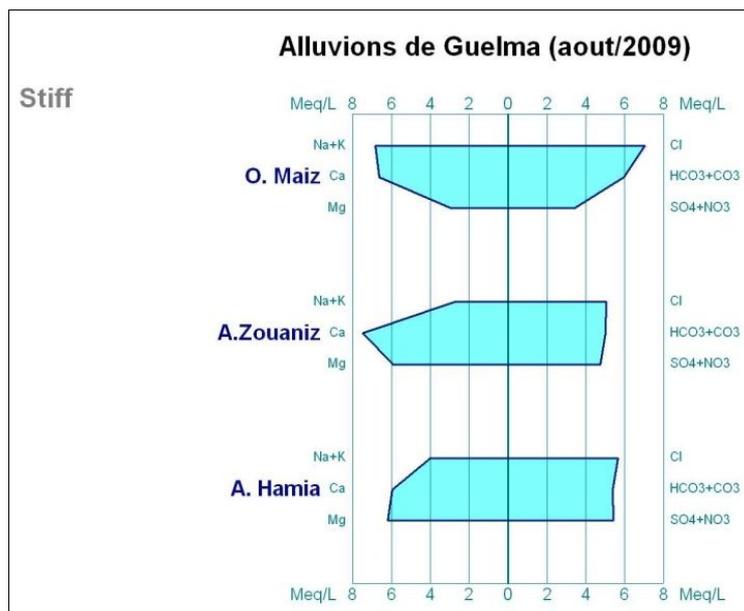
### V.5.1.1.3. Détermination des principaux faciès chimiques des eaux souterraines des alluvions quaternaires du bassin de Guelma (mai-aout/2009), (cf., fig. 18),

La typologie des eaux passe exclusivement par la détermination des hydrofaciès. D'après Jaeckli, (1970), les faciès hydrochimiques sont fréquemment utilisés en hydrogéologie pour décrire grossièrement la composition des eaux naturelles. On les détermine par le calcul des quantités en réaction (conversion des concentrations en méq/l) et, en tenant compte de la classification des ions (formule ionique). La réalisation de ces diagrammes a été faite en utilisant le logiciel Diagrammes 2, conçu par Roland Simler (Laboratoire d'hydrogéologie, Université d'Avignon, 2007).

Dans le cadre de ce travail, le diagramme de Stiff a été utilisé parce qu'il démontre mieux les ions dominants qui caractérisent l'empreinte de l'encaissant. L'objectif de ce travail étant la mise en évidence de la relation eau-roche.

En période de hautes eaux, les faciès chimiques des eaux souterraines sont bicarbonatés et chlorurés calciques à l'ouest de (O. Maiz) de l'aquifère, bicarbonatés et chlorurés calciques au centre (Ain Zouaniz) et chlorurés calciques et magnésiens à l'est (Ain Hamia). On constate que les ions dominants à l'amont sont les bicarbonates et le calcium avec secondairement les chlorures qui apparaissent en prédominance à l'est avec le magnésium, qui apparait comme cation secondaire. Les faciès chimiques indiquent une évolution des teneurs en ions dominants dans le sens de l'écoulement. En basses eaux, les faciès chimiques sont chlorurés et bicarbonatés sodi-calciques à l'ouest, chlorurés et bicarbonatés calciques et magnésiens au centre et chlorurés et sulfatés magnésiens et calciques à l'est. On constate la dominance des chlorures dans tout l'aquifère, avec apparition du sodium à l'ouest, du magnésium en pole secondaire au centre et dominant à l'est et, les sulfates en pole secondaire également. Les minéraux carbonatés  $[(Ca,Mg(CO_3)_2]$  et évaporitiques ( $SO_4^{2-}$ ,  $Na^+$  et  $Cl^-$ ) sont d'origine lithologique durant les deux périodes. En plus de leur origine lithologique, les chlorures sont d'origine anthropique issue du lessivage des sols agricoles par les eaux d'irrigation en période de basses eaux.





**Figure 18.** Faciès chimiques des eaux souterraines des alluvions du bassin de Guelma (mai-aout/2009).

#### V.5.1.1.4. Répartition spatiale des faciès chimiques

Pour la répartition spatiale des faciès chimiques, les éléments minéraux dominants caractéristiques ont été pris en considération :

En hautes eaux, les cations dominants sont : le calcium (75 %) et le magnésium (25%). Leurs teneurs augmentent dans le sens de l'écoulement. Celles du calcium varient entre 130 et 200 mg/l, celles du magnésium varient entre 35 et 90 mg/l. Les anions dominants sont : les bicarbonates (40 %) et les chlorures (60 %). Leurs teneurs augmentent dans le sens d'écoulement et varient respectivement entre 335 et 448 mg/l pour les bicarbonates et entre 125 et 354 mg/l pour les chlorures.

En basses eaux, les cations dominants sont : le calcium (50 %), le magnésium (33,6 %) et le sodium (16,4 %). L'évolution de leurs teneurs n'est pas homogène, sauf pour le magnésium dont les teneurs varient entre 36 et 75 mg/l. Celles du sodium varient entre 60 et 150 mg/l et celles du calcium entre 120 et 150 mg/l. Les anions dominants sont : les bicarbonates (33,6 %), les chlorures (50 %) et les sulfates (16,4%). Comme pour les cations, l'augmentation de leurs teneurs n'est pas homogène dans le sens d'écoulement, sauf pour les sulfates, dont les valeurs varient entre 98 et 200 mg/l. Les teneurs des chlorures varient entre 180 et 250 mg/l, celles des bicarbonates entre 305 et 366 mg/l.

D'une manière globale les principaux faciès chimiques dans l'aquifère des alluvions quaternaires sont :

- En hautes eaux : Bicarbonatés et chlorurés calciques et chlorurés calciques et magnésiens.
- En basses eaux : Chlorurés et bicarbonatés sodi-calciques, - chlorurés et bicarbonatés calciques et magnésiens, - chlorurés et sulfatés magnésiens et caciques.

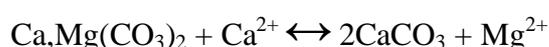
#### V.5.1.1.5. Acquisition de la minéralisation des eaux souterraines des alluvions quaternaires du bassin de Guelma (mai-aout/2009)

L'interprétation des données chimiques à l'aide de la représentation graphique dans le diagramme de Stiff, a pu donner une idée sur le mécanisme du chimisme des eaux souterraines dans l'aquifère alluvionnaire de Guelma. L'influence des formations géologiques sur la nature des faciès est très significative :

Dans le but d'expliquer les mécanismes d'acquisition de la minéralisation, on a utilisé le programme WATEQ, pour déterminer les indices de saturation de quelques minéraux spécifiques.

En hautes eaux (cf., tab.23), on assiste à une sursaturation vis-à-vis des minéraux carbonatés et à la halite et à une sous-saturation vis-à-vis de l'anhydrite et du gypse pour les minéraux évaporitiques, d'où les faciès bicarbonaté calcique à l'amont de l'aquifère et chloruré calcique à l'aval. Les minéraux carbonatés ont pour origine les travertins situés à l'amont de l'aquifère alluvionnaire et qui l'alimentent en partie. Les minéraux évaporitiques ont pour origine les formations évaporitiques de l'aquifère alluvionnaire.

En basses eaux, (cf., tab. 24), on assiste à une sursaturation vis-à-vis des minéraux carbonatés (sauf à l'aragonite au niveau d'O. Maiz et Ain Hamia) due à une dédolomitisation (rapport Ca/Mg > 0,5 (Plummer et al., 1983, in : Ammary, 2007), provoquée par la dissolution irréversible des sulfates et de la dolomite et précipitation de la calcite selon le mécanisme :



On assiste également à une sursaturation vis-à-vis de l'halite et de l'anhydrite, d'où l'apparition des pôles sodique et sulfaté au niveau des sources O. Maiz et Ain Hamia et à une sous-saturation vis-à-vis du gypse dans tout l'aquifère.

**Tableau 23.** Variations des indices de saturation des minéraux des eaux souterraines dans les alluvions de Guelma (mai/2009).

Période	Hautes eaux (Mai/2009)							
	carbonatés				Evaporitiques			
	Faciès chimique	Calcite (CaCO <sub>3</sub> )	Dolomite Ca,Mg (CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Aragonite (CaCO <sub>3</sub> )	Anhydrite (CaSO <sub>4</sub> )	Halite (NaCl)	Gypse (CaSO <sub>4</sub> ,2H <sub>2</sub> O)	pCO <sub>2</sub> équi(atm)
O.Maiz	B.Cl.C.M	3,83	6,96	3,69	- 1,55	0,0320	- 1,33	0,00001
Zouaniz	B.Cl.C	1,99	3,15	1,85	- 1,72	0,0320	- 1,50	0,00051
Hamia	Cl.C	2,67	4,8	2,53	- 1,12	0,0305	- 0,90	0,00021

**Tableau 24.** Variations des indices de saturation des minéraux des eaux souterraines dans les alluvions de Guelma (aout/2009).

Période	Basses eaux (Aout/2009)							
	carbonatés				Evaporitiques			
	Faciès chimique	Calcite (CaCO <sub>3</sub> )	Dolomite Ca,Mg (CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Aragonite (CaCO <sub>3</sub> )	Anhydrite (CaSO <sub>4</sub> )	Halite (NaCl)	Gypse (CaSO <sub>4</sub> ,2H <sub>2</sub> O)	pCO <sub>2</sub> équi(atm)
O.Maiz	Cl.B.N.C	0,36	- 0,05	0,21	1,58	0,0287	- 1,36	0,02181
Zouaniz	Cl.B.C.M	0,42	0,33	0,28	1,31	0,0346	- 1,09	0,01438
Hamia	Cl.S.M.C	0,16	- 0,09	0,01	1,33	0,0287	- 1,11	0,02463

Les relations entre les teneurs en éléments majeurs et la minéralisation totale montrent que celle-ci est régie par le calcium et le magnésium et à un degré moindre par le sodium pour les cations et par les chlorures et les bicarbonates et à un degré par les sulfates pour les anions. Le faciès chloruré et bicarbonaté des eaux pourrait être lié à la dissolution et/ou lessivage du gypse présent dans les marnes miocènes (substratum). La corrélation (r = 0,99) entre les teneurs en calcium et celles en sulfates montre une étroite liaison entre les deux ions. Ils proviendraient de la même formation. L'excès en calcium exprimé par un rapport

$\text{Ca}^{2+}/\text{SO}_4^{2-}$  supérieur à 1 durant les deux périodes est lié à l'apport supplémentaire à partir du lessivage des travertins. Ce qui confirme que ces derniers alimentent l'aquifère alluvionnaire.

Les valeurs de l'indice d'échange de base (I.E.B) sont positives (cf., tab. 40). Les ions  $\text{Na}^+$  et  $\text{K}^+$  contenus dans l'eau sont donc échangés partiellement par les ions  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$  des formations géologiques. Cet échange masqué par l'excès en calcium provenant des travertins est confirmé par la valeur du rapport  $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$  inférieure à 1. Les teneurs en calcium et en magnésium sont très variables d'un point de l'aquifère à l'autre durant les deux campagnes. La mise en solution du magnésium serait due au lessivage des travertins d'abord (amont), puis aux marnes gypsifères du substratum en basses eaux. Les valeurs du rapport  $\text{Ca}^{2+}/\text{HCO}_3^-$  montrent un excès en calcium provenant du lessivage des travertins. Ce taux est d'autant plus important que ne peuvent être consommées la précipitation de la calcite et l'adsorption du calcium par les lentilles d'argiles. Le rapport  $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$  montre notamment un excès de calcium pour un déficit de sodium. La bonne corrélation de ces deux éléments est due à la dissolution des minéraux carbonatés présents dans les travertins. Ce qui verse également en faveur de l'alimentation de l'aquifère des alluvions par les travertins. Le rapport  $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$  est inférieur à 1, donc en faveur d'un excès en chlorures d'origine évaporitique d'où le faciès hydrochimique chloruré dominant.

D'une manière globale, l'analyse chimique des éléments majeurs montre une signature géochimique fidèle à l'aquifère des travertins et celui des alluvions, ce qui met en évidence la communication entre les deux nappes facilitée par l'absence de niveau étanche.

#### **V.5.1.1.6. Analyse en composantes principales (ACP) des eaux souterraines des alluvions du bassin de Guelma :**

Dans le cadre de l'étude de la chimie des eaux des sources, on observe non pas un seul paramètre (variable), mais un nombre souvent élevé de paramètres à la fois. L'étude séparée de chacune de ces variables est une phase importante lors de l'analyse du comportement chimique des sources mais elle est souvent insuffisante. En effet, l'étude séparée de chaque variable laisse de côté les liaisons qui peuvent exister entre elles et qui sont souvent un aspect très important. Il faut donc analyser les données en tenant compte de leur caractère multidimensionnel. L'analyse factorielle est une méthode particulièrement puissante pour explorer la structure de telles données (Hotelling, (1933), *In* : Nagabhsushan et Kumar, 2007 ; Husson et al., 2010). L'intérêt de cette technique réside dans le fait qu'elle permet de réduire à quelques plans factoriels, la majeure partie de la variance exprimée par les descripteurs. Le premier axe F1 est celui qui exprime le plus fort pourcentage de la variance totale. Le second axe F2, indépendant du premier, est celui qui exprime la plus grande partie de la variance résiduelle et ainsi de suite (Mudry et Blavoux, 1986).

L'aquifère des alluvions quaternaires du bassin de Guelma compte trois points d'eau, donc trois individus et quinze paramètres (variables).

La projection des variables en Hautes eaux montre (cf., fig. 19), le développement d'un groupe sur l'axe F1 (77,05 % de la variance) représenté par la conductivité (C.E),  $\text{T}^\circ\text{C}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  et  $\text{Al}^{3+}$  qui expriment donc la minéralisation des eaux de l'aquifère alluvionnaire et s'opposent aux phosphates et au TH. Les éléments qui régissent la minéralisation sont positivement corrélés entre eux et, négativement corrélés aux phosphates (cf., tabl. 25) et à la dureté. L'axe F2 (22,95 % de la variance totale) est représenté par le groupe à valeurs négatives  $\text{NO}_3^-$ , O.D et Eh, qui expriment la pollution agricole (nitratisation par oxydation), l'oxygène dissous et le Eh sont très corrélés aux nitrates (cf. tab. 25) et qui s'opposent au pH. La projection des individus montre que la minéralisation est représentée par la source Ain Hamia située à l'aval de l'aquifère, la pollution agricole est représentée par les sources Ain Zouaniz et O. Maiz par oxydoréduction vers Ain Zouaniz.

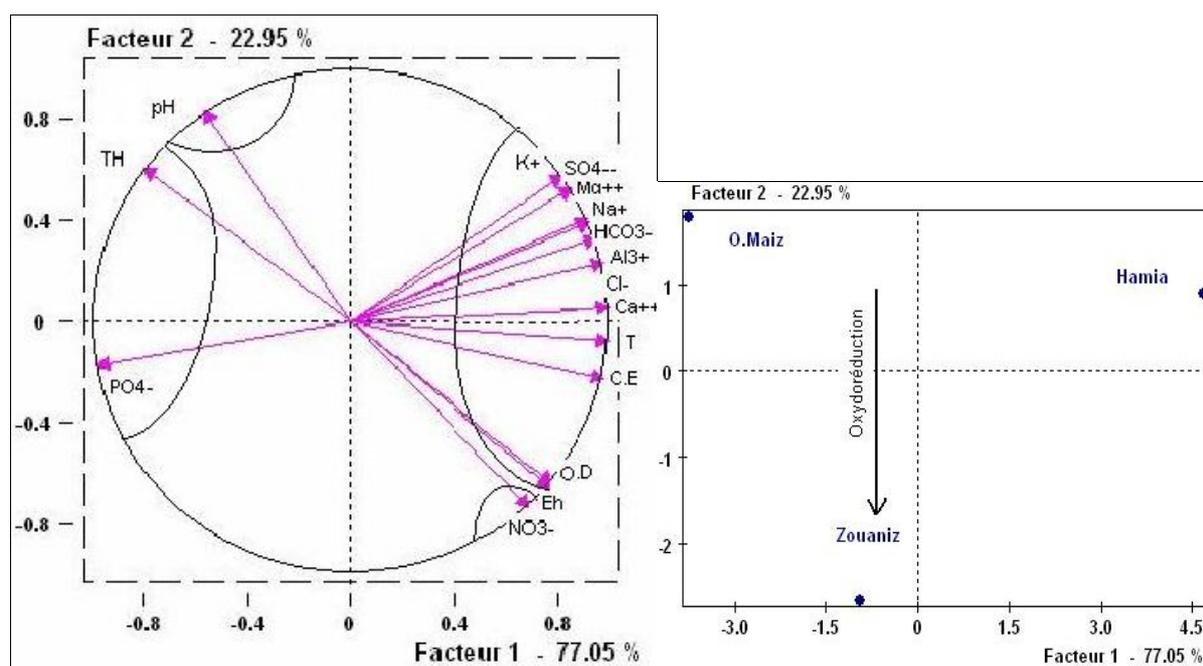


Figure 19. Projection des variables et des individus: Alluvions de Guelma (mai/2009).

Tableau 25. Matrice de corrélation des eaux souterraines des alluvions du bassin de Guelma (mai/2009)

	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	C.E	pH	Eh	T°C	O.D	TH	Al <sup>3+</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>
Ca <sup>++</sup>	1,00															
Mg <sup>++</sup>	0,93	1,00														
K <sup>+</sup>	0,85	0,98	1,00													
Na <sup>+</sup>	0,94	1,00	0,98	1,00												
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,96	1,00	0,96	1,00	1,00											
Cl <sup>-</sup>	0,98	0,98	0,93	0,99	1,00	1,00										
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,65	0,34	0,14	0,35	0,41	0,50	1,00									
SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	0,88	0,99	1,00	0,99	0,98	0,95	0,20	1,00								
C.E	0,96	0,80	0,67	0,81	0,85	0,90	0,83	0,71	1,00							
pH	-0,52	-0,18	0,01	-0,20	-0,26	-0,36	-0,99	-0,04	-0,74	1,00						
Eh	0,73	0,44	0,25	0,45	0,51	0,59	0,99	0,31	0,89	-0,96	1,00					
T	0,99	0,88	0,77	0,89	0,92	0,95	0,74	0,81	0,99	-0,63	0,81	1,00				
O.D	0,74	0,45	0,27	0,46	0,52	0,60	0,99	0,32	0,90	-0,96	1,00	0,82	1,00			
TH	-0,77	-0,49	-0,31	-0,50	-0,56	-0,64	-0,99	-0,36	-0,91	0,95	-1,00	-0,84	-1,00	1,00		
Al <sup>3+</sup>	0,96	1,00	0,96	1,00	1,00	1,00	0,41	0,98	0,85	-0,26	0,51	0,92	0,52	-0,56	1,00	
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	-0,99	-0,97	-0,91	-0,97	-0,99	-1,00	-0,55	-0,93	-0,92	0,41	-0,64	-0,97	-0,65	0,68	-0,99	1,00

En période de basses eaux (cf., fig. 20), la projection des variables montre une distribution sur l'axe F1, (66,24 % de la variance totale) en deux groupes distincts. Le premier est représenté par les variables à valeurs positives : C.E, O.D, K<sup>+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Eh et Mg<sup>2+</sup>. Il s'oppose au deuxième groupe de variables à valeurs négatives : Cl<sup>-</sup>, Na<sup>+</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, T°C et NO<sub>3</sub><sup>-</sup>.

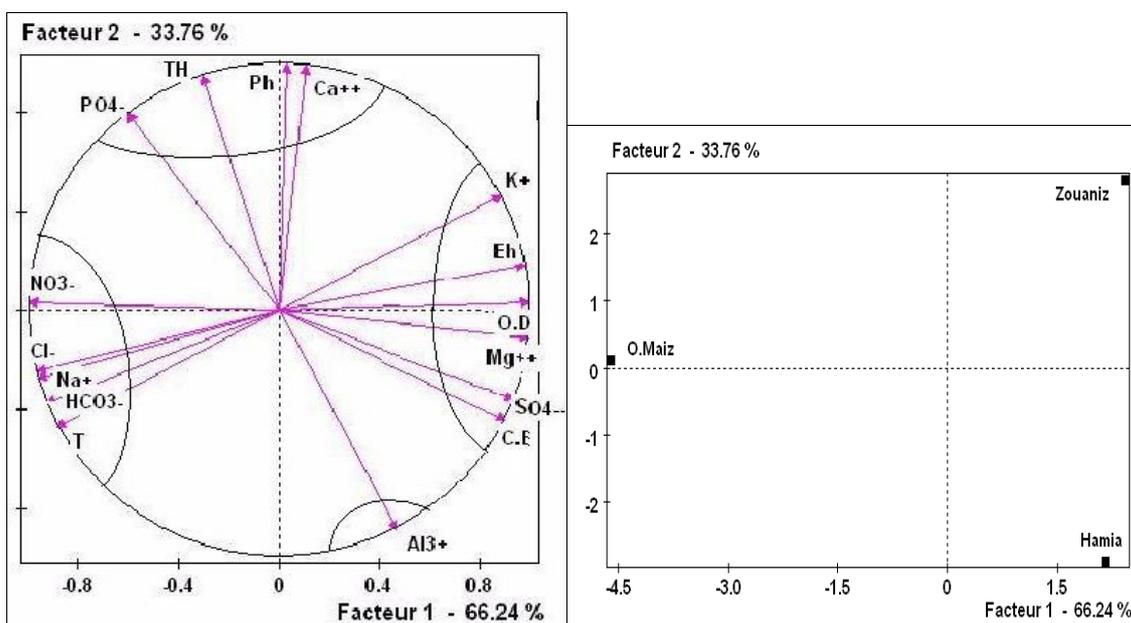
L'axe F1, représente donc la minéralisation des eaux souterraines acquise de deux origines différentes, à partir de l'aquifère des travertins situé à l'amont et par hydrolyse acide dans l'aquifère alluvionnaire.

L'axe F2., (33,76 % de la variance totale), est également représenté par deux groupes de variables, l'un à valeurs positives représenté par : pH,  $\text{Ca}^{2+}$ , TH et  $\text{PO}_4^{3-}$  et, l'autre à valeurs négatives représenté par :  $\text{Al}^{3+}$ . L'axe F2 est celui de la pollution agricole (lessivage des engrais phosphatés) et de la dureté calcique.

Dans le tableau 26, les variables à valeurs positives qui régissent la minéralisation, montrent des corrélations significatives entre elles. Les variables à valeurs négatives de l'axe F2 de la pollution montrent également des corrélations significatives entre elles.

La projection des individus en basses eaux, montre que la minéralisation est représentée par les sources Ain Zouaniz et Ain Hamia et la pollution par O. Maiz et Ain Zouaniz.

Au niveau de la source Ain Zouaniz, les paramètres de la pollution contribuent également à la minéralisation.



**Figure 20.** Projection des variables et des individus : Alluvions de Guelma (aout/2009).

**Tableau 26** : Matrice de corrélation des eaux souterraines des alluvions du bassin de Guelma (aout/2009)

	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	C.E	pH	Eh	T°C	O.D	TH°F	Al <sup>3+</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>
Ca <sup>++</sup>	1,00															
Mg <sup>++</sup>	0,01	1,00														
K <sup>+</sup>	0,56	0,83	1,00													
Na <sup>+</sup>	-0,38	-0,93	-0,98	1,00												
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-0,48	-0,88	-0,99	0,99	1,00											
Cl <sup>-</sup>	-0,35	-0,94	-0,97	1,00	0,99	1,00										
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-0,08	-1,00	-0,87	0,95	0,91	0,96	1,00									
SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	-0,25	0,97	0,65	-0,80	-0,73	-0,82	-0,94	1,00								
C.E	-0,34	0,94	0,59	-0,74	-0,67	-0,76	-0,91	1,00	1,00							
pH	1,00	-0,07	0,50	-0,31	-0,41	-0,28	0,00	-0,33	-0,41	1,00						
Eh	0,30	0,96	0,96	-1,00	-0,98	-1,00	-0,97	0,85	0,80	0,22	1,00					
T°C	-0,56	-0,83	-1,00	0,98	0,99	0,97	0,87	-0,65	-0,59	-0,50	-0,96	1,00				
O.D	0,15	0,99	0,90	-0,97	-0,94	-0,98	-1,00	0,92	0,88	0,07	0,99	-0,90	1,00			
TH°F	0,91	-0,40	0,18	0,03	-0,08	0,06	0,34	-0,63	-0,69	0,94	-0,12	-0,18	-0,27	1,00		
Al <sup>3+</sup>	-0,83	0,56	0,00	-0,21	-0,10	-0,24	-0,50	0,76	0,81	-0,87	0,29	0,00	0,44	-0,98	1,00	
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	0,73	-0,68	-0,16	0,36	0,26	0,39	0,63	-0,85	-0,89	0,78	-0,44	0,16	-0,57	0,94	-0,99	1,00

## Conclusion

L'aquifère est représenté par des alluvions d'âge Quaternaire du bassin de Guelma, où émergent les sources O. Maiz, Ain Zouaniz et Ain Hamia.

La température des eaux souterraines est proche de la température ambiante, parce que le niveau d'eau dans l'aquifère est soumis à l'influence de la pression atmosphérique, ce qui engendre un équilibre thermique. Le pH varie d'alcalin à neutre. La conductivité électrique augmente dans le sens de l'écoulement. Les eaux sont moyennement minéralisées à O. Maiz et minéralisées au niveau des autres sources. Elles sont douces, durant les deux périodes. Les valeurs les plus élevées du TH sont inférieures à 18 °F.

L'analyse chimique des éléments majeurs montre une signature géochimique fidèle à l'aquifère des travertins et celui des alluvions, ce qui met en évidence la communication entre les deux aquifères facilitée par l'absence de niveau étanche.

En hautes eaux, les faciès chimiques sont bicarbonatés et chlorurés calciques à l'ouest de l'aquifère (O. Maiz), bicarbonatés et chlorurés calciques au centre (Ain Zouaniz) et chlorurés calciques et magnésiens à l'est (Ain Hamia). On constate que les ions dominants à l'amont sont les bicarbonates et le calcium et secondairement les chlorures qui apparaissent en prédominance à l'est avec le magnésium qui apparaît comme cation secondaire après le calcium. Les résultats indiquent une évolution des teneurs en ions dominants dans le sens de l'écoulement. On assiste à une sursaturation vis-à-vis des minéraux carbonatés et à la halite et à une sous-saturation vis-à-vis de l'anhydrite et du gypse pour les minéraux évaporitiques, d'où les faciès bicarbonatés calciques à l'amont de l'aquifère et chlorurés calciques à l'aval.

Les minéraux carbonatés auraient pour origine les travertins situés à l'amont de l'aquifère alluvionnaire et qui alimentent en partie celui-ci. Les minéraux évaporitiques auraient pour origine les formations évaporitiques de l'aquifère.

En basses eaux, les faciès chimiques sont chlorurés et bicarbonatés sodi-calciques à l'ouest, chlorurés et bicarbonatés calciques et magnésiens au centre et, chlorurés et sulfatés magnésiens et calciques à l'est. On assiste à une sursaturation vis-à-vis des minéraux

carbonatés (sauf à l'aragonite au niveau d'O. Maiz et Ain Hamia) dûe à une dédolomitisation provoquée par la dissolution irréversible des sulfates et de la dolomite et précipitation de la calcite. On assiste également à une sursaturation vis-à-vis de l'halite et de l'anhydrite, d'où l'apparition des pôles sodique et sulfaté au niveau des sources O. Maiz et Ain Hamia et à une sous-saturation vis-à-vis du gypse dans tout l'aquifère.

L'ACP a mis en évidence que l'axe F1 représente la minéralisation et, l'axe F2 représente la pollution agricole (nitratation par oxydation). La projection des individus montre que la minéralisation est représentée par la source Ain Hamia située à l'aval de l'aquifère, la pollution agricole est représentée par les sources Ain Zouaniz et O. Maiz par oxydoréduction vers Ain Zouaniz. En basses eaux, l'axe F1, représente la minéralisation des eaux souterraines acquise de deux origines différentes, à partir de l'aquifère des travertins situé à l'amont et par hydrolyse acide dans l'aquifère alluvionnaire. L'axe F2 représente la pollution agricole (lessivage des engrais phosphatés).

### V.5.1.2. Les travertins du bassin Mio-Pliocène de Guelma

#### V.5.1.2.1. Paramètres physiques des eaux souterraines des travertins du bassin Mio-Pliocène de Guelma (mai-aout/2009), (cf., tab. 27)

En hautes eaux, la température des eaux souterraines des travertins du bassin Mio-Pliocène de Guelma, varient entre 17,7 et 19 °C, avec une moyenne de 18,23 °C et un écart type de 0,681 °C. D'après les valeurs inscrites dans le tableau 27, on remarque une diminution proportionnelle à l'altitude. En basses eaux, les températures sont légèrement élevées mais, l'influence de l'altitude n'est pas observée. Le pH varie entre 7,7 et 8,6 en hautes eaux et 6,97 et 7,6 en basses eaux. Il passe de neutre à alcalin en hautes eaux, à légèrement acide en basses eaux (Ain Guergour). L'état alcalin serait dû sans doute aux apports de matières dissoutes par les eaux de pluie, l'état acide serait dû à une pollution anthropique au niveau de la source Ain Guergour. Les valeurs du potentiel d'oxydoréduction varient entre -59 et 0,03 mv en hautes eaux et entre -8 et -5 mv en basses eaux. Les sources Benjerrah et Guergour situées sur la rive droite de l'Oued Seybouse possèdent des valeurs proches durant les deux périodes, positives en hautes eaux et négatives en basses eaux. Ces valeurs indiquent une influence directe par les eaux de pluie et une faible profondeur du niveau d'eau de l'aquifère. Sur la rive gauche de l'Oued, les valeurs du potentiel d'oxydoréduction sont négatives durant les deux périodes mais inférieures en hautes eaux.

L'influence des eaux de pluie n'est pas significative parce que le niveau d'eau de l'aquifère de la rive gauche est plus profond que celui de la rive droite.

Les teneurs en oxygène dissous sont très proches de part et d'autre de l'Oued Seybouse durant les deux périodes au niveau des sources Guergour et Bouchiha situées pratiquement à la même altitude avec une légère augmentation en hautes eaux. Cette variation entre les deux périodes verse dans l'apport de l'oxygène dissous par les eaux de pluie. Au niveau de la source Benjerrah située à une plus haute altitude, les teneurs sont inférieures à celles des autres sources et tendent vers la stabilité.

La conductivité : Les valeurs de la conductivité varient entre 960  $\mu\text{s/cm}$  (Ain Bouchiha) et 1104  $\mu\text{s/cm}$  (Ain Guergour) en hautes eaux et, entre 991  $\mu\text{s/cm}$  (Ain Benjerrah) et 1594  $\mu\text{s/cm}$  (Ain Guergour) en basses eaux. On constate qu'au niveau de la source Ain Guergour, les valeurs de la conductivité sont les plus élevées durant les deux périodes. Cela signifie qu'au niveau des travertins de la rive droite de l'Oued Seybouse, les valeurs élevées témoignent d'une bonne circulation des eaux et d'une mise en solution des éléments minéraux par hydrolyse. Les valeurs de la dureté des eaux sont faibles et varient entre 6,75 et 10,83 durant les deux périodes et indiquent que les eaux sont douces.

**Tableau 27.** Les paramètres physiques des eaux souterraines des travertins du bassin Mio-Pliocène de Guelma (mai-aout/2009),

Nom	Hautes eaux						Basses eaux					
	C.E ( $\mu\text{s/cm}$ )	pH	Eh (mv)	T (°C)	O.D (mg/l)	TH °F	C.E ( $\mu\text{s/cm}$ )	pH	Eh (mv)	T (°C)	O.D (mg/l)	TH °F
A. Benjerrah	1030	7,9	0,03	19	1,56	7,02	991	7,6	-5	20,3	1,9	8,16
A. Guergour	1104	7,7	0,02	18	3,55	10,83	1594	6,97	-8	19,7	2,22	8,95
A. Bouchiha	960	8,6	-59	17,7	3,5	10,83	1158	7,58	-5	21,1	2,6	6,75
Min.	960	7,7	-59	17,7	1,56	7,02	991	6,97	-8	19,7	1,9	6,75
Max.	1104	8,6	0,03	19	3,55	10,83	1594	7,6	-5	21,1	2,6	8,95
Moyenne	1031,3	8,067	-19,65	18,23	2,87	9,30	1247,7	7,383	-6	20,37	2,24	7,912
Ecart type	72,009	0,473	34,078	0,681	1,134	2,199	0,358	1,732	0,702	0,35	0,350	1,114
<b>Norme</b>	<b>1500</b>	<b>6,5-9,5</b>	/	<b>25</b>	<b>5 &lt;</b>	<b>&lt; 18</b>	<b>1500</b>	<b>6,5-9,5</b>	/	<b>25</b>	<b>5 &lt;</b>	<b>&lt; 18</b>

### V.5.1.2.2. Paramètres chimiques des eaux souterraines des travertins du bassin de Guelma (mai-aout/2009)

#### V.5.1.2.2.1. Teneurs en cations (mg/l) (mai et aout/2009), (cf., tab. 28)

En hautes eaux, les teneurs en calcium varient entre 100 et 145 mg/l, avec une moyenne de 125 mg/l et un écart type de 22,913 mg/l, celles en magnésium qui lui est toujours associé, varient entre 35 et 41 mg/l, avec une moyenne de 38,67 mg/l et un écart type de 3,215 mg/l. Leurs teneurs sont dans les normes de potabilité. Les teneurs en sodium et potassium sont également faibles et dans les normes de potabilité. Elles varient entre 2 et 2,2 mg/l, avec une moyenne de 3,4 mg/l et écart type de 3,143 mg/l pour le premier élément et, entre 60 et 98 mg/l, avec une moyenne de 79,33 mg/l et un écart type de 19,01 mg/l pour le second élément.

En basses eaux, les teneurs en calcium varient entre 138 et 150 mg/l, avec une moyenne de 146 mg/l et un écart type de 6,928 mg/l ; celles en magnésium varient entre 49 et 80 mg/l, avec une moyenne de 69,66 mg/l et un écart type de 17,898 mg/l. On assiste donc à une augmentation des teneurs de ces deux éléments par évapotranspiration. Les teneurs en potassium varient dans l'intervalle de 1,2 et 7 mg/l, avec une moyenne de 3,4 mg/l et un écart type de 3,143 mg/l ; celles en sodium varient entre 80 et 140 mg/l, avec une moyenne de 108 mg/l et un écart type de 30,2 mg/l. Ces deux éléments observent également une augmentation de leurs teneurs respectives en basses eaux, attribuable à une évapotranspiration.

**Tableau 28.** Teneurs en cations (mg/l) des eaux souterraines des travertins du bassin de Guelma (mai et aout/2009)

Source	Hautes eaux (mai/2009)				Basses eaux (aout/2009)			
	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>
A.Benjerrah	130	40	2	80	138	49	2	140
A.Guergour	145	41	2,2	98	150	80	7	80
A.Bouchiha	100	35	2,2	60	150	80	1,2	104
Min.	100	35	2	60	138	49	1,2	80
Max.	145	41	2,2	98	150	80	7	140
Moyenne	125	38,67	2,133	79,33	146	69,66	3,4	108
Ecart type	22,913	3,215	0,115	19,01	6,928	17,898	3,143	30,2
<b>Norme</b>	<b>100</b>	<b>50</b>	<b>12</b>	<b>200</b>	<b>100</b>	<b>50</b>	<b>12</b>	<b>200</b>

#### V.5.1.2.2.2. Teneurs en anions (mg/l) (mai-aout/2009), (cf., tab. 29)

En hautes eaux, les teneurs en bicarbonates varient entre 320 et 405 mg/l, avec une moyenne de 353,33 mg/l et un écart type de 45,368 mg/l, celles en chlorures varient entre 115 et 150 mg/l, avec une moyenne de 130 mg/l et écart type de 18,03 mg/l. Les teneurs en sulfates varient entre 98 et 130 mg/l, avec une moyenne de 119,33 mg/l et écart type de 18,475 mg/l et celles des nitrates, varient entre 18 et 175 mg/l, avec une moyenne de 72 mg/l et écart type de 89,236 mg/l.

En basses eaux, les teneurs en bicarbonates varient entre 293 et 340 mg/l, avec une moyenne de 312,67 mg/l et un écart type de 24,42 mg/l, celles en chlorures varient entre 200 et 282 mg/l, avec une moyenne de 245,67 et un écart type de 41,789 mg/l. Les sulfates varient entre 160 et 180 mg/l, avec une moyenne de 168,67 mg/l et un écart type de 10,263 mg/l. Quant à celles en nitrates, elles varient entre 65 et 120 mg/l, avec une moyenne de 88 mg/l et un écart type de 28,583 mg/l.

A la lumière de ces données statistiques, on constate qu'en hautes eaux, les variations des teneurs en anions sont plus importantes qu'en basses eaux, sauf pour les chlorures. Les

teneurs en bicarbonates sont élevées surtout au niveau des sources Ain Guergour et Ain Bouchiha, sans doute par lessivage des travertins du sud de Guelma pour la première source et ceux du plateau d'Héliopolis pour la deuxième, par les eaux de pluie. Les nitrates et les chlorures dépassent les normes de potabilité d'eau de consommation en basses eaux, à cause d'une éventuelle pollution anthropique, les trois sources sont situées à l'aval des agglomérations et peuvent être contaminées par les rejets domestiques.

D'une manière globale, les eaux souterraines des travertins du bassin de Guelma sont douces et minéralisées. Les teneurs en cations sont dans les normes de potabilité d'eau de consommation, par contre celles des anions (bicarbonates, chlorures et nitrates) sont élevées et d'origine anthropique. Leur pH passe de neutre à alcalin en hautes eaux, à légèrement acide en basses eaux (Ain Guergour). L'état alcalin serait dû sans doute aux apports de matières dissoutes par les eaux de pluie, l'état acide serait dû à une pollution anthropique au niveau de la source Ain Guergour.

**Tableau 29.** Teneurs en anions (mg/l) des eaux souterraines des travertins du bassin de Guelma (mai-aout/2009)

Source	Hautes eaux (mai/2009)				Basses eaux (aout/2009)			
	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>
A.Benjerrah	320	150	18	130	305	255	79	166
A.Guergour	405	115	175	130	340	200	120	180
A.Bouchiha	335	125	23	98	293	282	65	160
Min.	320	115	18	98	293	200	65	160
Max.	405	150	175	130	340	282	120	180
Moyenne	353,33	130	72	119,33	312,67	245,67	88	168,67
Ecart type	45,3689	18,03	89,236	18,475	24,42	41,789	28,583	10,263
<b>Norme</b>	<b>250</b>	<b>200</b>	<b>50</b>	<b>250</b>	<b>250</b>	<b>200</b>	<b>50</b>	<b>250</b>

#### V.5.1.2.2.3. Teneurs en éléments mineurs (mg/l) (mai-aout/2009), (cf., tab. 30)

En hautes eaux, les teneurs en aluminium sont élevées au niveau des travertins d'Héliopolis et varient entre 2,7 et 4,05 mg/l, avec une moyenne de 3,15 mg/l et un écart type de 0,7794 mg/l. Celles en phosphates varient entre 0,23 et 0,31 mg/l, avec une moyenne de 0,27 mg/l et un écart type de 0,04 mg/l.

En basses eaux, les teneurs en aluminium sont pratiquement identiques qu'en hautes eaux et témoignent d'une origine anthropique permanente. Les teneurs en phosphates sont nulles au niveau des travertins d'Héliopolis, cela signifie que leur origine est due aux infiltrations d'eau de pluie par lessivage des formations géologiques traversés. Durant les deux périodes, les teneurs en aluminium sont supérieures à la norme de potabilité.

**Tableau 30.** Teneurs en éléments mineurs (mg/l) des eaux souterraines des travertins du bassin de Guelma (mai et aout/2009)

Source	Hautes eaux (mai/2009)		Basses eaux (aout/2009)	
	Al <sup>3+</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	Al <sup>3+</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>
A.Benjerrah	2,7	0,23	2,7	0,04
A.Guergour	2,7	0,31	2,7	0,33
A.Bouchiha	4,05	0,27	4,2	0
Min	2,7	0,23	2,7	0
Max	4,05	0,31	4,2	0,33
Moy	3,15	0,27	3,2	0,1233
Ecart type	0,7794	0,04	0,866	0,1801
<b>Norme</b>	<b>0,2</b>	<b>2</b>	<b>0,2</b>	<b>2</b>

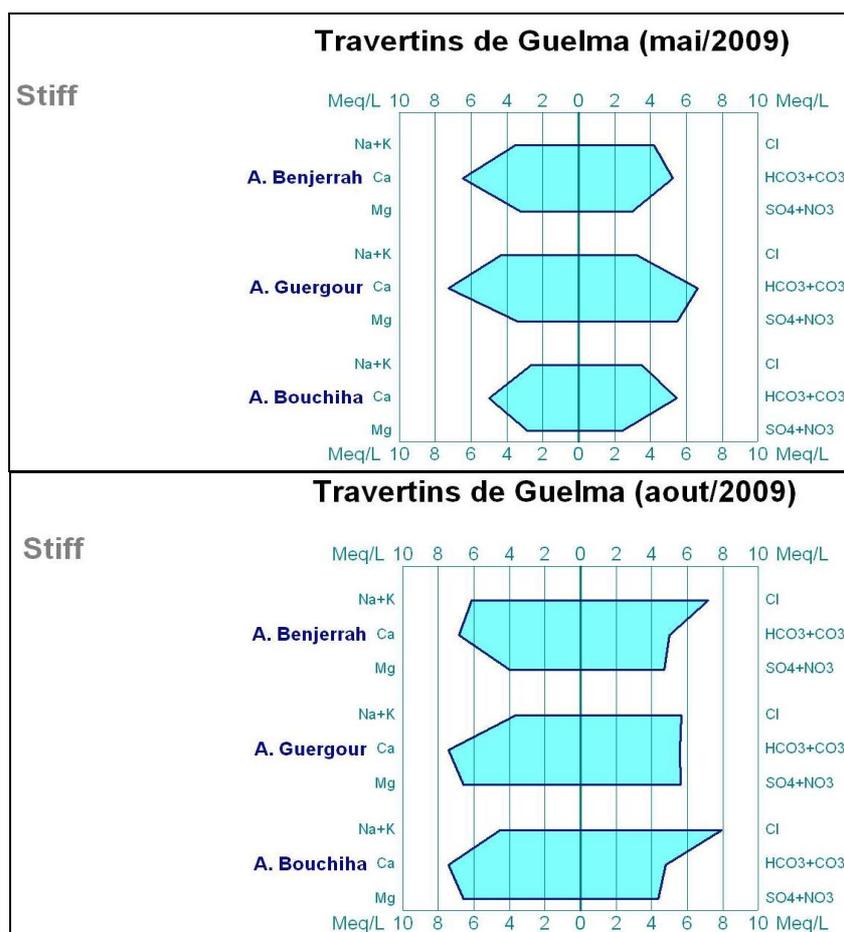
### V.5.1.2.3. Détermination des principaux faciès chimiques des eaux souterraines des travertins du bassin de Guelma (mai-aout/2009), (cf., fig. 21)

En hautes eaux, les faciès chimiques des eaux des travertins du bassin de Guelma sont bicarbonatés et chlorurés calciques au niveau des sources Ain Benjerrah et Ain Bouchiha, Bicarbonatés et sulfatés calciques au niveau de la source Ain Guergour.

En basses eaux, les faciès chimiques sont chlorurés calciques et sodiques au niveau de la source Ain Benjerrah, chlorurés et sulfatés calciques et magnésiens au niveau d'Ain Guergour et chlorurés calciques et magnésiens au niveau d'Ain Bouchiha. Les ions dominants qui déterminent les faciès chimiques des eaux sont les chlorures, les bicarbonates et les sulfates pour les anions d'une part et, le calcium, le sodium et le magnésium pour les cations d'autre part.

Les principales classes d'eau ainsi déterminées sont : - Les eaux bicarbonatées calciques, avec apparition des chlorures au niveau des sources Ain Benjerrah et Ain Bouchiha et apparition des sulfates au niveau de la source Ain Guergour ; - Les eaux chlorurées calciques, avec apparition du sodium au niveau de la source Ain Benjerrah et apparition du magnésium au niveau des sources Ain Guergour et Ain Bouchiha.

Ce passage de faciès chimique de la dominance des bicarbonates en hautes eaux à celle des chlorures en basses eaux, s'explique par le lessivage des travertins en surface par les eaux de pluie. Les rapports caractéristiques Ca/Na, Ca/SO<sub>4</sub>, Ca/Na, Cl/SO<sub>4</sub> et Ca/HCO<sub>3</sub> sont supérieurs à l'unité. On enregistre donc un excès de calcium et de chlorures par rapport au magnésium, au sodium et aux sulfates, d'où les pôles chloruré et calcique dominants des faciès chimiques des eaux.



**Figure 21.** Faciès chimiques des eaux souterraines des travertins du bassin de Guelma (mai-aout /2009).

#### V.5.1.2.4. Répartition spatiale des faciès chimique des eaux des travertins du bassin de Guelma (mai-aout/2009).

En hautes eaux, les ions dominants qui caractérisent les faciès chimiques des eaux souterraines sont : le calcium (33,33 %) et les bicarbonates (33,33 %) au niveau des trois sources, les chlorures (22,22 %), au niveau des sources Benjerrah et Bouchiha et les sulfates (11,11 %) au niveau d'Ain Guergour. En basses eaux, les ions dominants qui caractérisent les faciès chimiques des eaux souterraines sont : le calcium (30 %) au niveau des trois sources, le magnésium (20 %) au niveau des sources Ain Guergour et Ain Bouchiha, le sodium (10 %) au niveau de la source Ain Benjerrah et, les chlorures (30 %) au niveau des trois sources et les sulfates (10 %) au niveau de la source Ain Guergour.

D'une manière globale les principaux faciès chimiques des eaux souterraines des travertins du bassin de Guelma sont : Bicarbonatés et chlorurés calciques, Bicarbonatés et sulfatés calciques en hautes eaux et, chlorurés calciques et sodiques, chlorurés et sulfatés calciques et magnésiens, chlorurés calciques et magnésiens en basses eaux.

#### V.5.1.2.5. Acquisition de la minéralisation des eaux souterraines des travertins du bassin de Guelma (mai-aout /2009).

Les valeurs de l'indice de saturation des minéraux renseignées dans le tableau 31, montrent une sursaturation vis-à-vis des minéraux carbonatés en hautes eaux et une sous-saturation vis-à-vis des minéraux évaporitiques. Les eaux ont tendance à s'enrichir en sulfates et en chlorures.

**Tableau 31.** Indices de saturation des eaux souterraines des travertins du bassin de Guelma (mai/2009).

Période	Hautes eaux (mai/2009)						
Minéraux	carbonatés				Evaporitiques		
	Faciès chimique	Calcite (CaCO <sub>3</sub> )	Dolomite Ca,Mg (CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Aragonite (CaCO <sub>3</sub> )	Anhydrite (CaSO <sub>4</sub> )	Gypse (CaSO <sub>4</sub> ,2H <sub>2</sub> O)	pCO <sub>2</sub> équival(atm)
Source							
Benjerrah	B.Cl.C	1,01	1,3	0,86	-1,44	-1,22	0,00384
Guergour	B.S.C	0,94	1,14	0,8	-1,42	-1,2	0,00764
Bouchiha	B.Cl.C	1,63	2,61	1,49	-1,64	-1,42	0,00081

En basses eaux (cf., tab. 32), les eaux sont sursaturées vis-à-vis des minéraux carbonatés (sauf celles de la source Ain Guergour), qui sont sous-saturées vis-à-vis de la dolomite. Sur la rive droite de l'Oued Seybouse, le pole sodique du faciès chimique des eaux à l'amont (Ain Benjerrah) est substitué par le pole magnésien dans le sens de l'écoulement (Ain Guergour). On constate un état de sous-saturation des eaux vis-à-vis de la dolomite au niveau de cette source due à une dédolomitisation provoquée par la dissolution de la dolomite et des sulfates, (Plummer et al., 1983; in : Ammary, 2007), d'où l'apparition du pole sulfaté dans le faciès chimique des eaux de ladite source. Les faciès dominants bicarbonatés calciques en hautes eaux et chlorurés calciques en basses eaux sont le résultat d'une mise en solution des éléments minéraux de l'encaissant par lessivage.

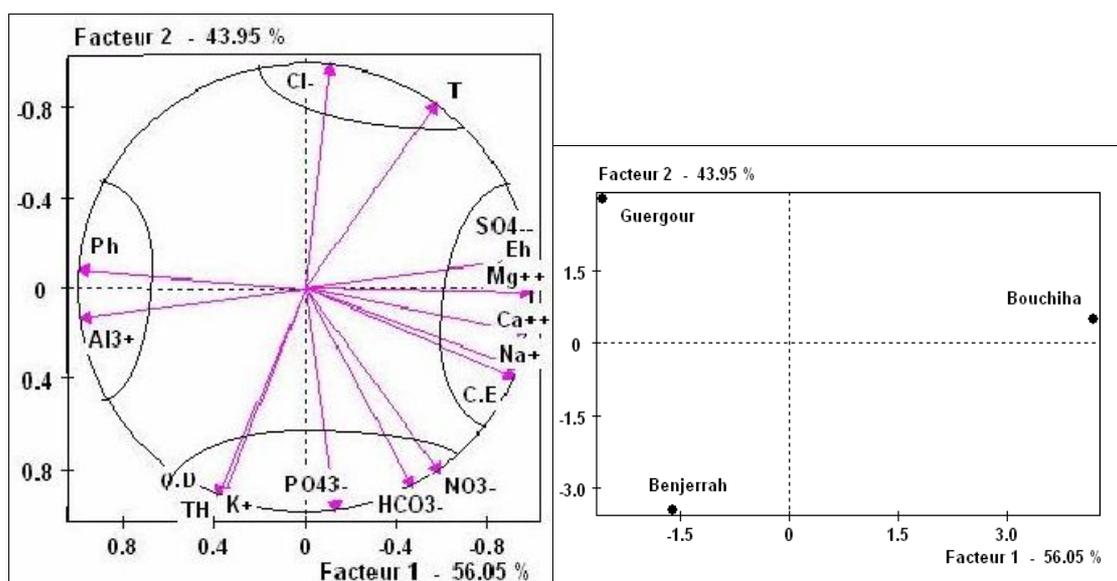
**Tableau 32.** Indices de saturation des eaux souterraines des travertins du bassin de Guelma (aout/2009).

Période	Basses eaux (aout/2009)						
Minéraux	carbonatés				Evaporitiques		
	Faciès chimique	Calcite (CaCO <sub>3</sub> )	Dolomite Ca,Mg (CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Aragonite (CaCO <sub>3</sub> )	Anhydrite (CaSO <sub>4</sub> )	Gypse (CaSO <sub>4</sub> ,2H <sub>2</sub> O)	pCO <sub>2</sub> équival(atm)
Source							
Benjerrah	Cl.C.N	0,68	0,72	0,54	-1,35	-1,13	0,0072
Guergour	Cl.S.C.M	0,13	-0,21	0,02	-1,29	-1,07	0,03411
Bouchiha	Cl.C.M	0,67	0,88	0,53	-1,35	-1,13	0,00721

#### V.5.1.2.6. Analyse en composantes principales des eaux souterraines des travertins du bassin de Guelma

La projection des variables en hautes eaux (cf., fig. 26), montre un regroupement sur l'axe F1, (56,05 de la variance totale), représenté par : C.E, Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> et Eh, avec des valeurs positives. C'est le groupe de la minéralisation, qui s'oppose au pH et Al<sup>3+</sup>. Les variables qui régissent la minéralisation sont réparties de part et d'autre de l'axe F1, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Mg<sup>2+</sup> et Eh d'un coté et Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup> de l'autre, chaque groupe est issu d'une origine différente. L'axe F2, (43,95 % de la variance totale) est représenté par deux groupes opposés. Le premier groupe avec des valeurs positives est représenté par les chlorures (Cl) et la température (T°C) et le deuxième groupe avec des valeurs négatives est représenté par : NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, K<sup>+</sup>, TH et O.D. L'axe F2, représente le pole de la pollution agricole, par les nitrates, le potassium et les phosphates. L'origine des nitrates et des phosphates diffère de celle du potassium ; ces variables sont situées de part et d'autre de l'axe F2. La projection des individus sur l'axe F1, montre que la minéralisation est représentée par la source Bouchiha. La pollution est représentée par la source Benjerrah (individu) qui s'oppose à Ain Guergour où la pollution par les nitrates provient des rejets domestiques. Les éléments qui

régissent la minéralisation (cf., tab. 33) sont corrélés parfaitement entre eux et entre la conductivité électrique. Les éléments de la pollution sont également corrélés entre eux. Les corrélations les plus significatives positivement sont entre  $K^+$  et O.D, entre  $Na^+$  et C.E et entre  $SO_4^{2-}$  et Eh, ces éléments proviendraient donc de la même origine. Et les plus significatives négativement sont entre pH et  $Mg^{2+}$ , entre  $SO_4^{2-}$  et  $Al^{3+}$  et entre Eh et  $Al^{3+}$ , ces éléments proviendraient de deux origines différentes. Les relations entre les éléments majeurs et la minéralisation totale montrent que celle-ci est régie par le calcium, le magnésium et un à degré moindre par le sodium, pour les cations d'une part et, par les chlorures, les bicarbonates et à un degré moindre par les sulfates pour les anions d'autre part.



**Figure 22.** Projection des variables et des individus des eaux souterraines des travertins du bassin de Guelma (mai/2009).

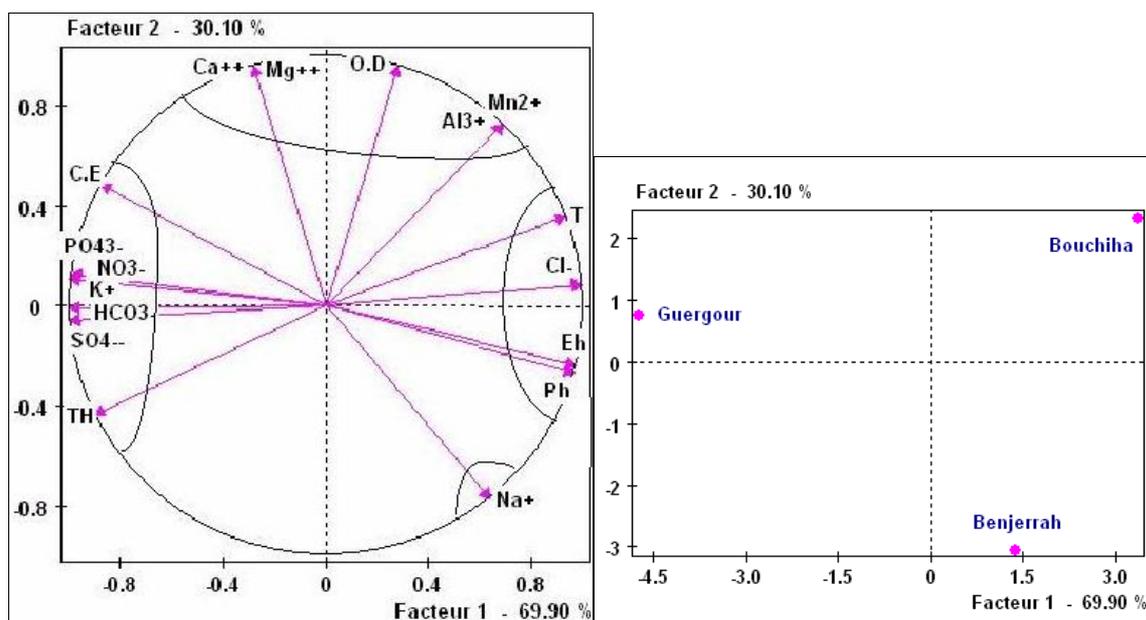
**Tableau 33.** Matrice de corrélation des eaux souterraines des travertins du bassin de Guelma (mai/2009).

	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>--</sup>	C.E	pH	Eh	T°C	O.D	TH°	Al <sup>3+</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>
Ca <sup>++</sup>	1,00															
Mg <sup>++</sup>	0,98	1,00														
K <sup>+</sup>	-0,19	-0,36	1,00													
Na <sup>+</sup>	0,99	0,94	-0,03	1,00												
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,64	0,49	0,64	0,75	1,00											
Cl <sup>-</sup>	-0,09	0,09	-0,96	-0,25	-0,83	1,00										
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,74	0,61	0,52	0,84	0,99	-0,74	1,00									
SO <sub>4</sub> <sup>--</sup>	0,94	0,99	-0,50	0,88	0,35	0,24	0,48	1,00								
C.E	0,98	0,93	0,02	1,00	0,78	-0,29	0,86	0,86	1,00							
pH	-0,99	-1,00	0,31	-0,96	-0,54	-0,03	-0,65	-0,98	-0,95	1,00						
Eh	0,94	0,99	-0,50	0,88	0,35	0,24	0,48	1,00	0,86	-0,98	1,00					
T°C	0,40	0,56	-0,98	0,25	-0,45	0,88	-0,32	0,68	0,20	-0,51	0,68	1,00				
O.D	-0,17	-0,34	1,00	-0,01	0,65	-0,97	0,54	-0,48	0,04	0,28	-0,48	-0,97	1,00			
TH	-0,19	-0,36	1,00	-0,03	0,64	-0,96	0,52	-0,50	0,02	0,31	-0,50	-0,98	1,00	1,00		
Al <sup>3+</sup>	-0,94	-0,99	0,50	-0,88	-0,35	-0,24	-0,48	-1,00	-0,86	0,98	-1,00	-0,68	0,48	0,50	1,00	
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	0,33	0,16	0,87	0,47	0,94	-0,97	0,88	0,00	0,51	-0,21	0,00	-0,73	0,88	0,87	0,00	1,00

En basses eaux (cf., fig. 23), les variables sont réparties sur l'axe F1 (69,90 % de la variance totale) en deux groupes distincts. Le premier avec des valeurs positives est représenté par : pH, Eh, Cl<sup>-</sup> et T°C qui sont corrélés entre eux (cf., tab. 34). Le deuxième groupe avec des valeurs négatives est représenté par : TH, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> et SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>. Les sulfates sont corrélés au potassium, aux nitrates, aux bicarbonates et aux phosphates. Les sulfates et les bicarbonates sont situés au dessous de l'axe F1, ils pourraient avoir une origine lithologique. Les phosphates et les nitrates sont situés au dessus de l'axe F1 et pourraient avoir une origine agricole.

L'axe F2, (30,10 % de la variance totale) est représenté par : Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, O.D, Mn<sup>2+</sup> et Al<sup>3+</sup>, avec des valeurs positives par opposition au Na<sup>+</sup>, avec une valeur négative. Les alcalino-terreux sont situés sur le même coté de l'axe F2 et proviendraient de la même formation géologique. Le sodium est mis en solution par échange de base contre le Ca<sup>2+</sup> de l'eau. Le manganèse et l'aluminium qui régissent l'axe F2 en même temps que les alcalino-terreux, ont une origine différente. Ils pourraient provenir des argiles.

La projection des individus indique que l'axe F1 de la minéralisation qui a une origine anthropique et une origine lithologique est représenté par la source Guergour. La projection sur l'axe F2, indique un phénomène d'oxydation avec apparition de manganèse au niveau de Bouchiha et échange de base avec apparition de sodium au niveau de Benjerrah.



**Figure 23.** Projection des variables et des individus des eaux souterraines des travertins du bassin de Guelma (aout/2009).

**Tableau 34.** Matrice de corrélation des eaux souterraines des travertins du bassin de Guelma (aout/2009).

	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>--</sup>	C.E	pH	Eh	T°C	O.D	TH° F	Mn <sup>2+</sup>	Al <sup>3+</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>
Ca <sup>++</sup>	1,00																
Mg <sup>++</sup>	1,00	1,00															
K <sup>+</sup>	0,39	0,39	1,00														
Na <sup>+</sup>	-0,92	-0,92	-0,72	1,00													
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,27	0,27	0,99	-0,63	1,00												
Cl <sup>-</sup>	-0,19	-0,19	-0,98	0,57	-1,00	1,00											
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,27	0,27	0,99	-0,63	1,00	-1,00	1,00										
SO <sub>4</sub> <sup>--</sup>	0,23	0,23	0,99	-0,59	1,00	-1,00	1,00	1,00									
C.E	0,71	0,71	0,92	-0,93	0,87	-0,83	0,87	0,84	1,00								
pH	-0,52	-0,52	-0,99	0,82	-0,96	0,94	-0,96	-0,95	-0,97	1,00							
Eh	-0,50	-0,50	-0,99	0,80	-0,97	0,95	-0,97	-0,96	-0,96	1,00	1,00						
T°C	0,08	0,08	-0,89	0,32	-0,94	0,96	-0,94	-0,95	-0,64	0,81	0,82	1,00					
O.D	0,84	0,84	-0,18	-0,56	-0,29	0,37	-0,29	-0,34	0,22	0,02	0,05	0,61	1,00				
TH° F	-0,16	-0,16	0,85	-0,24	0,91	-0,94	0,91	0,93	0,58	-0,76	-0,77	-1,00	-0,67	1,00			
Mn <sup>2+</sup>	0,50	0,50	-0,61	-0,11	-0,70	0,75	-0,70	-0,73	-0,25	0,48	0,50	0,90	0,89	-0,94	1,00		
Al <sup>3+</sup>	0,50	0,50	-0,61	-0,11	-0,70	0,75	-0,70	-0,73	-0,25	0,48	0,50	0,90	0,89	-0,94	1,00	1,00	
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	0,40	0,40	1,00	-0,73	0,99	-0,98	0,99	0,98	0,93	-0,99	-0,99	-0,88	-0,16	0,84	-0,59	-0,59	1,00

## Conclusion

L'aquifère des travertins Mio-Pliocène de Guelma, regroupe les sources Benjerrah et Ain Guergour situées sur la rive droite de l'Oued Seybouse et la source Ain Bouchiha située sur sa rive gauche. Les eaux souterraines sont douces et minéralisées. Les teneurs en cations sont dans les normes de potabilité d'eau de consommation, par contre celles des anions (bicarbonates, chlorures et nitrates) sont anormalement élevées, les chlorures et les nitrates sont d'origine anthropique. Le pH des eaux varie de légèrement acide à alcalin d'une période à l'autre. Durant les deux périodes, les teneurs en aluminium sont supérieures à la norme de potabilité.

En hautes eaux, les faciès chimiques des eaux des travertins du bassin de Guelma sont bicarbonatés et chlorurés calciques au niveau des sources Ain Benjerrah et Ain Bouchiha et Bicarbonatés et sulfatés calciques au niveau de la source Ain Guergour. Les eaux sont sursaturées vis-à-vis des minéraux carbonatés en hautes eaux et, sous-saturées vis-à-vis des minéraux évaporitiques. Les eaux ont tendance à s'enrichir en sulfates et en chlorures.

En basses eaux, les faciès chimiques sont chlorurés calciques et sodiques au niveau de la source Ain Benjerrah, chlorurés et sulfatés calciques et magnésiens au niveau d'Ain Guergour et chlorurés calciques et magnésiens au niveau de la source Ain Bouchiha. Les eaux sont sursaturées vis-à-vis des minéraux carbonatés (sauf celles de la source Ain Guergour), qui sont sous-saturées vis-à-vis de la dolomite. Sur la rive droite de l'Oued Seybouse, le pole sodique du faciès chimique des eaux à l'amont (Ain Benjerrah) est substitué par le pole magnésien dans le sens de l'écoulement (Ain Guergour). On constate un état de sous-saturation des eaux vis-à-vis de la dolomite au niveau de cette source dûe à une dédolomitisation provoquée par la dissolution de la dolomite et des sulfates.

En hautes eaux, l'ACP montre que l'axe F1 est celui de la minéralisation, l'axe F2 est celui de la pollution agricole. En basses eaux, l'axe F1 représente la minéralisation d'origine lithologique et agricole, l'axe F2 représente le phénomène d'oxydation.

### V.5.1.3. Les travertins Mio-Pliocène du bassin d'Ain Makhlouf

#### V.5.1.3.1. Paramètres physiques des eaux souterraines des travertins du bassin d'Ain Makhlouf (mai-aout/2009), (cf., tab. 35)

La température des eaux varient entre 14,8 °C (Ain Guerfa froide) et 68,5 °C (H. Belhachani, source thermale), avec une moyenne de 46,77 °C et un écart type de 28,27 °C, en hautes eaux. Les températures des eaux des sources thermales H. Belhachani et H. Guerfa, indiquent une origine profonde selon le gradient géothermique (Ouali, 2007). En basses eaux, la température des eaux d'Ain Guerfa atteint 20,4 °C et reflète une influence par la température ambiante et indique une origine peu profonde. Le pH varie entre 8,2 et 9,9, avec une moyenne de 8,8 et un écart type de 0,907 en hautes eaux et, entre 6,84 et 9,9 avec une moyenne de 8,2 et un écart type de 1,545 en basses eaux. Les eaux de l'aquifère sont alcalines en hautes eaux. En basses eaux elles sont également alcalines (sauf celles de la source de H. Belhachani) qui sont légèrement acides, sans doute à cause d'une pollution anthropique provenant de la population qui entoure la source. Les valeurs du potentiel d'oxydoréduction varient entre -66 et 155 mv, avec une moyenne de 17,67 mv et un écart type de 119,9 mv en hautes eaux, en basses eaux, elles varient entre -161 et 46 mv, avec une moyenne de -49 mv et un écart type de 104,5 mv. L'oxygène dissous varie entre 0,04 et 4,73 mg/l, avec une moyenne de 1,61 mg/l et un écart type de 2,7 mg/l en hautes eaux. Les eaux froides d'Ain Guerfa sont les plus oxygénées avec une valeur de 4,73 mg/l. L'apport en oxygène provient des eaux de pluie, ce qui verse dans la faible profondeur du niveau d'eau dans l'aquifère soumis à l'influence atmosphérique. La conductivité électrique varie entre 1858 et 2250  $\mu\text{s/cm}$  en hautes eaux, avec une moyenne de 2116  $\mu\text{s/cm}$  et un écart type de 223,49  $\mu\text{s/cm}$  et, entre 2000 et 2360  $\mu\text{s/cm}$  en basses eaux, avec une moyenne de 2220  $\mu\text{s/cm}$  et un écart type de 192,87  $\mu\text{s/cm}$ . Durant les deux périodes, les eaux sont très minéralisées à cause de la mise en solution des éléments minéraux. Le titre hydrométrique qui varie entre 14,44 et 41,83 °F, indique que les eaux varient de douces (Belhachani), peu dures (H. Guerfa) à très dures (Guerfa froide) en hautes eaux. En basses eaux, les eaux sont douces.

**Tableau 35.** Paramètres physiques des eaux souterraines les travertins du bassin d'Ain Makhlouf (mai-aout/2009)

Période	Hautes eaux (mai/2009)						Basses eaux (aout/2009)					
	C.E ( $\mu\text{s/cm}$ )	pH	Eh (mv)	T (°C)	O.D (mg/l)	TH (°F)	C.E ( $\mu\text{s/cm}$ )	pH	Eh (mv)	T (°C)	O.D (mg/l)	TH (°F)
H.Belhachani	2240	8,5	-66	68,5	0,04	14,44	2000	6,84	46	69	0,07	13,16
H.Guerfa	2250	9,9	155	57	0,06	23,75	2360	8,07	-32	65,2	0,05	11,46
Guerfa froide	1858	8,2	-36	14,8	4,73	41,83	2300	9,91	-161	20,4	4,7	13,47
Min	1858	8,2	-66	14,8	0,04	14,44	2000	6,84	-161	20,4	0,05	11,16
Max	2250	9,9	155	68,5	4,73	41,83	2360	9,91	46	69	3,5	13,47
Moyenne	2116	8,8	17,67	46,77	1,61	26,673	2220	8,27	-49	51,53	1,207	12,696
Ecart type	223,49	0,907	119,9	28,27	2,702	13,927	192,87	1,545	104,5	27,03	1,986	1,082
<b>Norme</b>	<b>1500</b>	<b>6,5-9,5</b>	/	<b>25</b>	<b>5 &lt;</b>	<b>&lt; 18</b>	<b>1500</b>	<b>6,5-9,5</b>	/	<b>25</b>	<b>5 &lt;</b>	<b>&lt; 18</b>

### V.5.1.3.2. Paramètres chimiques des eaux souterraines des travertins du bassin d'Ain Makhoulouf (mai-aout/2009)

#### V.5.1.3.2.1. Teneurs en cations (mg/l), (cf., tab. 36),

Les teneurs en calcium varient entre 278 et 460 mg/l, avec une moyenne de 362,67 mg/l et un écart type de 91,659 mg/l en période de hautes eaux et, entre 211 et 232 mg/l, avec une moyenne de 221 mg/l et un écart type de 10,504 mg/l en basses eaux. Celles en magnésium varient entre 13 et 32 mg/l, avec une moyenne de 21 mg/l et un écart type de 9,849 mg/l en hautes eaux et, entre 22 et 52 mg/l, avec une moyenne de 39,667 mg/l et un écart type de 15,079 mg/l en basses eaux. Les teneurs en sodium varient entre 78 et 82 mg/l, avec une moyenne de 81,33 mg/l et un écart type de 4,163 mg/l en hautes eaux et, entre 63 et 72 mg/l, avec une moyenne de 69 mg/l et un écart type de 4,583 mg/l en basses eaux. Celles en potassium varient entre 2 et 5 mg/l, avec une moyenne 3,66 mg/l et un écart type de 1,568 mg/l en hautes eaux et entre 5 et 12 mg/l, avec une moyenne de 9,66 mg/l et un écart type de 3,564 mg/l en basses eaux.

En hautes eaux, les teneurs en calcium proviendraient du lessivage des travertins. Les plus élevées sont enregistrées au niveau de H. Guerfa à l'aval de l'écoulement. Celles des autres cations sont d'origine lithologique et s'insèrent dans les normes de potabilité des eaux de consommation. En basses eaux, les teneurs en calcium sont également au dessus de la norme mais diminuent parallèlement à celles en sodium au profit de celles en magnésium et potassium, notamment au niveau des sources H. Belhachani et Guerfa froide. Ces variations des teneurs sont liées au phénomène d'échange de base entre le sodium et le calcium de l'eau contre le magnésium et le potassium de la roche.

**Tableau 36.** Teneurs en cations (mg/l) des eaux souterraines les travertins du bassin d'Ain Makhoulouf (mai-aout/2009)

Période	Hautes eaux (mai/2009)				Basses eaux (aout/2009)			
	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>
H.Belhachani	278	13	2	78	220	52	12	72
H.Guerfa	460	18	5	86	211	22	5	63
Guerfa froide	350	32	4	80	232	45	12	72
Min	278	13	2	78	211	22	5	63
Max	460	32	5	86	232	52	12	72
Moy	362,67	21	3,66	81,33	221	39,66	9,66	69
Ecart type	91,659	9,849	1,528	4,163	10,504	15,079	3,564	4,583
<b>Norme</b>	<b>100</b>	<b>50</b>	<b>12</b>	<b>200</b>	<b>100</b>	<b>50</b>	<b>12</b>	<b>200</b>

#### V.5.1.3.2.2. Teneurs en anions (mg/l) (cf., tab. 37)

En hautes eaux, les teneurs en bicarbonates varient entre 265 et 848 mg/l, avec une moyenne de 575 mg/l et un écart type de 293,30 mg/l. Celles en chlorures varient entre 163,3 et 260 mg/l, avec une moyenne de 212,10 mg/l et un écart type de 48,36 mg/l. Les teneurs en sulfates sont anormalement élevées et varient entre 386 et 482 mg/l, avec une moyenne de 435,33 mg/l et un écart type de 48,056 mg/l. Les valeurs de ces trois anions sont très élevées et dépassent largement les normes de potabilité. Leur origine serait attribuable à une mise en solution par hydrolyse acide et lessivage des travertins par les eaux d'infiltration. Les teneurs en nitrates sont très faibles et sont d'origine naturelle.

En basses eaux, les teneurs en bicarbonates diminuent dans les eaux de Guerfa froide et H. Guerfa et, augmentent dans celles de H. Belhachani. Les teneurs en bicarbonates

seraient dûes au phénomène d'hydrolyse acide qui est plus marqué au niveau de H. Belhachani et qui est lié à l'action dissolvante des eaux chaudes. Les teneurs en nitrates au niveau de Guerfa froide sont relativement plus élevées et pourraient provenir des activités agricoles à l'amont.

**Tableau 37.** Teneurs en anions (mg/l) des eaux souterraines les travertins du bassin d'Ain Makhlouf (mai-aout/2009)

Période	Hautes eaux (mai/2009)				Basses eaux (aout/2009)			
	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>
H.Belhachani	265	260	2	386	350	280	8	260
H.Guerfa	848	213	2	438	292	165	8	218
Guerfa froide	612	163,3	6	482	282	272	12	245
Min	265	163,3	2	386	282	165	8	218
Max	848	260	6	482	350	280	12	260
Moy	575	212,1	3,33	435,33	308	239	9,333	241
Ecart type	293,3	48,36	2,31	48,056	34,312	58,28	2,037	21,03
<b>Norme</b>	<b>250</b>	<b>200</b>	<b>50</b>	<b>250</b>	<b>250</b>	<b>200</b>	<b>50</b>	<b>250</b>

#### V.5.1.3.2.3. Teneurs en éléments mineurs (mg/l) (cf., tab. 38)

En hautes eaux, les teneurs en fer, varient entre 0,06 et 0,3 mg/l, avec une moyenne de 0,15 mg/l et un écart type de 0,13 mg/l, elles sont à la limite de la norme et pourraient provenir des argiles rouges. Celles en aluminium varient entre 0,1 et 1,2 mg/l, avec une moyenne de 0,55 mg/l et un écart type de 0,573 mg/l, la valeur anormalement élevée est enregistrée au niveau de H. Belhachani. Celles en phosphates varient entre 0,06 et 0,5 mg/l, avec une moyenne de 0,206 mg/l et un écart type de 0,254 mg/l. Elles s'insèrent dans la norme de potabilité et seraient attribuables aux activités agricoles.

En basses eaux, les teneurs en fer et en phosphates diminuent légèrement par rapport à celles enregistrées en hautes eaux et indiquent un apport par d'infiltration. Par contre les teneurs en aluminium augmentent grâce au phénomène de l'hydrolyse acide des argiles que surmontent les travertins et indiquent que les faibles teneurs acquises en hautes eaux seraient attribuables à une dilution par les eaux d'infiltration.

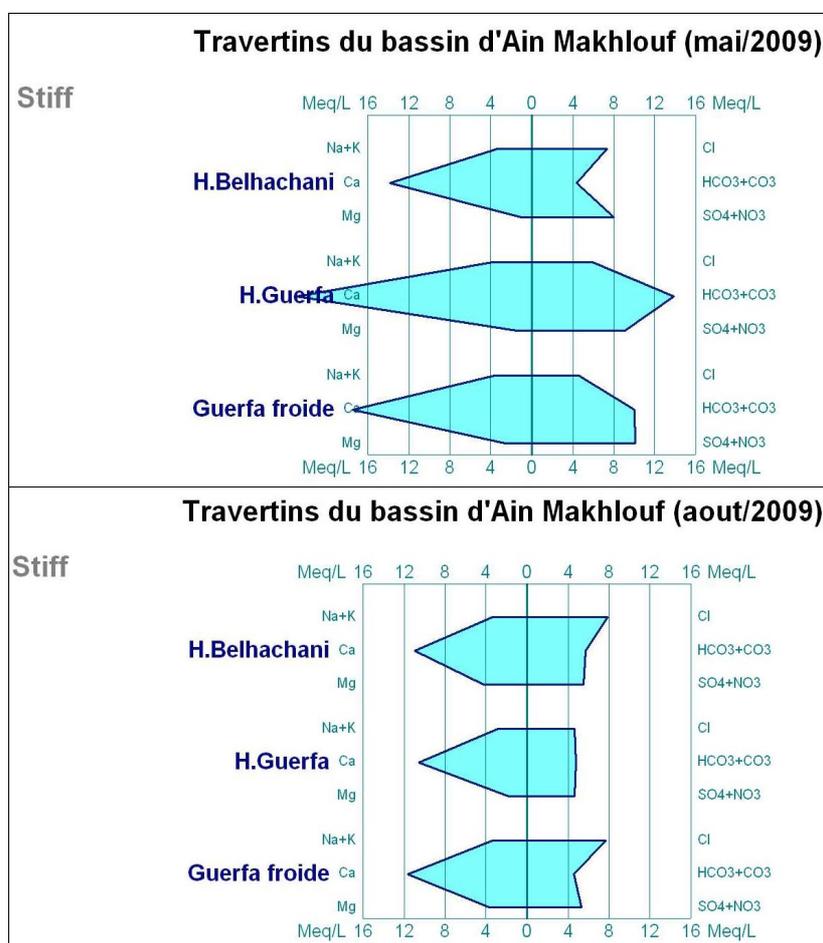
**Tableau 38.** Teneurs en éléments mineurs (mg/l) des eaux souterraines des travertins du bassin d'Ain Makhlouf (mai-aout/2009)

Période	Hautes eaux (mai/2009)			Basses eaux (aout/2009)		
	Fe	Al <sup>3+</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	Fe	Al <sup>3+</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>
H.Belhachani	0,3	1,2	0,5	0	4,2	0,07
H.Guerfa	0,06	0,37	0,06	0,04	4,05	0,06
Guerfa froide	0,09	0,1	0,06	0,06	3,37	0,05
Min	0,06	0,1	0,06	0	3,37	0,05
Max	0,3	1,2	0,5	0,06	4,2	0,07
Moyenne	0,15	0,557	0,2067	0,033	3,8733	0,06
Ecart type	0,13	0,573	0,254	0,031	0,4423	0,01
<b>Norme</b>	<b>0,3</b>	<b>0,2</b>	<b>2</b>	<b>0,3</b>	<b>0,2</b>	<b>2</b>

### V.5.1.3.3. Détermination des faciès chimiques des eaux souterraines des travertins du bassin d'Ain Makhlouf (mai-aout /2009), (cf., fig. 24)

En hautes eaux, les faciès chimiques des eaux sont sulfatés et chlorurés calciques au niveau de H. Belhachani, bicarbonatés et sulfatés calciques au niveau de H. Guerfa et sulfatés et bicarbonatés calciques au niveau de Guerfa froide. On constate que les ions dominants sont : les sulfates, les bicarbonates et les chlorures pour les anions et le calcium pour les cations. Le calcium et les bicarbonates proviendraient du lessivage des travertins, les sulfates et les chlorures proviendraient du lessivage des évaporites.

En basses eaux, les faciès chimiques des eaux sont chlorurés calciques au niveau de H. Belhachani, bicarbonatés et sulfatés et chlorurés calciques au niveau de H. Guerfa et, chlorurés et sulfatés calciques au niveau de Guerfa froide. En cette période estivale, les ions dominants sont : les chlorures, les bicarbonates et les sulfates pour les anions et, le calcium pour les cations. On constate que le calcium est le seul cation dominant durant les deux périodes, les sulfates et les chlorures sont dominants au niveau des sources H. Belhachani et Guerfa froide, également durant les deux périodes. Leur provenance commune, serait liée aux argiles sur lesquelles reposent les travertins.



**Figure 24.** Faciès chimiques des eaux souterraines des travertins du bassin d'Ain Makhlouf (mai-aout/2009).

### V.5.1.3.4. Répartition spatiale des faciès chimiques des eaux souterraines des travertins du bassin d'Ain Makhlouf (mai-aout/2009).

Les principaux faciès chimiques qui caractérisent les eaux souterraines des travertins du bassin d'Ain Makhlouf sont :

- Sulfatés calciques pour les eaux thermales de H. Belhachani et celles de Guerfa froide, qui migrent en chlorurés calciques en basses eaux, - Bicarbonatés calciques au niveau de H. Guerfa, situé à l'aval de H. Belachani. On suppose que cette dernière alimente H. Guerfa et que durant l'écoulement, les eaux lessivent les formations travertineuses et s'enrichissent en bicarbonates, d'où les faciès bicarbonatés calciques durant les deux périodes et la baisse de température des eaux de H. Guerfa par perte de chaleur durant l'écoulement.

#### V.5.1.3.5. Acquisition de la minéralisation des eaux souterraines des travertins du bassin d'Ain Makhoulouf (mai-aout/2009).

En hautes eaux (cf., tab. 39), les eaux souterraines des travertins sont sursaturées vis-à-vis des minéraux carbonatés, surtout au niveau de H. Guerfa, où on note les plus grandes valeurs et à un degré moindre, au niveau de Guerfa froide. Les plus faibles valeurs sont enregistrées au niveau de H. Belhachani qui est la source principale. La température élevée (+ 65°C) des eaux, indique une origine profonde et un jaillissement plus rapide et, par conséquent un temps de contact eau-roche relativement plus court, d'où les faibles valeurs des indices de saturation. On constate également une sous-saturation des eaux vis-à-vis des minéraux évaporitiques au niveau des trois sources.

**Tableau 39.** Indices de saturations des eaux souterraines des travertins du bassin d'Ain Makhoulouf (mai/2009)

Période	Hautes eaux (mai/2009)						
Minéraux	carbonatés				Evaporitiques		
Source	Faciès chimique	Calcite (CaCO <sub>3</sub> )	Dolomite Ca,Mg (CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Aragonite (CaCO <sub>3</sub> )	Anhydrite (CaSO <sub>4</sub> )	Gypse (CaSO <sub>4</sub> ,2H <sub>2</sub> O)	pCO <sub>2</sub> équi(atm)
H.Belhachani	S.Cl.C	1,8	2,07	1,66	-0,73	-0,51	0,00078
H.Guerfa	B.C	3,87	6,14	3,73	-0,54	-0,32	0,0001
Guerfa froide	S.B.C	1,99	2,63	1,79	-0,58	-0,36	0,00353

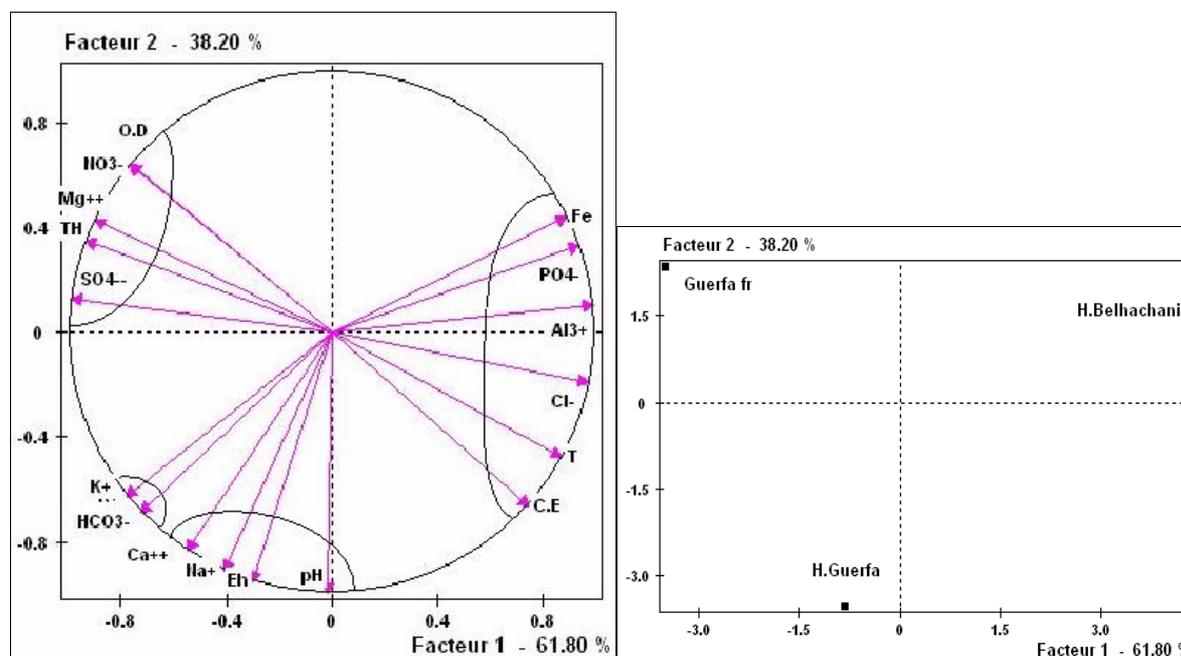
En basses eaux (cf., tab. 40), les eaux sont sursaturées vis-à-vis des minéraux carbonatés, (sauf pour celles de H. Belhachani) où les eaux sont sous-saturées vis-à-vis de la dolomite. Les valeurs des indices les plus élevées sont enregistrées au niveau de la source Guerfa froide, les moins élevées au niveau de H. Guerfa et les plus faibles au niveau de H. Belhachani. En cette période, on note que l'effet du temps de contact eau-roche est plus significatif qu'en hautes eaux.

**Tableau 40.** Indices de saturations des eaux souterraines des travertins du bassin d'Ain Makhoulouf (aout/2009)

Période	Basses eaux (aout/2009)						
Minéraux	carbonatés				Evaporitiques		
Source	Faciès chimique	Calcite (CaCO <sub>3</sub> )	Dolomite Ca,Mg (CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Aragonite (CaCO <sub>3</sub> )	Anhydrite (CaSO <sub>4</sub> )	Gypse (CaSO <sub>4</sub> ,2H <sub>2</sub> O)	pCO <sub>2</sub> équi(atm)
H.Belhachani	Cl.C	0,16	-0,49	0,02	-0,99	-0,77	0,04707
H.Guerfa	B.Cl.S.C	1,33	1,47	1,18	-1,04	-0,82	0,00234
Guerfa froide	Cl.S.C	3,17	5,43	3,02	-0,99	-0,77	0,00003

### V.5.1.3.6. Analyse en composantes principales des eaux souterraines des travertins du bassin d'Ain Makhoulouf (mai-aout/2009)

En hautes eaux (cf., fig. 25), la répartition des variables sur l'axe F1. (61,80 % de la variance totale) montre l'existence de deux groupes distincts, le premier avec des valeurs positives : C.E, T (°C) et Cl<sup>-</sup> d'un coté de l'axe F1 et Al<sup>3+</sup>, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> et Fe de l'autre, le deuxième groupe, avec des valeurs négatives : SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Mg<sup>2+</sup>, TH, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, O.D d'un coté de l'axe F1 et HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> et K<sup>+</sup> de l'autre. L'axe F1 représente la minéralisation, par dissolution des chlorures (Cl) et de l'aluminium (Al<sup>3+</sup>) grâce à la température élevée. Dans le tableau 61, C.E est significativement corrélée à la température, aux chlorures et à l'aluminium. La projection des individus sur l'axe F1, indique que le pole de la minéralisation est représenté au niveau de H. Belhachani. Les variables à valeurs négatives situées au dessus de l'axe F1 sont corrélées entre elles et indiquent une pollution nitratée par oxydation et une dureté magnésienne des eaux. Ces deux phénomènes sont visibles au niveau de la source Guerfa froide située à l'aval des terres agricoles. L'axe F2. (38,20 % de la variance totale) est représenté uniquement par des variables à valeurs négatives : pH, Eh, Na<sup>+</sup> et Ca<sup>2+</sup>, qui sont corrélées entre elles (cf., tab. 41) et régissent l'axe F2 qui représente le phénomène d'oxydoréduction individualisé au niveau de la source H. Guerfa.

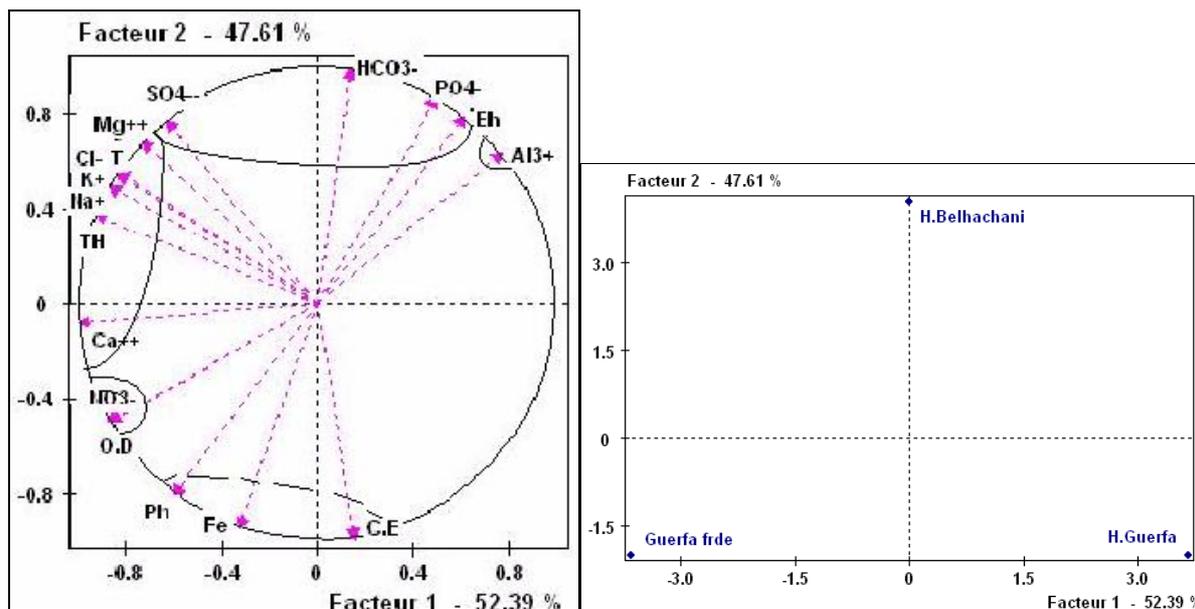


**Figure 25.** Projection des variables et des individus des eaux souterraines des travertins du bassin d'Ain Makhoulouf (mai/2009)

**Tableau 41.** Matrice de corrélation des eaux souterraines des travertins du bassin d'Ain Makhoulouf (mai/2009)

	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	C.E	pH	Eh	T°C	O.D	TH°F	Fe	Al <sup>3+</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>
Ca <sup>++</sup>	1,00																
Mg <sup>++</sup>	0,14	1,00															
K <sup>+</sup>	0,95	0,43	1,00														
Na <sup>+</sup>	0,99	-0,02	0,89	1,00													
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,97	0,36	1,00	0,92	1,00												
Cl <sup>-</sup>	-0,38	-0,97	-0,64	-0,22	-0,58	1,00											
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-0,12	0,97	0,19	-0,28	0,11	-0,87	1,00										
SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	0,44	0,95	0,69	0,29	0,63	-1,00	0,84	1,00									
C.E	0,14	-0,96	-0,17	0,30	-0,09	0,86	-1,00	-0,83	1,00								
pH	0,84	-0,42	0,64	0,92	0,70	0,18	-0,64	-0,12	0,65	1,00							
Eh	0,96	-0,14	0,83	0,99	0,87	-0,11	-0,39	0,17	0,41	0,96	1,00						
T°C	-0,08	-1,00	-0,38	0,08	-0,31	0,95	-0,98	-0,93	0,97	0,47	0,19	1,00					
O.D	-0,12	0,97	0,19	-0,27	0,11	-0,88	1,00	0,84	-1,00	-0,63	-0,38	-0,98	1,00				
TH°F	0,22	1,00	0,51	0,06	0,44	-0,99	0,94	0,97	-0,93	-0,34	-0,06	-0,99	0,94	1,00			
Fe	-0,86	-0,62	-0,98	-0,77	-0,96	0,79	-0,40	-0,83	0,38	-0,46	-0,69	0,58	-0,40	-0,68	1,00		
Al <sup>3+</sup>	-0,64	-0,85	-0,84	-0,50	-0,79	0,95	-0,69	-0,97	0,67	-0,12	-0,40	0,82	-0,69	-0,89	0,94	1,00	
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	-0,80	-0,70	-0,94	-0,69	-0,92	0,86	-0,50	-0,89	0,48	-0,35	-0,60	0,67	-0,50	-0,76	0,99	0,97	1,00

En basses eaux (cf., fig. 26), les variables se répartissent sur l'axe F1 (52,39 % de la variance totale) en deux groupes distincts, l'un à valeurs positives, représenté par : Al<sup>3+</sup>, et l'autre à valeurs négatives, représenté par : O.D, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Ca<sup>2+</sup> d'un coté de l'axe F1 et, Mg<sup>2+</sup>, TH, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, T°C et Cl<sup>-</sup> de l'autre coté. Cette répartition de part et d'autre de l'axe F1 indique deux origines différentes. L'axe F1, représente le pôle de la pollution de deux types, anthropique par oxydation des nitrates et lithologique par hydrolyse acide. Les coefficients de corrélation inscrits dans le tableau 42, témoignent de l'étroite liaison entre les variables à valeurs négatives situées au dessus de l'axe F1 qui proviendraient des formations évaporitiques et entre les nitrates qui acquis par oxydation. Le calcium proviendrait des travertins par hydrolyse acide. L'axe F2, (47,61 % de la variance totale) est représenté par les variables à valeurs positives : SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> et Eh, par opposition aux variables à valeurs négatives : C.E, pH et Fe. L'axe F2 représente le phénomène d'oxydoréduction. Les bicarbonates proviendraient de la dissolution de la calcite par agressivité des eaux de H. Belhachani riches en CO<sub>2</sub>. La projection des individus en basses eaux (cf., fig. 30), indique que le phénomène de la pollution agricole est représenté au niveau de la source Guerfa froide, le phénomène d'oxydoréduction est représenté au niveau de la source thermale H. Belhachani et le phénomène d'évaporation est représenté au niveau de la source thermale H. Guerfa.



**Figure 26.** Projection des variables et des individus : des travertins du bassin d’Ain Makhoulouf (aout/2009).

**Tableau 42.** Matrice de corrélation des eaux souterraines des travertins du bassin d’Ain Makhoulouf (aout/2009)

	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	C.E	pH	Eh	T°C	O.D	TH°F	Fe	Al <sup>3+</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>
Ca <sup>++</sup>	1,00																
Mg <sup>++</sup>	0,67	1,00															
K <sup>+</sup>	0,82	0,97	1,00														
Na <sup>+</sup>	0,82	0,97	1,00	1,00													
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-0,22	0,57	0,38	0,38	1,00												
Cl <sup>-</sup>	0,78	0,99	1,00	1,00	0,43	1,00											
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,90	0,29	0,50	0,50	-0,61	0,45	1,00										
SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	0,57	0,99	0,94	0,94	0,68	0,96	0,16	1,00									
C.E	-0,07	-0,79	-0,63	-0,63	-0,96	-0,68	0,36	-0,86	1,00								
pH	0,66	-0,11	0,11	0,11	-0,88	0,05	0,92	-0,24	0,70	1,00							
Eh	-0,68	0,08	-0,14	-0,14	0,86	-0,08	-0,93	0,22	-0,68	-1,00	1,00						
T°C	0,78	0,99	1,00	1,00	0,44	1,00	0,44	0,96	-0,68	0,04	-0,07	1,00					
O.D	0,91	0,30	0,50	0,50	-0,61	0,45	1,00	0,17	0,35	0,92	-0,93	0,44	1,00				
TH°F	0,90	0,93	0,99	0,99	0,24	0,98	0,62	0,88	-0,51	0,26	-0,28	0,98	0,62	1,00			
Fe	0,40	-0,40	-0,19	-0,19	-0,98	-0,25	0,76	-0,52	0,88	0,95	-0,95	-0,26	0,75	-0,05	1,00		
Al <sup>3+</sup>	-0,82	-0,13	-0,35	-0,35	0,74	-0,29	-0,99	0,01	-0,51	-0,97	0,98	-0,28	-0,98	-0,48	-0,86	1,00	
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	-0,57	0,22	0,00	0,00	0,93	0,06	-0,87	0,35	-0,78	-0,99	0,99	0,07	-0,86	-0,14	-0,98	0,94	1,00

**Conclusion**

L’aquifère est représenté par les travertins Mio-pliocène d’Ain Makhoulouf dans lesquels on recense deux sources thermales et une source froide. Durant les deux périodes, les eaux sont très minéralisées. Le titre hydrométrique qui varie entre 14,44 et 41,83 °F, indique que les eaux varient de douces (Belhachani), peu dures (H. Guerfa) à très dures (Guerfa froide) en hautes eaux et douces au niveau des trois sources en basses eaux.

En hautes eaux, les faciès chimiques des eaux de H. Belhachani sont sulfatés et chlorurés calciques, bicarbonatés et sulfatés calciques au niveau de H. Guerfa et sulfatés et bicarbonatés calciques au niveau de Guerfa froide. En basses eaux, les faciès chimiques des eaux sont chlorurés calciques au niveau de H. Belhachani, bicarbonatés et sulfatés et chlorurés calciques au niveau de H. Guerfa et, chlorurés et sulfatés calciques au niveau de Guerfa froide.

Les eaux souterraines des travertins sont sursaturées vis-à-vis des minéraux carbonatés, en hautes eaux surtout au niveau de H. Guerfa, où on note les plus grandes valeurs de l'indice de saturation et à un degré moindre, au niveau de Guerfa froide. On constate également une sous-saturation des eaux vis-à-vis des minéraux évaporitiques au niveau des trois sources. En basses eaux, les eaux sont sursaturées vis-à-vis des minéraux carbonatés, sauf pour celles de H. Belhachani où les eaux sont sous-saturées vis-à-vis de la dolomite.

En hautes eaux, l'axe F1 représente la minéralisation, par dissolution des chlorures (Cl<sup>-</sup>) et de l'aluminium (Al<sup>3+</sup>) grâce à la température élevée, l'axe F2 représente le phénomène d'oxydoréduction individualisé au niveau de la source H. Guerfa. En basses eaux, l'axe F1, représente le pôle de la pollution de deux types ; anthropique par oxydation des nitrates et lithologique par hydrolyse acide, l'axe F2 représente le phénomène d'oxydoréduction au niveau de la source thermale H. Belhachani et le phénomène d'évaporation au niveau de la source thermale H. Guerfa.

#### V.5.1.4. Les calcaires lacustres

Ils sont représentés par la source Ain Rosfa qui émerge au contact des calcaires avec les argiles rouges.

##### V.5.1.4.1. Paramètres physiques des eaux souterraines des calcaires lacustres (cf., tab. 43)

**Tableau 43.** Paramètres physiques des eaux souterraines des calcaires lacustres

Période	Hautes eaux (mai/2009)						Basses eaux (aout/2009)					
	C.E μs/cm	pH	Eh mv	T °C	OD mg/l	TH °F	C.E μs/cm	pH	Eh mv	T °C	OD mg/l	TH °F
A. Rosfa	1954	8,4	2	18,8	3,65	11,98	2020	7,4	-47	19	2,67	9,38
<b>Norme</b>	<b>1500</b>	<b>6,5-9,5</b>	<b>/</b>	<b>25</b>	<b>5 &lt;</b>	<b>&lt; 18</b>	<b>1500</b>	<b>6,5-9,5</b>	<b>/</b>	<b>25</b>	<b>5 &lt;</b>	<b>&lt; 18</b>

La température des eaux varie entre 18,8 °C en période de hautes eaux et 19 °C en basses eaux. Cette légère variation entre les deux périodes, traduit une influence directe par la température ambiante et une faible profondeur du niveau de l'aquifère. Le pH varie entre 8,4 et 7,4 de la période des hautes eaux vers celle des basses eaux. Les eaux changent donc d'un pH alcalin à un pH neutre. Cette modification est attribuée à un apport en substances dissoutes par les eaux d'infiltration, surtout les matières organiques dissoutes par les eaux d'irrigation. Les teneurs en oxygène dissous et celles de Eh sont également élevées en hautes eaux et indiquent un apport par les eaux d'infiltration. La conductivité électrique varie de 1954 μs/cm en hautes eaux à 2020 μs/cm en basses eaux, on enregistre une légère augmentation par phénomène d'évapotranspiration mais durant les deux périodes elle est supérieure à la norme de potabilité, les eaux sont donc minéralisées. Le degré hydrotimétrique diminue également de 11,98 °F en hautes eaux, à 9,38 °F en basses eaux et reste dans les normes des eaux douces.

##### V.5.1.4.2. Paramètres chimiques des eaux souterraines des calcaires lacustres (mai-aout/2009).

###### V.5.1.4.2.1. Teneurs en cations (mg/l), (cf., tab. 44)

En hautes eaux, les teneurs des eaux en calcium, magnésium et potassium sont supérieures à celles enregistrées en basses eaux, sauf celles en sodium. Pour les premiers cations les teneurs seraient attribuables au lessivage de l'encaissant par les eaux de pluie, pour le sodium, la teneur élevée en basses eaux, serait liée à un échange de base contre le calcium de l'eau.

**Tableau 44.** Teneurs en cations (mg/l) des eaux souterraines des calcaires lacustres (mai-aout/2009).

Période	Hautes eaux (mai/2009)				Basses eaux (aout/2009)			
	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>
A. Rosfa	178	74	8	93	156	38	5	102
<b>Norme</b>	<b>100</b>	<b>50</b>	<b>12</b>	<b>200</b>	<b>100</b>	<b>50</b>	<b>12</b>	<b>200</b>

###### V.5.1.4.2.2. Teneurs en anions (mg/l), (cf., tab. 45)

Comme pour les cations, les teneurs des eaux souterraines en anions enregistrées en hautes eaux sont élevées par rapport à celles enregistrées en basses eaux et témoignent donc

d'un apport en sels dissous par infiltration des eaux de pluie par lessivage des formations géologiques traversées. Les teneurs en bicarbonates et en chlorures sont supérieures aux normes de potabilité durant les deux périodes, celles en nitrates sont inférieures aux normes mais assez élevées pour faire penser à une origine anthropique. Celles en sulfates s'insèrent dans la norme de potabilité durant les deux périodes et seraient d'origine lithologique.

**Tableau 45.** Teneurs en anions (mg/l), des eaux souterraines des calcaires lacustres (mai-aout/2009).

Période	Hautes eaux (mai/2009)				Basses eaux (aout/2009)			
	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>
Nom								
A. Rosfa	482	300	31	110	354	270	31	85
<b>Norme</b>	<b>250</b>	<b>200</b>	<b>50</b>	<b>250</b>	<b>250</b>	<b>200</b>	<b>50</b>	<b>250</b>

#### V.5.1.4.2.3. Teneurs en éléments (mg/l), mineurs (cf., tab. 46)

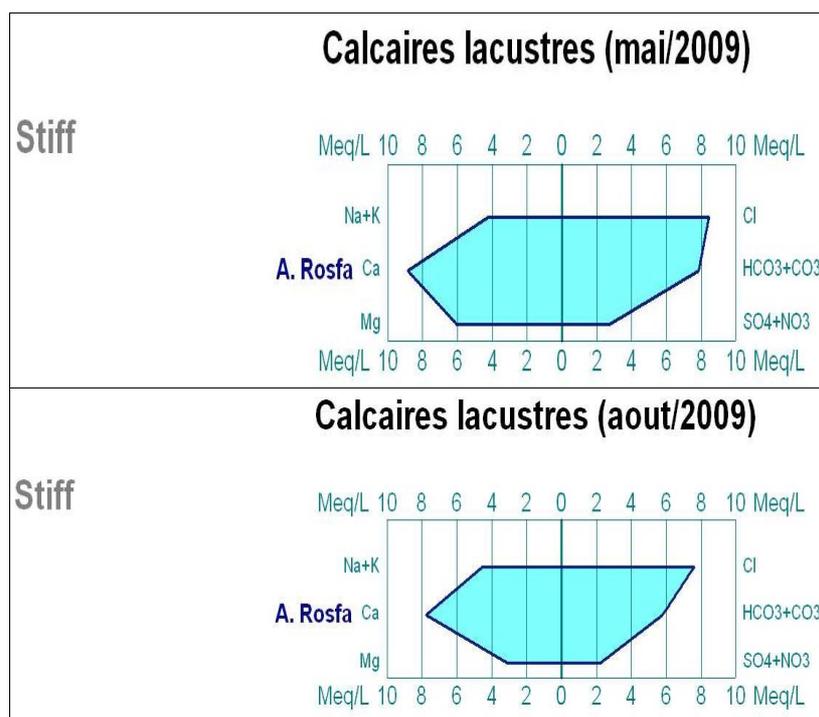
Les éléments mineurs présents dans les eaux souterraines des calcaires lacustres, sont l'aluminium et les phosphates. En hautes eaux, leurs teneurs sont supérieures aux normes et pourraient provenir de la dissolution des argiles par infiltration. En basses eaux, les teneurs en aluminium diminuent mais sont toujours anormalement élevées, celles en phosphates diminuent en dessous de la norme. La diminution des teneurs en aluminium et en phosphates en basses eaux, indiquent que les teneurs seraient acquises par infiltrations et hydrolyse acide en hautes eaux et par hydrolyse acide en basses eaux.

**Tableau 46.** Teneurs en éléments mineurs (mg/l), des eaux souterraines des calcaires lacustres (mai-aout/2009).

Période	Hautes eaux (mai/2009)		Basses eaux (aout/2009)	
	Al <sup>3+</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	Al <sup>3+</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>
Nom				
A. Rosfa	3,4	2,7	1,4	0,21
<b>Norme</b>	<b>0,2</b>	<b>2</b>	<b>0,2</b>	<b>2</b>

#### V.5.1.4.3. Détermination des faciès chimiques des eaux souterraines des calcaires lacustres (mai-aout /2009), (cf., fig. 27).

En hautes eaux, les faciès chimiques des eaux souterraines des calcaires lacustres sont : chlorurés et bicarbonatés calciques et magnésiens et, chlorurés et bicarbonatés calciques et sodiques en basses eaux. Les ions dominants responsables des faciès sont les chlorures et les bicarbonates pour les anions et le calcium, le magnésium et le sodium pour les cations. On constate que le magnésium de l'eau est substitué par le sodium des argiles par échange de base en période de basses eaux, cet échange est favorisé par évaporation. Les ions caractérisant les faciès chimiques proviennent essentiellement des bancs calcaires en intercalations avec les argiles rouges.



**Figure 27.** Faciès chimiques des eaux souterraines des calcaires lacustres (mai-aout/2009)

#### V.5.1.4.4. Acquisition de la minéralisation des eaux souterraines des calcaires lacustres (mai-aout/2009)

Les eaux souterraines des calcaires lacustres sont saturées vis-à-vis des minéraux carbonatés durant les deux périodes, avec des valeurs plus élevées en hautes eaux (cf., tab. 47) et, sous-saturées vis-à-vis des minéraux évaporitiques également durant les deux périodes, avec des valeurs légèrement inférieures en basses eaux (cf., tab. 48). Compte tenu de ces variations décroissantes de la période des hautes eaux vers celle des basses eaux, on pense que les teneurs enregistrées en hautes eaux proviendraient essentiellement par infiltration et qui, viennent s'ajouter à celles acquises par hydrolyse au sein d l'aquifère.

**Tableau 47.** Indices de saturation des eaux souterraines des calcaires lacustres (mai/2009)

Période	Hautes eaux (mai/2009)						
Minéraux	carbonatés			Evaporitiques			
	Faciès chimique	Calcite (CaCO <sub>3</sub> )	Dolomite Ca,Mg (CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Aragonite (CaCO <sub>3</sub> )	Anhydrite (CaSO <sub>4</sub> )	Gypse (CaSO <sub>4</sub> ,2H <sub>2</sub> O)	pCO <sub>2</sub> équi(atm)
Rosfa	Cl.B.C.M	1,78	2,98	1,63	-1,44	-1,22	0,00384

**Tableau 48.** Indices de saturation des eaux souterraines des calcaires lacustres (aout/2009)

Période	Basses eaux (Aout/2009)						
Minéraux	carbonatés			Evaporitiques			
	Faciès chimique	Calcite (CaCO <sub>3</sub> )	Dolomite Ca,Mg (CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Aragonite (CaCO <sub>3</sub> )	Anhydrite (CaSO <sub>4</sub> )	Gypse (CaSO <sub>4</sub> ,2H <sub>2</sub> O)	pCO <sub>2</sub> équi(atm)
Rosfa	Cl.B.C.N	0,61	0,42	0,47	-1,57	-1,35	0,01332

## Conclusion

Le programme qui traite l'analyse en composantes principales ne prend en charge que trois individus et plus, c'est pourquoi cette partie ne comprend pas cet outil d'interprétation.

L'aquifère est représenté par des calcaires lacustres en intercalation avec des argiles rouges d'âge Mio-Pliocène.

La température des eaux souterraines des calcaires lacustres varie entre 18,8 °C en période de hautes eaux et 19 °C en basses eaux. Cette légère variation entre les deux périodes, traduit une influence directe par la température ambiante et indique une faible profondeur du niveau de l'aquifère. Les eaux changent d'un pH alcalin à un pH neutre. Cette modification serait attribuée à un apport en matières organiques dissoutes par les eaux d'infiltration. La conductivité électrique varie de 1954  $\mu\text{s}/\text{cm}$  en hautes eaux à 2020  $\mu\text{s}/\text{cm}$  en basses eaux, on enregistre une légère augmentation par phénomène d'évapotranspiration mais durant les deux périodes elle est supérieure à la norme de potabilité, les eaux sont donc minéralisées. Le degré hydrotimétrique diminue également de 11,98 °F en hautes eaux, à 9,38 °F en basses eaux et reste dans les normes des eaux douces. En hautes eaux, les faciès chimiques des eaux souterraines des calcaires lacustres sont : chlorurés et bicarbonatés calciques et magnésiens, en basses eaux, ils sont chlorurés et bicarbonatés calciques et sodiques. Les eaux souterraines des calcaires lacustres sont sursaturées vis-à-vis des minéraux carbonatés durant les deux périodes, avec des valeurs plus élevées en hautes eaux et sous-saturées vis-à-vis des minéraux évaporitiques également durant les deux périodes, avec des valeurs légèrement inférieures en basses eaux. Compte tenu de ces variations décroissantes de la période de hautes eaux vers celle de basses eaux, on pense que les teneurs enregistrées en hautes eaux proviendraient essentiellement par infiltration et qui, viennent s'ajouter à celles acquises par hydrolyse au sein de l'aquifère.

## V.5.2- Le domaine allochtone

### V.5.2.1. Les formations numidiennes :

Ce sont des formations gréseuses d'âge Aquitanien au sommet qui reposent sur des argiles d'âge Oligocène.

#### V.5.2.1.1. Paramètres physiques des eaux souterraines dans le Numidien (mai-aout/2009) (cf., tab. 49)

En hautes eaux, les températures varient entre 17,5 à Matwia et 19,5 °C à Ain Bensmih, avec une moyenne de 18,6 °C et un écart type de 1,556 °C. Ces températures proches de celles de l'air au niveau de Matwia indiquent une influence atmosphérique directe à travers la surface fissurée ou friable des grès mais au niveau d'Ain Bensmih leur évolution à l'inverse de celles de l'air serait dûe soit à la présence d'une couche de couverture ou à une origine profonde. Le pH varie entre 8 et 8,7 avec une moyenne de 8,35 et un écart type de 0,495. Les teneurs de l'oxygène dissous et celles de Eh, sont faibles et légèrement élevées en hautes eaux par apport des eaux d'infiltration. La conductivité électrique, varie entre 100 µs/cm (A. Matwia) et 1215 µs/cm (A. Bensmih), avec une moyenne de 657,5 µs/cm et un écart type de 788,4 µs/cm et indique que les eaux de Bensmih sont plus minéralisées que celles de Matwia et que la vitesse de circulation des eaux est d'autant plus grande qu'elle ne permet pas une dissolution suffisante des minéraux contenus dans la roche, d'où la faible valeur de la conductivité électrique.

En basses eaux, la diminution de la température des eaux au niveau d'Ain Bensmih implique la présence d'une couche de couverture ou une origine profonde. Le pH varie de neutre (7,2) à A. Bensmih à alcalin (8,1) à A. Matwia. La conductivité électrique varie entre 798 et 1345 µs/cm, avec une moyenne de 1072 µs/cm et un écart type de 368,8 µs/cm. On enregistre une augmentation remarquable de la conductivité électrique des eaux souterraines, notamment au niveau d'Ain Matwia sous l'effet de l'évaporation à travers la couche gréseuse de surface. Les faibles valeurs du potentiel d'oxydoréduction et de l'oxygène dissous enregistrées au niveau de la source A. Bensmih confirment l'origine profonde des eaux. Les valeurs de la dureté des eaux varient entre 8,25 et 10,15 °F en hautes eaux et, entre 7,91 et 9,93 °F en basses eaux, marquant une légère augmentation en hautes eaux dûes à l'infiltration. Durant les deux périodes elles s'insèrent dans la fourchette des eaux douces.

**Tableau 49.** Paramètres physiques des eaux souterraines dans le Numidien (mai-aout/2009)

Période	Hautes eaux (mai/2009)						Basses eaux (aout/2009)					
	C.E µs/cm	pH	Eh mv	T °C	O.D mg/l	TH °F	C.E µs/cm	pH	Eh mv	T °C	O.D mg/l	TH °F
A.Bensmih	1215	8,7	-50	19,7	0,32	8,25	1345	7,2	-71	19	0,1	7,91
A. Matwia	100	8	-22	17,5	1,35	10,15	798	8,1	-34	22,8	1,4	9,93
Min	100	8	-50	17,5	0,32	8,25	798	7,2	-71	19	0,1	7,91
Max	1215	8,7	-22	19,7	1,35	10,15	1345	8,13	-34	22,8	1,4	9,93
Moyenne	657,5	8,35	-36	18,6	0,835	9,2	1072	7,66	-52,5	20,9	0,75	8,92
Ecart type	788,4	0,495	19,8	1,556	0,728	1,3435	386,8	0,658	26,16	2,687	0,919	1,428
<b>Norme</b>	<b>1500</b>	<b>6,5-9,5</b>	<b>/</b>	<b>25</b>	<b>5&lt;</b>	<b>&lt; 18</b>	<b>1500</b>	<b>6,5-9,5</b>	<b>/</b>	<b>25</b>	<b>5 &lt;</b>	<b>&lt; 18</b>

### V.5.2.1.2. Paramètres chimiques des eaux souterraines dans le Numidien (mai-aout/2009)

#### V.5.2.1.2.1. Teneurs en cations (mg/l), (cf., tab. 50)

En hautes eaux, les teneurs en calcium varient entre 140 et 180 mg/l, avec une moyenne de 164 mg/l et un écart type de 33,94 mg/l. Celles en magnésium varient entre 18 et 30mg/l, avec une moyenne de 24 mg/l et un écart type de 8,485 mg/l. Dans les deux sources, les teneurs en calcium anormalement élevées proviendraient par infiltration et par hydrolyse acide dans l'aquifère. Les faibles teneurs en en magnésium et en potassium, s'insèrent dans les normes de potabilité et seraient d'origine lithologique. Celles en sodium varient entre 26 et 70 mg/l, avec une moyenne de 48 mg/l et un écart type de 31,11 mg/l. Les fortes teneurs sont enregistrées au niveau d'Ain Bensmih.

En basses eaux, les teneurs en calcium diminuent au profit des teneurs en sodium et du magnésium, au niveau de la source Matwia. On assiste donc un phénomène d'échange de base du calcium de l'eau contre le sodium de la roche. Les teneurs en magnésium augmentent sensiblement et varient entre 32 et 70 mg/l, avec une moyenne de 51 mg/l et un écart type de 26,87 mg/l. Les faibles teneurs du potassium varient entre 1 et 3 mg/l durant les deux périodes et seraient d'origine lithologique.

**Tableau 50.** Teneurs en cations (mg/l), des eaux souterraines dans le Numidien (mai-aout/2009)

Période	Hautes eaux (mai/2009)				Basses eaux (aout/2009)			
	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>
A. Bensmih	140	30	1	70	100	70	3	90
A. Matwia	188	18	3	26	172	32	3	22
Min	140	18	1	26	100	32	3	22
Max	180	30	3	70	172	70	3	90
Moy	164	24	2	48	136	51	3	56
Ecart type	33,94	8,485	1,414	31,11	50,91	26,87	0	48,08
<b>Norme</b>	<b>100</b>	<b>50</b>	<b>12</b>	<b>200</b>	<b>100</b>	<b>50</b>	<b>12</b>	<b>200</b>

#### V.5.2.1.2.2. Teneurs en anions (mg/l), (cf., tab. 51).

En hautes eaux, les teneurs en bicarbonates anormalement élevées varient entre 320 et 362 mg/l, avec une moyenne de 341 mg/l et un écart type de 29,698 mg/l. Ces teneurs seraient attribuables au lessivage du substratum argilo-marneux. Celles en chlorures varient entre 28 et 150 mg/l, avec une moyenne de 89 mg/l et un écart type de 86,27 mg/l, elles s'insèrent dans les normes de potabilité et seraient d'origine lithologique pour les eaux de d'Ain Matwia mais pourraient provenir des rejets domestiques au niveau d'Ain Bensmih parce que la source émerge à l'aval immédiat de l'agglomération. Les teneurs en nitrates qui varient entre 2 et 13 mg/l, avec une moyenne de 7,5 mg/l et un écart type de 7,7782 mg/l seraient d'origine lithologique, celles en sulfates, varient entre 168 et 232 mg/l, avec une moyenne de 200mg/l et un écart type de 45,255 mg/l. Elles sont également dans les normes de potabilité et d'origine lithologique. Ces teneurs seraient liées au phénomène de lessivage des minéraux contenus dans la roche encaissante par les eaux de pluie.

En basses eaux, les teneurs en anions sont plus élevées qu'en hautes eaux au niveau de la source Bensmih, sauf pour les chlorures qui restent stables et qui pourraient être d'origine anthropique, ainsi que les nitrates. Donc, on assiste à une concentration en anions par évaporation (sauf pour les bicarbonates) qui diminuent au niveau d'Ain Matwia.

**Tableau 51.** Teneurs en anions (mg/l), des eaux souterraines dans le Numidien (mai-aout/2009)

Période	Hautes eaux (mai/2009)				Basses eaux (aout/2009)			
Nom	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
A. Bensmih	320	150	13	168	354	150	32	200
A. Matwia	362	28	2	232	242	80	6	245
Min.	320	28	2	168	242	80	6	200
Max.	362	150	13	232	354	150	32	245
Moyenne	341	89	7,5	200	298	115	19	222,5
Ecart type	29,698	86,27	7,7782	45,255	79,196	49,5	18,385	31,82
<b>Norme</b>	<b>250</b>	<b>200</b>	<b>50</b>	<b>250</b>	<b>250</b>	<b>200</b>	<b>50</b>	<b>250</b>

**V.5.2.1.2.3. Teneurs en éléments mineurs (mg/l), (cf., tab. 52)**

En hautes eaux, les éléments mineurs contenus dans les eaux souterraines sont le manganèse et l'aluminium. En basses eaux, les eaux souterraines ne contiennent pas de manganèse, son origine serait attribuable aux eaux d'infiltration. Les teneurs en manganèse des eaux varient entre 0,1 et 0,21 mg/l, avec une moyenne de 0,15 mg/l et un écart type de 0,0778 mg/l. Celles en aluminium varient entre 0,1 et 0,3 mg/l, avec une moyenne de 0,2 mg/l et un écart type de 0,141 mg/l. Les teneurs en manganèse au niveau d'Ain Bensmih sont supérieures aux normes de potabilité, leur présence dans les eaux indique un milieu pauvre en oxygène dissous. Celles en aluminium sont supérieures aux normes de potabilité au niveau d'Ain Bensmih. En basses eaux, les teneurs en aluminium sont dans la fourchette des normes de potabilité et seraient attribuables au lessivage des argiles numidiennes de base.

**Tableau 52.** Teneurs en éléments mineurs (mg/l) des eaux souterraines dans le Numidien (mai-aout/2009)

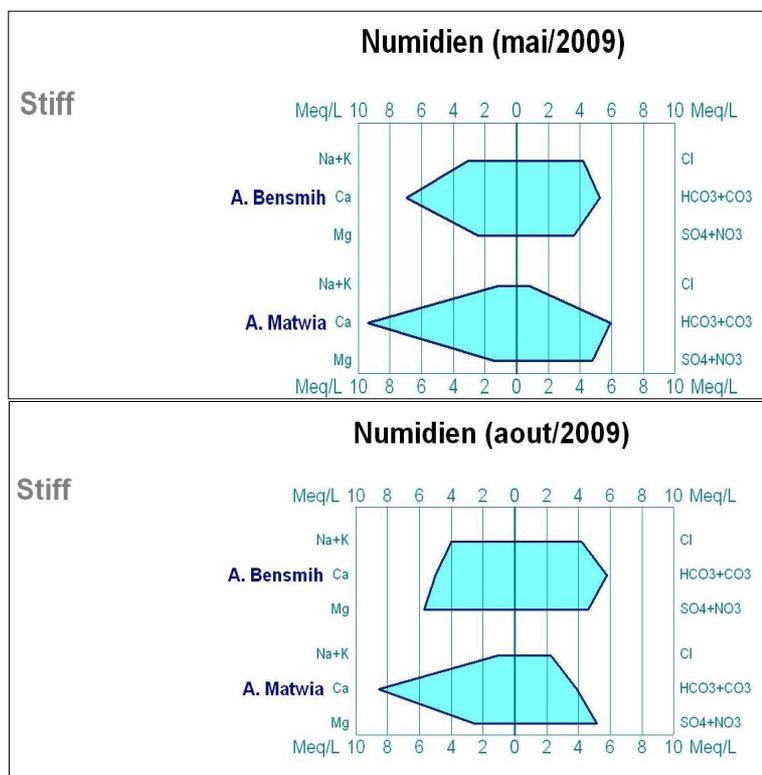
Période	Hautes eaux (mai/2009)		Basses eaux (aout/2009)
Nom	Mn <sup>++</sup>	Al <sup>3+</sup>	Al <sup>3+</sup>
A. Bensmih	0,1	0,3	0,2
A. Matwia	0,21	0,1	0,1
Min.	0,1	0,1	0,1
Max.	0,21	0,3	0,2
Moyenne	0,155	0,2	0,15
Ecart type	0,0778	0,141	0,0707
<b>Norme</b>	<b>0,05</b>	<b>0,2</b>	<b>0,2</b>

**V.5.2.1.3. Détermination des faciès chimiques des eaux souterraines du Numidien (mai-aout/2009), (cf., fig. 28)**

Les faciès chimiques des eaux souterraines, des formations numidiennes sont :

En hautes eaux, ils sont bicarbonatés et chlorurés calciques pour les eaux de Bensmih et, bicarbonatés et sulfatés calciques pour les eaux de Matwia. En basses eaux, ils sont bicarbonatés magnésiens pour les eaux de Bensmih et, sulfatés calciques pour celles de Matwia. Les ions dominants qui caractérisent les faciès chimiques sont : le calcium et magnésium pour les cations et, les bicarbonates et les pour les anions. L'origine des ions

calcium, magnésium et sulfates serait le lessivage des de la roche encaissante par les eaux d'infiltration, les bicarbonates pourraient être d'origine profonde ou provenir de la dégradation de la matière organique au niveau d'Ain Bensmih. Les chlorures pourraient provenir des rejets domestiques.



**Figure 28.** Faciès chimiques des eaux souterraines du Numidien (mai-aout/2009).

#### V.5.2.1.4. Répartition spatiale des faciès chimiques des eaux souterraines du Numidien (mai-aout/2009).

Au niveau de la source Bensmih, les ions dominants qui caractérisent les faciès chimiques des eaux souterraines sont : le calcium et le magnésium pour les cations et les bicarbonates pour les anions. Au niveau de la source Matwia, les ions dominants qui caractérisent les faciès chimiques des eaux souterraines sont : le calcium pour les cations et les bicarbonates et les sulfates pour les anions. Les bicarbonates pourraient être d'origine profonde ou provenir de la dégradation de la matière organique au niveau d'Ain Bensmih.

#### V.5.2.1.5. Acquisition de la minéralisation des eaux souterraines dans le Numidien (mai-aout/2009)

En hautes eaux (cf., tab. 53), les eaux souterraines d'Ain Bensmih bicarbonatées calciques sont sursaturées vis-à-vis des minéraux carbonatés et sous-saturées vis-à-vis des minéraux évaporitiques. En basses eaux (cf., tab. 54), les eaux sont bicarbonatées magnésiennes, on enregistre l'absence du pôle secondaire chloruré et l'apparition du pôle dominant magnésien. Ce qui explique l'origine du calcium et des chlorures par infiltration en période de hautes eaux. L'apparition du pôle magnésien en basses eaux serait attribuable au lessivage du substratum argileux. Au niveau de la source Matwia, les eaux bicarbonatées et sulfatées calciques sont sursaturées vis-à-vis des minéraux carbonatés et sous-saturées vis-à-vis des minéraux évaporitiques en période de hautes eaux. En basses eaux, le pôle secondaire sulfaté migre en pôle dominant pour attribuer aux eaux un faciès sulfaté calcique.

Donc, en l'absence d'eau d'infiltration les sulfates proviendraient du lessivage du substratum argileux contenant des gypses par hydrolyse acide.

**Tableau 53.** Indices de saturation des eaux souterraines dans le Numidien (mai/2009)

Période	Hautes eaux (mai/2009)						
Minéraux	carbonatés				Evaporitiques		
Source	Faciès chimique	Calcite (CaCO <sub>3</sub> )	Dolomite Ca,Mg (CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Aragonite (CaCO <sub>3</sub> )	Anhydrite (CaSO <sub>4</sub> )	Gypse (CaSO <sub>4</sub> ,2H <sub>2</sub> O)	pCO <sub>2</sub> équ(atm)
Bensmih	B.Cl.C	1,84	2,81	1,69	-1,3	-1,08	0,00061
Matwia	B.S.C	1,32	1,42	1,17	-1,03	-0,81	0,00364

**Tableau 54.** Indices de saturation des eaux souterraines dans le Numidien (aout/2009)

Période	Basses eaux (aout/2009)						
Minéraux	carbonatés				Evaporitiques		
Source	Faciès chimique	Calcite (CaCO <sub>3</sub> )	Dolomite Ca,Mg (CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Aragonite (CaCO <sub>3</sub> )	Anhydrite (CaSO <sub>4</sub> )	Gypse (CaSO <sub>4</sub> ,2H <sub>2</sub> O)	pCO <sub>2</sub> équ(atm)
Bensmih	B.M	0,22	0,09	0,08	-1,39	-1,17	0,0211
Matwia	S.C	1,23	1,54	1,09	-1,05	-0,83	0,0017

## Conclusion

Le programme qui traite l'analyse en composantes principales ne prend en charge qu'un minimum de trois individus, c'est pourquoi cette partie d'interprétation ne comprend pas cet outil d'interprétation.

L'aquifère est représenté par les grès numidiens qui reposent sur des argiles et marnes. Les sources Ain Matwia et Ain Bensmih émergent au contact des grès avec le substratum argilo-marneux.

Les températures des eaux souterraines sont proches de celles de l'air au niveau de Matwia et indiquent une influence atmosphérique directe à travers la surface fissurée ou friable des grès mais au niveau d'Ain Bensmih, leur évolution à l'inverse de celles de l'air est due soit à la présence d'une couche de couverture épaisse ou à une origine profonde des eaux. Les eaux souterraines sont alcalines en hautes eaux au niveau des deux sources et neutres au niveau d'Ain Bensmih en basses eaux. Elles sont moyennement minéralisées et douces. En hautes eaux, les faciès chimiques sont bicarbonatés et chlorurés calciques au niveau de la source Bensmih et bicarbonatés et sulfatés calciques au niveau de la source Matwia. Les eaux sont sursaturées vis-à-vis des minéraux carbonatés et sous-saturées vis-à-vis des minéraux évaporitiques au niveau des deux sources. En basses eaux, les faciès chimiques sont bicarbonatés magnésiens au niveau d'Ain Bensmih et sulfatés calciques pour celles de Matwia. Les eaux sont sursaturées vis-à-vis des minéraux carbonatés et sous-saturées vis-à-vis des minéraux évaporitiques au niveau des deux sources.

### V.5.2.2. Les formations Ultra-telliennes

Elles sont représentées par les calcaires et marno-calcaires d'âge allant du Barrémien au Lutétien.

#### V.5.2.2.1. Paramètres physiques des eaux souterraines dans les formations ultra-telliennes (cf., tab. 55)

La température des eaux varie autour la température ambiante durant les deux périodes, sauf pour celles des sources Magrone (15,5 °C) et Choga (16,6 °C) en basses eaux et qui doivent avoir une origine profonde. Le pH varie de neutre (7,4) pour les eaux d'Ain El Fedjoudj à alcalin au niveau des autres sources en hautes eaux et, neutre en basses eaux au niveau de l'ensemble des sources. Les valeurs du potentiel d'oxydoréduction varient entre (-76) (Ain Drahem) et (9) mv (Ain El Fedjoudj) en hautes eaux. En basses eaux, la plus faible valeur est enregistrée au niveau d'El Fedjoudj et indique un milieu pauvre en oxygène dissous. Les valeurs de Eh au niveau des autres sources se rapprochent et font penser à l'origine commune des eaux. Les teneurs en oxygène dissous varient entre 0,1 mg/l au niveau d'El Fedjoudj et plus de 3,65 mg/l au niveau des autres sources en hautes eaux et, entre 0,1 mg/l au niveau de la même source, 0,35 mg/l au niveau d'Ain Drahem et plus de 4,8 mg/l au niveau des autres sources en basses eaux. D'après ces teneurs le nombre de sources qui peuvent avoir la même origine se limite aux sources ; Ras El Fedj, Ain Magrone et Ain Choga et qui culminent près du sommet de Dj. Bousbaa. Les valeurs de la conductivité électrique varient entre 246 µs/cm (Ain Drahem) et 870 µs/cm (Ain El Fedjoudj), avec une moyenne de 624 µs/cm et un écart type de 228,71 µs/cm, en période de hautes eaux. En basses eaux, elles varient entre 514 (Ain Drahem) et 950 µs/cm (Ain El Fedjoudj), avec une moyenne de 730,8 µs/cm et un écart type de 187,4 µs/cm. On constate une augmentation de la conductivité vers l'aval et des variations d'un point à l'autre, indiquant une bonne circulation des eaux et un drainage de l'aquifère. Les eaux sont peu minéralisées au niveau d'Ain Drahem et moyennement minéralisées au niveau des autres sources en hautes eaux et moyennement minéralisées en basses eaux au niveau de l'ensemble des sources. Le degré hydrotimétrique varie de 4,65 à 5,5 °F en hautes eaux avec une moyenne de 4,91°F et un écart type de 0,341 °F, en basses eaux, il varie entre 4,31 et 10,55 °F, avec une moyenne de 5,77 °F et un écart type de 2,6797 °F. Les valeurs de ce paramètre indiquent que les eaux souterraines de l'aquifère sont douces durant les deux périodes.

**Tableau 55.** Paramètres physiques des eaux souterraines dans les formations ultra-telliennes (mai-aout/2009).

Période	Hautes eaux (mai/2009)						Basses eaux (aout/2009)					
	C.E µs/cm	pH	Eh mv	T °C	O.D mg/l	TH °F	C.E µs/cm	pH	Eh mv	T °C	O.D mg/l	TH °F
A. Drahem	246	8,73	-76	19	3,7	4,82	514	7,4	-10	20,9	0,35	4,31
Ras El Fedj	664	10,9	-55	18,8	3,64	4,7	695	7,1	-12	18	7,1	4,7
A. Magrone	670	8,3	-51	18	3,65	5,5	600	7,3	-13	15,5	7,1	4,4
A. Choga	670	8,4	-52	18,5	3,64	4,65	895	7,2	-13	16,6	4,8	10,55
A. Fedjoudj	870	7,4	9	18,3	0,1	4,92	950	7,37	-146	18,3	0,1	4,92
Min.	246	7,4	-76	18	0,1	4,65	514	7,1	-146	15,5	0,1	4,31
Max.	870	10,9	9	19	3,7	5,5	950	7,4	-10	20,9	7,1	10,55
Moyenne	624	8,74	-45	18,5	2,94	4,91	730,8	7,27	-38,8	17,9	3,89	5,77
Ecart type	228,71	1,301	31,87	0,4	1,591	0,3419	187,4	0,124	59,94	2,04	3,4760	2,6797
<b>Norme</b>	<b>1500</b>	<b>6,5-9,5</b>	<b>/</b>	<b>25</b>	<b>5 &lt;</b>	<b>&lt; 18</b>	<b>1500</b>	<b>6,5-9,5</b>	<b>/</b>	<b>25</b>	<b>5 &lt;</b>	<b>&lt; 18</b>

### V.5.2.2.2. Paramètres chimiques des eaux souterraines dans les formations ultra-telliennes (mai-août/2009)

#### V.5.2.2.2.1. Teneurs en cations (mg/l), (cf., tab. 56)

En hautes eaux, les teneurs en calcium varient entre 75 et 96 mg/l, avec une moyenne de 85,14 mg/l et un écart type de 10,36 mg/l, les teneurs les plus élevées sont enregistrées au niveau des sources ; Ain Magrone et Ain Choga, les plus faibles au niveau de Ras El Fedj (amont). Les teneurs en magnésium varient entre 23 et 46 mg/l, avec une moyenne de 33,57 mg/l et un écart type de 11,238 mg/l en hautes eaux. On constate qu'à l'aval les teneurs en alcalino-terreux sont relativement faibles et ne reflètent pas le principe de l'accroissement des teneurs dans le sens d'écoulement, ceci est dû à une dilution par les eaux d'irrigation pour les besoins des cultures au niveau d'El Fedjoudj. Les teneurs en sodium varient entre 18 et 31 mg/l, avec une moyenne de 27,40 mg/l et un écart type de 10,50 mg/l. Celles en potassium varient entre 0,2 et 2,5 mg/l, avec une moyenne de 1,24 mg/l et un écart type de 1,069 mg/l. Pour ces deux paramètres les teneurs les plus élevées sont enregistrées à l'aval dans le sens d'écoulement et acquises par lessivage des formations géologiques traversés. En basses eaux, les teneurs en calcium varient entre 64 et 112 mg/l, avec une moyenne de 79 mg/l et un écart type de 19,1049 mg/l. Celles en magnésium varient entre 22 et 42 mg/l, avec une moyenne de 28,60 mg/l et un écart type de 8,0187 mg/l. On constate que les teneurs en alcalino-terreux diminuent sauf pour la teneur en calcium qui augmente au niveau d'Ain Choga et reste stable au niveau de Ras El Fedj et El Fedjoudj. Les teneurs en sodium varient entre 18 et 54 mg/l, avec une moyenne de 39 mg/l et un écart type de 14,2478 mg/l. Mise à part la stabilité de la teneur au niveau de Ras El Fedj, on enregistre une augmentation au niveau des autres sources, par échange de base contre les alcalino-terreux de l'eau. Les teneurs en potassium restent stables au niveau de la source Ras El Fedj, augmentent au niveau des sources Ain Magrone et Ain Choga par échange de base contre le magnésium de l'eau et diminuent au niveau des sources Ain Drahem et Ain El Fedjoudj par échange de base dans le sens inverse.

**Tableau 56.** Teneurs en cations (mg/l) des eaux souterraines dans les formations ultra-telliennes (mai-août/2009).

Période	Hautes eaux (mai/2009)				Basses eaux (août/2009)			
	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>
Ras El Fedj	75	23	0,3	18	75	23	0,3	18
A. Magrone	96	42	1	23	64	29	2	54
A. Choga	95	46	0,2	25	112	42	1	32
A. Drahem	84	35	2	30	68	22	1	43
A. Fedjoudj	76	32	2,5	31	76	27	2	48
Min	75	23	0,2	18	64	22	0,3	18
Max	96	46	2,5	31	112	42	2,5	54
Moyenne	85,14	33,571	1,24	27,4	79	28,6	53,8	39
Ecart type	10,367	11,238	1,069	10,5	19,1049	8,0187	7,8391	14,2478
<b>Norme</b>	<b>100</b>	<b>50</b>	<b>12</b>	<b>200</b>	<b>100</b>	<b>50</b>	<b>12</b>	<b>200</b>

#### V.5.2.2.2.2. Teneurs en anions (mg/l) (cf., tab. 57)

En hautes eaux, les teneurs en bicarbonates oscillent entre 292 et 350 mg/l, avec une moyenne de 303,3 mg/l et un écart type de 40,82 mg/l. Ces teneurs élevées traduisent une

forte dissolution des formations carbonatées par lessivage par les eaux d'infiltration. Les teneurs en chlorures varient 35 et 64 mg/l, avec une moyenne de 46,86 mg/l et un écart type de 13,15 mg/l et s'insèrent dans les normes de potabilité. Celles en sulfates varient entre 30 et 180 mg/l, avec une moyenne de 83,43 mg/l et un écart type de 68,25 mg/l et s'insèrent également dans la norme de potabilité des eaux de boisson. Les teneurs en nitrates dépassent la norme de potabilité au niveau de la source El Fedjoudj. Elles seraient d'origine agricole, parce que la source est située à l'aval d'un périmètre irrigué. Mises à part les teneurs en bicarbonates et celles en nitrates au niveau d'El Fedjoudj, celles des autres anions sont dans la fourchette des normes de potabilité d'eau de boisson. En basses eaux, les teneurs en bicarbonates varient entre 258 et 305 mg/l, avec une moyenne de 281,40 mg/l et un écart type de 21,1376 mg/l, les teneurs acquises par hydrolyse acide sont légèrement inférieures à celles enregistrées en hautes eaux. Celles en chlorures varient entre 42 e 80 mg/l, avec une moyenne de 63,40mg/l et un écart type de 15,3394 mg/l. Les teneurs augmentent sensiblement, sauf au niveau de Ras El Fedj. Les teneurs en sulfates varient entre 30 et 195 mg/l, avec une moyenne de 68,80mg/l et un écart type de 71,1456 mg/l, la teneur la plus élevée est enregistrée au niveau d'Ain Choga, qui doit son origine à l'évaporation. Les teneurs en nitrates restent faibles et dans l'ordre de grandeur des teneurs naturelles sauf au niveau d'El Fedjoudj où elles dépassent la norme de potabilité. Cette teneur anormale serait d'origine agricole comme en période de hautes eaux.

**Tableau 57.** Teneurs en anions (mg/l) des eaux souterraines dans les formations ultra-telliennes (mai-aout/2009).

Période	Hautes eaux (mai/2009)				Basses eaux (aout/2009)			
	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>
A. Drahem	350	42	6	32	305	55	2	34
Ras El Fedj	330	52	5	180	292	42	6	32
A. Magrone	331	35	5	30	258	80	8	30
A. Choga	300	36	2	79	260	75	6	195
A. Fedjoudj	292	64	53	53	292	65	53	53
Min	292	35	2	30	258	42	2	30
Max	350	64	53	180	305	80	8	195
Moy	303,3	46,86	18	83,43	281,4	63,4	15	68,8
Ecart type	40,82	13,15	23,96	68,25	21,1376	15,3394	21,3541	71,1456
<b>Norme</b>	<b>250</b>	<b>200</b>	<b>50</b>	<b>250</b>	<b>250</b>	<b>200</b>	<b>50</b>	<b>250</b>

#### V.5.2.2.3. Teneurs en éléments mineurs (mg/l) (cf., Tab. 58)

En hautes eaux, les teneurs en aluminium varient entre 0,1 et 1,2 mg/l, avec une moyenne de 0,56 mg/l et un écart type de 0,586 mg/l. Les valeurs les plus élevées sont enregistrées au niveau des sources El Fedjoudj et Ain Drahem. Celles en phosphates varient entre 0 (Ain Drahem) et 0,29 mg/l (El Fedjoudj), avec une moyenne de 0,21 mg/l et un écart type de 0,12 mg/l. En basses eaux, on note une teneur en phosphate de 0,4 mg/l au niveau d'El Fedjoudj et l'absence totale de cet élément au niveau des autres sources. Les teneurs en aluminium varient entre 1,3 et 3,4 mg/l, avec une moyenne de 2,24 mg/l et un écart type de 0,7503 mg/l. Les teneurs anormales en phosphates seraient d'origine agricole, compte tenu de l'utilisation des fertilisants et engrais au niveau du périmètre d'irrigation, celles en aluminium proviendraient du lessivage du sol et sous sol, par infiltration des eaux d'irrigation et par hydrolyse acide au sein de l'aquifère.

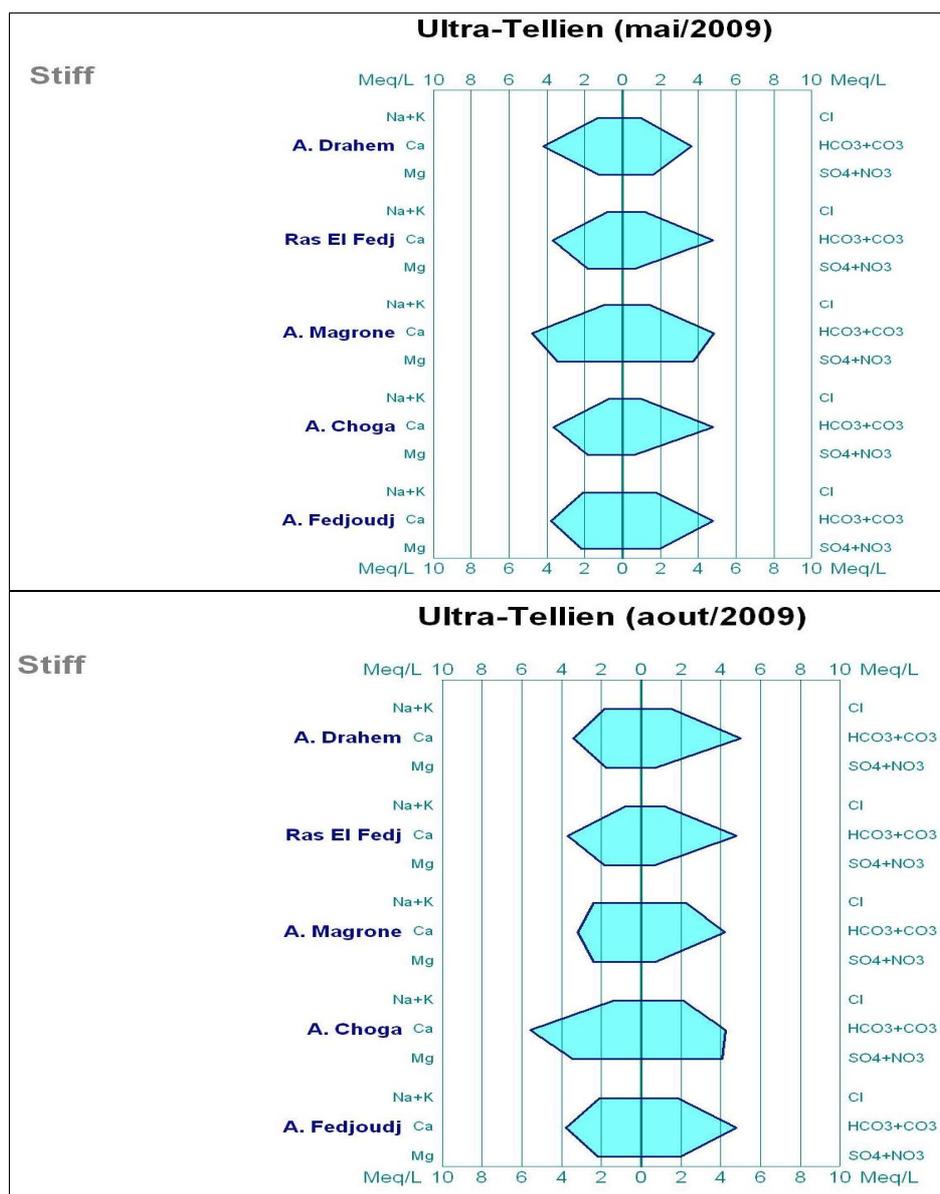
**Tableau 58.** Teneurs en éléments mineurs (mg/l) des eaux souterraines dans les formations ultra-telliennes (mai-aout/2009).

Période	Hautes eaux (mai/2009)		Basses eaux (aout/2009)	
	Al <sup>3+</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	Al <sup>3+</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>
A. Drahem	1,2	0	2,1	0
Ras El Fedj	0,1	0,25	1,3	0
A. Magrone	0,2	0,25	2,2	0
A. Choga	0,1	0,24	3,4	0
A. Fedjoudj	1,2	0,29	2,2	0,4
Min	0,1	0	1,3	0
Max	1,2	0,29	3,4	0,4
Moy	0,56	0,21	2,24	0,08
Ecart type	0,586	0,12	0,7503	0,1789
<b>Norme</b>	<b>0,2</b>	<b>2</b>	<b>0,2</b>	<b>2</b>

#### V.5.2.2.3. Détermination des faciès chimiques des eaux souterraines des formations ultra-telliennes (mai-aout/2009), (cf., fig. 29)

En hautes eaux, les faciès chimiques des eaux souterraines des formations ultra-telliennes sont : bicarbonatés et sulfatés calciques au niveau de la source Ain Drahem, bicarbonatés calciques et magnésiens au niveau Ras El Fedj et Ain Choga, bicarbonatés et sulfatés calciques et magnésiens au niveau d'Ain Magrone et bicarbonatés calciques au niveau El Fedjoudj. Les ions dominants qui caractérisent les faciès chimiques sont le calcium et le magnésium pour les cations et les bicarbonates et les sulfates pour les anions. Ces ions dominants et secondaires proviendraient par lessivage des de la roche encaissante.

En basses eaux, les faciès chimiques sont : bicarbonatés calciques au niveau des sources Ain Drahem et El Fedjoudj, bicarbonatés calciques et magnésiens au niveau Ras El Fedj, bicarbonatés et sulfatés calciques et magnésiens au niveau de la source Ain Choga et bicarbonatés et chlorurés calciques au niveau d'Ain Magrone. Les ions dominants qui caractérisent les faciès chimiques des eaux, sont le calcium et le magnésium pour les cations et les bicarbonates, les sulfates et les chlorures pour les anions. En hautes eaux, les ions dominants proviendraient de la dissolution des formations carbonatées qui constituent l'aquifère par les eaux d'infiltration. Les teneurs en ions au niveau de chaque source dépendent du temps écoulé depuis la zone de recharge, du parcours effectué par l'eau jusqu'à l'émergence. En basses eaux, les ions proviendraient par hydrolyse acide à l'intérieur de l'aquifère sauf au niveau d'El Fedjoudj où l'apport par les eaux d'irrigation est significatif.



**Figure 29.** Faciès chimiques des eaux souterraines de l'Ultra-Tellien (mai-aout/2009)

#### V.5.2.2.4. Répartition spatiale des faciès chimiques des eaux souterraines dans l'Ultra-Tellien (mai-aout/2009)

En hautes eaux, les faciès chimiques en amont de l'aquifère sont bicarbonatés calciques et magnésiens (Ras El Fedj et Ain Choga) et bicarbonatés et sulfatés calciques et magnésiens (Ain Magrone). Les bicarbonates (37,5 %) et le calcium (37,5 %) proviendraient de la dissolution des formations carbonatées de l'Ultra-Tellien, les sulfates (12,5 %) et le magnésium (12,5 %) proviendraient de la dissolution des gypses contenus dans les marnes et marno-calcaires. Les faciès chimiques au niveau des deux autres sources situées à l'aval sont bicarbonatés et sulfatés calciques (Ain Drahem) et bicarbonatés calciques (El Fedjoudj). Les bicarbonates et le calcium à pourcentage égal (40 %), proviendraient de la dissolution des calcaires et marno-calcaires. En basses eaux, on assiste aux mêmes ions dominants qui caractérisent les faciès chimiques des eaux. En amont, le faciès chimique à Ain Ras El Fedj est le même, au niveau d'Ain Magrone les sulfates et le magnésium sont remplacés par les chlorures et au niveau d'Ain Choga on note l'apparition des sulfates comme pôle secondaire sans doute à cause des changements de direction

d'écoulement en basses eaux. A l'aval, on note la disparition des sulfates au niveau d'Ain Drahem et persistance du même faciès chimique au niveau d'El Fedjoudj.

#### V.5.2.2.5. Acquisition de la minéralisation des eaux souterraines dans les formations ultra-telliennes (mai-aout/2009)

En hautes eaux (cf., tab. 59), les eaux souterraines des formations carbonatées ultra-telliennes sont sursaturées vis-à-vis des minéraux carbonatés et de l'anhydrite, sauf au niveau d'El Fedjoudj vis-à-vis de la dolomite. L'empreinte des formations carbonatées et des gypses dans la composition chimique des eaux est significative. Les concentrations en minéraux carbonatés et de l'anhydrite sont positives. Au niveau de Ras Elfedj (amont), on remarque une pression du CO<sub>2</sub> atmosphérique nulle et les valeurs de l'indice de saturation sont les plus élevées, les plus basses sont enregistrées au niveau d'El Fedjoudj (aval), sans doute à cause d'une dilution par les eaux d'infiltration. Les eaux sont sous-saturées vis-à-vis du gypse dans tout l'aquifère.

**Tableau 59.** Indices de saturation des eaux souterraines dans les formations ultra-telliennes (mai/2009)

Période	Hautes eaux (mai/2009)						
Minéraux	carbonatés				Evaporitiques		
Source	Faciès chimique	Calcite (CaCO <sub>3</sub> )	Dolomite Ca,Mg (CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Aragonite (CaCO <sub>3</sub> )	Anhydrite (CaSO <sub>4</sub> )	Gypse (CaSO <sub>4</sub> ,2H <sub>2</sub> O)	pCO <sub>2</sub> équi(atm)
A.Drahem	B.S.C	1,56	2,17	1,41	1,74	-1,52	0,00041
Ras El Fedj	B.C.M	3,79	6,88	3,65	2,18	-1,96	0
Magrone	B.S.C.M	1,26	1,96	1,12	1,4	-1,17	0,00142
Choga	B.C.M	1,29	1,88	1,15	2,21	-1,99	0,00115
El Fedjoudj	B.C	0,28	-0,08	0,14	1,98	-1,76	0,01132

En basses eaux (cf., tab. 60), les eaux souterraines sont sursaturées vis-à-vis de la calcite sauf au niveau de la source Ras El Fej, vis-à-vis de l'aragonite, sauf au niveau des sources Ras El Fedj et Ain Magrone et sous-saturées vis-à-vis de la dolomite et des minéraux évaporitiques. On constate qu'au niveau de la source Ras El Fedj, les eaux sont sous-saturées vis-à-vis de tous les minéraux, carbonatés et évaporitiques, cet état de sous-saturation en basses eaux indique que les eaux d'infiltration sont responsables de l'état de sursaturation en hautes eaux.

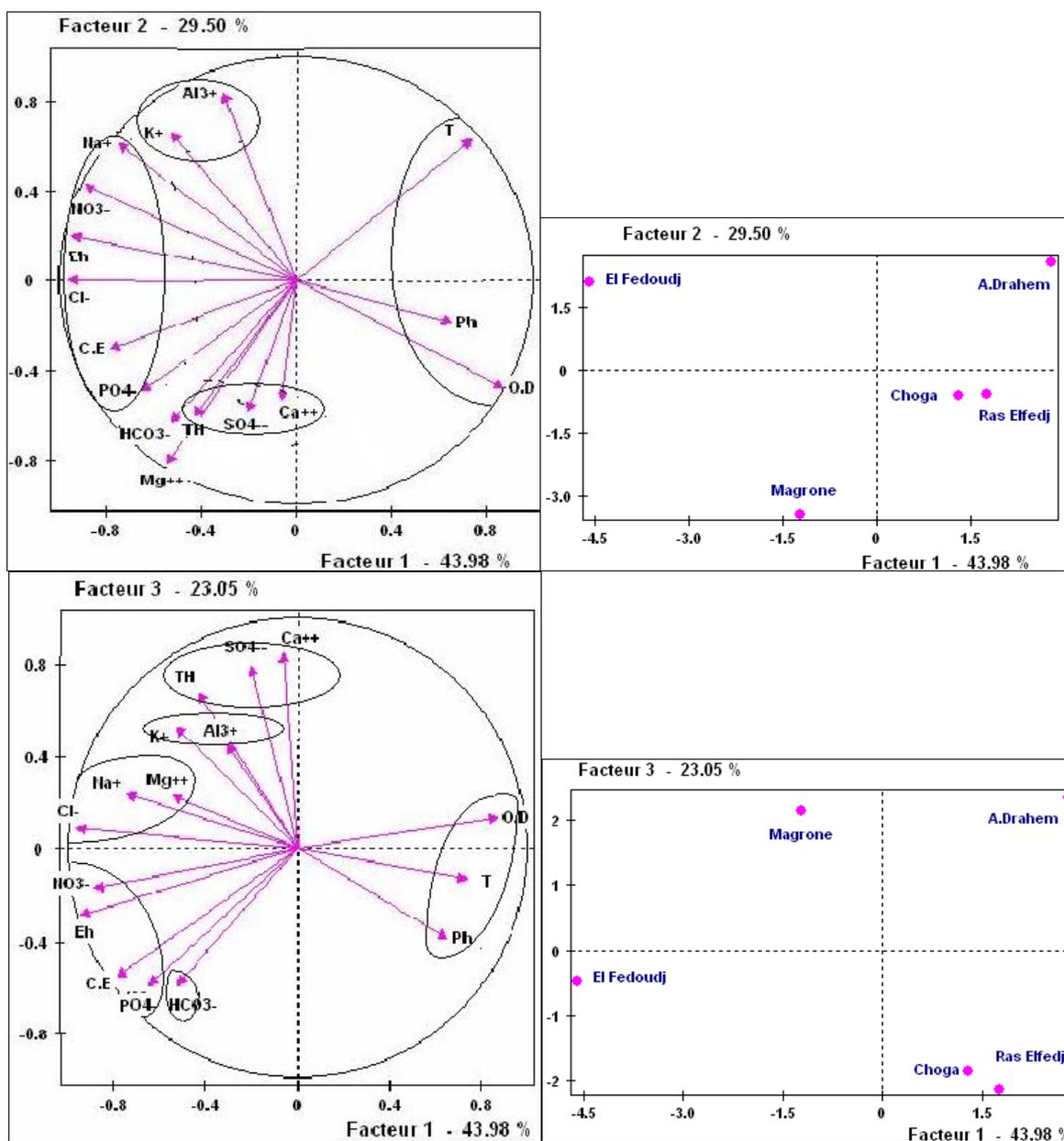
**Tableau 60.** Indices de saturation des eaux souterraines dans les formations ultra-telliennes (aout/2009)

Période	Basses eaux (aout/2009)						
Minéraux	carbonatés				Evaporitiques		
Source	Faciès chimique	Calcite (CaCO <sub>3</sub> )	Dolomite Ca,Mg (CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Aragonite (CaCO <sub>3</sub> )	Anhydrite (CaSO <sub>4</sub> )	Gypse (CaSO <sub>4</sub> ,2H <sub>2</sub> O)	pCO <sub>2</sub> équi(atm)
A.Drahem	B.C	0,27	-0,16	0,12	-2,2	-1,98	0,0119
Ras El Fedj	B.C.M	-0,01	-0,72	-0,15	-2,18	-1,96	0,02277
Magrone	B.Cl.C	0,06	-0,42	-0,08	-2,29	-2,07	0,01264
Choga	B.S.C.M	0,16	-0,3	0,02	-1,31	-1,09	0,01571
El Fedjoudj	B.C	0,25	-0,15	0,11	-1,98	-1,76	0,01212

#### V.5.2.2.6. Analyse en composantes principales des eaux souterraines dans les formations ultra-telliennes (mai-août/2009)

En hautes eaux (cf., fig. 30), l'axe F1, (43,98 % de la variance totale) est représenté par les variables à valeurs positives : O.D, pH et T°C par opposition aux variables à valeurs négatives : C.E, Cl<sup>-</sup>, Eh, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Na<sup>+</sup> et PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>. La variable C.E est corrélée significativement aux PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> au Eh, aux chlorures (Cl<sup>-</sup>) et à un degré moindre aux nitrates (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) (cf, tab. 61). Ces variables à valeurs négatives régissent donc l'axe de la minéralisation. L'axe F2, (29,50 % de la variance totale) est représenté par les variables à valeurs positives : Al<sup>3+</sup> et K<sup>+</sup>, par opposition aux variables à valeurs négatives : Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, TH, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> et SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>. Le Ca<sup>2+</sup> est corrélé aux sulfates et à la dureté (TH), qui est corrélée au magnésium (cf., tab. 61). Le calcium et les sulfates proviendraient de la dissolution de l'anhydrite (sursaturation des eaux), le sodium est mis en solution à partir de la roche par échange de base contre le calcium de l'eau. Le potassium en position intermédiaire entre le sodium et l'aluminium peut avoir la même origine lithologique que le sodium et l'aluminium. La projection des individus sur l'axe F1, indique qu'au niveau d'El Fedjoudj (aval), on enregistre la plus grande valeur de la conductivité électrique dans le sens d'écoulement. Dans cette zone, on note également une pollution par les nitrates et les phosphates provenant des activités agricoles dans le périmètre irrigué. Au niveau de Ras El Fedj et Ain Choga (amont) on enregistre un phénomène d'oxydation où les teneurs élevées en oxygène dissous sont introduites par infiltration. De l'amont vers l'aval (El Fedjoudj), on observe un phénomène du pouvoir d'oxydoréduction. La projection des variables sur l'axe F2, montre une mise en solution du potassium et de l'aluminium provenant des argiles intercalées avec les marno-calcaires au niveau d'Ain Drahem, au niveau d'Ain Magrone on enregistre une mise en solution des alcalino-terreux contribuant à la dureté des eaux. Les sulfates en position intermédiaire entre le calcium et le magnésium pourraient provenir de l'anhydrite et des marno-calcaires.

L'axe F3, (23,05 % de la variance totale) est introduit pour augmenter le poids de la variance totale, de 73,48 % pour les axes F1 et F2 à 96,53 %. Il est représenté par les variables à valeurs positives : Ca<sup>2+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, TH, Al<sup>3+</sup> et K<sup>+</sup>, par opposition aux bicarbonates. Le calcium et les sulfates significativement corrélés se détachent nettement des autres variables sur l'axe F3. Ces deux éléments proviendraient des mêmes formations, qui sont les marno-calcaires à gypses par dissolution. Le potassium et l'aluminium proviendraient des argiles. La projection des individus sur l'axe F3, montre ce phénomène au niveau d'Ain Magrone. L'union entre les bicarbonates et les phosphates (cf, tab. 61) aurait son origine dans des processus de contamination agricole ; l'ion bicarbonate est lié à l'augmentation de CO<sub>2</sub> provenant de la décomposition de la matière organique en abondance au niveau du périmètre irrigué (El Fedjoudj), l'eau chargée en CO<sub>2</sub> devient agressive face à la calcite en dissolvant CaCO<sub>3</sub> et influence l'équilibre des carbonates des eaux souterraines (Pulido Bosch et al., 1980). L'axe F3 peut donc représenter le pôle de la contamination agricole. Les variables contribuant à la minéralisation sur l'axe F1 se détachent en deux groupes distincts de part et d'autre de l'axe F1 et proviendraient donc de deux origines différentes, lithologique pour les variables Cl<sup>-</sup>, Na<sup>+</sup> et Mg<sup>2+</sup> et agricole pour les variables PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> et NO<sub>3</sub><sup>-</sup>.



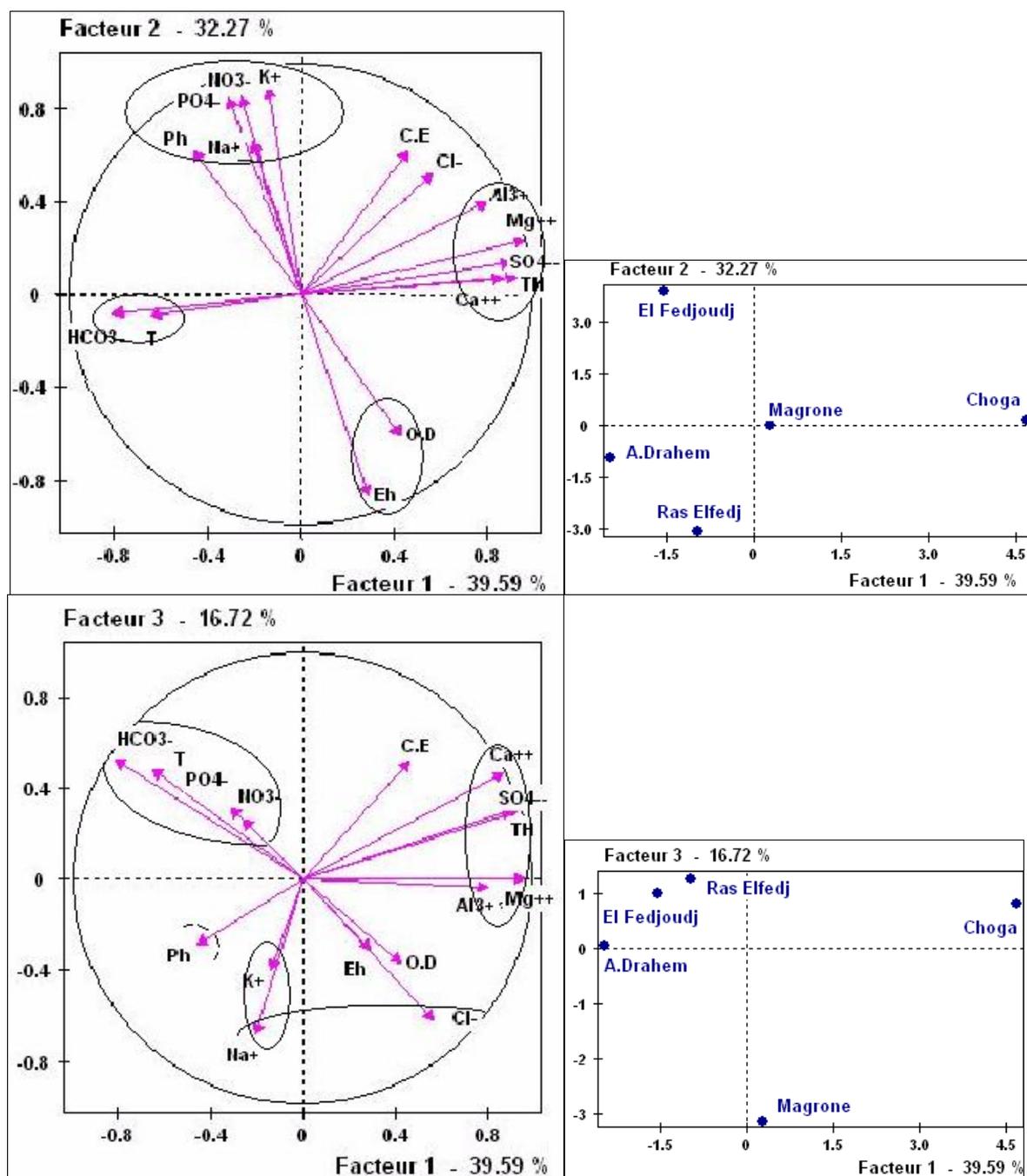
**Figure 30.** Projection des variables et des individus des eaux souterraines dans l'Ultra-Tellien (mai/2009)

**Tableau 61.** Matrice de corrélation des eaux souterraines dans les formations ultra-telliennes (mai/2009)

	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	C.E	pH	Eh	T°C	O.D	TH°F	Al <sup>3+</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>
Ca <sup>++</sup>	1,00															
Mg <sup>++</sup>	0,65	1,00														
K <sup>+</sup>	0,14	-0,12	1,00													
Na <sup>+</sup>	-0,07	-0,04	0,93	1,00												
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-0,14	0,65	-0,44	-0,14	1,00											
Cl <sup>-</sup>	0,16	0,55	0,58	0,76	0,45	1,00										
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-0,32	0,09	0,66	0,89	0,29	0,85	1,00									
SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	0,99	0,76	0,15	-0,01	0,00	0,28	-0,20	1,00								
C.E	-0,26	0,54	-0,08	0,26	0,92	0,70	0,65	-0,10	1,00							
pH	-0,22	-0,27	-0,61	-0,64	0,00	-0,50	-0,55	-0,29	-0,23	1,00						
Eh	-0,29	0,28	0,48	0,76	0,53	0,88	0,97	-0,15	0,82	-0,53	1,00					
T°C	-0,46	-0,93	-0,02	-0,17	-0,70	-0,66	-0,34	-0,60	-0,69	0,55	-0,52	1,00				
O.D	0,31	-0,06	-0,70	-0,91	-0,25	-0,84	-1,00	0,20	-0,61	0,57	-0,95	0,32	1,00			
TH°F	0,92	0,87	0,19	0,12	0,19	0,50	0,01	0,97	0,14	-0,36	0,09	-0,75	0,00	1,00		
Al <sup>3+</sup>	-0,03	-0,40	0,96	0,86	-0,62	0,34	0,56	-0,06	-0,26	-0,51	0,33	0,25	-0,60	-0,06	1,00	
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	-0,20	0,61	-0,29	0,04	0,98	0,58	0,46	-0,05	0,97	-0,08	0,67	-0,69	-0,42	0,17	-0,47	1,00

En basses eaux (cf., fig. 31), l'axe F1 (39,59 % de la variance totale) est représenté par les variables à valeurs positives : Al<sup>3+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Cl<sup>-</sup> et TH°F, par opposition aux variables à valeurs négatives : T°C et HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>. Dans le tableau 82, les sulfates et le calcium corrélés positivement entre eux et à la dureté (TH) pourraient provenir des marno-calcaires à gypse. Le magnésium et l'aluminium sont corrélés entre eux et pourraient provenir des argiles, comme en période de hautes eaux. Les bicarbonates auraient une origine qui diffère de celle du calcium. Sur l'axe F2, (32,27 % de la variance totale), les variables à valeurs positives : pH, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Na<sup>+</sup> et K<sup>+</sup> s'opposent aux variables à valeurs négatives : Eh et O.D. Les nitrates (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) et les phosphates (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>) sont corrélés positivement entre eux et négativement au potentiel d'oxydoréduction (Eh) (cf., tab. 62). La projection des individus sur l'axe F2, indique un phénomène d'oxydoréduction de l'amont (Ras Elfedj) vers l'aval (El Fedjoudj) où on enregistre une pollution agricole par les engrais nitrés, phosphatés et potassiques.

L'axe F3, (16,72 % de la variance totale), complète l'information donnée par les axes F1 et F2. Les nitrates et les phosphates individualisés au niveau de la source El Fedjoudj proviendraient effectivement de la même origine agricole. Le potassium et le sodium qui contribuent à l'axe F3 par opposition aux nitrates et aux phosphates, seraient d'origine lithologique. Les bicarbonates sont obtenus par dissolution des formations carbonatées par les eaux riches en CO<sub>2</sub> dissous dans les eaux souterraines devenant agressives face à la calcite.



**Figure 31.** Projection des variables et des individus des eaux souterraines dans l'Ultra-Tellien (aout/2009)

**Tableau 62.** Matrice de corrélation des eaux souterraines dans les formations ultra-telliennes (aout/2009)

	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>--</sup>	C.E	pH	Eh	T°C	O.D	TH°F	Al <sup>3+</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>
Ca <sup>++</sup>	1,00															
Mg <sup>++</sup>	0,87	1,00														
K <sup>+</sup>	-0,25	0,07	1,00													
Na <sup>+</sup>	-0,41	-0,02	0,86	1,00												
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-0,43	-0,78	-0,20	-0,19	1,00											
Cl <sup>-</sup>	0,26	0,68	0,63	0,68	-0,81	1,00										
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-0,08	-0,07	0,75	0,36	0,20	0,11	1,00									
SO <sub>4</sub> <sup>--</sup>	0,98	0,94	-0,15	-0,24	-0,53	0,43	-0,11	1,00								
C.E	0,65	0,57	0,34	-0,12	-0,23	0,23	0,68	0,59	1,00							
pH	-0,40	-0,25	0,67	0,84	0,30	0,31	0,38	-0,28	-0,17	1,00						
Eh	0,08	0,10	-0,73	-0,35	-0,26	-0,07	-1,00	0,11	-0,66	-0,42	1,00					
T°C	-0,27	-0,60	-0,25	-0,12	0,93	-0,65	0,02	-0,32	-0,31	0,43	-0,10	1,00				
O.D	0,07	0,22	-0,39	-0,37	-0,63	0,09	-0,53	0,06	-0,17	-0,78	0,60	-0,73	1,00			
TH°F	0,98	0,94	-0,20	-0,29	-0,55	0,40	-0,16	1,00	0,56	-0,35	0,17	-0,35	0,13	1,00		
Al <sup>3+</sup>	0,77	0,90	0,21	0,24	-0,59	0,74	-0,02	0,88	0,45	0,15	0,02	-0,32	-0,14	0,85	1,00	
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	-0,09	-0,11	0,72	0,35	0,28	0,06	0,99	-0,12	0,65	0,43	-1,00	0,12	-0,61	-0,18	-0,03	1,00

## Conclusion

La température des eaux varie autour la température ambiante durant les deux périodes (sauf pour celles des sources) Magrone (15,5 °C) et Choga (16,6 °C) en basses eaux et, qui doivent avoir une origine profonde. Le pH varie de neutre (7,4) pour les eaux d'Ain El Fedjoudj à alcalin au niveau des autres sources en hautes eaux et, neutre en basses eaux au niveau de l'ensemble des sources, une diminution du pH qui peut être causée par les substances organiques d'origine agricole. Les valeurs de la conductivité électrique varient entre 246 µs/cm (Ain Drahem) et 870 µs/cm (El Fedjoudj), avec une moyenne de 624 µs/cm et un écart type de 228,71 µs/cm, en période de hautes eaux. En basses eaux, elles varient entre 514 et 950 µs/cm, avec une moyenne de 730,8 µs/cm et un écart type de 187,4 µs/cm.

On constate une légère augmentation de la conductivité et des variations d'un point à l'autre de l'aquifère, indiquant une bonne circulation des eaux. Les eaux sont peu minéralisées au niveau d'Ain Drahem et moyennement minéralisées au niveau des autres sources en hautes eaux et, moyennement minéralisées en basses eaux au niveau de l'ensemble des sources. Les valeurs de ce paramètre indiquent que les eaux souterraines sont douces.

En hautes eaux, les faciès chimiques des eaux souterraines des formations ultra-telliennes sont : - bicarbonatés calciques au niveau des sources Ain Drahem, Ras El Fedj, Choga et El Fedjoudj et, bicarbonatés et sulfatés calciques et magnésiens au niveau d'Ain Magrone. Les eaux sont sursaturées vis-à-vis des minéraux carbonatés et de l'anhydrite (sauf au niveau d'El Fedjoudj) vis-à-vis de la dolomite. L'empreinte des formations carbonatées et des gypses dans la composition chimique des eaux est significative. Au niveau de Ras El Fedj (amont), on remarque une pression en CO<sub>2</sub> atmosphérique nulle et les valeurs de l'indice de saturation sont les plus élevées, les plus basses sont enregistrées au niveau d'El Fedjoudj (aval), sans doute à cause d'une dilution par les eaux d'infiltration. Les eaux sont sous-saturées vis-à-vis du gypse dans tout l'aquifère. En basses eaux, les faciès chimiques sont :

- bicarbonatés calciques au niveau des sources Ain Drahem, Ras El Fedj, Magrone et El Fedjoudj et, - bicarbonatés et sulfatés calciques et magnésiens au niveau de la source Choga.

Parallèlement, les eaux souterraines sont sursaturées vis-à-vis de la calcite (sauf au niveau de la source Ras El Fej) et vis-à-vis de l'aragonite (sauf au niveau des sources Ras El Fedj et Ain Magrone) et sous-saturées vis-à-vis de la dolomite et vis-à-vis des minéraux évaporitiques.

L'ACP a mis en évidence que l'axe F1 représente la minéralisation des eaux qui s'acquiert dans le sens d'écoulement depuis l'amont (sommet de Dj. Bousbaa) jusqu'à l'aval vers Ain Drahem et El Fedjoudj. Dans le même sens d'écoulement, on enregistre un phénomène d'oxydoréduction. L'axe F2 est apte à discriminer le pôle de la pollution agricole, la source El Fedjoudj est le point de surveillance.

### V.5.2.3. Les formations telliennes

#### V.5.2.3.1. Les formations telliennes à Globigérines

Les points d'eau sont répartis dans trois zones différentes disposées suivant un axe Est-ouest, tout en appartenant à des formations carbonatées de même nature et de même âge.

Les sources Ain Beida et Ain Karma sont situées dans la région Ras El Agba-Sellaoua Announa, à l'Ouest de la zone d'étude, la source Ain Chikh au Sud-est et le forage OH5 et H. Assasla (source chaude) à l'Est de la zone d'étude.

##### V.5.2.3.1.1. Paramètres physiques des eaux souterraines dans le Tellien à globigérines (mai-août/2009), (cf., tab. 63)

En hautes eaux, la température des eaux varie entre 15 et 36,4 °C, avec une moyenne de 21,7 °C et un écart type de 8,899 °C, celle des eaux chaudes de H. Assasla, modifie anormalement la moyenne et l'écart type de l'ensemble des points d'eau. En basses eaux, les valeurs de la température augmentent légèrement et sont comparables à celles de l'atmosphère (sauf au niveau d'Ain Karma) où on observe une légère diminution. Ce qui signifie qu'à l'émergence, les eaux ont subi l'influence atmosphérique. Les valeurs du pH en hautes eaux, se répartissent en trois classes, (5,85 – 7,5) pour les sources Ain Beida et Ain Karma à l'Ouest, (8 – 8,8) pour la source thermique H. Assasla et le forage OH5 à l'Est et, (9,6) pour la source Ain Chikh au Sud-est. Donc, le pH des eaux souterraines varie de légèrement acide à neutre dans la première zone et, alcalin dans les deux autres zones. En basses eaux, le pH varie de neutre à alcalin dans l'ensemble des points d'eau. Les valeurs élevées en basses eaux sont dues à l'évaporation importante (Meybeck et al., 1996 *In* : derwiche et al., 2010). Le Eh varie entre : -138 et 96 mv, avec une moyenne de -30 mv et un écart type de 87,54 mv en hautes eaux. On constate que les valeurs de Eh sont positives dans la zone Ouest et négatives dans les deux autres zones. En basses eaux, elles varient entre : -60 et 6 mv, avec une moyenne de -19 mv et un écart type de 26,66 mv. La plus faible valeur est enregistrée au niveau de la source thermique H. Assasla, liée à une circulation en profondeur en milieu réducteur. Les teneurs en oxygène dissous en hautes eaux, se répartissent en trois classes : (2,17 – 3,3) mg/l dans la zone Ouest, (5,66) mg/l au Sud-est et, (0,07 – 1,07) mg/l à l'Est. En basses eaux, les teneurs se répartissent également en trois classes mais les plus grandes valeurs sont enregistrées dans la zone Ouest, les plus faibles valeurs sont enregistrées dans l'Est durant les deux périodes et indiquent une origine profonde des eaux. La conductivité électrique varie entre 193 et 678 µs/cm, avec une moyenne de 435 µS/cm et un écart type de 178,43 µs/cm. Ces valeurs, permettent de classer les eaux comme minéralisées à l'ouest (Ain Beida, Ain Karma), peu minéralisées au Sud-est (Ain Chikh) et moyennement minéralisées à l'Est (H. Assasla et OH5). Les variations des concentrations de la conductivité d'un point à l'autre témoignent d'une distribution spatiale dans la nappe et d'un bon drainage (Bakalowicz, 1996 ; Raeisi, 1997). Les valeurs de la dureté des eaux, varient entre 4,49 et 13,56 °F en hautes eaux et peuvent se répartir en trois classes : TH < 5°F à l'Ouest (Ain Beida et Ain Karma), TH : (5 – 9) °F à l'Est (OH5 et H. Assasla) et, TH > 9 °F au Sud-est (Ain Chikh). On constate que la dureté des eaux de tous les points d'eau s'insère dans la fourchette des eaux douces. En basses eaux, les valeurs de la dureté se répartissent en deux grandes classes : TH < 4 °F à l'Ouest, TH > 12 °F dans les deux autres zones. Les eaux de la zone ouest sont les moins minéralisées durant les deux périodes.

D'une manière globale, le pH des eaux souterraines varient de légèrement acide pour Ain Karma, en hautes eaux) et neutre à alcalin au niveau des autres points d'eau durant les deux périodes . Les eaux sont douces, minéralisées à l'Ouest, peu minéralisées au Sud-est et

moyennement minéralisées à Est. L'effet de l'évaporation en basses eaux serait à l'origine de la minéralisation des eaux souterraines de l'ensemble des points d'eau.

**Tableau 63.** Paramètres physiques des eaux souterraines dans le Tellien à globigérines (mai-aout/2009).

Période	Hautes eaux (mai/2009)						Basses eaux (aout/2009)					
	Nom	C.E μs/cm	pH	Eh mv	T (°C)	TH °F	O.D Mg/l	C.E μs/cm	pH	Eh mv	T (°C)	TH °F
A. Beida	678	7,5	1	15	4,56	3,3	667	7,5	1	17,5	3,68	2,17
A. karma	515	5,85	96	17,5	4,49	2,17	667	8,03	-29	16,4	3,68	2,61
A. Chikh	193	9,6	-138	18,1	13,56	5,66	606	7,74	-13	20,6	12,73	1,34
H. Assasla	400	8	-36	36,4	8,4	0,07	686	8,49	-60	37,2	12,43	0,07
Forage (OH5)	389	8,8	-76	20,7	5,54	1,07	632	7,42	6	21,3	12,76	1,18
Min	193	5,85	-138	15	4,49	0,07	606	7,42	-60	16,4	3,68	0,07
Max	678	8,8	96	37,2	13,56	5,66	686	8,49	6	36,4	12,76	2,61
Moyenne	435	7,95	-30,6	21,7	7,31	1,07	651,6	7,836	-19	22,44	9,056	1,474
Ecart type	178,43	1,4195	87,54	8,899	3,8372	2,161	32,098	0,436	26,66	8,069	4,9093	0,981
Norme	1500	6,5-9,5	/	25	< 18	5 <	1500	6,5-9,5	/	25	< 18	5 <

#### V.5.2.3.1.2. Paramètres chimiques des eaux souterraines dans le Tellien à globigérines (mai-aout/2009).

##### V.5.2.3.1.2.1. Teneurs en cations (mg/l), (cf., tab. 64)

En hautes eaux, les teneurs en calcium varient entre 64 et 248 mg/l, avec une moyenne de 130,8 mg/l et un écart type de 76,936 mg/l, les plus faibles valeurs sont enregistrées dans la zone Ouest et, les valeurs anormalement élevées sont enregistrées au niveau des autres points d'eau et traduisent un temps de contact suffisamment long pour permettre des teneurs en calcium si élevées. Au niveau de la source thermique H. Assasla, la température élevée serait à l'origine des teneurs élevées en tant que paramètre catalyseur des réactions chimiques (Chapman et al., 1996, In : Derwich E. et al., 2010). Les teneurs des autres cations sont faibles dans l'ensemble des points d'eau et sont dans la fourchette des teneurs des eaux naturelles.

En basses eaux, les teneurs en alcalino-terreux ( $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$ ) sont plus élevées qu'en hautes eaux dans la zone Est. Toutefois, celles en calcium varient entre 52 et 236 mg/l, avec une moyenne de 159 mg/l et un écart type de 97,791 mg/l, celles en magnésium, varient entre 26 et 42 mg/l, avec une moyenne de 32 mg/l et un écart type de 7,483 mg/l. Les plus faibles valeurs sont enregistrées au niveau de la zone Ouest et les plus élevées au niveau des deux autres zones. L'augmentation des teneurs en calcium et en magnésium au niveau d'Ain Chikh, H. Assasla et OH5, indique une concentration par évaporation. Les teneurs en sodium sont également plus importantes en basses eaux, sauf au niveau de H. Assasla et OH5, où on assiste à une diminution des teneurs au profit des alcalino-terreux par échange de base du sodium de l'eau contre le calcium de la roche. Au niveau de la zone ouest et sud-est l'augmentation des teneurs en sodium au détriment du calcium serait attribuée à un échange de base du sodium de la roche contre le calcium de l'eau. Les teneurs en potassium sont pratiquement stables durant les deux périodes et sont dans les normes des eaux naturelles.

**Tableau 64.** Teneurs en cations (mg/l) des eaux souterraines dans le Tellien à globigérines (mai-aout/2009).

Période	Hautes eaux (mai/2009)				Basses eaux (aout/2009)			
	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>
Nom								
A. Beida	68	28	2	13	52	26	1	25
A. karma	64	31	1	9	52	26	1	25
A.Chikh	248	28	3	22	236	42	4	62
H. Assasla	164	5	1	42	223	38	3	26
Forage(OH5)	110	1	1	25	232	28	2	22
Min	64	1	1	9	52	26	1	22
Max	248	31	3	42	236	42	4	62
Moy	130,8	18,6	1,6	22,2	159	32	2,2	32
Ecart type	76,936	14,363	0,894	12,83	97,791	7,4833	1,304	16,84
<b>Norme</b>	<b>100</b>	<b>50</b>	<b>12</b>	<b>200</b>	<b>100</b>	<b>50</b>	<b>12</b>	<b>200</b>

**V.5.2.3.1.2.2. Teneurs en anions (mg/l), (cf., tab. 65)**

En hautes eaux, les teneurs en bicarbonates, varient entre 212 et 366 mg/l, avec une moyenne de 289,6 mg/l et un écart type de 74,54 mg/l. Les valeurs anormales sont enregistrées au niveau d'Ain Chikh, OH5 et H. Assasla. Ces teneurs élevées proviendraient de la mise en solution par lessivage des formations carbonatées par les eaux d'infiltration. Les teneurs en chlorures varient entre 25 et 224 mg/l, avec une moyenne de 84,4 mg/l et un écart type de 81,75 mg/l. Au niveau d'Ain Chikh, les teneurs en chlorures sont supérieures à la norme et pourraient provenir d'une pollution anthropique, la source étant située à l'aval immédiat d'une habitation. Les teneurs en sulfates les plus élevées sont enregistrées au niveau d'Ain Chikh (150 mg/l) et H. Assasla (82 mg/l), la plus faible est enregistrée au niveau du forage OH5 (30 mg/l). Ces valeurs sont dans les normes de potabilité et proviendraient de la dissolution des formations lithologiques par les eaux d'infiltration. Les teneurs en nitrates varient entre 1 et 7 mg/l, avec une moyenne de 4 mg/l et un écart type de 2,55 mg/l. Elles sont faibles dans l'ensemble des points d'eau et sont dans les normes des teneurs des eaux naturelles en nitrates.

En bases eaux, les teneurs en bicarbonates sont anormalement élevées dans l'ensemble des points d'eau. Elles varient entre 252 et 380 mg/l, avec une moyenne de 307 mg/l et un écart type de 55,01 mg/l. Les plus grandes valeurs sont enregistrées au niveau du forage OH5, Ain Chikh et H. Assasla. Dans les deux premiers points d'eau, le temps de contact eau-roche serait à l'origine des teneurs, cependant au niveau du troisième point, c'est la température élevée qui serait à l'origine des teneurs. Les teneurs en chlorures diminuent légèrement dans la zone Ouest (Ain Beida et Ain Karma), restent stables au Sud-est (Ain Chikh) à cause de la pérennité de la source de pollution anthropique durant les deux périodes et, augmentent considérablement à l'Est (H. Assasla et OH5) par évaporation et hydrolyse acide dans l'aquifère. Les teneurs en sulfates, varient entre 26 et 248 mg/l, avec une moyenne de 144,40 mg/l et un écart type de 110,60 mg/l. On assiste à une diminution à l'Ouest et, concentration par évaporation dans le reste des points d'eau. Les teneurs en nitrates augmentent sensiblement à l'Ouest et pourraient être d'origine agricole, les produits azotés utilisés en agriculture sont lessivés et transportés par les eaux d'irrigation vers les eaux souterraines. L'augmentation au niveau d'Ain Chikh proviendrait des rejets domestiques de l'habitation située à l'amont de la source.

**Tableau 65.** Teneurs en anions (mg/l) des eaux souterraines dans le Tellien à globigérines (mai-aout/2009).

Période	Hautes eaux (mai/2009)				Basses eaux (aout/2009)			
	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>--</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>--</sup>
A, Beida	212	43	7	53	252	30	23	26
A. karma	218	40	6	53	252	30	23	26
A. Chikh	366	224	2	150	321	224	13	236
H. Assasla	362	90	1	82	330	172	8	186
Forage (OH5)	290	25	4	30	380	96	8	248
Min	212	25	1	30	252	30	8	26
Max	366	224	7	150	380	224	23	248
Moy	289,6	84,4	4	73,6	307	110,4	15	144,4
Ecart type	74,54	81,75	2,55	46,522	55,01	86,36	7,5829	110,6
<b>Norme (OMS)</b>	<b>250</b>	<b>200</b>	<b>50</b>	<b>250</b>	<b>250</b>	<b>200</b>	<b>50</b>	<b>250</b>

**V.5.2.3.1.2.3. Teneurs en éléments mineurs (mg/l), (cf., tab. 66)**

Les teneurs en aluminium varient entre 0,3 et 1,5 mg/l en hautes eaux et, entre 0,2 et 1,6 mg/l en basses eaux. Durant les deux périodes, les teneurs sont anormalement élevées surtout au niveau des sources Ain Karma et Ain Beida dans la zone Ouest et tout juste à la limite de la norme au niveau du forage OH5. Les teneurs en phosphates sont enregistrées au niveau du forage OH5 et pourraient être attribuables au lessivage des formations carbonatées. Au niveau des sources de la zone Ouest Ain Karma et Ain Beida, les phosphates proviendraient des activités agricoles. Les teneurs en phosphates enregistrées s'insèrent dans les normes de potabilité des eaux de boisson.

**Tableau 66.** Teneurs en éléments mineurs (mg/l) des eaux souterraines dans le Tellien à globigérines (mai-aout/2009).

Période	Hautes eaux (mai/2009)		Basses eaux (aout/2009)	
	Al <sup>3+</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	Al <sup>3+</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>
A, Beida	1,1	0,33	1,3	0,41
A. karma	1,5	0,29	1,6	0,21
A. Chikh	1,02	0	0,3	0
H. Assasla	0,7	0	0,6	0
Forage (OH5)	0,3	0,25	0,2	0,35
Min	0,3	0	0,2	0
Max	1,5	0,33	1,6	0,41
Moy	0,924	0,174	0,8	0,194
Ecart type	0,4504	0,161	0,62	0,1914
<b>Norme</b>	<b>0,2</b>	<b>2</b>	<b>0,2</b>	<b>2</b>

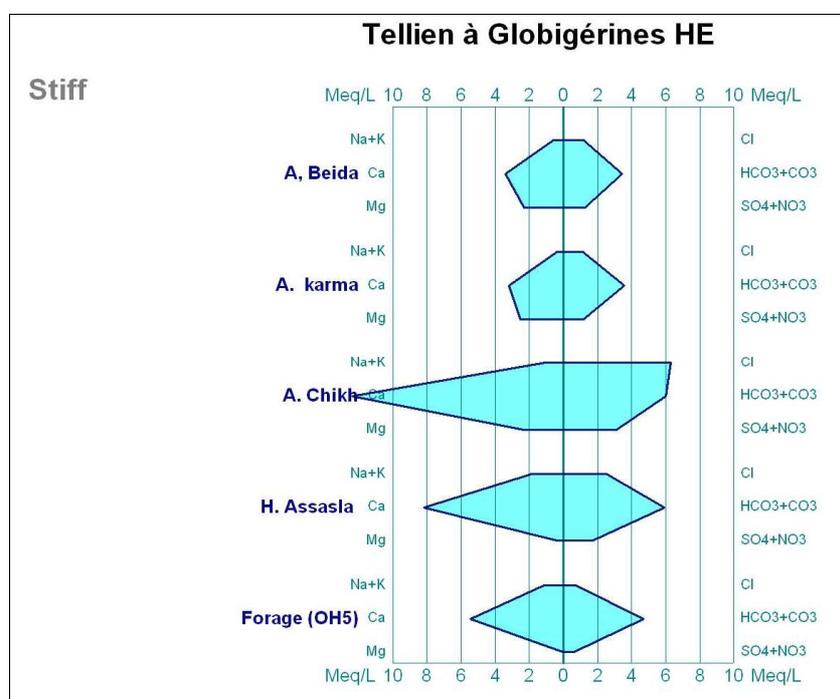
**V.5.2.3.1.3. Détermination des faciès chimiques eaux souterraines dans le Tellien à globigérines (mai-aout/2009) (cf., fig. 32)**

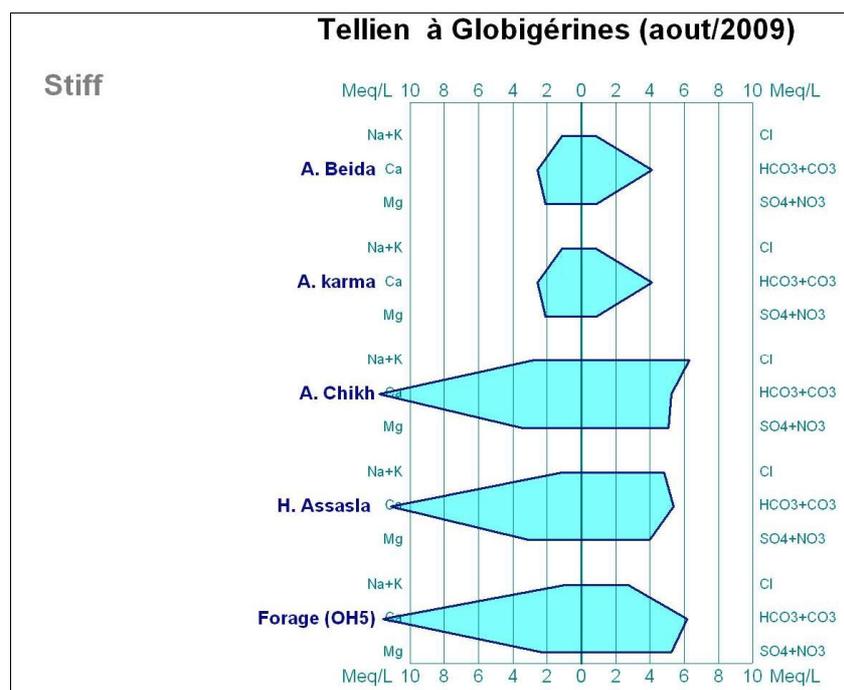
En hautes eaux, les faciès chimiques des eaux souterraines sont : bicarbonatés calciques et magnésiens au niveau de la zone Ouest, chlorurés et bicarbonatés calciques au

niveau de la zone Sud-est (Ain Chikh) et bicarbonatés calciques au niveau de la Est (H. Assasla et OH5). Les ions dominants qui caractérisent les faciès chimiques des eaux souterraines sont : le calcium et le magnésium pour les cations et les bicarbonates pour les anions au niveau de la première zone, le calcium pour les cations et, les chlorures et les bicarbonates pour les anions au niveau de la deuxième zone et, le calcium pour les cations et les bicarbonates pour les anions au niveau de la troisième zone.

En basses eaux, les faciès chimiques sont : bicarbonatés calciques et magnésiens au niveau de la zone Ouest, chlorurés calciques au niveau de la zone Sud-est (Ain Chikh), bicarbonatés et chlorurés calciques au niveau de H. Assasla et, bicarbonatés et sulfatés calciques au niveau du forage OH5.

Les ions dominants qui caractérisent les faciès chimiques des eaux souterraines des formations telliennes à globigérines dont : le calcium et le magnésium pour les cations et les bicarbonates pour les anions au niveau de la première zone, le calcium pour les cations et les chlorures pour les anions au niveau de la source Ain Chikh, le calcium pour les cations et les bicarbonates et les chlorures pour les anions au niveau de H. Assasla et le calcium pour les cations et les bicarbonates et les sulfates pour les anions au niveau forage OH5.





**Figure 32.** Faciès chimiques eaux souterraines dans le Tellien à globigérines (mai-aout/2009).

#### V.5.2.3.1.4. Répartition spatiale des faciès chimiques eaux souterraines dans le Tellien à globigérines (mai-aout/2009).

Au niveau de la zone Ouest, les faciès chimiques des eaux sont bicarbonatés calciques et magnésiens durant les deux périodes. Le calcium et les bicarbonates proviendraient de la dissolution des minéraux carbonatés contenus dans les formations carbonatées telliennes à globigérines, le magnésium pourrait provenir du lessivage des marnes gypsifères. Au niveau de la zone Sud-est, les faciès chimiques sont principalement chlorurés calciques, avec apparition des bicarbonates comme ion secondaire en période de hautes eaux, par infiltration. Le calcium également proviendrait de la dissolution des formations carbonatées par les eaux d'infiltration, cependant les chlorures proviendraient d'une pollution anthropique, située à l'amont de la source. Au niveau de la zone Est, les faciès chimiques sont bicarbonatés calciques, avec apparition des chlorures comme pole secondaire au niveau de H. Assasla et apparition des sulfates comme pole secondaire au niveau du forage OH5. Les ions dominants proviendraient de la dissolution de la roche carbonatée durant les deux périodes par infiltration et hydrolyse en hautes eaux et par hydrolyse en basses eaux. Les sulfates et les chlorures proviendraient du lessivage des marnes gypsifères.

#### V.5.2.3.1.5. Acquisition de la minéralisation des eaux souterraines dans le Tellien à globigérines (mai-aout/2009).

En hautes eaux (cf., tab. 67), les eaux souterraines sont sursaturées vis-à-vis de la calcite et de l'aragonite sauf au niveau de la source Ain Karma et vis-à-vis de la dolomite au niveau des sources Ain Karma et Ain Beida (zone Ouest) et, totalement sous-saturées vis-à-vis des minéraux évaporitiques.

**Tableau 67.** Indices de saturation des eaux souterraines dans le Tellien à globigérines (mai/2009)

Période	Hautes eaux (mai/2009)						
Minéraux	carbonatés				Evaporitiques		
Source	Faciès chimique	Calcite (CaCO <sub>3</sub> )	Dolomite Ca,Mg (CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Aragonite (CaCO <sub>3</sub> )	Anhydrite (CaSO <sub>4</sub> )	Gypse (CaSO <sub>4</sub> ,2H <sub>2</sub> O)	pCO <sub>2</sub> équi(atm)
Beida	B.C.M	0,21	-0,16	0,07	-2	-1,78	0,00659
Karma	B.C.M	-1,45	-3,41	-1,59	-2,02	-1,8	0,30268
Chikh	Cl.B.C	3,02	4,89	2,87	-1,14	-0,92	0,00009
Assasla	B.C	1,28	0,85	1,14	-1,5	-1,28	0,00348
OH5	B.C	1,86	1,48	1,72	-2,04	-1,82	0,00045

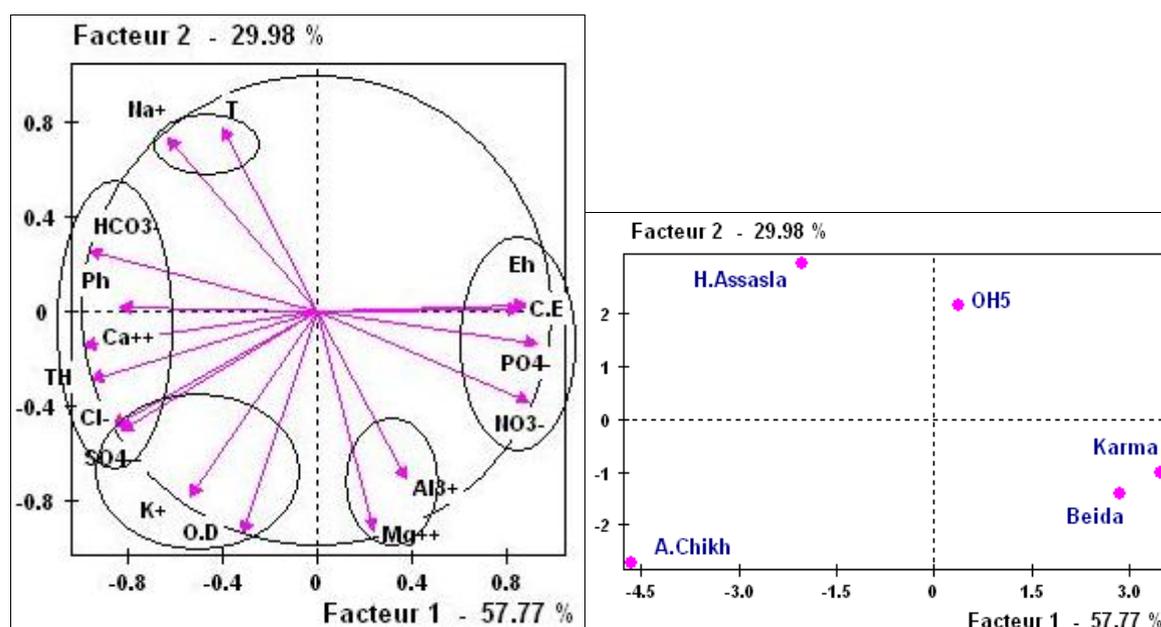
En basses eaux (cf., tab. 68), les souterraines sont sursaturées vis-à-vis des minéraux carbonatés (sauf vis-à-vis de la dolomite) au niveau de la source Ain Beida et, sous-saturées vis-à-vis des minéraux évaporitiques au niveau de tous les points d'eau. La source Ain Chikh est située à l'aval du forage OH5, l'apparition des sulfates comme pole secondaire caractéristique dans leurs faciès chimiques respectifs, suppose une alimentation de la source à partir du même aquifère.

**Tableau 68.** Indices de saturation des eaux souterraines dans le Tellien à globigérines (aout/2009)

Période	Basses eaux (aout/2009)						
Minéraux	carbonatés				Evaporitiques		
Source	Faciès chimique	Calcite (CaCO <sub>3</sub> )	Dolomite Ca,Mg (CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Aragonite (CaCO <sub>3</sub> )	Anhydrite (CaSO <sub>4</sub> )	Gypse (CaSO <sub>4</sub> ,2H <sub>2</sub> O)	pCO <sub>2</sub> équi(atm)
Beida	B.C.M	0,18	-0,13	0,04	-2,41	-2,19	0,00787
Karma	B.C.M	0,71	0,93	0,57	-2,41	-2,19	0,00232
Chikh	Cl.S.C	1,06	1,19	0,92	-0,99	-0,77	0,00545
Assasla	B.Cl.C	1,82	2,67	1,67	-1,03	-0,87	0,001
OH5	B.S.C	0,83	0,54	0,68	-0,95	-0,73	0,01359

#### V.5.2.3.1.6. Analyse en composantes principales des eaux souterraines dans le Tellien à globigérines (mai-aout/2009)

En hautes eaux (cf., fig. 33), l'axe F1 (55,74 % de la variance totale est représenté par deux groupes de variables, l'un à valeurs positives composé de : C.E, Eh, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> et NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, par opposition aux variables à valeurs négatives de l'autre groupe composé de : SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Cl<sup>-</sup>, Ca<sup>2+</sup>, TH, pH et HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>. Les nitrates (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) sont corrélés aux phosphates (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>) et pourraient provenir des engrais agricoles par oxydation. L'axe F1 représente donc, la minéralisation, acquise par deux phénomènes ; par infiltration, individualisée au niveau des sources Ain Karma et Ain Beida et, par hydrolyse acide des ions SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Cl<sup>-</sup>, et HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> dans l'aquifère. Ces ions sont significativement corrélés entre eux (cf., tab. 69). L'axe F2 (29,98 % de la variance totale), est représenté par les variables à valeurs positives : Na<sup>+</sup> et T°C, par opposition aux variables à valeurs négatives : Al<sup>3+</sup> corrélé à Mg<sup>2+</sup> et, O.D corrélé au K<sup>+</sup>. La projection des individus sur l'axe F2, montre le phénomène de température au niveau de H. Assasla. L'axe F2, représente le phénomène de température comme catalyseur de mise en solution des minéraux.



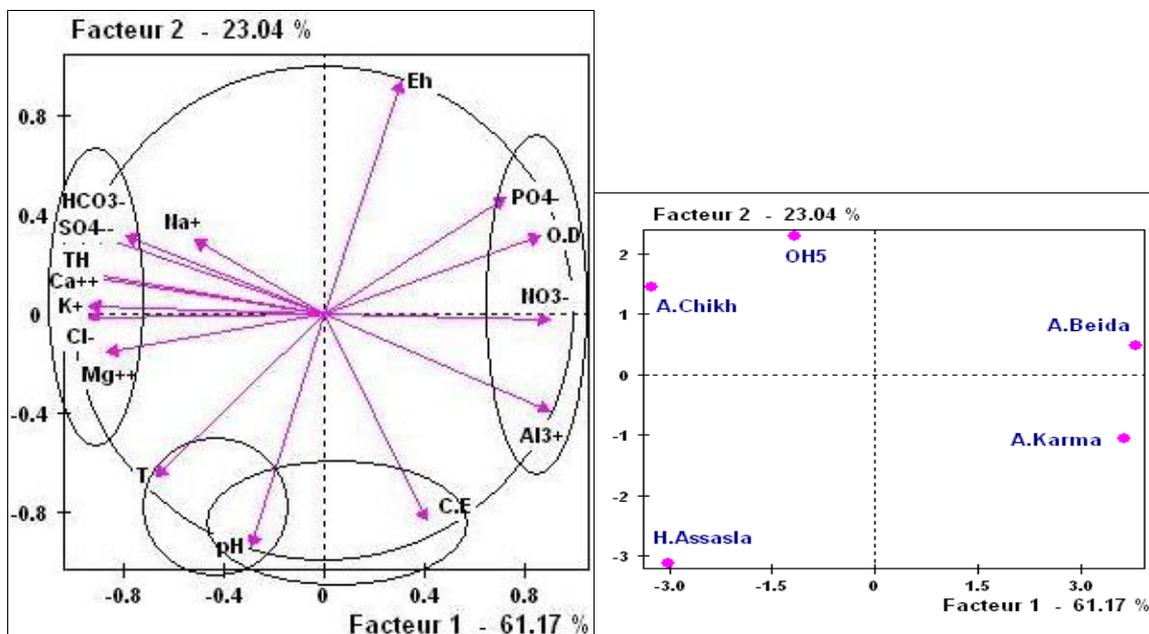
**Figure 33.** Projection des variables et des individus des eaux souterraines dans le Tellien à globigérines (mai/2009).

**Tableau 69.** Matrice de corrélation des eaux souterraines dans le Tellien à globigérines (mai/2009).

	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>--</sup>	C.E	pH	Eh	T°C	O.D	TH°F	Al <sup>3+</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>
Ca <sup>++</sup>	1,00															
Mg <sup>++</sup>	-0,09	1,00														
K <sup>+</sup>	0,62	0,55	1,00													
Na <sup>+</sup>	0,52	-0,77	-0,21	1,00												
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,92	-0,44	0,28	0,80	1,00											
Cl <sup>-</sup>	0,93	0,29	0,81	0,21	0,72	1,00										
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-0,84	0,51	-0,11	-0,86	-0,98	-0,61	1,00									
SO <sub>4</sub> <sup>--</sup>	0,89	0,35	0,79	0,21	0,68	0,99	-0,59	1,00								
C.E	-0,90	0,22	-0,38	-0,44	-0,86	-0,77	0,81	-0,71	1,00							
pH	0,79	-0,37	0,56	0,48	0,74	0,63	-0,62	0,54	-0,71	1,00						
Eh	-0,83	0,34	-0,58	-0,48	-0,77	-0,67	0,65	-0,59	0,74	-1,00	1,00					
T°C	0,30	-0,67	-0,44	0,92	0,63	0,04	-0,75	0,07	-0,25	0,12	-0,13	1,00				
O.D	0,44	0,74	0,94	-0,50	0,04	0,70	0,12	0,68	-0,29	0,34	-0,37	-0,67	1,00			
TH°F	0,99	0,06	0,71	0,40	0,85	0,97	-0,76	0,95	-0,86	0,74	-0,77	0,19	0,55	1,00		
Al <sup>3+</sup>	-0,24	0,92	0,23	-0,67	-0,48	0,11	0,47	0,20	0,32	-0,65	0,62	-0,42	0,43	-0,09	1,00	
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	-0,91	0,25	-0,33	-0,74	-0,96	-0,78	0,95	-0,79	0,80	-0,59	0,63	-0,64	-0,11	-0,88	0,24	1,00

En basses eaux (cf., fig. 34), l'axe F1 (61,17 % de la variance totale) est représenté par les variables à valeurs positives : PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, O.D, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> et Al<sup>3+</sup>. A l'opposé, l'axe F1 est aussi représenté par les variables à valeurs négatives : tous les éléments majeurs, sauf les nitrates. Les nitrates (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) sont corrélés à l'oxygène dissous (O.D) et à l'aluminium (Al<sup>3+</sup>) (cf., tab. 70), les nitrates et les phosphates sont donc obtenus par oxydation des fertilisants agricoles. L'axe F1 représente donc deux phénomènes ; la minéralisation acquise par mise en solution des minéraux de l'encaissant enregistrée à l'aval de l'aquifère (Ain Chikh) et celui de la

pollution agricole par oxydation au niveau des sources Ain Karma et Ain Beida. L'axe F2, (23,04 % de la variance totale) est représenté par le potentiel d'oxydoréduction (Eh) dans sa partie positive qui est inversement corrélé au pH. La projection des individus sur l'axe F2, indique que d'oxydoréduction se produit au niveau du forage OH5 et la minéralisation est régie par la température et le pH au niveau de H. Assasla.



**Figure 34.** Projection des variables et des individus des eaux souterraines dans le Tellien à globigérines (aout/2009).

**Tableau 70.** Matrice de corrélation des eaux souterraines dans le Tellien à globigérines (aout/2009).

	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	C.E	pH	Eh	T°C	O.D	TH°F	Al <sup>3+</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>
Ca <sup>++</sup>	1,00															
Mg <sup>++</sup>	0,73	1,00														
K <sup>+</sup>	0,85	0,97	1,00													
Na <sup>+</sup>	0,41	0,77	0,77	1,00												
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,91	0,39	0,56	0,09	1,00											
Cl <sup>-</sup>	0,85	0,98	1,00	0,74	0,57	1,00										
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-0,95	-0,57	-0,68	-0,12	-0,95	-0,70	1,00									
SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	0,99	0,66	0,80	0,42	0,94	0,80	-0,92	1,00								
C.E	-0,48	-0,37	-0,52	-0,74	-0,42	-0,47	0,24	-0,59	1,00							
pH	0,11	0,42	0,27	-0,06	-0,09	0,31	-0,20	-0,04	0,59	1,00						
Eh	-0,13	-0,43	-0,28	0,06	0,07	-0,33	0,22	0,02	-0,59	-1,00	1,00					
T°C	0,58	0,56	0,51	-0,09	0,46	0,56	-0,71	0,45	0,40	0,73	-0,76	1,00				
O.D	-0,83	-0,67	-0,68	-0,08	-0,72	-0,72	0,90	-0,73	-0,07	-0,47	0,50	-0,93	1,00			
TH°F	1,00	0,73	0,84	0,39	0,92	0,85	-0,96	0,98	-0,46	0,13	-0,15	0,60	-0,84	1,00		
Al <sup>3+</sup>	-0,96	-0,62	-0,77	-0,40	-0,93	-0,77	0,90	-0,98	0,60	0,14	-0,12	-0,42	0,73	-0,96	1,00	
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	-0,54	-0,89	-0,82	-0,61	-0,20	-0,83	0,43	-0,44	0,11	-0,73	0,73	-0,60	0,56	-0,54	0,34	1,00

## Conclusion

En hautes eaux, la température des eaux varie entre 15 et 36,4 °C, celle des eaux chaudes de H. Assasla, modifie anormalement la moyenne et l'écart type de l'ensemble des points d'eau. En basses eaux, les valeurs de la température augmentent légèrement et sont comparables à celles de l'atmosphère, sauf au niveau d'Ain Karma où on observe une légère diminution liée à l'origine profonde des eaux. Le pH des eaux souterraines varie de neutre à alcalin (acide pour Ain Karma, en hautes eaux). Les eaux sont douces, minéralisées à l'Ouest (A. Karma et A. Beida), peu minéralisées au Sud-est (A. Chikh) et moyennement minéralisées à l'Est (H. Assasla).

En hautes eaux, les faciès chimiques des eaux souterraines sont : bicarbonatés calciques et magnésiens au niveau de la zone Ouest, chlorurés et bicarbonatés calciques au niveau de la zone Sud-est (A. Chikh) et bicarbonatés calciques au niveau de la zone Est (H. Assasla et OH5). Les eaux souterraines sont sursaturées vis-à-vis de la calcite et de l'aragonite (sauf au niveau de la source Ain Karma) et vis-à-vis de la dolomite au niveau des sources Ain Karma et Ain Beida (zone Ouest) et, totalement sous-saturées vis-à-vis des minéraux évaporitiques.

En basses eaux, les faciès chimiques sont : bicarbonatés calciques et magnésiens au niveau de la zone Ouest, chlorurés calciques au niveau de la zone Sud-est (Ain Chikh), bicarbonatés et chlorurés calciques au niveau de H. Assasla et, bicarbonatés et sulfatés calciques au niveau du forage OH5. Les eaux sont sursaturées vis-à-vis des minéraux carbonatés (sauf vis-à-vis de la dolomite) au niveau de la source Ain Beida et, sous-saturées vis-à-vis des minéraux évaporitiques au niveau de tous les points d'eau. La source Ain Chikh est située à l'aval du forage OH5, l'apparition des sulfates comme pole secondaire caractéristique dans leurs faciès chimiques respectifs, suppose une alimentation de la source à partir du même aquifère.

En hautes eaux, l'axe F1 représente la minéralisation, acquise par infiltration, individualisée au niveau des sources Ain Karma et Ain Beida et, par hydrolyse acide des ions  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ , et  $\text{HCO}_3^-$  dans l'aquifère. L'axe F2, représente le phénomène de température comme catalyseur de mise en solution des minéraux.

En basses eaux, l'axe F1 représente la minéralisation acquise par mise en solution des minéraux de l'encaissant et celui de la pollution agricole par oxydation au niveau des sources Ain Karma et Ain Beida. L'axe F2 indique que le phénomène d'oxydoréduction se produit au niveau du forage OH5 et la minéralisation est régie par la température et le pH au niveau de H. Assasla.

### V.5.2.3.2. Les formations telliennes à Nummulites

Ce sont des formations carbonatées du Paléogène où émergent les sources : Ain Souda, Ain Bardo et Ain Ras Elma.

#### V.5.2.3.2.1. Paramètres physiques des eaux souterraines dans le Tellien à Nummulites (mai-aout/2009), (cf., tab. 71).

La température des eaux souterraines des formations carbonatées du Tellien à Nummulites varie entre 13,6 et 14 °C, en hautes eaux et entre 13,9 et 14,8 °C en basses eaux. On enregistre une légère variation d'une période à l'autre des températures, indiquant l'existence d'une bonne protection contre l'influence extérieure ou liée à une origine profonde. Le pH varie entre 8,4 et 10,4 avec une moyenne de 9,6 et un écart type de 1,058 en hautes eaux. Au niveau des sources Ain Souda et Ain Bardo, les valeurs du pH élevées en hautes eaux, leur confèrent un caractère alcalin et dont la cause pourrait être liée à l'apport en substances dissoutes. En basses eaux, elles varient entre 6,18 et 7,12 avec une moyenne de 6,68 et un écart type de 0,473. On constate une diminution des valeurs du pH au dessous de la norme au niveau de la source Ras Elma, liée sans doute à une substance polluante. Les valeurs de Eh varient entre -162 et -48 mv en hautes eaux, avec une moyenne de -118 mv et un écart type de 61,29 mv et entre 11 et 76 mv en basses eaux, avec une moyenne de 43,666 mv et un écart type de 32,501 mv. Ces valeurs indiquent un milieu réducteur en hautes eaux lié à la profondeur et oxydant en basses eaux lié à l'évaporation. Les teneurs en oxygènes dissous varient entre 3,37 et 5,1 mg/l en hautes eaux, avec une moyenne de 4,22 mg/l et un écart type de 0,865 mg/l, valeurs indiquant une oxygénation des eaux aux points d'émergence surtout au niveau d'Ain Bardo. En basses eaux, les teneurs sont légèrement inférieures par rapport à celles enregistrées en hautes eaux et qui, seraient attribuables aux eaux d'infiltration. Les valeurs de la conductivité électrique varient entre 155 et 411  $\mu\text{s}/\text{cm}$ , avec une moyenne de 316,70  $\mu\text{s}/\text{cm}$  et un écart type de 140,70  $\mu\text{s}/\text{cm}$  en hautes eaux. En basses eaux, elles varient entre 393 et 437  $\mu\text{s}/\text{cm}$ , avec une moyenne de 412,66  $\mu\text{s}/\text{cm}$  et un écart type de 22,36  $\mu\text{s}/\text{cm}$ . On enregistre une augmentation de la conductivité électrique au niveau des sources Ain Souda et Ras Elma et une diminution au niveau de la source Ain Bardo. L'accroissement des valeurs de la conductivité électrique sont acquises dans le sens d'écoulement par hydrolyse acide au sein de l'aquifère. Ces valeurs confèrent aux eaux une minéralisation moyenne. L'effet de l'évaporation serait à l'origine des concentrations enregistrées en basses eaux. Les valeurs de la dureté varient entre 4,08 et 6,26 °F, avec une moyenne de 4,93 °F et un écart type de 1,166 °F en hautes eaux et, entre 5,52 et 7,33 °F, avec une moyenne de 6,28 °F et un écart type de 0,9377 °F en basses eaux. Les valeurs les plus élevées enregistrées au niveau des sources Ain Bardo et Ras Elma sont supérieures à celles enregistrées en hautes eaux et seraient liées à l'évaporation.

D'une manière globale, les eaux souterraines ont une température pratiquement stable liée à la profondeur ou à la présence d'une couche protectrice. Elles sont alcalines en hautes eaux par apport en substances dissoutes et neutres en basses eaux. Elles sont moyennement minéralisées, douces et sont dans les normes de potabilité du point de vue paramètres physiques.

**Tableau 71.** Paramètres physiques des eaux souterraines dans le Tellien à Nummulites (mai/2009).

Période	Hautes eaux						Basses eaux					
	Nom	C.E μs/cm	pH	Eh mv	T (°C)	O.D Mg/l	TH °F	C.E μs/cm	pH	Eh mv	T (°C)	O.D Mg/l
A. Souda	155	10	-144	13,9	3,37	6,26	437	6,75	44	14,8	2,76	6
A. Bardo	411	10,4	-162	14	5,1	4,08	393	7,12	11	14	2,6	5,52
Ras Elma	384	8,4	-48	13,6	4,2	4,45	408	6,18	76	13,9	3,04	7,33
Min	155	8,4	-162	13,6	3,37	4,08	393	6,18	11	13,9	2,6	5,52
Max	411	10,4	-48	14	5,1	6,26	437	7,12	76	14,8	3,04	7,33
Moyenne	316,7	9,6	-118	13,833	4,223	4,93	412,66	6,68	43,66	14,233	2,8	6,2833
Ecart type	140,7	1,058	61,29	0,208	0,8652	1,166	22,36	0,473	32,501	0,493	0,222	0,9377
<b>Norme</b>	<b>1500</b>	<b>6,5 - 9,5</b>	<b>/</b>	<b>25</b>	<b>5 &lt;</b>	<b>&lt; 18</b>	<b>1500</b>	<b>6,5- 9,5</b>	<b>/</b>	<b>25</b>	<b>5 &lt;</b>	<b>&lt; 18</b>

**V.5.2.3.2.2. Paramètres chimiques des eaux souterraines dans le Tellien à Nummulites (mai-aout/2009).****V.5.2.3.2.2.1. Teneurs en cations (mg/l), (cf., tab. 72)**

En hautes eaux, les teneurs en calcium varient entre 75 et 122 mg/l, avec une moyenne de 92,33 mg/l et un écart type de 25,81 mg/l, celles en magnésium auquel il est pratiquement toujours lié sont faibles et varient entre 4 et 11 mg/l, avec une moyenne de 7,66 mg/l et un écart type de 3,511 mg/l. Les teneurs en sodium varient entre 10 et 15 mg/l, avec une moyenne de 13,33 mg/l et un écart type de 2,886 mg/l et celles en potassium entre 1 et 4 mg/l, avec une moyenne de 2,66 mg/l et un écart type de 1,527 mg/l. Mise à part la teneur en calcium élevée enregistrée au niveau de la source Ain Souda, celles des autres cations s'insèrent dans la gamme des eaux de boisson. En basses eaux, les teneurs en calcium augmentent au niveau des sources Ain Bardo et Ras Elma et diminuent légèrement au niveau de la source Ain Souda. Celles en magnésium et en sodium augmentent au niveau des trois sources. On assiste donc à un phénomène d'échange de base entre le sodium de la roche contre le calcium de l'eau au niveau de la source Ain Souda, au niveau des deux autres sources ce phénomène est masqué par les teneurs élevées des deux cations. Les teneurs en potassium diminuent au niveau des sources Ain Bardo et Ras Elma, où celles en magnésium libérées par l'encaissant augmentent par échange de base.

**Tableau 72.** Teneurs en cations (mg/l) des eaux souterraines dans le Tellien à Nummulites (mai-aout/2009).

Période	Hautes eaux (mai/2009)				Basses eaux (aout/2009)			
	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>
A. Souda	122	4	1	15	110	12	1	18
A. Bardo	75	8	4	10	98	15	1	22
Ras El Ma	80	11	3	15	120	32	1	16
Min	75	4	1	10	98	12	1	16
Max	122	11	4	15	120	32	1	22
Moyenne	92,33	7,66	2,66	13,33	107,2	20,6	1	18,667
Ecart type	25,81	3,511	1,527	2,886	9,338	10,478	0	3,055
<b>Norme</b>	<b>100</b>	<b>50</b>	<b>12</b>	<b>200</b>	<b>100</b>	<b>50</b>	<b>12</b>	<b>200</b>

**V.5.2.3.2.2. Teneurs en anions (mg/l), (cf., tab. 73).**

En hautes eaux, les teneurs en bicarbonates varient entre 210 et 341 mg/l, avec une moyenne de 260,33 mg/l et un écart type de 70,571 mg/l, en basses eaux, on assiste à une légère diminution des teneurs au niveau des sources Ain Souda et Ain Bardo et une stabilité au niveau de la source Ras Elma. Les teneurs élevées en hautes eaux, sont acquises par lessivage des formations carbonatées par les eaux d'infiltration, en sus de celles acquises par hydrolyse acide. Les teneurs en chlorures varient entre 21 et 28 mg/l, avec une moyenne de 23,67 mg/l et un écart type de 3,786 mg/l en hautes eaux et entre 26 et 242 mg/l en basses eaux, avec une moyenne de 110,66 mg/l et un écart type de 115,314 mg/l. La plus grande valeur est enregistrée au niveau de la source Ras Elma, liée à une pollution anthropique. Celles en sulfates, oscillent dans l'intervalle de 28 et 45 mg/l, avec une moyenne de 34 mg/l et un écart type de 9,539 mg/l. En basses eaux, elles oscillent entre 28 et 233 mg/l, avec une moyenne de 148,66 mg/l et un écart type de 82,561 mg/l. Les teneurs en nitrates sont faibles durant les deux périodes et peuvent s'insérer dans la fourchette des teneurs des eaux naturelles et seraient d'origine lithologique.

**Tableau 73.** Teneurs en anions (mg/l) des eaux souterraines dans le Tellien à Nummulites (mai-aout/2009).

Période	Hautes eaux (mai/2009)				Basses eaux (aout/2009)			
	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>
A. Souda	341	21	4	45	280	64	4	68
A. Bardo	210	22	2	28	201	26	5	233
Ras El Ma	230	28	2	29	230	242	2	145
Min	210	21	2	28	201	26	2	68
Max	341	28	4	45	280	242	5	233
Moyenne	260,33	23,67	2,66	34	237	110,66	3,66	148,66
Ecart type	70,571	3,786	1,155	9,539	39,962	115,314	1,5275	82,561
<b>Norme</b>	<b>250</b>	<b>200</b>	<b>50</b>	<b>250</b>	<b>250</b>	<b>200</b>	<b>50</b>	<b>250</b>

**V.5.2.3.2.2.3. Teneurs en éléments mineurs (mg/l), (cf., tab. 74).**

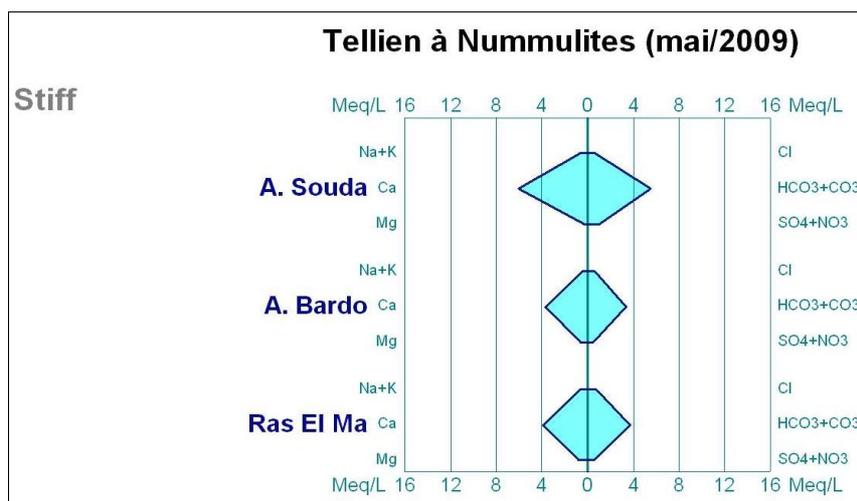
En hautes eaux, les teneurs en aluminium, varient entre 2,7 et 6,75 mg/l, avec une moyenne de 4,05 mg/l et un écart type de 2,338 mg/l, en basses eaux, elles varient entre 0,2 et 1,75 mg/l, avec une moyenne de 0,88 mg/l et un écart type de 0,791 mg/l. Les teneurs diminuent considérablement et indiquent un apport par les eaux d'infiltrations. Mais, durant les deux périodes, les teneurs en aluminium sont anormalement élevées et dépassent la norme admise. Les teneurs en phosphates sont enregistrées uniquement au niveau de la source Ain Souda et sont inférieures à la norme durant les deux périodes, la stabilité de la teneur fait penser à une source ponctuelle qui pourrait être agricole.

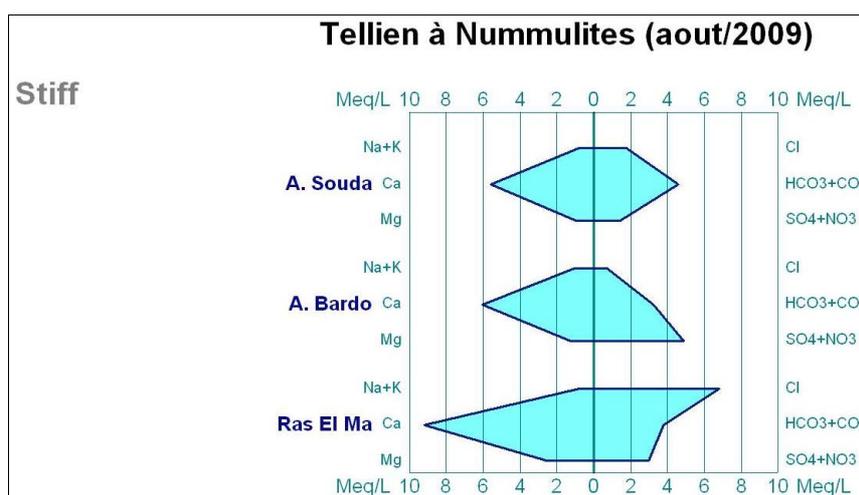
**Tableau 74.** Teneurs en éléments mineurs (mg/l) des eaux souterraines dans le Tellien à Nummulites (mai-aout/2009).

Période	Hautes eaux (mai/2009)		Basses eaux (aout/2009)	
	Al <sup>3+</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	Al <sup>3+</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>
A. Souda	6,75	0,08	1,75	0,08
A. Bardo	2,7	0	0,7	0
Ras El Ma	2,7	0	0,2	0
Min	2,7	0	0,2	0
Max	6,75	0,08	1,75	0,08
Moyenne	4,05	0,02	0,88	0,02
Ecart type	2,338	0,046	0,791	0,046
<b>Norme</b>	<b>0,2</b>	<b>2</b>	<b>0,2</b>	<b>2</b>

#### V.5.2.3.2.3. Détermination des faciès chimiques eaux souterraines dans le Tellien à Nummulites (mai-aout/2009), (cf., fig. 35).

En hautes eaux, les faciès chimiques des eaux souterraines sont bicarbonatés calciques au niveau des trois sources. L'origine carbonatée des ions dominants qui caractérisent les faciès chimiques est commune. Au niveau des trois sources les bicarbonates et le calcium sont les ions dominants. Au niveau de la source Ain Souda, les teneurs en ions sont plus significatives et témoignent d'un temps de contact eau-roche conséquent. En basses eaux, les faciès chimiques sont : bicarbonatés calciques au niveau de la source Ain Souda, sulfatés calciques au niveau de la source Ain Bardo et, chlorurés calciques au niveau de la source Ras Elma. Les ions dominants qui caractérisent les faciès chimiques sont : le calcium pour les cations au niveau des trois sources et, les bicarbonates pour les anions au niveau de la source Ain Souda, les sulfates au niveau de la source Ain Bardo et les chlorures au niveau de la source Ras Elma. Les chlorures au niveau de Ain Ras Elma pourraient provenir d'une pollution anthropique accentuée par évaporation, parce que la source est située dans une agglomération, les autres ions proviendraient par hydrolyse acide dans l'aquifère.





**Figure 35.** Faciès chimiques des eaux souterraines dans le Tellien à Nummulites (mai-aout/2009).

#### V.5.2.3.2.4. Répartition spatiale des faciès chimique des eaux souterraines dans le Tellien à Nummulites (mai-aout/2009).

En hautes eaux, les principaux faciès chimiques qui caractérisent les eaux souterraines sont bicarbonatés calciques dans l'ensemble des sources, le lessivage des formations carbonatées par les eaux d'infiltration serait à l'origine des ions dominants. En basses eaux, on assiste à trois faciès chimiques différents d'une source à l'autre. Les bicarbonates et le calcium proviendraient des formations carbonatées par hydrolyse acide. Le calcium pourrait également provenir ainsi que les sulfates des marno-calcaires à gypse par lessivage. Cependant, les chlorures proviendraient d'une pollution anthropique et dont la concentration est acquise par évaporation au niveau de la source Ras Elma.

#### V.5.2.3.2.5. Acquisition de la minéralisation des eaux souterraines dans le Tellien à Nummulites (mai-aout/2009).

En hautes eaux (cf., tab. 75), les eaux souterraines du Tellien à Nummulites sont sursaturées vis-à-vis des minéraux carbonatés au niveau des trois sources. La dissolution des minéraux contenus dans les formations carbonatées par les eaux d'infiltration, a permis l'acquisition de cet état de sursaturation. Au niveau des sources Ain Souda et Ain Bardo, les valeurs de l'indice de saturation sont les plus élevées et traduisent un temps de contact eau-roche plus élevé. Les valeurs des rapports ioniques (Ca/Mg), (Ca/SO<sub>4</sub>), (Ca/HCO<sub>3</sub>), supérieures à l'unité indiquent un apport excessif en calcium par rapport aux autres minéraux, le rapport (Ca/HCO<sub>3</sub>), proche de l'unité indique un apport en bicarbonates proche de celui du calcium. Parallèlement, les eaux sont sous-saturées vis-à-vis des minéraux évaporitiques, et ont tendance à s'enrichir en gypse.

**Tableau 75.** Indices de saturation des eaux souterraines dans le Tellien à Nummulites (mai/2009)

Période	Hautes eaux (mai/2009)						
Minéraux Source	carbonatés				Evaporitiques		
	Faciès chimique	Calcite (CaCO <sub>3</sub> )	Dolomite Ca,Mg (CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Aragonite (CaCO <sub>3</sub> )	Anhydrite (CaSO <sub>4</sub> )	Gypse (CaSO <sub>4</sub> ,2H <sub>2</sub> O)	pCO <sub>2</sub> équivalents (atm)
A.Souda	B.C	3,16	4,64	3,02	-1,83	-1,61	0,00003
A.Bardo	B.C	3,18	5,18	3,03	-2,2	-1,98	0,00001
A. Ras El Ma	B.C	1,23	1,41	1,09	-2,17	-1,95	0,00091

En basses eaux (cf., tab. 76), les eaux souterraines sont sous-saturées vis-à-vis des minéraux carbonatés (sauf au niveau de la source Ain Bardo) vis-à-vis de la calcite et, sous-saturées vis-à-vis des minéraux évaporitiques (sauf au niveau de la source Ain Souda) vis-à-vis du gypse. Cet état de non équilibre confirme l'apport en minéraux dissous par les eaux d'infiltration en période de hautes eaux. Au niveau de Ain Bardo le faciès chimique est sulfaté calcique, le rapport ionique (Ca/SO<sub>4</sub>) proche de l'unité indique une saturation en sulfates par évaporation. La valeur de l'indice d'échange de base est négative, l'échange du sodium de la roche contre le calcium de l'eau est masqué par l'excès de ce dernier en solution. Au niveau de la source Ain Souda, les eaux souterraines sont sursaturées vis-à-vis du gypse, le rapport ionique (Ca/SO<sub>4</sub> = 8), indique que le calcium et les sulfates proviendraient de la même origine avec un excès en calcium.

**Tableau 76.** Indices de saturation des eaux souterraines dans le Tellien à Nummulites (aout/2009)

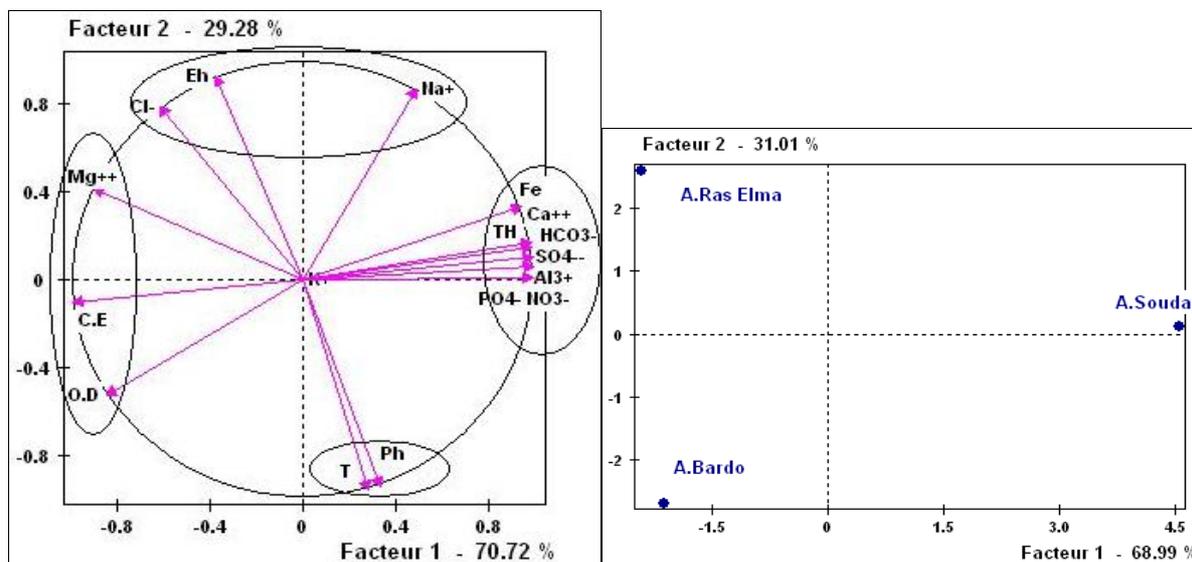
Période	Basses eaux (aout/2009)						
Minéraux	carbonatés				Evaporitiques		
Source	Faciès chimique	Calcite (CaCO <sub>3</sub> )	Dolomite Ca,Mg (CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Aragonite (CaCO <sub>3</sub> )	Anhydrite (CaSO <sub>4</sub> )	Gypse (CaSO <sub>4</sub> ,2H <sub>2</sub> O)	pCO <sub>2</sub> équival (atm)
A.Souda	B.C	-0,92	-1,6	-0,36	-1,7	1,48	0,04852
A.Bardo	S.C	0,02	-1,06	-0,12	-1,17	-0,95	0,0147
A. Ras El Ma	Cl.C	-0,71	-2,38	-0,86	-1,25	-1,03	0,14413

#### V.5.2.3.2.6. Analyse en composantes principales des eaux souterraines dans le Tellien à Nummulites (mai-aout/2009), (cf., fig. 36)

En hautes eaux, l'axe F1 (70,72 % de la variance totale) est représenté par un groupement de variables à valeurs positives : PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Al<sup>3+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> TH et Fe, qui sont opposées à un autre groupement de variables à valeurs négatives : O.D, C.E et Mg<sup>2+</sup>. Les variables à valeurs positives sont significativement corrélées entre elles (cf., tab. 77) et auraient une origine lithologique par lessivage. Le calcium est inversement corrélé au magnésium, ce dernier proviendrait donc d'une source différente, autre que celle du calcium auquel il est habituellement associé. Les éléments mineurs sont corrélés entre eux et également aux autres variables. La liaison entre les nitrates (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) et les phosphates (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>), fait penser à une infiltration depuis la surface du sol, leur corrélation aux bicarbonates est liée à la décomposition de la matière organique qui enrichit les eaux en CO<sub>2</sub>, leur attribuant une certaine agressivité face aux minéraux carbonatés. Donc, la minéralisation est acquise de deux origines différentes ; par infiltration et par hydrolyse. L'axe F1 représente le pôle de la minéralisation des eaux souterraines. L'axe F1 est apte à discriminer les points de surveillance de la minéralisation et la pollution agricole, la source Ain Souda est le point de surveillance. La présence du fer (Fe) dans les eaux souterraines de cette source serait due à une d'oxydation.

L'axe F2 (29,28 % de la variance totale), est représenté par les variables à valeurs positives : Cl<sup>-</sup>, Eh et Na<sup>+</sup> et, qui s'opposent aux variables à valeurs négatives : pH et T °C. Les chlorures et le sodium sont faiblement corrélés entre eux et situés de part et d'autre de l'axe F2. Ils proviendraient donc de deux origines différentes. Les chlorures, corrélés au potentiel d'oxydoréduction proviendraient d'une pollution anthropiques, le sodium est le résultat d'un échange de base contre le calcium de l'eau. Le pH et le potentiel d'oxydoréduction sont inversement corrélés. La composition chimique des eaux souterraines qui s'écoulent vers Ain Ras Elma est sous le contrôle du potentiel d'oxydoréduction. L'axe F2 est apte à discriminer les points de surveillance du potentiel d'oxydoréduction, et la

source Ras Elma est le point de surveillance. Le potassium situé à l'intersection des deux axes est inactif, il ne manifeste aucune corrélation aux autres variables et ne contribue pas à la minéralisation.



**Figure 36.** Projection des variables et des individus des eaux souterraines dans le Tellien à Nummulites (mai/2009).

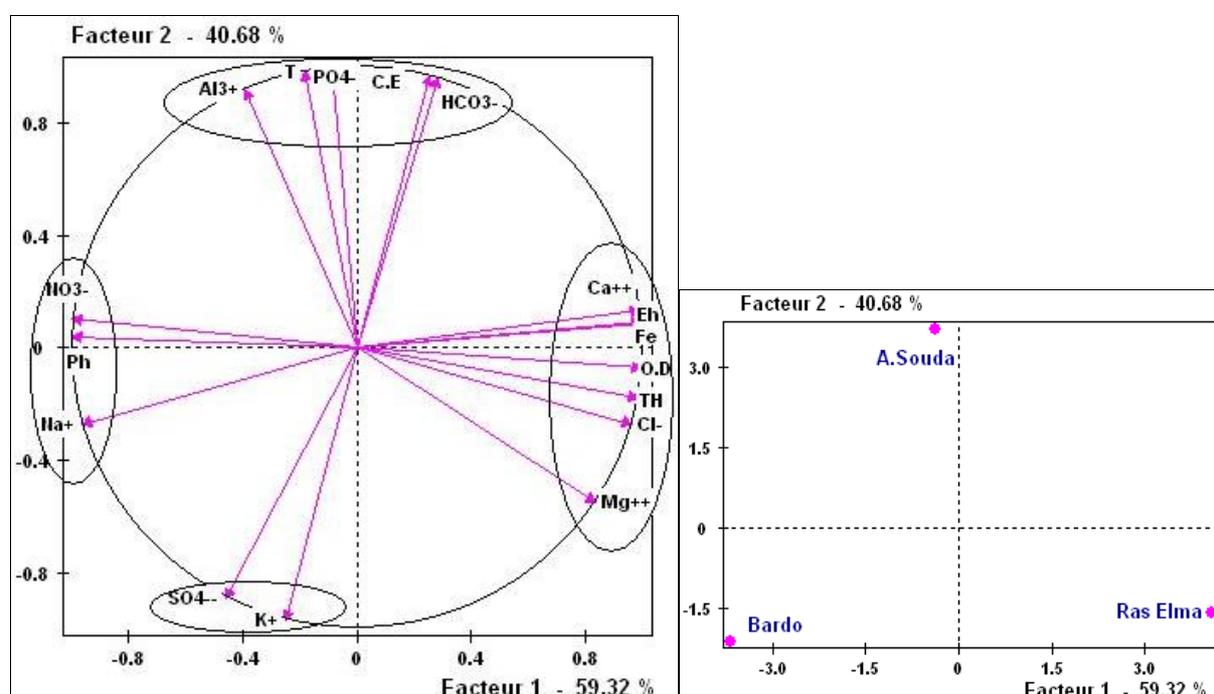
**Tableau 77.** Matrice de corrélation des eaux souterraines dans le Tellien à Nummulites (mai/2009).

	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>--</sup>	C.E	pH	Eh	T°C	O.D	TH°F	Fe	Al <sup>3+</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>
Ca <sup>++</sup>	1,00																
Mg <sup>++</sup>	-0,86	1,00															
K <sup>+</sup>	0,00	0,00	0,00														
Na <sup>+</sup>	0,58	-0,08	0,00	1,00													
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	1,00	-0,83	0,00	0,62	1,00												
Cl <sup>-</sup>	-0,53	0,89	0,00	0,38	-0,49	1,00											
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	1,00	-0,90	0,00	0,50	0,99	-0,61	1,00										
SO <sub>4</sub> <sup>--</sup>	1,00	-0,88	0,00	0,54	1,00	-0,57	1,00	1,00									
C.E	-1,00	0,86	0,00	-0,58	-1,00	0,53	-1,00	-1,00	1,00								
pH	0,23	-0,70	0,00	-0,65	0,19	-0,95	0,33	0,28	-0,24	1,00							
Eh	-0,28	0,73	0,00	0,62	-0,23	0,96	-0,37	-0,32	0,28	-1,00	1,00						
T°C	0,18	-0,66	0,00	-0,69	0,14	-0,93	0,28	0,23	-0,18	1,00	-1,00	1,00					
O.D	-0,90	0,55	0,00	-0,88	-0,92	0,11	-0,85	-0,88	0,90	0,21	-0,17	0,26	1,00				
TH°F	1,00	-0,83	0,00	0,63	1,00	-0,48	0,99	0,99	-1,00	0,17	-0,22	0,12	-0,93	1,00			
Fe	0,97	-0,71	0,00	0,76	0,98	-0,32	0,94	0,96	-0,97	0,00	-0,04	-0,05	-0,98	0,98	1,00		
Al <sup>3+</sup>	1,00	-0,90	0,00	0,50	0,99	-0,61	1,00	1,00	-1,00	0,33	-0,37	0,28	-0,85	0,99	0,94	1,00	
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	1,00	-0,90	0,00	0,50	0,99	-0,61	1,00	1,00	-1,00	0,33	-0,37	0,28	-0,85	0,99	0,94	1,00	1,00

En basses eaux (cf., fig. 37), l'axe F1 (59,32 % de la variance totale) est représenté par : Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, O.D, Eh, TH, Fe et Cl<sup>-</sup>, par opposition aux variables à valeurs négatives : NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, pH et Na<sup>+</sup>. Le calcium est positivement corrélé aux variables : Cl<sup>-</sup>, O.D, Eh, Fe et TH. On assiste à un phénomène d'oxydation qui aurait favorisé l'apparition du fer au niveau de la source Ras Elma. Le Magnésium qui contribue à la dureté des eaux est corrélé aux chlorures

(Cl<sup>-</sup>) et moyennement corrélé au calcium (cf., tab. 78). Ce dernier inversement corrélé au sodium (Na<sup>+</sup>), est mis en solution à partir de l'encaissant par échange de base contre le sodium de l'eau. A l'inverse, on assiste à une diminution du pH des eaux par concentration des matières azotées dans les eaux, par évaporation. L'axe F1 est apte à discriminer les points de surveillance du phénomène d'oxydation et d'échange de base.

L'axe F2 (40,68 % de la variance totale), est représenté par les variables à valeurs positives : Al<sup>3+</sup>, T°C, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, C.E et HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, par opposition aux variables à valeurs négatives : SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> et K<sup>+</sup>. La conductivité électrique (C.E) est fortement corrélée aux bicarbonates (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) et, à un degré moindre aux phosphates (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>), à la température (T°C) et à l'aluminium. Donc, ces variables régissent le pole de la minéralisation par hydrolyse acide. Le potassium (K<sup>+</sup>) est significativement corrélé aux sulfates (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), leur origine commune serait attribuable à une concentration par évaporation. La projection des individus sur l'axe F2, indique que la source Ain Souda est le point de surveillance de la minéralisation.



**Figure 37.** Projection des variables et des individus des eaux souterraines dans le Tellien à Nummulites (aout/2009).

**Tableau 78.** Matrice de corrélation des eaux souterraines dans le Tellien à Nummulites (aout/2009).

	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	C.E	pH	Eh	T°C	O.D	TH° F	Fe	Al <sup>3+</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>
Ca <sup>++</sup>	1,00																
Mg <sup>++</sup>	0,75	1,00															
K <sup>+</sup>	-0,38	0,32	1,00														
Na <sup>+</sup>	-0,99	-0,66	0,50	1,00													
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,41	-0,29	-1,00	-0,53	1,00												
Cl <sup>-</sup>	0,92	0,95	0,02	-0,85	0,01	1,00											
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-0,97	-0,89	0,14	0,93	-0,18	-0,99	1,00										
SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	-0,58	0,10	0,97	0,68	-0,98	-0,20	0,36	1,00									
C.E	0,38	-0,32	-1,00	-0,51	1,00	-0,02	-0,15	-0,98	1,00								
pH	-0,98	-0,86	0,21	0,95	-0,25	-0,97	1,00	0,43	-0,22	1,00							
Eh	1,00	0,78	-0,34	-0,98	0,37	0,93	-0,98	-0,54	0,34	-0,99	1,00						
T°C	-0,05	-0,69	-0,91	-0,09	0,89	-0,44	0,29	-0,79	0,90	0,22	-0,09	1,00					
O.D	0,98	0,87	-0,18	-0,94	0,21	0,98	-1,00	-0,39	0,18	-1,00	0,99	-0,25	1,00				
TH° F	0,95	0,92	-0,07	-0,90	0,11	1,00	-1,00	-0,29	0,08	-0,99	0,96	-0,36	0,99	1,00			
Fe	1,00	0,79	-0,33	-0,98	0,36	0,94	-0,98	-0,53	0,34	-0,99	1,00	-0,10	0,99	0,97	1,00		
Al <sup>3+</sup>	-0,27	-0,83	-0,79	0,13	0,77	-0,63	0,49	-0,63	0,79	0,43	-0,31	0,98	-0,44	-0,55	-0,32	1,00	
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	0,05	-0,62	-0,94	-0,19	0,93	-0,35	0,19	-0,85	0,94	0,12	0,01	0,99	-0,16	-0,26	0,00	0,95	1,00

## Conclusion

Les eaux souterraines des formations telliennes à nummulites possèdent une température proche de 14 °C durant toute l'année, qui serait liée à leur origine profonde ou à la présence d'une couche épaisse protectrice. Elles sont alcalines en hautes eaux et neutres en basses eaux, moyennement minéralisées, douces et sont dans les normes de potabilité du point de vue paramètres physiques. En hautes eaux, leurs faciès chimiques sont bicarbonatés calciques au niveau des trois sources. L'origine carbonatée des ions dominants qui caractérisent les faciès chimiques est commune. Au niveau de la source Ain Souda, les teneurs des ions sont plus significatives. Les eaux souterraines sont sursaturées vis-à-vis des minéraux carbonatés au niveau des trois sources. La dissolution des minéraux contenus dans les formations carbonatées par les eaux d'infiltration, a permis l'acquisition de cet état de sursaturation. Parallèlement, les eaux sont sous-saturées vis-à-vis des minéraux évaporitiques et, ont tendance à s'enrichir en gypse.

l'ACP a montré que l'axe F1 est apte à discriminer les points de surveillance de la minéralisation et la pollution agricole, la source Ain Souda est le point de surveillance. La présence du fer (Fe) dans les eaux souterraines de cette source serait dûe à une d'oxydation. L'axe F2 est apte à discriminer les points de surveillance du potentiel d'oxydoréduction. Le potassium situé à l'intersection des deux axes est inactif, il ne manifeste aucune corrélation aux autres variables et, ne contribue pas à la minéralisation.

En basses eaux, les faciès chimiques sont : bicarbonatés calciques au niveau de la source Ain Souda, sulfatés calciques au niveau de la source Ain Bardo et, chlorurés calciques au niveau de la source Ras Elma. Elles sont sous-saturées vis-à-vis des minéraux carbonatés, sauf vis-à-vis de la calcite au niveau de la source Ain Bardo et, sous-saturées vis-à-vis des minéraux évaporitiques, sauf au niveau de la source vis-à-vis du gypse. L'axe F1 est apte à discriminer les points de surveillance du phénomène d'oxydation et l'échange de base, l'axe F2, indique que la source Ain Souda est le point de surveillance de la minéralisation.

### V.5.3. Le domaine para-autochtone

**V.5.3.1. Les formations Sellaoua :** Elles sont représentées par les marno-calcaires du Crétacé supérieur et dans lesquelles émergent les sources Ain Sbaa (Ouest) et Ain Sandal (Est).

#### V.5.3.1.1. Paramètres physiques des eaux souterraines dans les Sellaoua (mai-aout/2009), (cf., tab. 79).

En hautes eaux, les températures varient entre 14,4 et 16,4 °C, avec une moyenne de 15,4 °C et un écart type de 1,41 °C. En basses eaux, elles varient entre 14,8 et 15,7 °C, avec une moyenne de 15,25 °C et un écart type de 0,634 °C. On constate une chute de température au niveau de la source Ain Sbaa, liée à l'origine profonde du niveau d'eau ou à la présence d'une couche protectrice. En parallèle, on constate une légère augmentation au niveau de la source Ain Sandal située à l'Est, qui indique une influence atmosphérique au point d'émergence. Le pH des eaux varie de, alcalin en hautes eaux à neutre au niveau de Ain Sandal en basses eaux. La valeur élevée du pH en hautes eaux serait dûe à l'intrusion de substances minérales dissoutes par infiltration. Au niveau d'Ain Sbaa le pH est alcalin durant les deux périodes, avec une légère augmentation en basses eaux, liée à l'évaporation.

Les valeurs de Eh varient entre -181 et -29 mv, avec une moyenne de -105 mv et un écart type de 107 mv en hautes eaux. Au niveau de la source Ain Sbaa, la diminution de la valeur de Eh, de -29 mv en hautes eaux, à -66 mv en basses eaux est liée à celle de l'oxygène dissous. Au niveau d'Ain Sandal, les valeurs varient de -181 mv en hautes eaux à 29 mv en basses eaux, valeurs qui indiquent l'effet d'un potentiel d'oxydoréduction.

En hautes eaux, les teneurs en oxygène dissous, varient entre 2,6 mg/l au niveau de la source Ain Sbaa et 5,7 mg/l, au niveau de la source Ain Sandal, en basses eaux, elles varient entre 2,61 mg/l, au niveau de la première source et 1,67 mg/l, au niveau de la deuxième. La stabilité de la teneur en oxygène dissous au niveau de la source Ain Sbaa, verse dans l'existence d'une couche protectrice contre l'influence extérieure ou à l'origine profonde des eaux. Au niveau d'Ain Sandal, la teneur élevée en oxygène dissous serait liée à l'infiltration.

Les valeurs de la conductivité électrique varient entre 524 et 541 µs/cm en hautes eaux et, entre 478 et 573 µs/cm en basses eaux. D'une période à l'autre, les valeurs augmentent au niveau d'Ain Sbaa par évaporation et diminuent au niveau d'Ain Sandal, par infiltration.

Les valeurs de la dureté varient entre 3,38 et 4,8 °F en hautes eaux et, entre 1,75 et 8,1 °F en basses eaux. On enregistre une augmentation significative au niveau d'Ain Sandal par évaporation et, une diminution au niveau d'Ain Sbaa liée à l'appauvrissement des eaux souterraines en alcalino-terreux.

**Tableau 79.** Paramètres physiques des eaux souterraines dans les Sellaoua (mai-aout/2009)

Période	Hautes eaux (mai/2009)						Basses eaux (aout/2009)					
	C.E µs/cm	pH	Eh mv	T (°C)	O.D Mg/l	TH °F	C.E µs/cm	pH	Eh mv	T (°C)	O.D Mg/l	TH °F
A. Sbaa	541	8	-29	16,4	2,6	3,38	573	8,45	-66	14,8	2,61	1,75
A. Sndal	524	10	-181	14,4	5,7	4,8	478	7,15	21	15,7	1,67	8,1
Min	524	8	-181	14,4	2,6	3,38	478	7,15	-66	14,8	1,67	1,75
Max	541	10	-29	16,4	5,7	4,8	573	8,45	21	15,7	2,61	8,1
Moy	532,5	9	-105	15,4	4,15	4,09	525,5	7,8	-22,5	15,25	2,14	4,92
Ecart type	12,02	1,414	107	1,41	2,192	1,004	67,18	0,92	61,52	0,6364	0,6647	3,373
<b>Norme</b>	<b>1500</b>	<b>6,5-9,5</b>	<b>/</b>	<b>25</b>	<b>5 &lt;</b>	<b>&lt; 18</b>	<b>1500</b>	<b>6,5-9,5</b>	<b>/</b>	<b>25</b>	<b>5 &lt;</b>	<b>&lt; 18</b>

### V.5.3.1.2. Paramètres chimiques des eaux souterraines dans les Sellaoua (mai-aout/2009)

#### V.5.3.1.2.1. Teneurs en cations (mg/l), (cf., tab. 80)

En hautes eaux, les teneurs en calcium varient entre 51 et 92 mg/l, avec une moyenne de 71,5 mg/l et un écart type de 28,99 mg/l, en basses eaux, les teneurs varient entre 20 et 112 mg/l, avec une moyenne de 66 mg/l et un écart type de 65,05 mg/l. Les teneurs les plus élevées sont enregistrées au niveau d'Ain Sandal durant les deux périodes. On assiste à une diminution des teneurs au niveau d'Ain Sbaa, qui implique un apport en calcium par infiltration en hautes eaux. L'augmentation des teneurs au niveau d'Ain Sandal en basses eaux serait liée à une concentration par évaporation. Les teneurs en magnésium obéissent fidèlement au même scénario que le calcium. Les teneurs en sodium varient entre 18 et 21 mg/l en hautes eaux, avec une moyenne de 19,5 mg/l et un écart type de 2,12 mg/l, en basses eaux, elles varient entre 17 et 36 mg/l, avec une moyenne de 26,5 mg/l et un écart type de 13,435 mg/l. De même que pour les alcalino-terreux, les teneurs élevées en sodium sont enregistrées au niveau d'Ain Sandal également en basses eaux. Les teneurs en potassium sont invariables durant les deux périodes. A la lumière de ces teneurs, on peut conclure que l'augmentation des teneurs en cations au niveau d'Ain Sandal serait soumise à l'influence des paramètres climatiques. On assiste à une dilution par infiltration en hautes eaux et à une concentration par évaporation en basses eaux. Au niveau d'Ain Sbaa, l'évolution des teneurs en cations est inverse, l'apport en cations serait lié à une mise en solution par lessivage des formations géologiques traversées.

**Tableau 80.** Teneurs en cations (mg/l) des eaux souterraines dans les Sellaoua (mai-aout/2009)

Période	Hautes eaux (mai/2009)				Basses eaux (aout/2009)			
	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>
A. Sbaa	51	20	1	18	20	18	1	17
A. Sndal	92	5	2	21	112	60	2	36
Min	51	5	1	18	20	18	1	17
Max	92	20	2	21	112	60	2	36
Moy	71,5	12,5	1,5	19,5	66	39	1,5	26,5
Ecart type	28,99	10,61	0,71	2,12	65,05	29,7	0,707	13,435
<b>Norme</b>	<b>100</b>	<b>50</b>	<b>12</b>	<b>200</b>	<b>100</b>	<b>50</b>	<b>12</b>	<b>200</b>

#### V.5.3.1.2.2. Teneurs en anions (mg/l), (cf., Tab. 81)

Au niveau de la source Ain Sbaa, les teneurs en bicarbonates sont identiques durant les deux périodes. Au niveau d'Ain Sandal, elles varient entre 291 mg/l en hautes et 371 mg/l en basses eaux. L'augmentation de la teneur en bicarbonates serait liée à une évaporation. Pour les autres anions, on constate une augmentation des teneurs en anions, de la période de hautes eaux vers celle de basses eaux. Au niveau de la source Ain Sbaa, on constate pratiquement les mêmes teneurs durant les deux périodes, qui traduisent une stabilité de la composition chimique des eaux. L'aquifère ne reçoit pas un apport significatif en éléments minéraux dissous en période de hautes eaux et ne subit pas d'influence du milieu extérieur grâce à la couche de protection. Mises à part, les teneurs en bicarbonates qui sont élevées au niveau des deux sources, celles des autres anions s'insèrent dans la norme de potabilité d'eau de consommation.

**Tableau 81.** Teneurs en anions (mg/l) des eaux souterraines dans les Sellaoua (mai-aout/2009)

Période	Hautes eaux (mai/2009)				Basses eaux (aout/2009)			
	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>
A. Sbaa	235	29	13,5	16,5	235	29	13	16
A. Sndal	291	28	5	36	370	175	8	110
Min	235	28	5	16,5	235	29	8	16
Max	291	29	13,5	36	370	175	13	110
Moy	263	28,5	5	36	302,5	102	10,5	63
Ecart type	39,598	0,7071	6,0104	13,788	95,459	103	3,536	66,5
<b>Norme</b>	<b>250</b>	<b>200</b>	<b>50</b>	<b>250</b>	<b>250</b>	<b>200</b>	<b>50</b>	<b>250</b>

**V.5.3.1.2.3. Teneurs en éléments mineurs (mg/l), (cf., tab. 82)**

Les éléments mineurs décelés dans les eaux souterraines des Sellaoua, sont l'aluminium et les phosphates en hautes eaux. Leurs teneurs respectives varient entre 0,3 et 1,2 mg/l pour l'aluminium, avec une moyenne de 0,75 mg/l et un écart type de 0,636 mg/l et entre 0,08 et 0,22 mg/l pour les phosphates, avec une moyenne de 0,15 mg/l et un écart type de 0,0989 mg/l. Les teneurs en aluminium sont anormalement élevées surtout au niveau d'Ain Sbaa, celles en phosphates sont inférieures à la norme. En basses eaux, on note l'absence totale des éléments mineurs, leur origine serait liée au lessivage des formations géologiques traversées par les eaux d'infiltration.

**Tableau 82.** Teneurs en éléments mineurs (mg/l) des eaux souterraines dans les Sellaoua (mai-aout/2009).

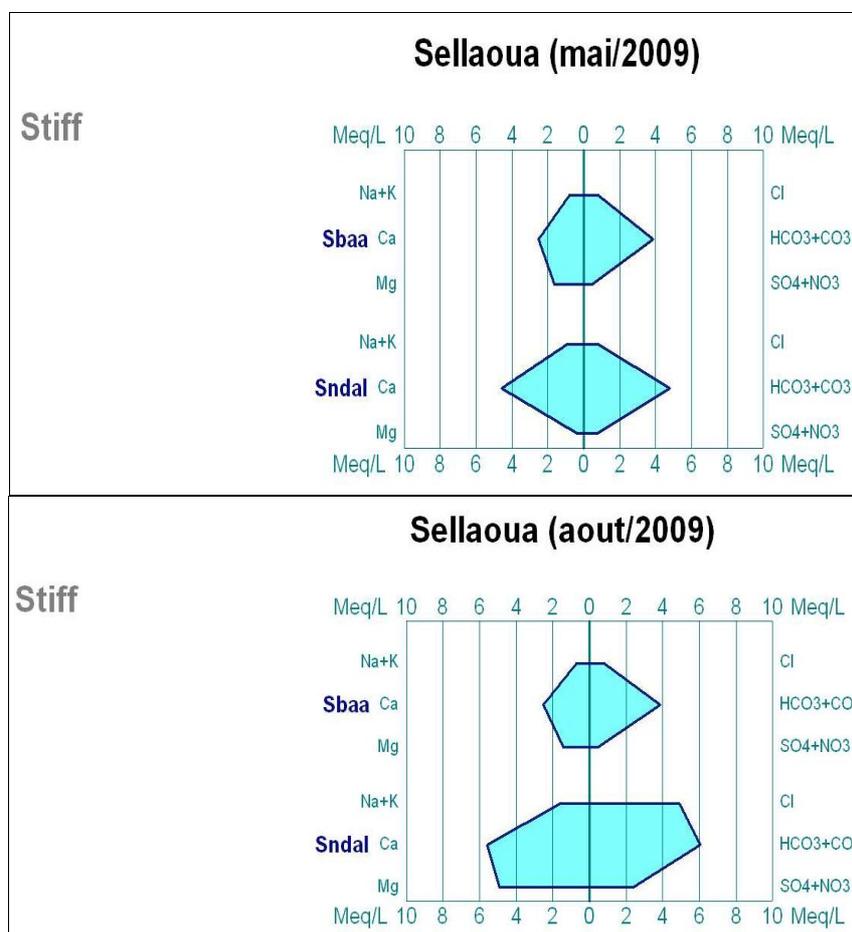
Période	Hautes eaux (mai/2009)	
	Al <sup>3+</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>
A. Sbaa	1,2	0,22
A. Sndal	0,3	0,08
Min	0,3	0,08
Max	1,2	0,22
Moy	0,75	0,15
Ecart type	0,636	0,09899
<b>Norme</b>	<b>0,2</b>	<b>2</b>

**V.5.3.1.3. Détermination des faciès chimiques des eaux souterraines dans les Sellaoua (mai-aout/2009), (cf., fig. 38)**

En hautes eaux, les faciès chimiques au niveau d'Ain Sbaa sont bicarbonatés calciques et magnésiens et, bicarbonatés calciques au niveau d'Ain Sandal. Les ions dominants qui caractérisent les faciès chimiques au niveau de la première source sont le calcium et le magnésium en pole secondaire pour les cations et les bicarbonates pour les anions. Au niveau de la deuxième source les ions dominants sont le calcium pour les cations et les bicarbonates pour les anions. Leurs origines seraient liées à la dissolution des éléments minéraux de la roche encaissante.

En basses eaux, les faciès chimiques au niveau d'Ain Sbaa sont les mêmes qu'en hautes eaux ; bicarbonatés calciques et magnésiens. Les ions dominants sont le calcium et le magnésium comme pole secondaire pour les cations et les bicarbonates pour les anions. Au

niveau d'Ain Sandal, les faciès sont bicarbonatés et chlorurés calciques et magnésiens. Les ions dominants sont le calcium et le magnésium en pole secondaire pour les cations et les bicarbonates et les chlorures comme pole secondaire au niveau d'Ain Sandal. L'acquisition des ions responsables des faciès chimiques des eaux souterraines serait liée à l'évaporation.



**Figure 38.** Faciès chimiques des eaux souterraines dans les Sellaoua (mai-aout/2009)

#### V.5.3.1.4. Répartition spatiale des faciès chimiques des eaux souterraines dans les Sellaoua (mai-aout/2009)

Ain Sbaa est située à l'ouest de la zone d'étude, Ain Sandal est située à l'Est. Les eaux de la zone ouest sont bicarbonatés calciques et magnésiens durant les deux périodes. Celles de la zone Est sont bicarbonatés calciques en hautes eaux et bicarbonatés et chlorurés calciques et magnésiens en basses eaux. A l'Est, on constate l'apparition du magnésium et des chlorures en basses eaux qui doivent avoir une même origine lithologique et liée à une concentration par évaporation. A l'Ouest, les eaux conservent les mêmes faciès chimiques durant les deux périodes. Cette stabilité fait penser à une protection contre toute influence extérieure.

#### V.5.2.3.1.5. Acquisition de la minéralisation des eaux souterraines dans les Sellaoua (mai-aout/2009)

En hautes eaux (cf., tab. 83), les eaux souterraines des formations Sellaoua sont sursaturées vis-à-vis des minéraux carbonatés au niveau des deux zones, avec un état de sursaturation plus significatif dans la zone Est, lié à une mise en solution des éléments

minéraux de la roche encaissante. Parallèlement, elles sont sous-saturées vis-à-vis des minéraux évaporitiques également au niveau des deux zones. Les minéraux carbonatés proviendraient de la dissolution des marno-calcaires des formations Sellaoua. Les chlorures et le magnésium proviendraient des marnes. Les rapports ioniques ( $\text{Ca/Mg} > 1$ ), ( $\text{Ca/HCO}_3 < 1$ ) et ( $\text{Mg/Cl} < 1$ ) indiquent que les bicarbonates sont plus dominants que le calcium, les chlorures et le magnésium.

**Tableau 83.** Indices de saturation des eaux souterraines dans les Sellaoua (mai/2009)

Période	Hautes eaux (mai/2009)						
Minéraux	carbonatés				Evaporitiques		
Source	Faciès chimique	Calcite ( $\text{CaCO}_3$ )	Dolomite $\text{Ca,Mg} (\text{CO}_3)_2$	Aragonite ( $\text{CaCO}_3$ )	Anhydrite ( $\text{CaSO}_4$ )	Gypse ( $\text{CaSO}_4,2\text{H}_2\text{O}$ )	$\text{pCO}_2$ équi(atm)
A. Sbaa	B.C.M	0,66	0,71	0,51	-2,6	-2,38	0,00233
A. Sandal	B.C	2,99	4,51	2,84	-2,03	-1,81	0,00003

En basses eaux (cf., tab. 84), les eaux souterraines sont sursaturées vis-à-vis des minéraux carbonatés au niveau des deux zones, avec une sursaturation plus significative pour les eaux d'Ain Sbaa et à la limite de l'équilibre au niveau d'Ain Sandal. Elles sont sous-saturées vis-à-vis des minéraux évaporitiques dans les deux zones. Les rapports ioniques ( $\text{Ca/Mg} > 1$ ), ( $\text{Ca/HCO}_3 < 1$ ) et ( $\text{Mg/Cl} < 1$ ) indiquent que les bicarbonates sont plus dominants que le calcium, les chlorures et le magnésium. Les bicarbonates et le calcium proviendraient des calcaires, les chlorures et le magnésium proviendraient des marnes par concentration liée à l'évaporation.

**Tableau 84.** Indices de saturation des eaux souterraines dans les Sellaoua (aout/2009)

Période	Basses eaux (aout/2009)						
Minéraux	Carbonatés				Evaporitiques		
Source	Faciès chimique	Calcite ( $\text{CaCO}_3$ )	Dolomite $\text{Ca,Mg} (\text{CO}_3)_2$	Aragonite ( $\text{CaCO}_3$ )	Anhydrite ( $\text{CaSO}_4$ )	Gypse ( $\text{CaSO}_4,2\text{H}_2\text{O}$ )	$\text{pCO}_2$ équi(atm)
A. Sbaa	B.C	1,11	1,56	0,96	-2,61	-2,38	0,00083
A. Sandal	B.Cl.C.M	0,25	0,04	0,11	-1,58	-1,36	0,02493

## Conclusion

Les eaux souterraines des Sellaoua possèdent une température moyenne de 14 °C durant les deux périodes, avec une légère chute au niveau de la source Ain Sbaa, qui serait liée à l'origine profonde des eaux ou à la présence d'une couche épaisse de couverture et, une légère augmentation au niveau de la source Ain Sandal, qui indique une influence atmosphérique au point d'émergence. Le pH des eaux varie de alcalin en hautes eaux à neutre en basses eaux, au niveau de Ain Sandal. Au niveau d'Ain Sbaa il est alcalin durant les deux périodes, avec une légère augmentation en basses eaux liée à l'évaporation. Elles possèdent une minéralisation moyenne et douces. Leurs teneurs en ions sont dans les normes sauf pour les bicarbonates et l'aluminium qui sont anormalement élevées. Les principaux faciès chimiques sont bicarbonatés calciques et reflètent fidèlement leur origine carbonatée. La zone Est offre des conditions d'échange avec le milieu extérieur, contrairement à la zone ouest, caractérisée par la présence d'une couche de couverture qui limite l'échange avec le milieu extérieur.

En hautes eaux, les eaux souterraines des formations Sellaoua sont sursaturées vis-à-vis des minéraux carbonatés au niveau des deux zones, avec un état de sursaturation plus

significatif dans la zone Est. Elles sont sous-saturées vis-à-vis des minéraux évaporitiques également au niveau des deux zones. Les minéraux carbonatés proviendraient essentiellement de la dissolution des formations Sellaoua. En basses eaux, les eaux souterraines sont sursaturées vis-à-vis des minéraux carbonatés au niveau des deux zones, avec une sursaturation plus significative pour les eaux d'Ain Sbaa. Parallèlement, elles sont sous-saturées vis-à-vis des minéraux évaporitiques dans les deux zones.

### V.5.3.2. Les formations néritiques

Ce sont des marnes et marno-calcaires du Crétacé où émergent les eaux de deux sources thermales H. Meskhoutine (cascade), H.Ouled Ali (H.O.Ali) et celles d'un lac souterrain (Bir Ben Osmane : B.B.O) situé au Sud-est de H. Meskhoutine et, dont les eaux sont froides.

Les eaux thermales possèdent une action dissolvante extrêmement puissante lorsqu'elles traversent les terrains et acquièrent une composition chimique différente des eaux froides.

#### V.5.3.2.1. Paramètres physiques des eaux souterraines dans le Néritique (mai-aout/2009), (cf., tab. 85).

Durant les deux périodes, les températures des deux sources thermales sont élevées et atteignent 54 °C au niveau de H.O.Ali et 98 °C au niveau de la cascade. Celles de (B.B.O), varient entre 17,5 °C en hautes eaux et 18,3 °C en basses eaux. Selon le gradient géothermique (1°C/33 m), (Ouali et al, 2007), l'origine des eaux thermales serait très profonde. Ce gradient est plus important dans la région de H. Meskhoutine ; il varie entre 1°C/7 m et 1°C/16 m (H. Dib, 1983). Les eaux météoriques s'infiltrent au niveau de la zone de recharge et acquièrent des températures et pressions qui augmentent au fur et à mesure qu'elles pénètrent vers le manteau extérieur de la terre. Par différence de leur densité qui diminue, elles remontent vers la surface de la terre en empruntant des chemins préférentiels, en sources chaudes et jaillissantes.

En hautes eaux, le pH varie entre 7,5 (cascade) et 9,8 (H.O.Ali), en basses eaux, il varie entre 8,32 (cascade) et 10,05 (H.O.Ali), enregistrant une augmentation remarquable, liée à l'évaporation. Le potentiel d'oxydoréduction varie entre -146 et 7 mv en hautes eaux, avec une moyenne de -59 mv et un écart type de 78,63 mv et, entre -163 et -52 mv en basses eaux, avec une moyenne de -91 mv et un écart type de 62,43 mv. Durant les deux périodes, les valeurs de Eh au niveau de (B.B.O) et H.O.Ali et au niveau de la cascade en basses eaux, indiquent un milieu réducteur. En hautes la valeur positive de Eh, indique un milieu oxydant. Les teneurs en oxygène dissous, varient entre 0,03 et 2,5 mg/l en hautes eaux. La valeur la plus élevée est enregistrée au niveau de (B.B.O), où la surface libre du plan d'eau reçoit les eaux de pluie qui l'approvisionnent en oxygène à travers le toit calcaire. En basses eaux, les teneurs diminuent au niveau de (B.B.O) et augmentent au niveau des sources thermales du simple au double. En hautes eaux, les valeurs de la conductivité électrique varient entre 1426 et 2480  $\mu\text{s/cm}$ , avec une moyenne de 1886  $\mu\text{s/cm}$  et un écart type de 539,8  $\mu\text{s/cm}$ . Les valeurs dépassent la norme de potabilité au niveau de la cascade et B.B.O et, à la limite de la norme au niveau de H.O.Ali. En basses eaux, les valeurs varient entre 1325 et 2480  $\mu\text{s/cm}$ , avec une moyenne de 2008,3  $\mu\text{s/cm}$  et un écart type de 605,89  $\mu\text{s/cm}$ . La conductivité au niveau de B.B.O qui reste stable, suppose une dissolution continue indépendamment des saisons, l'augmentation au niveau de la cascade suppose une évaporation en basses eaux et, une dilution en hautes eaux. Au niveau de H.O.Ali, une légère diminution de la conductivité suppose un apport en éléments minéraux par dissolution en hautes eaux. Les valeurs de la dureté varient entre 13,58 et 25,79 °F, en hautes eaux, avec une moyenne de 18,76 °F et un écart type de 6,3117 °F. En basses eaux, les valeurs varient entre 4,61 et 13,83 °F, avec une moyenne de 9,71 °F et un écart type de 4,6871 °F. On note donc une légère augmentation au niveau de la cascade, due au phénomène de l'évaporation en basses eaux et, une diminution au niveau des deux autres points due à un déficit en alcalino-terreux

A la lumière des valeurs des paramètres physiques étudiés, les eaux souterraines des formations carbonatées du Néritiques, sont caractérisées par l'hyper thermalité pour la cascade et H.O.Ali, ont un pH qui varie de neutre à alcalin en hautes eaux, avec une alcalinité plus significative en basses eaux, des teneurs en oxygène faibles, sauf pour B.B.O où on note une teneur relativement élevée grâce à un apport par les eaux d'infiltration.

A l'exception des eaux de la cascade qui enregistrent une valeur positive en hautes, les valeurs de Eh sont très faibles au niveau des deux autres sources et indiquent des milieux réducteurs. Les eaux sont moyennement minéralisées à H.O.Ali et minéralisées au niveau de la cascade et B.B.O. et où elles sont dures en hautes eaux et peu dures au niveau des sources thermales durant les deux périodes.

**Tableau 85.** Paramètres physiques des eaux souterraines dans le Néritique (mai-aout/2009)

Période	Hautes eaux (mai/2009)						Hautes eaux (aout/2009)					
	C.E µs/cm	pH	Eh mv	T (°C)	O.D mg/l	TH °F	C.E µs/cm	pH	Eh mv	T (°C)	O.D mg/l	TH °F
H.Meskh.cascade	1751	7,5	7	96	0,03	13,58	2220	8,32	-52	98	0,07	13,83
B.B.Osmane	2480	8,2	-38	17,5	2,6	25,79	2480	8,52	-58	18,3	0,86	4,61
H.O.Ali	1426	9,8	-146	54,3	0,031	16,91	1325	10,05	-163	53,2	0,07	10,69
Min.	1426	7,5	-146	17,5	0,03	13,58	1325	8,32	-163	18,3	0,07	4,61
Max.	2480	9,8	7	96	2,6	25,79	2480	10,05	-52	98	0,86	13,83
Moyenne	1886	8,5	-59	55,933	0,887	18,76	2008,3	8,963	-91	56,5	0,333	9,71
Ecart type	539,8	1,179	78,63	39,275	1,483	6,3117	605,89	0,946	62,43	39,95	0,456	4,687
Norme	1500	6,5-9,5	/	25	5 <	< 18	1500	6,5-9,5	/	25	5 <	< 18

### V.5.3.2.2. Paramètres chimiques des eaux souterraines dans le Néritique (mai-aout/2009).

#### V.5.3.2.2.1. Teneurs en cations (mg/l), (cf., tab. 86)

Les teneurs en calcium varient entre 235 et 485 mg/l, avec une moyenne de 340 mg/l et un écart type de 129,7 mg/l. Ces teneurs supérieures à la norme, reflètent l'empreinte des formations carbonatées lessivées. L'ordre croissant des teneurs, la cascade, H.O.Ali et B.B.O est le résultat du temps de contact eau-roche au niveau de chaque point d'eau. Au niveau de la cascade, l'eau est jaillissante à une vitesse nettement supérieure à celles au niveau de H.O.Ali. Au niveau de B.B.O, l'eau coule à une vitesse très lente et proche de la stagnation, permet un temps de contact eau-roche plus long d'où la teneur élevée en calcium. En basses eaux, les teneurs diminuent, surtout au niveau de B.B.O et suppose que l'apport en calcium est essentiellement lié aux eaux d'infiltration en période de hautes eaux. Les teneurs en magnésium, varient entre 37 et 46 mg/l en hautes eaux, avec une moyenne de 42,33 mg/l et un écart type de 4,725 mg/l, contre des teneurs qui varient entre 64 et 220 mg/l, avec une moyenne de 52,33 mg/l et un écart type de 17,156 mg/l en basses eaux. On enregistre une légère diminution du magnésium au niveau de B.B.O et une augmentation au niveau des sources thermales. Donc, l'apport en magnésium au niveau de B.B.O est également lié aux eaux d'infiltration. Au niveau des sources thermales, les teneurs en magnésium sont liées au lessivage des terrains traversés par les eaux ascendantes. Les teneurs en sodium varient entre 65 et 105 mg/l en hautes eaux, avec une moyenne de 80,67 mg/l et un écart type de 21,36 mg/l, contre des teneurs qui varient entre 28 et 200 mg/l, avec une moyenne de 112,7 mg/l et un écart type de 86,03 mg/l en basses eaux. Au niveau des sources thermales, on assiste à une augmentation des teneurs en sodium, parallèlement à celle en magnésium, au détriment du calcium par échange de base, par libération du sodium de la roche dans l'eau. Les teneurs en potassium varient entre 5 et 12 mg/l en hautes eaux, avec une moyenne de 8 mg/l et un écart type de 3,606 mg/l. En basses eaux, elles varient entre 1 et 21 mg/l, avec une moyenne de 9,33 mg/l et un écart type de 10,41 mg/l. On enregistre de ce fait une diminution au niveau de B.B.O et la cascade et, une augmentation anormale au niveau de H.O.Ali liée qui serait liée à la lithologie.

**Tableau 86.** Teneurs en cations (mg/l) des eaux souterraines dans le Néritique (mai-aout/2009).

Période	Hautes eaux (mai/2009)				Hautes eaux (aout/2009)			
	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>
H. Meskh.cascade	235	44	7	105	220	68	6	110
Bir Ben Osmane	485	37	12	65	64	34	1	28
H.O.Ali	300	46	5	72	168	55	21	200
Min	235	37	5	65	64	34	1	28
Max	485	46	12	105	220	68	21	200
Moyenne	340	42,333	8	80,67	150,67	52,333	9,333	112,7
Ecart type	129,7	4,725	3,606	21,36	79,431	17,156	10,41	86,03
<b>Norme</b>	<b>100</b>	<b>50</b>	<b>12</b>	<b>200</b>	<b>100</b>	<b>50</b>	<b>12</b>	<b>200</b>

**V.5.3.2.2.2. Teneurs en anions (mg/l), (cf., tab. 87)**

En hautes eaux, les teneurs en bicarbonates et en sulfates sont anormalement élevées. Celles en bicarbonates varient entre 456 et 921 mg/l, avec une moyenne de 761,67 mg/l et un écart type de 264,79 mg/l, celles en sulfates varient entre 378 et 486 mg/l, avec une moyenne de 415,30 mg/l et un écart type de 61,23 mg/l. Ces teneurs élevées indiqueraient une affinité de ces anions à la mise en solution. En basses eaux, on note une diminution importante en teneurs de ces anions au niveau de B.B.O et H.O.Ali et, une légère augmentation au niveau de la cascade. Donc, les teneurs élevées enregistrées en hautes eaux au niveau de ces deux points d'eau seraient acquises par lessivage des formations géologiques. Les teneurs en chlorures varient entre 56 et 220 mg/l en hautes eaux, avec une moyenne de 160,33 mg/l et un écart type de 90,666 mg/l. En basses eaux, elles varient entre 40 et 330 mg/l, avec une moyenne de 210 mg/l et un écart type de 151,30 mg/l. On enregistre donc, une augmentation au niveau des sources thermales et une diminution au niveau de B.B.O. En l'absence d'eaux d'infiltration, l'apport en chlorures serait d'origine profonde au niveau des sources thermales et par infiltration au niveau de B.B.O. Les teneurs en nitrates en hautes eaux sont faibles au niveau de la cascade et B.B.O et nulles au niveau de H.O.Ali. En basses eaux, elles augmentent sensiblement sous l'effet de l'évaporation, tout en restant dans la norme des nitrates des eaux naturelles.

**Tableau 87.** Teneurs en anions (mg/l) des eaux souterraines dans le Néritique (mai-aout/2009).

Période	Hautes eaux (mai/2009)				Hautes eaux (aout/2009)			
	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>
H. Meskh.cascade	456	220	2	378	480	260	12	355
Bir Ben Osmane	921	205	7	486	238	40	14	106
H.O.Ali	908	56	0	382	393	330	1	394
Min	456	56	0	378	238	40	1	106
Max	921	220	7	486	480	330	14	394
Moyenne	761,67	160,333	3	415,3	370,33	210	9	285
Ecart type	264,79	90,6661	3,606	61,23	122,58	151,3	7	156,24
<b>Norme</b>	<b>250</b>	<b>200</b>	<b>50</b>	<b>250</b>	<b>250</b>	<b>200</b>	<b>50</b>	<b>250</b>

### V.5.3.2.2.3. Teneurs en éléments mineurs (mg/l), (cf., tab. 88)

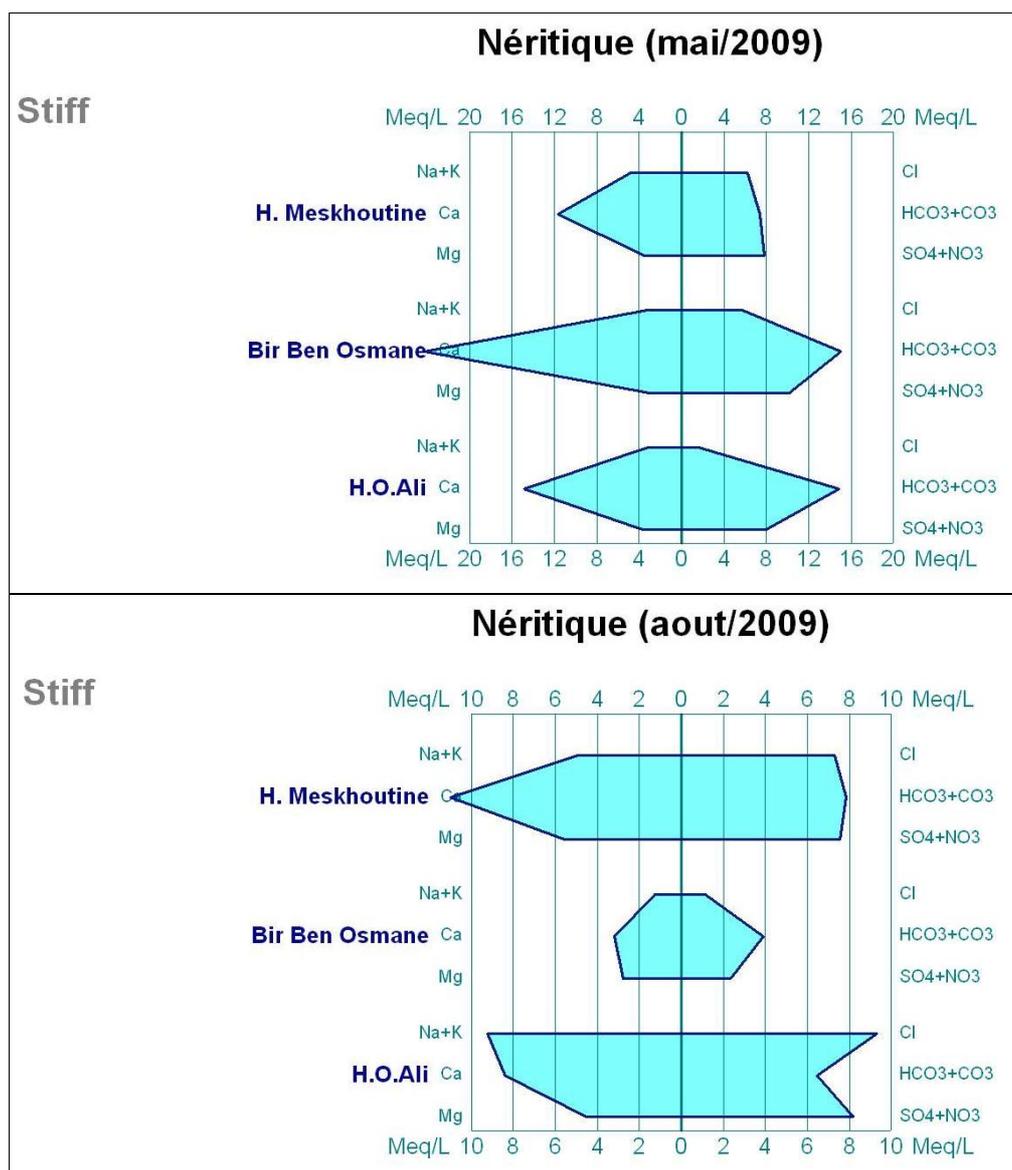
En hautes eaux, les teneurs en manganèse varient entre 0,4 et 0,45 mg/l, avec une moyenne de 0,43 mg/l et un écart type de 0,029 mg/l, celles en aluminium varient entre 0,45 et 0,75 mg/l, avec une moyenne de 4,42 mg/l et un écart type de 3,458 mg/l. Celles en phosphates varient entre 0 et 0,1 mg/l, avec une moyenne de 0,047 mg/l et un écart type de 0,05 mg/l. Les teneurs en manganèse et en aluminium sont au dessus de la norme de potabilité et proviendraient du lessivage de l'encaissant. Celles en phosphates sont dans la norme de potabilité durant les deux périodes et pourraient être d'origine lithologique. En basses eaux, les teneurs en manganèse et en aluminium augmentent au niveau de la cascade et B.B.O par évaporation et diminuent au niveau de H.O.Ali.

**Tableau 88.** Teneurs en éléments mineurs (mg/l) des eaux souterraines dans le Néritique (mai-aout/2009).

Période	Hautes eaux (mai/2009)			Hautes eaux (aout/2009)		
	Mn <sup>++</sup>	Al <sup>3+</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	Mn <sup>++</sup>	Al <sup>3+</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>
H. Meskh.cascade	0,4	6,07	0,04	0,6	6,5	0,04
Bir Ben Osmane	0,45	6,75	0,1	0,5	6,8	0,04
H.O.Ali	0,45	0,45	0	0,4	0,38	0,03
Min	0,4	0,45	0	0,5	0,38	0,03
Max	0,45	6,75	0,1	0,4	6,8	0,04
Moy	0,43	4,42	0,047	0,5	4,56	0,036
Ecart type	0,029	3,458	0,05	0,1	3,623	0,0057
<b>Norme</b>	<b>0,05</b>	<b>0,2</b>	<b>2</b>	<b>0,05</b>	<b>0,2</b>	<b>2</b>

### V.5.3.2.3. Détermination des faciès chimiques des eaux souterraines dans le Néritique (mai-aout/2009), (cf., fig. 39)

En hautes eaux, les faciès chimiques des eaux souterraines des formations carbonatées du Néritique sont : sulfatés et bicarbonatés calciques au niveau de la cascade, bicarbonatés et sulfatés calciques au niveau de B.B.O et H.O.Ali. Les ions dominants qui caractérisent les faciès chimiques sont : le calcium pour les cations au niveau des trois points d'eau et, les sulfates au niveau de la cascade comme ion principal et secondaire au niveau des autres points d'eau et, les bicarbonates au niveau de B.B.O et H.O.Ali comme ion principal et secondaire au niveau de la cascade pour les anions. Les bicarbonates et le calcium proviendraient de la dissolution des formations carbonatées néritiques et les sulfates proviendraient des formations gypso-salines. En basses eaux, les faciès chimiques sont : bicarbonatés calciques au niveau de la cascade, bicarbonatés calciques et magnésiens au niveau de B.B.O et, chlorurés et sulfatés sodi-calciques au niveau de H.O.Ali. Les ions dominants qui caractérisent les faciès chimiques en basses eaux sont : le calcium au niveau de la cascade et B.B.O et le sodium au niveau de H.O.Ali comme ions prédominants et le magnésium et le calcium comme ions secondaires, respectivement au niveau de B.B.O et H.O.Ali pour les cations et, les bicarbonates au niveau de la cascade et B.B.O et les chlorures comme ions principaux et les sulfates comme ion secondaire au niveau de H.O.Ali pour les anions. Les bicarbonates et le calcium proviendraient de la dissolution des formations carbonatées et, les chlorures, les sulfates et le sodium proviendraient des formations gypso-salines.



**Figure 39.** Faciès chimiques des eaux souterraines dans le Néritique (mai-aout/2009).

#### V.5.3.2.4. Répartition spatiale des faciès chimiques (mai-aout/2009).

Au niveau de la cascade les faciès chimiques des eaux souterraines sont sulfatés (40 %) et bicarbonatés (20 %) calciques (40 %), avec apparition des bicarbonates comme pole secondaire. Au niveau des deux autres points, les faciès chimiques sont bicarbonatés (40 %) et sulfatés (20 %) calciques (40 %).

En basses eaux, les faciès chimiques sont : bicarbonatés (50 %) calciques (50 %) au niveau de la cascade, avec une prédominance dominance des bicarbonates et disparition des sulfates qui devraient provenir dans ce cas de figure, par infiltration à partir de la zone de recharge, - bicarbonatés (40 %) calciques (40 %) et magnésiens (20 %), au niveau de B.B.O, avec apparition du magnésium par dédolomitisation et, - chlorurés (40 %) et sulfatés (10 %) sodiques (40 %) et calcique (10 %) au niveau de H.O.Ali, avec apparition du sodium par échange de base contre le calcium de l'eau.

Les bicarbonates et le calcium proviendraient de la dissolution des formations carbonatées néritiques dans la région de Hammam Meskhoutine et les sulfates et le sodium proviendraient des formations gypso-salines dans la région de Hammam Ouled Ali.

### V.5.3.2.5. Acquisition de la minéralisation des eaux souterraines dans le Néritique (mai-aout/2009)

En hautes eaux (cf., tab. 89), les eaux souterraines sont sursaturées vis-à-vis des éléments minéraux carbonatés au niveau des trois points d'eaux et vis-à-vis du gypse au niveau de B.B.O et, sont sous-saturées vis-à-vis de l'anhydrite au niveau des trois points d'eau et vis-à-vis du gypse au niveau des sources thermales. Les éléments minéraux carbonatés proviendraient de la dissolution des calcaires néritiques par mise en solution. Les valeurs des indices de saturations les plus élevées sont enregistrées au niveau de H.O.Ali, les plus basses au niveau de la cascade. Au niveau de H.O.Ali, ces valeurs seraient liées d'une part à l'action dissolvante des eaux chaudes et d'autre part au temps de contact eau-roche dû à la vitesse de circulation des eaux chaudes ascendantes. Au niveau de B.B.O. Les eaux froides ont une action dissolvante moins importante, donc le temps de contact est le facteur principal en faveur des valeurs intermédiaires des indices de saturation des eaux. L'ion sulfate contribue aux faciès chimiques au niveau des trois points d'eaux comme ion secondaire, le gypse aurait donc une origine lithologique.

**Tableau 89.** Indices de saturation des eaux souterraines dans le Néritique (mai/2009)

Période	Hautes eaux (mai/2009)						
	Minéraux	Carbonatés			Evaporitiques		
Faciès chimique		Calcite (CaCO <sub>3</sub> )	Dolomite Ca,Mg (CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Aragonite (CaCO <sub>3</sub> )	Anhydrite (CaSO <sub>4</sub> )	Gypse (CaSO <sub>4</sub> ,2H <sub>2</sub> O)	pCO <sub>2</sub> équi(atm)
H.Meskh.cascade	S.B.C	0,95	0,99	0,81	-0,82	-0,6	0,01334
Bir Ben Osmane	B.S.C	2,22	3,13	2,07	-0,49	0,27	0,00524
H.O.Ali	B.S.C	3,64	6,28	3,5	-0,74	-0,51	0,00013

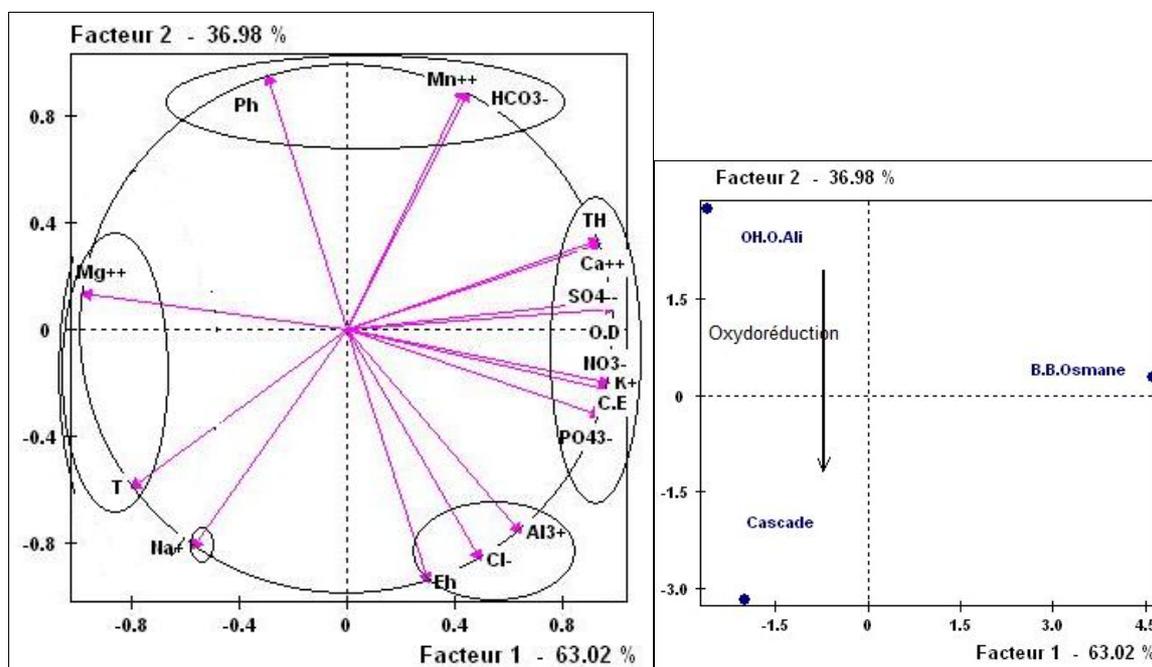
En basses eaux (cf., tab. 90), les eaux sont sursaturées vis-à-vis des minéraux carbonatés et sous-saturées vis-à-vis des minéraux évaporitiques, au niveau des trois points d'eau. Durant les basses eaux, les éléments minéraux proviendraient de la dissolution par hydrolyse acide. Les valeurs des indices de saturation les plus élevées sont enregistrées au niveau de H.O.Ali, les plus basses au niveau de B.B.O. En l'absence d'eau d'infiltration, la mise en solution des éléments minéraux serait liée à l'action dissolvante des eaux chaudes, cette action dissolvante est mise en évidence par les valeurs enregistrées au niveau des sources thermales. Les plus faibles valeurs des indices de saturation sont enregistrées au niveau de B.B.O.

**Tableau 90.** Indices de saturation des eaux souterraines dans le Néritique (aout/2009).

Période	Basses eaux (mai/2009)						
	Minéraux	Carbonatés			Evaporitiques		
Faciès chimique		Calcite (CaCO <sub>3</sub> )	Dolomite Ca,Mg (CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Aragonite (CaCO <sub>3</sub> )	Anhydrite (CaSO <sub>4</sub> )	Gypse (CaSO <sub>4</sub> ,2H <sub>2</sub> O)	pCO <sub>2</sub> équi(atm)
H.Meskh.cascade	B.C	1,76	2,82	1,62	-0,89	-0,67	0,000312
Bir Ben Osmane	B.S.C.M	1,24	2,01	1,1	-1,75	-1,53	0,0007
H.O.Ali	Cl.S.N.C	3,29	5,9	3,15	-0,96	-0,74	0,00003

### V.5.3.2.6. Analyse en composantes principales des eaux souterraines dans le Nérétique (mai-aout/2009)

En hautes eaux (cf., fig. 40), l'axe F1 (63,02 %) de la variance totale est représenté par le groupe de variables à valeurs positives : C.E, Ca<sup>2+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, O.D, K<sup>+</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> et TH. Il s'oppose au groupe représenté par les variables à valeurs négatives : Mg<sup>2+</sup> et la température (T°C), variable propre aux sources thermales H. Meskhoutine (cascade) et (H.O.Ali). La dureté (TH) est corrélée au calcium et inversement corrélée au magnésium, on assiste donc à une dureté purement calcique. Le calcium est corrélé significativement au TH, aux sulfates et à l'oxygène dissous (O.D), variables situées au dessus de l'axe F1 et à un degré moindre aux variables situées au dessous de l'axe F1: K<sup>+</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> et C.E (cf., tab. 91). Le calcium et les sulfates ont donc une même origine lithologique marno-calcaire, les autres variables K<sup>+</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> auraient une origine agricole. L'axe F1, représente donc la minéralisation acquise par mise en solution des minéraux par lessivage de la roche et infiltration des engrais. L'axe F1 est apte à discriminer les points de surveillance de la minéralisation, individualisée au niveau de B.B.O. L'axe F2 (36,98 %) de la variance totale est représenté par deux groupes opposés, le premier par les variables à valeurs positives : Mn<sup>2+</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> et pH et le deuxième par les variables à valeurs négatives : Al<sup>3+</sup>, Cl<sup>-</sup>, Eh, Na<sup>+</sup> et T°C. Le manganèse est corrélé aux bicarbonates et à un degré moindre au pH. Cette union Mn<sup>2+</sup> - HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> est à chercher dans la composition chimique des eaux chaudes ascendantes riches en CO<sub>2</sub> dissous. Elles acquièrent de ce fait une action agressive vis-à-vis des minéraux carbonatés. Le manganèse précipite quand les eaux ascendantes remontent en surface et acquièrent une pression atmosphérique en se déplaçant d'un milieu réducteur en profondeur à un milieu oxydant en surface. Les chlorures (Cl) sont corrélés à Al<sup>3+</sup> et au Eh, ils pourraient provenir des argiles. Le sodium est corrélé à la T°C, cette union indique l'action dissolvante des eaux chaudes face aux terrains gypso-salins. L'axe F2 représente donc le pouvoir d'oxydoréduction et l'action dissolvante des eaux chaudes face aux minéraux.



**Figure 40.** Projection des variables et des individus des eaux souterraines dans le Nérétique dans le Nérétique (mai/2009).

**Tableau 91.** Matrice de corrélation des eaux souterraines dans le Néritique (mai/2009).

	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	C.E	pH	Eh	T°C	O.D	TH	Mn <sup>++</sup>	Al <sup>3+</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>
Ca <sup>++</sup>	1,00																
Mg <sup>++</sup>	-0,89	1,00															
K <sup>+</sup>	0,86	-1,00	1,00														
Na <sup>+</sup>	-0,81	0,46	-0,40	1,00													
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,72	-0,33	0,26	-0,99	1,00												
Cl <sup>-</sup>	0,19	-0,61	0,66	0,43	-0,55	1,00											
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,86	-1,00	1,00	-0,40	0,26	0,66	1,00										
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0,98	-0,97	0,95	-0,66	0,55	0,40	0,95	1,00									
C.E	0,85	-1,00	1,00	-0,37	0,24	0,68	1,00	0,94	1,00								
pH	0,03	0,42	-0,48	-0,61	0,72	-0,98	-0,48	-0,19	-0,50	1,00							
Eh	-0,02	-0,43	0,49	0,60	-0,71	0,98	0,49	0,20	0,51	-1,00	1,00						
T°C	-0,95	0,72	-0,67	0,95	-0,89	0,12	-0,67	-0,86	-0,65	-0,33	0,32	1,00					
O.D	0,97	-0,98	0,96	-0,64	0,52	0,43	0,96	1,00	0,95	-0,22	0,23	-0,85	1,00				
TH°F	1,00	-0,89	0,85	-0,82	0,73	0,17	0,85	0,97	0,84	0,04	-0,03	-0,96	0,96	1,00			
Mn <sup>++</sup>	0,70	-0,31	0,24	-0,99	1,00	-0,57	0,24	0,53	0,22	0,73	-0,73	-0,88	0,50	0,71	1,00		
Al <sup>3+</sup>	0,36	-0,74	0,79	0,26	-0,39	0,98	0,79	0,56	0,80	-0,92	0,93	-0,06	0,58	0,35	-0,41	1,00	
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	0,79	-0,98	0,99	-0,28	0,14	0,75	0,99	0,90	0,99	-0,59	0,60	-0,57	0,92	0,78	0,11	0,86	1,00

En basses eaux (cf., fig. 41), l'axe 1 (65,80 % de la variance totale) est représenté par le groupe de variables à valeurs positives C.E, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Al<sup>3+</sup>, Eh, O.D et PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>. Il s'oppose au groupe de variables à valeurs négatives; SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Cl<sup>-</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup> Ph. La conductivité électrique (C.E) est positivement corrélée aux nitrates (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), aux phosphates (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>) à l'aluminium (Al<sup>3+</sup>) et au potentiel d'oxydoréduction (Eh) et à un degré moindre à l'oxygène dissous (O.D), (cf., tab. 92). La minéralisation des eaux est régie donc par deux phénomènes différents ; par infiltration de surface des engrais agricoles par oxydation et, par mise en solution des minéraux évaporitiques contenus dans les terrains gypso-salin. L'axe F1 est apte à discriminer les points de surveillance de la minéralisation, où l'oxydation des engrais azotés et phosphatés notamment au niveau de B.B.O. et où la dissolution des minéraux et les échanges de bases (H.O.Ali) font augmenter la conductivité électrique des eaux. L'axe 2 (34,20 % de la variance totale) est représenté par les variables à valeurs positives : T°C, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, TH situées à gauche de l'axe F2 et Mn<sup>2+</sup> situé à sa droite. Les bicarbonates, le calcium, le magnésium, la température et la dureté sont corrélés entre elles. L'influence de la température comme variable la plus pertinente au niveau de H.Meskhoutine (cascade), active la mise en solution des bicarbonates et des alcalino-terreux, variables composant la dureté (TH) des eaux.

La projection des individus sur l'axe F2, indique que la température est la variable la plus pertinente au niveau de H.Meskhoutine (cascade), qui active la mise en solution des bicarbonates et des alcalino-terreux, variables composant la dureté (TH) des eaux souterraines.

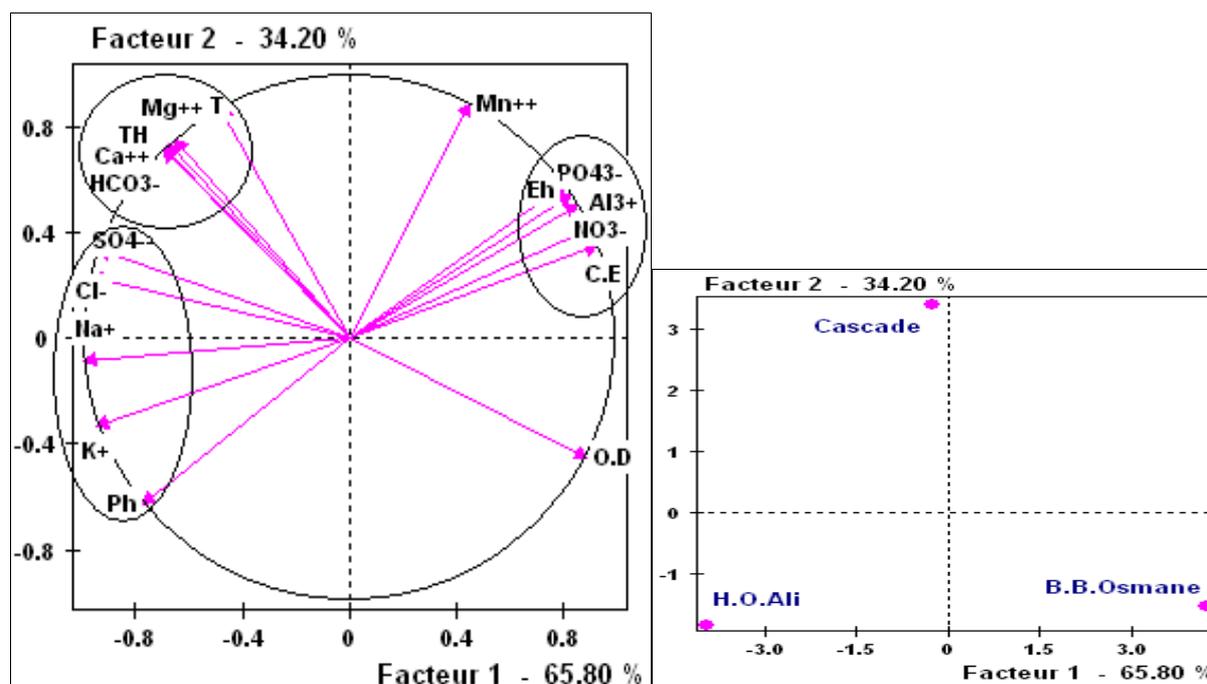


Figure 41. Projection des variables et des individus des eaux souterraines dans le Nérétique (aout/2009).

Tableau 92. Matrice de corrélation des eaux souterraines dans le Nérétique (aout/2009).

	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	C.E	pH	Eh	T°C	O.D	TH	Mn <sup>++</sup>	Al <sup>3+</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>
Ca <sup>++</sup>	1,00																
Mg <sup>++</sup>	1,00	1,00															
K <sup>+</sup>	0,42	0,37	1,00														
Na <sup>+</sup>	0,63	0,59	0,97	1,00													
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	1,00	1,00	0,39	0,61	1,00												
Cl <sup>-</sup>	0,84	0,81	0,84	0,95	0,83	1,00											
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-0,33	-0,27	-1,00	-0,94	-0,30	-0,78	1,00										
SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	0,90	0,87	0,78	0,91	0,88	0,99	-0,71	1,00									
C.E	-0,40	-0,34	-1,00	-0,96	-0,37	-0,83	1,00	-0,76	1,00								
pH	0,08	0,03	0,94	0,82	0,05	0,61	-0,97	0,52	-0,95	1,00							
Eh	-0,14	-0,09	-0,96	-0,86	-0,11	-0,65	0,98	-0,57	0,97	-1,00	1,00						
T°C	0,97	0,98	0,17	0,41	0,97	0,68	-0,07	0,75	-0,14	-0,18	0,12	1,00					
O.D	-0,94	-0,93	-0,69	-0,85	-0,93	-0,97	0,62	-0,99	0,67	-0,41	0,46	-0,83	1,00				
TH <sup>°F</sup>	1,00	1,00	0,41	0,63	1,00	0,84	-0,32	0,89	-0,39	0,08	-0,13	0,97	-0,94	1,00			
Mn <sup>++</sup>	0,33	0,38	-0,72	-0,52	0,35	-0,23	0,79	-0,12	0,74	-0,91	0,89	0,56	0,00	0,33	1,00		
Al <sup>3+</sup>	-0,23	-0,18	-0,98	-0,90	-0,20	-0,72	0,99	-0,64	0,98	-0,99	1,00	0,03	0,54	-0,22	0,84	1,00	
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	-0,19	-0,13	-0,97	-0,88	-0,16	-0,69	0,99	-0,60	0,98	-0,99	1,00	0,07	0,50	-0,18	0,87	1,00	1,00

**Conclusion**

Les formations géologiques sont des marnes et marno-calcaires du Crétacé où émergent les eaux de deux sources thermales H. Meskhoutine (cascade), H.Ouled Ali (H.O.Ali) et d'un lac souterrain (Bir Ben Osmane : B.B.O), situé au Sud-est de H. Meskhoutine dont les eaux sont froides. Les eaux thermales possèdent une action dissolvante extrêmement puissante

lorsqu'elles traversent les formations géologiques et acquièrent une composition chimique différente des eaux froides.

Durant les deux périodes, les températures des deux sources thermales sont élevées et atteignent 54 °C pour H.O.Ali et 98 °C pour H.Meskhoutine (cascade). Celles de B.B.O, varient entre 17,5 °C en hautes eaux et, 18,3 °C en basses eaux. Selon le gradient géothermique (1°C/33 m), (Ouali et al, 2007), l'origine des eaux thermales est très profonde.

A la lumière des valeurs des paramètres physiques étudiés, les eaux souterraines des formations carbonatées du Néritique, sont caractérisées par l'hyper thermalité pour la cascade et H.O.Ali, ont un pH qui varie de neutre à alcalin en hautes eaux, avec une alcalinité plus significative en basses eaux, des teneurs en oxygène faibles, sauf pour B.B.O où on note une teneur relativement élevée grâce à un apport par les eaux d'infiltration. A l'exception des eaux de la cascade qui enregistrent une valeur positive en hautes, les valeurs de Eh sont très faibles au niveau des deux autres points et indiquent des milieux réducteurs. Les eaux sont moyennement minéralisées à H.O.Ali et minéralisées au niveau de la cascade et B.B.O. Les eaux sont moyennement minéralisées à H.O.Ali et minéralisées au niveau de la cascade et B.B.O. et où elles sont dures en hautes eaux et, peu dures au niveau des sources thermales durant les deux périodes.

Les teneurs en manganèse et en aluminium sont au dessus de la norme de potabilité.

En hautes eaux, les faciès chimiques sont : sulfatés et bicarbonatés calciques au niveau de la cascade, bicarbonatés et sulfatés calciques au niveau de B.B.O et H.O.Ali, les eaux souterraines sont sursaturées vis-à-vis des éléments minéraux carbonatés au niveau des trois points d'eaux et vis-à-vis du gypse au niveau de B.B.O et, sous-saturées vis-à-vis de l'anhydrite au niveau des trois points d'eau et vis-à-vis du gypse au niveau des sources thermales.

En basses eaux, les faciès chimiques sont : bicarbonatés calciques au niveau de la cascade, bicarbonatés calciques et magnésien au niveau de B.B.O et, chlorurés et sulfatés sodi-calciques au niveau de H.O.Ali, les eaux sont sursaturées vis-à-vis des minéraux carbonatés et sous-saturées vis-à-vis des minéraux évaporitiques, au niveau des trois points d'eau.

En hautes eaux, l'axe F1, représente la minéralisation acquise par mise en solution des minéraux par lessivage de la roche et infiltration des engrais. L'axe F1 est apte à discriminer les points de surveillance de la minéralisation, individualisée au niveau de B.B.O. L'axe F2 représente le pouvoir d'oxydoréduction et l'action dissolvante des eaux chaudes face aux minéraux.

En basses eaux, L'axe F1 est apte à discriminer les points de surveillance de la minéralisation, où l'oxydation des engrais azotés et phosphatés notamment au niveau de B.B.O. et la dissolution des minéraux et les échanges de bases (H.O.Ali) font augmenter la conductivité électrique des eaux. L'axe F2, indique que la température est la variable la plus pertinente au niveau de H.Meskhoutine (cascade), qui active la mise en solution des bicarbonates et des alcalino-terreux, variables composant la dureté (TH) des eaux souterraines.

## CONCLUSION GENERALE

La zone d'étude fait partie de la chaîne des Maghrébides d'Algérie orientale (la chaîne alpine d'Afrique du Nord). Cette chaîne fait partie de l'orogène alpin péri-méditerranéen, d'âge Tertiaire.

Elle est située à 116 km à l'est de Constantine, à 65 km au sud-ouest d'Annaba, à 77 km à l'ouest de Souk Ahras et à 537 km à l'est d'Alger.

Le secteur d'étude appartient à l'ensemble géologique du Tell externe. On distingue trois domaines :

- 1- Domaine Post-nappes (formations récentes) : - les alluvions quaternaires ; - les travertins du bassin de Guelma ; - les travertins du bassin d'Ain Makhlouf et, - les calcaires lacustres (Mio-Pliocène) ;
- 2- Domaine allochtone : - les formations numidiennes ; - les formations Ultra-telliennes ;  
- les formations telliennes ; à Globigérines et à Nummulites (calcaires yprésiens (Eocène).
- 3- Domaine Para-autochtone : - les formations Sellaoua ; - les formations néritiques

L'interprétation des différents résultats d'analyses physico-chimiques, confrontés aux données géologiques recueillies de la description des domaines géologiques a permis :

- d'expliquer le chimisme des eaux souterraines au niveau de chaque domaine étudié ;
- de mettre en évidence l'influence climatique sur la composition chimique des eaux d'une période à l'autre ;
- de déterminer les faciès hydrochimiques des eaux à l'aide de programme ;
- de connaître les éléments minéraux qui contrôlent la minéralisation des eaux ;
- d'identifier les formations géologiques à l'origine des faciès hydrochimiques des eaux ;
- de mettre en évidence l'interaction eau-roche et les mécanismes influents à l'origine de cette relation ;
- de proposer le sens des écoulements des eaux souterraines au niveau de chaque domaine ;
- de proposer des schémas de synthèse conceptuels nouveaux ;
- l'ACP, comme outil d'aide à l'interprétation a permis de :

\* dégager les paramètres pertinents qui régissent la minéralisation des eaux et ceux qui pourraient altérer sa qualité, leurs origines et les points de surveillance pour un éventuel suivi ;

\* Identifier les conditions oxydantes ou réductrices du milieu où elles se trouvent,

Pour une précipitation moyenne de P(m) : 556,10 mm et ETP (m) : 917,89 mm, on enregistre un déficit pluviométrique.

La lame d'eau infiltrée (représente 25 % de la précipitation moyenne 556,10 mm), acquiert une composition chimique qui reflète fidèlement la nature des formations géologiques traversées.

Le secteur d'étude recèle des potentialités hydriques importantes réparties sur quatre aquifères principaux :

- L'aquifère alluvionnaire de Guelma d'âge Mio-Plio-Quaternaire, dans lequel les eaux varient entre bicarbonatées calciques et chlorurées calciques ;
- L'aquifère néritique, dans lequel les eaux sont bicarbonatées calciques;

- L'aquifère des formations carbonatées de la région de Ras El Agba-Sellaoua Announa, dans lequel les eaux sont également bicarbonatées calciques;
- L'aquifère des formations carbonatées de la région de Bouhachana–Ain Larbi dans lequel les eaux varient entre bicarbonatées calciques, chlorurées calciques et sulfatées calciques.

Les principales classes d'eau identifiées en relation avec les formations géologiques objet de l'étude sont:

<u>- Domaine Post-nappes</u>	{	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Alluvions quaternaires : B. C. et Chl. C. (HE), Chl.Sod, Chl.C et Chl.M (BE)</li> <li>* Travertins de Guelma : B.C. (HE) Chl.C. (BE)</li> <li>* Travertins A. Makhlouf: S.C. et B.C. (HE) Chl.C. et B.C. (BE)</li> <li>* Calcaires lacustres: Chl.C.</li> </ul>
<u>- Domaine allochtone</u>	{	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Numidien: B.C. (HE) B.M. et S.C. (BE)</li> <li>* Ultra-Tellien : B.C.</li> <li>* Tellien à :               <ul style="list-style-type: none"> <li>- Globigérines: B.C. et Chl.C. (HE, BE)</li> <li>- Nummulites: B.C. (HE) B.C., S.C. et Chl.C. (BE)</li> </ul> </li> </ul>
<u>- Domaine para-autochtone:</u>	{	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Sellaoua: B.C. (HE, BE)</li> <li>* Néritique: S.C. (cascade), B.C. (B.B.O., H.O.Ali), (HE) B.C. (cascade, B.B.O.), Chl.N. (H.O.Ali), (BE)</li> </ul>

Les classes d'eau ainsi dégagées en relation avec les différents domaines géologiques étudiés, peuvent être extrapolées à d'autres régions au-delà de la zone d'étude.

**REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

- A.B.H., (2005). Les cahiers de l'agence. Les eaux souterraines dans le bassin de la Seybouse, *Rapport interne 1- 46.* »
- Ammary B., (2007). Etude géochimique et isotopique des principaux aquifères du bassin Crétacé d'Errachidia et de la plaine de Taflalet. Th. Doct. Univ Rabat, Maroc. 134 p.
- Andrews R. J., Lloyd J. W., et Lerner D. N., (1997). Modelling of nitrate leaching from arable land into unsaturated soil and chalk : 1. Development of a management model for applications of sewage sludge and fertilizer. *J. Hydrol.*, 200, 179-197.
- Ayraud, V., (2005). Détermination du temps de résidence des eaux souterraines : Application au transfert de l'azote dans les aquifères fracturés hétérogènes. Thèse doct., univ.de Rennes1, 312p.
- Backalowicz M., (1996). Le traçage naturel des aquifères karstiques. Les apports de la géochimie de l'eau et des isotopes du milieu. In « Pour une gestion active des ressources en eau d'origine karstique » Séminaire national tenu à Montpellier en 1996.
- Backalowitch M. et Mangin A., (1980). L'aquifère karstique, sa définition, ses caractéristiques et son identification – Mémoire hors série de la société géologique de France. N° 11. P. : 71-79
- Banton O. and Bangoy L. M., (1999). Hydrogéologie : multiscience environnementale des eaux souterraines. Sainte-Foy, Québec, Presses de l'université du Québec.
- Batiot (2002). Etude expérimentale du cycle de carbone en régions karstiques- Apport du carbone organique et du carbone minéral à la connaissance hydrogéologiques des systèmes. Thèse doct. 2002 Univ. d'Avignon et des pays du Vaucluse.
- Beaudoin G., (2006). *Gitologie et métallogénie*. Cours, faculté des sciences et de génie. Univ. Laval, Québec. 13p
- Bergström L. et Jarvis N. J., (1991). Prediction of nitrate leaching losses from arable land under different fertilization intensities using the SOIL-SOILN models. *Soil Use Manage.*, 7, 79-85.
- Blayac J., (1912). Esquisse géologique du bassin de la Seybouse et de quelques régions voisines. Thèse sc. *Paris B.S.C.G. Algérie* n°6 490 p 53 fig. 6 plv. Alger
- Boers P. C. M., (1991). The influence of pH on phosphate release from lake sediments. *Wat. Res.* Vol. 25, N° 3, p. 309-311
- Bouillin J.P. (1986). Le « bassin maghrébin » : une ancienne limite entre l'Europe et l'Afrique à l'ouest des Alpes. *Bull. Soc. Géol. France*, 8(2) 547-558.
- Bragan R.J., Starr J.L. et Parkin T.B., (1997). "Acetylene transport in shallow groundwater for denitrification rate measurement". *Journal of Environmental Quality*, 26: 1524-1530.
- Castany G., (1982). *Principes et méthodes de l'hydrogéologie*. Dunod université. 237 p
- Chapman D. Et Kimstach V. (1996). Selection of water quality variables. Water quality assessments : a guide to the use of biota, sediments and water in environment monitoring, Chapman edition, 2nd ed. E & FN Spon, London, pp. 59-126.
- Chiodini G., Frondini F., Marini L., (1995). Theoretical geothermometers and pCO<sub>2</sub> indicators of aqueous solution coming from hydrothermal systems of medium low temperature hosted in carbonate evaporite rocks. Application to the thermal springs of the Etruscan schell, Italy. *Appl. Geochem.* 10, 337-346
- Chouabbi A., (1987). Etude géologique de la région de Hammam N'bails Sud Est de Guelma-Constantine, Algérie, un secteur des Maghrébides, th. Univ. Toulouse. 35-49
- Danquigny C., Ackerer P. et Carlier J.P., (2004). "Laboratory tracer tests on three-dimensional reconstructed heterogeneous porous media". *Journal of Hydrology*,

- 294: 196-212.
- Daresté de la Chavane, (1910). Étude spéciale des terrains tertiaires de la région de Guelma et établissement de deux cartes, feuille de Guelma (n° 54) et de Gounod (la Mahouna, Ain Larbi ou même Abdi) (n°76).
- Debieche T. H., (2002). Evolution de la qualité des eaux (salinité, azote et métaux lourds), sous l'effet de la pollution saline, agricole et industrielle. Application à la basse plaine de la Seybouse. NE, Algérien. Thèse doct. Université Franche Comté. 235 p
- Delleau P., (1952). Le pays constantinois. XIXe *Cong. Géol. Intern. Monogr. Régionale (1) Algérie*, n° 13, 85 p, 3 fig., 1 pl.
- De Marsily G. (1981). *Hydrogéologie quantitative*. Collection sciences de la terre. Edition Masson, Paris. 214 p
- Derradji F., Khérici N., Roméo M., Caruba R.. (2004). Aptitude des eaux de la vallée de la Seybouse à l'irrigation (Nord-Est algérien). *Sécheresse* ; 15 : 353-60.
- Derwich E E., Benaabidate L., Zian A., Sadki O., Belghity D., (2010). Caractérisation physico-chimique des eaux de la Nappe alluviale du haut Sebou en aval de sa Confluence avec oued fes.
- Detay M., (1993). *Le forage d'eau ; réalisation, entretien et réhabilitation*. Edition Masson. 1- 378.
- Detay M., (1997). *La gestion active des aquifères*. Edition Masson Paris. 1- 416.
- Dib H., (1983). Thermalisme de l'Est algérien. Colloque des ressources en eau et utilisations. Méthodes et études du cas algérien. I.S.T. Université de Constantine
- D.P.A.T., (2006). Direction de la Planification et de l'Aménagement du Territoire. *Rapport interne, monographie de la wilaya de Guelma*. 36 pages.
- Durand Delga, (1969). Mise au point sur la structure du Nord-Est de la Berbérie. *Publ. Serv. Géol. Algérie*, n°39, 89-131. Alger
- Durozoy, G., (1952). Les massifs calcaires crétacés des Monts Constantinois. Etude Hydrogéologique préliminaire, XIX *Congr.s G.ol. Inter.*, Alger, 20 p.
- Fedrigoni L., Krimissa M., Zouari K., Maliki A., Zouppi G.M., (2001). Origine de la minéralisation et comportement hydrogéochimique d'une nappe phréatique soumise à des contraintes naturelles et anthropiques sévères : exemple de la nappe de Djébiana (Tunisie). C R Acad Sci Paris, (Science de la terre et des planètes) ; 332 : 665-71.
- Fidelibus M.D. et Tulipano L., (1996). « Regional flow of intruding sea water in the carbonate aquifers of Apulia (Southern Italy) ». Proceedings 14th Salt Water Intrusion Meeting. Rapporteur och meddelanden nr 87. pp.: 230-241
- Flandrin J., (1948). Contribution à l'étude stratigraphique du Nummulitique algérien, Th.es Sciences, Paris, P.S.C.G. Algérie, *Bulletin* n° 19, 332, 88 fig., 8 pl. Alger
- Gaud B., 1976). Etude hydrogéologique de la nappe alluvionnaire de Guelma. Rapport interne. 318-333
- Gemici U. et Tarcan G., (2002). Hydrochemistry of the simav geothermal field, western Anatolia, Turkey. *J. Volcanol. Geoth. Res.*, 116, 215-233
- Glynn P.D. and Plummer N., (2005). Geochemistry and the understanding of groundwater système. "Hydrology journal 13: 263-287
- Gudmundsson B. T. et Arnorsson S., (2002). Geochemical monitoring of the krafla and Namfjoll geothermal areas, N-Iceland geothermals, 31, 195-234
- Guillaume P., Jean-Marie M., Dubois Et Gwyn G.H.J., (2005). Méthode de cartographie des géorisques karstiques à l'aide d'une image radar : application à l'île d'anticosti, québec. *Téledétection*, 2005, vol. 4, n°4, p. 303-328.
- Gokgoz A. et Tarcan G., (2006). Mineral equilibria and geothermometry of the Dalaman-

- koycegiz thermal spring, Southern Turkey. *Appl. Geochem.*, 21, 253-268
- Greenwood N.N. et Earnshaw A., (1984). *Chemistry of the elements*, Pergamon Press, Oxford, UK.
- Hani A., (2003). Analyse méthodologique de la structure et des processus anthropiques : Application aux ressources en eau d'un bassin côtier méditerranéen. Thèse doct. D'état en géol. Appl. Spéc. Hydrogéologie. Univ. Badji Mokhtar, Annaba.
- Hotelling, (1933). Analysis of a complex of statistical variables into principal components. *J.Educ.Psy.*24, p 417-441, p 498-520.
- Husson F., Josse J. et Pagès J., (2010). Principal component methods-hierarchical clustering-Partitional clustering : Why would we need to choose for visualizing data ? Technical report-Agrocampus, p. 17
- Ilavsky et Snopkava, (1987). Première datation du Trias détritique d'Algérie septentrionale, dans la région de Guelma. *C.R. Acad. S., ser. II*, t. 305, pp. 379-401, Paris
- Jacobsen O.H., Leij F.J. et Van Genuchten M.T., (1992). "Parameter Determination for Chloride and Tritium Transport in Undisturbed Lysimeters During Steady Flow". *Nordic Hydrology*, 23(2): 89-104.
- James R.V. et Rubin J., (1986). "Transport of chloride ion in a water-unsaturated soil exhibiting anion exclusion". *Soil Science Society of America Journal*, 50(5): 1142-1149.
- Joleaud L., (1912). Travaux étendus sur l'ensemble du Constantinois, J. Blayac (1912), a établi une esquisse géologique du bassin versant de la Seybouse, apporté des connaissances sur les étages du Crétacé et a montré l'âge triasique du complexe salifère de cette région
- Joseph O., (Articles parus entre 1991 et 1994). *Réactions d'oxydo-réduction et acido-basiques: vers une approche théorique et expérimentale plus cohérente. L'eau en tant que système rédox. Quelques aspects physico-chimiques des coordonnées bio-électroniques. Concepts de base de la bio-électronique*, «Sciences du Vivant» Ed. Arys (Paris) Vol.1 pages 23-34, Vol.2 pages 81-97, Vol.4 pages 45-62, Vol. 5 pages 77-87.
- Laborde J.P., (2003). Hydrologie de surface. Université Nice-Sofia antipolis
- Lahondère J. C., Feinberg H. et Haq B.U., (1979). Datation des grès numidiens d'Algérie orientale. *C.I. acad. Sciences Paris*, t<sub>1</sub> 289 pp. 383-386 3fig.
- Lahondère J.C., (1987). Les séries ultra telliennes d'Algérie nord orientale et les formations environnantes dans leur cadre structural. Th. Doct. Es sciences. Université Paul Sabatier, Toulouse. 1- 242. »
- Lasserre F., Razack M. Et Banton, O., (1999). A GISlinked model for the assessment of nitrate contamination in groundwater. *J. Hydrol.*, 224, 81-90.
- Magesan G.N., Vogeler I., Clothier B.E., Green S.R. et Lee R., (2003). "Solute movement through an allophanic soil". *Journal of Environmental Quality*, 32(6): 2325-2333
- Marie-Solange O., (2009). Caractérisation chimique des eaux des aquifères de fracture : Cas de la région de Tiassalé en Cote d'Ivoire. *European journal of scientific research*, vol.31, N°1. pp : 72-87.
- Meybeck M., Friedrich G., Thomas R., Chapman D., (1996). Rivers Water quality assessments : a guide to the use of biota, sediments and water in environment monitoring, Chapman edition, 2nd ed. E & FN Spon, London, pp. 59-126.
- Mudry et Blavoux, (1986). Utilisation de l'analyse en composantes principales (sur variables centrées réduites) pour le fonctionnement hydrocinématique de trois aquifères karstiques du Sud-Est de la France, pp 53-59.
- Nagabhsushan P., Kumar P., (2007). Principal Component Analysis of histogram Data. Springer-Verglag Berlin Heidelberg. EdsISNN Part I I LNCS 4492, 1012-1021

- Noiriel C., (2005). Contribution à la détermination expérimentale et à la modélisation des différents processus contrôlant l'évolution géochimique, structurale et hydrodynamique des roches fissurées carbonatées. Thèse de doctorat, école des mines de Paris, 341 p.
- O.M.S., (2005). Célébration de la décennie internationale d'action l'eau, source de vie (2005-2015). Guide de sensibilisation 34 p.
- Ouali S., Khellaf A. & Beddari K., (2007). Etude des ressources géothermiques du Sud algérien. *Revue des ressources renouvelables*. vol 10 n° 3, 407-417.
- Oostrom M., Dane J.H., Guven O. et Hayworth J.S., (1992). "Experimental Investigation of Dense Solute Plumes in an Unconfined Aquifer Model". *Water Resources Research*, 28(9): 2315-2326.
- Pandey R.S., Bhattacharya A.K., Singh O.P. et Gupta S.K., (1997). "Water table draw down during drainage with evaporation/evapotranspiration". *Agricultural Water Management*, 35(1-2): 61-73.
- Peck H.D., (1970). Sulphur requirements and metabolism of microorganisms. *Proceedings of a symposium on sulphur in nutrition*. D.H. Muth & J.E. Oldfields. Ari Publishing Co., Westport, CT.
- Plummer L.N., Parkhurst D.L. and Thorstenson D.C., (1983). *Géochimie, cosmochimie. Acta*, 42, pp: 1117-1139
- Porro I., Wierenga P.J. et Hills R.G., (1993). "Solute Transport Through Large Uniform and Layered Soil Columns". *Water Resources Research*, 29(4): 1321-1330.
- Primeau S. et Grimard Y., (1989). *Rivière Yamaska 1975- 1988, vol. 2 : Résultats complémentaires sur la qualité des eaux*. Ministère de l'Environnement du Québec, Direction de la qualité des cours d'eau, Sainte-Foy, Québec.
- Raeisi K., (1997). Hydrochemographs of Bergham karst spring as indicators of aquifers characteristics. *Journal of Cave and Karst Studies*, 59 (3), 112-118
- Raoult J.F., (1975). Evolution paléogéographique et structurale de la chaîne alpine entre le golf de Skikda et Constantine (Algérie orientale). *Extrait du bulletin de la société géologique de France*, 7° série. t, XVII, 394-409. »
- Refsgaard J.C., Thorsen M., Jensen J.B., Kleeschulte S. et Hansen S., (1999). Large scale modelling of groundwater contamination from nitrate leaching. *J. Hydrol.*, 221, 117-140.
- Remeneras G., (1993). *L'hydrologie de l'ingénieur*. Edition Eyrolles. Paris 183 pages
- Rice R.C., Bowman R.S. et Jaynes D.B., (1986). "Percolation of water below an irrigated field." *Soil Science Society of America Journal*, 50(4): 855-859.
- Rodier J., (2009). *L'analyse de l'eau ; eaux naturelles, eaux résiduelles, eaux de mer. Chimie, physico chimie, microbiologie, biologie, interprétation des résultats*. 8<sup>ème</sup> édition Dunod, Paris. 1383 pages.
- Roubault M., (1934). La Kabylie de Collo. Etude géologique. Thèse Sc. Paris. *P.S.C.G. Algérie* (2), Bull. n° 10, 272 p., Alger
- Schmalz B., Lennartz B. et van Genuchten M.T., (2003). "Analysis of unsaturated water flow in a large sand tank". *Soil Science*, 168(1): 3-14.
- Schoeller H., (1934). Les échanges de base dans les eaux souterraines. Trois exemples en Tunisie, *Bull., Soc., Géol. De France* (5), IV, 389-420
- Schoeller H., (1941). Les modifications de la composition chimique de l'eau dans une même nappe, *bulletin de la société géologique de France*. XI, pp : 124-129
- Schoeller H., (1962). *Les eaux souterraines, hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources*. Ed. Masson et Cie, 640 p
- Schoen R., Gaudet J.P. et Bariac T., (1999). "Preferential flow and solute transport in a large lysimeter, under controlled boundary conditions". *Journal of Hydrology*, 215(1- 4): 70-81.

- SIDD (Système d'information sur le développement durable), (2003). Assurer l'avenir du milieu rural : le développement rural et l'agriculture durable au Canada (Page web), Disponible à [www.sdinfo.gc.ca/reports/fr/monograph8/agricult.cfm](http://www.sdinfo.gc.ca/reports/fr/monograph8/agricult.cfm), Consultation en 2003.
- Silliman S.E., Berkowitz B., Simunek J. et van Genuchten M.T., (2002). "Fluid flow and solute migration within the capillary fringe". *Ground Water*, 40(1): 76-84.
- Smiler ; (2007). Diagramme : Logiciel d'hydrochimie multilingue en distribution libre version 4.0 du Laboratoire d'Hydrogéologie, Université d'Avignon, France.
- Sogréah (Société française d'ingénierie). (2005). *Etude d'actualisation et de finalisation du plan national de l'eau. Région hydrographique Centre et Est- Rapport de mission 2, volet 6 :hydrogéologie. vol 2*, 164 -168.
- Stitou J. et Pulido-Bosch A., (1995). Impacts anthropiques sur l'aquifère alluvial de Smir (Tetouan, Maroc),.Hydrogéologie, n° 3, pp.39-46, 6 fig., 2 tab.
- Tardy Y., (1980). Géochimies des interactions entre les eaux, les minéraux et les roches. S.A.R.L. ELEMENTS edit. Tarbes, 199 p.
- Thorntthwaite C.W., (1948). An approach towards a rational classification of climate. *Geographical review*. 38, 55.596
- Thiebaud E., (2008). Fonctionnement d'un système hydrothermal associé à un contact tectonique alpin (La Lechère, Savoie). Apports de l'hydrogéologie, de la géochimie et de la modélisation hydrodynamique et thermique en vue de la gestion de la ressource. Th ; Doct. De géologie, uni.de Savoie, 306 p
- Vila J.M., (1966). Sur la présence d'un flysch allochtone tithonique et néocomien dans la région située entre Bône et Guelma (Est de la chaîne numidique, Algérie). *C.R.Somm. S.G. France*, p 232, 1 fig., Paris.
- Vila J. M., Busnardo R., Devries A., Magne J. et Sigal J., (1968). Données stratigraphiques sur la série renversée et charriée du Djebel Bousbaa et étude de son cadre structural (région de Guelma, constantinois, Algérie). *B.S.G. Paris France*, (7), X, 206-212.
- Vila J. M et Magné J., (1969). Evolution du domaine néritique constantinois dans la région de Guelma(Algérie), à la fin du Secondaire et au début du Tertiaire : conséquences paléogéographiques. *C.R. Acad. Sc.*, t. 197, p. 775-778, 2 fig., Paris.
- Vila J. M., (1970). Répartition de l'autochtone en fenêtre Hahouner-Débar (feuille au 1 /50 000è de Gounaud-La Mahouna, Nord-Est de Constantinois, Algérie). *B.S.G. France*, (7), XII, p. 813-817, 3 fig. Paris
- Vila J. M., (1971). Paléogéographie et tectonique des unités allochtones du type tellien et de type flysch à microbrèches dans le Nord-Est (Algérie). *C.R. Acad. Sc. (D)*, t. 272, p. 1047-1050, 1 fig., Paris.
- Vila J.M., (1972). Les témoins méridionaux du mole néritique constantinois au Sud de Hammam Meskhoutine et de Guelma 'Algérie). *B.S.H.N. Afr. Nord* 63, fasc. 1-2, p. 29-37, 4 fig., Alger.
- Vila J. M., (1978). La nappe néritique constantinoise: Un élément majeur de la chaîne alpine d'Algérie orientale. 6<sup>ème</sup> Réun. Ann. Sc. Terre, Orsay, p. 404, 1 fig.
- Vila J.M., (1980). La chaîne alpine d'Algérie orientale et des confins Algéro-Tunisiens.Th. Doct. Es sciences naturelles, Paris 3 tomes, 665 pages, 199 figures, 40 planches.
- Wierenga P.J. et Van Genuchten M.T., (1989). "Solute transport through small and large unsaturated soil columns". *Ground Water*, 27(1): 35-42.