

UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR – ANNABA  
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



Année 2016

Faculté des Sciences de la Terre  
Département de Géologie

# THÈSE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de  
Docteur en Sciences

Domaine : Sciences de la Terre et de l'Univers

Filière : Géologie

**EFFETS DE LA VARIABILITÉ CLIMATIQUE SUR LES  
RESSOURCES EN EAU D'UN AQUIFÈRE KARSTIQUE  
-CAS DU PLATEAU DE CHÉRIA-**

Option : Hydrogéologie

Par

**BENHAMMADI Hocine**

Directeur de Thèse : M. CHAFFAI Hicham      Professeur UBM- Annaba

**DEVANT LE JURY**

PRÉSIDENT : M. DJABRI Larbi      Professeur UBM-Annaba

EXAMINATEURS:

M. HANI Azzedine

Professeur UBM-Annaba

M. BAALI Fethi

Professeur Université de Tébessa

M. KACHI Slimane

Professeur Université de Guelma

M. GOUAIDIA Layachi

Maître de Conférences A Université de Tébessa

## RÉSUMÉ

Le plateau de Chéria est caractérisé par un système carbonaté constituant le principal réservoir d'eau de la région. Ce système est constitué de trois niveaux géologiques. Un niveau constituant la couverture et d'âge plio-quaternaire, en dessous de cette formation est localisé le niveau Eocène calcaire, en dessous duquel se trouve le niveau Maestrichtien.

Le thème présenté dans ce travail vise à identifier l'impact de la variabilité du climat sur l'évolution de la ressource en eau souterraine dans ce système et particulièrement sur l'aquifère karstique que constituent les calcaires éocènes.

En raison d'épisodes climatiques déficitaires et d'une exploitation sans cesse croissante, un programme de travail a été élaboré afin de mieux visualiser l'état actuelle de la ressource en eau dans cette localité et d'identifier les véritables facteurs impactant cette ressource.

Sur la base d'un socle bibliographique constitué de travaux antérieurs sur la région et la comparaison avec l'ensemble des données issues de notre investigation, l'état de cet aquifère (Eocène) a pu être présenté, un état marquée par une baisse importante de son niveau statique, conséquence d'un double effet, climatique (recharge) et anthropique (exploitation).

En finalité et sur la base de la synthèse de tous les résultats, il est apparu que même si l'effet d'une recharge fréquemment déficitaire sur la ressource en eau de l'aquifère est certain, il est aussi tout a fait remarquable que l'exploitation en nette augmentation au cours des dernières décennies a un effet encore plus marqué et dominant.

Mots clés : Plateau de Chéria, Ressources en eau, Variabilité climatique, Aquifère karstique.

## ABSTRACT

Cheria plateau is characterized by a carbonate system constituting the main water reservoir of the region. This system consists of three geological levels. One level up the coverage and Pliocene-Quaternary age, below this formation is located the Eocene limestone level, below which will find the Maastrichtian level.

The theme presented in this work aims to identify the impact of climate variability on the evolution of the groundwater resource in this system and especially on the karstic aquifer that constitute the Eocene limestone.

Due to climatic episodes deficit and exploitation ever increasing, a work program has been developed to better visualize the current state of water resources in that area and to identify the real factors affecting this resource.

Based on a bibliographic base composed of previous work in the area, and the comparison with all the data from our investigation, the state of the aquifer (Eocene) has been presented, a state marked by a significant drop in static level, the result of a double effect, climate (recharge) and anthropogenic (exploitation). In finality and based on the synthesis of all the results, it appears that although the effect of deficit frequently refill the water in the aquifer resource is certain, it is also quite remarkable that exploitation a net increase in recent decades has an even stronger effect and dominant.

Key words: Chéria Plateau, Water resources, Climatic variability, Karstic aquifer.

تتميز هضبة الشريعة بنظام الصخور الكربونية كونها خزان المياه الرئيسي . ويتكون هذا النظام من ثلاثة مستويات جيولوجية. مستوى التغطية والعصر الحديث-الرباعي العمر، دون هذه التركيبية يقع مستوى الحجر الجيري الإيوسين بعد هذا المستوى توجد صخور كلسية أخرى ذات عمر المايستريشان.

ويهدف موضوع المعروض في هذا العمل لتحديد تأثير التغير المناخي على تنمية الموارد المائية وخاصة في طبقة المياه الجوفية الكارستية التي تشكل الإيوسين.

بسبب أحوال جوية تتميز بالعجز المتزايد واستغلال متزايد تم تحديد برنامج عمل من أجل التعرف على الوضعية الحالية للمياه الجوفية لهذه المنطقة، و تحديد العوامل التي تؤثر عليها.

واستنادا إلى قاعدة بيليوغرافية مصنوعة من الأعمال السابقة في المنطقة مع كافة البيانات من نتائج البحوث لدينا، حالة المياه الجوفية تم تحديدها، حيث تتميز بانخفاض معتبر لمستوى المياه لهذا الخزان، هذا نتيجة أثر مزدوج للعامل المناخي و الإنساني عن طريق الاستغلال.

و في النهاية و على أساس النتائج يظهر أن العامل المناخي، ليس هو العامل الوحيد المتسبب في تدهور حالة ستوى المياه، إنما عامل الاستغلال له دور أكثر أثر على إنخفاض مستوى المياه و هذا خاصة في السنوات الأخيرة.

: هضبة الشريعة ، التقلبات المناخية

## REMERCIEMENTS

A la fin de ce modeste travail, résultat d'une période d'efforts et de difficultés et de persévérance, je voudrais témoigner de ma reconnaissance et mes remerciements envers tous ceux qui ont contribué de manière directe ou indirecte à l'achèvement de ce modeste travail.

Je voudrais remercier en premier le Professeur CHAFFAI Hicham et lui témoigner ma reconnaissance, qui non seulement a accepté de diriger mon travail, mais a également fait preuve de patience tout le long de ces années de préparation.

Je remercie également le Docteur AUDRA Philippe, pour son accueil au sein de son laboratoire à Nice, son aide et ses orientations et toutes les initiations dans le domaine de la Karstologie et la spéléologie.

Je tiens également à exprimer mes sincères remerciements au Professeur DJABRI Larbi, qui m'a fait l'honneur d'accepter de présider ce Jury.

Que les membres du Jury, Messieurs les professeurs : HANI Azzedine, BAALI Fethi, KACHI Slimane et le Docteur GOUADIA Layachi, trouvent ici l'expression de toute ma gratitude.

J'adresse également mes remerciements à l'ensemble de mes collègues et amis, en particulier, Fehdi, Boumazbeur, Boubaya, Défaflia, Guefaifia, Degaichia, trop nombreux pour être tous cités.

Que Monsieur Djebassi des services de l'hydraulique soit remercié pour la documentation et les informations qu'il a mises à ma disposition.

Que tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail par leurs encouragements, en particulier mes proches, soient remerciés.

## **Hommage**

*Je ne saurais clôturer ce travail, sans rendre un hommage à une personne pour qui j'avais beaucoup d'estime et d'admiration, mon collègue et ami, le défunt ROUABHIA Abdelkader (Allah yarhmou).*

*J'ai découvert en cette personne un exemple de persévérance et de continuité, dans le travail, un exemple dans l'encouragement et l'aide à toute personne le sollicitant, cela même en dehors du cadre professionnel.*

*Je ne reviendrai pas sur ses qualités d'enseignant sérieux, organisé et performant, qualités qui lui ont donné une réputation dépassant de loin l'université de Tébessa, réputation faisant de lui un scientifique très souvent demandé dans les différentes activités pédagogiques et manifestations scientifiques.*

*Dans la préparation de la présente thèse, il fut mon co-encadreur et ce fut une joie énorme de l'avoir vu accepter cette tâche, comme à son habitude, il m'encouragea dès les débuts à démarrer le travail que ce soit sous le volet bibliographique que le travail de terrain. Sur le terrain il ne mettait aucune différence entre sa tâche et la mienne, mais une relation d'amitié et d'aide, fruit de sa qualité humaine dont la principale était la modestie. Sur le terrain, rien ne l'arrêtait ni le décourageait, ni le froid des journées hivernales, ni la chaleur des journées caniculaires, toujours prêt à vous encourager à aller de l'avant. Il n'hésitait pas un seul instant à vous inviter chez lui pour continuer le travail qui parfois se terminait tard dans la nuit, chez lui il fait preuve d'une hospitalité et d'un accueil, mettant en valeur son caractère de générosité et de partage.*

*Je ne saurais oublier ici d'évoquer ses qualités de sincérité et de franc-parler, même au risque de choquer beaucoup de personnes. C'était un homme de principe loin de toute hypocrisie.*

*Monsieur ROUBHIA, en plus de toutes ses qualités professionnelles, savait être un ami plaisantin qui savait faire rire avec ses blagues, pendant nos moments de détente dans un café ou tout simplement dans la cour, entre deux séances de travail.*

*Je reste persuadé, maintenant qu'il nous a quitté, que je n'aurais jamais mis autant pour la préparation de ce travail, car il était une véritable locomotive pour vous entraîner toujours vers l'avant et progresser un peu plus.*

*Il est parti trop tôt, car il avait l'ambition de décrocher le grade de Professeur, il en était largement digne et le méritait amplement en raison de ses compétences. Pour nous, sa valeur dépassait largement ce grade.*

*Pour ses amis et moi dont je fais partie, ROUABHIA Abdelkader, restera un frère toujours présent parmi nous.*

**Hocine BENHAMMADI**

## LISTE DES FIGURES

N° Fig.	Titre	Page
1	Situation géographique de la région de Chéria	6
2	La géologie de la région de Chéria à partir de la Carte Géologique du Nord Est de l'Algérie au 1/500.000 <sup>e</sup>	8
3	Coupe géologique le long du plateau de Chéria	10
4	Disposition des profils géophysiques	14
5	Courbe de résistivité en cloche	15
6	Coupes géoélectriques des profils C et J	17
7	Coupe géoélectrique du profil P	18
8	Modèle d'un paysage karstique	22
9	Chronique des températures de l'année moyenne (1972-2012)	28
10	Chronique des températures annuelles moyennes (1972-2012)	29
11	Réseau des stations climatiques	31
12	Chronique des précipitations à la station de Chéria (1972-2012)	32
13	Graphique de l'évolution de l'indice de pluviosité (1972-2012)	33
14	Evolution de la pluviométrie saisonnière-Chéria (1972-2012)	34
15	Courbe de la variation du régime – Chéria (1972-2012)	35
16	Chronique des indices pluviométriques – Chéria (1972-2012)	37
17	Evolution de l'écart à la moyenne de Chéria (1972-2012)	38
18	Diagramme pluviothermique – Chéria (1972-2012)	39

19	Réseau hydrographique du plateau de Chéria	46
20	Hydrogramme mensuel de l'oued Chéria (1974-1976)	47
21	Hydrogramme de l'oued Chéria (1982-1994)	48
22	Evolution du débit de l'oued Chéria (2001)	49
23	Evolution du débit de l'oued Chéria (2003)	50
24	Esquisse hydrogéologique du plateau de Chéria (H. Chaffai, 1986)	54
25	Coupe hydrogéologique le long du plateau de Chéria	55
26	Carte des écoulements et conditions aux limites	60
27	Coupes géologiques montrant les émergences des sources du plateau de Chéria (Chaffai et Baali, 2006)	64
28	Evolution du nombre d'habitants (1990-2015)	66
29	Site du forage de suivi en aval de Chéria (Google earth)	67
30	Chronique du niveau statique du forage aval (2012/2013)	71
31	Chronique piézométrique des forages amont « Douamis » (2011/2012)	72
32	Chronique piézométrique (1993-2005)	75
33	Chronique des fluctuations (1993-2005)	76
34	Graphique de l'évolution conjuguée de P et Ns	78
35	Graphique de l'évolution conjuguée de Q et Ns	79
36	Graphique de l'évolution conjuguée de P et $Q_{exp}$	80
37	Courbe de l'évolution du calcium	81
38	Courbe de l'évolution du magnésium	82
39	Courbe de l'évolution du rapport Mg/Ca	83
40	Courbe de l'évolution des nitrates	84
41	Courbe de l'évolution des conductivités	85

42	Chronique du niveau des eaux de Bouakous (Zerrouki, H., 2013)	89
43	Type de doline rencontrée en région de Douamis	94
44	Profil de résistivité par tomographie (Fehdi et al., 2011)	96

## LISTE DES TABLEAUX

N° Tab.	Titre	Page
1	Potentiel hydrique des formations géologiques	11
2	Résultats des sondages mécaniques (forages)	24
3	Pluviométrie saisonnière Chéria (1972-2012)	34
4	Valeurs du rapport P/T - Chéria (1972-2012)	35
5	Evaluation de l'ETP par la méthode de Thornthwaite (1972-2012)	40
6	Bilan hydrologique (Thornthwaite) - station de Chéria (1972-2012)	42
7	Bilan hydrologique (Thornthwaite) - station de Chéria (1982-2014)	42
8	Bilan hydrologique (Thornthwaite) - station de Chéria (1993-2008)	43
9	Bilan hydrologique (Thornthwaite) - station de Chéria (1985-1995)	43
10	Observation de la chronique piézométrique pendant les semaines de Février à Mai 2013	70
11	Chronique piézométrique et fluctuation (1993/2005)	74
12	(a) Caractéristiques des forages	76
13	(b) Caractéristiques des forages	77
14	Analyse chimique des eaux de la source (Zerrouki, H., 2013)	90
15	Processus d'évolution de formes karstiques	95

# **INTRODUCTION GÉNÉRALE**

## **Introduction générale**

Le travail que nous présentons dans cette thèse, porte sur un système aquifère qui fait partie des aquifères carbonatés fissurés, du type karstique. Il fait suite à de nombreux travaux antérieurs sur la région de Chéria, et se veut un complément d'étude dans la connaissance de ce système.

De part le caractère semi aride de la région de Chéria, cela induit des conditions climatiques contraignantes sur la ressource hydrique.

L'objectif étant d'identifier l'impact de l'évolution des conditions climatiques et particulièrement la variabilité climatique sur l'état de cette ressource. Il est admis que la variation du régime des précipitations accompagné d'épisodes de sécheresse alternés, se traduit par une modification des apports en recharge et par conséquent, des modifications des conditions de circulation avec des conséquences sur les caractéristiques physico-chimiques. L'écoulement de l'eau dans un milieu souterrain fracturé est dépendant de processus hydrauliques, chimiques, thermiques et mécaniques. La prise en compte de ces différents mécanismes à différentes échelles semble donc indispensable à une bonne compréhension du fonctionnement global de ce type d'aquifère.

La région de Chéria d'un point de vue géographique est située à plus d'une cinquantaine de kilomètres du chef-lieu de la wilaya de Tébessa et se situe sur un plateau culminant à plus de 1000 m d'altitude. En raison de l'importance de son système aquifère et en particulier le niveau Eocène, notre démarche se veut un pas de plus vers une meilleure connaissance de cet aquifère et particulièrement en tenant compte de l'aspect climatique et sa variabilité, facteur d'impact indiscutable sur la ressource en eau.

Dans un premier temps, nous présentons dans une première partie, les caractéristiques géographiques et géologiques de la région d'étude, suivie d'une identification géométrique de l'aquifère par la géophysique.

L'hydroclimatologie a permis de définir le type de climat d'une part et de visualiser l'évolution des paramètres climatiques d'autre part indicateurs de la variabilité climatique.

La problématique abordée dans ce travail et qui constitue notre partie spéciale tourne autour de la question suivante :

La variabilité climatique observée au cours des dernières années peut-elle avoir un impact sur la ressource en eau de cette région et quels sont les outils appropriés pour l'identification de cet impact ?

Bien que ce système aquifère ait fait l'objet de nombreuses études, nous pensons qu'elles restent insuffisantes et incomplètes. En effet les méthodes de l'hydrogéologie classique sont en partie inadaptées, les informations qui en découlent restent ponctuelles et insuffisantes. Ces limitations découlent de la nature complexe que représente l'hétérogénéité de l'aquifère karstique.

Pour cette raison, dans notre approche, nous avons utilisé les outils du type hydrogéochimique dont les résultats ont permis d'approcher la caractérisation du fonctionnement ainsi que l'état de la ressource de l'aquifère, cela par le suivi au niveau d'un point d'observation (forage) situé à l'exutoire du bassin.

Enfin nous avons jugé utile de procéder à une comparaison avec un autre système aquifère (Maestrichtien) de la région, cela à travers son émergence au niveau de la grotte de Bouakous.

Pour clôturer, une partie concernant l'aspect géotechnique et environnemental a été abordée, en raison de son lien avec l'aspect karstique et les problèmes que pose le karst en matière de pollution et d'aménagement.

# **CHAPITRE I**

## **CADRE GÉOGRAPHIQUE ET GÉOLOGIQUE**

### **I. CADRE GÉOGRAPHIQUE ET GÉOLOGIQUE**

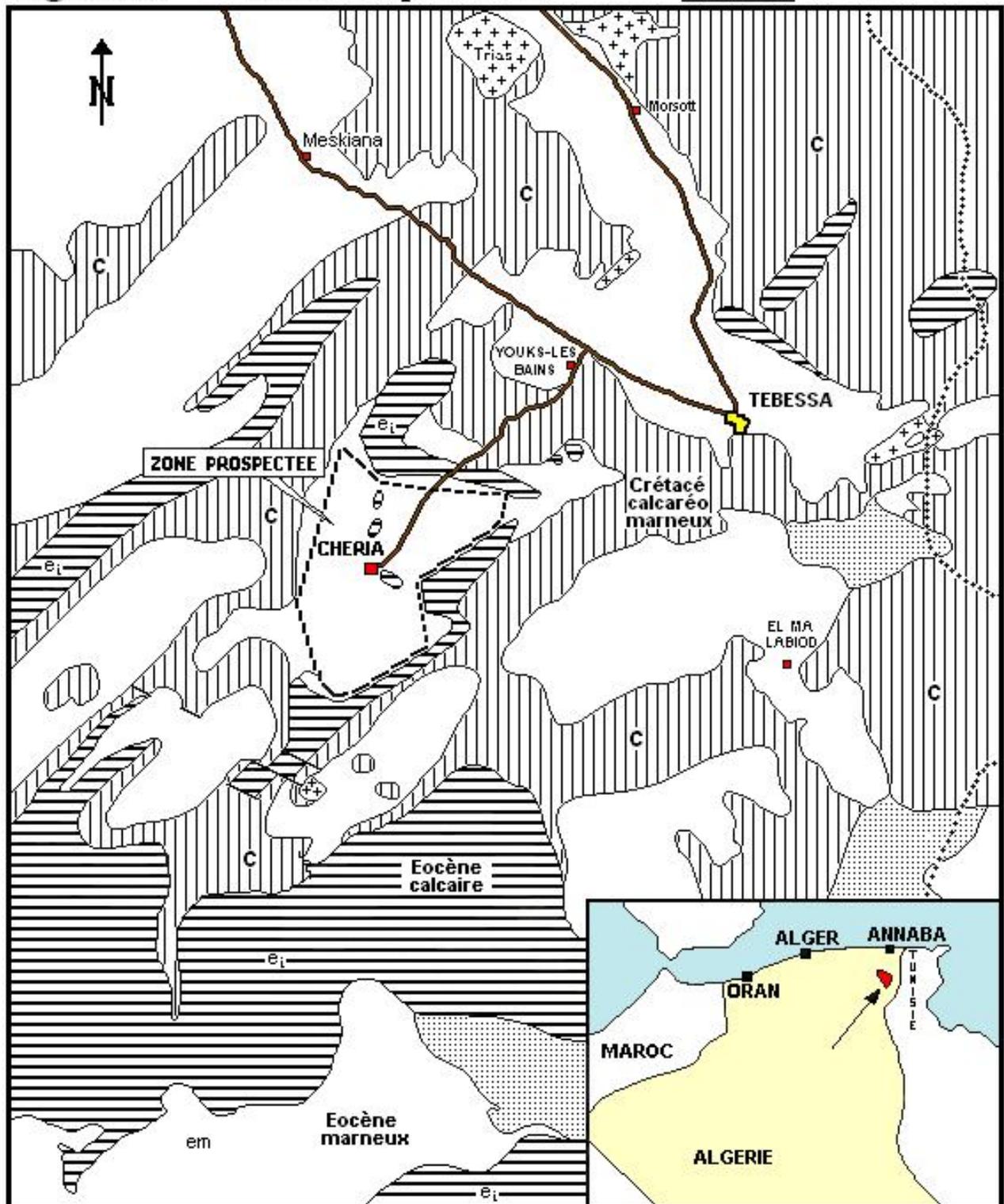
## **1. Situation géographique**

La région de Chéria est située au NE Algérien (Fig. 1), à 47 kilomètres au Sud-est de la ville de Tébessa. Le bassin versant étudié s'étend sur une surface de 720 km<sup>2</sup>. Le plateau de Chéria fait partie du bassin versant du ChottMelghir, de forme grossièrement triangulaire dont les limites sont constituées de monts culminants à différentes altitudes. D'une altitude moyenne de 1100 m, limité grossièrement entre les parallèles 35°50 et 36°. A sa périphérie, un bourrelet montagneux qui domine la cuvette de 200 à 300 m, la bordure montagneuse s'élève à des altitudes qui culminent à plus de 1500 m (Djebel Doukkane 1650 m).

### **1.2. Aspect socioéconomique**

La localité de Chéria qui abrite une population dont le nombre avoisine les 100 000 habitants, se caractérise par une activité économique essentiellement agricole et d'élevage. Imprégné d'un mode de vie rural, l'agriculture est du type pastoral en relation avec l'activité d'élevage, avec un revirement vers une agriculture maraichère, les dernières années, conséquence du changement climatique qui s'est fait ressentir les dernières décennies.

**Figure 1: Plan de position** **Echelle: 0 5 10 Km**



**Figure 1: Situation géographique de la région de Chéria**

## 2. Géologie

## 2.1. Introduction

La région de Chéria et notamment son plateau fait partie des systèmes hydriques souterrains de la wilaya de Tébessa, il est inclus également dans les hautes plaines, atteignant une coté de 1100 m d'altitude.

Les différents travaux effectués sur cette région et qui ont traité de l'aspect géologique, dont nous citerons les auteurs tels que L. Durozoy (1947), Ricard (1979)...etc. En raison du contexte hydrogéologique de notre étude, il est intéressant de mettre en relief les caractéristiques géomorphologiques de cette région. De forme globalement triangulaire, le bassin versant de Chéria se termine vers le Sud par l'exutoire principal. A la périphérie du bassin se trouve une chaîne de montagnes formant les différentes bordures. La cote maximale de ces monts atteint une valeur de 1685m (sommet du Doukkane). Les pentes de ces massifs sont plus ou moins fortes. La pente globale du bassin évolue du nord vers le sud. En raison de sa forme triangulaire, le bassin est plus étendu dans sa partie Nord que la partie Sud où les chaînes montagneuses convergent vers l'exutoire.

## 2.2. L'aspect stratigraphique

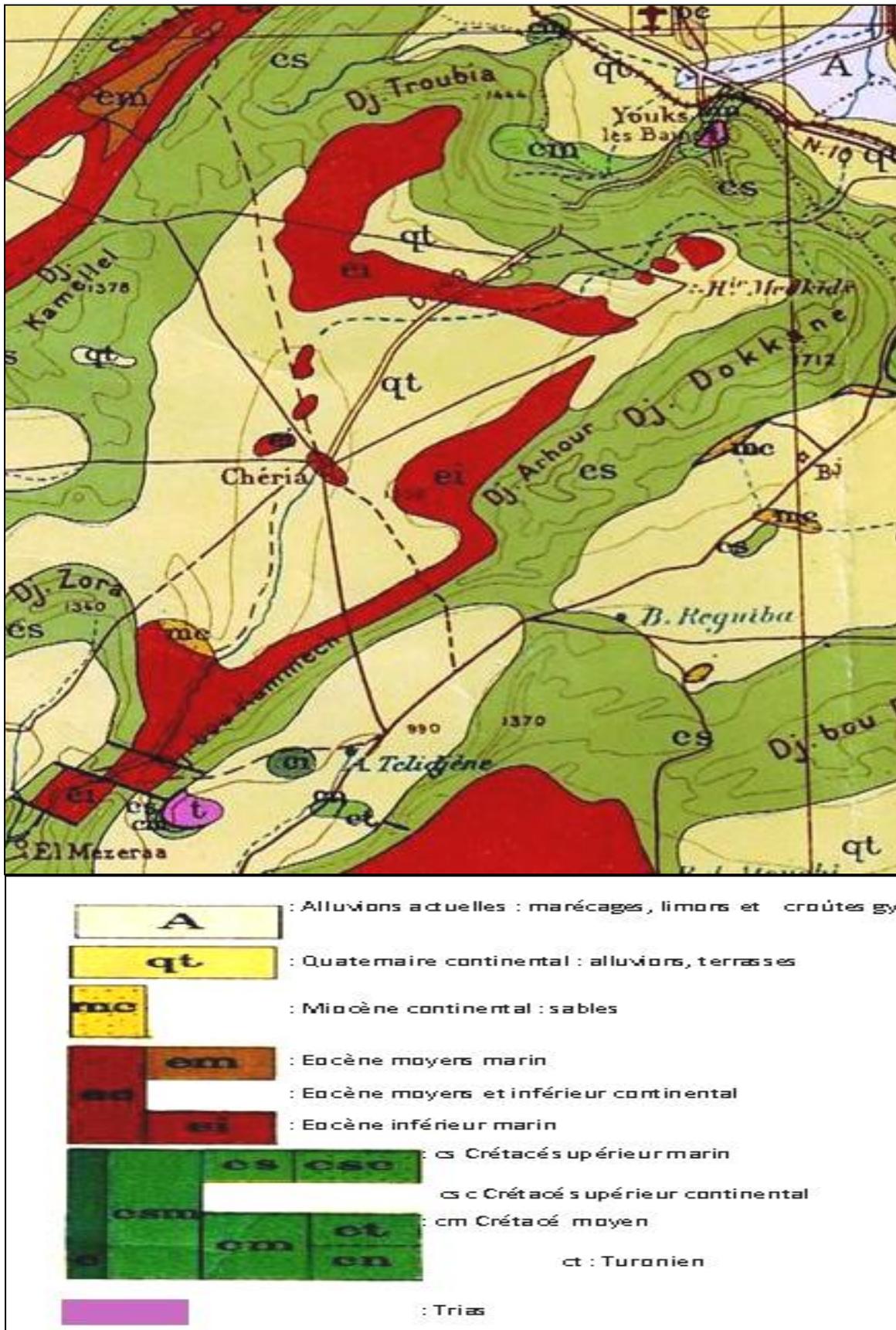
Sur la base des investigations et études géologiques antérieures, on peut présenter l'aspect stratigraphique comme suit : du plus anciens vers le plus récent (Fig. 2).

### 2.2.1. Le Secondaire

#### a) *Crétacé supérieur*

Marqué par le Turonien et le sénonien supérieur, le premier sous forme de calcaires de couleur beige et sombre, le deuxième qui est représenté par deux niveaux, le campanien et le maestrichtien.

Le campanien est constitué de marnes de couleur grise, affleurant en bordure du plateau et atteignant des épaisseurs de l'ordre de 400 m. Le Maestrichtien est représenté par des calcaires tendres et atteignant des épaisseurs de 250 m.



**Fig. 2 : La géologie de la région de Chéria à partir de la Carte Géologique du Nord Est de l'Algérie au 1/500.000<sup>e</sup>**

### 2.2.2. Le Tertiaire

#### a) Eocène moyen inférieur

Danien et Thanétien succèdent aux formations calcaires Maestrichtiennes, ils débutent par des formations marneuses noirâtres atteignant les 150 m d'épaisseur (Mont de Tazbent), au Sud, dans la région de Télijdène, affleurent des calcaires lumachelliques marquant le Thanétien. Viennent ensuite le niveau Yprésien et Lutétien, avec des formations carbonatées (calcaires et marnes) et la présence de niveaux phosphatés, marquant l'Yprésien, le Lutétien est marqué par des calcaires à gypse vulnérables entraînant souvent des phénomènes d'effondrement dans la région.

#### b) Mio-Pliocène

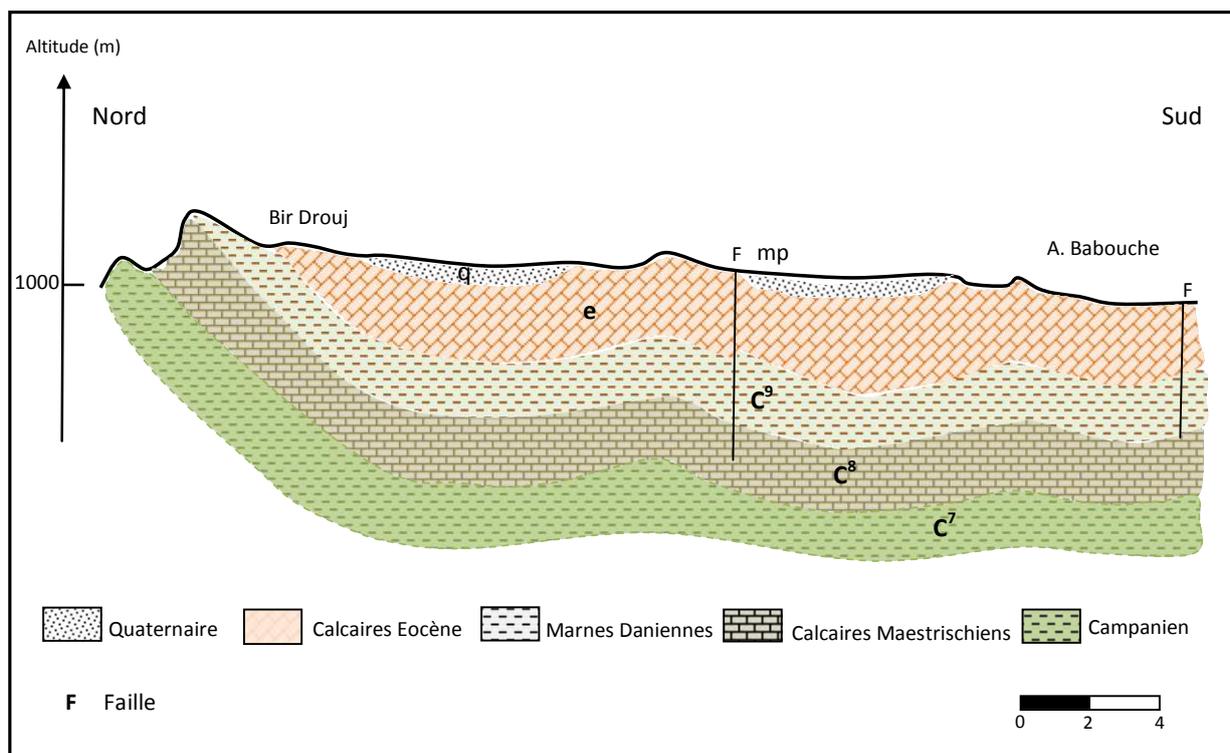
Le Mio-Pliocène, formé de couches d'argiles à gypses qui alternent avec des lentilles de sables jaunes, il s'étale sur les calcaires de l'Eocène moyen en discordance. Son épaisseur dépasse parfois les 60 m.

### 2.2.3. Le Quaternaire

Disposés en plateaux avec une pente inclinée vers la partie sud du bassin, on le rencontre vers le nord aux abords de Tazbent (Nord), plus au sud, on rencontre le quaternaire sous forme de cailloutis.

Les alluvions actuelles sont constituées de trois types, les alluvions de remplissage, les alluvions de piedmont et les éluvions. Ils sont constitués respectivement de cailloutis et galets de petites tailles enrobés dans un ciment plus moins argileux, ils constituent ce qu'on appelle les marécages de Chéria.

Les alluvions de piedmont sont formées de cailloutis propres et se localisent en périphérie de la plaine de Chéria (Fig. 3). Les éluvions, ce sont des esquilles de tailles variables (de quelques centimètres).



**Figure 3 : Coupe géologique le long du plateau de Chéria**

La figure 3 représentant une coupe géologique de direction nord-sud résume la situation géologique présentée ci-dessus. Sur un profil, sur la coupe nous pouvons retrouver la succession des formations géologiques de la région, ces formations s'étendent du plus ancien vers le plus récent, du Campanien (C<sup>7</sup>) où le faciès est marneux, vient au-dessus les calcaires d'âge Maestrichtien (C<sup>8</sup>). Au-dessus nous retrouvons un autre faciès marneux d'âge Danien (C<sup>9</sup>). Ces marnes sont surmontées par des calcaires éocènes (e). La fin de cette série est marquée par les formations plio-quaternaires, sables, argile et cailloutis. La coupe montre également une structure en cuvette des formations suscitées et l'ensemble est affecté par deux failles dans le secteur centre et Sud.

#### 2.4. L'aspect tectonique

La tectonique de cette région est marquée par deux principales phases : une, post-miocène et la deuxième post-pontiène.

Structuralement, le plateau de Chéria peut être décrit comme constitué de deux parties distinctes sous forme de cuvettes dont le contact se localise au niveau de la localité elle-même. Les charnières de ces deux structures synclinales sont allongées suivant une direction NE-SW.

A cette structure tectonique s'oppose de manière orthogonale une autre formée par un ensemble de failles importantes et de plis.

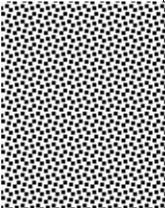
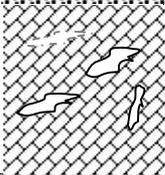
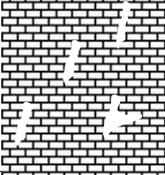
## 2.5. L'aspect paléontologique

La riche présence de débris de vertébrés dans les niveaux phosphatés de l'éocène et des formations maestrichtiennes la paléontologie de cette région, cela concernant la catégorie des poissons. Pour ce qui est des mammifères, la connaissance des faunes du niveau miocène inférieur et moyen reste très partielle.

## 2.6. Intérêt hydrogéologique du système multicouche de Chéria

En raison de la spécificité de cette étude ainsi que de son objectif, nous avons jugé utile de présenter un récapitulatif des différentes formations géologiques de la région d'étude et leurs éventuelles potentialités hydriques. Le tableau ci-dessous résume cela (Tab. 1).

**Tableau 1 : Potentiel hydrique des formations géologiques**

Site	Age	Epaisseur	Potentialités hydriques	Nature géologique	lithologie
Plateau de Chéria	Quaternaire	30 à 40 m	Aquifère à l'état d'épuisement	Alluvions fluviales	
	Eocène	50 à 70 m	Forte potentialité	Calcaires fissurés+karst	
	Maestrichtien	250 m	Aquifère en bordures	Calcaires fissurés	

### **3. Conclusion**

La série stratigraphique identifiée par les investigations sur le plateau de Chéria, se présente dans une chronologie croissante, du Campanien jusqu'au Plio-quaternaire, elle est représentée par une alternance de calcaires et de marnes et se termine par des alluvions et des sables. Les phases (02) tectoniques ont affecté la région et ont abouti à la formation d'un synclinal.

# **CHAPITRE II**

## **CADRE GÉOPHYSIQUE**

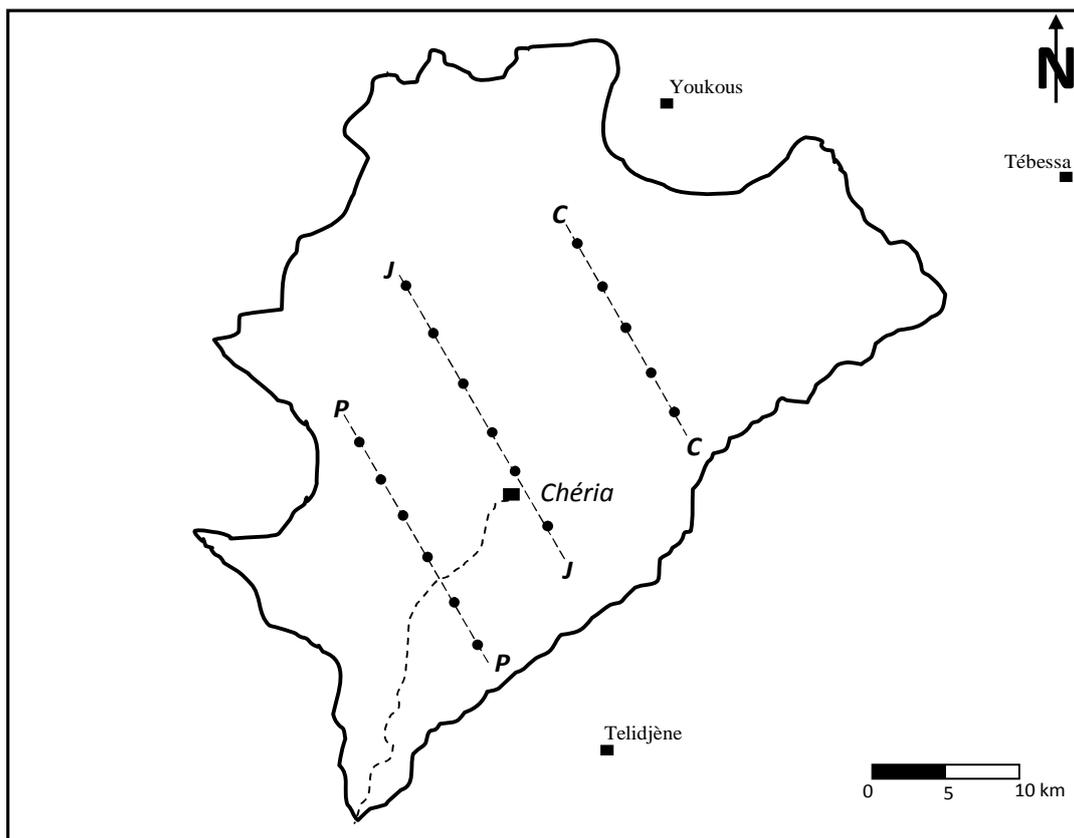
### **II. CADRE GÉOPHYSIQUE**

Les deux principales investigations géophysiques menées sur cette région ont été exécutées par deux sociétés, à savoir la compagnie Transacta-Geometal en 1971 et la compagnie CGG en 1970, l'étude la plus récente est celle de Zerdazi, A. (1990) dans le domaine de la gravimétrie.

### 1. L'investigation géoélectrique

Un dispositif de 291 sondage électrique disposés sur des profils Nord-ouest Sud-est sur un maillage de 1 km sur 1 km et couvrant une superficie de 790 km<sup>2</sup> ont marqué la campagne électrique. Ces profils sont d'orientation Nord-ouest Sud-est.

Dans notre cas, nous avons choisi la représentation de trois profils dans trois secteurs différents, à savoir le nord, le centre et le sud du plateau, selon les profils **C**, **J** et **P**. Ces différents profils sont représentés sur la figure 4.

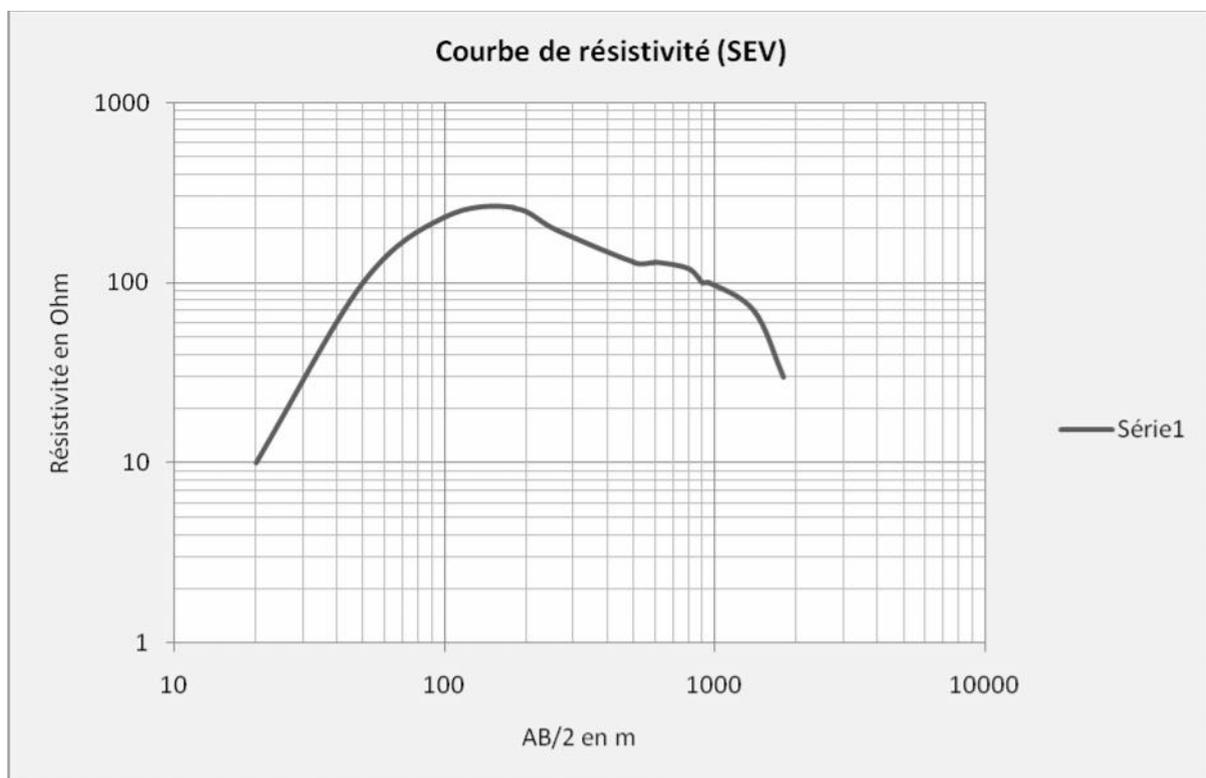


**Figure 4 : Disposition des profils géophysiques**

**Interprétation :** Bien que la géophysique ne soit pas le but de notre étude, nous essayerons sur la base des résultats par les anciennes compagnes de mettre en relief ce qui a été obtenu.

La carte (iso-résistivité) en ligne AB=1000m, avec une profondeur d'investigation de 200 m, a laissé apparaître une plage conductrice avec des résistivités ne dépassant pas 50 ohm-m, correspondant aux marnes Daniennes, intercalées entre les calcaires de l'éocène et les calcaires du maestrichtien.

Une deuxième carte résultant de cette campagne, est celle du toit du substratum résistant (200 a 300 ohm), correspondant aux calcaires d'une part d'âge éocène dans la partie Est et d'âge maestrichtien du côté Ouest. Cette structure d'alternance de niveau résistant et niveau conducteur est mise en évidence par les SEV en forme de cloche, caractéristique d'un recouvrement résistant sur un niveau conducteur (Fig. 5).



**Figure 5: Courbe de résistivité en cloche**

Pour ce qui est des coupes, l'observation de celles représentées sur les profils mentionnés ci-dessus, permet d'avancer ce qui suit :

Le secteur Nord, la coupe profil C montre une structure en forme de synclinal. Les résistivités rencontrées dans ces secteurs varient de 15 a 250

ohm-m. la coupe représentée sur la figure 6, montre l'évolution de cette structure en forme de synclinal, constitué d'un recouvrement peu résistant entre 15 et 60 ohm, correspondant aux formations plio-quaternaires (limons argileux et graveleux).

La deuxième formation sou jacente mise en évidence, correspond au niveau résistant (200 à 300 ohm). Ce niveau correspond aux calcaires éocènes fissurés affleurant aux deux extrémités de la coupe. Les valeurs du coté nord-ouest ont donné des résistivités atteignant les 500 ohm, correspondant à des calcaires compactes. Un dernier niveau, conducteur (50 ohm-m), sous-jacent a aux calcaires éocènes, correspondant aux marnes daniennes.

Dans la partie Sud, les formations argileuses du Mio-Pliocène sont plus épaisses.

Le secteur centre représenté par la coupe du profil J (Fig. 6), laisse apparaitre les mêmes horizons que la première coupe, avec des niveaux résistants (200 à 300 ohm), et des niveaux conducteurs (5 à 20 ohm), ces deux niveaux ont été identifiés comme les calcaires de l'Eocène et les marnes Daniennes, cela confirmé par leur affleurements.

La coupe du profil P (Fig. 7), concerne le secteur Sud du plateau, on retrouve la même configuration géologique, montrant une certaine continuité avec les précédentes. La même plage des valeurs de résistivité au niveau de ce profil, témoignent de la même lithologie que pour les secteurs précédents.

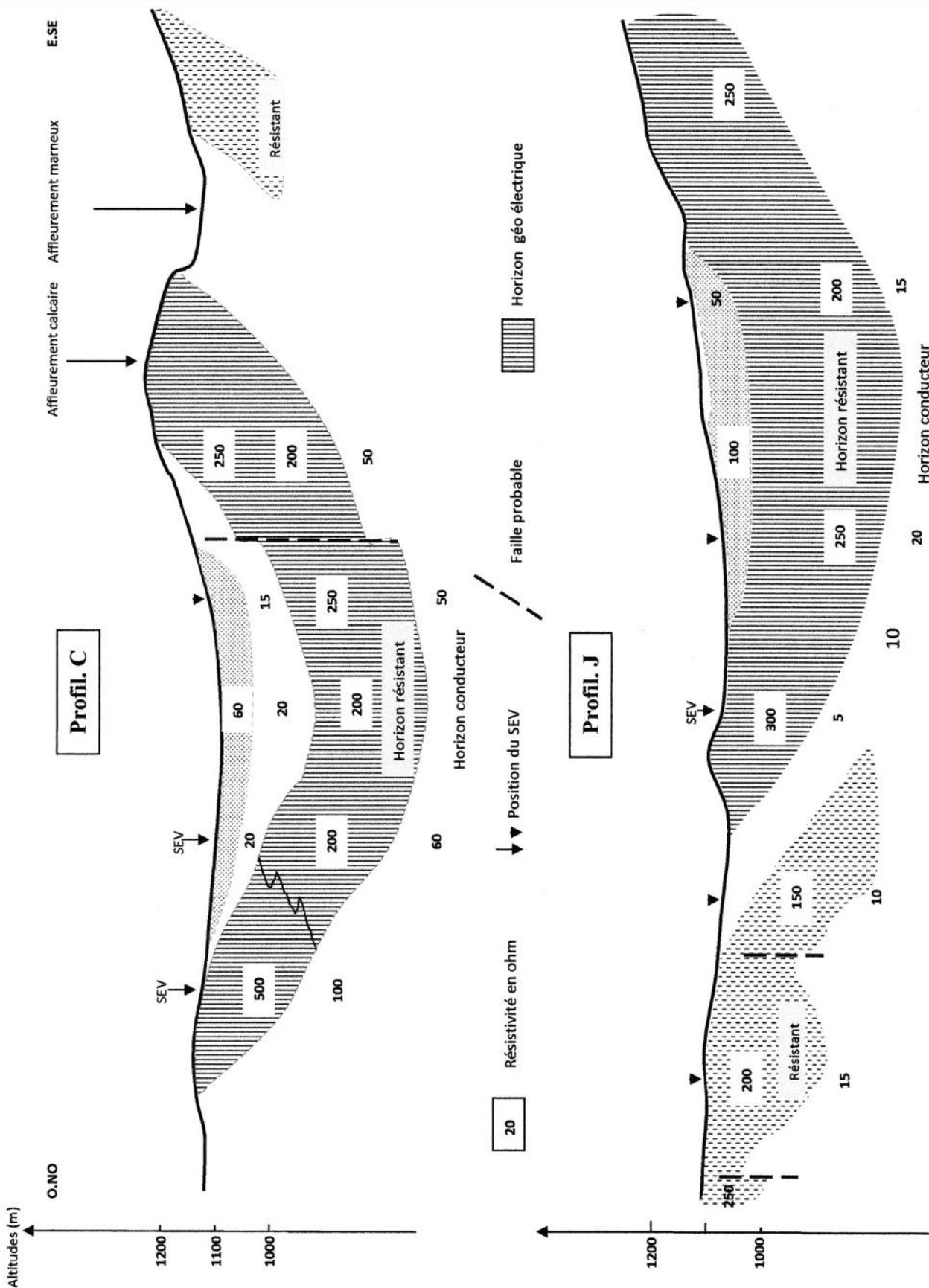
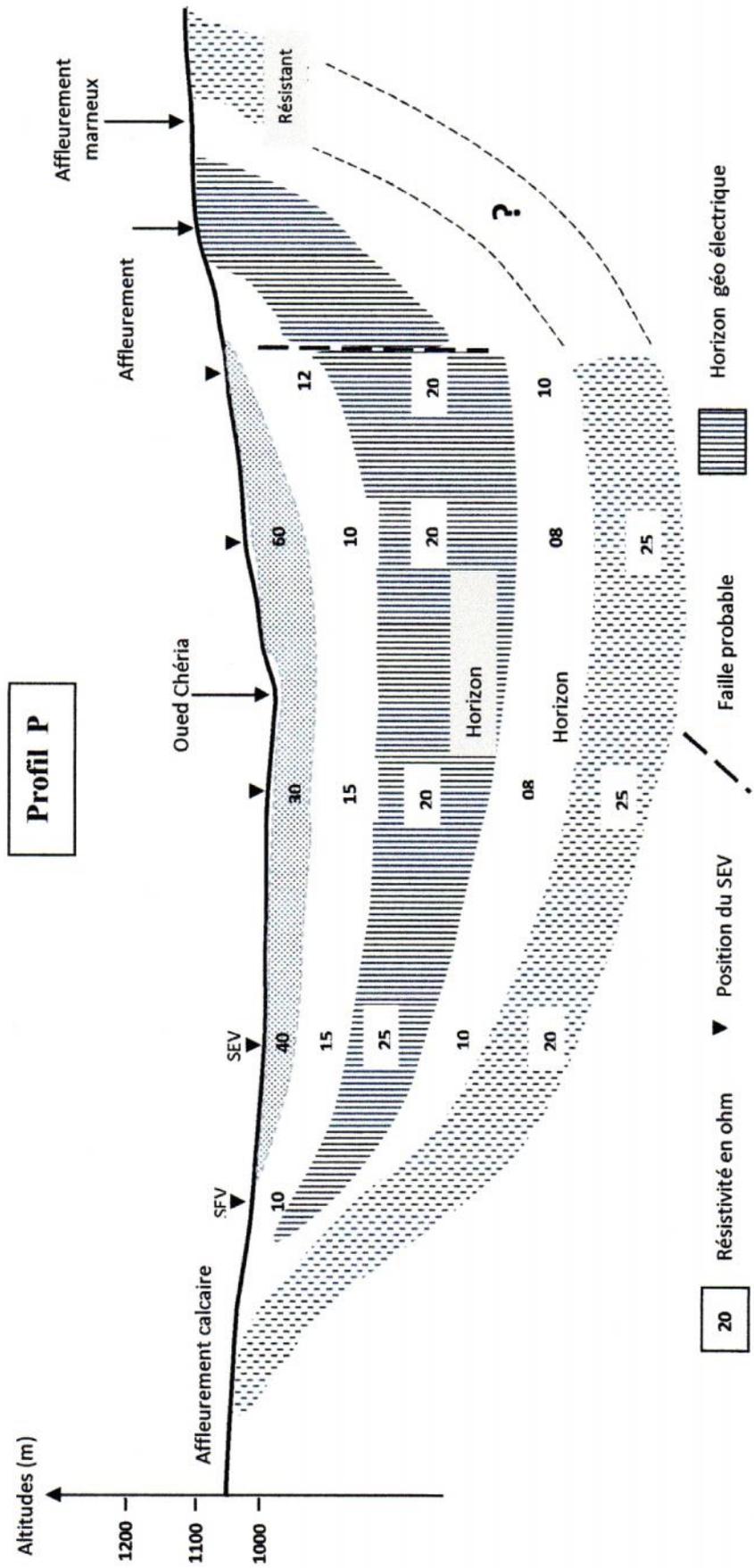


Figure 6: Coupes géoélectriques des profils C et J



**Figure 7: Coupe géoélectrique du profil P**

## **2. L'investigation gravimétrique**

Comme les méthodes géoelectriques, la gravimétrie peut être d'un grand apport dans l'identification des structures et des formations en profondeur.

Les travaux de Zerdazi Abdelhamid (1990) ont abouti à la réalisation d'une carte d'anomalie de Bouguer, à l'échelle de 1/50000, dont l'analyse a permis de dégager les points suivants :

Une anomalie négative dans le secteur Nord correspondant au fossé de Tébessa. Plus au sud, des anomalies positives pouvant correspondre à des formations denses et compactes (Dj. Gaagaa). Enfin une anomalie négative avec un axe Est-Ouest, cela correspond à des sédiments de comblement de faible densité (Quaternaire).

## **3. Conclusion**

L'étude géophysique de la région de Chéria et dont nous avons présenté un aperçu ci-dessus, a permis d'identifier le système aquifère de cette région.

Le contraste des valeurs des résistivités obtenues a mis en évidence l'alternance des niveaux conducteurs et des niveaux résistants, corrélés avec les formations calcaires et marneuses qui composent le système aquifère en question. Cette étude a également identifié la structure en cuvette (synclinal) des formations.

**CHAPITRE III**  
**KARSTIFICATION**

### **III. ASPECT FISSURE ET KARSTIFICATION**

En raison de notre intérêt pour les ressources hydriques de cette région et ses potentialités, nous ne pouvons passer à côté de cet aspect de la question et qui est directement impactant sur les modalités des écoulements souterrains. En raison de la difficulté de ce type d'étude par manque de moyens (cartes et photos aériennes), une démarche a été entreprise dans les travaux de Baali (2006), elle a concerné des mesures de terrains au niveau des différents affleurements calcaires.

Ces mesures ont permis de dégager deux directions dominantes, une avec des valeurs 40°- 50°, et une autre 130 – 140°N, dans le secteur de BirTouil. Pour ce qui est de la karstification, elle a été mise en évidence par les travaux de forages et localisée dans les 50 premiers mètres.

#### **1. Nature karstique et impact environnemental**

##### **1. 1 Introduction**

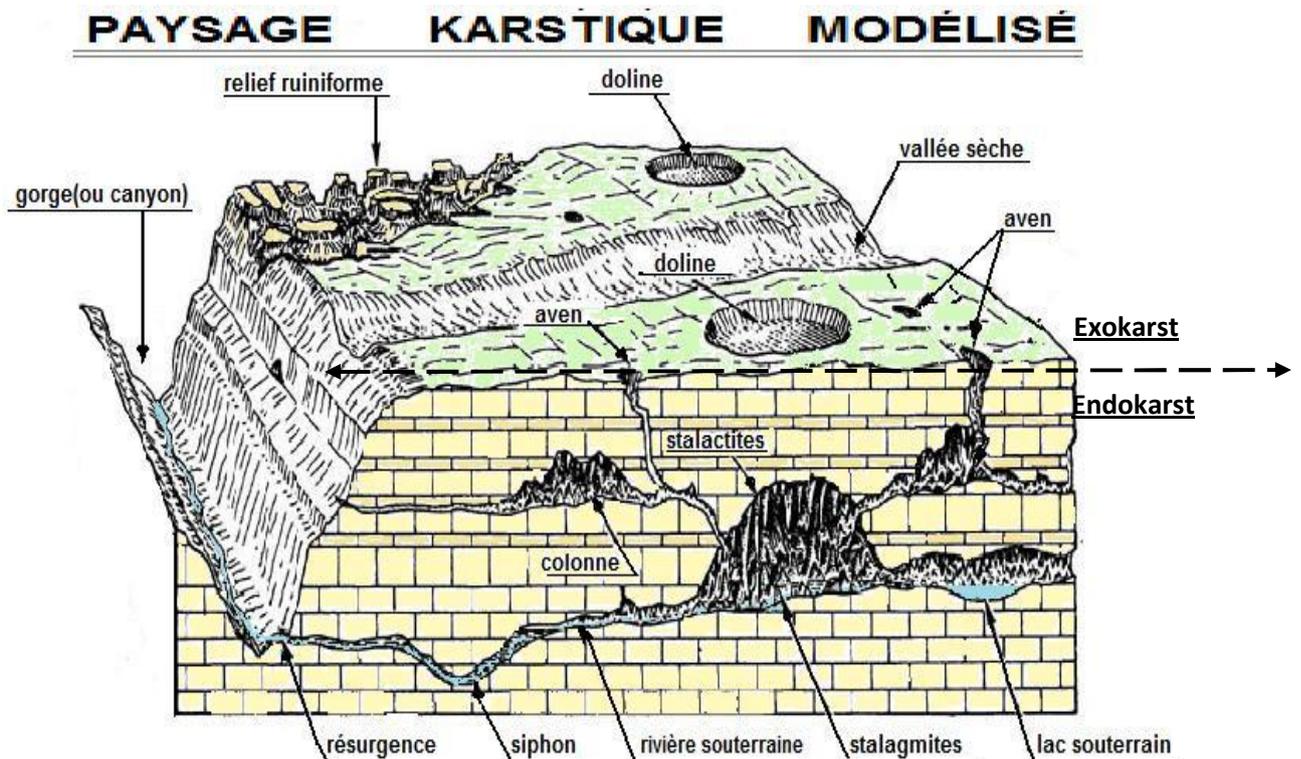
En raison de l'aspect particulier des roches carbonatées de la région de Chéria et qui a été attribué au type karstique, un intérêt particulier a été donné à la morphologie des terrains de Chéria, autant sur le volet hydrologique que sur le volet environnemental.

Il est intéressant de rappeler que le paysage karstique est la conséquence d'un phénomène de dissolution d'une roche présentant une solubilité, tels que les roches carbonatées.

Nous ne ferons pas d'historique de la nature du karst et de l'évolution des études qui ont permis de mieux cerner cette morphologie, nous y reviendrons plus loin, l'objectif de notre étude portant sur les volets cités ci-dessus.

De part la situation géographique de la région de Chéria caractérisée par un climat semi aride et la nature de ses terrains marqués par une morphologie karstique, cela constitue deux contraintes en terme d'une part, de ressources hydriques (faible pluviométrie) et d'autre part en terme d'aménagement (risques géotechnique).

A titre de rappel sur la morphologie karstique, le karst peut être subdivisé en deux parties distinctes, à savoir l'exokarst (morphologie apparaissant en surface et l'endokarst morphologie souterraine. (Fig. 8).



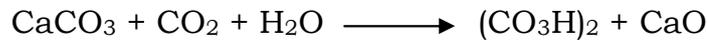
**Figure 8: Modèle d'un paysage karstique**

### 1.2. Cas de la formation Eocène

Les calcaires éocènes de la région de Chéria qui couvrent une bonne partie des terrains de cette région, qui eux même sont recouverts par les terrains quaternaires. Cette disposition de la formation quaternaire, a constitué une contrainte dans l'identification de la morphologie karstique.

Cette morphologie n'a réellement pu être mise en évidence qu'après les investigations par les méthodes directes que sont les forages d'exploration et d'exploitation entrepris dans le cadre d'un programme de développement.

L'aspect théorique de la karstification qui comme nous l'avons présenté ci-dessus, est la conséquence d'une dissolution par les eaux météoriques chargés en CO<sub>2</sub>. Ceci peut-être schématisé par la relation chimique :



Nous ne reviendrons pas également sur l'aspect technique des opérations de forage qui ont permis d'identifier la morphologie karstiques, notamment par les phénomènes de pertes de boue et chute d'outils. Ceci permet d'affirmer l'existence de zones de fissuration et de karstification (cavités) comme il est résumé dans le tableau 2.

Le tableau 2 ci-dessous laisse apparaître les niveaux rencontrés lors des opérations de forage ou des phénomènes de pertes et de chutes d'outil oneu lieu, mettant ainsi en évidence les vides (fissures et cavités) qui existent au sein de la formation Eocène.

Le phénomène de dissolution des formations calcaires est continu et conditionnés par les facteurs hydroclimatiques, la présence de croutes calcaires au piedmont des affleurements calcaires d'âge éocène, en est la conséquence.

Les calcaires éocènes de part la structure fissurée et karstifiée qui les caractérise constitue le principal aquifère de la région de Chéria. Cet aquifère subit une sollicitation de plus en plus croissante, par la multiplication des forages d'exploitation, conjuguée à un effet climatique contraignant (déficit pluviométrique), la ressource se voit diminuer considérablement.

**Tableau 2 : Résultats des sondages mécaniques (forages)**

<b>Forage</b>	<b>Prof. du toit</b> (m)	<b>Epaisseur calcaire traversés</b> (m)	<b>Débit</b> (l/s)	<b>Prof. des zones fissurées</b> (m)	<b>Prof. des zones karstifiées</b> (m)
<b>508</b>	00	51.0	16	19 – 23	19 – 23
<b>509</b>	02.9	11.9	Reconnaissance	12 – 13	12 – 13
<b>510</b>	00	29.15	13	3-5 /10-18	3-5
<b>511</b>	02.6	31.4	15	2-17/26-29	2-17/26-29
<b>512</b>	00	30.6	44.5	10-11/19-23	10-11/19-23
<b>513</b>	00.00	30.0	1.0	0-6/9-18	/
<b>514</b>	00.00	31.95	2.4	2-8/11-20	/
<b>515</b>	03.5	08.5	0.2	3 – 12	3 - 12
<b>517</b>	01.10	18.9	111	05 – 19	05 – 19
<b>518</b>	03.00	27.2	128	4-6/9-18	4-6/9-12
<b>534</b>	00	100.0	70.3	44 - 100	44-45
<b>JK.8</b>	11.0	89	08.14	15 -100	15 - 27

Cette diminution est marquée par une baisse plus ou moins continue du niveau piézométrique de la nappe, ce que nous avons mis en évidence dans notre travail et qui est présenté dans ce qui suivra dans la partie spéciale. A cela s'ajoute l'aspect environnemental traduit par l'apparition de phénomènes d'affaissement d'un diamètre plus ou moins important.

Ces deux aspects de la question du karst de Chéria ont fait l'objet d'un article que nous avons élaboré et qui a été publié, dans lequel nous avons suggéré un programme réfléchi et rationnel d'exploitation de la ressource, et une meilleure investigation pour une délimitation des zones à risque d'effondrement, notamment par la cartographie.

## **2. Conclusion**

En raison de l'intérêt que porte cet aspect de la question pour notre étude et son impact sur les modalités des écoulements de l'aquifère du plateau de Chéria dans les formations carbonatées de l'Eocène, il était utile de préciser les indices et argument en faveur de cette caractérisation (karst).

L'existence de croutes calcaires au piedmont des massifs calcaires, les paysages ruiniformes formant l'exokarst et enfin la rencontre lors des opérations de forage de cavités et fissures sont autant d'arguments de la présence d'un système karstique localisé dans les calcaires éocènes.

**CHAPITRE IV**  
**CARACTÉRISTIQUES CLIMATIQUES ET**  
**HYDROLOGIQUES**

**IV. CARACTERISTIQUES CLIMATIQUES ET HYDROLOGIQUES**

**1. Aspect climatologique**

### 1.1. Introduction

Dans toute étude des ressources hydriques ou des potentialités en eau d'une région donnée, il n'est nul besoin de démontrer le rôle que jouent les facteurs climatiques sur la variabilité des écoulements en surface et souterrains. Ceci souligne donc l'impact des deux facteurs climatiques principaux, à savoir la température et le rôle qu'elle joue dans le phénomène d'évaporation, et les précipitations en tant qu'élément d'écoulement de surface et recharge des réserves souterraines.

### 1.2. Caractérisation du climat

Le climat est phénomène important qui a son influence sur les différents types de relief et la modification des propriétés physico-chimiques des roches et des sols.

L'étude climatique d'un bassin versant permet une meilleure connaissance du comportement hydrologique et hydrogéologique de ce même bassin.

Dans le cas du bassin de Chéria, pour la caractérisation de son climat, nous nous sommes basée sur la méthode de Martonne, ce dernier a établi une expression qui permet d'évaluer un facteur appelé « indice d'aridité » et dont la valeur permet de classer le climat de la région étudiée sur une échelle qui va de 1 à 30.

Le calcul est basé sur l'utilisation de deux paramètres climatiques, à savoir la température et les précipitations. L'expression de De Martonne se présente comme suit :

$$A = P/T + 10$$

- Où :
- A : Représente l'indice d'aridité (annuel)
  - P : Précipitations moyennes annuelles (mm)
  - T : Température moyenne annuelle (mm)

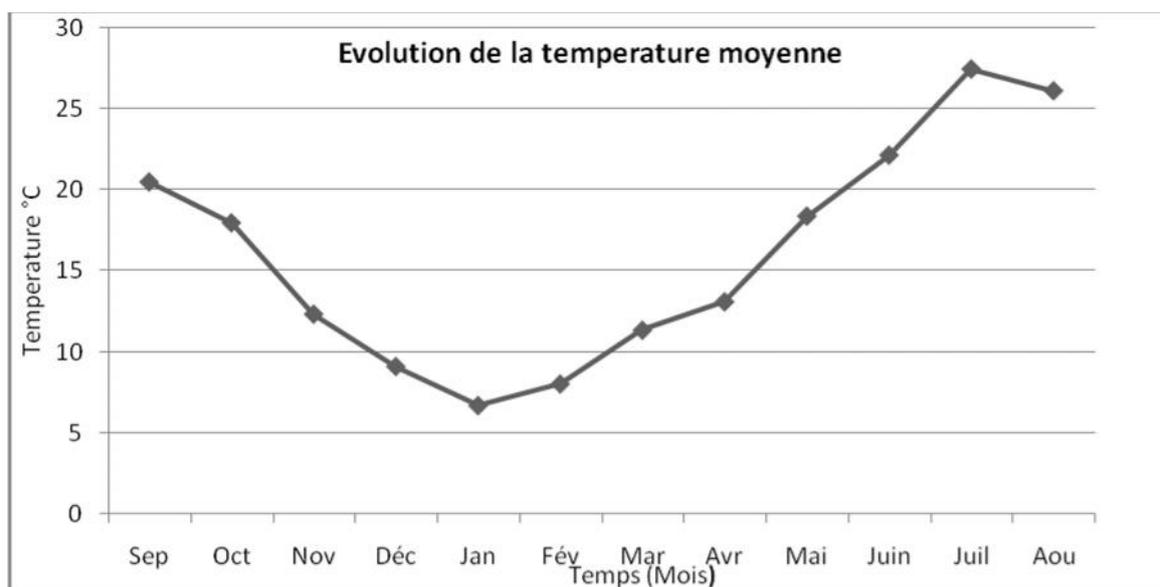
Pour les calculs, présentés plus loin, nous avons utilisé les données issues des relevés de la station de Chéria. Les résultats obtenus ont permis de classer et de caractériser le climat de notre région d'étude.

### 1.3. Etude de la température et de sa variation

Le facteur température a toute son importance dans l'étude climatique, conditionnant sa variabilité par son impact direct sur le phénomène de d'évapotranspiration et par conséquence le déficit hydrique.

La station de Chéria située en plein dans le bassin étudié est la mieux placée pour l'exploitation des données. Malheureusement, nous ne disposons pas de relevés à ce niveau, et avons été contraints d'utiliser les données de la station de Tébessa (X=991,900 et Y=247,200), données complètes et homogènes.

Dans notre cas, on a utilisé les données ou relevés d'une période s'étalant sur 40 années, allant de l'année 1972 à 2012. La figure 9 montre l'évolution du facteur thermique (moyenne) et sa variation sur la période d'observation. Du graphique sur la figure, il en ressort que le mois le plus chaud est le mois de Juillet avec une valeur de (26.62°C), et le mois le plus froid est celui de janvier (06.48°C).



**Figure 9: Chronique des températures de l'année moyenne (1972-2012)**

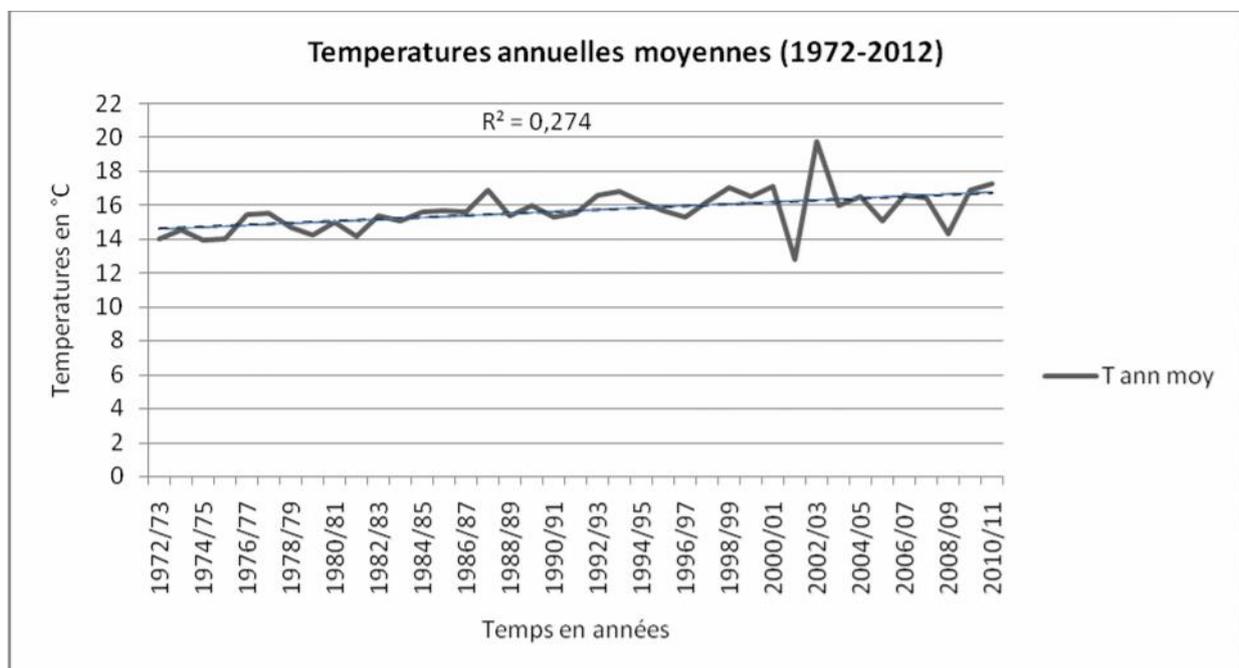
D'un point de vue de variabilité, nous avons dressé la courbe des températures moyennes annuelles de toute la période d'observation (Fig. 10). Cette représentation permet de visualiser le mode de variabilité de ce facteur (régime thermique). De plus, il est également possible à partir du graphique de mettre en évidence la tendance globale de cette évolution. Dans notre cas, la variabilité du facteur thermique sur la période d'observation est marquée

par une fluctuation assez modérée (faible amplitude), mis à part l'année 2001/02/03. Présence d'un pic. La tendance globale de la courbe est orientée vers une hausse légère.

#### 1.4. La pluviométrie

Comme pour le facteur de température, l'impact des précipitations sur les écoulements aussi bien de surface que ceux souterrains, est un élément d'apport et de recharge dans un bassin versant.

Pour l'étude de ce facteur, nous avons choisi la station de Chéria avec une série plus ou moins complète comparativement aux autres stations, sur une période qui s'étale de 1972 à 2012.



**Figure 10: Chronique des températures annuelles moyennes (1972-2012)**

L'observation de la courbe des variations interannuelles des précipitations, montre un régime en dents de scie, assez irrégulier, par rapport à une moyenne. De plus les mois caractéristiques des périodes de sécheresse varient entre juin et juillet selon les stations, avec des précipitations inférieures à 10 mm, La période la plus arrosée est en général en septembre, mais cette période accuse une variabilité spatiale au niveau du bassin. Troisième observation, au niveau de cette région, la particularité

des mois de période sèche (Mai, Juin, Juillet, Août) qui peuvent être d'un apport très important en matière de pluies « orageuses ».

#### 1.4.1. Variabilité des précipitations

L'étude de cet aspect de la question, permet de mieux comprendre les modalités des écoulements dans la région, en effet au niveau du bassin de Chéria et en raison de son étendue et sur une échelle de temps assez longue, on peut relever deux points importants en matière de variabilité :

##### 1.4.1.1. Variabilité spatiale

En raison de l'étendue du bassin versant de Chéria, nous relevons à partir des valeurs enregistrées sur tout le bassin, une certaine variation des précipitations que reçoit la région. Les différentes stations implantées dans le bassin versant, enregistrent des moyennes pluviométriques présentant un certain écart entre elles. Même si ces stations n'ont pas eu un fonctionnement régulier et continu, elles nous permettent de connaître le taux des précipitations pour chaque secteur de la région. Ces stations sont au nombre de cinq, il s'agit notamment du nord vers le sud, la station de Ain Troubia, celle de BirMokadem, BirTouil, Chéria et Ain Babouche (Fig. 11).

De manière globale, la variation spatiale des précipitations se présente comme suit :

- Des précipitations relativement élevées au nord, centre et sud, c'est le cas des stations Ain Troubia, Chéria et Ain Babouche.

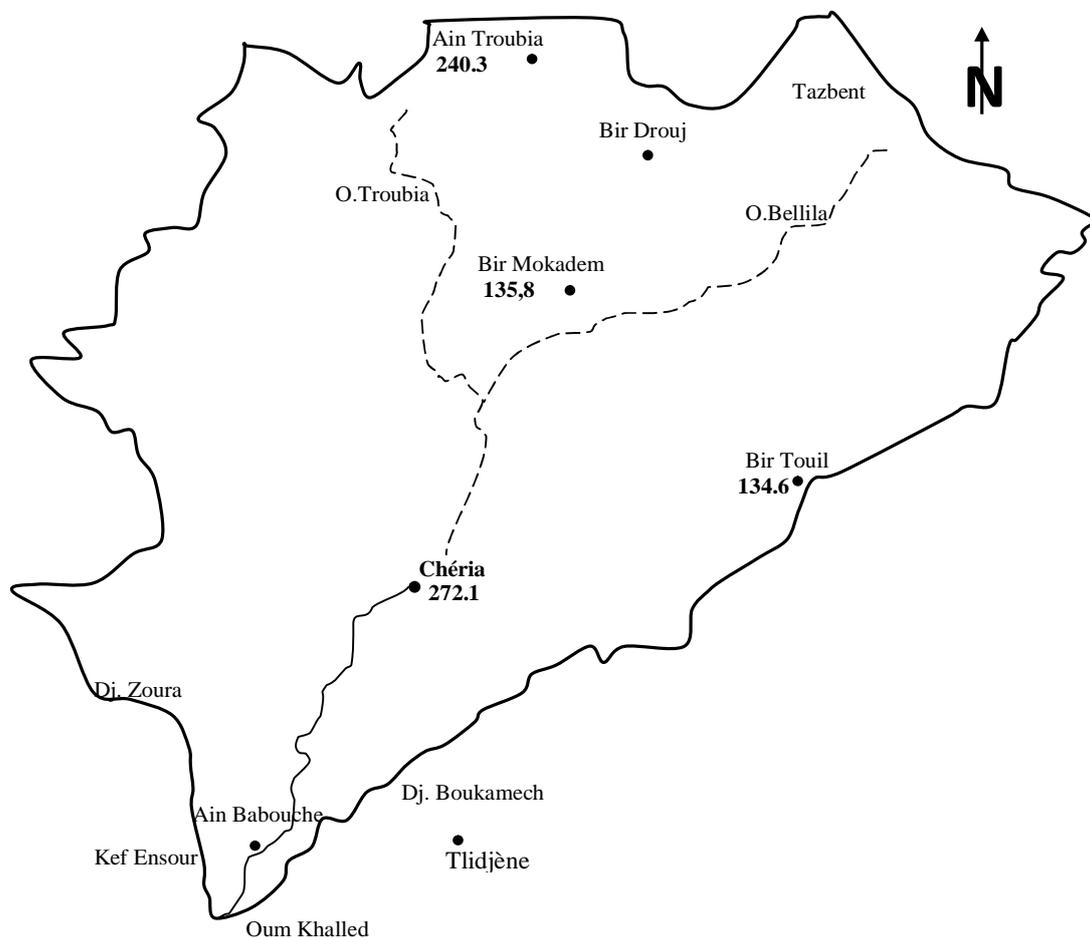
- Des valeurs plus faibles de précipitations au niveau des stations à la périphérie du bassin, au niveau des bordures, tel le cas de BirMokadem et BirTouil.

Des facteurs orographiques jouant un rôle d'écran aux vents chargés d'humidité, pourrait être une explication à cette variabilité.

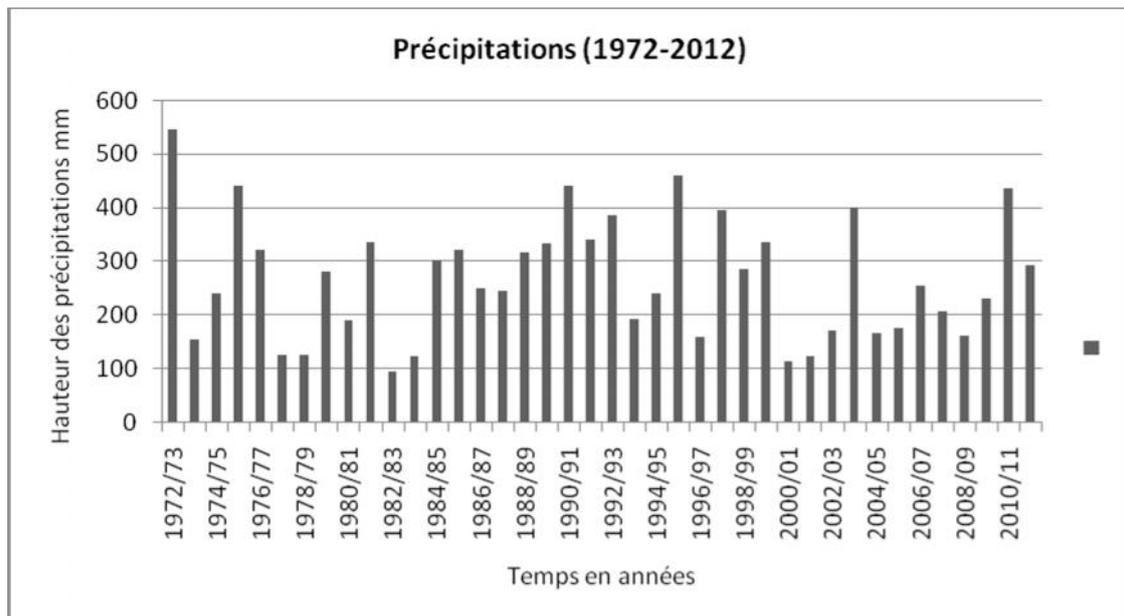
##### 1.4.1.2. Variabilité temporelle

L'étude de la variation temporelle des précipitations a été basée sur les résultats des relevés au niveau de la station de Chéria (Fig. 12). La période s'étale de 1972 à 2012, l'évolution est très irrégulière, par contre en terme d'évolution du taux moyen, on peut souligner que comparativement à celui qui correspond à nos calculs (267.22 mm), il est en légère baisse par rapport au taux déterminé par Durozoy (1952), pour une période plus ancienne

(1909-1949) et qui est de 330mm. Il est également compris dans l'intervalle [200 - 300] sur la carte pluviométrique de Chaumont Paquin (1913-1963).



**Figure 11 : Réseau des stations climatiques**



**Figure 12: Chronique des précipitations à la station de Chéria (1972-2012)**

De manière globale, on peut avancer une baisse sur une longue période des valeurs moyennes des précipitations, même si cette période est entrecoupée d'épisodes de fortes précipitations.

#### 1.4.1.3. Régime interannuel

La variabilité temporelle des précipitations sur une certaine période peut être caractérisée par l'identification des périodes dites « excédentaires » et d'autres dites « déficitaires ». Pour cela, l'utilisation d'un paramètre dit indice de pluviosité, noté  $I_p$ , sert à la qualification des dites périodes (Fig. 13). Il est évalué sur une certaine période et calculé comme suit :

$$I_{p_a} = P_i / P_{moy}$$

$I_{p_a}$  : Indice de pluviosité annuel

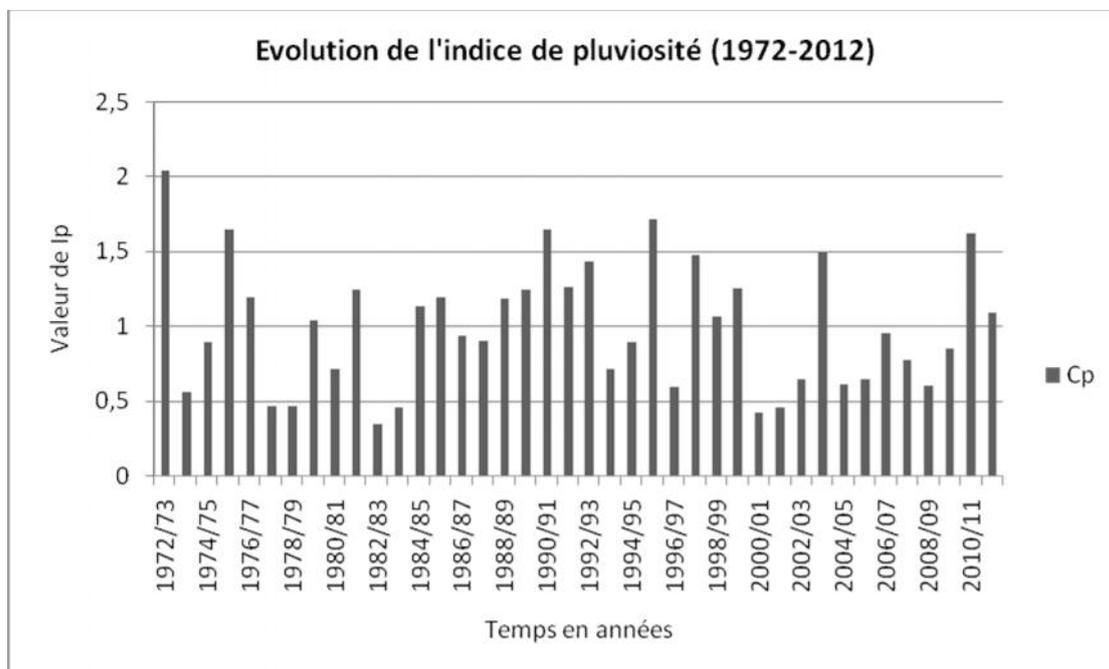
$P_i$  : Précipitations d'une année donnée

$P_{moy}$  : Précipitations moyennes de la période d'observation

Selon la valeur de cet indice, supérieure ou inférieure à l'unité (01), l'année en question est dite excédentaire ou déficitaire.

Le graphique ci-dessous résume les résultats obtenus pour toute la période d'observation. La valeur d'une année donnée, traduit en fait le manque en précipitations d'une année dite déficitaire et d'un autre coté le surplus pris d'une année excédentaire.

Nous pouvons distinguer à partir du graphique que l'évolution de ce paramètre est assez irrégulière avec des valeurs qui passent au dessus de 1, a des valeurs souvent inferieures. Ces résultats montrent que du point de vue de recharge, il n'y a pas de grand bouleversement dans les apports, vu que les années déficitaires ne sont pas très dominantes sur la période d'observation (40 années).



**Figure 13: Graphique de l'évolution de l'indice de pluviosité (1972-2012)**

#### 1.4.1.4. Régime climatique et saisonnier

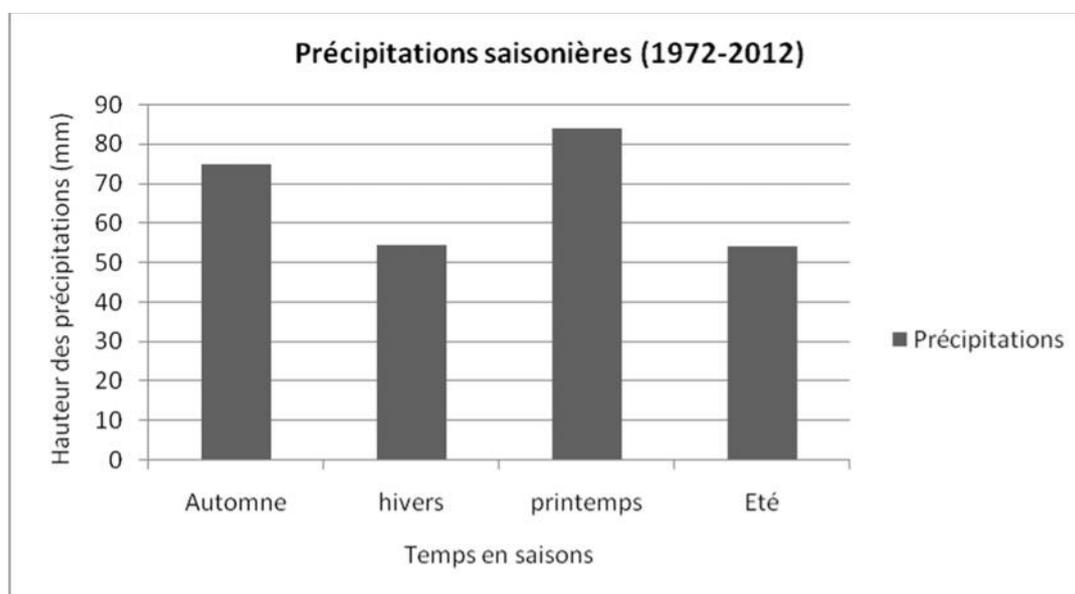
L'évaluation de l'indice de l'aridité à partir des résultats de précipitations et de températures observées et mesurées ont donné par la méthode de De Martone une valeur de  $I=11.51$ , classant ainsi la région sous climat semi aride.

De plus, l'observation de la variabilité des précipitations au cours de l'année moyenne (période d'observation), fait ressortir des périodes pluvieuses et d'autres moins pas forcément conforme au cycle hydrologique, notre intérêt pour l'évaluation de la pluviométrie saisonnière.

En effet les modules pluviométriques saisonniers dans le cas de Chéria montrent une saison pluvieuse correspondant au printemps (Mars-Avril-Mai), ce qui a un impact sur la recharge et les fluctuations des réserves souterraines (Tab. 3 et Fig. 14).

**Tableau 3: Pluviométrie saisonnière Chéria (1972-2012)**

Saisons	Automne	Hiver	Printemps	Eté
Précipitations (mm)	74.92	54.40	83.85	54.05



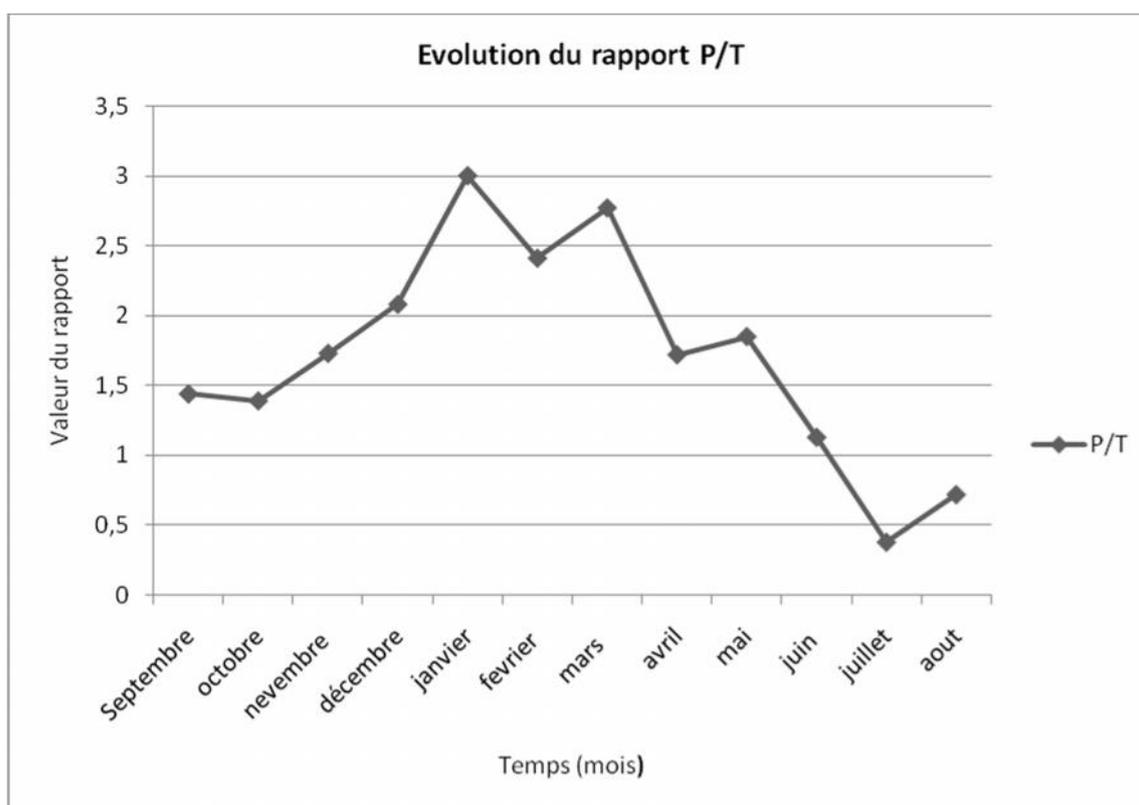
**Figure 14: Evolution de la pluviométrie saisonnière-Chéria (1972-2012)**

Un autre aspect climatique peut être caractérisé à partir des facteurs du climat et qui sont les précipitations et la température. En effet le rapport

entre ces deux facteurs (P/T) nous renseigne sur la nature du régime climatique, à savoir humide, sud humide, ou plus ou moins sec (Fig. 15). Dans la continuité de ce qui a précédé, nous avons procédé à l'évaluation de ce rapport à l'échelle mensuelle sur toute la période d'observation (Tab.4).

**Tableau 4: Valeurs du rapport P/T - Chéria (1972-2012)**

Mois	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août
<b>P</b>	31.17	23.59	20.16	16.32	19.47	18.61	28.61	22.17	33.07	25.24	10.23	18.58
<b>T°</b>	21.57	16.94	11.59	7.81	6.48	7.72	10.31	12.82	17.80	22.27	26.62	25.67
<b>P/T</b>	01.44	01.39	01.73	02.08	03.00	02.41	02.77	01.72	01.85	01.13	00.38	00.72



**Figure 15: Courbe de la variation du régime – Chéria (1972-2012)**

L'observation de la courbe sur le graphique ci-dessus, fait ressortir que les trois quart des valeurs se situent au dessus de la valeur de 1 (Septembre

à Juin). Selon la classification de Euverte, les valeurs situées dans l'intervalle] 1,2[caractérisent un régime sec.

Pour celles qui sont supérieures à 2, cela témoigne d'un régime subhumide. Le régime est encore plus sec pour les valeurs inférieures à 1. Dans notre cas, le graphique montre une période de Septembre à Novembre à régime sec, ainsi que pour la période d'Avril à Juin. Le régime subhumide est marqué par la période qui va de Décembre à Mars. Les mois de Juillet et Août appartiennent au régime extrême (très sec).

Un certain nombre d'outils statistiques est souvent utilisé pour une meilleure appréciation de la variabilité climatique d'une région. Parmi ces outils, le calcul des différents indices climatiques peut être d'un apport appréciable dans la caractérisation des situations climatiques d'une région. Dans notre cas, nous avons choisi l'emploi de l'indice pluviométrique (Fig. 16). Cet indice est d'une utilisation simple puisqu'il nécessite uniquement le paramètre des précipitations.

Son calcul est basé sur la relation suivante :

$$I_p = (P_i - P_m) / E$$

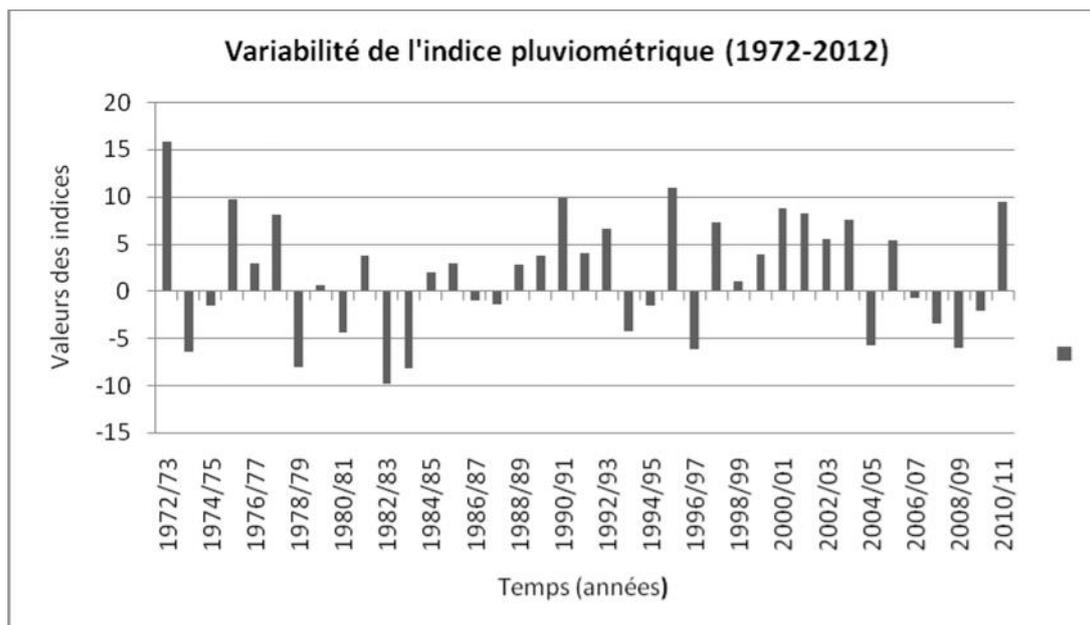
Où **I<sub>p</sub>** : **Indice** pluviométrique

**P<sub>i</sub>** : Précipitation d'une année i

**P<sub>m</sub>** : Précipitation de l'année moyenne (267.22 mm)

**E** : **Ecart** type de la série (17.66)

Les résultats des calculs statistiques ont permis de dresser le graphique suivant :

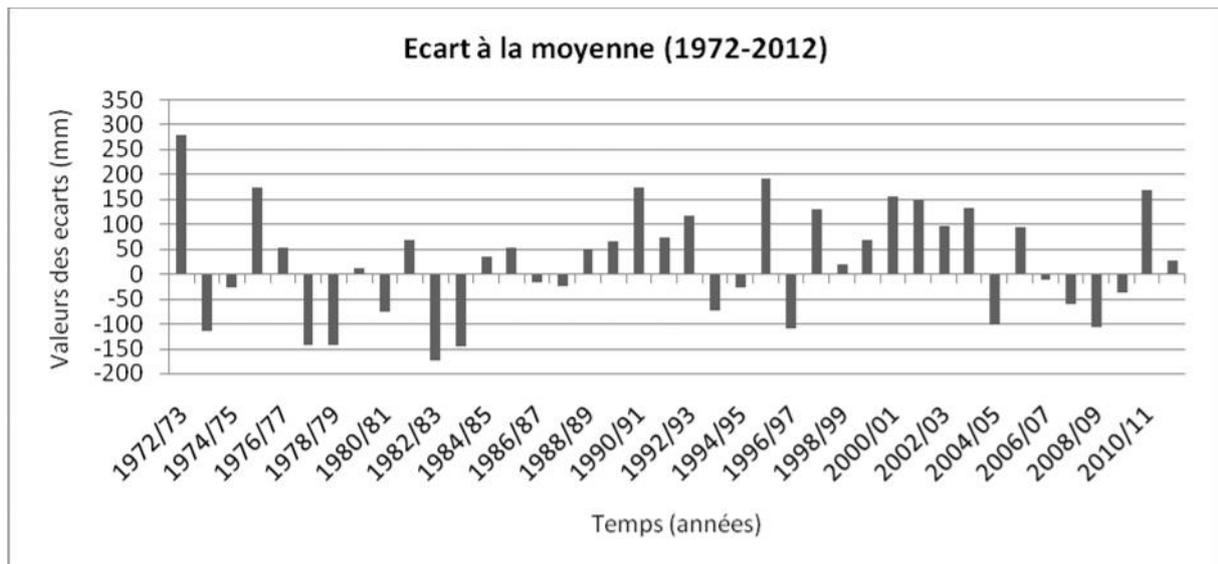


**Figure 16: Chronique des indices pluviométriques – Chéria (1972-2012)**

Le graphique obtenu permet de visualiser la variabilité de la distribution des précipitations. Nous remarquons une certaine récurrence des années qualifiées de négatives ou « sèches », mais en moindre importance vis-à-vis des années excédentaires (humides).

Un autre outil utilisé en statistique dans le domaine de la climatologie et en complément des outils précédents, est l'indice de sécheresse appelé aussi écart à la moyenne (Fig. 17). Noté **I<sub>s</sub>**, il permet d'apprécier l'écart par rapport à la moyenne d'une période et donc d'estimer le déficit d'une année à une autre. Il est évalué comme suit :

$$I_s = P_i - P_m$$



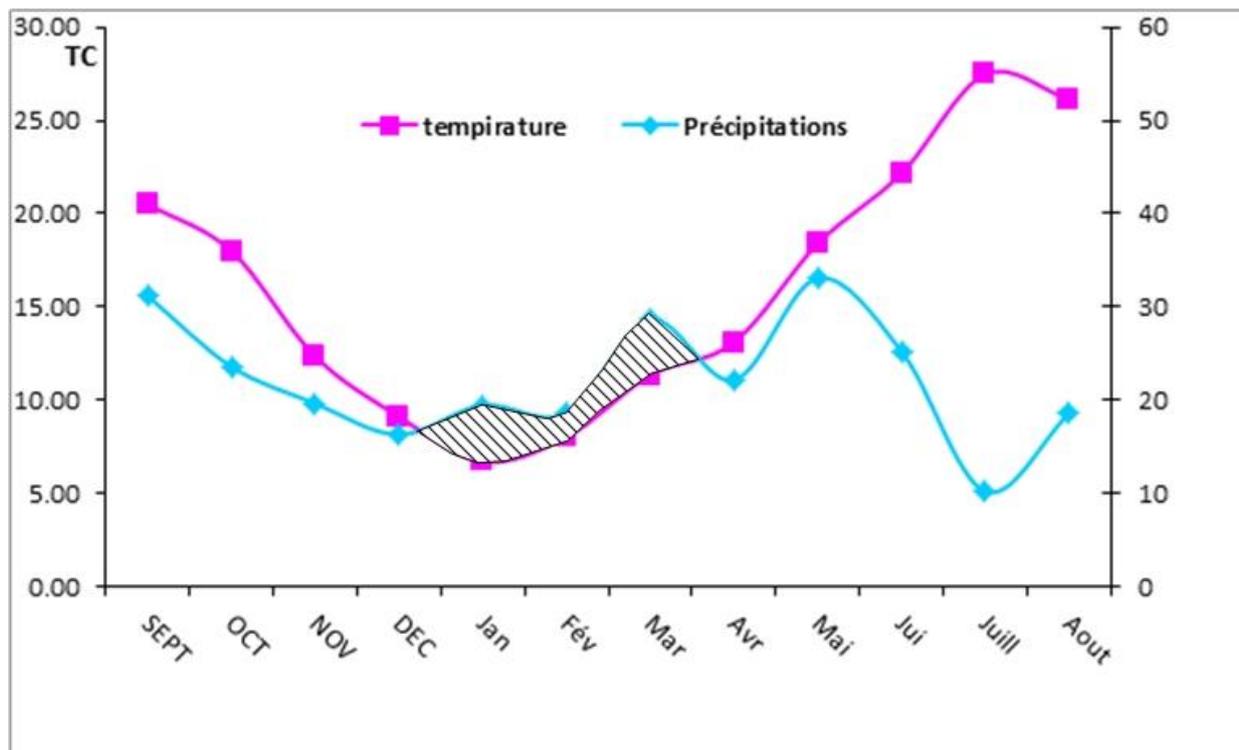
**Figure 17 : Evolution de l'écart à la moyenne de Chéria (1972-2012)**

La figure 17 ci-dessus montre l'évolution de l'écart à la moyenne de la série pluviométrique sur une période de 40 années, ce graphique nous permet d'observer le degré de dispersion des valeurs de précipitations annuelles par rapport à la moyenne et donc d'apprécier le degré de variabilité des valeurs  $P_i$  par rapport à une valeur moyenne  $P_m$ . On peut également apprécier le degré de variation de l'amplitude des écarts. Dans notre cas, pour les années dites « déficitaires » les amplitudes importantes sont relativement majoritaires (en dessous de -50), Cela est encore plus marqué pour les années excédentaires avec des amplitudes au dessus de (+50).

### 1.5. Diagramme pluviothermique

Afin de mieux visualiser les périodes climatiques (sèches ou humides), l'utilisation d'un diagramme, dit pluviothermique est adéquate et permet à partir de la représentation conjuguée des courbes thermique et pluviométrique de bien observer les périodes dites humides ou sèches de la région pour la période en question.

Sur la figure 18 ci-dessous, nous pouvons constater que la période humide s'étale du mois de Décembre à Avril, à partir de là, c'est une période sèche en dépit d'une pluviométrie non négligeable jusqu'en Juin, cela est dû à une température élevée pour cette période augmentant le pouvoir évaporant. Ceci est valable également pour la période antérieure à Décembre.



**Figure 18 : Diagramme pluviothermique – Chéria (1972-2012)**

### 1.6. L'évapotranspiration

Ce facteur, comme pour les deux précédents a son importance dans les équilibres hydriques et les mécanismes hydrologiques au niveau d'un bassin versant. Conditionné par le facteur thermique (température), son impact se fait traduire sur la ressource en eau et la végétation d'une région. C'est par un phénomène physico biologique qu'une partie d'eau est récupérée et restituée sous forme de vapeur à l'atmosphère, vapeur issue des deux phénomènes cités ci-dessus, l'évaporation des surfaces humides et la transpiration des végétaux.

En matière d'évaluation, l'estimation de ce paramètre nous renseigne sur le déficit en eau (perte) dans le résultat est utilisé dans le calcul du bilan hydrique d'un bassin versant.

Plusieurs méthodes peuvent être utilisées dans l'estimation de ce paramètre, celle de Coutagne, de Turc et de Thornthwaite. Elles utilisent toutes des facteurs liés la température, plus ou moins accessibles.

Dans notre cas, nous avons jugé celle de Thornthwaite la mieux adaptée dans l'évaluation de ce terme du bilan. Elle s'exprime comme suit :

$$ETP \text{ (mm)} = 1.6 (10T/I)^{\alpha} \cdot f(\lambda) ;$$

Où :

T : température moyenne mensuelle en °c

I : indice thermique annuel, égal a la somme des i avec  $i=(T/5)^{1.51}$

$\alpha$  : égal a  $(1.6/100)+0.5$

F( $\lambda$ ) : facteur de correction

Les résultats (Tab.5) sont utilisés dans le calcul du bilan.

**Tableau 5: Evaluation de l'ETP par la méthode de Thorthwaite  
(1972-2012)**

	<b>S</b>	<b>O</b>	<b>N</b>	<b>D</b>	<b>J</b>	<b>F</b>	<b>M</b>	<b>A</b>	<b>M</b>	<b>J</b>	<b>JU</b>	<b>A</b>	
<b>T<sub>moy</sub></b>	21.57	16.94	11.59	7.81	6.48	7.72	10.31	12.82	17.8	22.27	26.62	25.67	<b>15.63</b>
<b>P</b>	31.17	23.59	20.16	16.32	19.47	18.61	28.61	22..17	33.07	25.24	10.23	18.58	<b>267.22</b>
<b>K</b>	1.03	0.97	0.86	0.85	0.87	0.85	1.03	1.09	1.21	1.21	1.23	1.16	
<b>i</b>	9.14	6.34	3.50	1.96	1.48	1.93	2.99	4.16	6.83	9.59	12.57	11.90	<b>72.39</b>
<b><math>\alpha</math></b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<b>1.71</b>
<b>ETP</b>	106.6	70.52	36.85	18.76	13.63	18.39	29.47	43.79	76.75	112.59	152.76	143.55	<b>823.49</b>

### 1.7. Bilan hydrique

Le calcul du bilan s'établit au pas mensuel, sur la période d'observation et de suivi, le déficit représenté par l'évapotranspiration potentielle et l'évapotranspiration réelle est évalué par comparaison au taux pluviométrique, en prenant en considération la réserve du sol utilisable par la végétation.

En partant de la fin que l'évapotranspiration représente réellement le départ d'eau sous forme de vapeur à partir du sol, son évaluation dans le cas de la méthode de Thornthwaite repose sur la démarche suivante :

- Si  $P \leq ETP$ , alors on prend ETR équivalente à l'ETP.
  - Il reste un excédent ( $P - ETP$ ) qui est affecté en premier lieu à la RFU, et, si la RFU est saturée, alors a l'écoulement Q
- Si  $P > ETP$ , alors on prend ETR
  - L'évaporation accapare toute la pluie et on prend à la RFU (jusqu'à la vider) l'eau nécessaire pour satisfaire l'ETR.
  - si  $RFU = 0$ , la quantité ( $DA = ETP - ETR$ ) représente le déficit agricole, c'est-à-dire sensiblement la quantité d'eau qu'il faudrait apporter aux plantes pour qu'elles ne souffrent pas de la sécheresse.
- L'excédent noté EX, est destiné à l'infiltration et le ruissellement. Il est évalué par :  $EX = P - ETR$

Dans notre cas, nous avons utilisé les données de la période d'observation la même que celle des précipitations (1972-2012), pour l'évaluation du bilan, par la méthode de Thornthwaite (Tab.6).

A partir des résultats de ce tableau nous pouvons constater que le bilan est déficitaire, avec un excédent nul, des réserves (RFU) non satisfaites et un fort taux d'évaporation. En dépit d'un choix d'une réserve (RFU) de 25 mm, cela ne change rien au déséquilibre hydrique (déficit) de la région.

Pour une meilleure analyse de cette situation, nous avons jugé utile la comparaison des résultats avec les résultats d'autres bilans sur la même région et avec la même méthode, cela sur des périodes différentes, afin de prendre en compte de l'effet d'une éventuelle variabilité des conditions climatiques.

**Tableau 6: Bilan hydrologique (Thorthwaite) - station de Chéria (1972-2012)**

Mois	ETP (mm)	P (mm)	BH (mm)	RFU (mm)	ETR (mm)	Déf. (mm)	Exc. (mm)
Septembre	106.60	31.17	-75.6	00	31.17	75.6	00.0
Octobre	70.52	23.59	-47.52	00	23.59	47.52	00.0
Novembre	36.85	20.16	-16.69	00	20.16	16.52	00.0
Décembre	18.76	16.32	-02.44	00	16.32	02.44	00.0
Janvier	13.63	19.47	06.11	06.11	13.63	00	00.0
Février	18.39	18.61	00.22	06.33	18.39	00	00.0
Mars	29.47	28.61	-00.86	05.47	28.61	00.86	00.0
Avril	43.79	22.17	-21.72	00	22.17	21.72	00.0
Mai	76.75	33.07	-43.68	00	33.07	43.68	00.0
Juin	112.59	25.24	-87.35	00	25.24	87.35	00.0
Juillet	152.76	10.23	-142.53	00	10.23	142.53	00.0
Aout	143.55	18.58	-124.99	00	18.58	124.99	00.0
<b>Total</b>	<b>823.49</b>	<b>267.22</b>			<b>243.79</b>	<b>563.21</b>	

Ci-dessous les tableaux des autres bilans, sur les différentes périodes (Tab. de 7 à 9).

**Tableau 7: Bilan hydrologique (Thorthwaite) - station de Chéria (1982-2014)**

Mois	ETP (mm)	P (mm)	BH (mm)	RFU (mm)	ETR (mm)	Déf. (mm)	Exc. (mm)
Septembre	99.45	36.2	-63.25	00.0	36.20	63.25	00.0
Octobre	62.62	26.68	-35.94	00.0	26.68	35.94	00.0
Novembre	33.06	23.67	-09.39	00.0	23.67	09.39	00.0
Décembre	16.42	19.87	03.45	03.45	16.42	00.0	00.0
Janvier	12.67	23.11	10.44	13.89	12.67	00.0	00.0
Février	16.34	17.11	00.77	14.66	16.34	00.0	00.0
Mars	27.75	29.40	01.65	16.31	27.75	00.0	00.0
Avril	44.32	27.08	-17.34	00.0	43.39	00.93	00.0
Mai	72.65	41.02	-31.63	00.0	41.02	31.63	00.0
Juin	107.53	22.84	-84.69	00.0	22.84	84.69	00.0
Juillet	137.97	11.73	-126.24	00.0	11.73	126.24	00.0
Aout	134.78	20.02	-114.58	00.0	20.20	114.58	00.0
<b>Total</b>	<b>765.56</b>	<b>298.91</b>			<b>298.91</b>	<b>466.65</b>	<b>00.0</b>

Pour cette période également, nous constatons que l'excédent est toujours nul et une réserve non saturée.

**Tableau 8: Bilan hydrologique (Thorthwaite) - station de Chéria (1993-2008)**

Mois	ETP (mm)	P (mm)	BH (mm)	RFU (mm)	ETR (mm)	Def (mm)	Exc. (mm)
Septembre	101.0	33.9	-67.1	00.0	33.9	67.1	00.0
Octobre	56.2	34.2	-22.0	00.0	34.2	22.0	00.0
Novembre	26.0	25.9	-0.1	00.0	25.9	00.1	00.0
Décembre	10.8	18.8	08.0	08.0	10.8	00.0	00.0
Janvier	08.0	24.4	16.4	24.3	08.0	00.0	00.0
Février	11.8	20.5	08.7	33.0	11.8	00.0	00.0
Mars	26.4	31.6	05.2	38.2	26.4	00.0	00.0
Avril	48.1	17.5	-30.6	07.6	48.1	00.0	00.0
Mai	83.1	34.2	-48.9	00.0	41.8	41.3	00.0
Juin	127.1	30.9	-96.2	00.0	30.9	96.2	00.0
Juillet	160.4	10.9	-149.5	00.0	10.9	149.5	00.0
Aout	145.0	22.9	-122.1	00.0	22.9	122.1	00.0
<b>Total</b>	<b>803.9</b>	<b>305.7</b>			<b>305.7</b>	<b>498.4</b>	<b>00.0</b>

Le tableau ci-dessus fait également ressortir une période (1993-2008) caractérisée par un déficit.

**Tableau 9: Bilan hydrologique (Thorthwaite) - station de Chéria (1985-1995)**

Mois	ETP (mm)	P (mm)	BH (mm)	RFU (mm)	ETR (mm)	Def (mm)	Exc. (mm)
Septembre	102.3	25.01	-77.3	00.0	25.0	77.3	00.0
Octobre	65.6	28.81	-37.4	00.0	28.2	37.4	00.0
Novembre	29.7	24.09	-05.6	00.0	24.1	05.6	00.0
Décembre	13.9	20.83	06.9	06.9	13.9	00.0	00.0
Janvier	10.1	24.22	14.1	21.0	10.1	00.0	00.0
Février	15.2	20.53	05.3	25.0	15.2	00.0	01.3
Mars	26.6	34.29	06.6	25.0	27.6	00.0	06.6
Avril	44.6	15.17	-29.4	00.0	40.2	04.4	00.0
Mai	88.5	41.32	-47.2	00.0	41.3	47.2	00.0
Juin	127.6	37.64	-90.0	00.0	37.6	90.0	00.0
Juillet	161.0	15.40	-45.6	00.0	15.4	145.6	00.0
Aout	151.1	25.10	-26.0	00.0	25.1	126.0	00.0
<b>Total</b>	<b>837.32</b>	<b>311.81</b>			<b>303.85</b>	<b>533.48</b>	<b>07.9</b>

Seule cette période d'observation (1985-1995), n'accuse pas de déficit et montre un léger excédent dans la balance hydrique.

L'utilisation de plusieurs bilans a différentes périodes et avec différents scénarios (RFU variables) est motivée par le souci de se rapprocher au maximum des conditions réelles qui régissent la situation climatique du plateau de Chéria ainsi que la variabilité de cette situation. A partir des ces différents bilans, nous constatons ce qui suit :

- A part le bilan de la période (1985/95), les autres se caractérisent par un excédent nul et sont déficitaires.

- Différentes valeurs utilisées de la RFU, donnent elles aussi des bilans déficitaires.

- Le seul bilan (Tab.9) présentant un excédent (07.90), peut être justifié par d'une part la RFU<sub>25</sub>, et d'autre part par des précipitations relativement importantes (311.81 mm) par rapport aux autres périodes.

#### 1.8. Discussion des résultats

A la lumière de tous les résultats obtenus ci-dessus, nous pouvons soulever ce qui suit :

- La chronique pluviométrique de la région de Chéria est marquée par une variabilité très irrégulière sur la période d'observation.

- La valeur de la moyenne pluviométrique est en légère baisse par rapport aux périodes anciennes (1909-1949) avec 330.mm contre 267.mm

- Sur le plan saisonnier, la période du printemps est tout aussi importante en précipitations que celle de l'hiver si ce n'est plus. Ceci a un impact certain sur le mode de fluctuation des réserves souterraines.

- Le caractère déficitaire des différents bilans en fonction de différentes variantes de la RFU, en dépit de précipitations non négligeables peut s'expliquer par des températures relativement importantes avec un impact direct sur la ponction de l'évaporation, ce qui épuise constamment les réserves du sol.

- En dépit d'apport non négligeable en précipitations, cela même en période printanière et estivale, sauf que le caractère orageux de ces précipitations ne favorise pas une infiltration et a un impact d'érosion sur le sol.

La seule fraction qui arrive aux réserves souterraines ne peut provenir que des pertes par les structures karstiques (avens et dolines).

## **2. Aspect hydrologique**

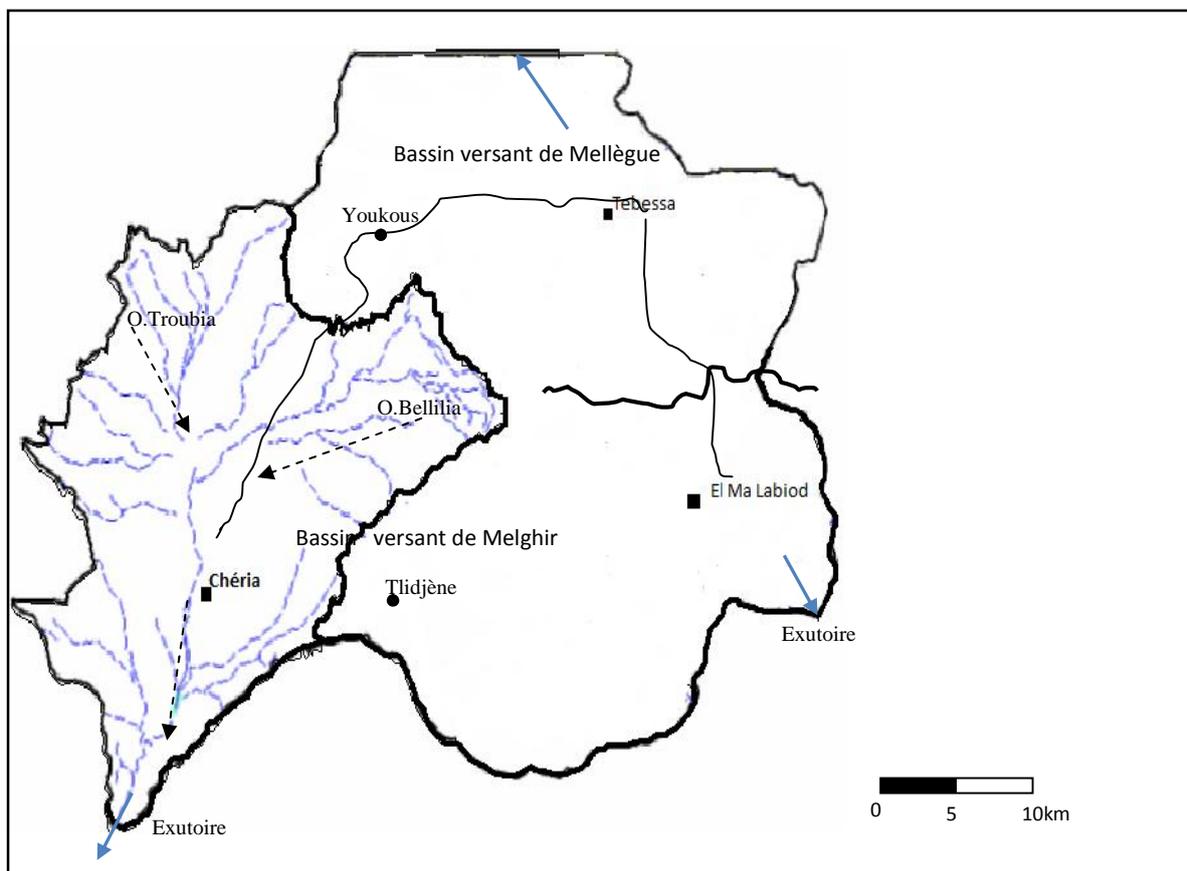
Une étude sur les potentialités hydriques de la région et leurs caractéristiques ne peut se passer des informations relatives à l'aspect hydrologique de cette même région ou bassin versant. Dans notre cas, nous avons jugé utile de présenter quelques informations relatives à l'hydrographie du bassin de Chéria.

Le bassin de Chéria, d'un point de vue hydrographique se présente comme suit (Fig. 19) :

Une partie Nord, caractérisée par beaucoup de talwegs orientant les écoulements de la périphérie (bordures) vers le centre de la cuvette. Ce réseau de talwegs draine les eaux de pluies et d'orage et les déversent dans deux collecteurs principaux qui sont l'oued Troubia, prenant naissance du djebel qui porte le même nom et qui finit sa course au niveau de la plaine avale. Le deuxième, oued Blilia, prend naissance à partir du Djebel Tazbent.

Enfin dans la partie sud du bassin, le principal cours d'eau se trouve être l'oued qui porte le nom de la localité, c'est-à-dire Chéria, il prend naissance au sud de la ville de Chéria, il sert de canal naturel de drainage des eaux de pluie et de la ville, il se différencie des autres cours d'eau par sa pérennité de l'écoulement, il se prolonge jusqu'à la plaine d'El Mazraa.

Nous nous intéresserons de plus près à ce cours d'eau, de part sa pérennité, mais aussi, car c'est celui qui a fait l'objet de mesures hydrométriques.



**Figure 19: Réseau hydrographique du plateau de Chéria**

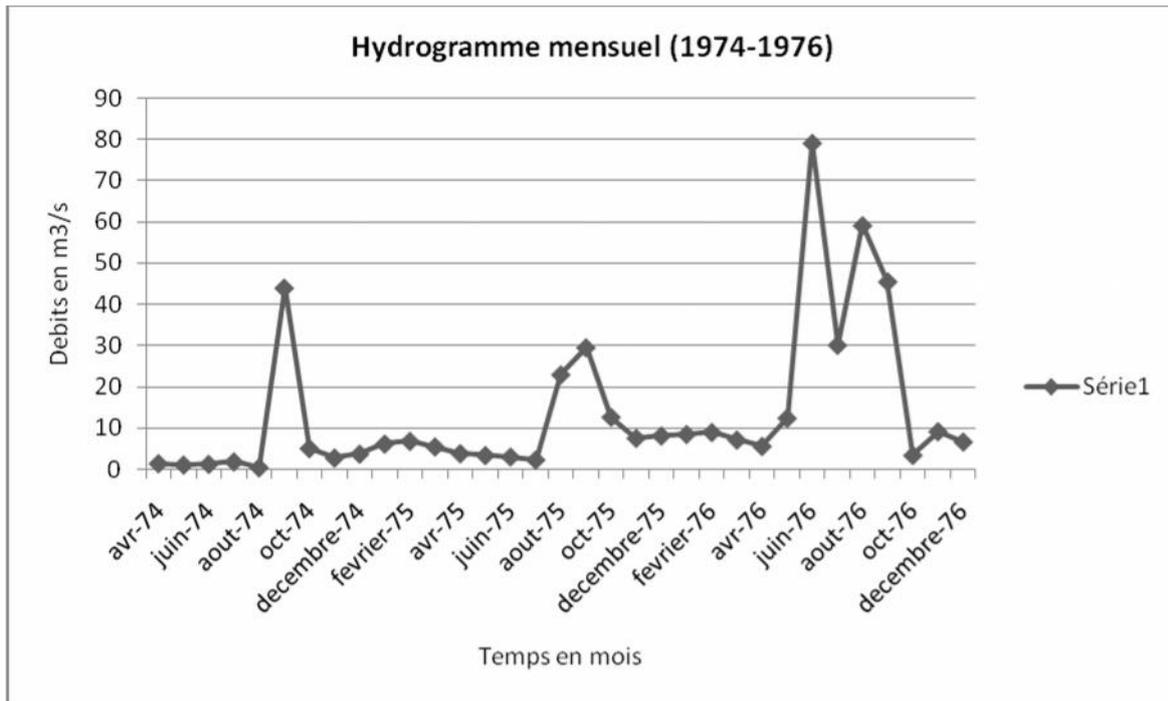
## 2.1. Hydrométrie de l'oued Chéria

Ce cours d'eau a été le siège de suivi hydrométrique, cela grâce à l'installation d'une station de jaugeage opérationnelle à partir de l'année 1974. Ce cours d'eau progresse dans sa majorité sur les calcaires Eocènes, le site de la station étant situé à la gorge formée par le rapprochement entre les massifs de Bou Kamech et Kef N'sour.

Grâce à un équipement formé d'un limnigraphe complet, des séries de mesures ont été enregistrées, notamment la période de 1974 à 1976 et 1982 à 1994, soit une période de deux années et douze années.

### 2.1.1. Hydrogramme mensuel de la période (1974 – 1976)

Afin de mieux caractériser les modalités des écoulements de l'oued Chéria, une série de mesures des débits (jaugeage) a été effectuée à partir du mois d'Avril 1974, l'hydrogramme obtenu (Fig.20), donne une vision sur cet aspect de la question.

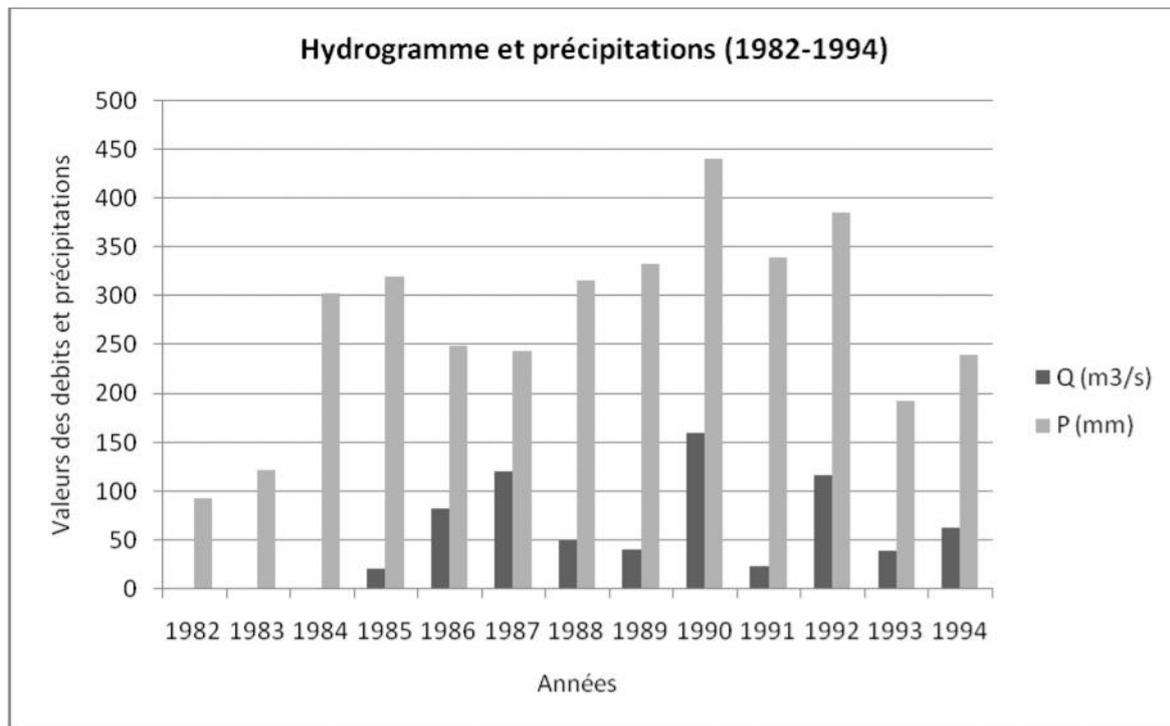


**Figure 20 : Hydrogramme mensuel de l’oued Chéria  
(1974-1976)**

Les débits dans leur majorité dépassent rarement les 10 m<sup>3</sup>/s avec des amplitudes modérées, sauf pour les mois Septembre 74 et 75 et de Juin à Septembre 1976. Les précipitations du mois de Juillet et d’Août (47.4 mm) peuvent expliquer ce pic avec un effet décalé. Pour l’autre période, les précipitations du mois de Avril-Mai 76 (105.2 mm) ont eu le même effet que pour le premier pic.

#### 2.1.2. Hydrogramme annuel de la période (1982 – 1994)

L’enregistrement de cette série (ANRH), peut être considéré comme régulier et complet (Fig. 21). Tout ce qui vient par la suite est très irrégulier marqué par des arrêts prolongés. L’hydrogramme obtenu pour la période en question, montre des débits plutôt faibles avec de faibles au début de la série jusqu’à l’année 1985/86, pour marquer ensuite des pics pendant l’année 1987, 1990 et 1992. Ceci s’explique par les précipitations relativement importantes de ces trois années.



**Figure 21: Hydrogramme de l'oued Chéria (1982-1994)**

La variation des précipitations et sa comparaison avec l'hydrogramme de l'oued Chéria sur la période d'observation et de suivi est apparue intéressante dans la mesure où cela nous permet de visualiser la réaction de l'écoulement souterrain (débit), à la recharge (précipitations).

De manière globale, la relation est assez parallèle, les débits suivent globalement l'évolution des précipitations, cependant, nous pouvons noter certains décalage dans la réaction (1986, 1987) et parfois des réactions (réponses) synchrones aux pluies (1990/92 et 1993/94).

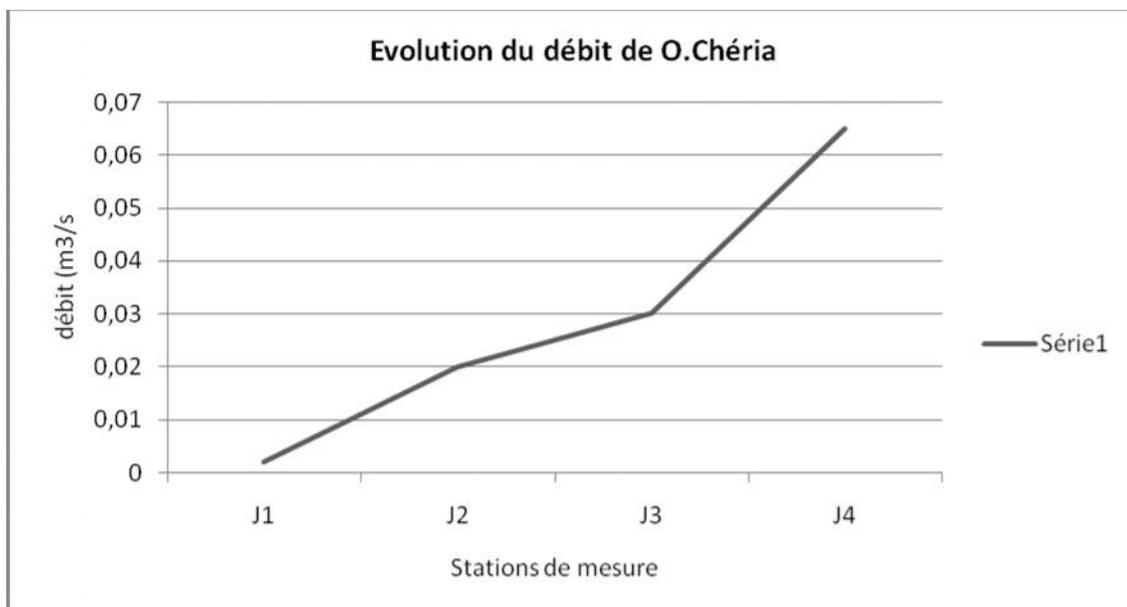
Ce que nous pouvons également ajouter en ce qui concerne la relation entre précipitations et débits de l'oued, c'est que le mode d'écoulement souterrain de l'aquifère éocène et l'importance en surface de l'impluvium du bassin de Chéria, font que l'évolution des deux paramètres, n'est pas similaire. En effet, l'écoulement enregistré correspond en réalité aux eaux en surface et l'émergence des eaux souterraines. Dans cette optique, deux campagnes de jaugeage effectuées en Février 2001 et Mai 2003 (Baali, F.), afin de mettre en évidence la part de chaque apport (surface et souterrain) dans l'écoulement de l'oued Chéria, principal axe de drainage du bassin versant de Chéria.

## 2.2. Courbe de jaugeage

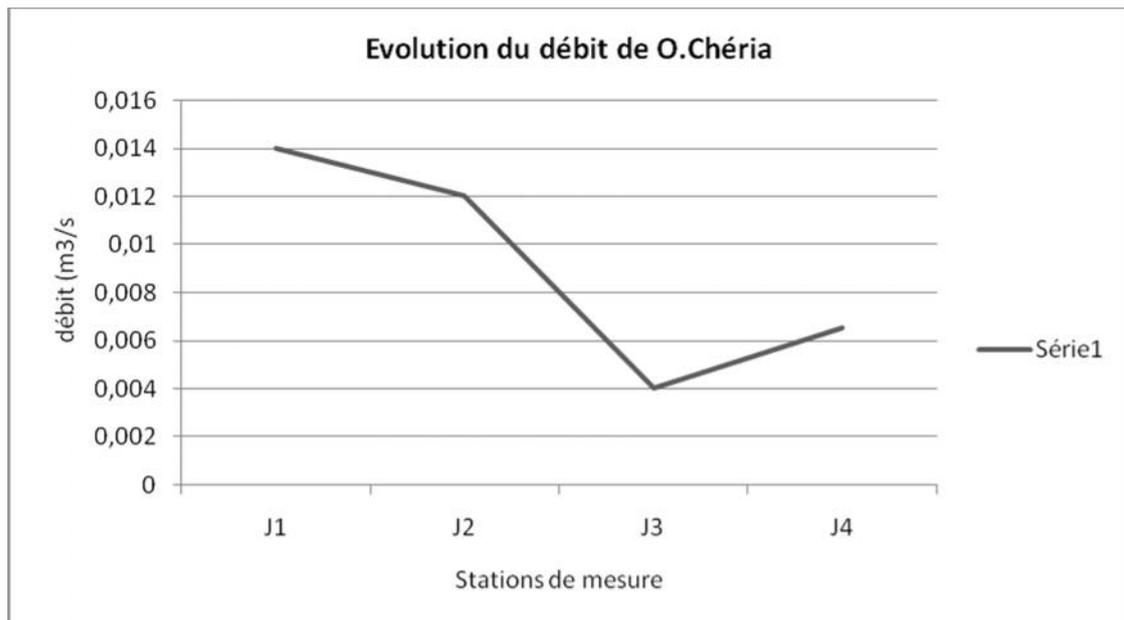
Le profil des débits obtenu après dépouillement des résultats des opérations de jaugeage pour les deux périodes a fait ressortir ce qui suit :

- Le premier jaugeage (02/2001), montre un profil croissant au niveau des trois stations (J1, J2 et J3), suivi d'une nette croissance jusqu'à la station J4 (Fig. 22). Cette nette augmentation s'explique par l'apport de l'émergence des eaux de l'aquifère éocène par la source de Ain Babouche sur le profil du dit cours d'eau.

- Le deuxième jaugeage (05/2003), le profil obtenu est à l'opposé du premier, notamment au niveau des trois premières stations (J1, J2 et J3), pour reprendre une croissance légère vers la station J4 (Fig. 23).



**Figure 22: Evolution du débit de l'oued Chéria (2001)**



**Figure 23: Evolution du débit de l'oued Chéria (2003)**

Le profil de la première période montre largement la participation des eaux souterraines à l'écoulement de surface, cette relation s'inverse à la deuxième période, où l'écoulement de surface décroît par diminution des apports (précipitations) d'une part et d'autre part par, la contribution à la recharge de l'aquifère (phénomène de fuite sur les affleurements calcaires).

La difficulté dans l'évaluation des débits du cours d'eau, réside dans le fait que le lit de oued Chéria et l'axe d'écoulement de l'exutoire de l'aquifère (source de Ain babouche) sont confondus, ainsi l'hydrogramme obtenu est en fait le résultat de l'écoulement de surface qui est aussi le drain de la zone urbaine et l'émergence des eaux de l'aquifère éocène.

### **3. Conclusion**

Dans un premier temps, les résultats des calculs à partir des valeurs obtenues sur la base des séries d'observation des stations (Chéria et Tébessa), notamment pour les deux facteurs de précipitation et de température, nous ont permis de caractériser le climat de la région de Chéria, comme du type semi aride.

La moyenne pluviométrique évaluée sur une période de plus de 40 années, à la station de Chéria, atteint les 267.22 mm. Cette valeur est en légère diminution si on la compare avec les résultats d'une série plus ancienne (1909-1949) de 40 années (330 mm), ce qui indique un léger déficit relatif en recharge ces dernières décennies. Le mois de Septembre et Mai semble être celui qui a reçu en moyenne le plus de précipitations. Le mois le plus chaud est celui de Juillet et Janvier étant le plus froid.

Le régime pluviométrique est très irrégulier sur l'année et dans le temps. Cependant et afin de mieux caractériser la variabilité climatique de cette région, différents outils ont été utilisés (indices climatiques), des résultats obtenus il en ressort que la variabilité au niveau de cette région est effective mais reste sans grande fluctuation avec des récurrences des périodes déficitaires mais sans une grande intensité.

Différents scénarios dans l'évaluation des bilans avec des périodes différentes et des RFU différentes (50 et 25 mm), ont abouti à des situations de déficit et des excédents nuls.

Du point de vue hydrologique, le principal cours d'eau de la région reste celui de Chéria, l'évolution hydrométrique (temporelle) est très irrégulière et semble complexe, mais la relation du cours d'eau avec l'aquifère est assez évidente sur le parcours par un échange des rôles de drainage et d'alimentation réciproquement.

**CHAPITRE V**  
**DESCRIPTIF ET CONSTAT DU SYSTÈME AQUIFÈRE**

## **V. DESCRIPTIF ET CONSTAT DU SYSTÈME AQUIFÈRE**

### **1. Introduction**

L'objet premier de ce chapitre est de dresser un état descriptif du système aquifère qui forme le plateau de Chéria d'une part, et dans une deuxième démarche, présenter l'approche suivie pour la problématique traitée, tout en se basant sur les approches des autres auteurs.

Afin d'atteindre l'objectif poursuivi dans ce travail, le choix de la méthode était fonction de sa demande en paramètres nécessaires à son application, mais aussi de la capacité de celle-ci à fournir une réponse au problème posé.

### **2. Structure du système aquifère**

Nous ne nous attarderons pas sur l'historique des études et investigations entreprises (géophysiques et sondages mécaniques) sur ce secteur (Chéria) et qui ont permis d'identifier les différentes formations géologiques dont se compose ce système, ce système identifié, se compose de ce qui suit (Fig. 24):

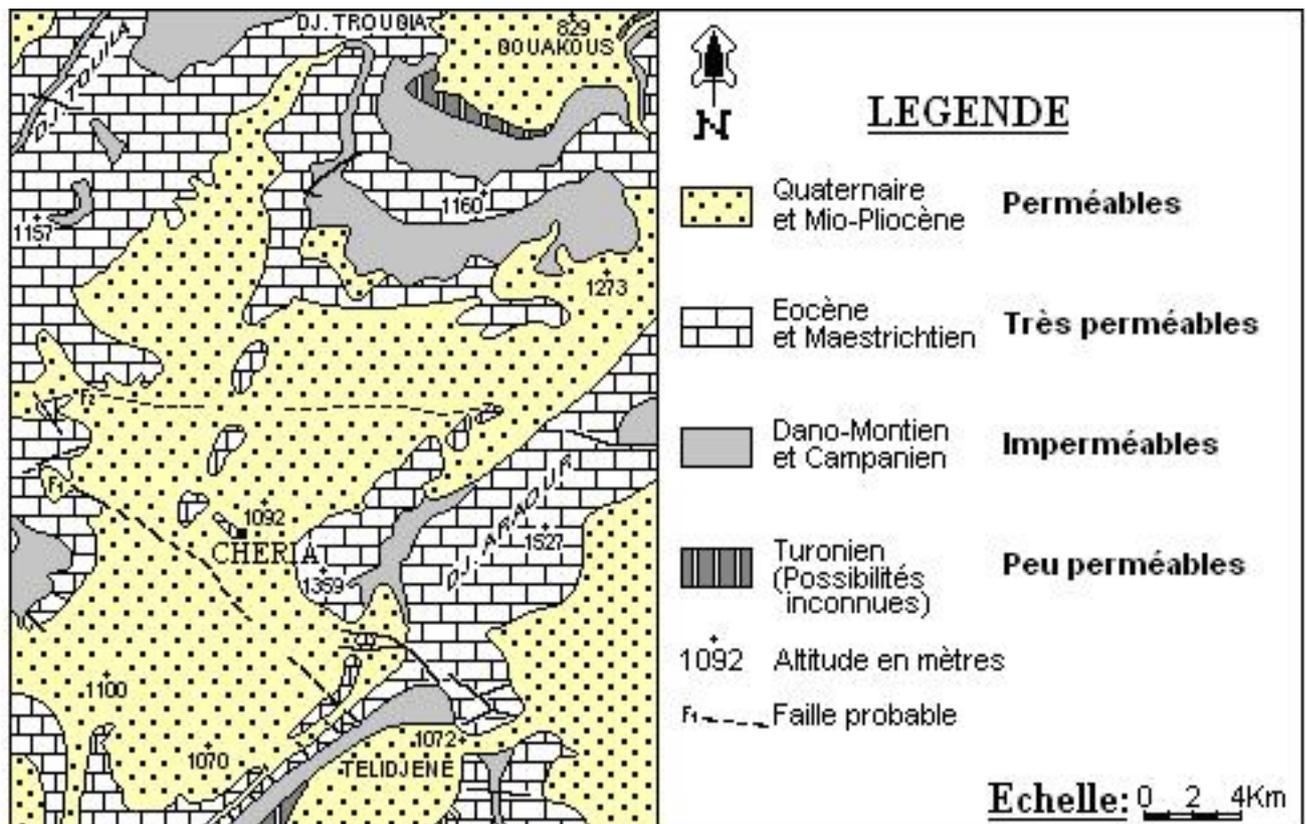
- Un niveau Maestrichtien, formé de calcaires, reposant sur des marnes Turoniennes.
- Au dessus du Maestrichtien, reposent des marnes Campaniennes.
- La formation subjacente est celle de l'Eocène, formée de calcaires.
- Le Mio-Plio-Quaternaire, complexe, composé d'un niveau Miocène et d'un niveau quaternaire.

#### **2.1. Potentialités hydriques des différentes formations**

D'après la géologie de la région, on peut constater que la série stratigraphique s'étale sur 1500 m en moyenne de sédiments, constitués essentiellement de marnes, de calcaires, de sables argileux et d'alluvions.

Les formations marines, c'est-à-dire le Trias, le Jurassique, le Crétacé et l'Eocène occupent 80% de la sédimentation, les 20% restant représentent les formations sableuses et alluvionnaires.

Cette succession lithologique permet d'entrevoir les possibilités aquifères et de tracer une esquisse hydrogéologique du plateau de Chéria (Fig. 24).

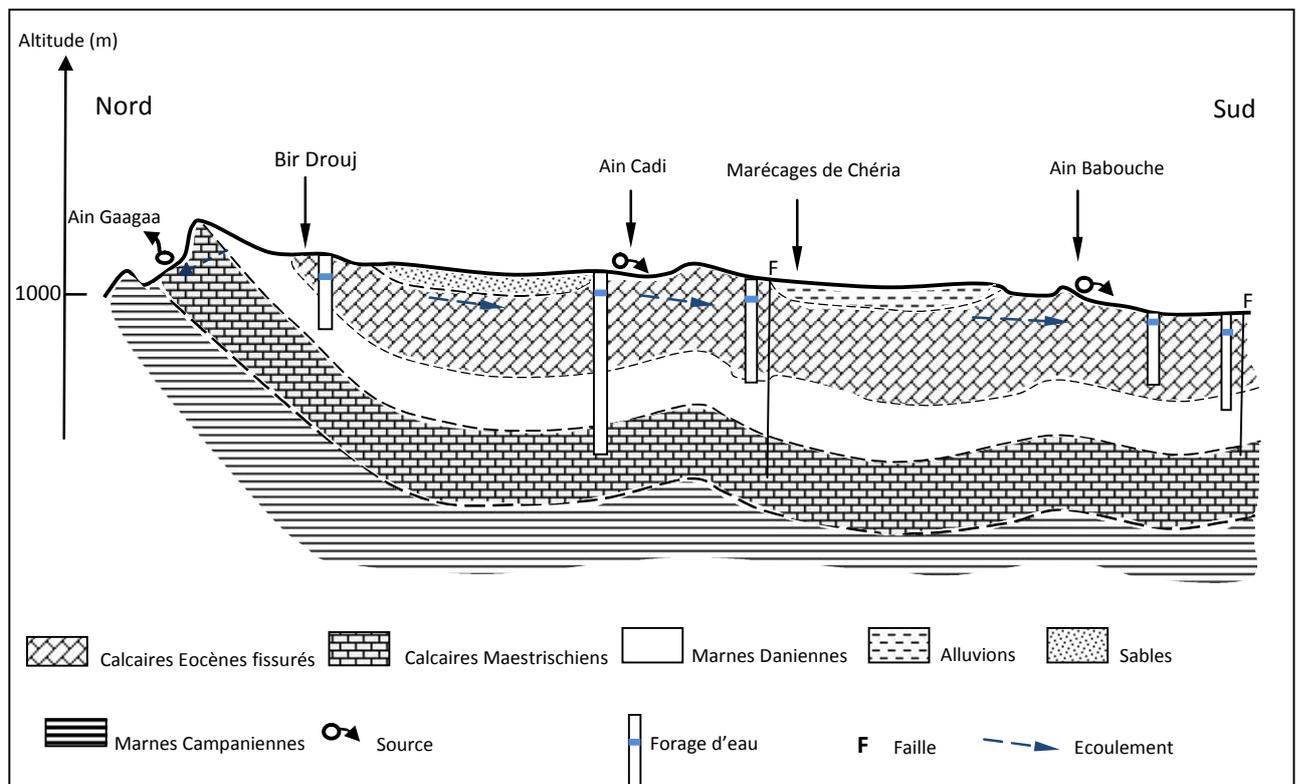


**Figure 24: Esquisse hydrogéologique du plateau de Chéria  
(H. Chaffai, 1986)**

### 2.1.1. Le Maestrichtien

Cette formation qui affleure aux bordures a été mise en évidence par l'investigation de sondages mécaniques, qui ont montrés que cette formation était aquifère à la périphérie et présentait de bonnes potentialités, avec présence de drains importants (débits importants et faibles rabattements). Au centre, cette formation ne présente pas les mêmes indices que les bordures, en effet, il n'y a pas de pertes de fluide de circulation (boue de forage) lors des opérations de réalisation des sondages (Fig. 25).

Nous ne pouvons avancer aucune affirmation pour ce qui est des potentialités hydriques du niveau maestrichtien dans le centre du bassin, en raison du faible nombre de forage d'exploration qui ont atteint un niveau au delà du niveau marneux dano-montien.



**Figure 25 : Coupe hydrogéologique le long du plateau de Chéria**

### 2.1.1. L'Eocène

Ce niveau constitué de calcaires, reposant sur les marnes suscitées, est notre principal réservoir étudié, il est aussi celui qui fait l'objet de la plus grande part d'exploitation pour les besoins (agricoles et urbains) de la région de Chéria (Fig. 25).

Le caractère aquifère de ce niveau et ses potentialités, ont été mis en évidence, par les nombreuses opérations de forages dans cette région. En effet les nombreux phénomènes de pertes de boue et même de chute d'outils ont mis en évidence l'existence de niveaux fissurés et karstifiés. La fissuration étant plus développée (karst) dans la partie supérieure (jusqu'à 50m).

Dans notre cas, et par rapport à la problématique traitée, c'est-à-dire l'effet de la variabilité climatique sur l'évolution de l'aquifère karstique Eocène, nous avons tenté une approche de suivi de cette aquifère sur une certaine période et de corréler l'évolution à celle de la recharge, les précipitations.

### 2.1.3. Le Mio-Plio-Quaternaire

Constitué de deux niveaux différents, cet aquifère est composé d'un niveau sableux d'âge Miocène, avec un niveau de graviers et de sable quartzeux.

Les formations alluvionnaires, formées de cailloutis fluviaux et de formations de piedmont, qui appartiennent au Quaternaire, ont une extension assez importante sur le plateau de Chéria. Ce niveau joue un rôle tampon dans l'alimentation des aquifères sous-jacents (Eocène et Maestrichtien).

Ce niveau a longtemps constitué le réservoir exploité dans l'activité agricole avec des puits relativement peu profonds (20 m), l'effet de la sécheresse qui a sévi et une demande sans cesse croissante a entraîné un abaissement progressif et continu du niveau d'eau jusqu'à l'assèchement de la majorité de ses puits.

Cet assèchement a eu pour conséquence, l'abandon de la majorité des puits domestiques ou leur développement en forages profonds, atteignant ainsi le niveau des calcaires Eocène.

Enfin notons que la structure globale se présente sous forme de synclinal perché.

## **3. Modalités de circulation des eaux souterraines**

L'aquifère Eocène étant notre objet d'étude, il est donc nécessaire d'apporter quelques éclaircissements sur ce type de réservoir en raison de son caractère karstique. Ce caractère hérité du phénomène de dissolution de la roche carbonatée, par l'eau chargée en dioxyde de carbone, a fait l'objet de nombreuses recherches (Jenning, 1985 ; Chaffai, 1986 ; Collignon, 1988 ; Ford, 1989 ; Pulina, 1999).

Le trait caractéristique des aquifères karstiques est leur hétérogénéité spatiale, ce qui explique le niveau lacunaire de connaissances dans ce domaine et la difficulté de leur étude, ceci entraîne souvent des exploitations non rationnelles de ces hydro systèmes (surexploitation ou sous-exploitation).

En ce qui nous concerne, nous avons voulu apporter un supplément de connaissances concernant la caractérisation des eaux de cet aquifère et les conséquences de leur évolution sous l'effet de la variabilité climatique des dernières décennies.

En pratique la connaissance des modalités d'écoulement et de circulation est liée à l'étude des différents paramètres structurels (géologie, tectonique, karst) et conjoncturels (précipitations et évapotranspiration) qui interagissent dans le cycle de l'eau.

Les aquifères calcaires sont considérés en raison des processus de dissolution comme perméables en grand.

Les conditions structurelles citées ci dessus de ces aquifères sont fractionnés dans l'espace et entraîne une variabilité du fonctionnement hydrodynamique.

Dans notre cas, pour visualiser les écoulements de l'aquifère Eocène du plateau de Chéria, nous nous sommes basés sur la cartographie piézométrique réalisée dans des campagnes d'étude précédentes (F. Baali, 2006). Même si la méthode de réalisation de la carte piézométrique est discutable dans le cas des aquifères fissurés, nous la considérons utile pour le but recherché. La configuration piézométrique permet de visualiser ce qui suit :

Dans une première partie représentée par le secteur (sous bassin) nord, les écoulements ont un sens nord sud, marqués par une convergence des bordures.

Le deuxième secteur est représenté par le sous bassin sud, où les écoulements sont issus des bordures Est et Ouest et converger vers l'axe que constitue l'oued de Chéria.

En dehors de toute confirmation de la relation entre l'aquifère de couverture et celui de l'Eocène, les relevés piézométriques, à partir des puits

et des forages restent peu fiables pour une quelconque interprétation et compréhension de la dynamique des écoulements dans le milieu calcaire.

Dans les milieux calcaires, concernant la dynamique des écoulements et la circulation, la méthode de traçage (naturel ou artificiel) nous semble être la plus appropriée et fiable lorsque sa mise en œuvre est possible.

Dans notre cas, nous avons tenté à plusieurs reprises d'établir un programme de traçage pour le plateau de Chéria, mais la difficulté résidait dans l'étendue du terrain et la localisation de points d'injection présentant les conditions de réussite de l'opération de traçage.

### 3.1. Conditions aux limites

Lors de l'investigation entreprise par GAUD, B. (1977), ce dernier a élaboré à la suite des résultats obtenus, une carte (esquisse), représentant les différentes limites de l'hydrosystème de la région et les conditions qui y existent (Fig. 26). Nous distinguons que pour les différents horizons (Maastrichtien et Eocène) que les différentes limites que constituent les affleurements calcaires au niveau des bordures, des situations de flux entrant caractérisent ces limites, les écoulements sont en général de sens Nord-Sud et convergent, sauf dans le secteur Nord, au niveau des affleurements Maestrichtien où l'écoulement souterrain se fait vers le nord et émerge sous forme de source telle que celle de Bouakous qui surplombe la localité de Hammamet.

### 3.2. Circulation karstique (Pertes et émergences)

Parmi les manifestations karstiques que l'on peut remarquer dans le paysage karstique et particulièrement dans les écoulements, on peut citer les pertes et émergences qui peuvent être de bons indicateurs dans la karstification et l'hydrodynamique des écoulements. Dans le cas du phénomène de perte, il se manifeste par une ouverture par laquelle un cours d'eau devient souterrain après un trajet à l'air libre, l'eau s'engouffre dans un conduit naturel de taille relativement importante ou cavité, transformant ainsi le cours d'eau en écoulement souterrain jusqu'à sa résurgence après une certaine distance.

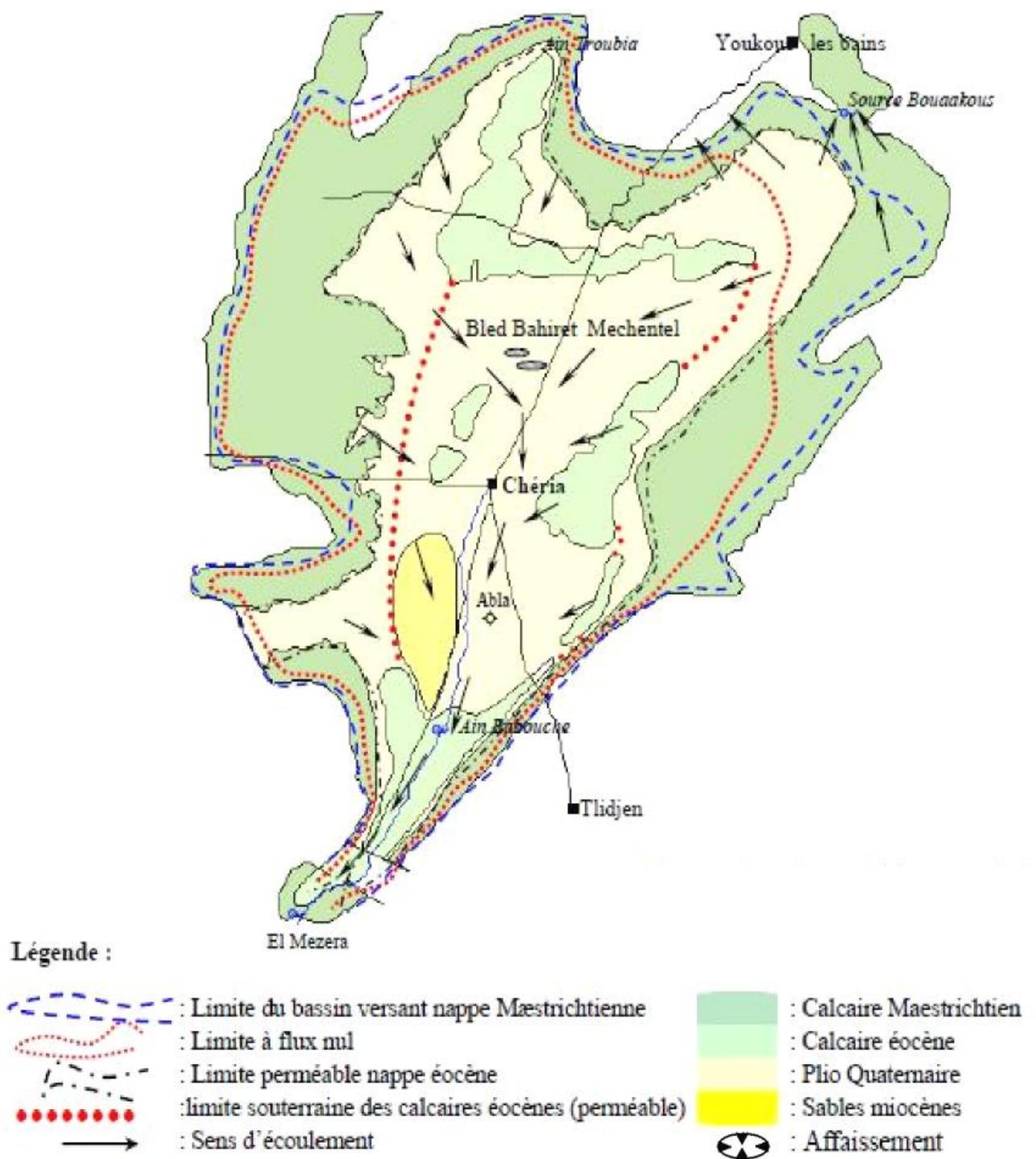
Au niveau de notre site d'étude, des phénomènes similaires ont été remarqués et particulièrement sur les cours d'eau issus des bordures, ce qui accentue leur caractère hydrologique temporaire.

Dans le deuxième cas, c'est-à-dire l'émergence, après avoir traversé un massif calcaire à travers fissures, failles, galeries, l'eau finit par ressortir à l'air libre à un niveau inférieur.

Cette sortie d'eau, fréquente dans les paysages karstiques reflète le phénomène d'émergence. Ce sont des exutoires des eaux souterraines, quelque soit le type de l'exutoire, (exurgence et résurgence), il forme ce qu'on appelle les sources.

Dans le cas du plateau de Chéria, un certain nombre d'émergences était fonctionnel, cependant, avec les décennies de sécheresse qui ont sévi dans la région ont eu un impact sur la recharge de l'aquifère et pour conséquence, une baisse progressive du niveau des eaux de l'aquifère. Ceci a entraîné une diminution des débits des émergences du plateau jusqu'à leur tarissement total, tel le cas de la source d'Ain Cadi et bientôt le cas d'Ain Babouche qui constitue le principal exutoire de l'aquifère Eocène, le débit de cet exutoire est très faible pour ne pas dire pratiquement nul, ce qui peut être expliqué par la même cause citée ci-dessus.

En se référant à la description des conditions aux limites du système aquifère étudié, présentées dans la figure 26, nous avons pris en compte dans nos investigations la source de Bouakous qui elle présente un sens d'écoulement à l'opposé de celui de Chéria, et draine les eaux de la formation Maestrichtienne. Dans le cadre d'un programme de coopération avec l'université de Nice Sophia-Antipolis, un suivi au niveau de la source en question a été réalisé, sur lequel nous reviendrons plus loin.



**Figure 26: Carte des écoulements et conditions aux limites**

#### 4. Milieu calcaire et choix de l'approche hydrogéologique

#### 4.1. Le milieu calcaire

Nous ne chercherons pas dans cette partie à retracer l'histoire de la Karstologie, mais présenter l'essentiel de ce type de configuration. Rappelons que l'existence d'un karst est conditionnée par deux facteurs qui sont, le potentiel de la karstification et l'état initial du massif carbonaté.

Le premier facteur comprend l'existence d'un solvant (eau + CO<sub>2</sub>) et d'un gradient hydraulique. Le deuxième, concerne la présence d'une fracturation ancienne (tectonique) ou d'une porosité ou la nature lithologique. La genèse de notre système karstique est le résultat des conditions évoquées ci-dessus.

Il appartient au type de karst dit « classique » (Bakalowicz, 1996; Plagnes, 1997), c'est-à-dire qui a pour origine des écoulements gravitaires d'eau chargée en CO<sub>2</sub> après son transit par le sol.

Enfin, pour clôturer cette aspect de la question, nous dirons que le système karstique de l'aquifère étudié est un système unaire dont l'impluvium est couvert par des terrains fissurés ou karstiques, et il est du type vaclusien en raison de l'organisation de son drainage.

#### 4.2. Choix de l'approche hydrogéologique

En raison de son caractère particulier, un système karstique ne peut guère être étudié par les moyens classiques généralement appliqués aux aquifères poreux. En effet, du fait de l'importance des hétérogénéités spatiales, la mise en place de campagnes piézométriques est compromise en raison des importantes discontinuités hydrauliques qui caractérisent le système karstique. Les dimensions très variables des drains peuvent entraîner une répartition décousue des niveaux piézométriques, il est très fréquent de retrouver des réserves isolées les unes des autres par des siphons.

Plusieurs approches propres à l'hydrologie des milieux calcaires existent, précisons cependant que les écoulements dans les calcaires ne sont pas forcément karstiques, par contre il faut souligner que le karst est l'élément majeur.

De nombreux auteurs qui ont travaillé sur le karst (Nicod, 1967; Jennings, 1971; Salomon, 2006) ont contribué dans la précision scientifique

et géographique du terme karst. D'autres, dans la continuité de la même optique, ont lié le terme de karst à quatre notions qui sont le paysage, la forme, la lithologie et le processus hydrodynamique (Mangin, 1975 ; Bakalowicz, 1979). Par contre, Ford (2011) a évoqué la spécificité du karst par sa triple porosité (matrice, fracture et conduit).

Dans notre cas, nous nous inspirons beaucoup plus des méthodes de l'hydrogéologie du milieu calcaire, même si parfois il y a eu des apports de la spéléologie.

#### 4.3. Les approches hydrogéologiques

Avant d'aborder la présentation d'une quelconque approche, il est utile de préciser que c'est le lien (De Martonne) entre l'évolution géomorphologique et le fonctionnement hydrologique qui a marqué la naissance de l'hydrogéologie karstique.

Sous l'impulsion d'autres auteurs (Schoeller, 1965 ; Drogue, 1969 ; Mangin, 1975 ; Bakalowicz, 1979) l'hydrogéologie karstique s'est caractérisée par deux approches distinctes : l'approche structurelle et l'approche fonctionnelle.

##### 4.3.1. L'approche structurelle

Nous n'aborderons pas en détails cette approche, notons seulement que c'est une approche déductive qui a été développée par l'école suisse et comme son nom l'indique, vise à décrire l'aspect structurel, en se basant sur son comportement temporel (Kiraly, 1969). La finalité de cette approche est une modélisation de la structure à partir de l'identification des caractéristiques du système issue des observations in situ (forages et pompages d'essais). Selon Jeannin (1996), la mise en œuvre est délicate en raison de sa nécessité d'une connaissance complète de l'espace pour en déduire le fonctionnement, ce qui n'est toujours pas le cas.

##### 4.3.2. L'approche fonctionnelle

Dans ce cas là, la base de cette approche est la relation pluie-débit, et permet ainsi de concevoir le réservoir calcaire à partir de son fonctionnement, c'est en fait le principe de la boîte noire.

Cette approche retrace les interactions entre les composantes du système, depuis la zone d'infiltration (alimentation) jusqu'à l'écoulement à l'exutoire.

Selon Mangin (1975), deux composantes verticales ont été identifiées et qui régissent la structure de l'aquifère calcaire : la zone d'infiltration (vadose) et la zone saturée (noyée).

Sans vouloir trop s'étaler sur cette méthode, précisons juste que dans cette approche, les deux fonctions du réservoir (transmissive et capacitive) sont reflétées dans la réponse du réservoir aux impulsions. La fonction transmissive est assurée par un réseau de conduits et la fonction capacitive, elle, est assurée par les vides karstiques (annexes) de drainage ou par la matrice poreuse de la roche. Cette dernière approche est fréquemment utilisée dans le domaine de l'hydrogéologie karstique (Dorfliger et al. 2008), a prouvé son adaptabilité pour des systèmes différents.

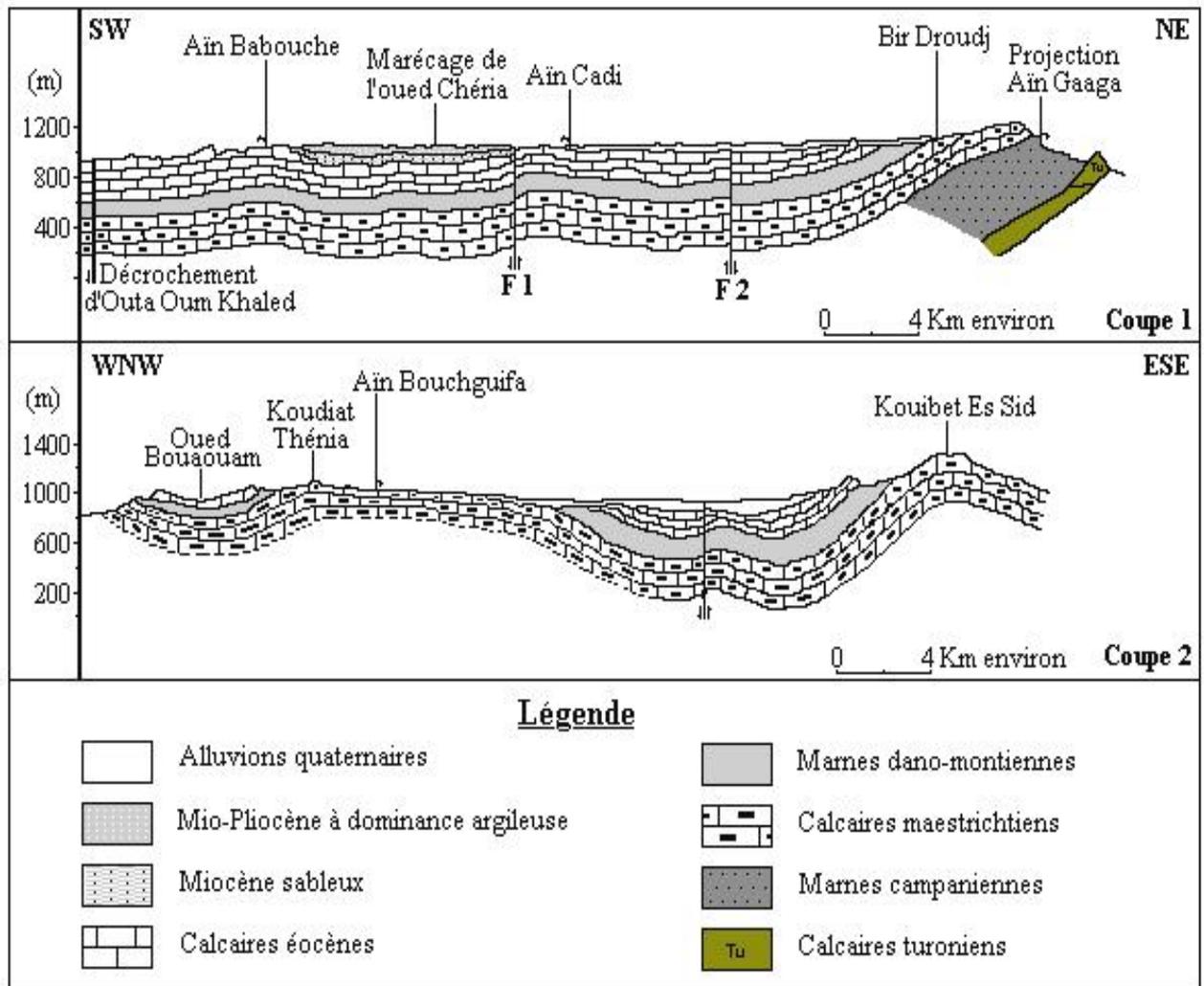
#### 4.3.3. L'approche adoptée

L'approche que nous avons retenue dans l'objectif de notre étude, s'aligne beaucoup plus sur la démarche fonctionnelle, ceci est motivé par la nécessaire caractérisation hydrologique des eaux de l'aquifère étudié. De l'approche structurelle, nous ne disposons pas d'assez d'informations sur la nature et la structure du réservoir. Notre choix sur l'autre approche a consisté à adapter cette même méthode à l'utilisation des informations accessibles et disponibles pour la caractérisation. Cette démarche permet de caractériser en termes de flux et de temps la dynamique du système.

Rappelons que cette méthode est basée sur l'étude (suivi) des réponses de l'aquifère (débit) à son exutoire suite aux impulsions (précipitations et infiltrations). En ce qui nous concerne et en vue de mettre en relief l'évolution du niveau de la réserve hydrique de l'aquifère éocène sous l'effet de la variabilité climatique, nous avons adopté une démarche qui s'inscrit plus ou moins dans l'approche fonctionnelle, afin de caractériser les eaux de l'aquifère, caractérisation qui permettra de se prononcer sur l'impact du processus de recharge (impact de l'infiltration) sur l'aquifère en question.

A la différence de la méthode fonctionnelle proprement dite, nous n'avons pas pu avoir accès à l'exutoire de l'aquifère, c'est-à-dire la source de Ain Babouche. Les rares fois où nous y sommes allés (2012), l'écoulement se résumait à un simple suintement (filet d'eau), mettant ainsi en évidence un quasi-tarissement de cette source (Fig. 27). Pour cette raison, nous nous

sommes dirigés vers l'observation et le suivi du niveau piézométrique de l'aquifère, qui lui aussi peut être un bon indicateur de la réaction de l'aquifère au même titre que le débit de la source.



**Figure 27: Coupes géologiques montrant les émergences des sources du plateau de Chéria (Chaffai et Baali, 2006)**

## 5. Méthodologie

Le système aquifère karstique étudié subit l'impact de deux facteurs importants dont l'effet conjugué sur l'aquifère, fait l'objet de notre démarche. Ces deux facteurs sont l'un d'ordre climatique et l'autre d'autre anthropique.

## 5.1. Facteurs d'impact

### 5.1.1. Facteur climatique

Nous n'allons pas présenter ici une étude des caractéristiques hydroclimatiques très poussée, ce qui a été fait dans le chapitre précédent, nous présentons juste les contours quantitatifs (entrées et sorties) des résultats du bilan. Cette opération comptable permet selon le cas de quantifier la fraction d'eau mobilisable (précipitations efficaces), issue de la confrontation entre les données de précipitations (entrées) et les données d'évapotranspiration (sorties).

En se basant sur les résultats du bilan présenté dans le chapitre précédent, il ressort de ce bilan le caractère déficitaire de cette région. Ceci accentue l'impact sur la ressource en eau du système aquifère. Le caractère hydroclimatique de cette région s'inscrit dans un contexte global de changement climatique ces dernières décennies, en effet les observations et études par la communauté scientifique montrent une inconstance climatique encore plus importante en termes de variables climatiques avec des conséquences sérieuses sur les systèmes hydrologiques.

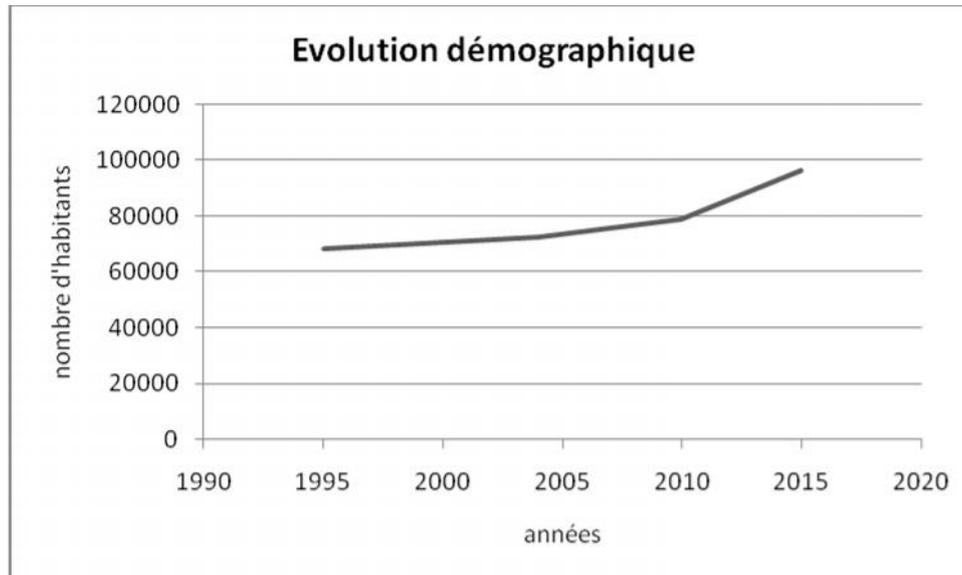
### 5.1.2. Facteur anthropique

Ce facteur est caractérisé par la pression anthropique issue d'une demande urbaine et agricole de plus en plus importante qui s'est traduite par un accroissement du nombre de forages de manière anarchique. Ajouté à cela, un déficit hydrique accentué au cours des dernières décennies, cela a entraîné un abaissement considérable du niveau des eaux jusqu'à un quasi-épuisement des puits domestiques exploitants l'aquifère de remplissage.

De ce fait, les utilisateurs (urbains et agricoles) se sont tournés vers le réservoir sous jacent, calcaire éocène et ont procédé à une multiplication des forages d'exploitation ou un fonçage de leurs puits domestiques. Cette nouvelle situation a entraîné à son tour le début d'un abaissement progressif du niveau de la nappe éocène.

Toujours dans cette optique, il est utile de signaler que la pression démographique est également la conséquence d'une croissance démographique ce qui est le cas aussi pour cette localité, mais la particularité réside dans le fait que bon nombre d'habitants ruraux ont procédé à un exode important pour des raisons de sécurité au cours des

années 90/2000. Sur la figure 28, est représentée l'évolution du nombre d'habitants de la localité de Chéria.



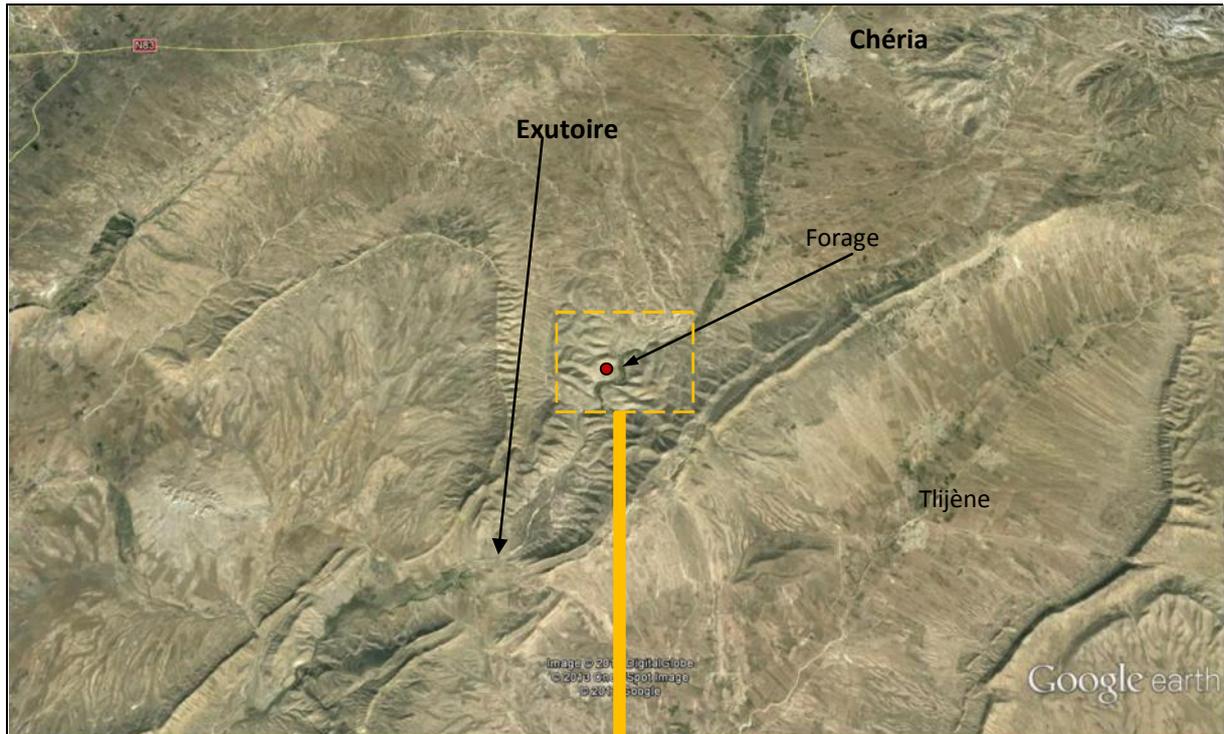
**Figure 28: Evolution du nombre d'habitants (1990-2015)**

Un changement de la pratique agricole également au cours de la même période, marqué par un abandon de l'agriculture agropastorale tributaire de la météo au profit d'une pratique maraichère, consommatrice d'eau. Ceci a également influencé sur l'exploitation irrationnelle de l'aquifère éocène.

## 5.2. Méthode d'étude

Il était utile de présenter les facteurs impactant sur l'aquifère étudié, car notre démarche vise à étudier l'effet de ces facteurs sur l'évolution de l'aquifère. Dans cette optique, nous avons adopté une méthode basée sur le suivi au niveau d'un point d'observation représenté par un forage à proximité de la source (exutoire) dans la zone Sud du plateau, en raison des difficultés à le faire au niveau de la source elle-même (Fig. 29).

Le suivi consistait à faire le relevé in situ de paramètres hydrogéochimiques des eaux de cet aquifère (calcaires de l'Eocène) sur une durée de 6 mois avec un pas de temps hebdomadaire.



**Figure 29: Photo satellite du Site du forage de suivi en aval de Chéria(Google earth)**

Le forage choisi pour le suivi a été réalisé dans la zone de l’affleurement des calcaires Eocène sur toute sa profondeur.

Un autre point d’observation en amont du premier point (région des Douamis) a lui aussi fait l’objet d’un suivi sur une année. Nous avons jugé utile de suivre l’évolution du niveau de la nappe en deux secteurs différents en raison de la spécificité du karst.

#### 5.2.1. Paramètres étudiés

Le suivi étant réalisé sous les conditions climatiques et la pression anthropique, le but recherché est de pouvoir se prononcer sur les eaux et leur nature (anciennes ou récentes) et se prononcer sur la situation actuelle de cet aquifère ?

Pour cela un certain nombre de paramètres est susceptible de nous renseigner sur le comportement de cet aquifère et dont nous avons choisi une partie pour notre investigation. Le choix était basé sur les moyens et l’utilité de chaque élément. A cet effet, nous avons opté pour deux outils différents, celui de la piézométrie et celui de l’hydrochimie.

##### 5.2.1.1. *La piézométrie*

A défaut de choisir le suivi des débits à l’exutoire, ce qui n’était pas réalisable, nous avons opté pour le suivi du niveau statique au niveau de notre forage d’observation. Tel que le débit au niveau de l’exutoire, le niveau statique de l’aquifère peut être un bon indicateur de l’évolution du plan d’eau de la nappe et ses réponses aux différentes sollicitations (anthropiques et climatiques).

##### 5.2.1.2. *L’hydrochimie*

Dans le cadre de notre travail, l’apport des informations à caractère hydrochimique peut être considérable dans l’identification du comportement et du fonctionnement de l’aquifère. A partir de campagnes sur le terrain nous avons procédé à des analyses des échantillons, en laboratoire, et des mesures in situ de l’ensemble des échantillons prélevés à partir de notre forage d’observation.

Les prélèvements d’échantillons d’eau sont effectués de manière synchrone aux relevés piézométriques, des flacons en polyéthylène ont été utilisés pour les analyses en laboratoire.

D'autres paramètres ont été mesurés in situ.

Au laboratoire du département, on a déterminé les éléments tels que le  $\text{Ca}^{2+}$ , le  $\text{Mg}^{2+}$ , et le  $\text{NO}_3^-$  à l'agence de production d'eau de Tébessa. Sur le terrain on a déterminé les paramètres (physiques), tels que la température, la conductivité et la salinité.

### 5.2.2. Résultats obtenus

Le suivi des deux paramètres piézométrique et hydrochimique au niveau du forage d'observation implanté à l'exutoire de l'aquifère (secteur aval), d'une part et au niveau de la région de Douamis (en amont) d'autre part, pour cette dernière, nous n'avons suivi que l'évolution du niveau statique de l'aquifère. Ce suivi a permis d'obtenir des chroniques que nous représentons sur les figures (30, 31, 32 et 33).

Le premier point d'observation (forage secteur aval) à l'exutoire, a fait l'objet d'un suivi durant une période de six mois (Février-Juin/2013), avec un pas de temps hebdomadaire, ce qui nous a permis de dresser la courbe d'évolution piézométrique et le chimiogramme pour chaque élément mesuré. Le suivi du débit (hydrogramme) de la source de Ain Babouche aurait été plus intéressant encore en raison de son rôle dans le drainage de l'aquifère, mais cela n'a pas été possible en raison de la difficulté du site et du quasi tarissement de cette émergence

Le deuxième point est également un forage (secteur amont) qui a fait l'objet de suivi du niveau statique durant une année (2011-2012) avec un pas de temps hebdomadaire.

#### 5.2.2.1. Chronique piézométrique

L'étude des chroniques piézométriques de l'aquifère karstique Eocène du plateau de Chéria (Tab. 10), est un élément important et intéressant susceptible de nous renseigner sur le fonctionnement et la manière dont les transferts d'énergie se font au sein de ce réservoir karstique. Sans perdre de vue l'objectif de cette étude qui est l'impact de la variabilité climatique sur l'aquifère en question, l'aspect fonctionnel reste un élément incontournable dans l'identification et la compréhension de l'impact.

**Tableau 10: Observation de la chronique piézométrique pendant les semaines de Février à Mai 2013**

<b>Dates</b>	19/02/13	26/02/13	05/03/13	12/03/13	20/03/13	27/03/13	04/04/13	12/04/13
<b>Semaine</b>	01	02	03	04	05	06	07	08
<b>Dates</b>	16/04/13	18/04/13	20/04/13	08/05/13	16/05/13	20/05/13	23/05/13	29/05/13
<b>Semaine</b>	09	10	11	12	13	14	15	16

L'observation de la chronique piézométrique (Tab. 10), représentée par la courbe (Fig. 30) réalisée à partir des résultats de mesure in situ au niveau du forage aval, qui a commencé du mois de Février 2013 avec un pas de temps hebdomadaire, montre dans son ensemble ce qui suit :

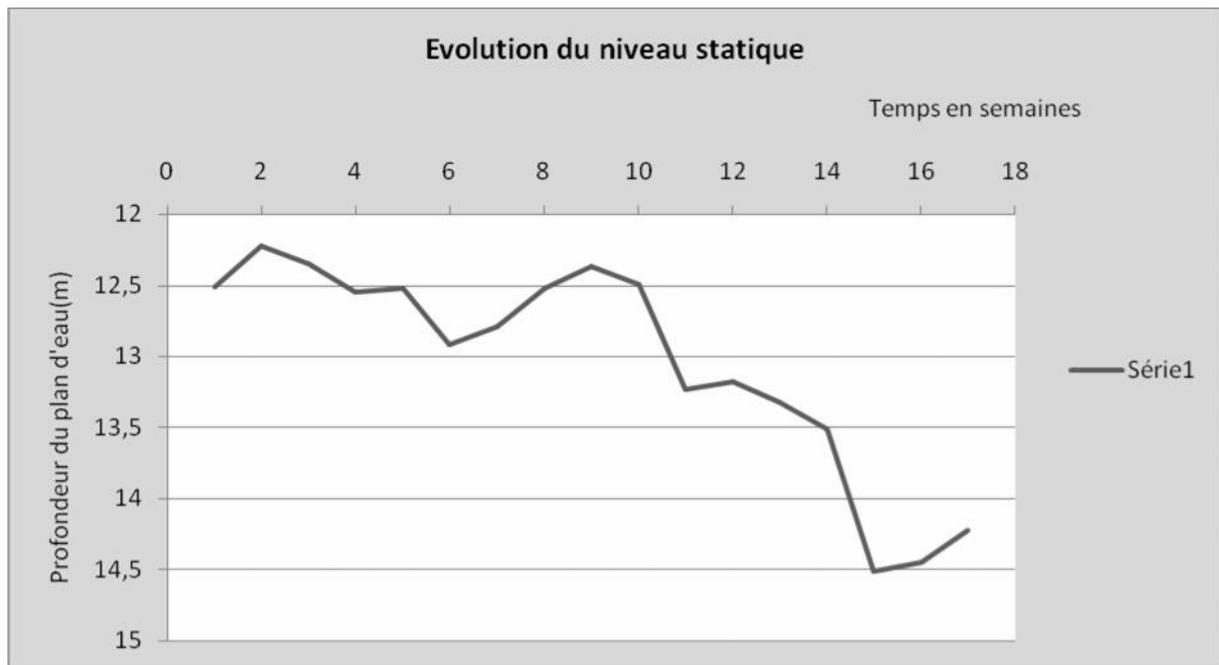
- L'allure générale de la courbe obtenue montre dans sa tendance globale une baisse plus ou moins régulière du niveau statique des eaux de la nappe.

- Au départ de la campagne de mesure, le niveau était à 12.5 m de profondeur, pour finir à la fin du cycle d'observation à une profondeur de plus de 14 m, soit une baisse de 2 mètres.

- Mis à part la deuxième semaine (pic à 12.22 m), la courbe amorce une descente irrégulière jusqu'à la sixième semaine, à partir de laquelle on remarque une remontée du niveau que l'on pourrait attribuer à un apport probable de la recharge ou à un arrêt prolongé du pompage par l'exploitant. Cette reprise du niveau se prolonge de manière atténuée jusqu'à la dixième semaine, pour reprendre à partir de là une descente jusqu'à pratiquement la fin de la période d'observation

- En raison d'une période d'observation marquée par une pluviométrie relativement nulle dans la région, il est fort probable que le niveau ancien dans ce forage était à moins de 12 mètres, compte tenu de la baisse graduelle que nous avons relevée dans nos mesures in situ.

- Enfin troisième observation, les eaux étudiées sont sans aucun doute et compte tenu du contexte hydro climatique (absence de recharge), des eaux de la partie profonde du réservoir et donc des eaux d'un séjour relativement ancien ou long.

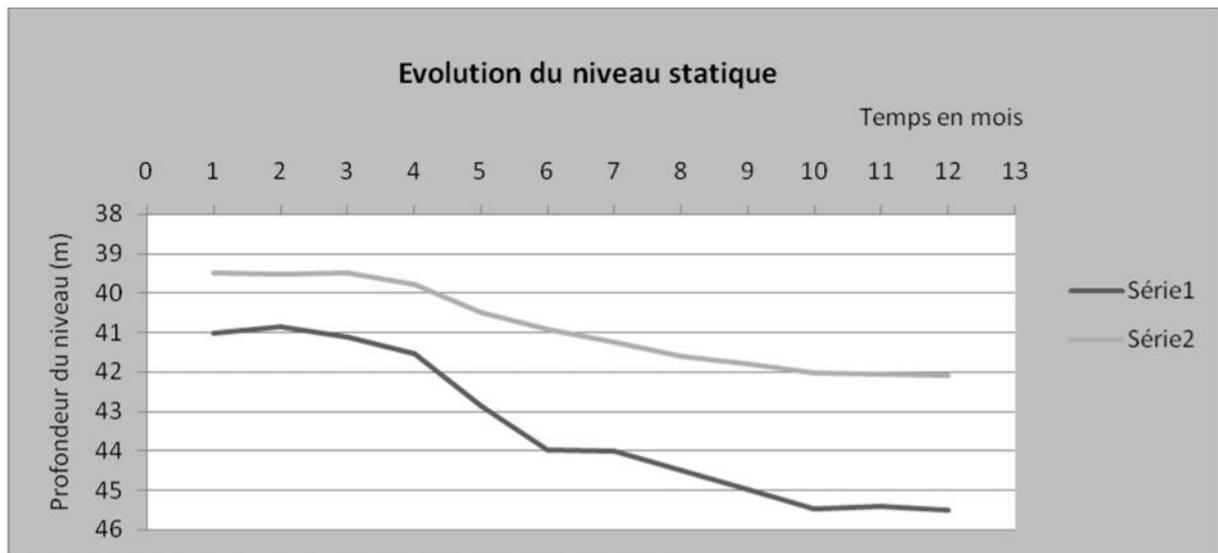


**Figure 30: Chronique du niveau statique du forage aval  
(2012/2013)**

Enfin, pour se prononcer sur le caractère de l'évolution du niveau statique de l'aquifère, représenté par la chronique piézométrique, et qui est marqué par un état de tendance a la baisse, a notre avis, cette situation est généralisée a tout le système.

Plusieurs indices témoignent de cette situation, nous citerons le quasi tarissement de la source de Ain babouche, et l'assèchement des puits de la nappe de couverture (Plio-quaternaire).

Les chroniques piézométriques au niveau du deuxième secteur d'observation (Douamis, 02 forages), du 13/05/2011 au 13/05/2012, présentent la même tendance que celle du premier point (Fig. 31), l'observation de ces deux chroniques fait ressortir ce qui suit :



**Figure 31: Chronique piézométrique des forages amont « Douamis » (2011/2012)**

- les premiers niveaux pour les deux puits démarrent d'une profondeur respective de 39.5 m et 41 m de profondeur pour entamer une lente descente plus ou moins régulière sur la période d'observation.

- A partir du mois d'août (pt 4), la pente de la courbe semble s'accroître, jusqu'au mois de novembre, où la courbe continue à descendre mais de manière moins importante jusqu'au mois de janvier (pt 10) avec une légère stabilisation du niveau.

- Pour résumer l'évolution de ces chroniques, trois phases principales marquent leur évolution, du mois de mai jusqu'à août, d'août jusqu'à janvier et enfin une dernière phase, de janvier à février pour un des forages.

- La première phase, du mois de mai jusqu'à août, la courbe est marquée par une pente modérée, et de légères fluctuations qui seraient dues à notre avis aux effets retardés de quelques épisodes de pluies et aux effets du pompage et de l'irrigation.

- La deuxième phase (août-Septembre), la pente s'accroît et marque une baisse de plus de trois mètres (41 à 44 m) de profondeur, cela marque l'effet de la période d'été (pas de recharge) conjugué à l'effet du pompage en agriculture.

- A partir du mois d'octobre qui marque la troisième phase, la baisse du niveau est atténuée et moins accentuée que la phase précédente, peut

être expliquée par l'effet contraire des deux facteurs précités, à savoir la recharge (reprise) et l'atténuation du pompage pour les besoins agricoles.

Notons enfin que l'allure globale est semblable pour les deux forages suivis.

#### *5.2.2.2. Chronique des fluctuations de la nappe*

En complément aux chroniques piézométriques, l'étude par le suivi des variations de niveau de la nappe que l'on appelle les fluctuations (battements), peut être d'un apport intéressant dans la compréhension des réactions de la nappe de l'aquifère karstique, aux facteurs impactant tels que le climat et l'exploitation. Ces deux facteurs ont deux effets opposés, l'un (le climat) contribuant à la recharge par les apports en précipitation et l'autre (exploitation) ayant un effet d'abaissement par la ponction sur la ressource.

Dans notre cas, nous avons pris les données relatives à une période qui s'étend de l'année 1993 à celle de 2005. Dans le tableau ci-dessous nous résumons les résultats obtenus.

Les valeurs représentées sur le tableau 11 ci-dessous ont été collectées à partir de différentes campagnes effectuées. Le pas de temps entre chaque mesure n'est pas régulier et constant, mais cela n'empêche pas leur utilisation pour une vision de l'évolution du niveau de la nappe sur cette période. Le graphique ci-dessous, représente la courbe de la chronique piézométrique sur la période en question (Fig. 32).

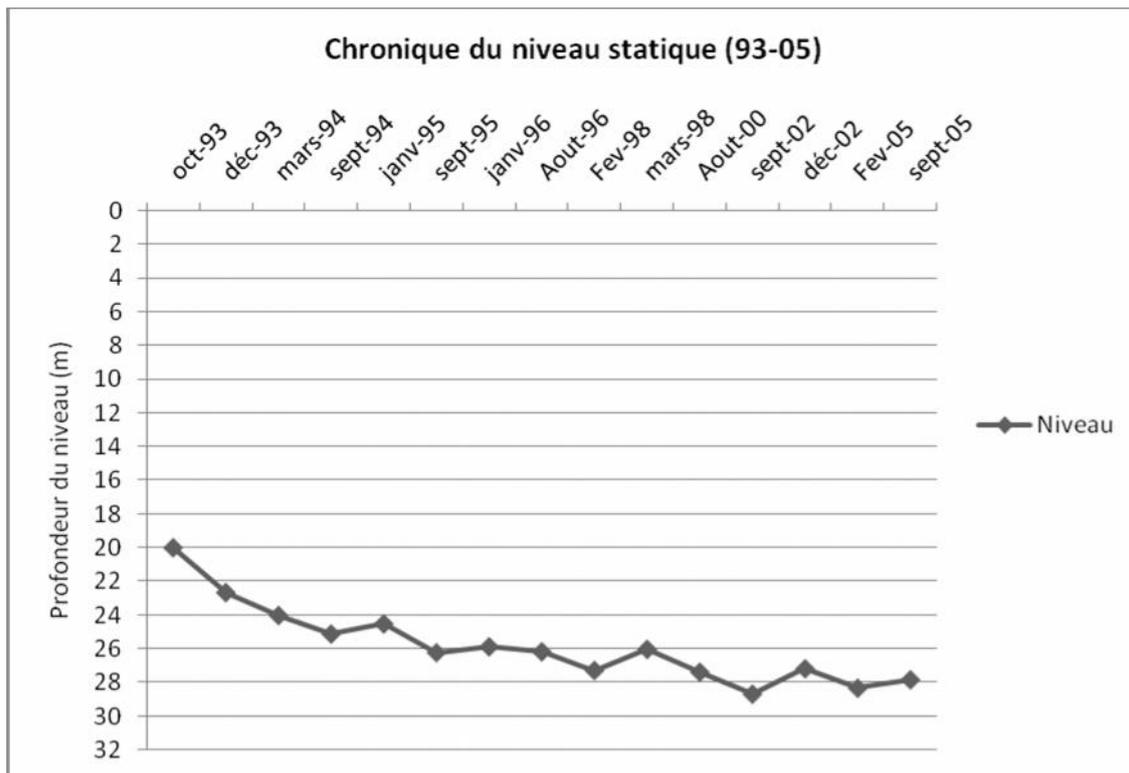
L'observation de cette chronique laisse apparaître du début à la fin de la période d'observation une baisse progressive du niveau statique. Cependant cette chronique est marquée par des passages de remontée du niveau, ce qui est typique du phénomène de la fluctuation.

**Tableau 11: Chronique piézométrique et fluctuation (1993/2005)**

Date de mesure	Profondeur. niveau statique (m)	Fluctuation (m)
Octobre 1993	20.00	02.65
Décembre 1993	22.65	
Mars 1994	24.00	01.10
Septembre 1994	25.10	
Janvier 1995	24.50	01.70
Septembre 1995	26.20	
Janvier 1996	25.85	00.30
Aout 1996	26.15	
Février 1998	27.25	00.75
Mars 1998	26.00	
Aout 2000	27.35	?
Septembre 2002	28.65	01.50
Décembre 2002	27.15	
Février 2005	28.30	00.50
Septembre 2005	27.80	

Pour ce qui est de la fluctuation, représentée sur la figure ci-dessous, elle varie dans une fourchette qui va de 0.30 m a 2.65 m, cela dépend des périodes.

Un meilleur suivi de la piézométrie, aurait permis de mieux visualiser la variabilité de la fluctuation et mieux cerner l'effet des facteurs impactants.

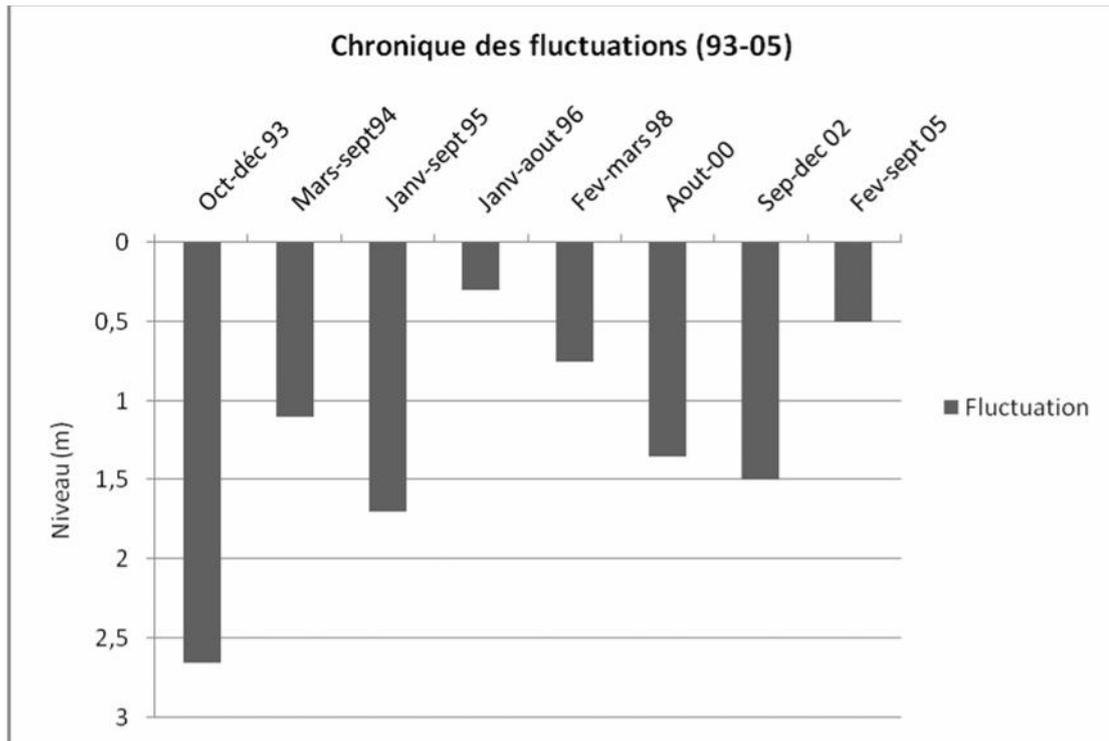


**Figure 32: Chronique piézométrique (1993-2005)**

La baisse globale du niveau de cette nappe ne peut être attribuée à l'impact de la variabilité climatique uniquement, en effet sur la base de la chronique des précipitations, les années excédentaires permettent d'équilibrer la tendance à la baisse, même si cela reste insuffisant, cependant l'impact du facteur anthropique représenté par une exploitation qui au fur et à mesure augmente annuellement, conséquence de l'augmentation des besoins en eau d'une population croissante. Contrairement à la variabilité climatique, qui elle peut avoir un impact positif sur l'amélioration du niveau de la nappe par effet de recharge au cours des années dites « excédentaires », l'exploitation elle, va en augmentant au cours du temps par augmentation du nombre de forages sur le plateau.

Sur le graphique de la fluctuation (Fig. 33), les périodes où la fluctuation est atténuée correspond en réalité à des années de bonne recharge. En effet l'exploitation étant sans cesse en augmentation et cela par la multiplication du nombre de forages dans les calcaires éocènes, l'impact se traduit par une accentuation de la baisse du niveau de la nappe, baisse compensée partiellement par la recharge annuelle et aggravée par les années de déficit.

Dans les tableaux ci-dessous, nous représentons les forages réalisés dans les calcaires éocènes avec leurs caractéristiques, cependant ce sont des forages réalisés par l'état, le nombre (une vingtaine) depuis a augmenté et notamment par les forages privés et illicites. Les forages réalisés par l'état l'ont été sous une mission Russe et le reste par la direction des ressources hydriques (D.R.H). Leur réalisation a eu lieu durant la décennie 1970/1980.



**Figure 33: Chronique des fluctuations (1993-2005)**

**Tableau 12: (a) Caractéristiques des forages**

Forages	508	508	510	511	512	513	514
Prof. Totale (m)	64	51	29	34	30.5	30	32
Prof. Du toit (m)	01	00	02	02.5	00.5	00	03.5
Niveau statique(m)	05	01.5	01.40	01.85	01.5	05.0	06.0
<b>Rabatement moyen (m)</b>	<b>01.5</b>						

**Tableau 13: (b) Caractéristiques des forages**

<b>Forages</b>	<b>516</b>	<b>517</b>	<b>523</b>	<b>524</b>	<b>527</b>	<b>536</b>	<b>537</b>
Prof. Totale (m)	20	20	100	317	121	230	250
Prof. Du toit (m)	01.2	01.00	80	80	06.2	37.5	64
Niveau statique(m)	03.5	01.5	14,30	06.0	Artésien	25	26.5
<b>Rabattement moyen (m)</b>	<b>De 0.85 à 40</b>						

Comme nous pouvons le constater sur les deux tableaux ci-dessus (Tab. 12 et 13), les forages réalisés dans les formations carbonatées éocènes, ont rencontré un niveau statique relativement peu profond, voir même artésien (forage 527), de plus les débits obtenus sur ces forages sont appréciables pour des rabattements parfois très faibles.

Depuis et sur les dernières années une bonne partie de ces forages ont vu leur débit décroître et dont la moitié est à l'état sec actuellement, par baisse du niveau statique de la nappe, conséquence d'une pluviométrie et donc d'une recharge très variable et en décroissance certes, mais aussi en raison d'une multiplication incontrôlée du nombre de forages dans le secteur.

### 5.2.3. Etude des chroniques conjuguées

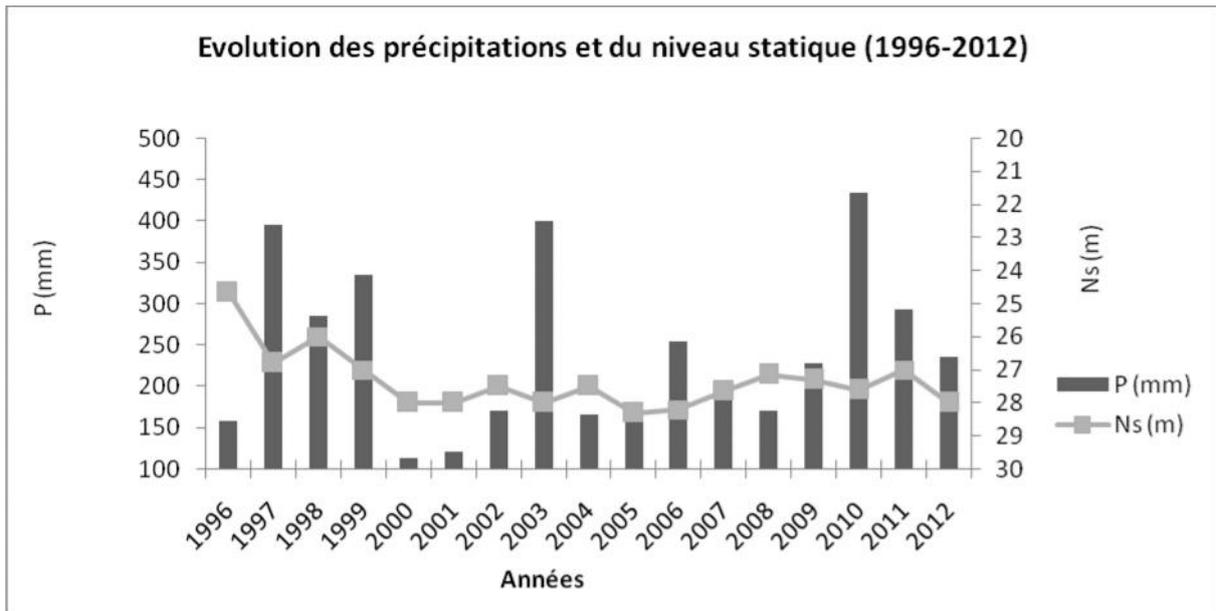
A travers l'étude des chroniques des isolées de certains paramètres, on voulait présenter les facteurs impactant sur l'aquifère étudié, afin de mieux caractériser son mode d'écoulement et son état quantitatif et qualitatif.

Pour une meilleure compréhension et une synthèse plus objective, l'étude de l'évolution des chroniques conjuguées des paramètres dits « impactant », se présente comme une bonne démarche. Comme il a été souligné ci-dessus, les facteurs impactant sont d'ordre climatique (P) et anthropique ( $Q_{exp}$ ). La conséquence se faisant ressentir sur l'aspect hydrologique ( $N_s$ ).

#### 5.2.3.1. Chronique conjuguée

a) *Précipitations et niveau statique.*

La représentation sur un même graphique des deux paramètres des précipitations et du niveau statique permet de mieux visualiser le mode de leur évolution ainsi que la nature de la relation entre ces deux paramètres (Fig. 34).

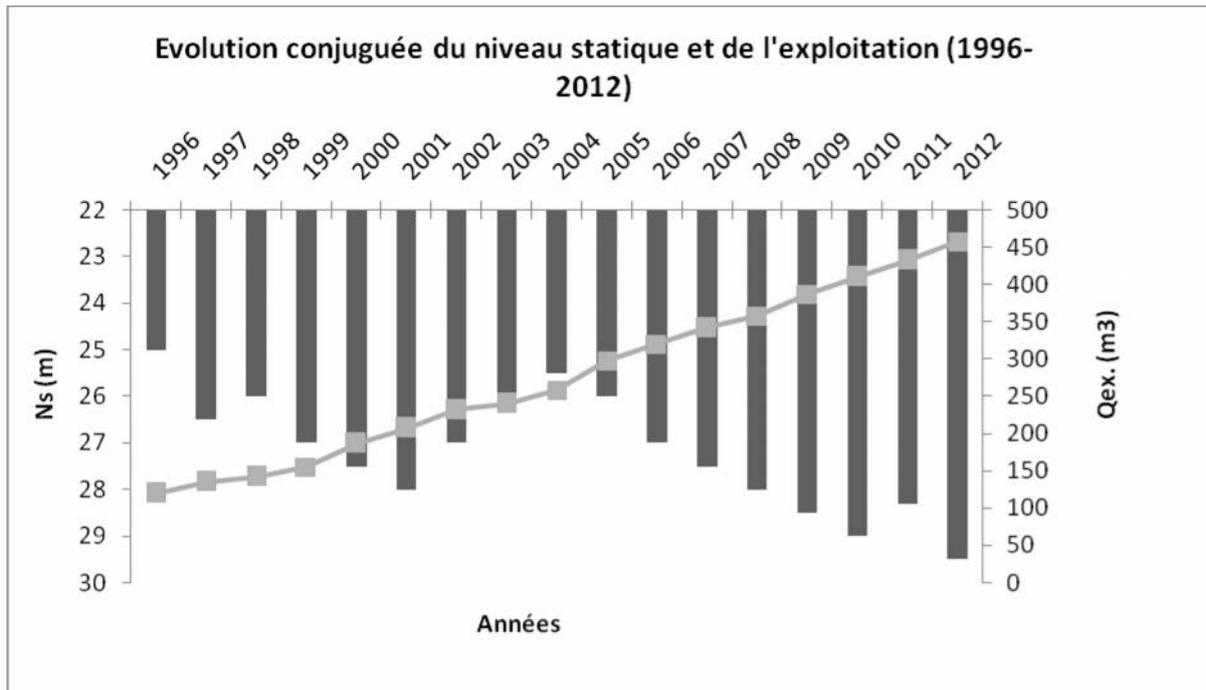


**Figure 34: Graphique de l'évolution conjuguée de P et Ns.**

Le graphique ci-dessus laisse apparaître une certaine variabilité des deux paramètres. Le niveau statique marque une tendance généralisée à la baisse et réagit de manière assez irrégulière aux effets de la recharge, qui elle-même est marquée par une irrégularité sur la période d'observation.

b) *Niveau statique et exploitation*

L'effet de l'exploitation sur l'évolution de la ressource en eau n'est pas à démontrer et a un impact important sur l'évolution du niveau statique, raison pour laquelle il est utile d'étudier la comparaison de ces deux paramètres. La figure 35 représente l'évolution de ces deux paramètres.

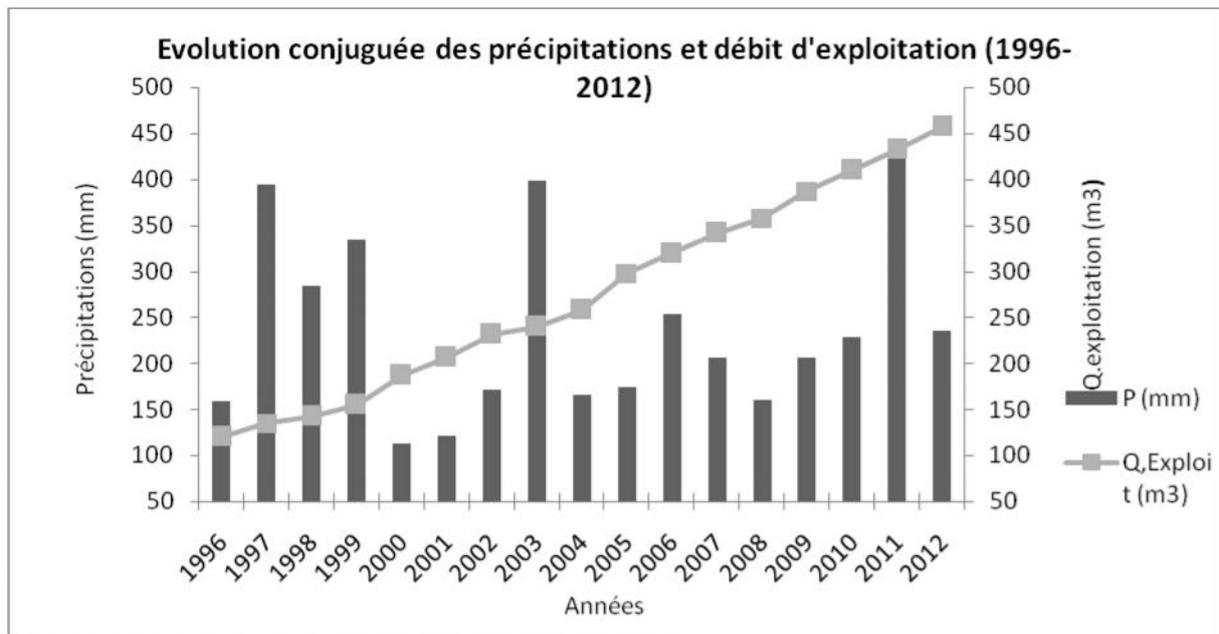


**Figure 35: Graphique de l'évolution conjuguée de Q et Ns**

A partir du graphique nous constatons une croissance de l'exploitation assez régulière conséquence d'une demande anthropique en nette évolution. Le niveau statique lui décroît de manière assez irrégulière.

*c) Précipitations et débit d'exploitation*

Ce sont les deux facteurs dont l'intensité a des effets opposés sur l'évolution de la ressource de l'aquifère. La représentation simultanée de l'évolution de ces deux paramètres (Fig. 36), est intéressante dans la mesure où elle permet de mieux comprendre la réaction de l'aquifère (fluctuation du niveau statique).



**Figure 36: Graphique de l'évolution conjuguée de P et Q<sub>exp</sub>**

Le débit d'exploitation est marquée par une croissance constante, alors que les précipitations comme il a été signalé plus haut, sont marquée par une variabilité.

#### 5.2.3.2. Chronique hydrochimique

Si l'étude hydrodynamique apporte des informations sur les transferts, l'analyse ou l'étude de l'aspect géochimique apporte des informations sur l'acquisition de la charge dissoute et son transit dans le karst, la géochimie nous renseigne également sur le fonctionnement et la nature des eaux de l'aquifère (Lepiller, M. 1980 et 2008).

Dans cette optique, la concentration de certains ions majeurs a été mesurée au niveau du point d'observation et de suivi à l'exutoire à défaut de le faire à la source. Ce suivi a été mené au même pas de temps que pour la piézométrie.

Notre approche est basée sur les chroniques de certains éléments majeurs (Ca, Mg et NO<sub>3</sub>) ainsi que les paramètres physiques tels que la température, la conductivité, le TDS.

Cette démarche constitue un complément à l'analyse précédente et apporte des éléments importants quant à la cinétique chimique et l'acquisition de la charge dissoute dans le karst.

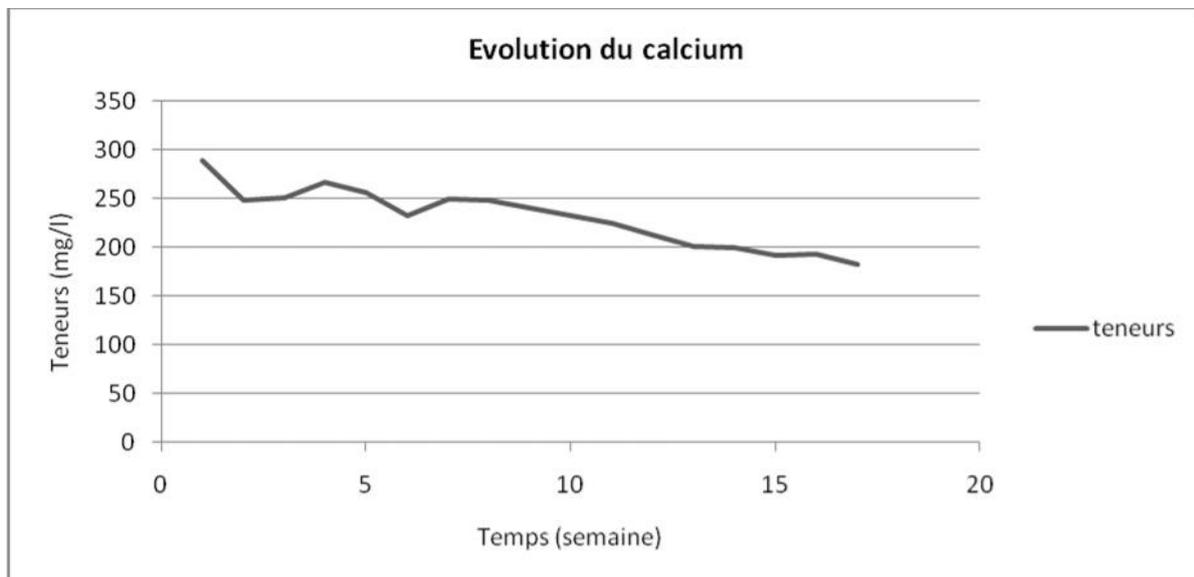
Nous n'avons pas procédé à une analyse statistique des données, en raison du faible nombre d'échantillons et donc éviter toute interprétation statistique erronée.

Les éléments majeurs (Ca, Mg et  $\text{NO}_3$ ) mesurés ont vu leurs résultats représentés sur des graphes, l'observation de ces différents graphes nous a permis de soulever ce qui suit :

- L'ion  $\text{Ca}^{2+}$

L'analyse de la chronique de l'ion  $\text{Ca}^{2+}$ , montre des valeurs globales de concentrations de cet élément dans les eaux prélevées au cours de la période d'observation (Fig. 37), qui varient dans une gamme de 200 à 300 mg/l. Ces teneurs sont tout à fait logiques en raison de la nature carbonatée du réservoir. La courbe laisse apparaître une tendance à la baisse.

La production de cet élément est la conséquence de l'attaque de la roche par les eaux d'infiltration, cette attaque est favorisée par une forte teneur en  $\text{CO}_2$ , due au transit des eaux infiltrées par la couverture végétale (sol).



**Figure 37: Courbe de l'évolution du calcium**

- L'ion  $\text{Mg}^{2+}$

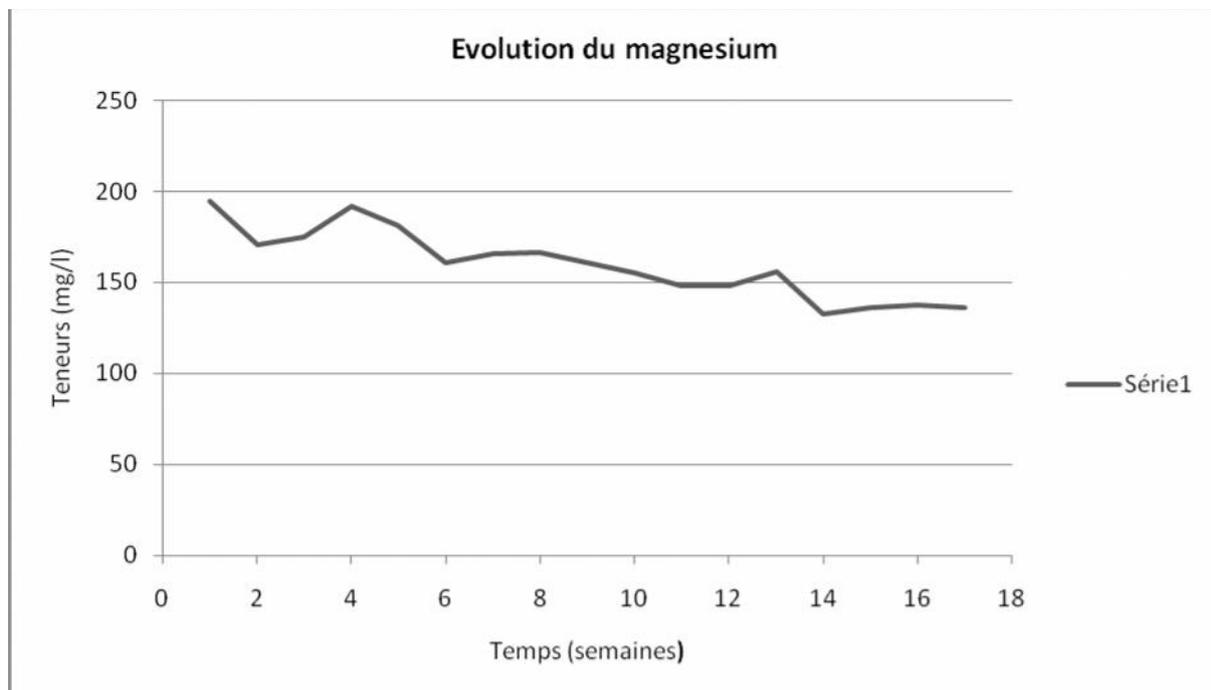
Pour ce qui est du Magnésium (Mg), cet élément n'est pas aussi présent dans les formations calcaires comme le calcium (Ca) et existe donc

en proportions modestes dans les calcaires Eocènes. Cependant le magnésium (Fig. 38) est considéré comme un traceur naturel important dans les eaux de ce type, En effet la présence du magnésium dans les eaux karstique a toujours une origine interne au système (Valérie Plagnes. 1997), il est donc considéré comme un bon indicateur du séjour des eaux dans la le réservoir, ce qui justifie notre choix pour cet élément.

Selon Emblanch (1997), le magnésium est caractérisé par une longue cinétique de mise en solution et ne se manifeste donc qu'après un long contact des eaux avec la roche encaissante, en effet plus l'eau séjourne dans un réservoir, plus elle se charge en magnésium.

Le temps de séjour de l'eau au sein d'un réservoir géologique carbonaté, peut être apprécié à partir du rapport Mg/Ca.

Le graphique obtenu pour cet élément seul (Fig. 38), montre des teneurs en magnésium qui varient de 120 à 200 mg/l. La courbe accuse une légère tendance à la baisse.



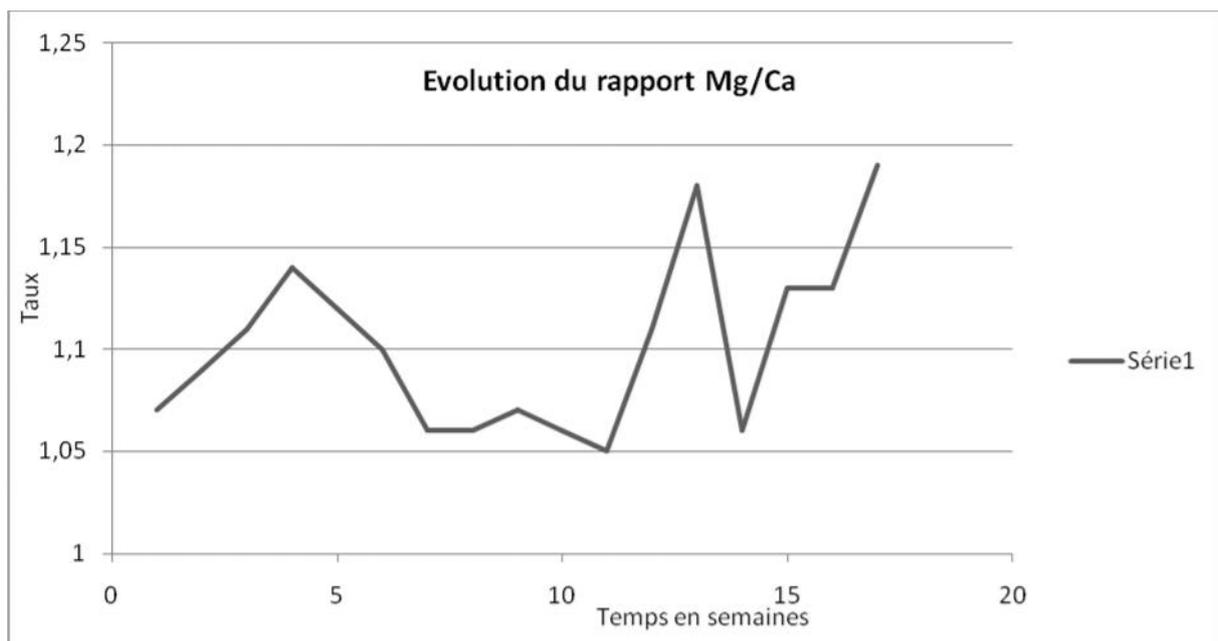
**Figure 38: Courbe de l'évolution du magnésium**

Plus des  $\frac{3}{4}$  des échantillons ont montré des valeurs supérieures à 150 mg/l ce qui est assez considérables pour ces eaux et donc ce qui marque bien leur caractère temporel assez prolongé au contact de la roche encaissante et résultant d'un écoulement lent. Des eaux relativement récentes donneraient des valeurs moindres.

La faible tendance à la baisse, peut être expliquée par la perturbation que peut causer le pompage sur l'hydrodynamique de ces eaux ou l'effet de la recharge retardée même si elle reste faible.

L'étude du rapport Mg/Ca (en meq/l), constitue un bon outil d'évaluation du critère temporel des eaux de l'aquifère, plus ce rapport est proche de l'unité, plus il indique une eau chargée en magnésium issue d'un séjour assez prolongé des eaux au contact de la roche réservoir (V.Plagnes, 1997).

Sur la figure 39, nous remarquons que la courbe évolue dans un intervalle entre 1 et 1.25, ceci indique bien des eaux fortement chargées en magnésium, conséquence d'un long contact avec la roche et absence d'une quelconque recharge des précipitations, ou très faible recharge sans un impact réel.



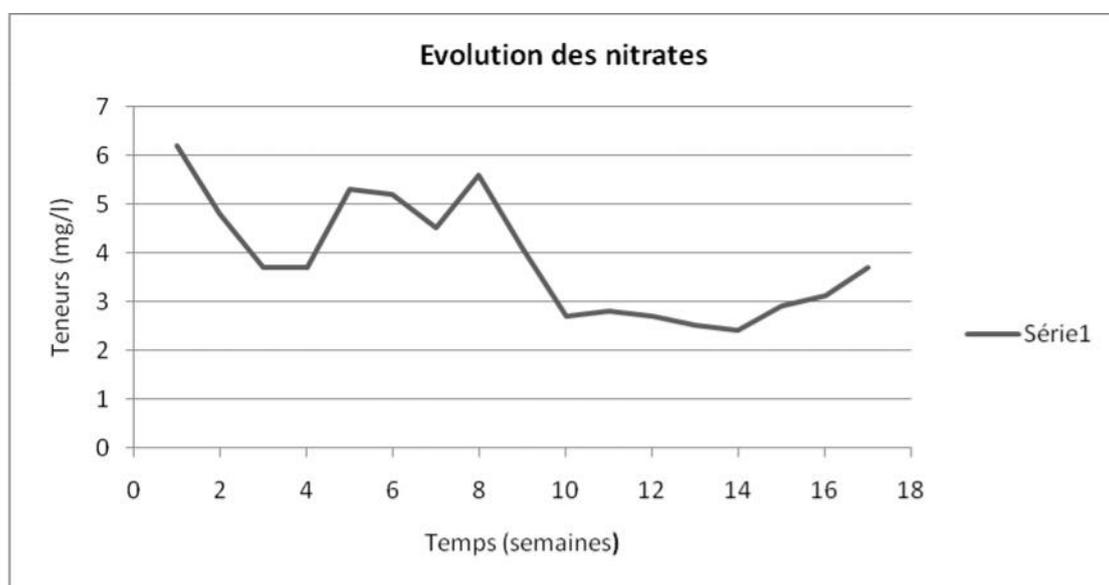
**Figure 39: Courbe de l'évolution du rapport Mg/Ca**

• L'ion  $NO_3$

Les concentrations en nitrates ( $NO_3$ ), à partir de l'observation de la courbe de leur évolution (Fig.40) montre des teneurs qui s'inscrivent dans un intervalle de 2,5 jusqu'à 7 mg/l, ces valeurs restent très modestes et soulignent l'absence d'une quelconque pollution ou impact anthropique.

Par rapport à notre problématique, nous pouvons aussi dire à partir de ces valeurs, que c'est l'indication de l'absence d'une quelconque eau récente d'infiltration émanant d'une quelconque recharge et que cela souligne bien le caractère ancien et un séjour assez long de ces eaux karstiques.

Des eaux fraîchement infiltrées sont en général, assez riches en nitrates. De plus les faibles valeurs des concentrations en nitrates des eaux de l'aquifère Eocène, peuvent être justifiées par le processus de dénitrification que subissent en général les eaux souterraines assez profondes ou d'un séjour assez prolongé sans aucun impact des eaux issues de la recharge et donc d'un apport des précipitations.



**Figure 40: Courbe de l'évolution des nitrates**

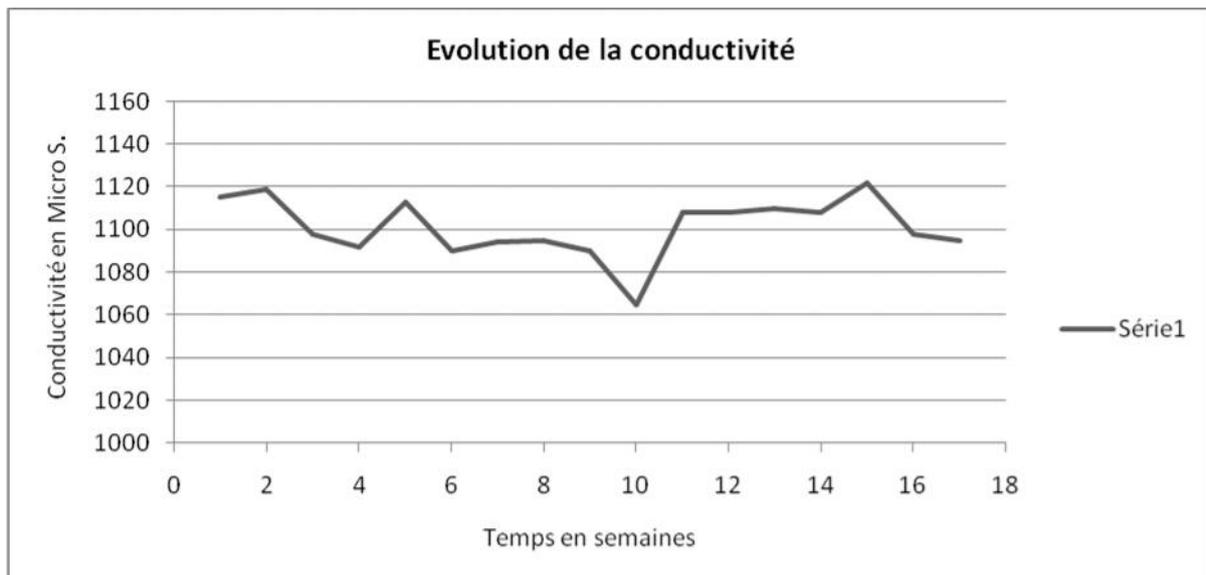
- Les paramètres physiques (TDS, conductivité et  $T^\circ$ ), ces éléments mesurés in situ, sont tout aussi intéressants que les précédents dans l'approche de caractérisation des eaux karstiques de cet aquifère. Comme pour les autres éléments, des courbes d'évolution ont été établies pour essayer de mieux comprendre la nature des eaux du réservoir.

- Le TDS, qui représente la totalité des sels dissous dans l'eau, les valeurs déterminées restent inférieures à 640 mg/l, ce qui est acceptable d'un point de vue qualitatif. Les fluctuations sont modérées, les pics de la courbe pourraient être attribués à des effets de recharge (faible) ou aux effets du pompage.

- La salinité, a été pratiquement stable dans ses valeurs durant l'ensemble des campagnes de prélèvement, avec une valeur autour de 0.4

g/l, avec une faible fluctuation, ce qui est dans la norme. Ceci témoigne aussi de l'absence d'un bouleversement hydrodynamique (impact d'une forte recharge), entraînant une modification conséquente des valeurs de salinité. De plus les apports en chlorures entraînés par les infiltrations à partir de la couverture auraient modifié les valeurs de la salinité, ce qui n'est pas le cas pour les eaux étudiées, un argument donc de plus sur l'absence d'une recharge conséquente.

- La conductivité (Fig. 41), dans le cas des eaux du type karstique, est tributaire de la concentration de l'ion  $\text{HCO}_3$  et avec lequel elle présente souvent de bonnes corrélations. Les valeurs renseignent un peu sur le degré de l'exportation carbonatée. Ces valeurs varient entre 1090 et 1120  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , mis à part une chute ponctuelle à 1030  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .



**Figure 41: Courbe de l'évolution des conductivités**

- La température (T), est un facteur important dans les phénomènes hydroclimatiques, et il est un bon indicateur dans la caractérisation des eaux souterraines et particulièrement karstiques. Dans notre démarche, nous avons choisi d'étudier ce paramètre par un suivi en parallèle aux autres paramètres afin de mieux corréler les valeurs obtenues avec le reste en vue de consolider notre hypothèse quant à la caractérisation des eaux de cet aquifère.

En général des eaux de recharge dans un système aquifère sont caractérisées par des températures relativement fraîches et dépassent rarement les 12 °C. Celles que nous avons mesurées s'échelonnent entre 12 et 21 °C. Une arrivée d'eau de la recharge (précipitations) aurait pour effet de chasser les eaux ayant séjourné plus longtemps dans le réseau karstique (Guyot, 1980). Ceci, aurait été marqué sur la chronique des températures par des pics de la courbe (variation brutale de la température), c'est un argument en faveur de l'ancienneté des eaux étudiées et de leur niveau profond, le forage ayant une profondeur de plus de 92 mètres, le gradient géothermique peut être un argument en faveur de cette hypothèse.

La prise en considération de tous les résultats présentés ci-dessus, laisse apparaître une convergence vers un fonctionnement hydrodynamique de l'aquifère faisant ressortir le rôle capacitif de l'aquifère.

Sans perdre de vue l'objectif de notre étude et qui est l'effet de la variabilité climatique sur la ressource de l'aquifère en question, en d'autres termes, l'évolution de la recharge qui est tributaire des conditions climatiques. Pour cela, l'observation est le suivi sur deux périodes d'observation (2011/2012 et 2012/2013) a permis de visualiser l'évolution de la ressource à travers la variabilité du niveau d'eau de la nappe, couplée à l'évolution hydrochimique.

D'un point de vue climatique, la nette diminution de la quantité des précipitations lors des dernières décennies, marquée également par des périodes de sécheresse avec élévation de la température ont eu indéniablement un effet aggravant sur le déficit et par voie de conséquence, cela a entraîné une baisse progressive du niveau de la nappe, aggravé par une ponction croissante.

A cela nous ajouterons un autre paramètre tout aussi important en matière d'impact sur la ressource et qui est lui-même lié à l'évolution climatique, c'est le facteur anthropique, qui comme dans toutes les régions a son effet sur la ressource (prélèvements pour les différents besoins), cela se traduit par une augmentation des débits prélevés. Cette situation devient contraignante, dans un contexte d'évolution climatique défavorable. Dans la région de Chéria, cette situation est plus accentuée (impact anthropique), en raison d'un changement et une réorientation de l'activité agricole, une activité consommatrice d'eau (irrigation).

### 5.3. Approche sur le mode des écoulements de l'aquifère

La démarche que nous avons adoptée dans l'étude des eaux de cet aquifère, à travers son état et l'évolution de cet état, en utilisant la méthode fonctionnelle. Cette méthode nous semble la plus appropriée pour ausculter et identifier le mode hydrodynamique de l'aquifère étudié, en raison de la spécificité de ce type de réservoir. Cette démarche nous permet sur la base de tous les résultats obtenus de préciser ce qui suit :

- Aussi bien sur les chroniques piézométriques que sur celle des paramètres chimiques, nous ne constatons pas de variation brutale indiquant un bouleversement dans la circulation des eaux, cela par l'absence de pics sur la courbe.

- En prenant en considération également les paramètres climatiques sur les deux périodes de suivi en deux secteurs différents et particulièrement le paramètre de recharge (les précipitations), on peut se prononcer sur le mode d'écoulement de cet aquifère, qui apparaît comme un écoulement lent avec une faible inertie au niveau de la zone noyée qui nous semble assez profonde et dont la karstification ne serait pas très développée.

- L'impact de la recharge ne se fait pas ressentir de manière rapide sur les chroniques piézométriques, en dépit des épisodes pluvieux et parfois neigeux au cours de la période d'observation, ceci témoigne d'une infiltration lente à travers l'épikarst (rôle de régulation), de nature plutôt diffuse.

L'existence d'alimentation directe par perte (infiltration rapide) à partir de la surface, court circuitant l'épikarst, nous semble peut probable.

Cela ne peut que renforcer notre hypothèse quant à un écoulement à temps et à séjours relativement lent.

## **6. Cas de la source de Bouakous**

Nous avons jugé utile de présenter le cas de cette source dans notre travail en raison d'un certain nombre de points qui sont les suivants :

- localisation du site de la source, faisant partie du grand système karstique formé par le complexe Maestrichtien –Eocène.

- Importance de la source

- Etude de la source dans le cadre d'un programme de coopération interuniversitaire sur une durée de 03 années.

Située plus au Nord de la localité de Chéria, elle fait partie du versant opposé au plateau et se distingue de celui-ci par une ligne de partage des eaux d'écoulement du système aquifère (Fig. 26). De plus, la zone d'alimentation de cette émergence est soumise aux mêmes conditions climatiques que la région de Chéria, d'où notre intérêt pour la comparaison.

Dans cette optique, nous présentons la chronique des hauteurs d'eau enregistrés au niveau du lac souterrain dans la grotte (Fig. 42), cet enregistrement a été possible grâce à une sonde de mesure de la variation du niveau de l'eau. L'étude de cette chronique est faite dans un but comparatif avec celles de l'aquifère de l'Eocène du plateau de Chéria, d'autre part afin d'avoir une vision sur le fonctionnement du karst de Youkous.

#### 6.1. Chronique du niveau du lac (Zerrouki, H., 2013)

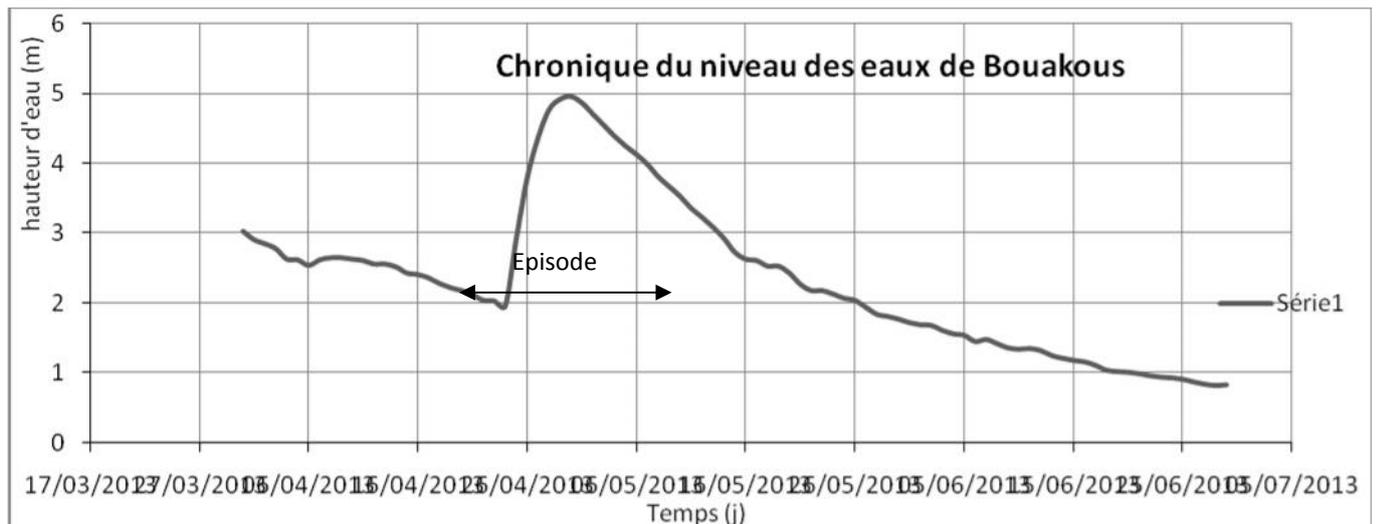
L'observation de la courbe obtenue (Fig. 42) représentant la chronique au pas de temps quotidien de la variation du niveau du plan d'eau du lac de la grotte, fait ressortir trois parties bien distinctes. Cette chronique a débuté au 30/04/2013.

- A cette date, le niveau était situé à une hauteur de 3.03 m, pour entamer une lente descente jusqu'au 24/04/2013.

- A partir de cette période, on entame la deuxième partie de la courbe qui est marquée par une brutale remontée du niveau de l'eau, atteignant un pic de 4.96 m, au 30/04/2013.

- Au-delà de cette date, la courbe reprend sa descente, aussi vite que l'a été la montée, cela jusqu'à la date du 16/05/2013.

- Cette dernière date marque la progression de la décroissance de la courbe faisant ressortir la poursuite de la baisse du niveau de l'eau avec le même rythme qu'au début de la chronique, cela jusqu'au 30/06/2013.



**Figure 42: Chronique du niveau des eaux de Bouakous**

En résumé, l'allure totale de la courbe est marquée par deux modes d'évolution. Un marquant le début et la fin de la chronique, séparé par un deuxième au milieu de la période relevée.

-Le premier mode correspond d'un point de vue interprétatif, à un drainage régulier de la réserve sans effet remarquable de la recharge. Cela met en relief le rôle capacitif de l'aquifère.

- Le deuxième mode (du 26/04/ au 16/05/2013), indique un épisode particulier dans la chronique, il s'agit en effet d'un bouleversement hydrodynamique marqué par une brusque remontée du niveau, résultat d'un impact rapide de la recharge dû à une période pluvieuse de nature orageuse. Au cours de cet épisode, nous pouvons souligner le rôle transmissif du réservoir.

Par comparaison à la chronique du forage aval du plateau de Chéria, nous pouvons dire que le même mode d'évolution de la chronique caractérise ce secteur et qu'à la même période l'événement de l'épisode du bouleversement se retrouve sur cette chronique et presque à la même période (Avril 2013), avec cependant une intensité moins marquée.

## 6.2. Aspect hydrochimique

Dans la présentation du cas de cette source par rapport à notre point d'observation, nous avons jugé utile, en plus de sa chronique du niveau, d'aborder l'aspect chimique, un deuxième outil intéressant dans la

caractérisation de ces eaux d'un point de vue de transit et d'échange avec la roche encaissante et donc le séjour de ces eaux.

Les données des analyses chimiques des eaux de la source (Zerrouki, H., 2013) présentent des valeurs relativement modérées (Tab. 14).

**Tableau 14: Analyse chimique des eaux de la source  
(Zerrouki, H., 2013)**

Eléments	Ca	Mg	Na	HCO <sub>3</sub>	Cl	SO <sub>4</sub>
Teneurs (moyenne) (mg/l)	82.3	29.5	13.9	277	32.4	37.6

En comparaison avec les données des valeurs du point d'observation sur le plateau de Chéria (à l'exutoire), nous pouvons remarquer un certain écart entre ces deux sites. Contrairement aux valeurs de notre point d'observation, les faibles teneurs des eaux de la source témoignent d'un contact assez court avec le réservoir carbonaté (Ca, Mg et HCO<sub>3</sub>) et donc d'un transit assez rapide. Cela nous permet de dire que l'écoulement à partir de la zone de recharge est assez rapide ainsi que le transfert, ceci peut être justifié soit par un réseau assez développé ou la présence de la faille à ce niveau (reculée).

Dans ce cas là, l'impact des effets de la variabilité de la recharge (climatique) est plus ressenti en raison du mode rapide des fluctuations de cette réserve.

## **7. Conclusion**

Après avoir abordé en premier, au cours de ce chapitre, une présentation et un descriptif du système aquifère de la région étudié avec en rappel, les apports des investigations émanant des études précédentes et

sans perdre de vue l'objectif de notre étude, nous avons mis en relief les approches possibles utilisées dans les études des systèmes karstiques.

En justifiant le choix de l'approche que nous avons adopté, c'est-à-dire l'approche fonctionnelle, notre but était à travers la caractérisation des eaux de l'aquifère, faire ressortir la relation de ce dernier avec la recharge et donc l'impact des effets climatiques (précipitations et déficit).

Partant du fait que toute recharge (infiltration), a son impact sur les écoulements et l'hydrochimie de l'aquifère, l'exploration des paramètres géochimiques et hydrodynamique était le seul outil à notre disposition pour 'mettre sous écoute' l'aquifère.

Enfin, l'observation de tous les résultats des mesures et analyses issues de l'investigation, laisse apparaître une convergence vers un état des eaux de l'aquifère caractérisé par un contact assez prolongé des eaux avec la matrice carbonatée et donc un séjour relativement lent et une cinétique des écoulements issus de la zone épikarstique avec probablement un effet retardé, d'où l'absence d'impact rapide de l'effet de la recharge (précipitations).

La comparaison des résultats de l'étude de notre site, avec l'émergence de Bouakous du système Maestrichtien, est abordée ici par souci de confirmation des hypothèses apportées dans le cas de l'aquifère Eocène. En effet l'émergence de Bouakous semble réagir de manière plus accélérée à la l'impulsion (recharge), ceci est consolidé par les teneurs des éléments chimiques (Ca et Mg) qui sont relativement faibles conséquence d'un transit rapide des eaux, comparativement à celles de l'aquifère Eocène du plateau de Chéria qui elles sont nettement plus élevées.

.

# **CHAPITRE VI**

## **ASPECT GÉOTECHNIQUE ET ENVIRONNEMENTAL**

### **VI. ASPECT GÉOTECHNIQUE ET ENVIRONNEMENTAL**

#### **1. Introduction**

Nous ne pouvions clôturer cette étude sans aborder cet aspect de la question, qui nous pensons ne peut être dissocié de l'impact des situations climatiques et leur variabilité.

Au cours de nos différentes sorties sur le site d'étude, nous avons pu remarquer une morphologie karstique, se manifestant par des affaissements de forme circulaire et elliptique, de diamètre plus ou moins important.

En raison du lien direct de ces formes avec la nature karstique du terrain et le rapport avec l'écoulement des eaux de surface infiltrées et enfin le danger que représente ces phénomènes dans la zone urbaine, nous avons jugé utile d'aborder cet aspect dans notre étude, aussi bien d'un point de vue géotechnique pour en expliquer le mécanisme, et d'un point de vue environnemental et l'impact de telles structures sur la vulnérabilité de l'aquifère.

## **2. Aspect géotechnique**

### 2.1. Morphologie karstique

Le karst peut être défini, comme un type particulier de morphologie. Le paysage du karst résulte des écoulements souterrains particuliers qui se mettent en place progressivement dans les roches carbonatées (calcaires et dolomies) et dans les roches salines (gypse et parfois sel gemme). Le karst est donc également un aquifère puisque l'eau souterraine est totalement impliquée dans sa formation et dans son fonctionnement. Ainsi, le karst est constitué par un ensemble de formes souterraines et de surface et de conditions d'écoulements souterrains, qui interagissent les unes sur les autres.

Ces affaissements et effondrement sont appelés dolines (sinkholes), elles sont visibles en surface, mais sont en réalité la conséquence d'un lent processus de dissolution dans le substratum carbonaté en profondeur. Le principal agent de dissolution est l'eau d'infiltration chargée de CO<sub>2</sub> de la couverture.

### 2.2. Dolines

Les dolines sont donc des trous (dépressions de la surface du sol), qui ont souvent une forme circulaire avec un diamètre souvent plus important que la profondeur (Fig.43). Ce sont des phénomènes évolutifs allant du

simple tassement jusqu'à l'effondrement en relation bien sûr avec les vides souterrains (cavités). Les dolines sont un élément fondamental dans le karst, car sur le plan hydrologique (drainage), elles se substituent en grande partie aux vallées.



**Figure 43 : Type de doline rencontrée en région de Douamis  
(Fehdi et al., 2011)**

Deux mécanismes sont responsables de l'apparition de ce phénomène (O. Kaufmann, 2000), l'un par l'érosion chimique, la dissolution et l'autre mécanique, la résistance de la roche.

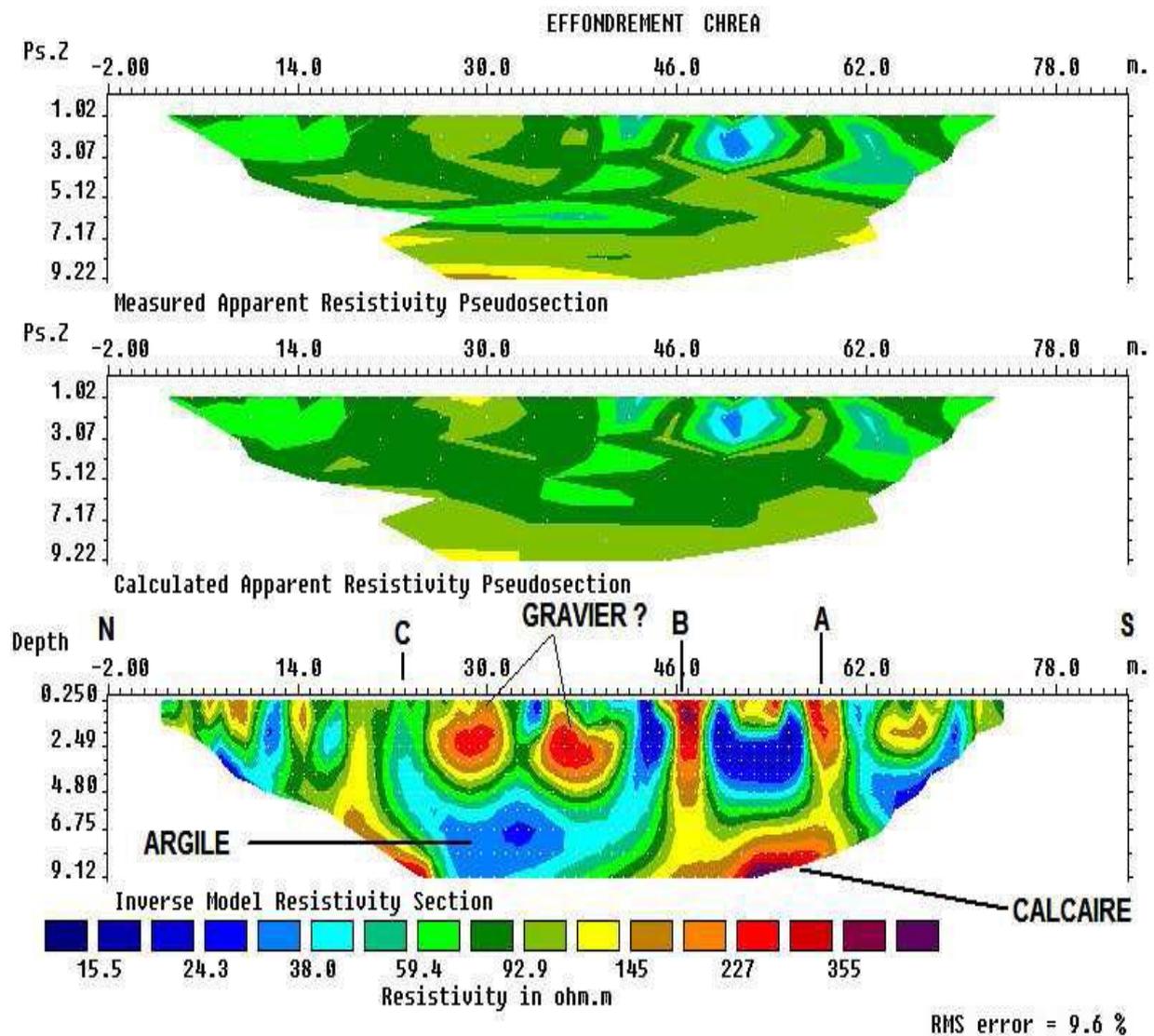
Leur genèse est la conséquence d'une infiltration le long des fissures et fentes de la roche, ces discontinuités évoluent et s'élargissent suite à une dissolution progressive de l'eau infiltrée et chargée en CO<sub>2</sub> provenant du sol. De cette évolution il s'en suit un phénomène de tassement progressif de la surface donnant une dépression fermée (J-N. Salomon, 2000).

Ce phénomène n'est pas figé dans le temps et subit une évolution qui se caractérise par une progression de la dissolution et une accumulation du matériel déposé au niveau de la dépression, ce qui va augmenter la pression de la couverture sur le toit de la cavité, jusqu'à ce qu'elle cède et entraîne ainsi un effondrement (Tab.15).

**Tableau 15: Processus d'évolution de formes karstiques**

<b>Processus</b>	<b>Instantanés ou rapides</b>	<b>Lents et rapides</b>
<i>Forme originelle</i>	<i>Doline d'effondrement et gouffre</i>	<i>Doline d'affaissement-dissolution</i>
<i>Forme originelle</i>	<i>Puits, chaudron</i>	<i>Cuvette entonnoir</i>
<i>Karst couvert</i>	<i>Doline avec suffision</i>	<i>Doline avec soutirage</i>

Leur prévention peut être envisagée à partir d'outil de prospection afin de localiser leur répartition, l'imagerie en 2D (Fig.44) par la géophysique électrique peut être un élément intéressant dans leur localisation et leur cartographie (CHALIKAKIS, K. 2006 ; FEHDI, Ch. 2010).



**Figure 44 : Profil de résistivité par tomographie (Fehdi et al., 2011)**

Nous ne nous étendrons pas longtemps sur cet aspect de l'étude, car il a fait l'objet d'un article publié dans une revue scientifique (EJGE) :

**Hocine Benhammedi, Hicham Chaffai (2015) :** *The Impact of Karsts Structures on the Urban Environment in Semi Arid Area Cheria Plateau case (Northeast of Algeria).* Electronic Journal of Geotechnical Engineering (EJGE) ISSN 1089-3032, Vol. 20 [2015], Bund. 8. pp. 2107-2114. (ScopusIndexed). <http://www.ejge.com/2015/Ppr2015.0279ma.pdf>

### 3. Aspect environnemental

Dans ce cas là, nous nous intéressons au risque que représentent ces formes karstiques (dolines) comme facteur déclenchant ou favorisant l'introduction d'un polluant à partir de la surface.

La grande vulnérabilité du karst face aux pollutions est une conséquence de sa structure hétérogène et anisotrope. Il importe donc de bien délimiter des compartiments dans l'aquifère et définir leur inertie.

On sait en effet qu'une autoépuration très limitée et variable suivant les temps de séjour de l'eau peut avoir lieu dans l'aquifère, contrairement à l'aquifère poreux où l'auto-filtration est plus efficace.

**Modes d'impact du polluant :** En raison de sa structure (verticale), l'aquifère karstique peut être le siège de deux modes d'infiltrations des eaux de surface (précipitations). Deux peuvent se présenter :

- soit une alimentation diffuse au travers de la couverture meuble ou au travers de calcaires uniformément fissurés.
- soit une infiltration directe et rapide d'écoulements concentrés dans les chenaux karstiques

Dans le premier cas, cela correspond au karst couvert en surface par des sédiments meubles avec ou sans végétation, qui jouent un rôle de filtre et un rôle régulateur, l'écoulement y est diffus et lent et ce niveau est en contact avec la zone épikarstique, réserve tampon et zone de transfert vers les niveaux profonds. Au niveau de cette zone, l'aquifère est moins vulnérable et le risque de pollution est plus faible.

Dans le deuxième cas, l'infiltration directe et rapide se fait par l'intermédiaire des structures karstiques telles que les dolines ou avens, présentées ci-dessus.

Par l'intermédiaire de ces dolines, il y a un phénomène d'absorption directe, en raison du contact direct de ces dolines avec les eaux souterraines (endokarst), sans processus de filtration. En raison de l'absence de couverture filtrante, l'accès des polluants par cette voie que constituent ces effondrements font augmenter la vulnérabilité de l'aquifère karstique.

Dans les deux, la mesure préventive à appliquer afin de minimiser l'impact de ces structures sur l'acheminement des polluants potentiels dans les eaux karstiques est la délimitation d'un périmètre destiné à protéger l'aquifère de tout rejet en surface. Ce périmètre sera élaboré à partir d'un inventaire de tous les sites et sources potentiels de pollutions (F. Bensaoula, 2006).

#### **4. Conclusion**

Que ce soit d'un point de vue géotechnique ou environnemental, nous avons jugé utile abordé cet aspect de la question dans notre étude du karst de cette région, car d'une manière directe ou indirecte, nous pensons qu'il existe un lien avec l'aspect climatique où le facteur hydrologique joue un rôle important. Même si la formation et l'évolution de ces dolines est favorisée par la lithologie et la structure, la fracturation à ses différentes échelles constitue le cheminement et voie de pénétration de l'eau dans le karst qui reste le facteur essentiel dans ce processus. Ce facteur qu'est l'eau a ainsi un double impact, l'instabilité de la structure et l'intrusion du polluant par cette même structure.

# **CONCLUSION GÉNÉRALE ET RECOMMANDATIONS**

## **1. CONCLUSION GÉNÉRALE**

L'objectif de ce travail était de mettre en relief les effets de la variabilité climatique sur la ressource en eau du plateau de Chéria et particulièrement le réservoir Eocène des calcaires karstiques. Dans ce but la démarche qui a été entreprise consistait à utiliser en premier les connaissances disponibles émanant des études antécédentes, ces connaissances qui nous ont servi de socle à notre travail, n'ont pas cependant levé toutes les indéterminations relatives aux différents aspects de cet aquifère. Pour ce qui est de la méthodologie suivie, nous avons opté pour les outils spécifiques à la démarche, mais également disponibles et accessibles et que nous avons puisé dans le socle bibliographique consulté dans le domaine des aquifères karstiques. Autrement dit, toutes les méthodes appropriées à l'étude de cette problématique n'ont pu être mise à contribution pour l'atteinte de l'objectif poursuivi. Cet inconvénient qui est hors de notre volonté laisse un gout d'incomplet au résultat de notre travail.

Dans les différentes littératures que nous avons consultées, notre travail était globalement inspiré des différents exemples traités par différents auteurs, dans le domaine.

### **Dans la partie générale**

Nous avons en premier, procédé à une présentation de la zone d'étude sous les différents aspects à savoir, la situation géographique, le contexte géologique dans lequel les différentes formations géologiques du plateau de Chéria ont été présentées. La géométrie du système aquifère formé à partir des formations carbonatées a été identifiée par les résultats de l'investigation géophysique. L'aspect structural a à son tour été présenté de manière résumée, sa relation avec la karstification n'est plus à démontrer. Par la suite, les caractéristiques climatiques ont été étudiés ce qui a permis de définir le type de climat de la région.

L'hydrologie dernier chapitre de la partie générale, a concerné le réseau hydrographique qui est représenté surtout par l'oued Chéria, principal axe de drainage du bassin versant.

### **Dans la partie spéciale**

Contrairement à la partie précédente où les travaux présentés émanent d'investigations antérieures à partir de travaux de plusieurs auteurs. Dans cette deuxième partie (spéciale), nous avons présenté les résultats de notre propre travail, résultats qui émanent de nos différentes investigations.

En premier, nous avons donné un descriptif du système aquifère étudié, basé sur les résultats des études précédentes. Avant de répondre à la problématique posée, nous avons par la suite présenté la démarche et méthodologie suivie ainsi que les outils utilisés pour atteindre notre objectif. Pour cela, une présentation des différentes approches en hydrogéologie karstique a été faite, où nous avons argumenté le choix de l'approche pour laquelle nous avons opté.

L'impact de la variabilité climatique sur la ressource en eau de l'aquifère étudié, ne pouvait être mise en évidence que par l'approche dite fonctionnelle, approche choisie et dont une partie des outils étaient disponibles. Aux nombre de deux, ces outils concernaient la piézométrie et la géochimie des eaux de l'aquifère.

La finalité de cette approche consistait à caractériser le comportement de l'aquifère à partir des chroniques piézométriques et hydrogéochimique, comportement vis-à-vis des impulsions de surface représentées par la recharge météorique (précipitations) et donc l'impact de cette dernière.

Les résultats obtenus ont permis de souligner ce qui suit :

- Une baisse graduelle et plus ou moins régulière du niveau statique de la nappe.
- Des concentrations relativement élevées des ions Ca et Mg, et faibles pour ce qui est des nitrates (NO<sub>3</sub>).
- Des valeurs de conductivités et de températures relativement importantes.

La conjugaison ou combinaison de tous ces résultats permet de souligner l'absence de bouleversement hydrodynamique et hydrochimique des eaux par l'arrivée d'eau fraîches issues de la recharge et enfin le

caractère plus ou moins anciens (lent séjour) de ces eaux d'une part, et le type non nerveux et à écoulement retardé de l'aquifère en question.

On peut aussi souligner à partir de ce qui a précédé, l'effet retardataire de la couverture pédologique et la zone épikarstique, ou l'effet tampon est assez souligné (déphasage entre la recharge et la réaction de la piézométrie).

En soulignant enfin le caractère irrégulier et orageux des précipitations de la région, accompagné d'épisodes de sécheresse de manière alternée, nous avons voulu montrer l'effet sur l'aquifère, par rapport à la cause que sont les précipitations, ce qui est le propre d'une étude d'impact.

Enfin, nous terminerons cette conclusion en soulignant que les réserves de cet aquifère sont en nette décroissance et que l'aquifère réagit très lentement aux effets de la recharge, mis à part les épisodes neigeux relativement durables. La présentation du cas de l'émergence de Bouakous a servi à mettre en évidence ce caractère de l'aquifère Eocène.

## **2. RECOMMANDATIONS**

A l'issue de ce travail, il serait utile d'apporter quelques idées ou conseils à titre de recommandations, pour l'utilisation de la ressource en eau de la région de Chéria.

Sur la base des résultats des investigations effectuées dans le cadre de ce travail, nous avons pu avoir une meilleure vision de l'état actuel de ce système aquifère et noter une situation assez inquiétante.

En effet, la décroissance ou la baisse quasi continue du niveau de la nappe aquifère en question nous incite à tirer la sonnette d'alarme pour les gestionnaires de la ressource en eau. Comme cela est inscrit dans l'objectif de ce travail, l'effet du facteur climatique sur l'évolution des eaux de la nappe, a été analysé et mis en relief. Il semble que l'impact de ce facteur n'est pas aussi alarmant qu'on le croit, car même si un certain déficit de recharge n'est plus à démontrer, il ya une certaine variabilité marquée par des années compensatoires, avec un effet d'atténuation de la baisse du niveau de la nappe. En dépit de cela, ce dernier est marqué par une baisse continue au fil des années. Nous avons montré que cela est l'impact du facteur anthropique qui se traduit par une exploitation toujours croissante et incontrôlée. L'analyse du facteur exploitation a permis de visualiser une évolution croissante et continue du débit d'exploitation, impactant directement sur la nappe.

A cet effet et afin de mettre un terme à cette situation, nous recommandons aux gestionnaires de ce secteur, ce qui suit :

- Un suivi rigoureux et régulier avec un pas de temps relativement réduit du niveau de la nappe à différent secteur (amont et aval). Nous recommandons à cet effet l'utilisation de sondes enregistreuses évitant ainsi les fréquents déplacements sur terrain.

- Au besoin, installer de nouveaux piézomètres bien protégés à des endroits judicieusement choisis.

- Programmer dans la mesure du possible des opérations de traçage qui permettront de mieux identifier les écoulements ainsi que les aires d'alimentation.

- Mettre fin de manière urgente à l'implantation de nouveaux forages afin de freiner l'impact négatif sur la réserve en eau. Avec la recharge, cela permettra non pas de rétablir le niveau mais de freiner ou stopper la baisse inquiétante.

- Mener une opération urgente de recensement de tous les forages foncés de manière illicite et incontrôlée dans la région. Cela permettra d'évaluer de manière plus exacte le véritable débit d'exploitation pour un bilan plus crédible.

- Enfin, sur un plan environnemental, il est nécessaire de mieux suivre l'apparition des effondrements (dolines) qui représentent un risque environnemental et géotechnique. Ce risque n'est pas seulement pour l'expansion urbaine, mais aussi pour ce qui est de la vulnérabilité de la nappe, car ces effondrements constituent de véritables voies d'accès direct de toute sorte de polluants, vers les eaux de la nappe.

- Par prévention, il serait très intéressant de programmer des campagnes de prospection par méthode électrique afin de mieux localiser les zones à cavités et en dégager une carte du risque, utile pour les aménagements urbains.

Ce n'est qu'en prenant en considération toutes ces recommandations, que l'on pourra préserver cette importante ressource, que constituent les eaux de l'aquifère éocène du plateau de Chéria.

### Participation à des Manifestations Scientifiques

**Benhammadi, H., Rouabhia, A., Baali, F. et Chaffai, H. (2008):** Effet de la sécheresse et de la surexploitation sur la structure et la qualité de la

ressource en eau d'un aquifère karstique. *Colloque International Terre et Eau – Annaba, 17, 18 et 19 Novembre 2008, Algérie.*

**Benhammadi, H. et Chaffai, H. (2012):** Conséquences géotechniques de la surexploitation des aquifères karstiques. *Colloque International REZAS'2012. Beni Mellal 14-16 Novembre 2012, Maroc.*

**Benhammadi, H. et Chaffai, H. (2012):** Impact climatique et anthropique sur la ressource d'un aquifère karstique. Cas du plateau de Chéria. *Colloque International Eau et Climat- Regards Croisés Nord/Sud. Rouen, 25 et 26 Septembre 2012, France.*

**Benhammadi, H. et Chaffai, H. (2013):** L'impact des structures karstiques sur l'environnement urbain dans une zone semi aride. *Colloque International « Dynamique Environnementales et Pratiques Locales : Quelles interactions ? Toulouse, le 4-7 Juin 2013, France.*

**Benhammadi, H., Fehdi, Ch. et Chaffai, H. (2013):** L'apport de la géophysique dans la prévention du risque urbain en région karstique. Cas de la ville de Chéria. *6<sup>ème</sup> Colloque Maghrébin de Géophysique Appliquée. Le 3-5 Mai 2013, Maroc.*

**Benhammadi, H., Fehdi, Ch. et Chaffai, H. (2014):** Impact of karst structures on the vulnerability of groundwater. *The 5<sup>th</sup> international symposium on karst. Malaga, 14 – 16 october 2014. Spain.*

# RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

## Références Bibliographiques

**ASTIER, J.L (1971).** Géophysique appliquée à l'hydrogéologie. Ed. Masson & Cie, Paris, 277 p.

- AUDRA P. (2001).** Mesures de débit et traçages – manuel à l’usage des spéléologues, Université de Nice, 44p.
- BAALI, F. (2001).** Etude hydrogéologique et hydrochimique de la région karstique de Chéria (Algérie). Mémoire de Magister, Université Badji Mokhtar-Annaba, 70 p.
- BAALI F, ROUABHIA A, KHERICI N ET DJABRI L. (2006).** Natural chemical tracers of urban pollution: case of born example of application on the area of Algerian Cheria. WRP, LLC ISBN-13: 978-1-887201647-6 Michigan, USA, pp 39-45.
- BAKALOWICZ M. et MANGIN A.(1980).**L'aquifère karstique. Sa définition, ses caractéristiques et son identification.Mémoire de la Société Géologique de France, **11**: pp. 71-79.
- BAKALOWICZ, M. (1979).** Contribution de la géochimie des eaux à la connaissance de l'aquifère karstique et de la karstification. Thèse Doctorat ès Sciences naturelles, Univ. P. et M. Curie, Paris 6, Géologie dynamique et Laboratoire Souterrain. CNRS, Moulis.
- BAKALOWICZ, M. (1996).** La zone d'infiltration des aquifères karstiques. Méthodes d'étude. Structure et fonctionnement. *Hydrogéologie*, 4 (1995).
- BAKALOWICZ, M. (1999).** Connaissance et gestion des ressources en eaux souterraines dans les régions karstiques. Guide technique n°3, SDAGE Rhône.
- BENHAMMADI, H. (2012).** Impact climatique et anthropique sur un aquifère karstique en zone semi aride. Colloque international « Eau et climat ». Vol 1. Université de Rouen.
- BENHAMADI, H., CHAFFAI, H., ROUABHIA, A. et BAALI, F. (2008).** Effet de la sécheresse et de la surexploitation sur la structure et la qualité de la ressource en eau de l’aquifère karstique du plateau de Chéria (Algérie). **Colloque International "Terre et Eau". Annaba - 17, 18 & 19 Novembre 2008 – Algérie.**

- BENSAOULA F. (2007).** L'importance des eaux karstiques dans l'approvisionnement en eau de la population de Tlemcen. Larhyss Journal n°6 pp. 57-64.
- BLÈS, J. L. (1969).** Contribution à l'étude des déformations cassantes de la feuille de Morsott (Sud-Est Constantinois-Algérie). Les microfractures et leurs relations avec les failles et les plis. Pub. Serv. Géol. Algérie, Nouvelle série, Bull. n° 39, pp.7-17.
- BLÈS, J. L. et FLEURY, J. J. (1970).** Carte géologique de Morsott au 1/50.000 et notice explicative. Service géologique de l'Algérie.
- BOTTON, R. (1984).** Etude de certaines modalités du fonctionnement de l'aquifère karstique (zone d'infiltration et zone saturée) sur deux champs de forage Nord Montpelliérains. Thèse 3<sup>ème</sup> cycle, USTL, Montpellier II, 500 p.
- BOUSNOUBRA, H. (1984).** Hydrogéologie de quelques réservoirs karstiques du Nord-Est algérien. Thèse 3<sup>ème</sup> cycle, USTL, Montpellier II, 162 p.
- CASTANY, G. (1967).** Traité pratique des eaux souterraines, Ed. Dunod, 551 p.
- CASTANY, G. (1968).** Prospection et exploitation des eaux souterraines, Ed. Dunod, Paris, 683 p.
- CASTANY, G. (1982).** Principes et méthodes de l'hydrogéologie, Ed. Dunod, 263 p.
- CASTANY, G. et MARGAT, J. (1977).** Dictionnaire français d'hydrogéologie. Ed. BRGM, Orléans, 250 p.
- CGG (Compagne Générale de Géophysique (1970).** Prospection géophysique sur le plateau de Chéria. Rapport interne R.A.D.P. Paris VII 26p.
- CHAFFAI H. (1983).** Approche hydrogéologique des formations du bassin versant de Chéria. Essai de synthèse. Rapport de DEA, USTL, Montpellier II, 83 p.
- CHAFFAI H, (1986).** Evaluation des ressources en eaux de la plaine de Chéria (Nord-Est Algérie). Synthèse et analyse des données. Doctorat 3<sup>ème</sup> cycle, USTL, Montpellier II, 245 p.

- CHAFFAI, H. (1988).** Evaluation des ressources en eaux du plateau de Chéria (Algérie). Synthèse et analyse des données. **Microfiches**, Thèse n° 86/MON2/0203. Atelier national de reproduction des thèses. ANRT - **Grenoble** 12967, **France**.
- CHAFFAI, H. (1989).** Evaluation des ressources en eaux du plateau de Chéria (Algérie). Synthèse et analyse des données. Bibliographie, Nouvelle série. 1989 – 2/3, Centre International pour la Formation et les Echanges Géologiques. **Géologie Africaine**, Page 26.
- CHAFFAI, H., RAZACK, M. et DROGUE, C. (1992).** Application de l'Analyse en Composantes Principales [ACP] au système aquifère de Chéria [Algérie]. **Colloque International** "Hydrogéologie des milieux discontinus sous climat aride". **Marrakech** - 22-25 Avril 1992 - **Maroc**. [Revue].
- CHAFFAI, H. (1993).** Ressources en eau des formations karstiques de Chéria [Algérie]. **Séminaire International** "Hydrogéologie des roches carbonatées profondes". **Tozeur** - 8-12 Février 1993 - **Tunisie**.
- CHAFFAI, H., BAALI, F. et ROUABHIA, A. (2003).** Facteurs influençant le chimisme des eaux dans une zone semi-aride: Cas des aquifères d'El Ma Labiod, Tébessa, Hammamet et Chéria [W. TEBESSA]. **Colloque International** "Oasis, Eau et Population". **Biskra** - 22, 23 & 24 Septembre 2003 – **Algérie**, pp. 339-344.
- CHAFFAI, H., BAALI, F. (2004).** Les alluvions quaternaires du plateau de Chéria: Relation avec les formations karstiques sous-jacentes. **Séminaire National** "Les Sciences de la Terre au Service du Développement Durable". **Tébessa** - 26 & 27 Avril 2004, **Algérie**.
- CHAFFAI, H., HANI, A. et DJABRI, L. (2004).** Le plateau de Chéria (Algérie). Application de l'analyse en composantes principales. **Colloque International** "Terre et Eau". **Annaba** - 4, 5 & 6 Décembre 2004 – **Algérie**.
- CHAFFAI, H., LAOUAR, R., HANI, A. et BAALI, F. (2006).** Les formations karstiques du plateau de Chéria (Algérie). Identification et évaluation des ressources en eau. *Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, N° 05, Juin 2006, pp.121-131.*

- CHALIKAKIS K. (2006).** Application de la géophysique pour la reconnaissance des ressources en eau dans les milieux karstiques. Thèse Université Paris 6.
- CHARMOILLE A. (2007).** L'aquifère karstique de Fourbanne . Etude du comportement hydraulique et mécanique à partir de l'hydrogéochimie. Thèse. Université de Franche-Comté.
- CHAUMONT, M., PAQUIN, C. (1970).** Notice explicative de la carte pluviométrique de l'Algérie en 1/500.000. Pub. Soc. Hist. Nat. AFN., Alger, 24 p.
- CHAUVE, P. et METTETAL, J. P. (1992).** La protection des captages en pays karstique. Exemples franc – comtois. 5<sup>ème</sup> Colloque d'hydrologie en pays calcaire, Neuchatel, 16-17-18 Octobre 1992. Annales Scientifiques de l'Université de Besançon, Géologie, Mémoire hors série n° 11, pp. 305-321.
- COLLIGNON, B. (1986).** Applied hydrogeology of karst aquifers mounts of Tlemcen. Thèse. Univ. Montpellier.
- COIFFAIT P.E., QUINIF Y. (1975).** Microformes karstiques et fracturation au Djebel Sidi R'Gheiss. (Constantinois, Algérie du N.E.). *Ann. Spéleo.*, 30, 4 : 609-618.
- COIFFAIT P.E., QUINIF Y., VILA J.M. (1975).** Histoire géologique et karstifications des massifs néritiques constantinois (Algérie). *Ann. Spéleo.*, 30, 4 : 619-627.
- COIFFAIT, P.E. et QUINIF, Y. (1979).** Etude hydrogéologique de la grotte de Bouakkous. Rapport inédit, INRH Tébessa, Algérie, 34 p.
- COMPAGNIE GÉNÉRALE DE GÉOPHYSIQUE(1970).** Prospection géophysique sur le plateau de Chéria. Service des études scientifiques, 26 p.
- DAVID, L. (1956).** Etude géologique des monts de la haute Medjerda. Bulletin n° 11, service de la carte géologique, Alger, 305 p.
- DELEAU, P. (1938).** Etude géologique de la région de Jemmapes, Hammam-Meskoutine et du Col des Oliviers. Bull. Serv. Carte géol. Algérie, Alger, Alger, 2<sup>èmesér.</sup> n° 14, t. 2.
- DE MARSILY, G. (1981).** Hydrogéologie quantitative, Edition Masson, 215 p.

- DJABRI, L. (1987).** Contribution à l'étude hydrogéologique de la nappe alluviale de Tébessa [essai de modélisation]. Thèse de Doc. Ing. U. Franche-Comté, France, 170 p.
- DOERFLIGER, N. (2008).** Guide méthodologique, les outils de l'hydrogéologie karstique. Rapport BRGM.
- DOERFLIGER, N. and ZWAHLEN, F. (1998).** Cartographie de la vulnérabilité en régions karstiques (EPIK). Application aux zones de protection des eaux souterraines. L'environnement pratique. Guide pratique.
- DROGUE, C. (1980).** Essai d'identification d'un type de structure de magasins carbonates fissurés. Application à l'interprétation de certains aspects du fonctionnement hydrogéologique. Société Géologique de France, N 11, pp. 101-108.
- DROGUE, C. et GRILLOT, J.C. (1976).** Structures géologiques et premières observations piézométriques à la limite du sous-système karstique de Terrieu (Périmètre expérimental). Annales scientifiques de l'Université de Besançon, Fasc, 25, 3<sup>ème</sup> série, pp.195-210.
- DUBOURDIEU, G. (1957).** Etude géologique de la région de l'Ouenza (Confins Algéro-Tunisien). Thèse Sciences, Paris, 611 p.
- DUBOURDIEU, G. et DUROZOY, G. (1950).** Observations tectoniques dans les environs de Tébessa et de l'Ouenza (Algérie). Bull. Soc. Géol. Fr., 5<sup>ème</sup> série, t. 20, pp. 257-266.
- DURAND DELGA, M. (1957).** Etude géologique Ouest de la chaîne numidique. Thèse Sciences, Paris, 533 p.
- DUROZOY, G. (1947).** Alimentation en eau de Tébessa. Rapport S.C.H. (Bur. Et. Sc.) Clairbois, Birmandreis, Algérie, n° 77, 15 nov. 1947.
- DUROZOY, G. (1948).** Alimentation en eau de Tébessa. Rapport S.C.H. (Bur. Et. Sc.) Clairbois, Birmandreis, Algérie, n° 372, 29 nov. 1948.
- DUROZOY, G. (1952).** Etude hydrogéologique du synclinal de l'Aïn Dalaa. Publication Service Carte Géologique Algérie, 16 p.
- DUROZOY, G. (1952).** Les massifs calcaires crétacés des Monts de Constantine. Etude hydrogéologique préliminaire. XIX<sup>e</sup> Congrès Géol. Intern. Alger, 20 p.

- DUROZOY, G. (1958).** Etude géologique de la région de Chateaudun du Rhumel. Thèse Sc., Alger, Publication Service Carte Géologique Algérie. Bulletin n° 23, 456 p.
- EMBLANCH, C. (2007).** Les équilibres chimiques et isotopiques dans les aquifères karstiques. Thèse. Université d'Avignon.
- FEHDI Chemseddine (2008).** Apport hydrogéochimique et isotopique dans la caractérisation des mécanismes d'acquisition de la salinite des eaux souterraines du complexe aquifère Morsott- El Aouinet (N.E. ALGERIEN). Thèse de Doctorat, Université Badji Mokhtar-Annaba.
- FEHDI, C., BAALI, F., BOUBAYA, D. & ROUABHIA, A. (2011).** Detection of sinkholes using 2D electrical resistivity imaging in the Cheria Basin (north-east of Algeria). Arabian Journal of Geosciences, 4 (1-2), pp. 181-187.
- FERAGA, A. (1985).** Ressources en eau des karsts du Nord-Est Algérien. Thèse de Docteur Ingénieur, USTL, Montpellier II, France.
- FLANDRIN, J. (1948).** Contribution à l'étude stratigraphique du Numulitique algérien. Thèse Sciences, Paris, 340 p.
- FLANDRIN, J. (1955).** Remarques sur quelques hypothèses récentes de la tectonique algérienne. B.S.G.F. (6), 397 p.
- FLEURY, J. J. (1969).** Stratigraphie du Crétacé et de l'Eocène (Aptien à Lutétien) de la feuille au 1/50.000 Morsott, n° 178. Pub. Serv. Géol. Algérie, Nouvelle série, Bull. n° 39, pp.141-153.
- FOURNIER, F. (1960).** Climat et érosion. Presses Universitaire de France, 195 p.
- FISTER V. (2012).** Dynamique des écoulements dans les aquifères calcaires de bas plateaux. Thèse. Université de Lorraine.
- GAUD, B. (1977).** Etude hydrogéologique du plateau de Chéria. Rapport, DEMRH, 74 p.
- GHISELINK, M. (2006).** Estimation du temps de séjour par étude isotopique des eaux de deux sources karstiques. Source de la Fade. Rapport final BRGM/RP 55094-FR.

- GILLE, E. (2010).** Les traceurs fluorescents en domaine karstique. In Audra P. Karstologia mémoires. n° 19.
- GLAÇON, G. et GUIRAUD, R. (1970).** La série mio-pliocène du Hodna et des régions voisines (Algérie du Nord). CRAS, Paris, t. 271, pp. 945-948.
- GRILLOT, J. C. (1979).** Structure des aquifères en milieu fissuré. Contribution méthodologique à cette connaissance. Thèse d'Etat, USTL, Montpellier II, 226 p.
- GUIRAUD, R. (1985).** Tectonique post-hercynienne en Afrique du Nord et de l'Ouest. CIFEG, Paris, pp. 186-224.
- GUIRAUD, R. (1977).** Sur la néo-tectonique des régions ouest-constantinoises. Bull. Soc. Géol. France, t. XIX, n° 3, pp. 645-650.
- GUIRAUD, R. (1975).** L'évolution post-triasique de l'avant-pays de la chaîne alpine en Algérie, d'après l'étude du bassin du Hodna et des régions voisines. "Extrait de la revue de géographie physique et de géologie dynamique". Vol. XVII, Fasc. 4, pp. 427-446.
- GUIRAUD, R. (1973).** Evolution post-triasique de l'avant-pays de la chaîne alpine en Algérie d'après l'étude du bassin du Hodna et des régions voisines. Thèse Doc., Univ. Nice, 270 p.
- GUIRAUD, R. (1968).** Le Plio-Quaternaire du bassin du Hodna (Algérie du Nord). CRAS, Paris, t. 267, pp. 561-564.
- GUIRAUD, R. (1965).** Géologie et hydrogéologie du Bassin du Hodna, Résumé des connaissances actuelles. Publ. Serv. Géol. Algérie, Bull. n° 33, Alger 1966.
- GUYOT, J.-L. (1985).** Le karst superficiel. Etude des écoulements hypodermiques. Le Gard. Karstologia n°6 15 – 20.
- HACHEMI, H. (1982).** Contribution à l'étude hydrogéologique du plateau du SraOurtane (Tunisie). Thèse 3ème cycle, USTL, Montpellier II, 96 p.
- JOIGNAUX, E. (2011).** Etat qualitatif des eaux de la nappe du Val d'Orleans : Impact du changement climatique Thèse. Université d'Orleans.

- KABOUR, A. (2004).** Contribution à l'étude du bassin versant de Chéria (Est Algérien) et essai de modélisation de l'aquifère de la région sud. Mémoire de Magister, Université de Batna, 191 p.
- KARDACHE, R. (2013).** Karstologie en zone aride : Formations karstifiées du sud-est Algérien. Courrier du savoir.Vol 17. ISSN 1112-3338
- KAUFMANN, O. & QUINIF, Y. (1999).**Cover-collapse sinkholes in the "Tournaisis" area, southern Belgium.Engineering Geology, 52, 15- 22.
- KAUFMANN, O. (2000).** Les effondrements karstiques du Tournaisis : genèse, évolution, localisation, prévention. Speleochronos, HorsSérie, 350 p.
- KAUFMANN, O. & QUINIF, Y. (2002).**Geohazard map of cover-collapse sinkholes in the Tournaisis area, southern Belgium.Engineering Geology, 65, 117-124.
- KAUFMANN, O., DELGRANCHE, J. & DECEUSTER, J. (2006).** Geophysics for physical planning over covered karstic areas in the Walloon region of Belgium. SAGEEP 2006 Extended Abstracts, Environmental and Engineering Geophysical Society, Colorado (USA), 9 p.
- KAUFMANN, O., LIZIN, P., MARTIN, T. & DECEUSTER, J. (2009).** The role of geophysical investigations in physical planning over covered karstic areas in southern Belgium. Proceedings of Near Surface 2009, European Association of Geoscientists & Engineers, Dublin (Ireland), 4p.
- KAUFMANN, O., DECEUSTER, J. & QUINIF, Y. (2012).**An electrical resistivity imaging-based strategy to enable site-scale planning over covered palaeokarst features in the Tournaisis area (Belgium), Engineering Geology, 133-134, 49-65.
- KAUFMANN, O. & DECEUSTER, J. (2014).**Detection and mapping of ghostrock features in the Tournaisis area through geophysical methods – an overview.GeologicaBelgica, 17 (1), 17-26.
- LAFFITTE, R. (1939).** Etude géologique de l'Aurès. Publ. Serv. Carte géol. Algérie, Alger, Alger, 2<sup>ème</sup>sér. Bull. n° 15.

- LAFFITTE R (1956).** Etude géologique et hydrogéologique de la région de Chéria. Rapport interne ANRH de Tébessa. 40 p.
- LANDREAU, A. (1987).** Investigations sur la dénitrification naturelle dans l'aquifère de la craie du nord de la France. BRGM. SGN-486. Eau.
- LASM, Th. and al (2011).** Caractérisation hydrochimique des aquifères fissurés de la région de San-Pedro. Int. J. Biol. Chem. Sci. 5(2): 642-662. Paper.
- LE BORGNE, F (2001).** Réponses hydrogéochimiques de la nappe phréatique du Val d'Orléans aux sollicitations de son environnement. Thèse. Université Paris 7.
- LEPILLER, M. (1980).** Contribution de l'hydrochimie à la connaissance du comportement hydrogéologique des massifs calcaires. (Savoie, Haute Savoie, France). Thèse, Univ. Grenoble.
- MANGIN A., MOLINARI J. et PALOC H. (1976).** Les traceurs en hydrogéologie karstique. Leur apport à la connaissance des réservoirs aquifères calcaires. La Houille Blanche. N° 3-4, pp. 261-26.
- MANGIN, A. (1975).** Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstique. Thèse de Doctorat en Sciences Naturelles. Dijon, (Ann. Spéleol., 1974, 29, 3, pp. 283-332.
- MANIA, J., BROQUET, P. et RAMPNOUX, N. (1998).** Rôle de la fracturation dans la détermination de la conductivité hydraulique des calcaires – Apport des méthodes directes et indirectes. Bull. Soc. Géol. France, 1998, t. 169, n° 6, pp. 765-773.
- MARSILY de, G. (1981).** Hydrogéologie quantitative. Ed. Masson, Paris, 214 p.
- MASSON, M. (1980).** Méthodologie générales de traitement statistique de l'information de masse. Ed. Cedic, 368 p.
- MATHEVET, Th. (2008).** Fonctionnement hydrologique et géochimique du système karstique de Bange-L'Eau-Morte. Colloque CFH. Hydrogéologie et karst. pp. 83 – 94.
- MECHLER, P. (1982):** Les méthodes de la géophysique. Ed. Dunod, 200 p.

- MUDRY, J. (1987).** Apport du traçage physico-chimique naturel à la connaissance hydrocinématique des aquifères carbonatés. *Thèse*, Université des Sciences et Techniques de Franche-Comté.
- PEGUY, C.P. (1961):** Précis de climatologie. Ed. Masson et Cie, 343 p.
- PLAGNES, V. (1997).** Structure et fonctionnement des aquifères karstiques. Caractérisation par la géochimie des eaux. *Thèse* de l'Université de Montpellier II. 375 p.
- QUINIF, Y., (1975).** Grottes perchées du Constantinois. Relations avec la néotectonique. *Bull. Soc. Hist. Nat. d'Afri. du Nord*, 66, 3 et 4 : 117-126.
- QUINIF, Y., (1976).** Contribution à l'étude morphologique des karsts algériens de type haut-alpin. *Rev. Géogr. Phys. Géol. Dyn.*, XVIII, I : 5-18.
- QUINIF, Y., COIFFAIT P.E., (1980).** La grotte de Bou Akouss (Hammamet, Algérie). *Spelunca*, 3 : 98-104.
- QUINIF, Y., (1983).** La reculée et le réseau karstique de Bou Akouss (Hammamet - Algérie de l'Est). Géomorphologie et aspects évolutifs. *Rev. belg. Géogr.*, 107, 4 : 89-111.
- RICARD, J. (1979).** Evaluation des ressources d'un aquifère d'après l'analyse du bilan en eau. Application au système aquifère de Tébessa-Morsott (Algérie). *Thèse* 3ème cycle, USTL, Montpellier II, 86 p.
- ROCHE, M. (1962).** Hydrologie de surface. Edition Gauthier-Villars, 390 p.
- ROCHE, M.A. (1973).** Hydrogéologie de la haute Saoura (Sahara Nord Occidental). Ed. CNRS, 91 p.
- ROCHE, M.F. (1986).** Dictionnaire Français d'hydrologie de surface, Ed, Masson, 288 p,
- ROUABHIA, A. (2001).** Vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines de la plaine d'El Ma Labiod (Algérie). *Mémoire de Magister*, Université de Annaba, 80 p.
- SAINT-JACQUES, M. (1972).** Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique du plateau de Chéria. DEMRH, 87 p.

- SAMIE, C. (1954).** Etude hydrogéologique de la haute Medjerda. Soc. Hydro-technique de France. Compte rendu des 3èmes journées de l'hydraulique, Alger, 12-14 Avril 1954, Pluie, Evaporation, Filtration et Ecoulement, pp.106-116.
- SCHÖELLER, H. (1962).** Les eaux souterraines. Hydrologie dynamique et chimique. Recherche, Exploitation et Evaluation des Ressources. Ed. Masson et Cie, 642 p.
- SCHÖELLER, H. (1955).** Essai de la qualité chimique de l'eau destinée à l'alimentation de l'homme dans les pays arides. Revue Terres et Eaux, Suppl. Sc. Alger, n° 24, pp. 4-11.
- SCHÖELLER, H. (1951).** Relation entre la concentration en chlore des eaux souterraines et les échanges de bases avec les terrains qui les renferment. CRAS, Paris, t. 232.
- SCHÖELLER, H. (1948).** Les modifications de la composition chimique de l'eau dans une même nappe. Les variations de la composition chimique de l'eau dans les nappes souterraines. Extrait des procès verbaux des séances de l'assemblée générale d'Oslo de l'union géodésique et géophysique internationale.
- VISSE, L. (1950).** Contribution à l'étude hydrogéologique du Sud-Est Constantinois. Paris.
- VOÛTE, C. (1967).** Essai de synthèse de l'histoire géologique des environs d'AïnFakroun, Aïn Babouche et des régions limitrophes. Publ. Serv. Géol. Algérie, Nllesér. Bull. n° 36, (2 t. et planches).
- ZEREG, Salah (2010).** Impact des retours d'eau d'irrigation sur la ressource en eau souterraine des régions semi arides, exemple des plaines de Tébessa, Chéria et El Ma El Abiod, Est Algérien. Mémoire de Magister, Université Colonel Hadj Lakhdar – Batna, 109 p.
- ZERROUKI Hichem (2013) :** "Aspects quantitatifs et qualitatifs de la source de Bouakkous: Impact sur le champ captant d'Ain Chabro". Thèse de Doctorat en Sciences, Université Badji Mokhtar, Annaba, 168 p.

## **ANNEXES**

AB/2 (m)	Résistivité(ohm.m)
20	10
50	100
100	230
180	260
260	195
500	130
600	130
800	120
900	100
950	100
1400	70
1800	30

**Résultats d'un sondage électrique vertical (SEV)**

Mois	Températures (mm)
Septembre	21,57
octobre	16,94

novembre	11,59
décembre	7,81
janvier	6,48
février	7,72
mars	10,31
avril	12,82
mai	17,8
juin	22,27
juillet	26,62
août	25,67

**Valeurs des températures moyennes (1972-2012)**

Années	hauteurs (mm)	Années	Hauteurs (mm)
1972/73	545,8		
1973/74	152,1	1992/93	384,2
1974/75	239,3	1993/94	192,2
1975/76	438,7	1994/95	239,3
1976/77	319,2	1995/96	458,9
1977/78	124,6	1996/97	158,2
1978/79	124,1	1997/98	395,1
1979/80	278,6	1998/99	284,8
1980/81	189,8	1999/00	335,1
1981/82	333,5	2000/01	112,7
1982/83	92,8	2001/02	121,3
1983/84	122,3	2002/03	170,9
1984/85	302	2003/04	399,2
1985/86	319,8	2004/05	165,3
1986/87	249,1	2005/06	173,6
1987/88	242,9	2006/07	254
1988/89	315,5	2007/08	206,6
1989/90	333,1	2008/09	160,9
1990/91	439,3	2009/10	228,6
1991/92	338,7	2010/11	434,6
1992/93	384,2	2011/12	292,6

**Précipitations annuelles de la période (1972/73 – 2012/13)**

Mois	précipitations
Septembre	31,17
Octobre	23,59
Novembre	20,16
Décembre	16,32
Janvier	19,47
Février	18,61
Mars	28,61
Avril	22,17
Mai	33,07
Juin	25,24
Juillet	10,23
Août	18,58

### Hauteurs des précipitations de l'année moyenne (1972/73-2012/13)

Années	T° annuelle moyenne	Années	T° annuelle moyenne
1972/73	13,98	1991/92	15,5
1973/74	14,56	1992/93	16,58
1974/75	13,97	1993/94	16,84
1975/76	13,99	1994/95	16,18
1976/77	15,46	1995/96	15,65
1977/78	15,53	1996/97	15,26
1978/79	14,71	1997/98	16,23
1979/80	14,2	1998/99	17,02
1980/81	15,01	1999/00	16,53
1981/82	14,16	2000/01	17,12
1982/83	15,37	2001/02	12,8
1983/84	15,08	2002/03	19,75
1984/85	15,59	2003/04	16
1985/86	15,69	2004/05	16,5
1986/87	15,58	2005/06	15,06
1987/88	16,88	2006/07	16,55
1988/89	15,4	2007/08	16,44
1989/90	16	2008/09	14,34
1990/91	15,28	2009/10	16,9

### Valeurs des températures annuelles moyennes (1972 - 1992)

Années	Ip
1972/73	2,04
1973/74	0,56
1974/75	0,89
1975/76	1,64
1976/77	1,19
1977/78	0,46
1978/79	0,46
1979/80	1,04
1980/81	0,71
1981/82	1,24
1982/83	0,34
1983/84	0,45
1984/85	1,13
1985/86	1,19
1986/87	0,93
1987/88	0,9
1988/89	1,18
1989/90	1,24
1990/91	1,64
1991/92	1,26
1992/93	1,43
1993/94	0,71
1994/95	0,89
1995/96	1,71
1996/97	0,59
1997/98	1,47
1998/99	1,06
1999/00	1,25

2000/01	0,42
2001/02	0,45
2002/03	0,64
2003/04	1,49
2004/05	0,61
2005/06	0,64
2006/07	0,95
2007/08	0,77
2008/09	0,6
2009/10	0,85
2010/11	1,62
2011/12	1,09

**Valeurs des indices de pluviosité de la période (1972/73-2012/13)**

Années	Débits annuels
1982	0,02
1983	0,01
1984	0,02
1985	21,3
1986	82,4
1987	120
1988	49,7
1989	40,8
1990	160
1991	23,6
1992	116,3
1993	39,6
1994	63,4

**Hydrogramme annuel d'Ain Babouche (1982-1994)**

Mois	Débit mensuel	Mois	Débit mensuel
Avril-74	1,38	Août-75	22,93
Mai-74	1,05	Sept-75	29,51
Juin-74	1,2	Oct-75	12,63
Juil-74	1,8	Nov-75	7,54
Août-74	0,4	Déc-75	8,12
Sept-74	43,96	Janv-76	8,47

Oct-74	5,05	Fév-76	8,94
Nov-74	2,75	Mars-76	7,12
Déc-74	3,69	Avr-76	5,56
Janv-75	6,14	Mai-76	12,38
Fév-75	6,79	Juin-76	79,11
Mars-75	5,45	Juil-76	30,1
Avr-75	3,82	Août-76	59,13
Mai-75	3,36	Sept-76	45,49
Juin-75	3,01	Oct-76	3,38
Jil-75	2,26	Nov-76	9,16

### Hydrogramme mensuel (1974-1976)

Années	Q (m <sup>3</sup> /s)	P (mm)
1982	0,02	92,8
1983	0,01	122,3
1984	0,02	302
1985	21,3	319,8
1986	82,4	249,1
1987	120	242,9
1988	49,7	315,5
1989	40,8	333,1
1990	160	439,3
1991	23,6	338,7
1992	116,3	384,2
1993	39,6	192,2
1994	63,4	239,3

### Valeurs des débits et hauteurs de précipitations (1982-1994)

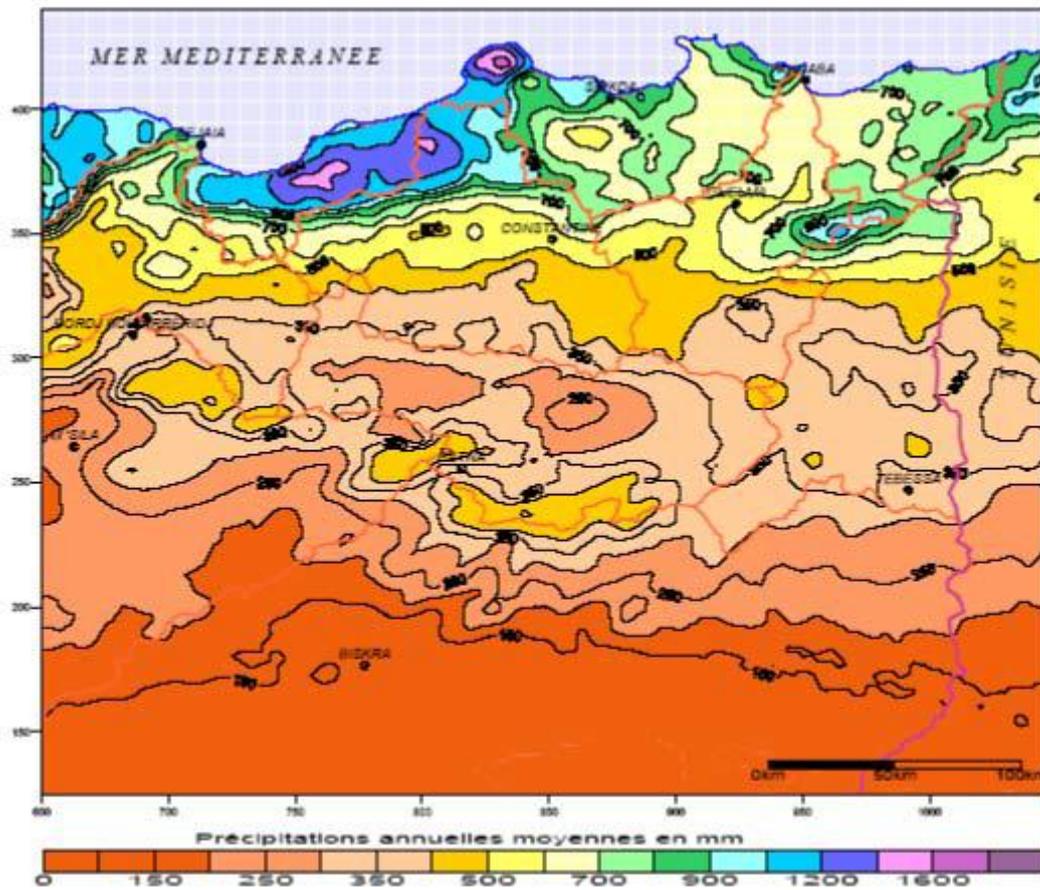
Années	Pi	Pi - Pm	(Pi - Pm) <sup>2</sup>	(Pi-Pm)/E=Ip
1972/73	<b>545,8</b>	278,58	77606,81	15,77
1973/74	152,1	-115,12	13252,61	-6,51
1974/75	239,3	-27,92	779,52	-1,58
1975/76	438,7	171,48	29405,39	9,71
1976/77	319,2	51,98	2701,92	2,94
1977/78	124,6	-142,62	20340,46	8,07
1978/79	124,1	-143,12	20483,33	-8,1
1979/80	278,6	11,38	129,5	0,64
1980/81	189,8	-77,42	5993,85	-4,38
1981/82	333,5	66,28	4393,03	3,75
1982/83	<b>92,8</b>	-174,42	30422,33	-9,87
1983/84	122,3	-144,92	21001,88	-8,2
1984/85	302	34,78	1209,64	1,96
1985/86	319,8	52,58	2764,65	2,97
1986/87	249,1	-18,12	328,33	-1,02
1987/88	242,9	-24,32	591,46	-1,37
1988/89	315,5	48,28	2330,95	2,73
1989/90	333,1	65,88	4340,17	3,73
1990/91	439,3	172,8	29859,84	9,78
1991/92	338,7	71,48	5109,39	4,04
1992/93	384,2	116,98	13684,32	6,62
1993/94	192,2	-75,02	5628	-4,24
1994/95	239,3	-27,92	779,52	-1,58
1995/96	458,9	191,68	36741,22	10,85
1996/97	158,2	-109,2	11924,64	-6,18
1997/98	395,1	127,88	16353,29	7,24
1998/99	284,8	17,58	309,05	0,99
1999/00	335,1	67,88	4607,69	3,84
2000/01	112,7	154,52	23876,43	8,74

2001/02	121,3	145,92	21292,64	8,26
2002/03	170,9	96,32	9277,54	5,45
2003/04	399,2	131,98	17418,72	7,47
2004/05	165,3	-101,92	10387,68	-5,77
2005/06	173,6	93,62	8764,7	5,3
2006/07	254	-13,22	174,76	-0,74
2007/08	206,6	-60,62	3674,78	-3,43
2008/09	160,9	-106,32	11303,94	-6,02
2009/10	228,6	-38,62	1491,5	-2,18
2010/11	434,6	167,38	28016,06	9,47
2011/12	292,6	25,38	644,14	1,43
			<b>499395,68</b>	

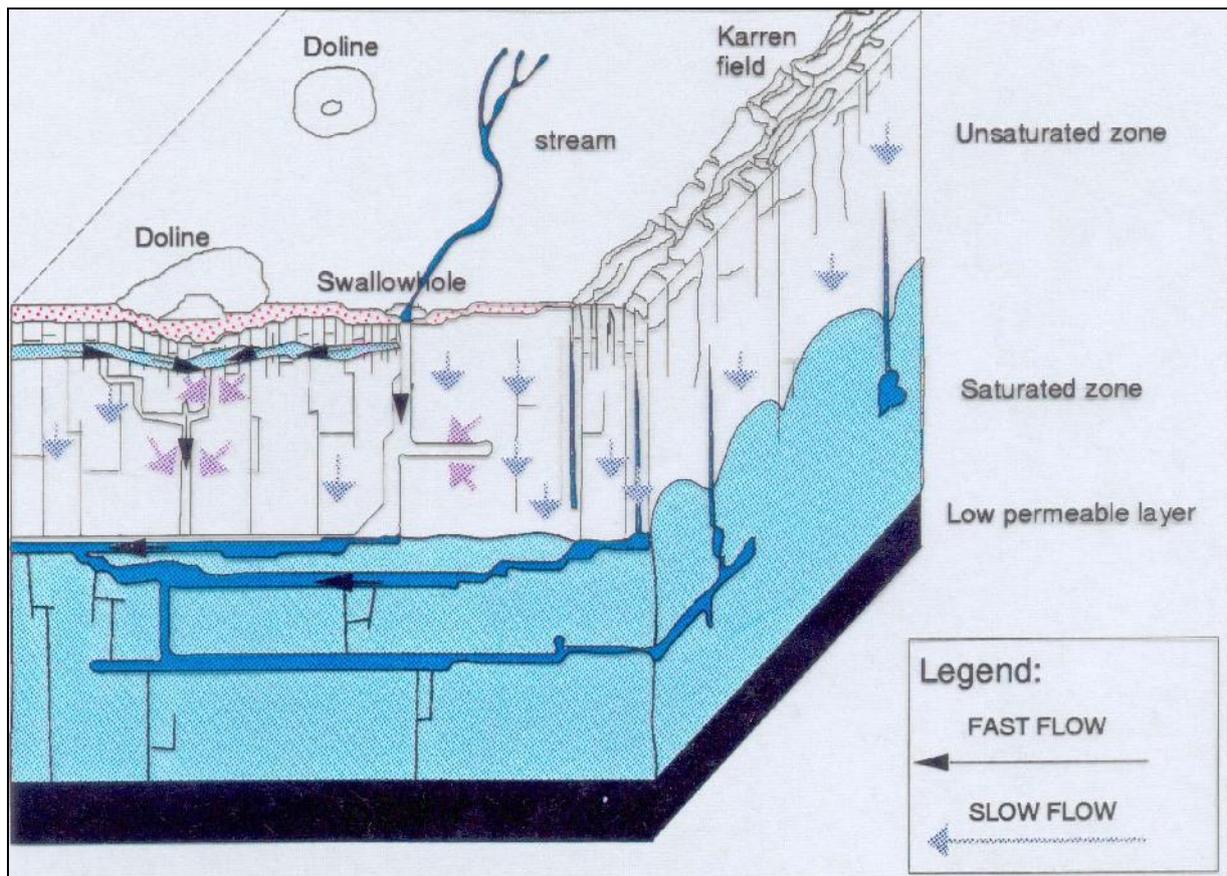
### Evaluation de l'indice de pluviosité

Date	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Mg/Ca	NO3	Conducti.	TDS	Temp
19/02/2013	310	297,5		8,5	1115	636	16,1
26/02/2013	300,5	289,7		6,8	1120	624	16
05/03/2013	297,3	280,5		4,5	1098	620	16,2
12/03/2013	282,7	268,6		5,7	1028	634	16
20/03/2013	276	250,3		7,3	1116	621	18
27/03/2013	272,6	228,8		7,2	1090	624	17
04/04/2013	267	220,5		6,3	1095	622	17,5
12/04/2013	258	209,6		8,4	1090	620	18
16/04/2013	250,2	197,8		6,1	1085	596	17,5
18/04/2013	238	192,3		4,7	1045	598	16
23/04/2013	235	193,6		5,8	1115	630	18
08/05/2013	241,5	189,2		4,7	1108	628	18
16/05/2013	238	178		4,5	1110	632	16
20/05/2013	241,7	169,8		4,2	1100	630	14,5
23/05/2013	247	170,3		4,9	1130	645	14
29/05/2013	239,6	161,5		4,7	1090	640	13,7
02/06/2013	237	158,2		6,2	1082	622	14

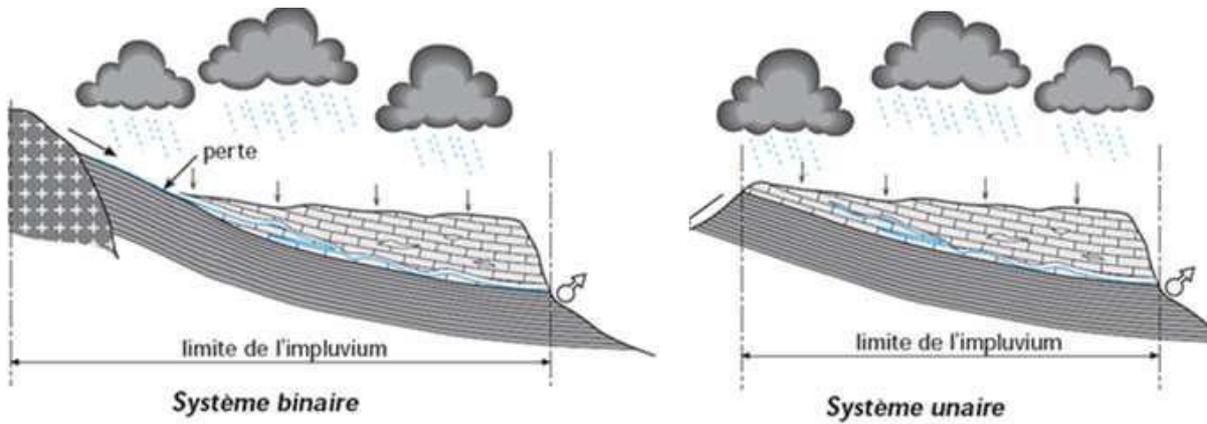
### Evolution chimique des eaux du forage aval



**Carte de la distribution spatiale des précipitations  
(ANRH 1993)**



**Structure karstique et type d'infiltration**



**Système karstique suivant l'impluvium (D'après Marsaud)**

