



N° d'ordre: 00000



# THÈSE

pour obtenir le grade de

## Docteur

de l'Université d'Es-Sénia - Oran  
en Sciences de la Terre, Option : Hydrogéologie  
&  
de l'Université de Franche-Comté  
en Sciences de la Terre et de l'Environnement

**Étude hydrodynamique et modélisation des écoulements  
souterrains dans les gouttières synclinales gréseuses  
du Barrémo-Albo-Aptien d'Aïn Séfra  
(partie centrale des Monts des Ksour –  
Atlas Saharien, Nord-Ouest Algérie)**

par

**Somia YOUSFI**

soutenue le 11 mai 2014 devant la commission d'examen

|                                |  |                           |
|--------------------------------|--|---------------------------|
| <b>Mr Mahammed MAHBOUBI,</b>   | <b>Professeur à l'Université d'Oran</b>            | <b>Président</b>          |
| <b>Mr Hamidi MANSOUR,</b>      | <b>Professeur à l'Université d'Oran</b>            | <b>Directeur de thèse</b> |
| <b>Mr Jacques MUDRY,</b>       | <b>Professeur à l'Université de Franche-Comté</b>  | <b>Directeur de thèse</b> |
| <b>Mr Larbi DJABRI,</b>        | <b>Professeur à l'Université d'Annaba.</b>         | <b>Rapporteur</b>         |
| <b>Mr Antonio PULIDO-BOSCH</b> | <b>Professeur à l'Université d'Almeria.</b>        | <b>Rapporteur</b>         |
| <b>Mme Naïma MABROUK</b>       | <b>Maitre de conférences à l'Université d'Oran</b> | <b>Examineur</b>          |
| <b>Mr Mustapha BENSALAH,</b>   | <b>Professeur à l'Université de Tlemcen.</b>       | <b>Invité</b>             |



*A mon cher mari*

## REMERCIEMENTS

Dieu soit remercié de m'avoir aidé, orienté et me donné la foi et le courage pour terminer ce travail.

Je tiens à remercier mes Directeurs de thèse Monsieur Hamidi MANSOUR et Monsieur Jacques MUDRY pour leur confiance, leur aide et d'avoir accepté de me faire bénéficier de leur savoir et de leur expérience. Merci pour leur disponibilité et leur encouragement constant.

Ce travail, en cotutelle entre les universités d'Oran (Algérie) et de Franche Comté (France), a vu le jour grâce à l'aide accordée par les responsables des deux établissements. Qu'ils y trouvent tous mes remerciements et ma profonde gratitude.

Je tiens également à remercier les membres du jury d'avoir pris le temps de juger mon travail : Mahammed MAHBOUBI, président du jury, Larbi DJABRI et Antonio PULIDO-BOSCH rapporteurs, Mustapha BENSALAH, Naïma MABROUK examinateur ; merci pour toutes leurs remarques et conseils que j'ai essayé de suivre pour finaliser ce document.

Je remercie chaleureusement Monsieur Mustapha BENSALAH, le Doyen de la Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie et des Sciences de la Terre et de l'Univers de l'Université de Tlemcen pour son soutien, ses encouragements et les facilités qu'il a pu m'accorder.

J'ajoute une mention spéciale à Monsieur Abderrahmane RAHMANI pour sa disponibilité et ses explications lors de mon stage sur terrain, également à Monsieur Mohamed BENTOUMI pour son apport en outils informatiques et ses précieux conseils.

Je remercie également le personnel de l'ANRH d'Oran pour m'avoir fait profiter des données, et un merci particulier à Monsieur Abdelhamid ACHACHI de m'avoir fait bénéficier de ses expériences en hydrogéologie.

Je tiens à remercier très vivement mon cher mari pour son soutien « psychologique », sa disponibilité, sa compréhension, son aide et son apport scientifique, sa patience, ses qualités humaines et son amour durant toutes ces années de préparation de ma thèse.

Un grand merci pour mes parents, mes frères et mes sœurs pour leur encouragement et leur soutien.

# TABLE DES MATIERES

|   |    |
|---|----|
| <b>REMERCIEMENTS</b>  |    |
| <b>TABLE DES MATIERES</b>   |    |
| <b>LISTE DES FIGURES</b>  | 4  |
| <b>LISTE DES TABLEAUX</b>   | 5  |
| <b>RESUME</b>   | 6  |
| <b>ABSTRACT</b>   | 8  |
| <b>INTRODUCTION</b>   | 10 |
| <br>  |    |
| <b>PARTIE 1 : CONTEXTE GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE</b>  | 12 |
| Introduction  | 13 |
| I- Présentation générale des Monts des Ksour  | 14 |
| I-1. Historique des recherches  | 14 |
| I-2. Relief général et réseau hydrographique  | 15 |
| II- Présentation de la zone d'étude   | 18 |
| III- Contexte géologique de la région d'Aïn Séfra   | 18 |
| II-1. Lithostratigraphie  | 19 |
| II-2. Contexte structural   | 26 |
| IV- Aspect géomorphologique   | 29 |
| V- Étude hydrodynamique des écoulements des gouttières synclinales d'Aïn Séfra  | 33 |
| V-1. Limites du bassin hydrogéologique étudié   | 33 |
| V-2. Grandes formations hydrogéologiques et leurs exutoires   | 34 |
| 2-1. Aquifère multicouche du Jurassique   | 34 |
| 2-2. Aquifère multicouche du Continental Intercalaire (CI)  | 35 |
| 2-3. Aquifère alluvionnaire du Plio-Quaternaire (RPQ)   | 38 |
| V-3. Géométrie de l'aquifère du CI  | 38 |
| V-4. Identification hydrodynamique de l'aquifère du Continental Intercalaire (CI) et le remplissage plio-quaternaire (RPQ) de la région d'Aïn Séfra | 40 |
| V-5. Rôle de la fracturation dans la circulation des eaux   | 43 |
| Conclusion  | 44 |
| <br>  |    |
| <b>PARTIE 2 : ESTIMATION DE LA RECHARGE</b>   | 46 |
| Introduction  | 47 |
| I- Aspect climatologique de la région   | 47 |
| II- Données disponibles et la représentation des paramètres climatiques   | 48 |
| II-1. Pluviométrie  | 48 |
| II-1-1. Données annuelles   | 48 |
| II-1-2. Données mensuelles  | 50 |
| II-2. Température   | 50 |
| III- Evaluation de la pluie efficace  | 51 |
| III-1. Interpolation des données  | 51 |
| III-2. Calculs de l'ETR et PE   | 52 |
| III-2-1. Conditions lithologiques et morphologiques   | 52 |

|   |           |
|---|-----------|
| III-2-2. Conditions pédologiques  | 54        |
| III-2-3. Estimation de la RFU et méthodologie de calcul   | 55        |
| III-3. Résultats  | 57        |
| IV-Bilan hydrologique et l'estimation de la recharge  | 59        |
| Conclusion  | 59        |
| <b>PARTIE 3 : ROLE DE L'HYDROCHIMIE DANS L'IDENTIFICATION DES<br/>ECOULEMENTS SOUTERRAINS</b>           | <b>61</b> |
| Introduction  | 61        |
| I- Composition chimique des eaux des aquifères (RPQ et du Cl)   | 61        |
| II- Origine de la minéralisation  | 63        |
| II-1. Principe  | 63        |
| II-2. Application   | 65        |
| II-3. Résultats et perspectives   | 66        |
| Conclusion  | 69        |
| <b>PARTIE 4 : ESSAI DE MODELISATION HYDRODYNAMIQUE DE L'UNITE<br/>HYDROGEOLOGIQUE DE GARET EL KHEIL</b> | <b>70</b> |
| Introduction  | 71        |
| I. Le modèle conceptuel de l'aquifère du Cl de Garet El Kheil   | 71        |
| I-1. Domaine à modéliser et conditions aux limites  | 71        |
| I-2. Caractéristiques hydrodynamiques et débits prélevés  | 72        |
| II. Modèle numérique en régime permanent  | 73        |
| III. Bilan des flux de la nappe   | 73        |
| IV. Réponses de l'aquifère aux variations climatiques et aux sollicitations<br>anthropiques             | 75        |
| IV-1. Scénario n°1 (-50% de la recharge)  | 75        |
| IV-2. Scénario n°2 (+100% de débit de pompage)  | 75        |
| Conclusion  | 76        |
| <b>CONCLUSION GENERALE</b>  | <b>78</b> |
| <b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b>  |           |
| <b>ANNEXES</b>  |           |

## LISTE DES FIGURES

- Figure 1: Les grands traits morphologiques de l'Atlas saharien occidental
- Figure 2 : Le réseau hydrographique (Institut géographique)
- Figure 3: Carte géologique de la région d'Aïn Séfra (Galmier 1972, Carte Photogéologique d'Aïn Séfra)
- Figure 4 : La formation de Tiloula
- Figure 5 : La formation de Tiout
- Figure 6 : Les affleurements du Barrémien au niveau du synclinal de Skhouna-Aïn Séfra
- Figure 7 : Les formations dunaires (du Nord et Nord-Est du Djebel Mekter : Oued Breidj)
- Figure 8: Attributions stratigraphiques proposées pour les formations détritiques dans la région d'Aïn Séfra
- Figure 9: a : Les grands traits structuraux de l'Atlas saharien occidental (S. Elmi 1978) ;  
b :Réseau de fracturation et continuité des accidents tectoniques cassants (A. K. Yelles Chaouche et al, 2001 in H. Mansour 2007)
- Figure 10: Carte structurale de la partie occidentale et centrale des Monts des Ksour (la base de la carte photogéologique de D. Galmier 1972, et l'accident Ras Touil-Aïn Séfra)
- Figure 11 : Carte schématique des affleurements des formations hydrogéologiques perméables, semi-perméables du bassin d'Aïn Séfra.
- Figure 12: Propriétés hydrogéologiques du Jurassique Supérieur et du Cl de la région d'Aïn Séfra.
- Figure 13: Mécanismes d'émergences des sources du Jurassique : a : Aïn Beïda et Aïn Srara ;  
b :Hassi Haï ; c :Aïn Boudema
- Figure 14: Mécanismes d'émergences des sources du Cl : a : Hassi Belflouf ; b : Aïn Skhouna et Aïn Djara
- Figure 15 : La source de Tiout
- Figure 16: Le réseau hydrographique de la région d'Aïn Séfra et les principales émergences.
- Figure 17: Carte en courbes isobathes de l'aquifère du Cl de l'unité hydrogéologique de Garet El Kheil.
- Figure 18: Carte hydrogéologique de la région d'Aïn Séfra
- Figure 19: Schéma hydro-structural des gouttières synclinales d'Aïn Séfra
- Figure 20: Carte piézométrique du synclinal d'Aïn Séfra (septembre 2008)
- Figure 21: Variation des précipitations annuelles (1980-2010)
- Figure 22: Histogramme de répartition des précipitations annuelles (1980-2010)
- Figure 23: Variation des précipitations moyennes mensuelles (1980-2010)
- Figure 23: Variation des températures moyennes mensuelles (1980-2010)
- Figure 25 : a : Situation des stations météorologiques des Monts des Ksour ;  
b: Gradient pluviométrique des Monts des Ksour
- Figure 26 : Représentation géologique en 3 D de la région d'étude
- Figure 27: Carte pédologique de la région centre de la wilaya de Naâma. (S. Djebaili et al 1982, in A. Bensaïd 2006)

*Figure 28 : Organigramme de calcul de l'ETR et PE*

*Figure 29 : P et PE calculées pour les deux impluviums durant les trois années repères*

*Figure 30: PE et ETR journalières durant les trois années repères: a : 1983 ; b : 2006 ; c : 2008.*

*Figure 31 Organigramme du bilan hydrique*

*Figure 32: Diagramme logarithmique vertical. Eaux de la région d'Aïn Séfra*

*Figure 33 : Distribution de la minéralisation des eaux des gouttières synclinales d'Aïn Séfra (sur la carte structurale)*

*Figure 34 : Analyse en Composantes Principales. Espaces des variables, plan factoriel IxII.*

*Figure 35 : Analyse en Composantes Principales. Espaces des individus, plan factoriel IxII*

*Figure 36 : a: Analyse discriminante des données hydrochimiques : classification 'lithologique'; b: Analyse discriminante des données des hydrochimiques: classification 'structurale'*

*Figure37 : Discrétisation du domaine et conditions aux limites*

*Figure38 : Comparaison des potentiels calculés et mesurés ( $H_c = F(H, m)$ ) de toutes les mailles en régime permanent*

*Figure 39 : comparaison des potentiels mesurés et calculés après calage en régime permanent*

*Figure 40 : Représentation des H de la simulation en régime permanent, premier et second scénarios.*

*Figure 41 : Paramètres, étapes, résultats et recommandations pour une meilleure gestion de la ressource en eau du synclinal d'Aïn Séfra*

## **LISTE DES TABLEAUX**

*Tableau 1 : Précipitations moyennes inter annuelles des stations des Mont des Ksour*

*Tableau 2: Classement 'lithologique' des eaux (forages et sources)*

*Tableau 3: Classement 'structural' des eaux (forages et sources)*

*Tableau 4 : Valeurs de la transmissivité utilisées pour le modèle conceptuel*

*Tableau 5 : Bilan de la nappe calculé après calage*

## RESUME

L'Atlas saharien sud oranais où les Monts des Ksour forment une région montagneuse constituée de chaînons allongés orientés Sud-Ouest – Nord-Est. Les dépressions crétacées sont représentées par des synclinaux à fond plat surplombés par des anticlinaux principalement jurassiques.

Les formations gréseuses crétacées appelées « Continental Intercalaire » de la région d'Aïn Séfra renferment une importante ressource en eau destinée à l'alimentation en eau potable et à l'irrigation.

L'étude hydrogéologique et l'identification des aquifères de la région montrent l'importante interconnexion entre l'aquifère jurassique et le Continental Intercalaire.

La recharge naturelle des aquifères sous un climat semi-aride est le terme du bilan hydrique le plus délicat à déterminer. La méthodologie proposée est une approche par interpolations spatiales et temporelles des données de précipitations journalières et de températures moyennes mensuelles mesurées à une station, durant trois années repères (1983 :sèche, 2006 :moyenne et 2008 :humide). Elle est très « pratique » dans des régions où les données climatiques sont limitées et discontinues dans l'espace et dans le temps. Son application nécessite des connaissances sur la nature du sol, la surface et l'altitude des impluviums.

Cette étude nous a permis d'estimer, à partir des gradients pluviométrique et thermique, la lame d'eau tombée sur les affleurements jurassiques à une altitude moyenne de 1600 m, et les valeurs de l'évapotranspiration (ETP) dans tout le bassin étudié.

La pluie efficace calculée, et le débit d'alimentation de l'aquifère, par son impluvium calcaréo-gréseux en altitude et gréseux dans les dépressions, montrent que l'aquifère du Continental Intercalaire est alimenté principalement par les affleurements du Jurassique surplombant les dépressions gréseuses, durant les années pluvieuses où les précipitations dépassent 300 mm par an.

Les caractéristiques chimiques des eaux ont fait l'objet de différentes analyses statistiques afin de tenter d'expliquer l'origine d'une minéralisation assez élevée (entre 2000 et 4000 mg/l). Dans une première approche, l'emploi de l'analyse en composantes principales (ACP) met en évidence trois familles d'eau correspondant aux trois niveaux

aquifères exploités. Dans une seconde étape, l'analyse factorielle discriminante croisée (AFD) caractérise l'importance et la dominance des paramètres responsables de cette minéralisation, en relation avec le cadre géostructural du système hydrogéologique des gouttières synclinales d'Aïn Séfra ; les contacts anormaux entre les formations gréseuses du Continental Intercalaire et les structures diapiriques argilo-gypso-salines du Trias forment les principales zones de contamination.

Après avoir estimé la recharge efficace (qui varie entre 0 pour une année sèche et 684 mm/ an une année humide) et identifié les écoulements souterrains et pour prévoir le comportement hydrodynamique des gouttières synclinales d'Aïn Séfra, il est primordial de réaliser un modèle mathématique. Nous n'avons pu réaliser que le modèle de l'unité hydrogéologique de Garet El Kheil, vu l'indisponibilité des données sur les deux autres unités (El Hanjir-Aïn Séfra, Aïn Séfra-Tiout). Nous avons choisi un calcul par différences finies à l'aide d'un code simple et pratique « ASMWIN ». Afin de déterminer l'impact du changement climatique et la surexploitation, deux scénarios d'exploitation ont été proposés : une recharge réduite de moitié (-50% :  $8 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$  au lieu de  $16 \cdot 10^6$ ) et un débit d'exploitation doublé (+100% :  $2.72 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$  au lieu de  $1.36 \cdot 10^6$ ). Ils nous ont révélé que la nappe est plus vulnérable aux changements climatiques qu'à la surexploitation, ce qui nous a permis de déduire que la nappe est encore en sous-exploitée.

**Mots clés :** Atlas saharien ; hydrodynamique ; pluie efficace ; hydrochimie ; analyse discriminante ; modélisation mathématique.

## ABSTRACT

The Saharan Atlas Mountains, South of Oran includes the 'Ksour Ridge', a mountainous region comprising SW-NE ranges. Cretaceous depressions are represented by flat-bottomed synclines overhung by anticlines, mainly Jurassic.

The sandstone formations, so-called Continental Intercalary, of the Ain Sefra region contain an unconfined significant water resource for drinking water and irrigation.

The hydrogeological study and identification of aquifers prove the important interconnection between the Continental Intercalary and the Jurassic aquifers.

In a recharge area characterized by a semiarid or an arid climate, therefore a low annual rainfall, effective rainfall is the hardest item to estimate, as it was demonstrated by classical monthly hydrological balance computations.

The methodology proposed in this work relies on spatial and temporal interpolations of scarce climatic data. This methodology can be used to determine the recharge flow to aquifers of these zones. The Ain Sefra's syncline includes the sandstone aquifers of Continental Intercalary and of the Plio-Quaternary layers. Three years, with contrasting annual rainfalls, are chosen in this application: 1983 as dry year, 2006 as average year, and 2008 as humid one. This application requires information about the soil nature, thickness and porosity, the surface and the altitude of the recharge areas. The rainfall and the recharge flow to aquifers indicate that the principal recharge areas are the Jurassic outcrops, mainly during the humid years, when the annual rainfall exceeds 300 mm.

The chemical characteristics of water have been submitted to different statistical analyses. As a first approach, a principal component analysis (PCA) displayed three clusters of water corresponding to the three aquifer layers which are exploited. Discriminant factor analysis (DFA) was used to characterize the importance and to rank the parameters responsible for this high mineralization (between 2000 and 4000 mg/l), namely: system characteristics (lithology), structural geology (fault and Triassic diapirs).

After estimating the effective recharge (ranging between 0 for a dry year, and 684 mm/year for a humid one) and identifying groundwater flow, and in order to predict the

hydrodynamic behavior of Ain Sefra's syncline, it is essential to implement a mathematical model. We were only able to establish the model of the Garet El Kheil hydrogeological unit, given the data unavailability on the other two units (El Hanjir-Ain Sefra, Ain Sefra-Tiout). We chose a finite difference method in permanent mode to improve knowledge of the hydraulic characteristics of aquifer, and to evaluate a complete hydrological balance, using the simple and convenient "ASMWIN" code. Exploitation of the model made it possible to determine the impact of the pumped yields, and the weather trends on the piezometric evolution of the aquifer. Two operating scenarios have been proposed: halving recharge (-50%:  $8 \cdot 10^6 \text{ m}^3 / \text{year}$  instead of  $16 \cdot 10^6$ ) and doubling the well's yield (+100 %:  $2.72 \cdot 10^6 \text{ m}^3 / \text{year}$ , instead of  $1.36 \cdot 10^6$ ). We conclude that the groundwater resource is more vulnerable to the climate change than intensive use of aquifers, meaning that the aquifer is underexploited at present.

**Keywords:** Saharan Atlas; hydrodynamics; effective rainfall, hydrochemistry, discriminant factor analysis, mathematical modeling.

# INTRODUCTION

L'Atlas saharien constitue un édifice plissé atlasique représenté par un grand alignement structural qui le subdivise en trois faisceaux de plis : les Monts des Oulad Naïl (Atlas saharien oriental), le Djebel Amour (Atlas saharien central) et les Monts des Ksour (Atlas saharien occidental).

Les affleurements, essentiellement jurassiques, forment des structures anticlinales longues et étroites, séparés par de larges synclinaux où les affleurements gréseux du Crétacé inférieur constituent les grands systèmes hydrogéologiques.

## **Problématique**

La région d'Aïn Séfra, qui fait partie des Monts des Ksour, a connu ces dernières années un développement considérable dans le domaine de l'agriculture, ce qui a poussé les responsables à élaborer des études géophysique et hydrogéologiques, afin d'exploiter les eaux souterraines de la région. Dans ce cadre, un ensemble de forages a été réalisé dans tout le synclinal, avec une exploitation de plus de 30 000 m<sup>3</sup>/jour.

Le cadre géologique et structural ont été bien détaillés dans les travaux de Cornet (1952), Galmier (1972), Bassoulet (1985), et Kacemi (2005).

Nous avons tenté dans le présent travail de répondre aux problématiques suivantes :

- l'identification des niveaux aquifères du synclinal d'Aïn Séfra ;
- la recharge efficace de l'aquifère du Continental Intercalaire ;
- la relation entre l'écoulement souterrain et la structure géologique de la région ;
- la prévision du comportement de la nappe face au changement climatique et à l'exploitation intensive.

## **Démarche**

Ce travail est subdivisé en quatre parties :

- la première partie est consacrée à l'étude géologique et hydrogéologique de la zone d'étude ;

- la deuxième partie est une étude climatique, dans laquelle nous avons élaboré une méthodologie d'estimation de la recharge sous un climat semi-aride à aride ;
- dans la troisième partie, nous avons identifié les écoulements souterrains par le traitement statistique des données physico-chimiques des eaux des aquifères du remplissage plio-quaternaire et du Continental Intercalaire ;
- enfin la quatrième partie est consacrée à une modélisation mathématique hydrodynamique déterministe d'une des unités hydrogéologiques du synclinal d'Aïn Séfra, qui constitue un outil pour la gestion de la ressource en eau souterraine de cette région aride en plein développement urbain et agricole.

En conclusion, nous recommandons un suivi de la ressource souterraine dans cette région afin d'enrichir les bases de données et de réaliser un modèle numérique de tout le synclinal d'Aïn Séfra pour mieux gérer cette ressource.

## **PARTIE 1 : CONTEXTE GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE**

### **I- Présentation générale des Monts des Ksour**

#### **I-1. Historique des recherches**

#### **I-2. Relief général et réseau hydrographique**

### **II- Présentation de la zone d'étude**

### **III- Contexte géologique de la région d'Aïn Séfra**

#### **II-1. Lithostratigraphie**

#### **II-2. Contexte structural**

### **IV- Aspect géomorphologique**

### **V- Étude hydrodynamique des écoulements des gouttières synclinales d'Aïn Séfra.**

#### **Introduction**

#### **V-1. Limites du bassin hydrogéologique étudié**

#### **V- 2. Grandes formations hydrogéologiques et leurs exutoires**

##### **V- 2-1. Aquifère multicouche du Jurassique**

##### **V- 2-2. Aquifère multicouche du Continental Intercalaire (CI)**

##### **V- 2-3. Aquifère alluvionnaire du Plio-Quaternaire (RPQ)**

#### **V- 3. Géométrie de l'aquifère du CI**

#### **V-4. Identification hydrodynamique de l'aquifère du Continental Intercalaire (CI) et le remplissage plio-quaternaire (RPQ) de la région d'Aïn Séfra**

### **Conclusion**

## Introduction

L'Atlas saharien est la partie algérienne d'un vaste ensemble montagneux s'allongeant sur près de 2000 Km depuis la région d'Agadir (au Maroc) jusqu'à la Tunisie. Cet Atlas est composé de chaînons allongés orientés généralement Sud-Ouest– Nord-Est ou Ouest-Sud-Ouest – Est-Nord-Est se succédant en relais sur une largeur de l'ordre de 100 à 200 Km. Il est affecté par deux grandes lignes structurales, entre les Plaines sahariennes au Sud et les Hautes Plaines au Nord, correspondant respectivement aux accidents sud et nord atlasiques.

L'Atlas saharien sud oranais, les Monts des Ksour forment une région montagneuse depuis la frontière marocaine, avec des massifs d'aspect trapu atteignant 2000 m.

Les Monts des Ksour, selon une zonation transversale d'une direction nord-sud proposée par S. N. REPAL (1952) se subdivise en trois zones :

- La zone pré-atlasique (Méchria) à structure peu marquée et à faible relief topographique ;
- La zone atlasique (Aïn Séfra) fortement plissée. La limite entre les deux zones est soulignée par des rides anticlinales dominant le pré-Atlas correspondant à l'accident Nord atlasique (D. Galmier, 1970 in H. Mansour, 2007), qui fait l'objet de notre étude ;
- La zone pré-saharienne (Béni Ounif), constituant l'extrémité méridio-occidentale des Monts des Ksour.

Cette première partie a pour objectif de représenter la zone d'étude sous ces différents aspects : géologique, géomorphologique et hydrogéologique, afin de mieux analyser la ressource en eau dans son environnement.

Pour une raison de simplicité, nous avons utilisé le terme « Néocomien » actuellement dénommé Crétacé inférieur.

## I - PRESENTATION GENERALE DES MONTS DES KSOUR

### I-1. Historique des recherches

Les Monts des Ksour ont fait l'objet de nombreuses études depuis 1852. Des connaissances fondamentales sur la tectonique, la géomorphologie, la stratigraphie, la paléontologie, la sédimentologie et la pétrographie de l'Atlas saharien ont été apportées par la thèse de **Flamand** (1889-1911) qui a servi de base pour les études récentes (Kacemi A. 2005).

En 1952, **Cornet** a étudié la stratigraphie du Trias au Quaternaire ainsi que la structure d'une grande partie des Monts des Ksour et la limite occidentale de Djebel Amour.

A partir de l'interprétation des photos aériennes, **Galmier** a réalisé une étude photogéologique de la région d'Aïn Séfra, dont il a élaboré neuf cartes au 1/ 100 000<sup>ème</sup>. Les faciès ont été représentés par des unités lithostratigraphiques notées de 1 à 31. « Ces cartes se révéleront être un guide précieux pour la prospection des ressources minérales, de l'eau et des matériaux divers » (D. Galmier 1972) (fig. 3).

En 1973 **Bassoulet** (fig. 4) a présenté un travail fondamental sur la stratigraphie du Mésozoïque des Monts des Ksour, dont il a présenté de nouvelles datations et une subdivision des ensembles lithostratigraphiques. Sur le même cadre géographique, **Douïhasni** (1974, 1976) a défini de nouvelles subdivisions supplémentaires et il a présenté une importante étude structurale et une analyse de fracturation à partir de la photo aérienne.

**Delfaud** (1973-1987) a publié plusieurs notes sur la sédimentologie, l'analyse séquentielle, le remplissage du bassin atlasique et le complexe deltaïque des Ksour.

Les études géophysiques ont été réalisées en 1974 par **CGG** intitulées « Contribution des études géophysique par prospection électrique pour la reconnaissance des aquifères des structures déprimées des Monts des Ksour » (fig. 12).

**KaziTani**, en 1986 a présenté une synthèse de l'évolution géodynamique de la bordure Nord-africaine en se basant sur une approche *mégaséquentielle*.

**Aït Ouali** (1991) a réalisé une étude sédimentologique et géodynamique ainsi qu'une analyse stratigraphique basée sur une approche séquentielle.

**Rahmani** (1993) a travaillé dans son mémoire d'ingénieur sur la contribution à l'étude hydrogéologique du synclinal des gouttières synclinales El Handjir–Aïn Séfra – Tiout (partie centrale des monts des Ksour).

En 1995, **Mekahli** a réalisé une importante étude sur l'évolution des Monts des Ksour de l'Hettangien au Bajocien, dont il a défini de nouvelles formations dans l'Infralias-Bajocien.

En 2005, une étude sédimentologique des formations des Monts des Ksour, une analyse séquentielle et une interprétation paléogéographique ont été réalisées par **Kacemi**. Ce travail a mis en évidence une évolution environnementale de cette région (fig. 4).

En 2007, une importante étude hydrogéologique des Monts des Ksour a été réalisée par **Mansour**, dont il a déterminé les grandes unités hydrogéologiques et réalisé une carte hydrogéologique sur une base géologique d'un jeu de six cartes photogéologiques.

En 2008, **Rahmani** a cartographié les paramètres hydrogéologiques du synclinal d'Aïn Séfra. Il a réalisé une campagne piézométrique, une étude hydrochimique et une importante synthèse hydrogéologique (fig. 15).

## **I-2. Relief général et réseau hydrographique**

La partie occidentale de l'Atlas saharien constitue une zone montagneuse à chaînons allongés, de direction sud-ouest –nord-est, séparés par de larges dépressions (fig. 1).

Les sommets les plus élevés coiffent, vers l'Ouest de gros massifs : Djebel Mzi : 2145m ; Mir El Djebel : 2109m ; Djebel Mekter : 2020 m, tandis que vers l'Est, les chaînons plus allongés, mieux individualisés, sont un peu plus bas et atteignent exceptionnellement 2000m d'altitude (Djebel Ksel, vers El Bayadh).

Au Nord, les Hautes-plaines sud oranaises dépassent légèrement la cote 1100m. Au Sud, la plateforme saharienne reste au-dessous de la cote 900 m.

La presque totalité du réseau hydrographique, dans la région de l'Atlas saharien sud-oranais est orientée vers le Sud, le rebord nord présente un réseau très pauvre et peu important (fig.2).

Le Sahara reçoit quatre oueds dont leurs bassins versants sont, d'Ouest en Est : l'oued Zousfana relayé par la Saoura, l'oued Namous, l'oued Rharbi et l'oued Segguer :

- ***l'oued Zoufana*** prend son nom à la sortie des chaînons de Figuig (partie occidentale des Monts des Ksour). L'oued traverse en cluse ces chaînons entre Djebel Tarhla (1101 m) et le Djebel Sidi Youssef (1067 m). En amont l'oued traverse la dépression d'El Ardja (869 m), passe dans la dépression entre le Djebel Mzi (1915 m) et le Djebel Amour (2160 m) ;
- ***l'oued Namous*** traverse entièrement la partie principale de la chaîne atlasique en portant successivement les noms d'oued Sfissifa, oued El Breidj (sur Aïn Séfra), oued Rouïba, oued Namous. Il est alimenté en divers points par des aquifères qui lui assurent localement un écoulement pérenne. Son bassin versant est important, drainant toute la région d'Aïn Séfra. La partie supérieure de son cours, à l'Ouest de Sfissifa, traverse les grès du Jurassique supérieur, et rejoint l'oued Sfissifa par une cluse profonde. En amont d'Aïn Hadjadj, il reçoit en rive gauche l'oued Tiout qui draine la cuvette gréseuse crétacée situé au Nord de Tiout. Au Sud de Mograr Tahtania, il reçoit en rive droite l'oued Mograr. A son arrivée au Sahara, vers 790 mètres d'altitude, l'oued Namous traverse les formations du Tertiaire Continental, puis va se perdre sous le Grand Erg Occidental ;
- ***l'oued El Rharbi*** dévale parallèlement au pied sud de l'Atlas sur une centaine de kilomètres. Sa partie supérieure coupe les calcaires turoniens relevés à la verticale, au débouché d'une vaste dépression albiennne en partie recouverte d'alluvions quaternaires. Son bassin est plus morcelé, plus complexe. En effet, il débouche au Sahara. Son affluent principal, le Chergui, draine toute la partie occidentale du bassin. Il collecte aussi les petits bassins montagneux plus ou moins marécageux (région d'Asla) ;
- ***l'oued Segguer*** prend sa source dans la région d'El Bayadh à 1800 m d'altitude sous le nom de Ghassoul puis de Mouilah. Il gagne la région de Brezina où il prend son nom de Segguer. Ayant franchi la Hamada, l'oued débouche sur le Grand Erg occidental. Le bassin théorique de l'oued Segguer peut s'étendre sur 8900 km<sup>2</sup> ; sa superficie se réduit à 3900 km<sup>2</sup> si on le limite à la hauteur de Brezina (au Sud d'El Bayadh).

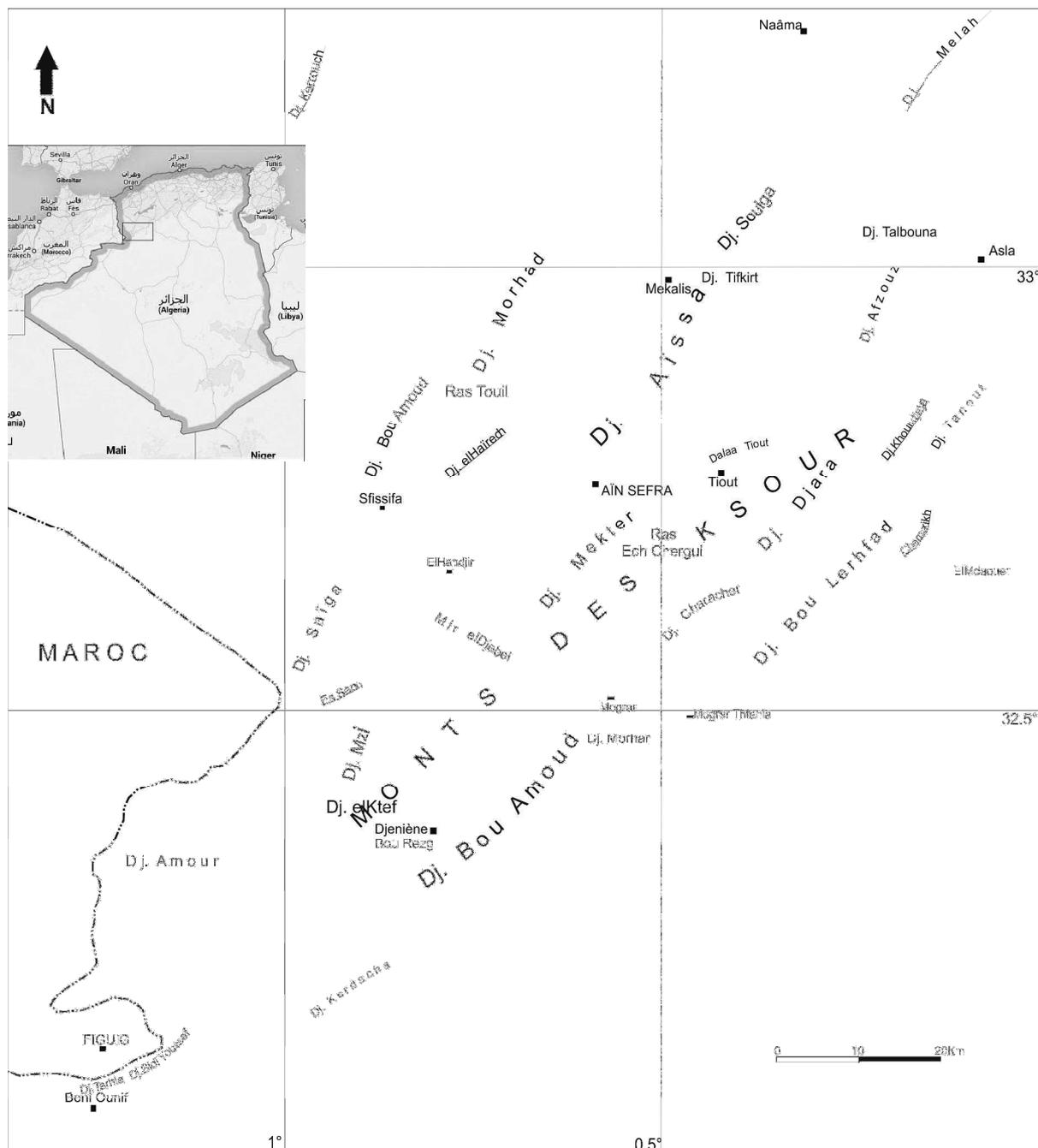


Figure 1: Les grands traits morphologiques de l'Atlas saharien occidental

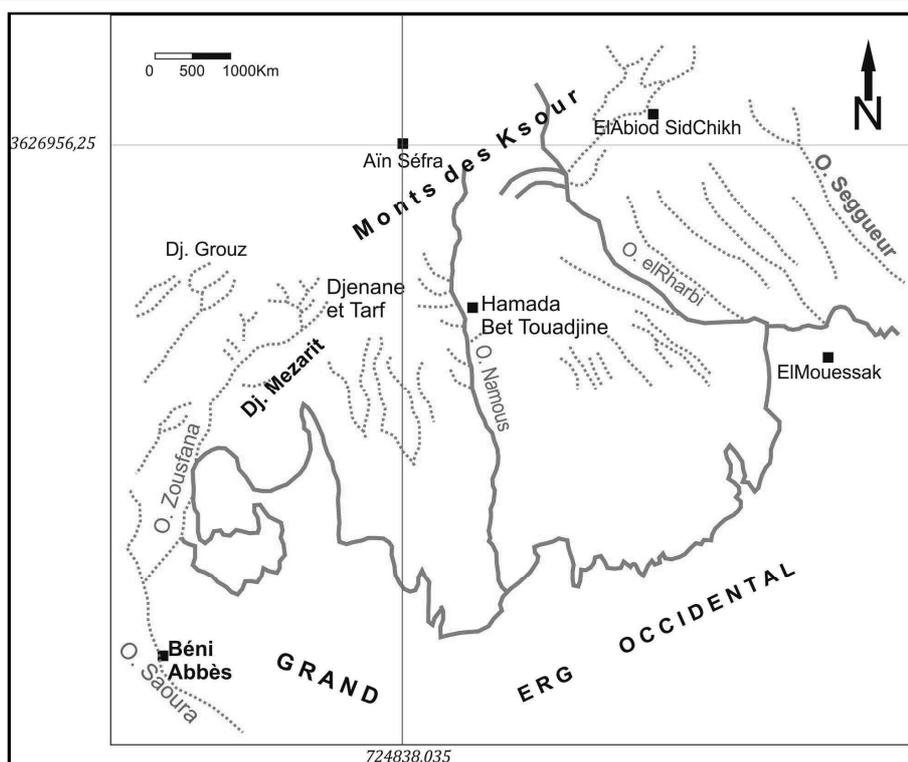


Figure 2 : Le réseau hydrographique (Institut géographique)

## II- PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

La région étudiée est située dans la partie centrale de Monts des Ksour, à proximité de la ville d'Aïn Séfra. Elle couvre la partie nord de la carte 1/ 100 000<sup>ème</sup> d'Aïn Séfra ; elle correspond à deux cuvettes (fig. 1) :

- la cuvette d'Aïn Séfra – Tiout – El Handjir : limitée au Sud par le Djebel Mekter, au Nord par le Djebel Aïssa et le Djebel Hirech ;
- la cuvette de Garet ElKheil : c'est la partie sud de la grande dépression de Mékalis : elle est limitée au Sud-Est par le Djebel Aïssa et le Djebel Hirech, au Nord-Ouest par le Djebel Morhad et Ras Touil.

## III- CONTEXTE GEOLOGIQUE DE LA REGION D'AÏN SEFRA

La lithostratigraphie des formations géologiques de l'Atlas saharien occidental est bien connue grâce à la cartographie géologique aux études de photogéologie de D. Galmier (1972) et celles stratigraphiques de JP. Bassoullet (1973). Les travaux de terrain et les levés détaillés de cinq coupes significatives réalisés par A. Kacemi en 2005 dans notre secteur d'étude, précisent toutes les particularités sédimentaires des formations et leur épaisseur.

Ces études nous permettront, non seulement de réaliser une attribution stratigraphique comparative des formations du Jurassique supérieur et Crétacé inférieur mais également nous servir de base pour notre analyse hydrogéologique.

Les Djebels de la région d'Aïn Séfra sont des anticlinaux essentiellement constitués de terrains jurassiques, alors que les cuvettes sont des synclinaux à fond plat constituées par les terrains crétacés et plio-quaternaires.

La série stratigraphique de la zone d'étude s'étale des terrains d'âge Jurassique supérieur au Quaternaire récent avec des diapirs triasiques (fig. 3, 4).

### **III-1. Lithostratigraphie**

#### **III-1-1. Trias**

Apparaît fréquemment dans la région d'Aïn Séfra, représenté par des argiles versicolores bariolées gypso-salines, du basalte doléritique et de roches à structure ophitique (M. Douihasni 1976), le plus souvent en liaison avec les fracturations de la couverture. Il affleure soit en masse diapirique soit en injection le long des grandes fractures de directions diverses par rapport aux axes des anticlinaux et des synclinaux (J.P. Bassoullet 1973).

Trois zones d'affleurement du Trias, dans la région d'Aïn Séfra ont été définies par D. Galmier (1972) :

- au niveau d'El Handjir, l'ensemble triasique est monté à la faveur d'une bande nord-sud, présentant une densité de fracturation importante ;
- au contrefort nord du Djebel Mekter, au Sud d'Aïn Séfra, connu par une importante fracturation et un repli anticlinal, apparaissent plusieurs pointements triasiques ;
- au Sud de Tiout près d'Aïn Srara : un repli anticlinal présente sur son axe plusieurs pointements triasiques masqués partiellement par les terrains tertiaires.

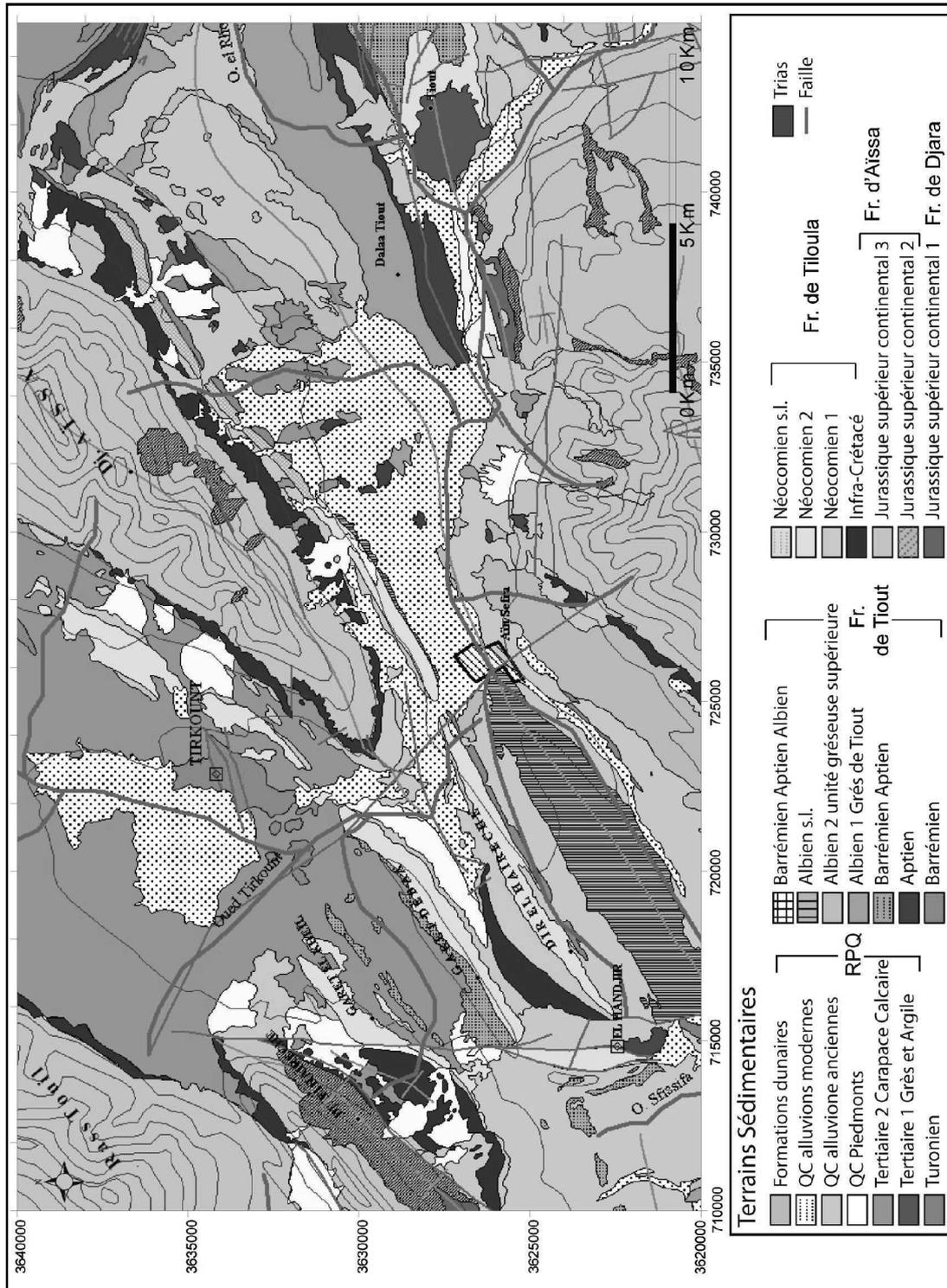


Figure 3: Carte géologique de la région d'Aïn Séfra (D. Galmier 1972)

### III-1-2. Jurassique moyen- supérieur :

C'est une alternance d'argiles, grès et dolomies d'une épaisseur de **400 m**, nommée par J.P. Bassoullet (1973) « **formation de Djara** » du Sommet du Bathonien à l'Oxfordien ; elle correspond au **Jurassique supérieur Unité 1** sur la carte (D. Galmier 1972). A l'Est d'Aïn Séfra sur le flanc nord du Djebel Mekter, cette unité affleure sur l'axe d'un anticlinal, et elle est en contact avec le Trias.

### III-1-3. Jurassique supérieur :

C'est un épais ensemble presque totalement détritique d'une épaisseur de **1000 m**, formant l'essentiel des reliefs de la région d'Aïn Séfra. La grande partie est appelée par J.P. Bassoullet (1973) « **formation d'Aïssa** ». La limite inférieure se situe juste à la disparition des bancs dolomitiques de la formation du Djara alors que sa limite supérieure est marquée par une sédimentation argileuse avec apparition de lits dolomitiques.

D. Galmier (1972) le subdivise en trois unités :

**a- Jurassique supérieur Unité 2** : c'est un ensemble argilo-gréseux et gréseux intermédiaire légèrement différent de la première unité avec une épaisseur approchant les **500 m**. Les crêtes des reliefs de la région d'Aïn Séfra sont constituées par des affleurements en forme de « boutonnières » ;

**b- Jurassique supérieur Unité 3** : c'est une série gréseuse d'une texture moutonnée, granuleuse et irrégulière correspondant à des grès variés, assez grossiers souvent peu consolidés et à stratifications entrecroisées. Cette formation atteint **200 m** d'épaisseur au Djebel El Hairech, formant ainsi presque la totalité de la masse des Djebel Mekter et Aïssa ;

**c- Infra-crétacé** : c'est une série gréseuse de transition d'environ **300 m** d'épaisseur. La base de cette formation est formée par des argiles pélitiques surmontées par une grande barre gréseuse se terminant vers le haut par une alternance de grès clairs. Sur le flanc nord-ouest du Djebel Aïssa, vers Hassi Bou Ghellaba, l'Infra-Crétacé disparaît, alors que sur le flanc sud-est, il se continue jusqu'à Tiloula ;

### III-1-4. Crétacé inférieur 'Néocomien'

Les séries « néocomiennes » constituent des repères intéressants :

- repères stratigraphiques, car elles représentent la seule possibilité de faire des coupures dans le puissant ensemble qui s'étend du Bathonien au début de la transgression cénomaniennne ;
- repères structurants car elles sont la preuve d'une « plasticité différentielle » remarquable, qui complique la formation des chaînons au moment de l'érection de l'Atlas (D. Galmier 1972).

Selon la nomenclature proposée par J.P. Bassoullet, cette série est appelée « **formation de Tiloula** » (500 m) (fig. 4). Elle est constituée par une alternance de marnes et d'argiles pélitiques versicolores gris vert ou violacées, de grès de teinte claire ou plus ou moins rubéfiés et de petits bancs de dolomies sublithographiques, appelés par certains auteurs « grès de Tiloula » (A. Kacemi 2005).

Au Nord d'Aïn Séfra, cette série forme les flancs des chaînons de Garet Debâa et Dir El Hirech où les affleurements sont formés par des argiles, marnes, calcaires et cargneules intercalés avec des grès. La surface des affleurements est plus importante au Sud-Ouest des dunes d'Aïn Séfra.



**Figure 4 : La formation de Tiloula**

### III-1-5. Crétacé inférieur 'Barrémien-Aptien-Albien' :

Avec une épaisseur de plus de **1000 m**, cet ensemble présente un faciès gréseux assez caractéristique. Ce sont de gros bancs de grès tendres gris ou roses « à dragées » occupant les plaines et les dépressions où ils affleurent en petits dômes **amygdaloïdes** très surbaissés. Connue sous l'appellation de « **formation de Tiout** » ou « **groupe de grès à dragées** » par M. Douihasni (1976) (fig. 5, 6), cette masse gréseuse à dragées forme les synclinaux à fond plat d'El Handjir-Aïn Séfra, Aïn Séfra-Tiout et celui de Garet El Kheil.



**Figure 5 : La formation de Tiout**

### III-1-6. Vraconien :

Il correspond à une alternance de **250 m** d'argiles à intercalation de bancs dolomitiques, et appelée par J. P. Bassoullet (1973) « **formation d'El Rhelida** ».

### III-1-7. Cénomaniens-Turonien :

Formant dans les Monts des Ksour, le terme supérieur de la série plissée mésozoïque, le Cénomaniens et le Turonien (**250 m**), n'affleure plus que sur des surfaces limitées. Par la photographie aérienne, D. Galmier (1972) a défini deux unités bien marquées mais leurs limites ne coïncident pas à des limites stratigraphiques :

- unité inférieure correspondant à une série de marne et d'argiles souvent gypsifères, renfermant des intercalations de petits bancs calcaires ;
- unité supérieure représentée par un ensemble de reliefs comprenant calcaires, calcaires dolomitiques et dolomies.



**Figure 6 : Les affleurements du Barrémien au niveau du synclinal de Skhouna-Aïn Séfra**

### **III-1-8. Mio-Plio-Quaternaire :**

Il s'agit d'un remplissage détritique, éolien qui comble les dépressions et les cuvettes, dont on peut définir la lithologie suivante dans la région d'Aïn Séfra et selon les études antérieures (D. Galmier 1972, J.P. Bassoullet 1973):

#### **a- Tertiaire Continental :**

Le Tertiaire est représenté par des dépôts d'abord détritiques et grossiers puis détritiques fins subhorizontaux, terminés par la fossilisation de leur surface sous forme d'une carapace calcaire. Les formations du Tertiaire Continental représentent de grandes variations lithologiques dues à la composition du substratum (D. Galmier 1972).

Il est constitué par des dépôts continentaux ou lagunaires (J.P. Bassoullet 1973 et M. Douihasni 1976). Cette formation comporte:

- une série attribuée au Mio-Pliocène formée de couches rouges argilo-gréseuses entrecoupées de niveaux gypsifères ;

- une formation épaisse rapportée au Pliocène formée de conglomérats hétérométriques appelés « poudingues de Ksour » ;
- une croûte horizontale de 1 à 2m d'épaisseur constituée de calcaires blanchâtres.

**b- Quaternaire :**

Le Quaternaire est une période d'érosion et de démantèlement, il est formé par :

- les piémonts et colluvions, constitués de cailloutis formant les brèches de pente ;
- les dépôts de comblement ;
- les alluvions anciennes et formations tufacées (Quaternaire ancien) : attribuées au Plio-Quaternaire et Quaternaire ancien, constituées par des formations argilo-sableuses et conglomératiques ainsi que des alluvions connues sous le terme de «formations tufacées» (D. Galmier 1972) ;
- les alluvions modernes (Quaternaire récent), constituées de sables, jalonnent les lits des oueds ;
- les formations dunaires : ces accumulations sableuses constituent les dunes qui jalonnent la partie nord et nord-est du Djebel Mekter (fig. 7).



**Figure 7 : Les formations dunaires (du Nord et Nord-Est du Djebel Mekter : Oued Breidj)**

### III-2. CONTEXTE STRUCTURAL DE LA REGION D'AÏN SEFRA

L'Atlas saharien est une chaîne intra-cratonique plissée, d'orientation NE-SO, située entre deux domaines stables (fig. 9-a et 9-b) :

- au Nord, le domaine des hautes plaines oranaises culminant à 1200 m d'altitude ;
- au Sud, le domaine saharien(ou plateforme saharienne) culminant à 800 m d'altitude.

Il s'agit d'un ensemble structural étendu depuis le Maroc à l'Ouest jusqu'en Tunisie à l'Est, limité :

- au Nord par l'accident nord atlasique, correspondant à la limite entre l'Atlas saharien occidental et les Hautes plaines oranaises, d'orientation SO-NE, qui est un accident complexe, le plus souvent décrochant, de rejet pouvant atteindre 1200 à 1500 m, d'origine profonde (A. Cornet 1947, 1952). Il n'est plus apparent au niveau d'Aflou (J.H. Delga 1952). Il fonctionne probablement depuis le Permo-Trias. L'interruption de cet accident est liée à la discontinuité d'un socle affecté par des cassures au Nord de la chaîne atlasique (R. Laffite 1939 *in* A. Kacemi 2005) ;

- au Sud par l'accident Sud atlasique correspondant à un accident complexe appelé aussi « Flexure sud atlasique » ; il s'agit d'un système de failles et de flexures qui se relaient du Sud-Ouest au Nord-Est, allant d'Agadir au Maroc jusqu'à Gabès en Tunisie, atteignant parfois un rejet supérieur à 2000 m, et résultant l'abaissement général du Sahara par rapport à sa bordure atlasique, les différentes failles constituant la flexure sud atlasique semblent s'établir de façon quasi-systématique sur le flanc sud des anticlinaux.

Les Monts des Ksour sont marqués par deux styles tectoniques distincts et un diapirisme remarquable :

#### III-2-1. Un style de tectonique cassante

Représenté par des failles de direction générale NE-SO, recoupées par d'autres accidents NO-SE. D'après D. Galmier (1972), les Monts des Ksour se divisent en trois zones principales, d'Ouest en Est :

- la première à l'Ouest paraissant plus structurée ;
- la deuxième étant d'un type intermédiaire avec des petits noyaux semi-rigides (Djebel Mekter) ;

- la troisième zone répondant à la définition classique (en chenilles processionnaires), avec une faible densité de fracturation et des phénomènes de coulissage plus importants.

### III -2-2. Un style de tectonique souple

Marqué par des plis coiffés séparés par des aires synclinoriales. Les terrains jurassiques constituent les grandes structures anticlinales formant des alignements orientés NE-SO (D. Galmier 1972).

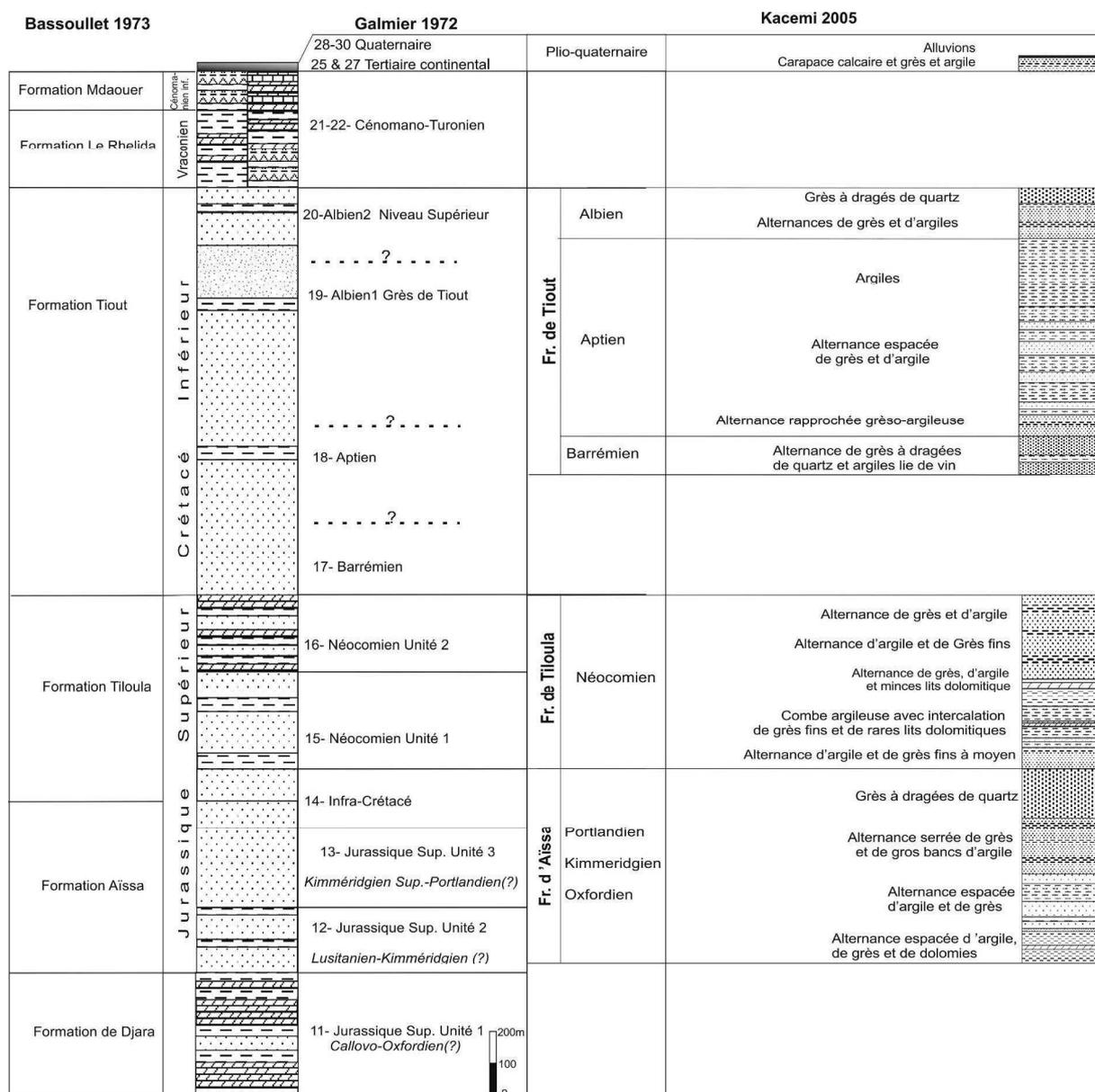


Figure 8 : Attribution stratigraphique des formations détritiques dans la région d'Aïn Séfra

### III -2-3. Les diapirs

L'évolution de l'Atlas saharien serait guidée à partir du Trias par la structuration du socle acquise lors de l'orogénèse hercynienne. Le jeu du Trias semble s'être produit en deux temps :

- une phase où il a joué le rôle de lubrifiant en accentuant les déplacements transversaux : phase longitudinale d'entraînement de la couverture ;
- une phase où sa plasticité a pu jouer en le faisant se plier en une structure diapirique, correspondant à la reprise de la tectonique verticale, et où il a entraîné dans sa montée des fragments de coulées volcanique (ophites). Cette phase se poursuit d'ailleurs encore actuellement (D. Galmier 1951 ,1972).

La région d'Aïn Séfra, faisant partie de la deuxième zone du type intermédiaire, la densité de fracturation, quoique plus faible, reste encore importante, et le panneau de socle a laissé moins de traces directes que la première zone à l'Ouest (fig. 10).

Dans cette seconde zone, il y a les trois divisions suivantes :

- le secteur à l'Ouest de l'accident N-Sd'El Hanjir ;
- le secteur des Djebel Aïssa, Djebel Mekter, concerné par notre zone d'étude, est caractérisé par une fracturation intense et des venues d'ophites et de Trias diapirique (le flanc est du Djebel Aïssa) et une importante zone de dislocation (Aïn El Hadjadj), le Djebel Mekter forme le dernier relief d'aspect trapu et compact avec une voûte surbaissée et coffrée, très fracturée dans plusieurs directions ;
- le secteur de la dépression de l'oued Namous qui marque la limite orientale des traces de tectonique cassante du socle profond (D. Galmier 1972).

Une synthèse de l'étude de la fracturation est basée sur des études de fissuration et de linéaments par imagerie satellitale dans les Monts des Ksour (A. Abada 1986, F. Mohiddine *et al.* 2012).

La première étude nous a permis de distinguer les directions suivantes :  $N70^{\circ}E$  à  $85^{\circ}E$ ,  $N110^{\circ}E$  à  $N140^{\circ}E$ ,  $N140^{\circ}E$  à  $N160^{\circ}E$ . La seconde qui étudie les cartes d'Aïn Séfra, Forthassa Rharbia, Djenien Bou Rezg et Moghrar Foukania, révèle un éventail de différentes directions :  $N70^{\circ}E$  à  $N90^{\circ}E$ ,  $N90^{\circ}E$  à  $N110^{\circ}E$ ,  $N110^{\circ}E$  à  $N130^{\circ}E$ .

Dans la même étude, l'analyse statistique des linéaments a montré que :

- la majeure partie de linéament a une direction N70°-N90° ;
- le Jurassique comporte la grande partie des linéaments d'une direction principale de N70° à N90° ;
- les plus longs linéaments, correspondant à des accidents de grande extension, ont une direction N90°-N110° ;
- les linéaments dans le Crétacé ne représentent qu'un dixième et ceux dans le Tertiaire que 7%.

Nous pouvons donc déterminer trois directions préférentielles : NE-SO, NO-SE et N-S, qui coïncident avec les directions déjà déterminées et confirment les études antérieures.

#### **IV- Aspect géomorphologique**

Les différentes unités morphologiques des Monts des Ksour (fig. 3 & fig. 10)

##### **IV-1. Les chaînons**

L'ossature des Monts des Ksour est constituée par un massif tabulaire où se développe entre les méridiens de Figuig (Maroc) et de Tiout, une série du Jurassique Supérieur Continental formée par :

- Djebel Amour (2160 m), Djebel Seffah (1850 m), Djebel Abiène (1762 m) ;
- Djebel Azi (2187 m), prolongé au SO par le Djebel Ktef (1776 m) ;
- Mir el Djebel (2062 m), relié au Mzi par le col de Founassa ;
- Djebel Mekter (2062 m) qui s'abaisse lentement vers l'Est en se coffrant jusqu'à la route d'Aïn Séfra – Béchar ;
- au Nord-Est d'Aïn Séfra, le Djebel Morhad (2136 m au Ras Touil), au Sud-Ouest le Djebel Bou-Amoud (1692 m) ;
- entre Sfisifa et Fortassa, une importante pénéplaine à dominante gréseuse s'ennoie sous les hauts plateaux au Nord-Est.

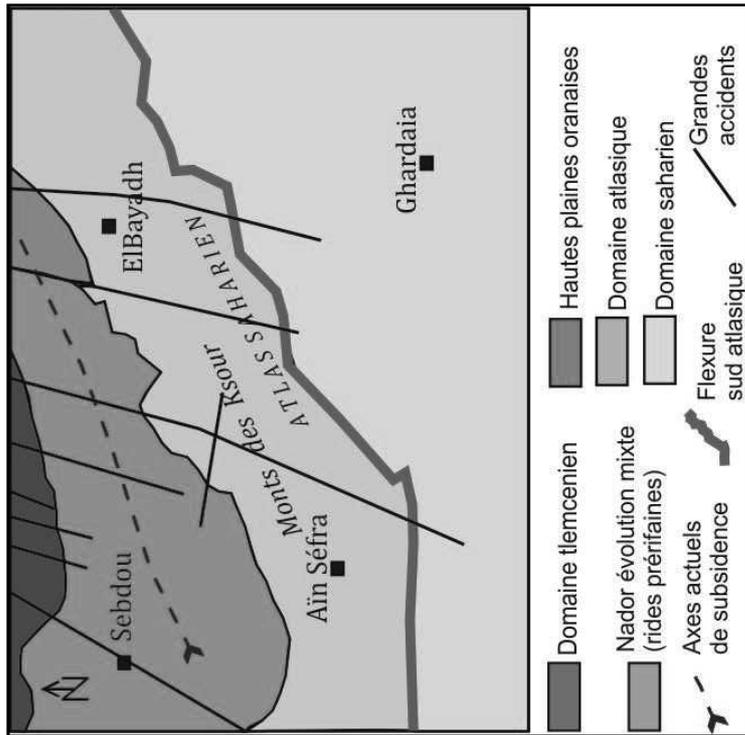


Figure 9-a : Les grands traits structuraux de l'Atlas saharien occidental (S. Elmi 1978)

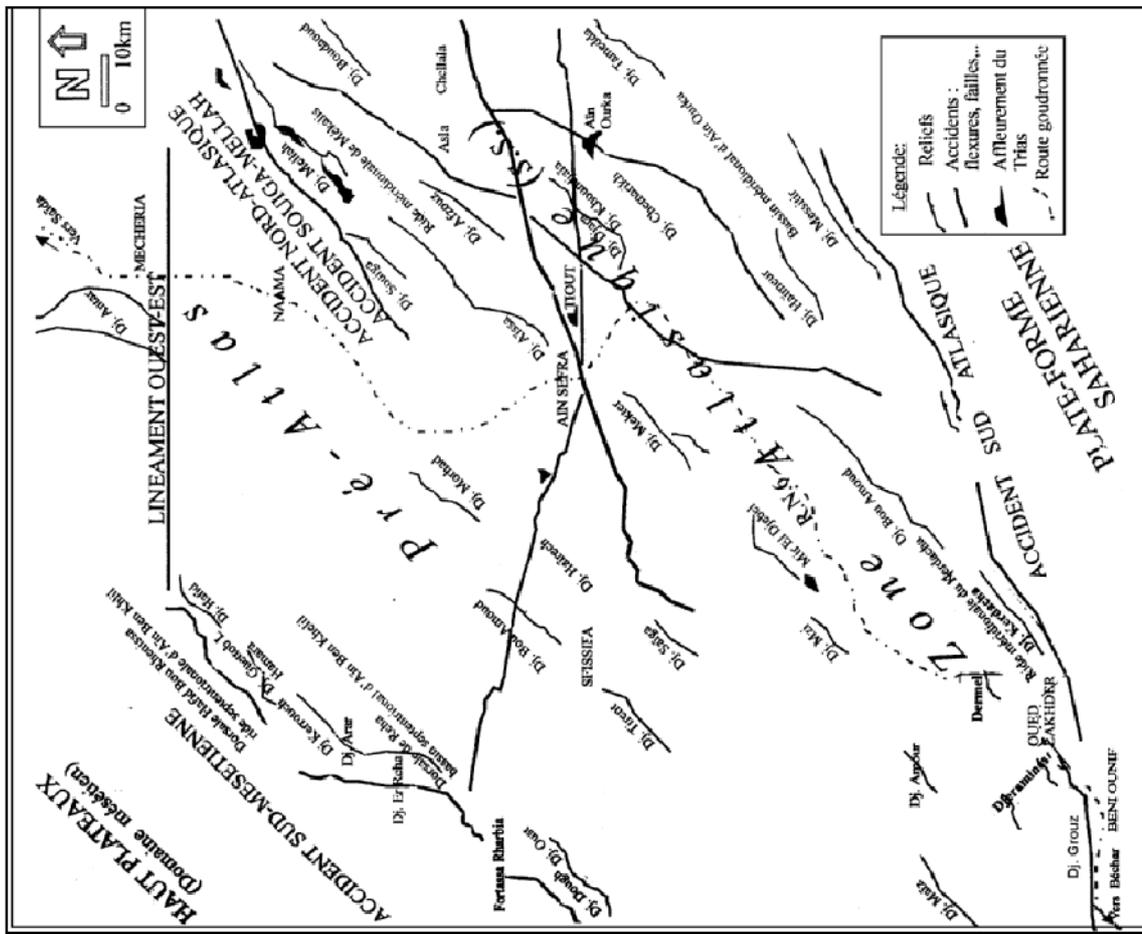
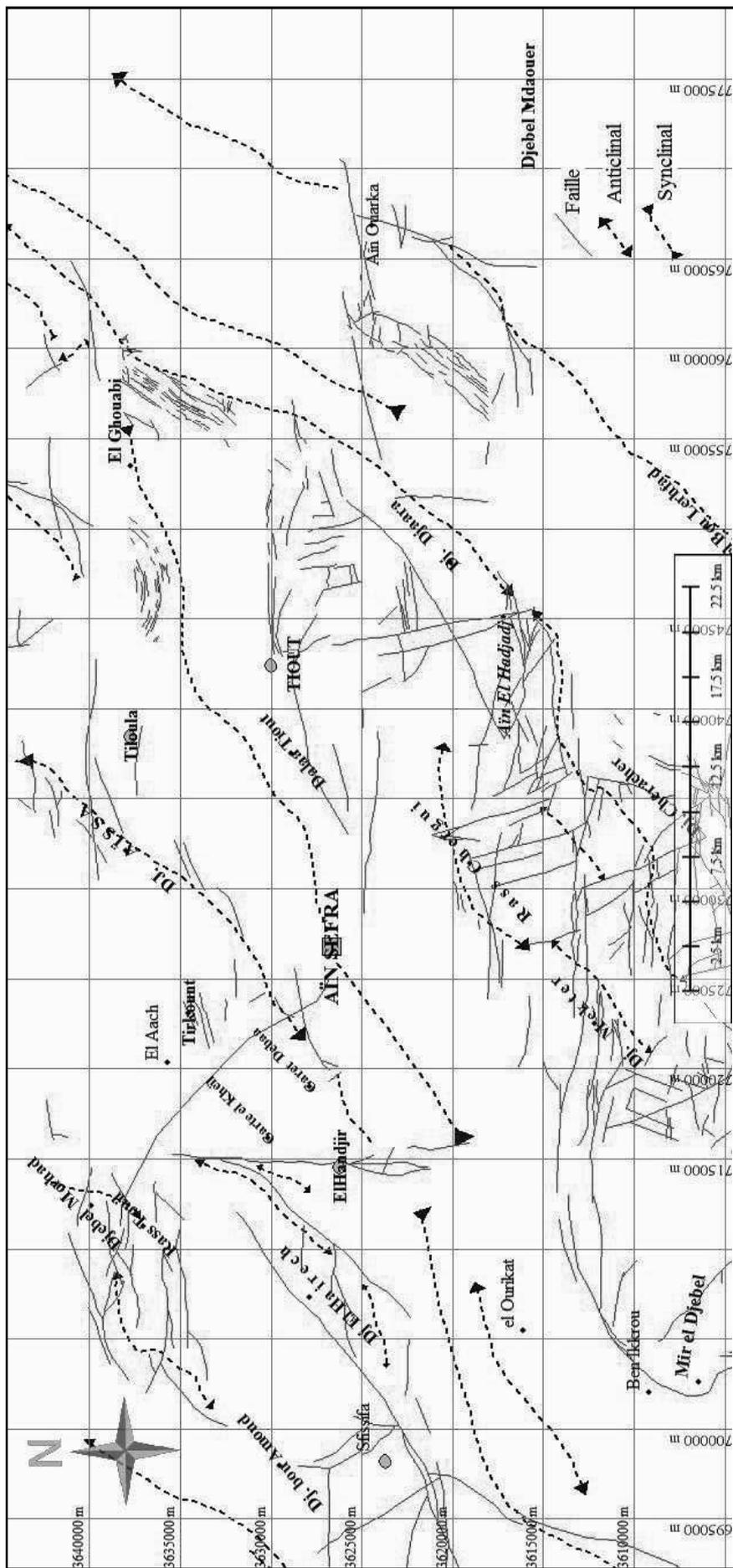


Figure 9-b : Réseau de fracturation et continuité des accidents tectoniques cassants (A. K. Yelles Chaouche et al, 2001 in H. Mansour 2007)



**Figure 10 : Carte structurale de la partie occidentale et centrale des Monts des Ksour (base de la carte photogéologique de D. Galmier 1972, et l'accident Ras Touil-Aïn Séfra)**

A l'Est du méridien d'Aïn Séfra, apparaissent des grandes masses gréseuses, appartenant au Jurassique Supérieur Continental, on citera : Djebel Aïssa (2236 m), Djebel Afzouz (1787 m), Djebel Bou Lerhfad (1700 m), Le Djebel Djara (1568 m). D'autres chaînons essentiellement calcaires, marneux ou dolomitiques se prolongent dans des orientations différentes, dont on peut citer les plus importants : Région d'El Azreq (1401 m), Djebel Gharnoug ; Djebel Souiga (1778 m) ; Djebel Ker dacha ; Djebel Chemarikh.

#### **IV-2. Les dépressions et les cuvettes**

La plupart des chaînons sont entourés par des dépressions bien marquées, correspondant le plus souvent à des marnes, calcaires marneux, argiles, etc.... Ainsi : Dépression de la vallée de l'oued Hallouf, ceinturant à l'Est la terminaison du Djebel Grouz ; Ceinture du Djebel Chemarikh ; Dépression entourant le Djebel Souiga puis le Djebel Melah avec un remplissage récent accentué. D'autres dépressions correspondant aux séries supérieures du Jurassique Moyen, dont quatre au moins peuvent être citées : la vallée de l'Oued Es Serdj ; la grande dépression de l'Oued Ich ; le seuil Ain El Smilah-Haci Slimane Ben Moussa et la pente intérieure du grand cirque d'Aïn Ouarka. Sous ce type de structure on peut citer des séries de cuvettes qui caractérisent la région des Monts des Ksour : Cuvettes Aourak – Oulakak (essentiellement gréseuses) ; Dépression de Béni Ounif ; Dépression de Mekhizène au NE de Sfissifa ; Cuvette d'Aïn Séfra – Tiout – El Handjir ; Cuvette de Tiourtelt ; Double dépression de Djenien Bou Rezk ; Cuvette d'Asla ; Cuvette d'El Kheloua-Arbaouet ; Dépression de Labiodh Sidi Cheikh

#### **IV-3. Les structures anticlinales**

Au Sud de la région montagneuse, trois structures anticlinales très allongées et dissymétriques jalonnent un relai de l'accident sud-atlasique : l'ensemble Chebket Brizinz-Sbaa Ey Tin-Djebel Tismert ; l'ensemble Djebel Et Kerouit-Djebel Hairech ; et l'ensemble Brizina-El Rhelida-Chebket Echeqga-Et Tserts-Dalaa Brezina.

#### **IV-4. Les structures synclinales**

Trois structures synclinales géographiquement et morphologiquement différentes, sont représentées par les bassins de Béni Ounif dans la zone pré Saharienne (partie méridio-occidentale des Monts des Ksour), d'Aïn Séfra dans la zone du sillon intra-cratonique (partie centrale des Monts des Ksour) et de Labiodh Sidi Cheikh dans la partie méridio-orientale des Monts des Ksour.

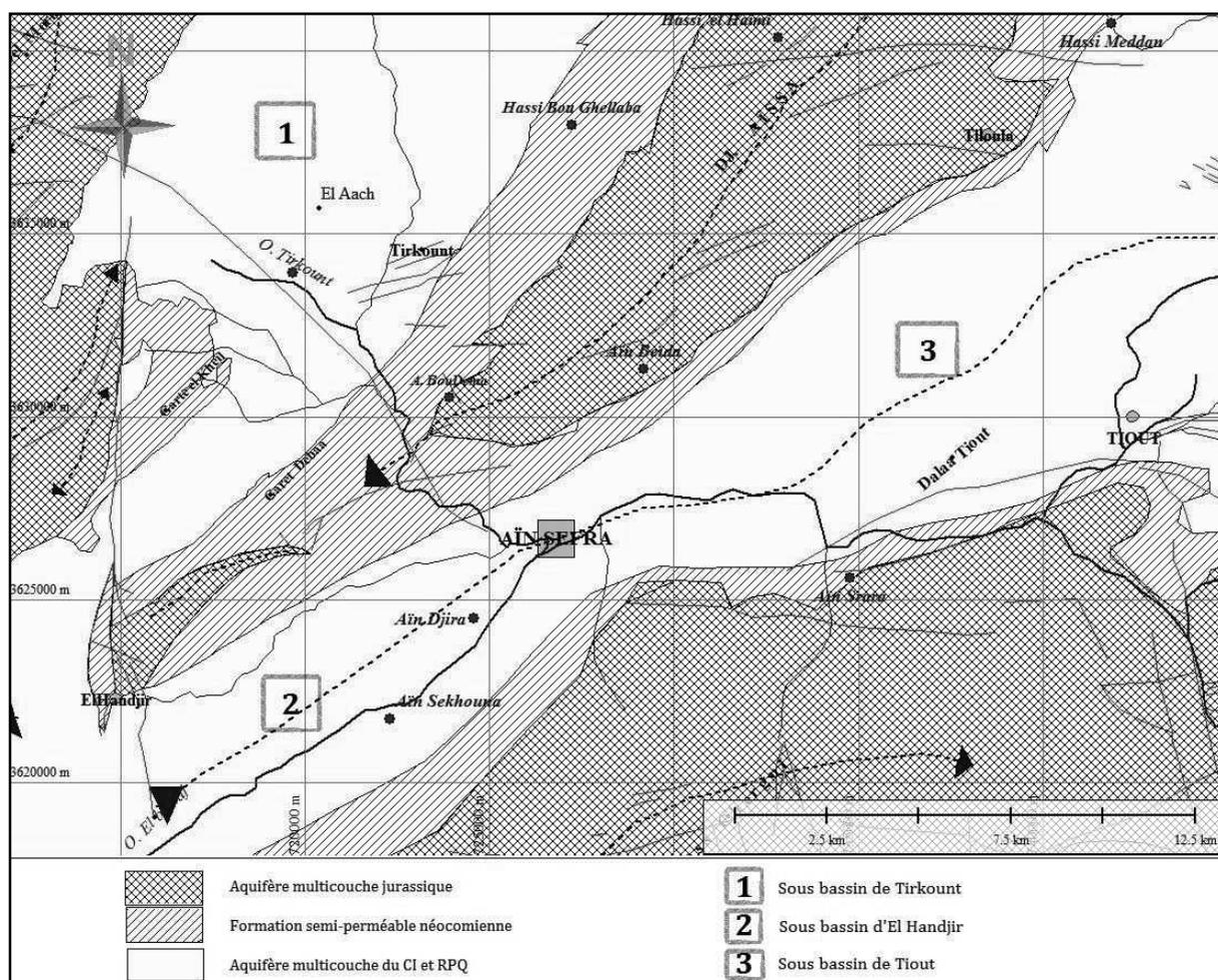
## V-ETUDE HYDRODYNAMIQUE DES ECOULEMENTS DES GOUTTIERES SYNCLINALES D'AÏN SEFRA

### V-1. Limites du bassin hydrogéologique étudié

Le bassin hydrogéologique de la zone d'étude est représenté principalement par la dépression d'El Handjir-Aïn Séfra-Tiout, et la partie sud de celle de Tirkount (fig. 11).

Il est représenté par les synclinaux crétacés à fond plat, et limité par les formations néocomiennes semi-perméables que nous considérons dans notre travail une limite étanche sans ignorer les massifs jurassiques qui par localité sont en contact avec le RPQ:

- au Sud par Djebel Mekter ;
- au Nord par Djebel Aïssa ;
- à l'Est par la ligne reliant la ville de Tiout et Hassi Medane ;
- au Sud-Ouest par la faille d'El Handjir et au Nord-Ouest par Djebel Morhad.



**Figure 11 : Esquisse schématique des affleurements des formations hydrogéologiques perméables et semi-perméables du bassin d'Aïn Séfra.**

## V- 2. Grandes formations hydrogéologiques et leurs exutoires

La série sédimentaire débute par les formations continentales de Djara et d'Aïssa du Jurassique (une alternance d'argiles, des dolomies et des grès). Elles sont surmontées par une série néocomienne principalement argileuse avec des intercalations gréseuses (la formation de Tiloula). Ensuite un immense ensemble gréseux du Barrémo-Alboaptien appelé aussi le Continental Intercalaire, comble le fond des dépressions du bassin hydrogéologique ; l'ensemble est déformé par des plissements à fond plat et cassé par des accidents tectoniques. Le Tertiaire et le Quaternaire sont essentiellement constitués de carapace calcaire, de grès, des alluvions et de sables dunaires. Seules les séries supérieures du Crétacé, du Tertiaire et du Quaternaire, renferment des nappes exploitables à potentiel hydrique important.

Selon les différentes études géologiques et hydrogéologiques réalisées sur la région d'Aïn Séfra (A. Kacemi 2005, H. Mansour 2007, A. Rahmani 2008), une colonne hydrogéologique a été élaborée pour visualiser en profondeur les aquifères et simplifier leur aspect litho-hydrodynamique. Cette colonne identifie plusieurs formations hydrogéologiques (fig. 12) :

Aquifère multicouche jurassique ; l'aquifère multicouche crétacé et les formations néocomiennes semi-perméables jouant le rôle d'un substratum pour l'aquifère crétacé, en assurant une séparation partielle avec celui du Jurassique.

### V- 2-1. Aquifère multicouche du Jurassique

L'existence de quelques points d'eaux à faible débit (ne dépassent pas les 2 l/s), émergeant dans les formations jurassiques des flancs du Djebel Aïssa et du Djebel Mekter, indique la présence d'un aquifère à potentialité hydrique peu importante.

Deux mécanismes d'émergence ont été mis en évidence :

- les sources de débordement : exemple d'Aïn Beïda qui se localise au contact de l'aquifère jurassique avec la couverture néocomienne principalement argileuse (fig. 13-a, 16) ;
- les sources artésiennes qui drainent les nappes captives profondes à la faveur de l'hétérogénéité lithologique et les failles (Aïn Boudema, Hassi El Haïme, Aïn Srara) (fig. 13-b, 13-c, 16).

| Formation      | Age                                      | Formations Lithostratigraphiques   |  | Formations hydrogéologiques           | Appellation dans le texte |
|----------------|--|--|--|---------------------------------------|---------------------------|
|                | Plio-quaternaire                         | Alluvions<br>Carapace calcaire et grès et argile   |  | Remplissage peu-perméable à perméable | RPQ                       |
| Fr. de Tiout   | Albien                                   | Grès à dragés de quartz<br>Alternances de grès et d'argiles  |  | Aquifère multicouche Perméable        | CI                        |
|                | Aptien                                   | Argiles<br>Alternance espacée de grès et d'argile<br>Alternance rapprochée grès-argileuse  |  |                                       |                           |
|                | Barrémien                                | Alternance de grès à dragées de quartz et argiles lie de vin   |  |                                       |                           |
| Fr. de Tiloula | Néocomien                                | Alternance de grès et d'argile<br>Alternance d'argile et de Grès fins<br>Alternance de grès, d'argile et minces lits dolomitique<br>Combe argileuse avec intercalation de grès fins et de rares lits dolomitiques<br>Alternance d'argile et de grès fins à moyen |  | Semi-perméable <i>substratum</i>      | La série néocomienne      |
| Fr. d'Aïssa    | Portlandien<br>Kimmeridgien<br>Oxfordien | Grès à dragées de quartz<br>Alternance serrée de grès et de gros bancs d'argile<br>Alternance espacée d'argile et de grès<br>Alternance espacée d'argile, de grès et de dolomies   |  | Aquifère multicouche Peu-perméable    | J. sup.                   |

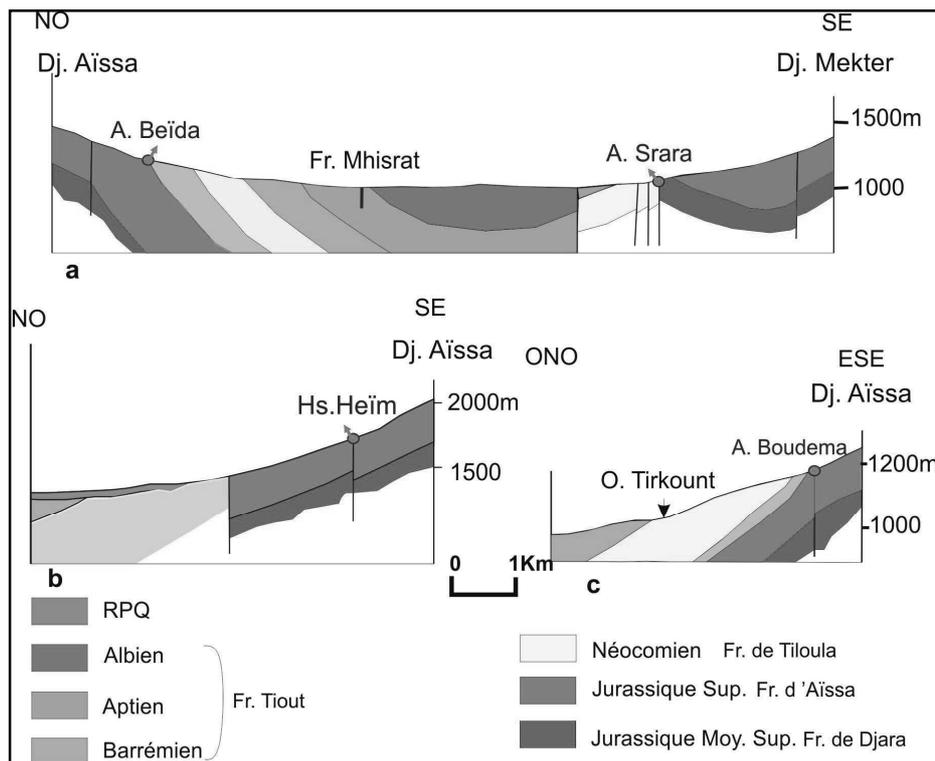
Figure 12 : Propriétés hydrogéologiques du Jurassique Supérieur et du CI de la région d'Aïn Séfra.

### V- 2-2. Aquifère multicouche du Continental Intercalaire (CI):

L'aquifère du CI, avec son vaste réservoir, représente un aquifère multicouche à nappe semi-captive ou libre localement; il est exploité par une cinquantaine de forages et il concerne la majeure partie de notre étude.

Les caractéristiques morphologiques, avec des synclinaux séparés par des anticlinaux, permettent de distinguer trois sous-bassins hydrogéologiques.

Trois synclinaux créacés séparés par des anticlinaux jurassiques permettent de distinguer les trois sous bassins hydrogéologiques (fig. 14) :



**Figure 13 : Mécanismes d'émergence des sources du Jurassique**  
**a : Aïn Beïda Aïn Srara, b : Hassi Haïm, c : Aïn Boudema**

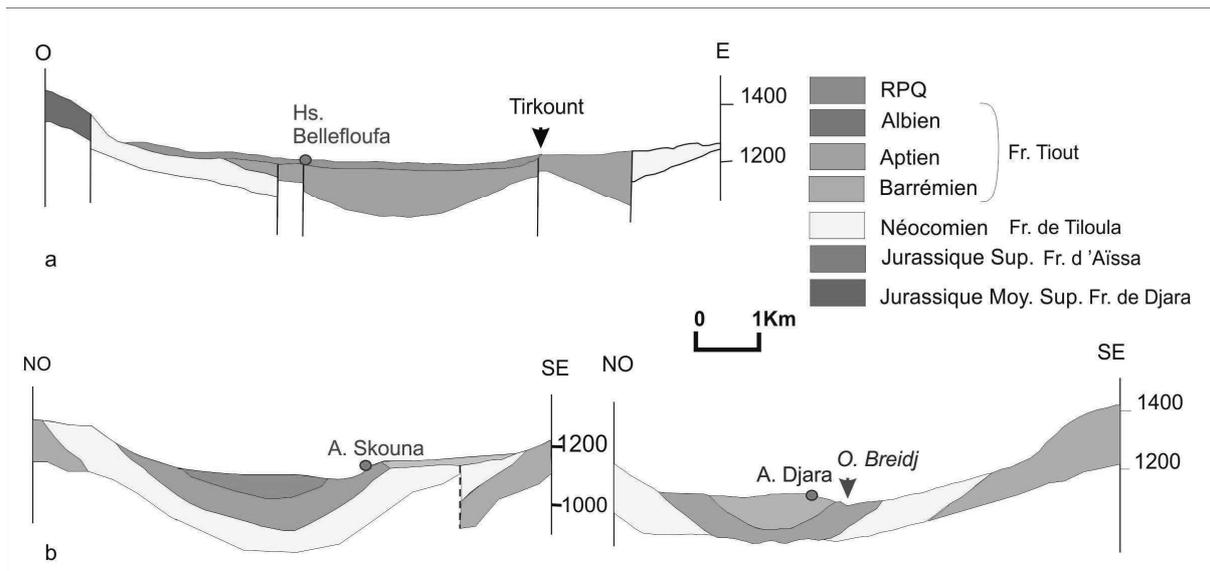
- le sous-bassin de Tirkount : il représente la partie sud du synclinal de Naâma ;
- le sous-bassin d'El Handjir : limité par Djebel Mekter au Sud, les reliefs de Ras Touil au Nord, la faille nord-sud d'El Handjir à l'Ouest et le rétrécissement du synclinal au niveau d'Aïn Séfra à l'Est ;
- le sous-bassin de Tiout. Il est limité par le Djebel Mekter et le Djebel Djara au Sud, et du Djebel Aïssa et du Djebel Tifkirt au Nord. A l'Ouest, l'axe du synclinal passe par la ville d'Aïn Séfra pour rejoindre celui d'El Handjir. Géologiquement le synclinal s'élargit vers le Nord pour donner naissance au synclinal d'Asla, mais comme il a été mentionné plus haut, selon la disponibilité des données, nous avons limité ce sous-bassin par la ligne Hassi Medane-Tiout.

Trois sources représentent l'exutoire principal de chacun de ces sous-bassins, avec un débit qui varie de 10 à 15 l/s :

- les sources de Tirkount-Hassi Belefoufa : des griffons le long de l'Oued de Tirkount émergent avec un régime non-permanent, ainsi le point d'eau de Hassi Belefoufa capte, à quelques mètres de profondeur sous les alluvions une eau

minéralisée; l'ensemble représente l'exutoire principal du sous-bassin hydrogéologique de Tirkount (fig. 14a) ;

- les sources de Djara et de Skhouna : ces sources émergent dans le lit de l'Oued Briedj, en constituant l'exutoire du sous-bassin d'El Handjir (fig. 14b) ;
- les sources de Tiout (fig. 15) et de Chaïb : ces sources émergent dans le lit de l'Oued Tiourtelt, à environ 1.5 km amont du village de Tiout.



**Figure 14 : Mécanismes d'émergences des sources du CI  
a : Hassi Bellefloufa, b : Ain Skhouna et Ain Djara**



**Figure 15 : La source de Tiout**

### **V- 2-3. Aquifère alluvionnaire du Plio-Quaternaire :**

Appelé dans cette étude « Remplissage Plio-Quaternaire » ou « RPQ », cet aquifère représente un remplissage des dépressions du bassin hydrogéologique par des grès et d'argile rouge et une carapace calcaire tertiaires, ainsi que des alluvions et des colluvions quaternaires. Il est capté par quelques puits, surtout dans le sous-bassin de Tirkount, où son épaisseur est supérieur à cinquante mètres ; il est en communication avec l'aquifère du Cl.

### **V- 3. Géométrie de l'aquifère du Cl**

Après avoir déterminé l'extension géographique et les limites en profondeur des formations hydrogéologiques de la région d'Aïn Séfra, il est important de connaître avec un maximum de précision les limites géométriques des réservoirs aquifères, principalement du Cl, qui conditionnent les possibilités de stockage des eaux souterraines et contrôlent leurs conditions de circulation. Pour cela, nous nous sommes basés sur l'étude géophysique, en prospection électrique, réalisée dans la région d'Aïn Séfra.

L'étude géophysique entreprise par la Compagnie Générale de Géophysique (C. C. G.) en 1974, avait pour but de prospector le bassin mio-pliocène et mésozoïque de Tirkount qui a une superficie d'environ 650 Km<sup>2</sup>.

En se basant sur les données de cette étude, et les valeurs de la résistivité apparente mesurées, nous avons réalisé une carte en isobathes (fig. 17). Les isobathes montrent que l'aquifère du Cl est un synclinal à fond plat. Il est simple au Sud de la faille de Ras Touil-Aïn Séfra, il est formé de deux petits synclinaux séparés par un anticlinal.

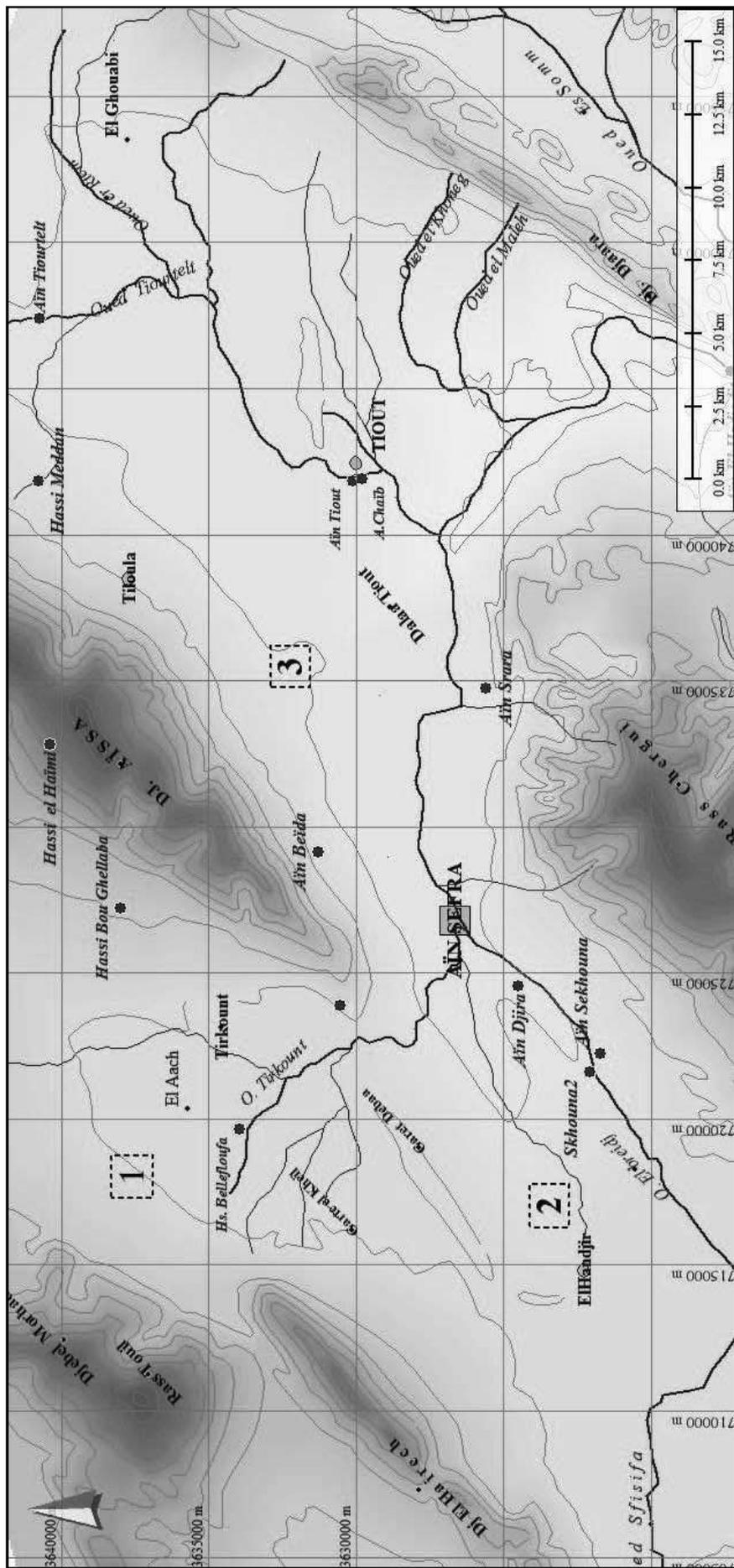
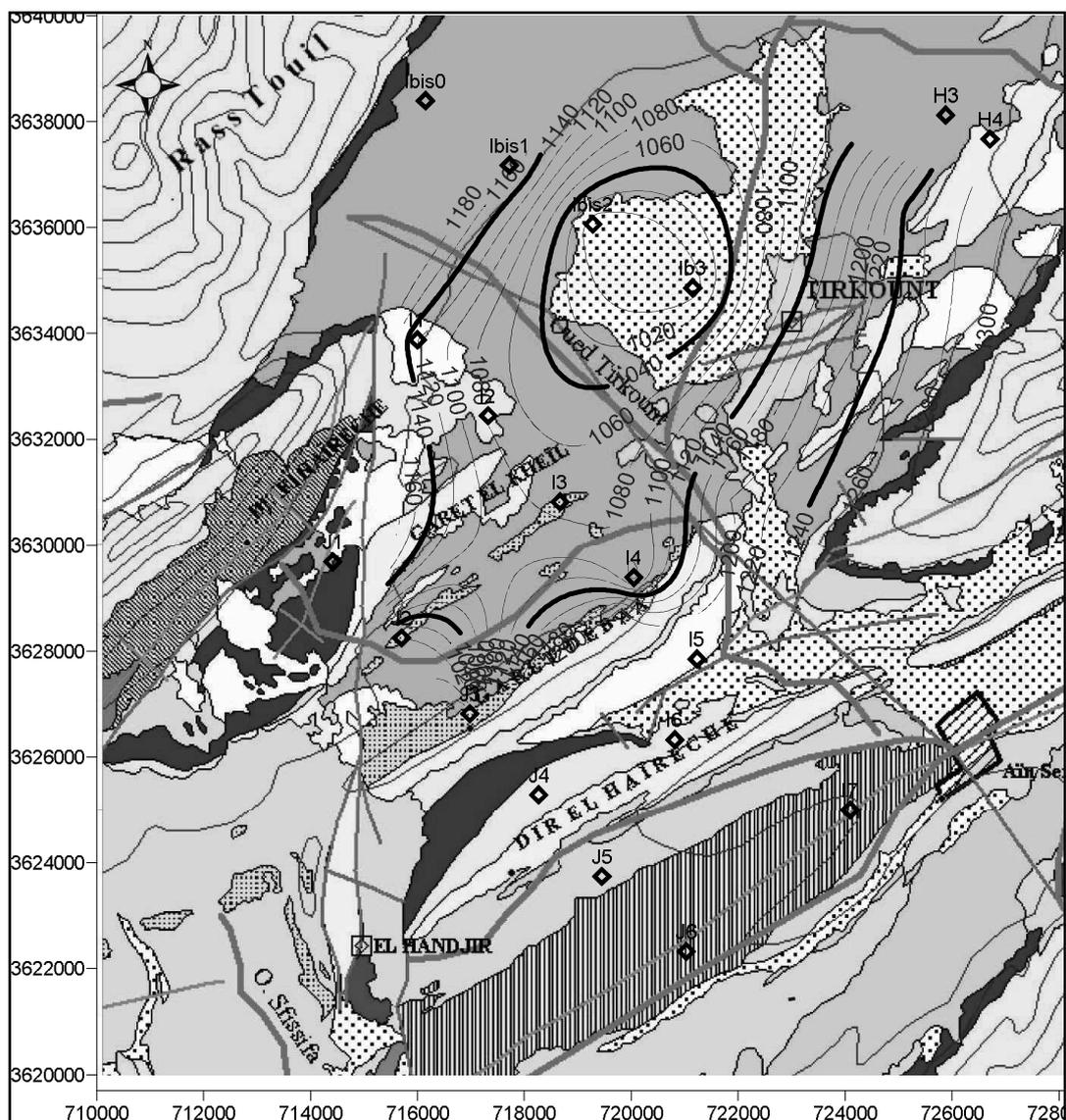


Figure 16 : Le réseau hydrographique de la région d'Aïn Séfra et les principales émergences.



**Figure 17 : Carte en courbes isobathes de l'aquifère du CI de l'unité hydrogéologique l'unité de Garet El Kheil.**

#### **V-4. Identification hydrodynamique de la nappe du Continental Intercalaire (CI) et le remplissage plio-quaternaire (RPQ) de la région d'Aïn Séfra :**

L'aquifère multicouche du CI et du RPQ a été identifié précédemment par les formations hydrogéologiques du Barrémo-Albo-Aptien et du remplissage du Plio-Quaternaire (fig. 12), il convient par la suite d'identifier son comportement hydrodynamique.

Il est important de noter que le RPQ constitue localement un toit semi-perméable, mais dans la majeure partie, il est en intercommunication avec le CI, le substratum est constitué de formations hydrogéologiques semi-perméables, argilo-gréseuses néocomiennes.

Le comportement hydrodynamique de l'aquifère est analysé par l'étude morphologique de la surface piézométrique et des conditions aux limites (fig. 16) :

L'étude des écoulements souterrains dans la région d'Aïn Séfra, fait l'objet de plusieurs études, la première représente la surface piézométrique de la nappe mio-pliocène du sous-bassin de Tirkount en juin 1983 (A. Abada 1986), la deuxième la plus importante est celle de H. Mansour en 2007, qui a réalisé une carte piézométrique régionale des Monts des Ksour. La troisième cartographie de la surface piézométrique de la région d'Aïn Séfra (des trois sous-bassins précités) qui est effectuée en 2008 par A. Rahmani.

Sur la base de l'inventaire effectué sur 46 points d'eau dont la plupart captent le Continental Intercalaire (A. Rahmani 2008) (annexe 1), nous avons réalisé la carte piézométrique qui a permis d'identifier trois unités hydrogéologiques (fig. 18) :

- l'unité de Garet El Kheil dont la source de Tirkount constitue l'exutoire principal (Unité 1). La carte piézométrique montre une alimentation de la nappe à partir des formations jurassiques du flanc nord-ouest du Djebel Aïssa et le flanc sud-est de Djebel Morhad. L'axe principal de drainage de la nappe est représenté par l'oued Tirkount suivant l'accident Ras-Touil–Aïn Séfra ;
- l'unité d'El Handjir-Aïn Séfra, dont les émergences d'Aïn Skhouna et Djira constituent ses exutoires (Unité 2). L'écoulement souterrain de cette nappe se fait de l'est vers l'Ouest, avec une dépression piézométrique au niveau d'Aïn Skhouna correspondant à une zone de champ captant (A. Rahmani 2008) ;
- l'unité de Tiout-Aïn Séfra est drainée par les exutoires d'Aïn Chaïb et d'Aïn Tiout (Unité 3). La carte piézométrique de la gouttière synclinale d'Aïn Séfra - Tiout montre un écoulement de direction sud-ouest–nord-est. A ce niveau également, les Djebel Aïssa et Djebel Mekter alimentent la nappe à travers un ensemble de sources qui émergent sur leurs flancs (Aïn Srara, Aïn Beïda).

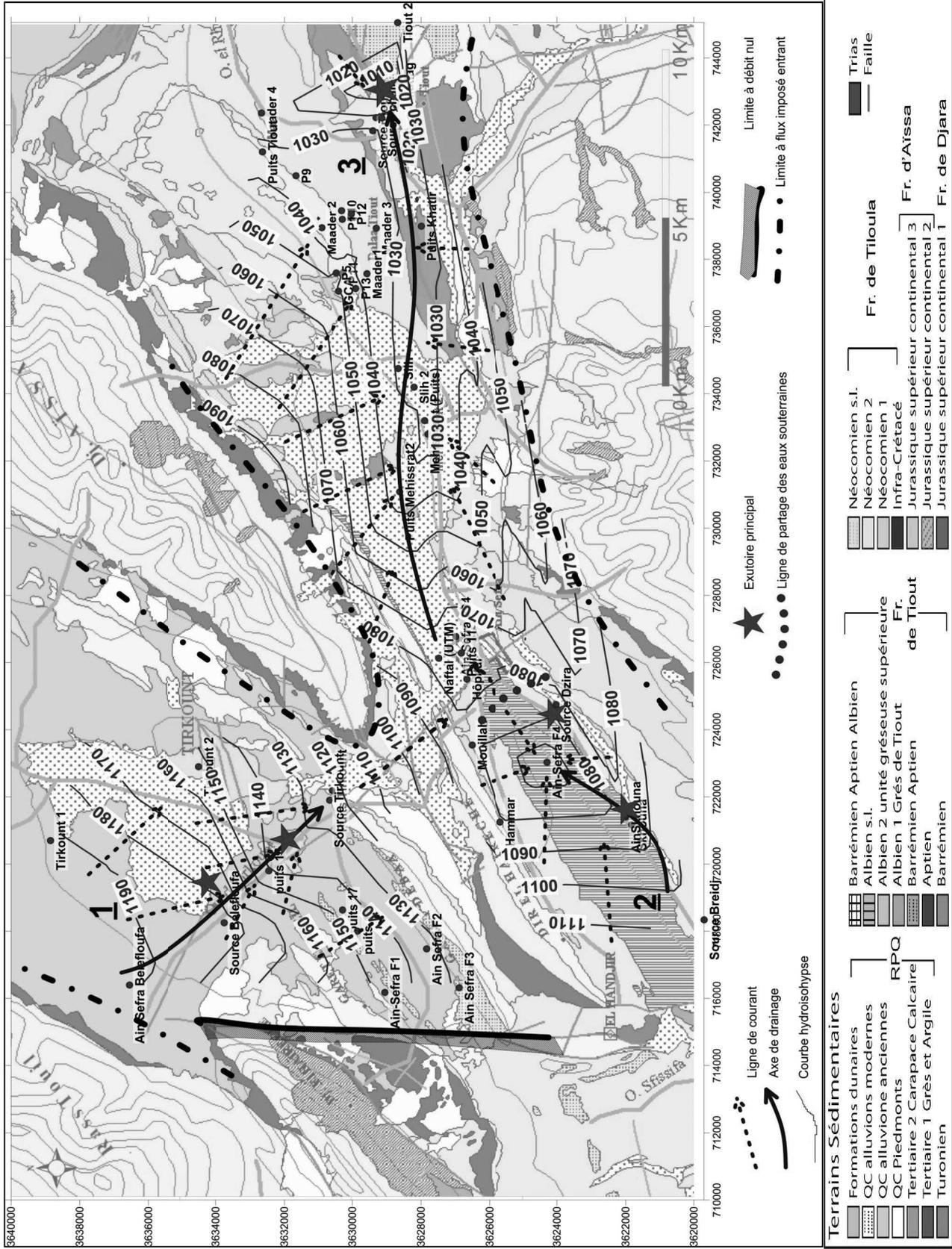
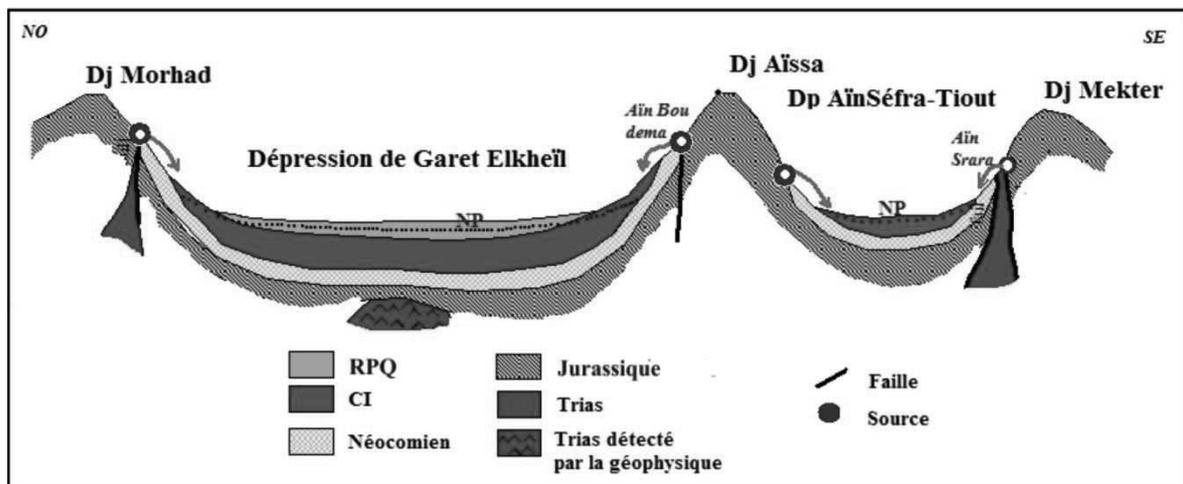


Figure 18 : Carte hydrogéologique de la région d'Ain Séfra (septembre 2008)

### V-5. Rôle de la fracturation dans la circulation des eaux

En se basant sur les conclusions des travaux antérieurs (CGG 1974 ; A. Abada 1986 ; H. Mansour 2007, 2008 ; A. Rahmani 2008; R. Kerzabi 2008), une coupe hydro-structurale des gouttières synclinales d'Aïn Séfra a été réalisée, mettant ainsi en évidence (fig. 19) :

- la relation hydrogéologique entre les aquifères gréseux du Barrémo-Albo-Aptien et les massifs du Jurassique représentés par l'ensemble des sources qui émergent des piémonts des Djebel Morhad, Djebel Aïssa et Djebel Mekter ;
- l'intrusion du Trias diapirique par le biais des failles constitue une limite étanche par rapport au trop plein des aquifères des formations du Jurassique (source d'El Handjir, source Srara) ;
- l'épanchement du Trias dans la partie centrale du synclinal de Gareet El Khaïl, décelé par la prospection géophysique.



**Figure 19 : Schéma hydro-structural des gouttières synclinales d'Aïn Séfra**

Pour mieux représenter la relation entre les écoulements souterrains et la fracturation de la région, nous avons représenté la carte piézométrique sur un fond structural où figurent les failles de la photogéologie (D. Galmier 1972) et la faille de Ras Touil- Aïn Séfra détectée par la géophysique. Nous avons utilisé également l'étude statistique des linéaments (F. Mohiddine *et al* 2012) afin d'interpréter le comportement hydrodynamique de cet aquifère :

- le Jurassique est caractérisé par deux classes de linéaments :
  - ✓ une classe des linéaments courts de direction 70°-90°. Il s'agit des failles qui se trouvent aux piémonts de djebel Aïssa, Ras Touil et Mekter, et qui

favorisent l'émergence de certaines sources (Aïn Srara et Aïn Beïda) alimentant le CI ;

- ✓ une autre classe de direction 130°-150° des linéaments longs qui représentent en général des décrochements ; celui de Ras Touil-Aïn Séfra joue le rôle de drain de l'unité hydrogéologique de Garet El Kheil en donnant naissance à une dizaine de griffons le long de l'oued Tirkount.
- le Crétacé et le Tertiaire sont caractérisés par une seule classe de direction 70°-90° qui représente les linéaments les plus nombreux et les plus longs ; le plus important est celui qui draine la nappe de l'unité hydrogéologique d'Aïn Séfra – Tiout, et favorise ainsi l'émergence des sources de Tiout et de Chaïb.

### **Conclusion**

L'étude géologique nous a permis de tirer les grands traits essentiels à la définition des rôles hydrogéologiques des formations du synclinal d'Aïn Séfra. Nous pouvons conclure la variation verticale comme suit :

- les formations jurassiques peu perméables ;
- les formations néocomiennes semi-perméables constituent le substratum ;
- les formations crétacées très perméables ;
- les formations plio-quaternaires perméables à semi-perméables.

L'étude hydrogéologique détaillée nous a permis de conclure que :

- le synclinale d'Aïn Séfra est divisé naturellement en trois unités hydrogéologiques dont il y a une connexion hydrique entre les différentes unités hydrogéologiques ;
- les formations néocomiennes semi-perméables constituent le substratum de l'aquifère crétacé, et le toit de l'aquifère jurassique ;
- les formations crétacées du Continental Intercalaire (CI) et le remplissage plio-quaternaire (RPQ) constituent un aquifère multicouche à potentialité hydrique très importante.

Après avoir décrit le contexte géologique et hydrogéologique, nous allons tenter, dans la partie suivante, d'estimer le débit d'alimentation de l'aquifère du CI et le RPQ du synclinal d'Aïn Séfra.

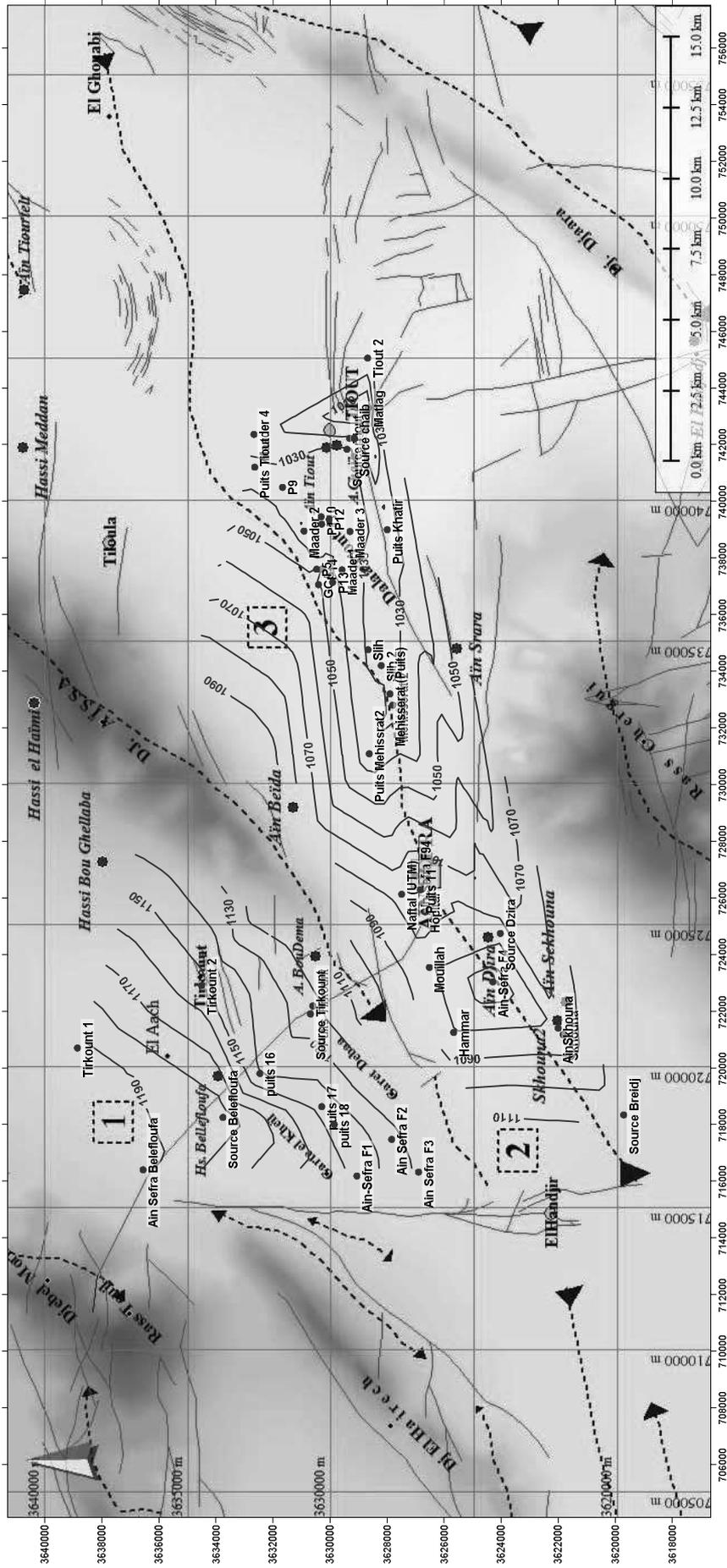


Figure 20 : Carte piézométrique du synclinale d'Aïn Séfra (septembre 2008)

## **PARTIE 2 : ESTIMATION DE LA RECHARGE**

### **Introduction**

#### **I- Aspect climatologique de la région**

#### **II- Données disponibles et la représentation des paramètres climatiques**

##### **II-1. Pluviométrie**

###### **II-1-1. Données annuelles**

###### **II-1-2. Données mensuelles**

##### **II-2. Température**

#### **III- Evaluation de la pluie efficace**

##### **III-1. Interpolation des données**

##### **III-2. Calculs de l'ETR et PE**

###### **III -2-1. Conditions lithologiques et morphologiques**

###### **III-2-2. Conditions pédologiques**

###### **III-2-3. Estimation de la RFU et méthodologie de calcul**

##### **III-3. Résultats**

#### **IV- Bilan hydrologique et l'estimation de la recharge**

### **Conclusion**

## Introduction

Dans les zones à climat semi-aride où les conditions climatiques sont extrêmes avec des précipitations très irrégulières et des températures très élevées, comment imaginons-nous une possible recharge des aquifères ?

Cette partie de notre étude a été consacrée à la compréhension des mécanismes et la quantification du taux de recharge de l'aquifère du Continental Intercalaire dont ce paramètre est un pré-requis nécessaire à la gestion efficace de cette ressources en eaux souterraines. La recharge d'un aquifère peut être définie comme tout flux d'entrée à la zone saturée (RA. Freeze *et al* 1979). Cette recharge est limitée par la disponibilité d'eau qui est contrôlée par les facteurs climatiques comme les précipitations et l'évapotranspiration (BR. Scanlon *et al.* 2002) ; elles sont d'une manière prédominante concentrées dans des périodes courtes (J. Jiménez-Martínez *et al.* 2010). La précipitation efficace est un paramètre très important dans les études hydrogéologiques, mais il est difficile à déterminer (DN. Lerner *et al.* 1990) ; c'est la conséquence du changement temporel des précipitations et des autres paramètres météorologiques et la variation spatiale des caractéristiques du sol, de la géologie, la topographie et la végétation (T. Sibanda *et al* ,2009).

L'interaction du climat, de la géologie, de la morphologie, des conditions de sol et de végétation sont des facteurs permettant leur évaluation quantitative et la détermination des processus de recharge.

La méthodologie proposée est une approche d'interpolation spatiale et temporelle des données de précipitations journalières et de températures moyennes mensuelles mesurées à la station d'Aïn Séfra, durant trois années repères (l'une sèche, l'autre moyenne et la dernière humide). Son application nécessite des connaissances sur la nature du sol, la surface et l'altitude des impluviums.

### I- Aspect climatologique de la région d'Aïn Séfra

Des études climatiques ont été élaborées à l'échelle régionale (les sept principales stations pluviométriques des Monts des Ksour) (H. Mansour 2007) et à l'échelle locale (la station d'Aïn Séfra) (A. Rahmani 2008) sur une base des données météorologiques de la période 1969-2001 pour la première, et la période 1979-2008 pour la seconde.

Notre zone d'étude fait partie du bassin versant de l'oued Namous. Les différentes méthodes d'étude du climat indiquent que la région d'Aïn Séfra est soumise à un climat semi-aride à aride avec des étés chauds et des hivers froids, ce climat est conditionné par les facteurs suivants (A. Rahmani 2008):

- l'éloignement de la mer ;
- une altitude assez élevée (1100 m) avec des sommets élevés (une moyenne de 1600 m) ;
- la proximité du Sahara et des Hautes plaines Oraïnes.

Toutes les méthodes de calcul du déficit d'écoulement et de l'évapotranspiration réelle (Coutagne, Wundt, Turc, Thornthwaite et Verdeil) montrent que les quantités d'eau apportées par les pluies sont insignifiantes (160 mm) par rapport à la capacité évaporatoire de l'atmosphère (1300 mm) (H. Mansour 2007).

## II- Données disponibles et la représentation des paramètres climatiques

Les données climatiques traitées pour déterminer la recharge potentielle de l'aquifère gréseux du Continental Intercalaire sont mesurées durant la période 1980-2010 à la station d'Aïn Séfra (annexe 2) :

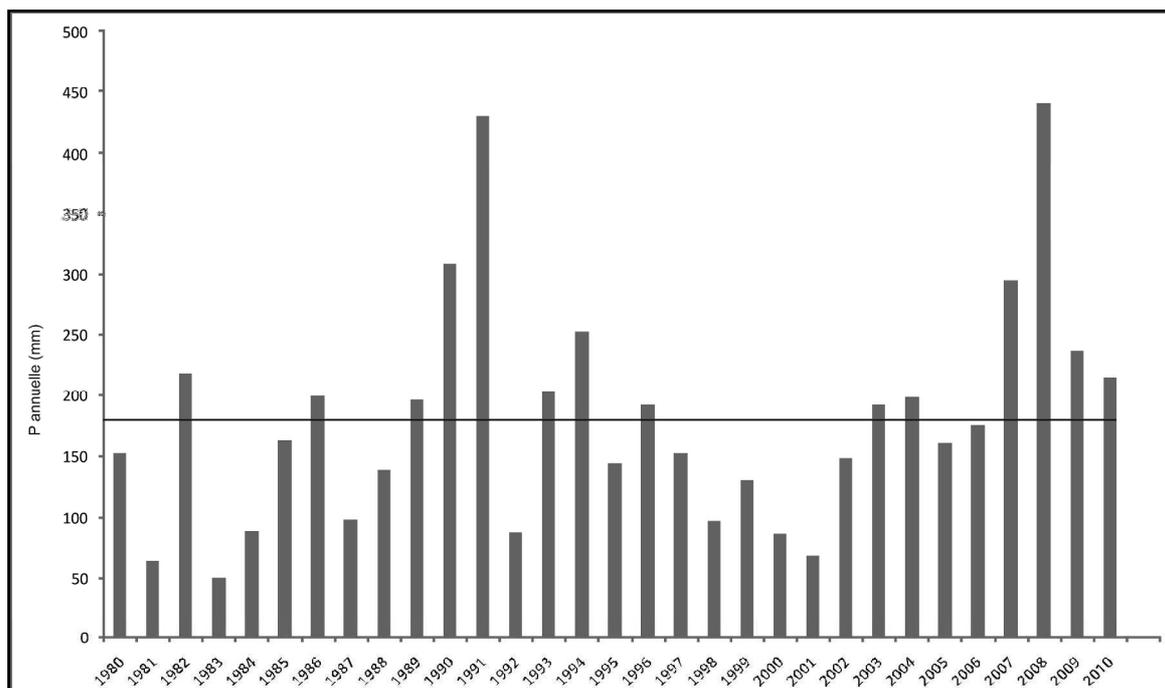
**Code** : 605600; **X**= 724838,035 ; **Y**= 3626956,25 ; **Z** : 1058 m

Une autre base de données des précipitations journalières des trois années repères (1983, 2006 et 2008) a servi à l'estimation de la recharge de l'aquifère du CI.

### II-1. Pluviométrie

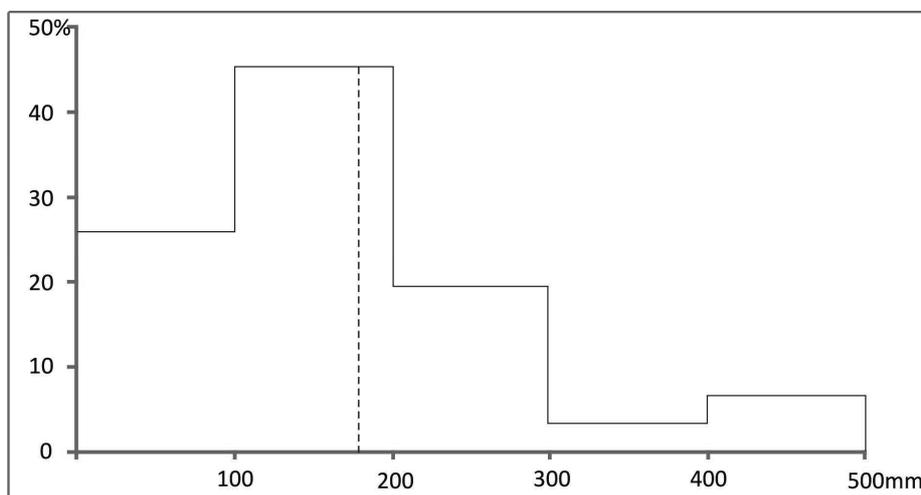
**II-1-1. Données annuelles**: Les précipitations moyennes annuelles enregistrées à la station d'Aïn Séfra pour la période 1980-2010 ont été calculées à partir des données de l'ANRH (annexe 2).

La variation interannuelle des précipitations (fig. 21), montre une année 2008 avec 417 mm, alors que le minimum est de 50 mm pour l'année 1983. La moyenne interannuelle, qui a peu de signification statistique compte tenu de ces écarts, est de 180.2 mm.



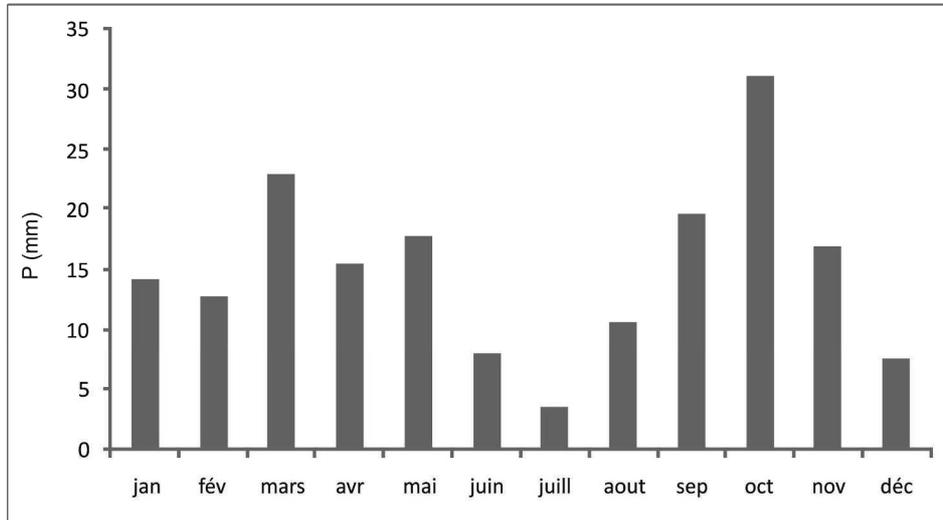
**Figure 21: Variation des précipitations annuelles (1980-2010)**

L'histogramme des précipitations annuelles (fig. 22), établi sur trente-et-un an, ne présente pas de forme caractéristique. Les années pluvieuses représentent près de 30 % et recouvrent trois classes de 100 mm. Les années sèches, couvrant deux classes, représentent les 70 %.



**Figure 22: Histogramme de la répartition des précipitations annuelles (1980-2010)**

**II-1-2. Données mensuelles :** L'histogramme de précipitations moyennes mensuelles de la période 1980-2010 montre que les mois allant de septembre à mai sont les plus pluvieux, dont la lame d'eau tombée constitue plus de 80% du total annuel (fig. 23).

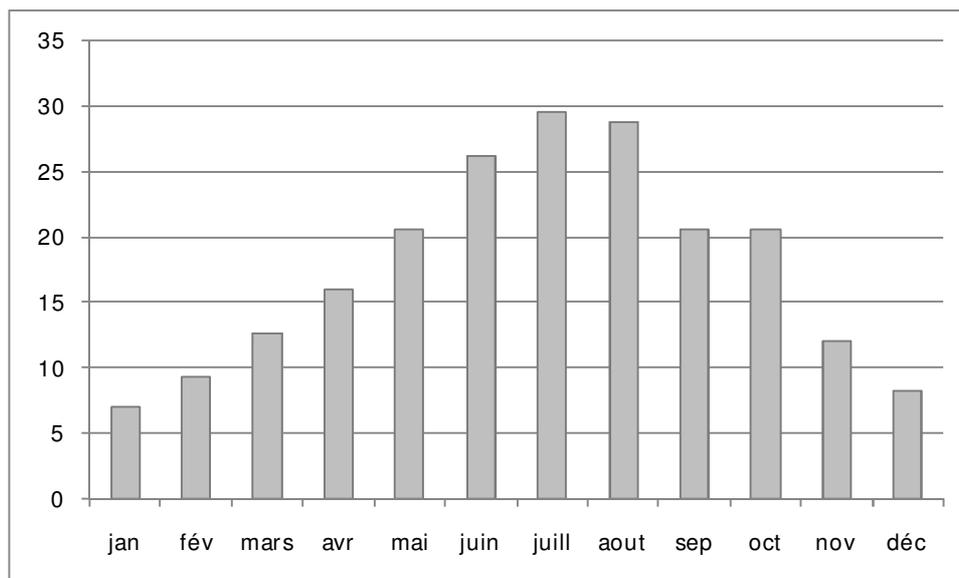


**Figure 23 : Variation des précipitations moyennes mensuelles (1980-2010)**

## II-2. Températures

La région d'étude appartient à un bassin caractérisé par une amplitude thermique nyctémérale importante du fait du régime continental (H. Mansour 2007).

La figure 24 représente la distribution des températures moyenne mensuelles de la période 1980-2010 de la station d'Aïn Séfra.



**Figure 24: Variation des températures moyennes mensuelles (1980-2010)**

Les indices climatiques, appliqués à cette région, donnent un caractère du type de climat sub-aride à semi-aride, compte tenu du régime moyen à l'échelle séculaire. Dans cette zone, le climat est caractérisé par l'irrégularité de la pluviométrie et des valeurs extrêmes élevées pour les températures (H. Mansour 2007).

### III- Evaluation de la pluie efficace

L'approche utilisée pour évaluer la pluie efficace dans la zone étudiée est basée sur deux principes :

- l'interpolation spatiale et temporelle des précipitations, des températures et des évapotranspirations potentielles : à partir d'une base de données **limitée** (précipitations journalières et températures moyennes mensuelles) et en fonction d'un gradient pluviométrique [ $P = f(z)$ ], et thermique [ $T = g(z)$ ], il est possible d'estimer ces deux paramètres dans tout le secteur étudié. L'ETP peut être calculée à l'échelle mensuelle par la formule de Thornthwaite puis interpolée à l'échelle journalière ;
- l'identification des impluviums de l'aquifère, la détermination des paramètres responsables de l'infiltration des eaux de pluies (altitude moyenne des affleurements, surface de recharge, nature et épaisseur du sol, état et quantité d'eau contenue dans le sol).

#### III-1. Interpolation des données

En premier lieu nous avons interpolé les valeurs des précipitations dans toute la zone d'étude, en utilisant un gradient pluviométrique établi à partir d'une représentation des précipitations moyennes interannuelles de la période 1969-2001, des sept stations des Mont des Ksour (tableau 1, fig. 25-a) en fonction de leurs altitudes par rapport au niveau de la mer (fig. 25-b).

Les données mensuelles des précipitations et des températures des trente-et-une années (ANRH d'Oran) nous ont permis de calculer, par la méthode de Thornthwaite l'évapotranspiration potentielle mensuelle (ETP). Ces valeurs ont été interpolées à l'échelle journalière (pour les trois années repères 1983, 2006 et 2008, le gradient thermique est estimé à  $-0,6 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ m}$  (N. Benabadji *et al* 2000)) en élaborant une équation linéaire de variation de l'ETP.

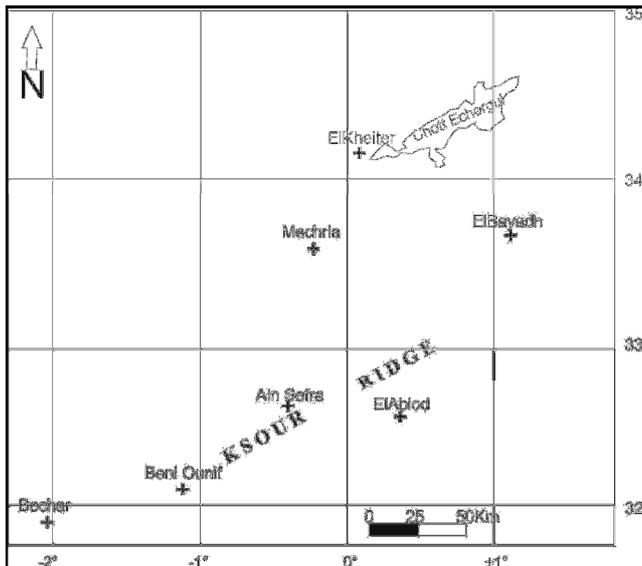


Figure 25-a : Situation des stations météorologiques des Mont des Ksour

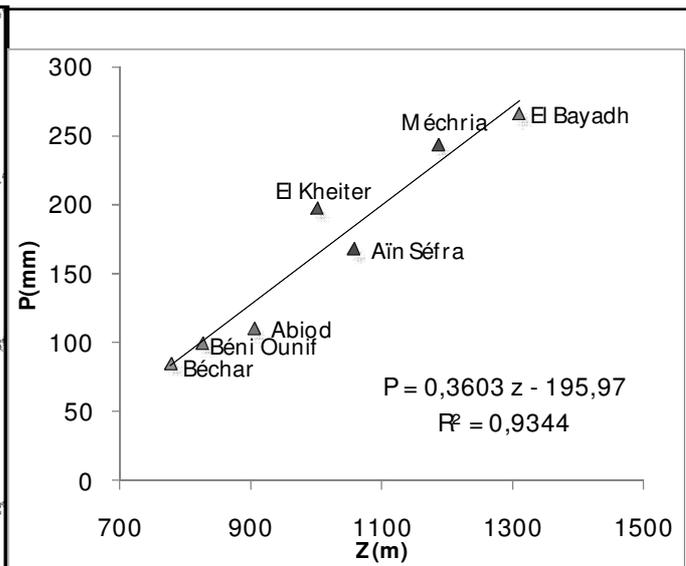


Figure 25-b : Gradient pluviométrique des Monts des Ksour

Tableau 1 : Précipitations moyennes interannuelles des stations des Mont des Ksour

|            | Z (m) | Moyenne (1969-2001) (mm) |
|------------|-------|--------------------------|
| El Kheiter | 1000  | 198                      |
| Mechria    | 1187  | 244                      |
| Bayadh     | 1310  | 266                      |
| Aïn Séfra  | 1058  | 168                      |
| Abiod      | 904   | 111                      |
| Beni Ounif | 825   | 100                      |
| Béchar     | 777   | 85                       |

### III-2. Calculs de l'ETR et PE

#### III -2-1. Conditions lithologiques et morphologiques

Comme il a été déjà décrit dans la partie 1, le contexte géologique de la région d'Aïn Séfra correspond à des terrains gréseux avec des passages calcaires qui affleurent en altitude (Djebel Aïssa, Mekter, Ras Touil), séparés par de larges dépressions constituées principalement par les grès du Continental Intercalaire et le remplissage Plio-Quaternaire. La représentation de la figure 26, nous montre que les affleurements jurassiques (en bleu) ont une altitude qui varie entre 1300 m et 2100 m, dont nous avons pris 1600 m comme moyenne pour notre application. La station d'Aïn Séfra se trouve à une altitude de 1056 m, elle est représentative pour les terrains gréseux.

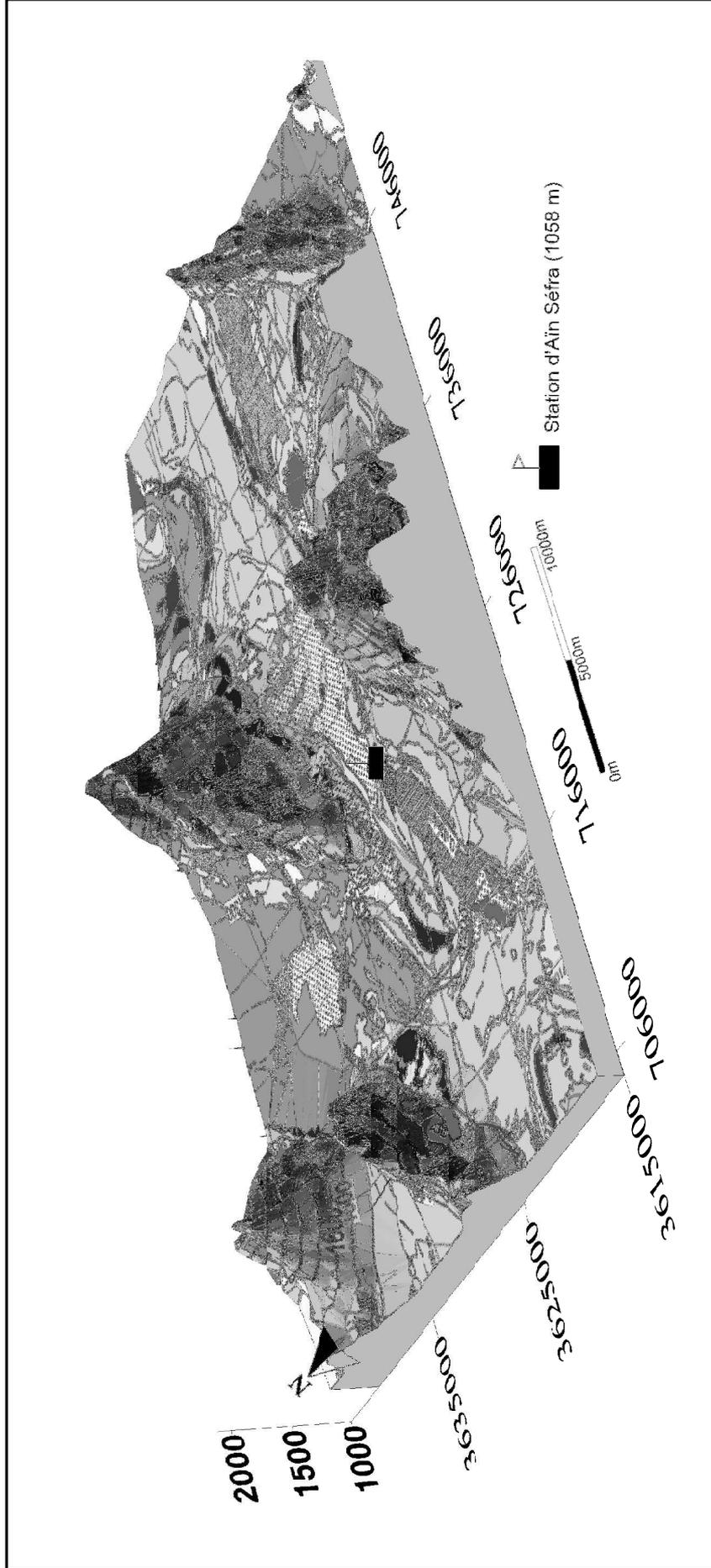


Figure 26 : Représentation géologique en 3 D de la région d'étude

### III -2-2. Conditions pédologiques

La nature des sols et leur répartition sont en étroite relation avec les unités géomorphologiques. Une plus grande superficie est occupée par les sols calcimagnésiques (fig. 27) (A. Bensaïd 2006).

**III -2-2-1. Sols calcimagnésiques :** cette classe est représentée par plusieurs types de sols : les rendzines, sols bruns calcaires et sols bruns calciques, sols à encroûtements gypseux. Ces sols occupent les glacis du Quaternaire ancien et moyen.

**III -2-2-2. Sols minéraux bruts :** les sols minéraux bruts sont représentés par les sols minéraux bruts d'érosion, les sols minéraux bruts d'apport alluvial et les sols minéraux bruts d'apport éolien :

**a-** sols minéraux bruts d'érosion : sont situés sur de fortes pentes où les couches superficielles sont constamment entraînées, empêchant ainsi la formation du sol ;

**b-** sols minéraux bruts d'apport alluvial : se rencontrent au niveau des oueds importants. Ils présentent une texture sableuse, une forte charge caillouteuse et leur profondeur est variable ;

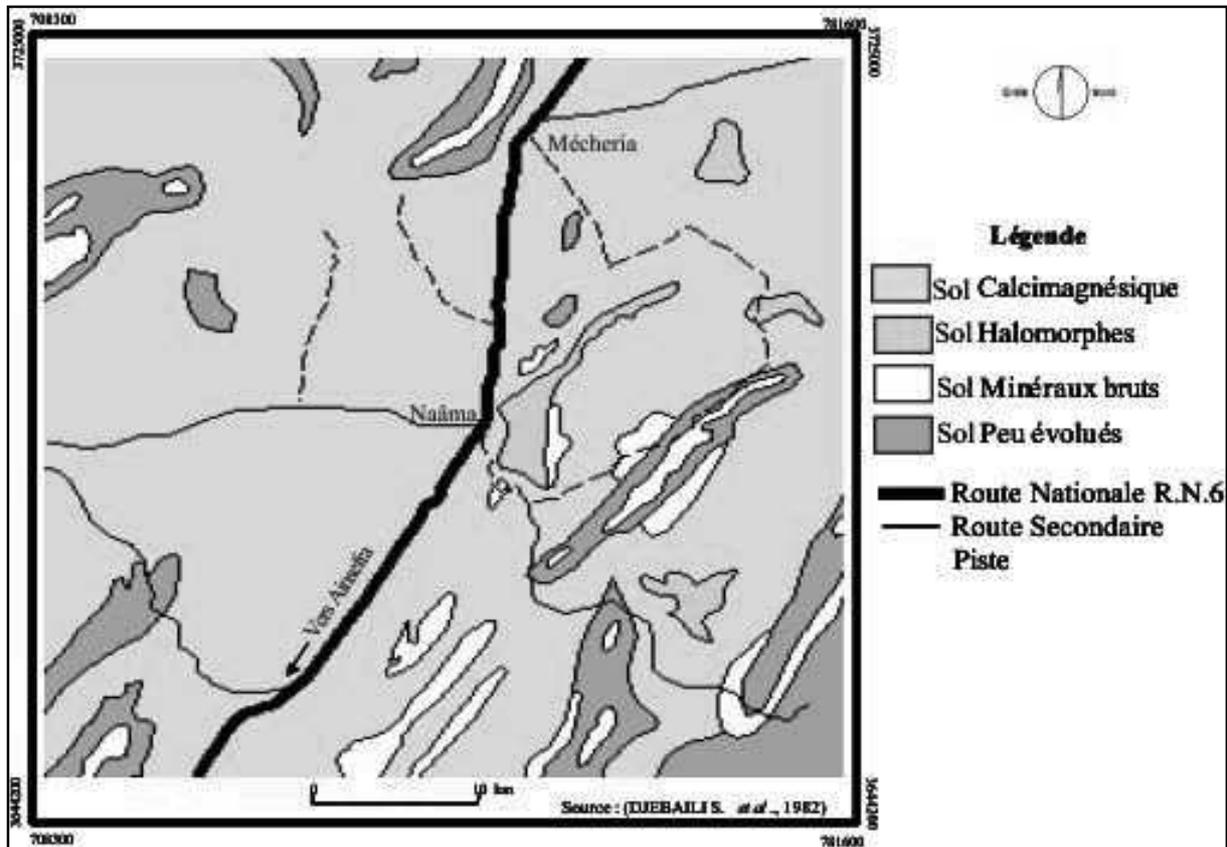
**c-** sols minéraux bruts d'apport éolien : ils sont constitués de sable et de dunes plus ou moins mobiles.

**III -2-2-3. Sols peu évolués :** la classe de sols peu évolués est composée par :

**a-** les sols peu évolués d'érosion sur roche mère dure (calcaire et grès) ou tendre (marnes), présentant une proportion élevée d'éléments grossiers et une forte charge caillouteuse ;

**b-** les sols peu évolués d'apport alluvial occupent particulièrement les zones basses (zone d'épandage, daïa (=petite cuvette dans laquelle se concentrent les eaux de pluie avant évaporation), chenaux d'oued). Ces sols représentent la majeure partie des terres mises en culture.

**III -2-2-4. Sols halomorphes :** ils se localisent au niveau des zones de dépressions et des zones d'épandage des principaux oueds. Ces sols se développent sur des matériaux alluviaux à texture sablo-limoneuse, et ils se repartissent en auréoles autour des chotts et des sebkhas et en bas des glacis.



**Figure 27 : Carte pédologique de la région centre de la wilaya de Naâma.** (S. Djebaili et al 1982, in A. Bensaïd 2006)

### III-2-3. Estimation de la RFU et méthodologie de calcul

Evaluation de l'évapotranspiration réelle ETR, qui est la quantité d'eau réellement évaporée dépend des conditions naturelles (végétation, nature du sol...) et de la quantité d'eau disponible dans le sol aussi appelée réserve utile (RU). Cette quantité d'eau est comprise entre 0 (réserve superficielle vide) pendant l'été et une valeur maximale appelée réserve en eau facilement utilisable (RFU ou  $RU_{max}$ ) (E. Gilli et al 2012).

RFU est la capacité maximale de saturation du sol (exprimé en cm) et c'est un facteur important pour déterminer le bilan hydrique (D. Zheng *et al* 1996).

D'après l'étude hydrogéologique, nous avons déterminé le rôle primordial de l'aquifère jurassique dans l'alimentation de celui du CI. L'aquifère du CI a deux impluviums distincts : ses propres affleurements (altitude moyenne 1058 m et surface de 270 Km<sup>2</sup>) et les terrains jurassiques (altitude moyenne 1600 m sur 370 Km<sup>2</sup> de surface).

Nous avons pris une valeur de RFU égale à 100 mm pour les sols calcimagnésiques, minéraux bruts et les halomorphes, qui occupent généralement les dépressions et qui couvrent les affleurements du CI et du RPQ (1 m de profondeur et 10% de porosité - F. Laurent 1996, E. Thiebaud 2008), et une valeur de 25 mm pour les sols peu évolués d'érosion sur les roches mères jurassiques (T<sub>j</sub>) en altitudes.

Afin d'estimer l'évapotranspiration réelle et la pluie efficace à l'échelle journalière (1983, 2006 et 2008), une série de calculs a été effectuée par l'intermédiaire de feuilles de calculs qui tiennent compte de la balance entre les apports des précipitations (P), la réserve en eau utile (RFU) et les pertes dues à l'évapotranspiration (ETP) ; durant la période humide, les sols sont progressivement humidifiés. Une partie de cette eau est retenu par les forces de capillarité (R). Quand le sol est saturé (R=RFU) l'eau s'infiltrer vers la nappe, mais l'évapotranspiration s'oppose à ce processus et restitue une partie de cette eau vers l'atmosphère (ETP) ; lorsque les précipitations et la RFU suffisent ETP= ETR et le surplus de la RFU alimente la nappe (fig. 28) (M. Kili *et al* 2008).

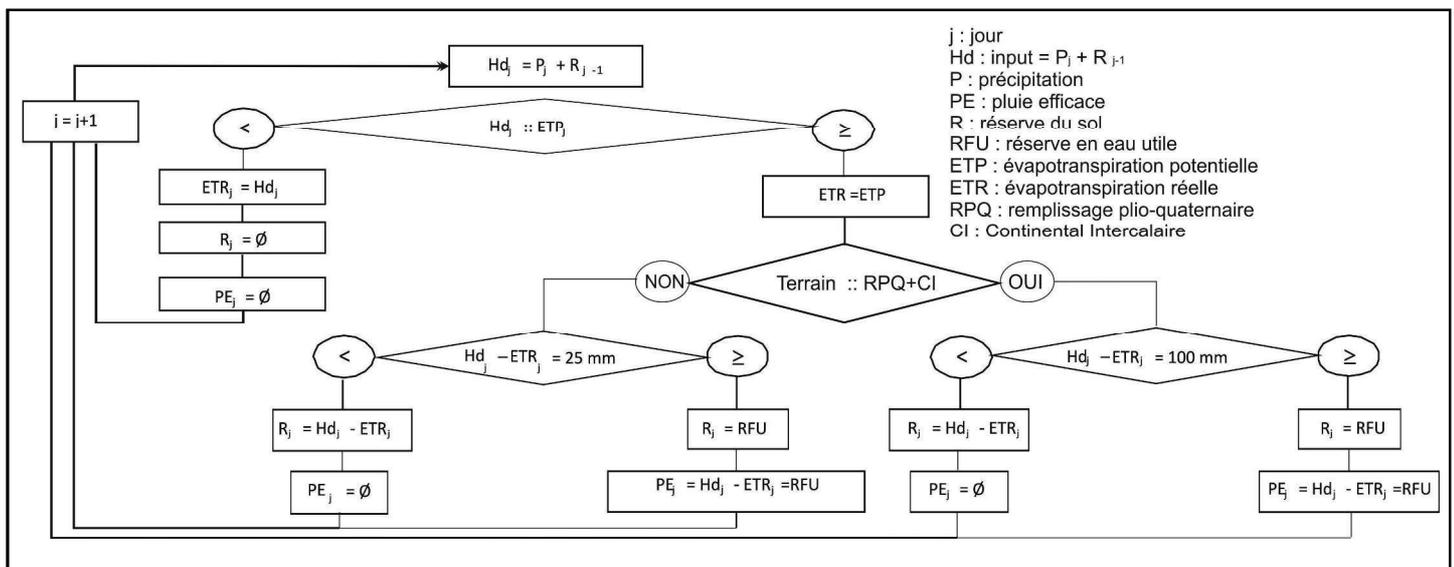
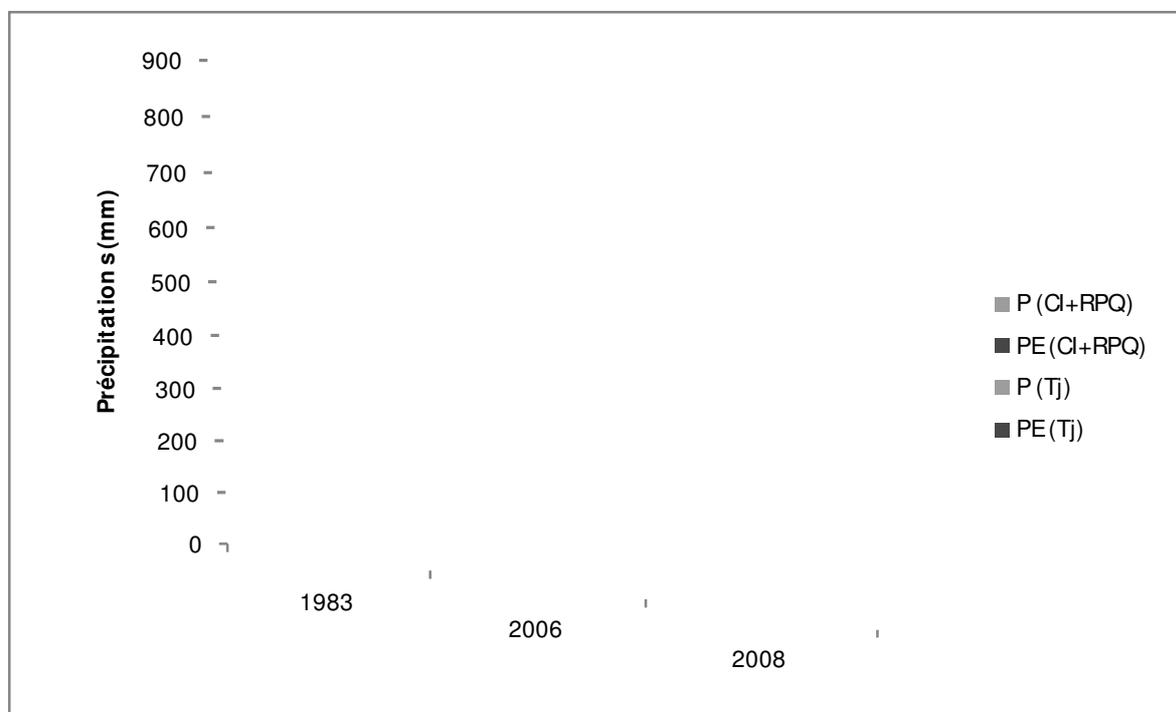


Figure 28 : Organigramme de calcul de l'ETR et PE

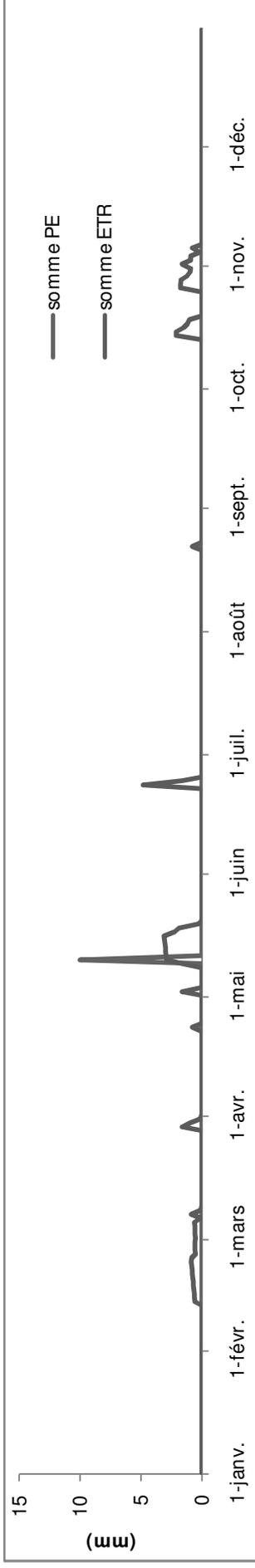
### III-3. Résultats

Cette analyse a été effectuée aux échelles spatiale et temporelle ; dont nous avons calculé la pluie efficace des deux impluviums ( $T_j$  et  $Cl+RPQ$ ) durant trois années 1983, 2006 et 2008 :

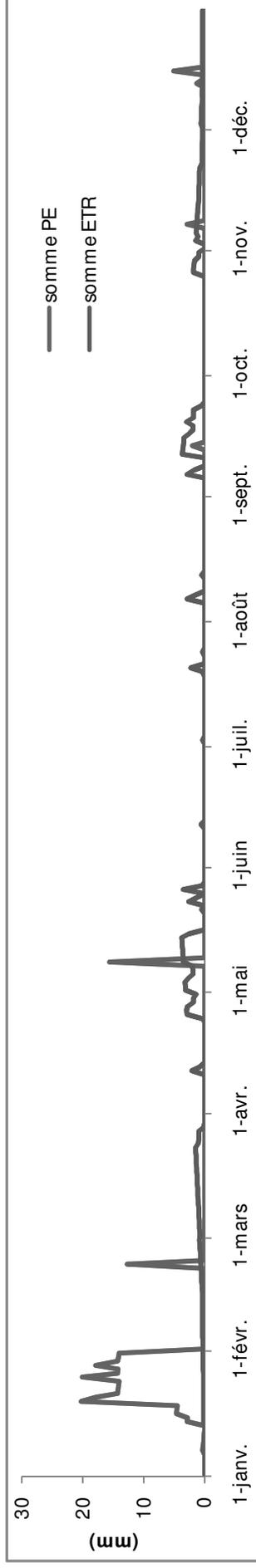
- la figure 29 représente la quantité de la pluie tombée et celle la pluie efficace sur les dépressions (affleurements du  $Cl$  et le  $RPQ$ ). Elle montre que la quantité infiltrée ( $PE$ ) dans les dépressions est nulle durant les années à faible et moyenne pluviométrie, en revanche elle rapproche les 100 mm en 2006 et dépasse 450 mm en 2008 en altitude ;
- la figure 30 représente la variation journalière de la  $PE$  et l'ETR calculée durant les trois années. Ces histogrammes montrent que la  $PE$  est plus ou moins importante durant les mois allant de septembre à mai, en ne dépassant pas les 20 mm durant les années à faible et moyenne pluviométrie et atteignent les 100 mm durant les périodes pluvieuses.



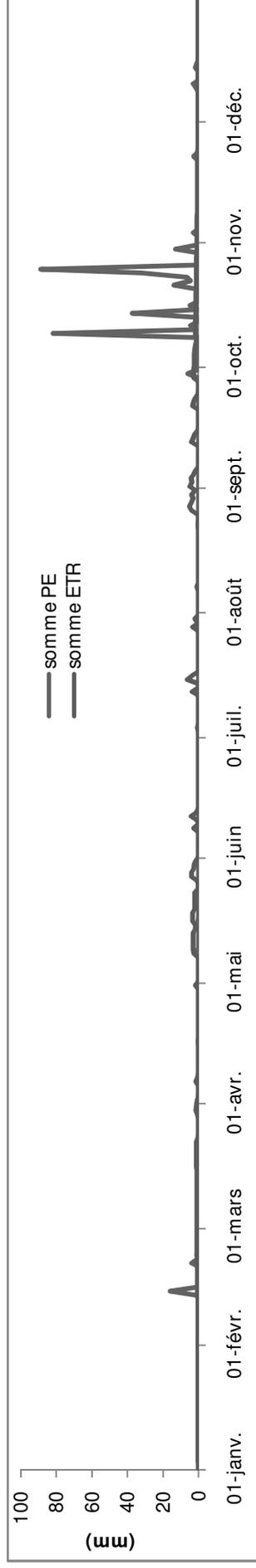
**Figure 29 : P et PE calculées pour les deux impluviums durant les trois années repères**



**a-1983**



**b-2006**



**c-2008**

**Figure 30: PE et ETR journalières durant les trois années repères**

#### IV- Bilan hydrologique et l'estimation de la recharge

La méthodologie utilisée pour estimer la recharge efficace des aquifères gréseux de la région d'Aïn Séfra est basée sur deux principes :

- l'interpolation spatiale afin de déterminer la lame d'eau tombée et les températures à une altitude de 1600 m, et l'interpolation temporelle pour estimer les ETP journalières à partir des données mensuelles de trois années repères : sèche 1983, moyenne 2006 et humide 2008;
- l'identification des impluviums (altitude et surface).

L'organigramme (fig. 31) explique et résume les chemins suivis pour calculer la recharge efficace et effectivement calculer le bilan hydrologique de l'aquifère du Cl.

#### Conclusion

La méthodologie présentée dans cette partie de notre travail nous a permis de déterminer le rôle de la lithologie et les paramètres climatiques à la recharge de l'aquifère du Cl dans cette zone semi-aride. Cette application est basée sur une estimation spatiale et temporelle des différents paramètres météorologiques; un gradient thermique et un autre pluviométrique, ce qui nous a permis d'estimer la pluie efficace dans les dépressions et les altitudes :

- l'estimation de la lame d'eau tombée sur l'impluvium jurassique est plus importante que celle tombée sur les trains gréseux (Cl et RPQ), en revanche les températures baissent en altitude donc une ETP plus faible ;
- la pluie efficace calculée, et le débit d'alimentation de l'aquifère ; par son impluvium jurassique en altitude (1600 m) où le sol est peu évolué (RFU=25 mm) et gréseux dans les dépressions (1058 m) recouvertes par un sol très développé, ce qui explique que la pluie efficace est liée principalement au RFU car un sol aux gros grains favorise généralement l'infiltration plus qu'un sol aux grains fins (PG. Cook *et al.* 1992). Les résultats montrent aussi que l'aquifère gréseux est alimenté principalement par les affleurements du Jurassique coiffant les dépressions gréseuses, durant les années pluvieuses où la précipitation dépasse 300 mm par an.

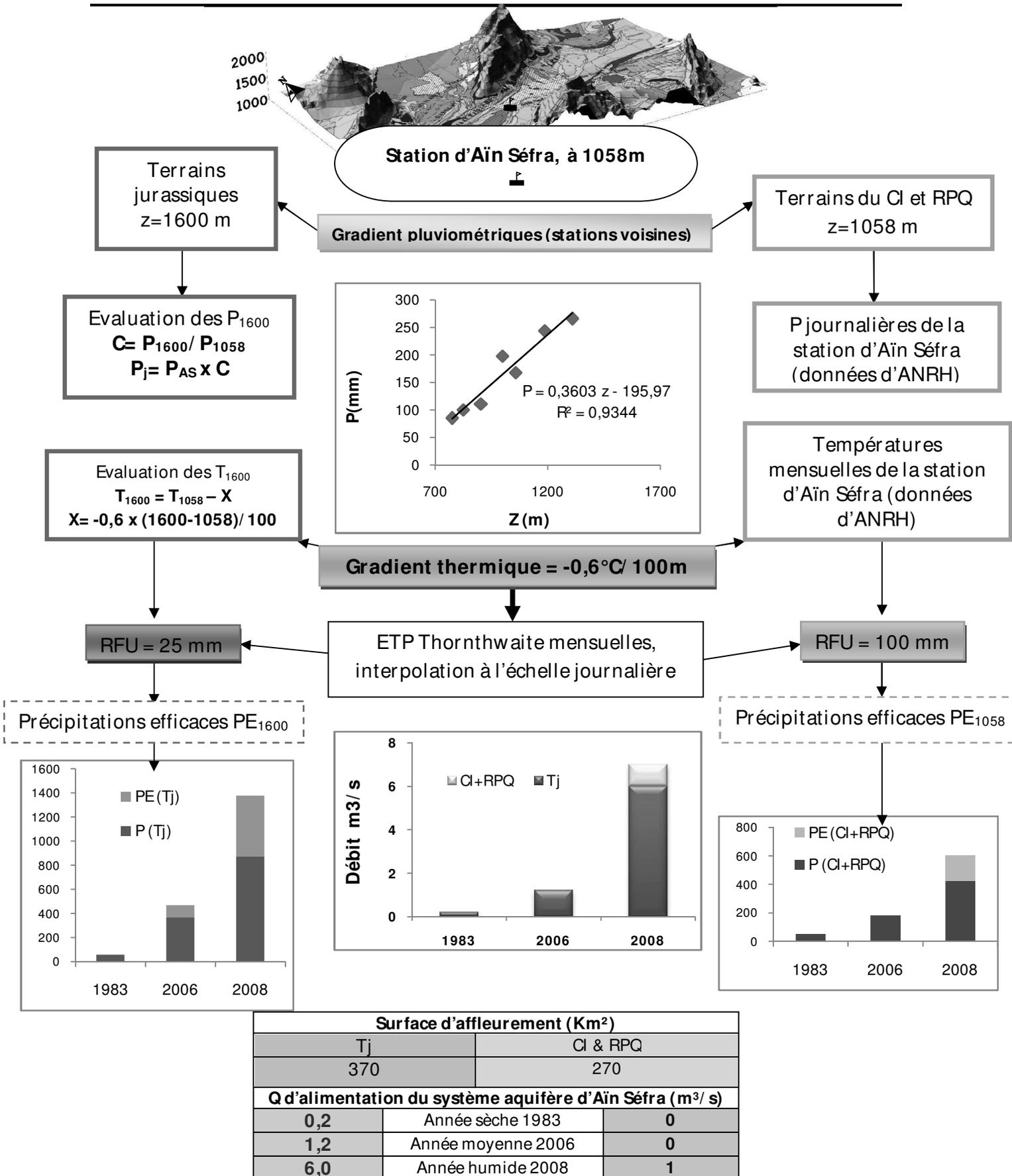


Figure 31 : Organigramme du bilan hydrique

## **PARTIE 3 : ROLE DE L'HYDROCHIMIE DANS L'IDENTIFICATION DES ECOULEMENTS SOUTERRAINS**

### **Introduction**

**I- Composition chimique des eaux des aquifères (RPQ et du Cl)**

**II- Origine de la minéralisation**

**II-1. Principe**

**II-2. Application**

**II-3. Résultats et perspectives**

### **Conclusion**

## **Introduction**

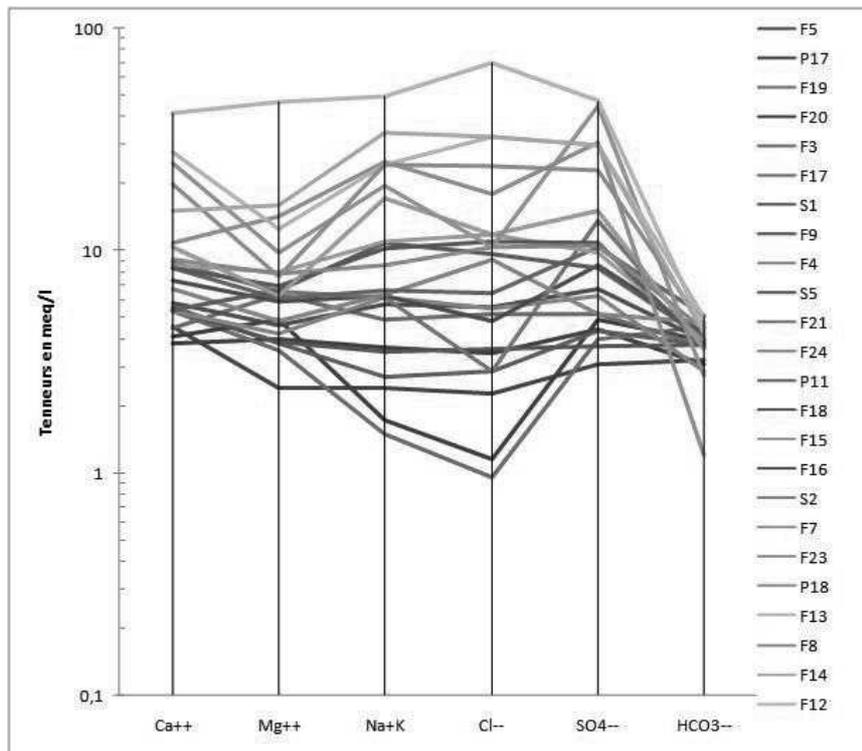
Les analyses physico-chimiques des points d'eau qui captent le système aquifère représenté par le Barrémo-Albo-Aptien, identifié au Continental Intercalaire, montrent une minéralisation assez élevée (entre 2000 et 4000 mg/l) sur certains prélèvements. La lithologie du réservoir aquifère exploité n'explique pas à elle seule cette minéralisation, un autre facteur intervient, lié à la tectonique de la région. Pour préciser son origine, nous avons utilisé la méthode d'analyse factorielle discriminante qui nous permet de caractériser l'importance de la disposition structurale des réservoirs aquifères, qui constitue l'un des principaux paramètres responsable de cette minéralisation.

### **I- Composition chimique des eaux des aquifères (RPQ et Cl)**

La minéralisation des eaux souterraines dépend naturellement de celle des terrains traversés et du temps de séjour. Dans les zones semi arides ou arides, les évaporites, dont la cinématique de dissolution est très rapide, constituent une source de contamination naturelle (E. Gilli *et al.* 2012).

L'étude des faciès hydrochimiques des eaux souterraines de la région (fig. 32) montre que celles-ci sont de manière générale de nature sulfatée-calcique à magnésienne et chlorurée-sodique à calcique. Ceci montre que la minéralisation d'origine évaporitique (parfois plus de 2g/l de  $\text{SO}_4^{2-}$  et de  $\text{Cl}^-$  (annexe 3) est acquise par la dissolution du gypse et de l'halite des formations triasiques de la région.

Les résultats d'études antérieures sur la chimie des eaux du Continental Intercalaire d'Aïn Séfra ont permis de mettre en évidence un changement de la minéralisation entre les forages, les puits et les sources (A. Abada 1986, H. Mansour 2007, A. Rahmani 2008). Nous avons réalisé une cartographie hydrochimique dont l'objectif est de visualiser la répartition spatiale de la minéralisation des eaux des différentes unités hydrogéologiques de la région (fig. 33).



**Figure 32 : Diagramme logarithmique vertical.  
Eaux de la région d'Aïn Séfra**

## **II- Origines de la minéralisation par l'analyse factorielle discriminante**

### **II-1. Principe**

L'Analyse en Composantes Principales (ACP) peut être considérée comme une méthode de projection qui permet de visualiser (projeter) les observations depuis l'espace à  $p$  dimensions des  $p$  variables vers un espace à  $k$  dimensions ( $k < p$ ) tel qu'un maximum d'information soit conservé. Parmi les applications de cette méthode, on citera plus particulièrement la visualisation et l'étude des corrélations entre les variables ainsi que la visualisation des observations dans un espace à deux ou trois dimensions. Dans les études hydrogéologiques, l'ACP constitue une des techniques statistiques de plus en plus employées, portant sur plusieurs variables, dans le but d'identifier les facteurs contrôlant la variabilité des données géochimiques (J. Mudry 1987). L'ACP aide à simplifier et organiser une large variété de données (A. Boubakar Hassane 2011).

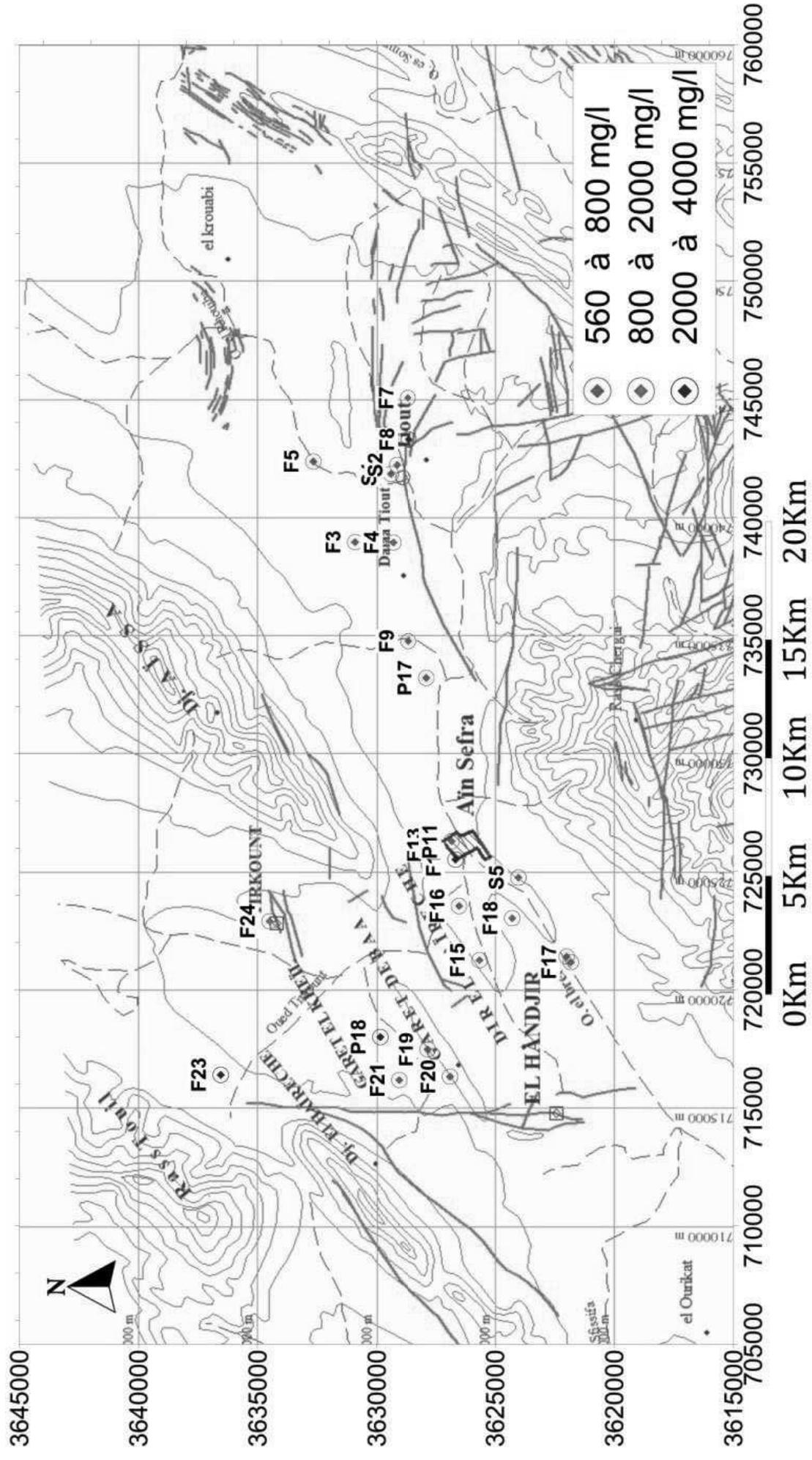


Figure 33 : Distribution de la minéralisation des eaux des gouttières synclinales d'Ain Séfra

L'analyse discriminante est une méthode d'analyse multidimensionnelle qui propose de comparer, au sein d'une population statistique rangée dans des groupes définis *a priori*, la variance intergroupe à la variance intragroupe (J. Mudry 1991). L'Analyse Factorielle Discriminante (AFD), permet de visualiser, d'analyser mais surtout de prédire à partir d'une série de variables quantitatives centrées réduites, l'appartenance d'un ensemble d'individus à des groupes prédéfinis. Ces groupes ainsi déterminés sont appelés groupes d'appartenance. Grâce à la variance apportée par chacun des individus (=prélèvements), l'algorithme réaffecte cet individu à l'un des groupes de départ, les individus sont alors reclassés dans ce que l'on appelle les groupes d'affectation. Si l'individu est réaffecté à son groupe d'appartenance, il est dit « bien classé », s'il est réaffecté à un autre groupe, il est dit « mal classé » (J. Mudry 1991, A. El Ouali *et al.* 2000).

L'autre intérêt de la méthode est de resituer des individus supplémentaires par rapport aux groupes d'affectation.

## **II-2. Application**

L'objectif de cette méthodologie est non seulement de caractériser la minéralisation des eaux du système aquifère du Barrémo-Albo-Aptien sur l'ensemble des synclinaux, mais aussi de déterminer si la variation chimique des eaux souterraines est plus conditionnée par le contexte lithologique ou par la géologie structurale de la région.

Cette analyse a été appliquée sur **11 variables physico-chimiques** ( $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{--}$ ,  $\text{HCO}_3^{--}$ ,  $\text{NO}_3^{--}$ , Conductivité électrique, Résidu sec et pH) de **25 points d'eaux** (puits, forages et sources, tableau 1) des trois unités hydrogéologiques de la région d'Aïn Séfra.

En premier lieu, nous avons analysé notre base de données par ACP afin d'identifier les groupes homogènes d'observations. A partir de là, nous avons croisé deux variables qualitatives « lithologie » (Albien : A, Barrémien-Aptien : B et Recouvrement plio-quaternaire : C) et « structurale » (zone faillée : ZF et zone non-faillée : ZNF) en effectuant sur le même jeu de données deux analyses discriminantes différentes, l'une avec la variable « lithologie » : A, B et C, et l'autre avec la variable « structurale » : ZF et ZNF.

### **II-3. Résultats et perspectives**

L'analyse en composantes principales de la chimie des eaux du système aquifère (fig. 34) a montré que l'axe I est un axe de minéralisation d'origine évaporitique et l'axe II est défini, d'une part par les pics des bicarbonates ayant pour origine les bancs carbonatés jurassiques et d'autre part par les pics de nitrates provenant de l'infiltration des précipitations sur les cuvettes synclinales d'Aïn Séfra.

L'analyse des individus (fig. 35) montre que :

- l'axe I regroupe principalement les forages qui captent les formations gréseuses du Barrémo-Aptien (groupe B) ;
- le pôle des bicarbonates de l'axe II regroupe majoritairement les forages captant les formations gréseuses de l'Albien (groupe A) ;
- le pôle des nitrates est représenté par les puits implantés dans le recouvrement plio-quaternaire (groupe C).

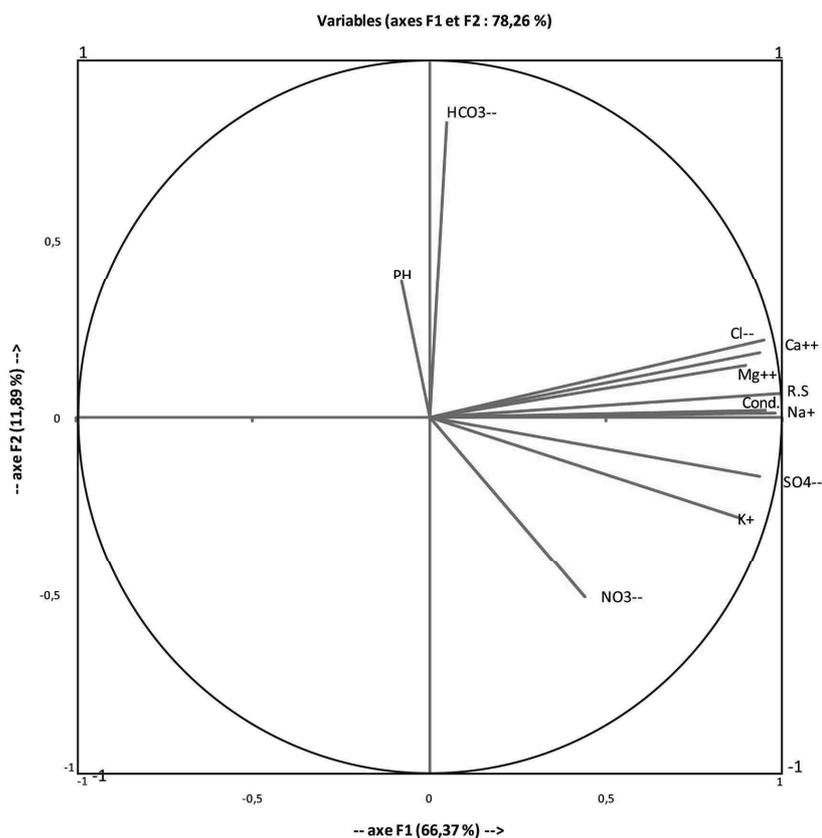
Le positionnement des individus sur la carte structurale (fig. 33) nous révèle que la plupart des points ayant une minéralisation importante sont situés à proximité des zones faillées.

A partir des résultats de l'ACP et de la distribution de la minéralisation, une problématique est apparue : Quel facteur a le rôle prépondérant **dans l'acquisition de cette minéralisation, la lithologie ou la fracturation ?** L'analyse factorielle discriminante croisée a été utilisée pour répondre à cette question.

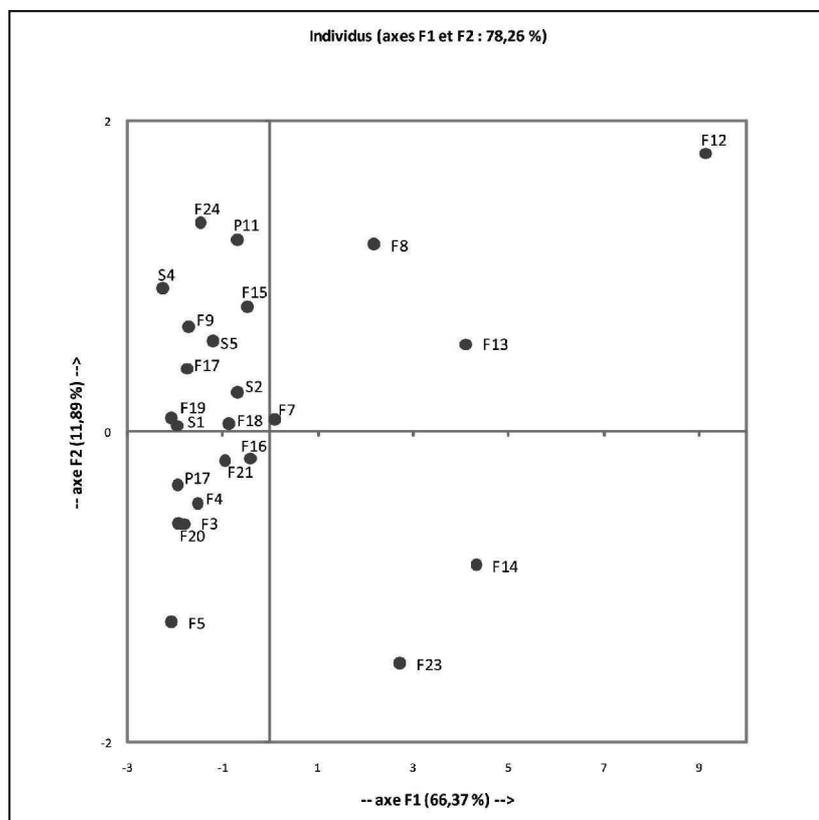
L'AFD croisée consiste à effectuer plusieurs traitements sur la même base de données en déterminant pour chaque traitement une variable qualitative différente permettant de définir pour chacun un indice de groupe (groupe d'affectation) (A. Abdelgader *et al.* 1996).

Pour cela, nous avons choisi deux variables qualitatives pour chaque traitement :

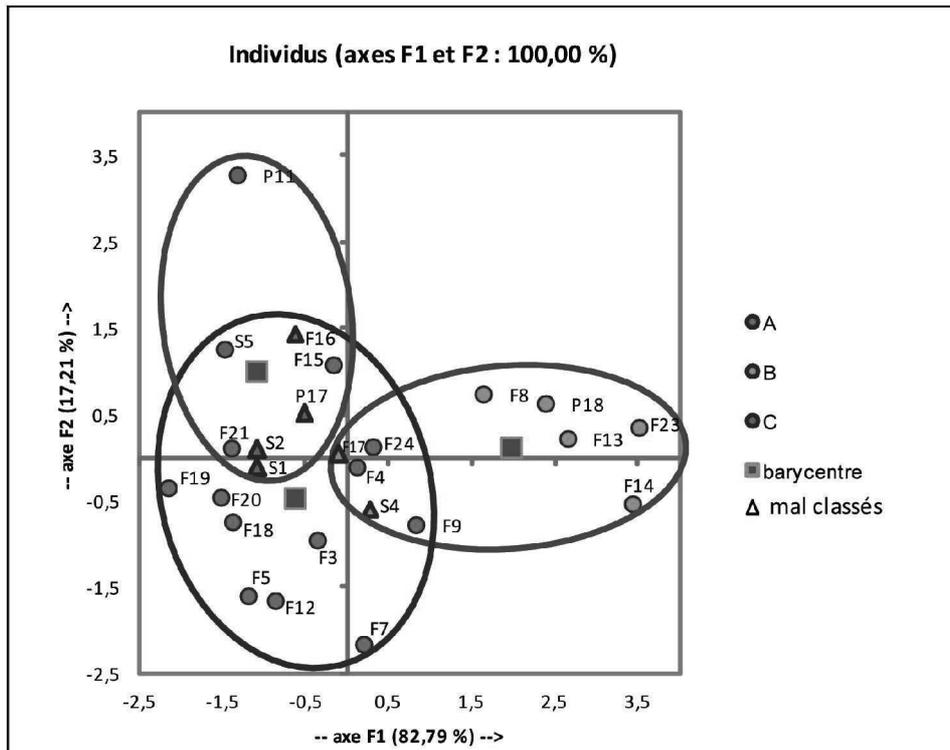
- la variable lithologie, qui peut prendre la valeur **A** « Albien », **B** « Barrémien-Aptien » et **C** « Recouvrement plio-quaternaire RPQ » (fig.36-a),
- la variable structurale, qui peut prendre la valeur **ZF** « Zone faillée », **ZNF** « Zone non faillée » (fig. 36-b).



**Figure 34 : Analyse en Composantes Principales.  
Espaces des variables, plan factoriel IxII.**

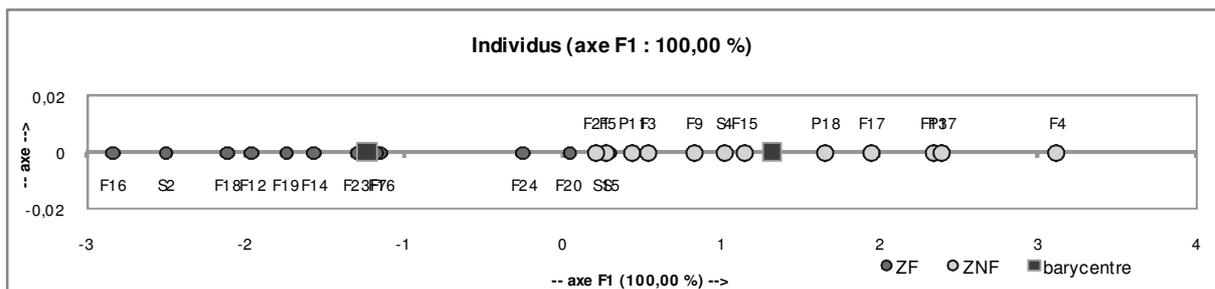


**Figure 35 : Analyse en Composantes Principales.  
Espaces des individus, plan factoriel IxII**



**Figure 36-a : Analyse discriminante des données hydrochimiques : classification par 'lithologie'**

Les tableaux 2 et 3 montrent les groupes d'appartenance, les groupes d'affectation et le classement des individus supplémentaires. Selon le groupement par structurale 92 % d'individus sont bien classés et seulement 67,91 % selon le regroupement lithologie ce qui démontre le rôle dominant et déterminant de la géologie structurale dans l'acquisition de la minéralisation des eaux.



**Figure 36-b : Analyse discriminante des données des hydrochimiques : classification par 'structurale'**

**Tableau 2 : Classement 'lithologique' des eaux (forages et sources)**

| Groupe d'appartenance \ Groupe d'affectation | Albien | Barrémo-Aptien | Recouvrement plio-quatenaire RPQ | % de bien Classés | % global de bien classés |
|--|--------|----------------|----------------------------------|-------------------|--------------------------|
| Albien (A)                                   | 12     | 0              | 1                                | 92,31             | <b>67,91</b>             |
| Barrémo-Aptien (B)                           | 2      | 5              | 0                                | 71,43             |                          |
| RPQ (C)                                      | 3      | 0              | 2                                | 40                |                          |

**Tableau 3 : Classement 'structural' des eaux (forages et sources)**

| Groupe d'appartenance \ Groupe d'affectation | Zone faillée | Zone non faillée | % de bien Classés | % global de bien classés |
|--|--------------|------------------|-------------------|--------------------------|
| Zone faillée                                 | 11           | 2                | 84,62             | <b>92,31</b>             |
| Zone non faillée                             | 0            | 12               | 100               |                          |

### **Conclusion**

En conclusion ; dans le cas des gouttières synclinales d'Aïn Séfra, les analyses factorielles discriminantes croisées ont permis de démontrer que la variabilité hydrochimique des aquifères gréseux est beaucoup plus influencée par les caractéristiques de la géologie structurale que par la lithologie. En effet, les contacts anormaux entre les formations gréseuses du Continental Intercalaire et les structures diapiriques argilo-gypso-salines du Trias forment les principales zones de contamination. Elles se situent à l'Est d'Aïn Séfra, au pied du Djebel Mekter, au Sud de localité de Tiout, le long de la faille d'El Handjir, à l'Ouest de Mékalis ainsi qu'au Sud de l'accident Ras Touil – Aïn Séfra. Il est clair donc que le contexte géostructural conditionne d'une façon très significative la configuration géochimique des aquifères de cette partie de l'Atlas saharien occidental.

## **PARTIE 4 : ESSAI DE MODELISATION HYDRODYNAMIQUE DE L'UNITE HYDROGEOLOGIQUE DE GARET EL KHEIL**

### **Introduction**

#### **I. Modèle conceptuel de l'aquifère du CI de Garet El Kheil**

##### **I-1. Domaine à modéliser et conditions aux limites**

##### **I-2. Caractéristiques hydrodynamiques et débits prélevés**

#### **II. Modèle numérique en régime permanent**

#### **III. Bilan des flux de la nappe**

#### **IV. Réponses de l'aquifère aux variations climatiques et aux sollicitations anthropiques**

### **Conclusion**

## **Introduction**

Comme il a été détaillé dans les chapitres précédents, l'aquifère du Continental Intercalaire représente une importante ressource d'eau surtout sous un climat semi-aride à aride. L'exploitation des eaux souterraines dans la région d'Aïn Séfra ne subit aucune forme de surveillance, le nombre des puits et des forages est en croissance vu le développement de l'agriculture et les aides étatiques pour cette activité. Il est donc nécessaire d'estimer l'impact de cette exploitation sur la nappe de l'aquifère du CI. L'outil efficace pour répondre à cette problématique est le modèle mathématique.

Cette partie de notre travail détaillera un essai de modélisation de l'une des unités hydrogéologiques du synclinal d'Aïn Séfra.

La construction du modèle mathématique est la traduction des caractéristiques physiques en termes d'équations algébriques (F. Dauvergne 2013). Cette construction nécessite des connaissances profondes sur la géométrie, les paramètres hydrodynamiques et les conditions aux limites de l'aquifère, ce qui était, dans notre cas d'étude, très difficile d'accès en termes de qualité et de quantité. La rareté des informations sur les paramètres hydrodynamiques nous a obligée à choisir un modèle 2D et le limiter au synclinal de Garet El Kheil, là où nous avons un maximum de données ;

### **I- Modèle conceptuel de l'aquifère du CI de Garet El Kheil**

Nous avons utilisé le code AS2DWIN, qui est l'implantation complète d'un modèle d'eaux souterraines en deux dimensions utilisable sous Microsoft Windows. Il a été initialement développé par W. Kinzelbach, R. Rausch et W. H. Chiang (1995), c'est un outil pédagogique à l'intention d'étudiants en hydrogéologie et ingénierie civile et environnementale. Ce logiciel a pour qualité première d'être simple et modulaire.

#### **I-1. Domaine à modéliser et conditions aux limites**

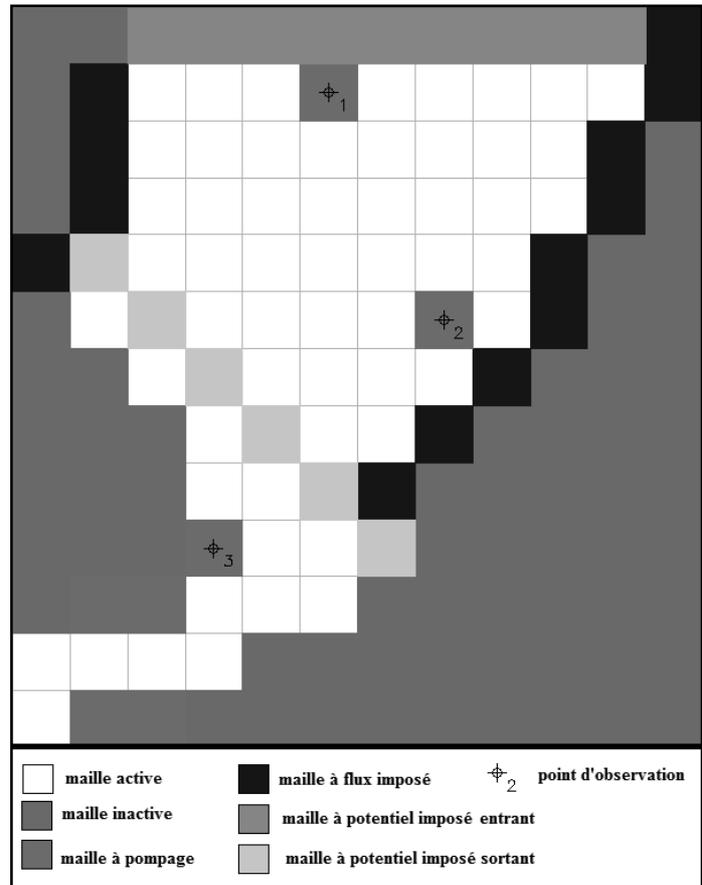
L'unité hydrogéologique de Garet El Kheil est la partie la plus connue de tout le synclinal d'Aïn Séfra, vu les études géophysiques qui nous donnent des informations détaillées sur la géométrie de l'aquifère, ainsi que le nombre de forages exploitant cette unité, et les conditions aux limites sont bien déterminées.

La géométrie de l'aquifère a été déterminé d'une part par les études géophysiques pour la profondeur du substratum, et par les courbes de niveau pour le toit d'autre part, que nous avons interpolées par le code ASM. La piézométrie de référence est mesurée par Rahmani en septembre 2008.

Sur une surface de 156 Km<sup>2</sup>, la zone d'étude a été discrétisée en 92 mailles de 1 Km de côté.

Les limites du domaine à modéliser ont été déterminées comme suit (fig. 37) :

- à l'Est et à l'Ouest des limites à flux imposé ;
- au Nord une limite à potentiel imposé ;
- au Sud une limite à flux nul.



**Figure 37 : Discretisation du domaine et les conditions aux limites**

### **I-2.Caractéristiques hydrodynamiques, débits d'alimentation et débits prélevés**

Les données de forages et les essais de pompage nous ont fourni une importante base de données concernant les paramètres hydrodynamiques de l'aquifère ainsi que les débits de pompages ; elle a donc été introduite dans le modèle.

Les interprétations des essais de pompage de longue durée (48 h à 72 h) à débit constant nous donnent les valeurs de référence pour notre modèle (A. Abada 1986, A. Rahmani 2008):

**Tableau 4 : Valeurs de la transmissivité utilisées pour le modèle conceptuel**

| Auteur           | Nom et code        | X         | Y          | T (m <sup>2</sup> / s) |
|------------------|--------------------|-----------|------------|------------------------|
| Rahmani,<br>2008 | Aïn Séfra F2 (F19) | 717473.20 | 3627833.75 | 9,3.10-3               |
|                  | Aïn Séfra F3 (F20) | 716319.90 | 3626892.00 | 1,1.10-2               |
|                  | Tirkount 1 (F25)   | 720700.00 | 3638850.00 | 3,5.10-4               |
| Abada,<br>1986   | P5                 | 724705,25 | 3641365,81 | 1.610-2                |
|                  | P3                 | 723388,56 | 3630572,34 | 1.4 10-2               |

Nous avons considéré l'aquifère comme une seule unité homogène d'une porosité de 20%. Le débit d'alimentation de la nappe est calculé a été dans la partie 2 de notre travail, il a été estimé à  $16.3 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$ . L'unité de Garet El Kheil est exploitée par une dizaine de forages et puits d'un débit moyen de  $0.0012 \text{ m}^3/\text{s}$ . Dans certaines mailles qui contiennent plusieurs forages le débit de pompage sera multiplié par le nombre forages. Dans notre cas, le rôle drainant de la faille Ras Touil-Aïn Séfra est pris en compte par le modèle, elle est en effet représentée comme une limite à potentiel imposé sortant (figure 37).

## II. Modèle numérique en régime permanent

L'ajustement du modèle conceptuel à la piézométrie de l'état permanent du septembre 2008 a été réalisé par tâtonnements. Les résultats du calage représentés dans la figure 38 nous montrent que la courbe de tendance de la représentation des niveaux piézométriques calculés en fonction des ceux mesurés est presque superposée à la droite de la fonction  $H_m = H_c$  (à l'exception de quelques points situés sur les limites, où les données sont inexistantes). La figure 39 représente la piézométrie mesurée ( $H_m$ ) et calculée ( $H_c$ ) : les axes de drainages et les sens d'écoulement sont parfaitement reproduits, la corrélation est acceptable, nous pouvons donc admettre que le calage est satisfaisant.

## III-Bilan des flux de la nappe

Une fois le modèle calé, nous pouvons calculer le bilan des flux de la nappe. Le tableau suivant donne les valeurs des flux calculées par le modèle (tableau 5).

Il nous a permis de vérifier le bon calage du modèle par un calcul de convergence. L'écart de la simulation n'est que de  $2.6 \cdot 10^{-4} \%$  dans notre cas (**DISCREPANCY** dans le tableau 5).

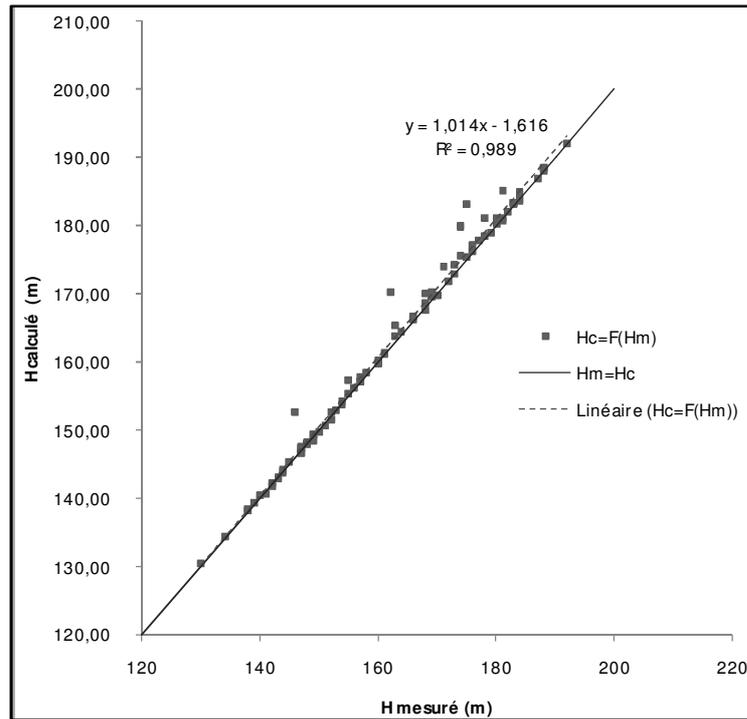


Figure 38 : Comparaison des potentiels calculés et mesurés ( $H_c = F(H_m)$ ) de toutes les mailles pour le régime permanent

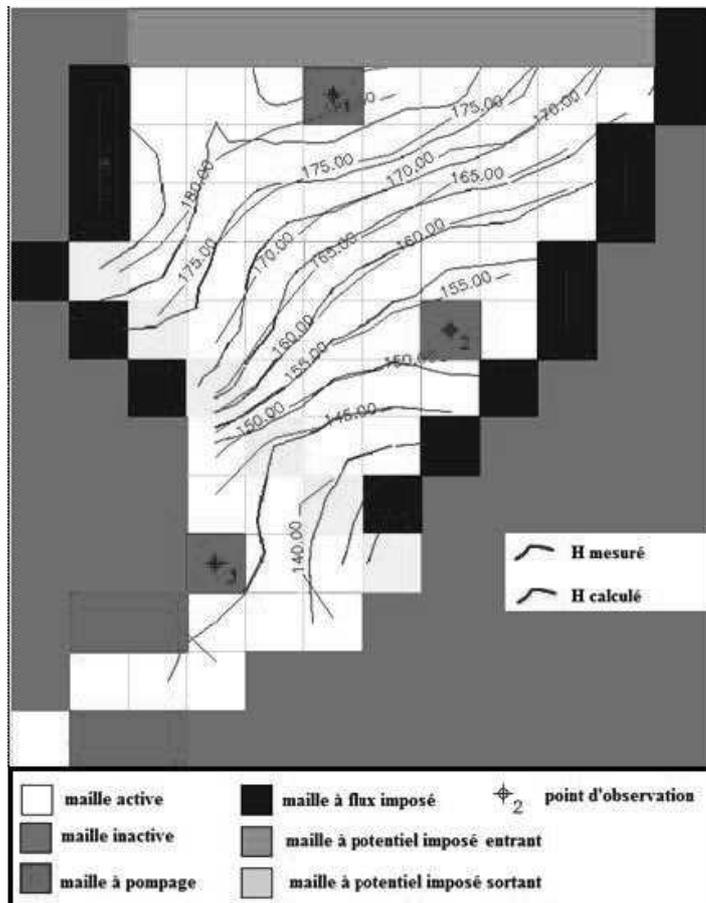


Figure 39 : comparaison des potentiels mesurés et calculés après calage en régime permanent

**Tableau 5 : Bilan de la nappe calculé après calage**

| ASMM N - WATER BUDGET   |              |              |               |
|---|--------------|--------------|---------------|
| -----   |              |              |               |
| FLOWS ARE CONSIDERED 'IN' IF THEY ARE ENTERING A SUBREGION<br>THE UNIT OF THE FLOWS IS [ L^3/ SECOND] |              |              |               |
| MODEL: E:\SOMAI\1PARTI~2\GARET.ASM  |              |              |               |
| STEADY STATE SOLUTION   |              |              |               |
| WATER BUDGET OF THE WHOLE MODEL DOMAIN  |              |              |               |
| FLOW TERM   | IN           | OUT          | IN- OUT       |
| CONSTANT HEAD   | 1.575867E-01 | 4.544852E-01 | -2.968985E-01 |
| WELL  | 0.000000E+00 | 4.310000E-02 | -4.310000E-02 |
| RECHARGE  | 3.399998E-01 | 0.000000E+00 | 3.399998E-01  |
| SUM   | 4.975865E-01 | 4.975852E-01 | 1.341105E-06  |
| DISCREPANCY [%]   | 0.0002613    |              | %             |

#### IV- Réponses de l'aquifère aux variations climatiques et aux sollicitations anthropiques

Le modèle numérique réalisé est ensuite utilisé pour simuler le comportement hydrodynamique et la réponse de la nappe aux deux conditions particulières: la première est la diminution de la recharge efficace, la seconde est l'augmentation de débit des pompages. Vu que la recharge efficace ( $16.3 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$ ) est dix fois plus importante que le volume d'exploitation ( $1.36 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$ ), et que le développement de l'agriculture provoque une multiplication du nombre des forages, nous avons envisagé une diminution de moitié de la recharge, et un doublement du débit d'exploitation.

##### IV-1. Scénario n°1 (-50% de la recharge)

Ce scénario envisage une diminution de la recharge efficace à 50% afin de déterminer la sensibilité du niveau piézométrique aux changements des conditions météorologiques.

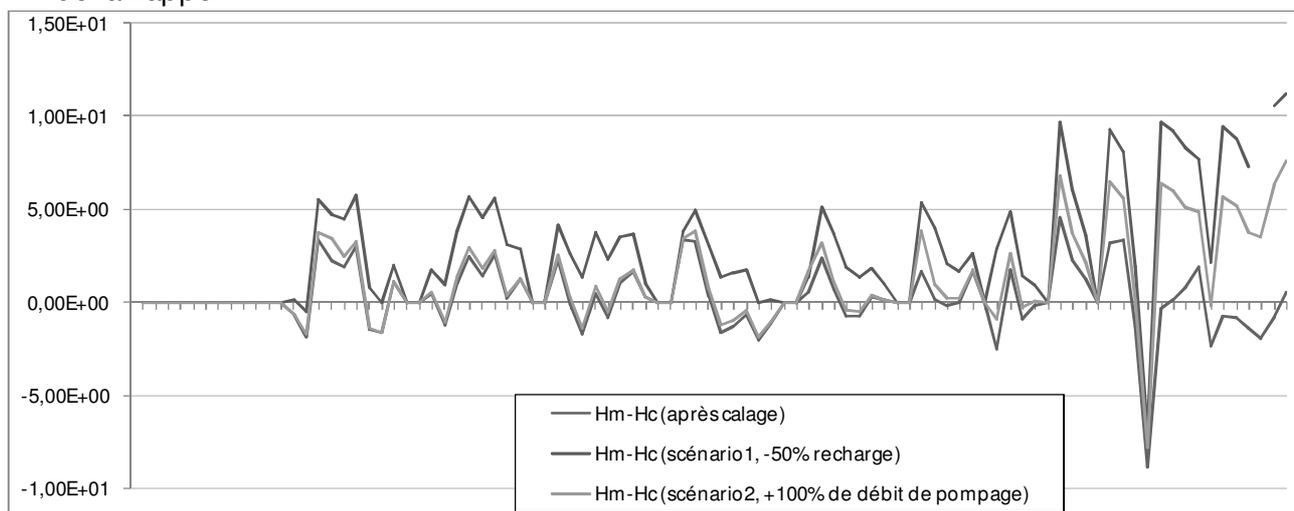
Nous observons dans la figure 40 la différence entre le potentiel mesuré et celui calculé a changé légèrement au Nord en revanche le rabattement est assez important au Sud (dépasse les neuf mètres). Cela est expliqué par l'alimentation latérale au Nord, par contre au Sud, les précipitations sont le seul apport à la nappe.

##### IV-2. Scénario n°2 (+100% de débit de pompage)

Afin de déterminer l'influence de l'exploitation, nous avons envisagé une augmentation de débit de pompage de  $6566,4 \text{ m}^3/\text{jour}$  (soit + de 100% du débit initial).

Les résultats de la simulation montrent que le rabattement du niveau de la nappe n'est pas très important, donc la nappe « supporte » une exploitation double de l'actuelle.

La représentation des  $H$  (figure 40), nous montre que l'impact climatique ( $-8.2 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$ ) est beaucoup plus important que l'exploitation ( $+1.36 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$ ) sur le niveau de la nappe.



**Figure 40 : Représentation des  $H$  de la simulation en régime permanent, premier et second scénarios.**

## **Conclusion**

La modélisation hydrodynamique de la nappe du CI et le RPQ a fourni des données indispensables à une gestion rationnelle de cette ressource primordiale au développement durable dans les zones arides.

Le modèle conceptuel a considéré l'aquifère multicouche CI et RPQ comme un aquifère monocouche afin de simplifier la représentation et de faciliter les calculs.

Le modèle mathématique nous a permis de simuler l'état initial (septembre 2008) en régime permanent dont les résultats de simulation sont satisfaisants.

Le bilan de la nappe calculé après le calage du modèle montre un équilibre entre les flux entrants et ceux sortant avec un écart de la simulation de  $2.6 \cdot 10^{-4} \%$ .

L'exploitation du modèle par les deux scénarios a révélé que le niveau piézométrique de la nappe est plus sensible à la diminution de la recharge qu'à l'exploitation. Ainsi que l'impact des changements climatiques et de l'exploitation intensive est plus remarquable dans la partie sud de l'unité qu'à la partie nord. Cela est dû à l'alimentation de la nappe par les formations jurassiennes au Nord.

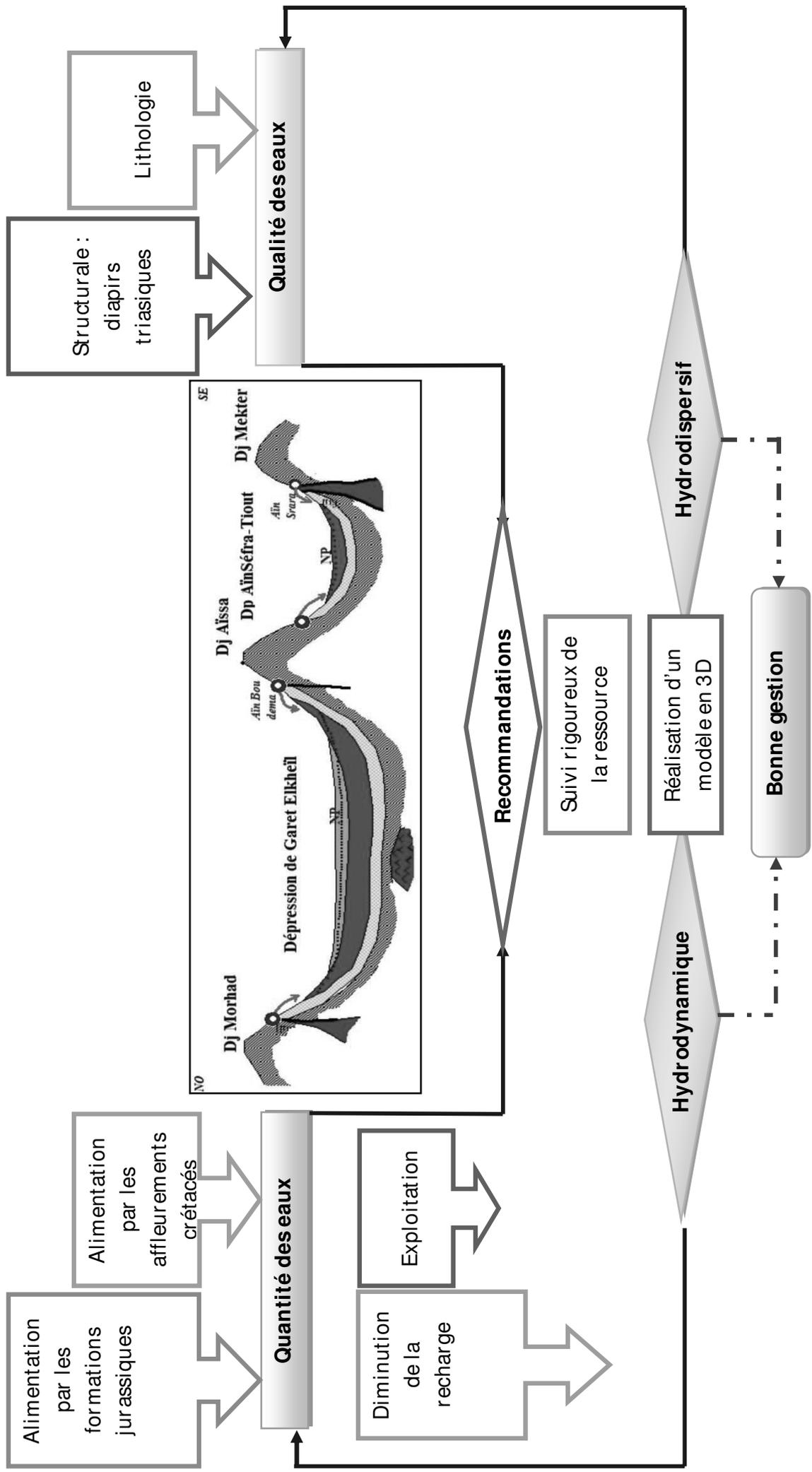


Figure 41 : Paramètres, étapes, résultats et recommandations pour une meilleure gestion de la ressource en eau du synclinal d'Aïn Séfra

## CONCLUSION GENERALE

L'objectif de cette thèse est d'étudier les écoulements souterrains des gouttières synclinales d'Aïn Séfra. L'ensemble des travaux réalisés visent à déterminer les caractéristiques et les paramètres nécessaires à la réalisation d'un modèle mathématique qui servira à une bonne gestion des ressources en eau souterraine.

Après avoir étudié le contexte géologique, structural et hydrogéologique de la zone d'étude dans la première partie de la thèse, nous avons pu déterminer le rôle hydrogéologique des formations, leur comportement hydrodynamique, ainsi que les connexions hydrogéologiques entre les différentes unités et formations aquifères.

Vu la rareté des précipitations (moins de 400 mm/ an) dans la région d'étude et l'importance de la détermination du taux de l'infiltration, nous avons tenté, dans la deuxième partie de notre thèse, d'estimer la recharge efficace de l'aquifère du Continental Intercalaire et de quantifier le rôle de l'aquifère jurassique dans l'alimentation indirecte du CI. Les résultats montrent que l'aquifère gréseux est alimenté principalement par les affleurements du Jurassique (entre 100 et 500 mm/ an) dominant les dépressions gréseuses (inférieur à 200 mm/ an), durant les années pluvieuses où la précipitation dépasse 300 mm par an. Cet important rôle des sommets jurassiques est dû au fait qu'en altitude, les précipitations sont plus abondantes, alors que la température est plus basse. La conséquence est une plus faible évapotranspiration réelle, accentuée par le fait que la capacité du sol (RFU) est plus faible sur substratum grès et dolomies que sur substratum détritique friable.

La troisième partie se concentre sur l'analyse statistique des données hydrochimiques des eaux de l'aquifère crétacé et du remplissage plio-quadernaire afin de comprendre l'influence de la lithologie et de la structurale, notamment les diapirs triasiques, sur la qualité des eaux du synclinal d'Aïn Séfra. Les analyses factorielles montrent que le contexte géostructural et la présence des affleurements triasiques conditionnent d'une façon très significative la configuration géochimique des aquifères du CI et RPQ de cette partie de l'Atlas saharien occidental.

En quatrième partie nous avons ébauché un modèle mathématique afin de prévoir le comportement hydrodynamique en cas d'une diminution de la recharge ou une

exploitation intensive. Vu la disponibilité des données géométriques et des paramètres hydrodynamiques que sur l'unité hydrogéologique de Garet El Kheil, nous avons réalisé un modèle en deux dimensions et en différences finies ; les résultats du calage ont été satisfaisants avec un bilan de la nappe équilibré (écart de simulation de  $2.6 \cdot 10^{-4} \%$ ). L'exploitation du modèle en réalisant deux scénarios : le premier en supposant une diminution de la recharge en 50% ( $-8.2 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$ ), le second nous avons supposé une augmentation des débits prélevés en 100% ( $+1.36 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$ ). Les résultats de ces simulations montrent que la nappe est sous-exploitée et que l'impact climatique est plus important que l'intensification de l'exploitation, et que la partie sud de l'unité hydrogéologique est plus vulnérable que la partie nord.

Les résultats de ce travail peuvent ouvrir de nouveaux horizons de recherche scientifique dans des zones semi-arides et arides (fig. 41):

L'approche mise en place au cours de ce travail pour l'estimation de la recharge efficace et le bilan hydrique peut être prise en compte pour la spatialisation des données d'entrée d'un modèle 'Pluie-Infiltration' sur toute la région des Monts des Ksour (même pour leurs prolongements Est et Ouest) où le contexte hydrogéologique est très semblable à celui du synclinal d'Aïn Séfra (sol peu développé favorisant l'alimentation par les terrains en altitude). Plus généralement, cette méthode est applicable dans tout contexte de zones climatiques semi-arides d'aquifère de piémont bordé par des reliefs susceptibles de participer à la recharge. En effet, l'altitude est dans de nombreux cas un facteur de l'augmentation des hauteurs de précipitations et de la diminution des températures. Ces deux phénomènes combinés ont pour conséquence une augmentation significative de la pluie efficace, qui donne à ces montagnes un rôle majeur dans la recharge des plaines de bordure.

Les résultats de l'analyse statistique peuvent être utilisés à une quantification détaillée de l'impact des formations évaporitiques du Trias sur l'aquifère Albien qui est considéré le plus important dans la région, en établissant des équations de mélange des composantes. A partir de ces valeurs, une carte de vulnérabilité à cette source « naturelle » de contamination pourra être réalisée.

Le modèle mathématique réalisé dans la dernière partie de ce travail est très localisé pour qu'il représente le comportement hydrodynamique des aquifères de toute la région d'Aïn Séfra, en effet une amélioration est envisageable ; un modèle en 3D peut être utile

pour simuler les écoulements au sein de chaque niveau aquifère multicouche (Barrémien, Aptien, Albien et le remplissage du Mio-Plio-Quaternaire) et quantifier les échanges hydriques horizontaux et verticaux entre les différents niveaux et unités aquifères. D'autre part, il sera important de prendre en considération les échanges « rivière-réservoir » pour un calage plus précis. Ces améliorations permettraient une modélisation locale fine. En revanche, un modèle global des hydrosystèmes des Monts des Ksour semble difficile à réaliser sans au préalable avoir enrichi les bases de données climatiques, hydrologiques, hydrochimiques et hydrogéologiques, en particulier en incluant de nouveaux points de mesures dans les zones à faible représentativité.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

**ABADA A., 1986** : Contribution à l'étude hydrogéologique du bassin d'Oued Breidj (Monts des Ksour- Atlas saharien occidental) Algérie. *Thèse Magister, USTHB, pp 244.*

**ABDELGADER A., ACHOUR F., MUDRY J., 1996** : Validation des écoulements par l'analyse discriminante. *Revue des Sciences de l'eau, Rev. Sci. Eau 2(1996) 219-230.*

**AÏT OUALI R., 1991** : Le Rifting des Monts des Ksour au Lias. Organisation des bassins, diagenèse des assises carbonatées. Place dans les ouvertures Mésozoïques du Maghreb. *Thèse de doctorat es Sciences, Université d'Alger, 297 p, 16 Tabl, 6 Pl.*

**BASSOULET B., 1973** : Contribution à l'étude stratigraphique du Mésozoïque de l'Atlas saharien occidental (Algérie). *Thèse. Sci. Nat, Univ-Paris VI, 2 tomes, 497 p, 50 Fig, 32 Pl.*

**BENABADJ N., BOUAZZA M. (2000)** : Contribution à une étude bioclimatique de la steppe à *Artemisia herba-alba* Asso. dans l'Oranie (Algérie occidentale). *Science et changements planétaires / Sécheresse. Volume 11, Numéro 2, 117-23, Juin 2000, Notes de recherche*

**BENSAID A. 2006** : SIG et télédétection pour l'étude de l'ensablement dans une zone aride : le cas de la wilaya de Naâma (Algérie). *Thèse de Doctorat de l'Université Joseph Fourier-Grenoble 1.*

**BOUBAKAR HASSANE A. 2011** : Aquifères superficiels et profonds et pollution urbaine en Afrique : cas de la communauté urbaine de Niamey (Niger). *Thèse de doctorat. Université d'Abdou Moumouni de Niamey.*

**C.G.G, 1974** : Etudes géophysique des synclinaux des monts des Ksour (Aïn Séfra, Mékalis). *Compagnie générale de géophysique. Rapports internes. DHW de Naâma.*

**CORNET A., 1947** : Observations géologiques dans l'Atlas saharien sud oranais. *Bull. Soc. Hist. Nat, Afrique du Nord, t.38, Fasc. 1 – 9, pp. 63 –69, 8 fig.*

**CORNET A., 1952** : L'Atlas Saharien Sud Oranais. *XIX ème Congrès géologique interne, Alger, Monographies régionales, 51 p, 9 fig, 1 pl.*

**COOK PG., WALKER GR., BUSELLI G., POTTS I., DODD AR., 1992:** The application of electromagnetic techniques to ground water recharge investigations. *J Hydrol* 130:201–229.

**DAUVERGNE F., 2013 :** Méthodes de discrétisation pour la modélisation par éléments analytiques en hydrogéologie quantitative – Application aux écoulements en régimes permanents et transitoires –. *Thèse de Doctorat de l'École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne et de l'Université Jean Monnet.*

**DELFAUT J., 1974 :** La sédimentation deltaïque ancienne. Exemples Nord Sahariens. *Bull. Centre. Recherches, Pau, SNPA, 8, 1, pp. 241 – 263.*

**DELFAUT J., 1975 :** Les grés des Ksour, un delta de plateforme stable. *XI aire Congrès. Interne. Sedim, Nice, pp. 151 – 162.*

**DELFAUT J., DOUIHASNI M. et ROLET J., 1974 :** Mise en évidence des tectoniques superposées dans la région de Aïn Ouarka (Monts des Ksour, Algérie). *CR. Ac. Sc. Paris, t.278, Série D, pp. 1817 – 1820.*

**DELFAUT J 1984 :** Le contexte géodynamique des systèmes Atlasique Mésozoïque des grés des Ksour (Atlas Saharien, Algérie). *5<sup>ème</sup> séminaire des sciences de la terre, Alger, p. 50.*

**DJEBAILI S.; ACHOUR A.; DJELLOULI Y. et KADIK L. 1982 :** Carte phytoécologique de l'Algérie : Mécheria. *Carte publiée par le Centre de recherche sur les Ressources Biologiques Terrestres (CRBT), Alger, Algérie.*

**DOUIHASNI M., 1974 :** Etude structurale de la terminaison Nord Orientale de l'anticlinal de Aïn Ouarka (Monts des Ksour, Atlas Saharien, Algérie). *Mémoire DEA, Fac. Sciences. Oran, 113 p.*

**DOUIHASNI M., 1976 :** Etude géologique d'Aïn Ouarka–Boussemghoun. Analyse structurale (Partie centrale des Monts des Ksour, Atlas Saharien, Algérie). *Thèse 3<sup>ème</sup> cycle, Université d'Oran, 272 p, 52 fig., 4 pl.*

**DURAND JH., 1952 :** Etude géologique, hydrogéologique et pédagogique des croûtes en Algérie. *Publication Gouvernement général de l'Algérie. Service colonisation et hydraulique. Birmandreis. Alger. 203 p.*

**ELMI S., 1978** : Polarité tectono-sédimentaire pendant l'effritement des marges septentrionales du bâti africain au cours du Mésozoïque (Maghreb). *Annales. Soc. Géol. Nord, XCVII, pp. 315-323.*

**EL OUALI A, MUDRY J CHAUVE P., MANIA J, ESSAHLAOUI A., 2000** : Alimentation d'aquifères profonds de bassin sédimentaires de piémont des zones arides par leurs reliefs bordiers : cas des aquifères crétacés du bassin d'Errachidia (Maroc). *Africa Geosciences Review, Vol. 7, N° 4, pp 371-381.*

**FLAMAND G.B.M., 1911** : Recherches géologiques et géographiques sur le haut pays de l'Oranie et sur le Sahara (Algérie et territoires du Sud). *Thèse Sciences. Lyon. n° 47 et A. Rey. Edit, 1001 p, 157 fig, 22 cartes, 16 pl.*

**FREEZE RA., CHERRY JA. 1979**: Groundwater. *Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ*

**GALMIER D., 1972** : Photogéologie de la région d'Aïn Séfra (Atlas saharien, Algérie). *Thèse doctorat d'état. Fasc. Sc. De Paris. 177 p, 9 cartes.*

**GILLI E., MANGAN C., MUDRY J 2004** : Hydrogéologie. Objets, méthodes, applications. *Paris, Dunod.*

**JMÉNEZ-MARTÍNEZ J, 2010**: Groundwater recharge in irrigated semi-arid areas: quantitative hydrological modelling and sensitivity analysis. *Hydrogeology Journal (2010) 18: 1811–1824.*

**KACEMI A., 2005** : Cartographie et dynamique sédimentaire de la série fin Dogger début Crétacé (Djara-Rhoundjaia) des Monts des Ksour (Atlas saharien-Algérie). *Mémoire Magister Université d'Oran.*

**KAZI TANI N., 2000** : Etude des bassins sédimentaires. *Géoresources. Sonatrach. Centre de recherche et développement (CRD). Boumerdes, Cycle 2000, 301 p, 213 fig.*

**KERZABI R., 2008** : Identification de la nappe des grès serravaliens du bassin miocène dans la région de Remchi-Hennaya-Bensekrane et Ouled Mimoun. *Mémoire de Magister. Université de Tlemcen, pp. 66.*

**KILI M., EL MANSOURI B., CHAO J 2008** : Bilan hydrique des sols et recharge de la nappe profonde de la plaine de Gharb (Maroc). *Sécheresse vol. 19 n°2, avril-mai-juin 2008.*

**KINZELBACH W., RAUSCH R., CHIANG W. H., 1995** : Aquifer simulation model help. *L'aide du logiciel ASMWIN.*

**LAFFITE R., 1939** : Les plissements post – Nummulitiques dans l'Atlas Saharien. *Bull. Soc. Géol. France, (5), IX, pp. 135 – 139. 1p, 8 fig.*

**LAURENT F., 1996** : Outils de la modélisation spatiale pour la gestion intégrée des ressources en eau. Application aux Schémas d'Aménagement et de Gestion des Eaux. Thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne et l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.

**LERNER DN., ISSAR AS., SIMMERS I., 1990**: Groundwater Recharge: a guide to understanding and estimating Natural Recharge. *International Contributions to Hydrogeologists, vol 10, IAH, Goring, UK.*

**MANSOUR H., 2007**: Hydrogéologie du Continental Intercalaire et du Complexe Terminal en domaine aride. Exemple des Monts des Ksour (Atlas saharien occidental – Algérie). *Thèse Doctorat d'Etat Université d'Oran-407 p.162 fig.8 Pl.*

**MANSOUR H., ISSAADI A., STAMBOUL M. et ZEROUAL I., 2008** : Apport des systèmes d'information à l'établissement d'une cartographie hydrogéologique régionale (Monts des Ksour, Atlas saharien occidental, Algérie). *Bulletin du Service Géologique National- Vol. 19, n° 1, pp. 71-85, 7 fig., 2 pl., 2008.*

**MEKAHLI L., 1995** : Hettangien – Bajocien supérieur dans les Monts des Ksour. Biostratigraphie, évolution paléogéographique et stratigraphie séquentielle (Atlas Saharien Occidental). *Thèse d'état, Université d'Oran – Algérie. Pp. 1 – 358, 67 fig, 49 pl.*

**MOHIDDINE F., TOUMI M. A., 2012** : Etude par imagerie satellitale LANDSAT 7 ETM+ de la zone ouest des Monts des Ksour (Atlas Saharien) Algérie. *Mémoire d'Ingéniorat d'Etat en géologie, université de Tlemcen.*

**MUDRY J., 1987** : Apport du traçage physico-chimique naturel à la connaissance hydrocinématique des aquifères carbonates. *Doctorat d'Etat 381 p. Université de Besançon, France.*

**MUDRY J., 1990** : L'analyse discriminante, un puissant moyen de validation des hypothèses hydrogéologiques. *Revue Sciences Eau 4, 19-37.*

**RAHMANI A., 2008** : Apport des S.I.G dans la caractérisation hydrodynamique et hydrochimique de la nappe du Crétacé inférieur de la région d'Aïn Séfra (Atlas saharien occidental –Algérie). *Mémoire de Magister à l'Université de Tlemcen*, pp 117.

**S. N. REPAL, 1952** : Région sud tellienne et Atlas saharien, *XIXème Congr. Géol. Internat. Alger. Monogr. Région. 1, n°2*.

**SIBANDA T., NONNER JC., UHLENBROOK S., 2009**: Comparison of groundwater recharge estimation methods for the semi-arid Nyamandhlovu area, Zimbabwe. *Hydrogeology Journal 17*: 1427–1441.

**SCANLON BR., HEALYR W., COOK PG. 2002**: Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeology Journal 10*: 18–39.

**THIEBAUD E., 2008** : Fonctionnement d'un système hydrothermal associé à un contact tectonique alpin (La Léchère, Savoie). *Thèse de Doctorat de Géologie, Université de Savoie, Chambéry. Ecole doctorale SISEO*.

**YELLES CHAOUCHE A.K., AÏT OUALI R., BRACENE R., DEDER M.E.M et DJELLIT H., 2001** : Chronologie de l'ouverture des Monts du bassin des Ksour au début du Mésozoïque. *Bull. Soc. Géol. France, t. 172, n°3, pp. 283 – 293*.

**ZHENG D., HUNT E.R., W. RUNNINGS, 1996**: Comparison of available soil water capacity estimated from topography and soil series information, *Landscape Ecology vol. 11 no. 1 pp 3-14 (1996) SPB Academic Publishing by Amsterdam*.

## ANNEXES

### Annexe 1 : Points d'eau et niveau aquifère capté

| CODE | NOM                     | AQUIFERE CAPTÉ | CODE | NOM                | AQUIFERE CAPTÉ |
|------|-------------------------|----------------|------|--------------------|----------------|
| F1   | Maader1                 | CI             | P2   | P3                 | RPQ            |
| F17  | Skhouna                 | CI             | P17  | Mehisserat (Puits) | RPQ            |
| F16  | Mouillah                | CI             | P16  | Puits16            | RPQ            |
| F15  | Hammar                  | CI             | P17  | Puits17            | RPQ            |
| F14  | Hôpital                 | CI             | P18  | Puits18            | RPQ            |
| F18  | Aïn SéfraF4             | CI             | P19  | Puits Tirkount     | RPQ            |
| F19  | Aïn SéfraF2             | CI             | P13  | Puits Tiout        | RPQ            |
| F20  | Aïn SéfraF3             | CI             | P14  | Puits Khatir       | RPQ            |
| F21  | Aïn SéfraF1             | CI             | P15  | Puits Mehisserat2  | RPQ            |
| F25  | Tirkount1               | CI             | P10  | P14                | RPQ            |
| F24  | Tirkount2               | CI             | P11  | Puits11            | RPQ            |
| F23  | Aïn Séfra<br>Belefloufa | CI             | P3   | P5                 | RPQ            |
| F8   | Matlag                  | CI             | P5   | P9                 | RPQ            |
| F3   | Maader2                 | CI             | P6   | P10                | RPQ            |
| F4   | Maader3                 | CI             | P7   | P11                | RPQ            |
| F7   | Tiout2                  | CI             | P8   | P12                | RPQ            |
| F5   | Maader4                 | CI             | P9   | P13                | RPQ            |
| F22  | Mehisserat2             | CI             | S7   | Source Breidj      |                |
| F10  | Sih2                    | CI             | S5   | Source Dzira       |                |
| F12  | Aïn SéfraF94            | CI             | S6   | Source Tirkount    |                |
| F9   | Sih                     | CI             | S6   | Source Belefloufa  |                |
| F13  | Naftal                  | CI             | S1   | Source Tiout       |                |
| F2   | F6SGCA                  | CI             | S2   | Source Chaïb       |                |

## Annexe 2 : Données météorologiques de la station d'Aïn Séfra

| année | mois      | Tn (°C) | Tm (°C) | Pluie (mm) |
|-------|-----------|---------|---------|------------|
| 1980  | Janvier   | -0,5    | 13,2    | 19         |
| 1980  | Février   | 3,0     | 17,1    | 11         |
| 1980  | Mars      | 5,5     | 18,0    | 22         |
| 1980  | Avril     | 8,7     | 21,4    | 15         |
| 1980  | Mai       | 10,5    | 24,3    | 3          |
| 1980  | Juin      | 16,4    | 33,1    | 0          |
| 1980  | Juillet   | 19,2    | 36,5    | 0          |
| 1980  | Août      | 21,4    | 36,9    | 10         |
| 1980  | Septembre | 17,7    | 30,6    | 19         |
| 1980  | Octobre   | 8,7     | 24,0    | 4          |
| 1980  | Novembre  | 6,5     | 15,9    | 48         |
| 1980  | Décembre  | 0,0     | 10,4    | 4          |
| 1981  | Janvier   | -1,5    | 12,7    | 0          |
| 1981  | Février   | 0,8     | 14,2    | 7          |
| 1981  | Mars      | 6,9     | 22,3    | 5          |
| 1981  | Avril     | 9,0     | 21,4    | 23         |
| 1981  | Mai       | 13,5    | 28,1    | 2          |
| 1981  | Juin      | 17,7    | 33,7    | 7          |
| 1981  | Juillet   | 21,2    | 36,6    | 0          |
| 1981  | Août      | 19,1    | 33,0    | 20         |
| 1981  | Septembre | 16,7    | 31,6    | 1          |
| 1981  | Octobre   | 11,1    | 26,8    | 0          |
| 1981  | Novembre  | 4,5     | 19,6    | 0          |
| 1981  | Décembre  | 2,7     | 17,2    | 0          |
| 1982  | Janvier   | 1,5     | 13,7    | 22         |
| 1982  | Février   | 2,7     | 14,5    | 24         |
| 1982  | Mars      | 6,5     | 18,8    | 37         |
| 1982  | Avril     | 9,5     | 19,5    | 50         |
| 1982  | Mai       | 13,9    | 26,4    | 7          |
| 1982  | Juin      | 20,9    | 34,5    | 6          |
| 1982  | Juillet   | 20,9    | 36,8    | 0          |
| 1982  | Août      | 19,7    | 36,2    | 7          |
| 1982  | Septembre | 17,2    | 30,8    | 4          |
| 1982  | Octobre   | 9,2     | 23,1    | 7          |
| 1982  | Novembre  | 5,6     | 16,2    | 51         |
| 1982  | Décembre  | 0,4     | 11,3    | 2          |
| 1983  | Janvier   | -3,2    | 14,5    | 0          |
| 1983  | Février   | 2,9     | 16,1    | 8          |
| 1983  | Mars      | 6,2     | 21,4    | 1          |
| 1983  | Avril     | 9,6     | 23,9    | 1          |
| 1983  | Mai       | 13,7    | 26,5    | 25         |
| 1983  | Juin      | 18,0    | 33,2    | 7          |
| 1983  | Juillet   | 21,9    | 36,8    | 0          |
| 1983  | Août      | 20,2    | 36,9    | 1          |
| 1983  | Septembre | 15,8    | 31,8    | 1          |
| 1983  | Octobre   | 10,9    | 25,7    | 5          |
| 1983  | Novembre  | 7,5     | 21,3    | 1          |
| 1983  | Décembre  | -0,1    | 15,7    | 0          |
| 1984  | Janvier   | -0,6    | 13,5    | 1          |
| 1984  | Février   | 1,1     | 14,6    | 3          |
| 1984  | Mars      | 3,5     | 17,6    | 6          |
| 1984  | Avril     | 11,6    | 25,2    | 0          |
| 1984  | Mai       | 9,9     | 22,2    | 34         |
| 1984  | Juin      | 19,1    | 33,1    | 10         |

|      |           |      |      |    |
|------|-----------|------|------|----|
| 1984 | Juillet   | 20,6 | 36,3 | 3  |
| 1984 | Août      | 20,2 | 36,4 | 1  |
| 1984 | Septembre | 17,0 | 31,7 | 1  |
| 1984 | Octobre   | 8,5  | 22,5 | 11 |
| 1984 | Novembre  | 6,1  | 18,6 | 16 |
| 1984 | Décembre  | 2,4  | 12,7 | 1  |
| 1985 | Janvier   | 0,7  | 12,0 | 13 |
| 1985 | Février   | 5,0  | 19,9 | 13 |
| 1985 | Mars      | 4,0  | 17,1 | 18 |
| 1985 | Avril     | 9,1  | 23,4 | 0  |
| 1985 | Mai       | 12,7 | 25,6 | 25 |
| 1985 | Juin      | 19,2 | 35,6 | 0  |
| 1985 | Juillet   | 22,2 | 37,5 | 0  |
| 1985 | Août      | 20,4 | 36,5 | 2  |
| 1985 | Septembre | 16,0 | 30,7 | 25 |
| 1985 | Octobre   | 11,5 | 23,6 | 28 |
| 1985 | Novembre  | 7,8  | 19,6 | 5  |
| 1985 | Décembre  | 2,0  | 12,8 | 34 |
| 1986 | Janvier   | 2,1  | 12,8 | 6  |
| 1986 | Février   | 4,5  | 16,6 | 7  |
| 1986 | Mars      | 5,1  | 16,7 | 17 |
| 1986 | Avril     | 6,7  | 21,0 | 0  |
| 1986 | Mai       | 16,4 | 29,9 | 11 |
| 1986 | Juin      | 17,8 | 31,8 | 8  |
| 1986 | Juillet   | 20,8 | 36,3 | 1  |
| 1986 | Août      | 20,7 | 36,9 | 4  |
| 1986 | Septembre | 17,7 | 30,9 | 45 |
| 1986 | Octobre   | 11,9 | 22,5 | 56 |
| 1986 | Novembre  | 5,0  | 15,6 | 40 |
| 1986 | Décembre  | 1,6  | 12,4 | 4  |
| 1987 | Janvier   | 2,0  | 14,1 | 2  |
| 1987 | Février   | 3,9  | 15,3 | 6  |
| 1987 | Mars      | 7,0  | 20,4 | 20 |
| 1987 | Avril     | 11,5 | 26,9 | 1  |
| 1987 | Mai       | 14,3 | 27,7 | 5  |
| 1987 | Juin      | 18,7 | 34,5 | 6  |
| 1987 | Juillet   | 20,8 | 35,9 | 2  |
| 1987 | Août      | 21,4 | 36,4 | 9  |
| 1987 | Septembre | 18,1 | 32,2 | 2  |
| 1987 | Octobre   | 12,4 | 25,8 | 6  |
| 1987 | Novembre  | 6,0  | 16,8 | 28 |
| 1987 | Décembre  | 5,5  | 16,2 | 12 |
| 1988 | Janvier   | 3,0  | 14,6 | 11 |
| 1988 | Février   | 4,1  | 14,8 | 31 |
| 1988 | Mars      | 5,2  | 19,6 | 16 |
| 1988 | Avril     | 9,9  | 23,9 | 1  |
| 1988 | Mai       | 14,0 | 27,8 | 14 |
| 1988 | Juin      | 18,6 | 31,8 | 19 |
| 1988 | Juillet   | 21,9 | 37,6 | 8  |
| 1988 | Août      | 21,6 | 37,3 | 0  |
| 1988 | Septembre | 16,0 | 30,6 | 15 |
| 1988 | Octobre   | 11,8 | 24,7 | 7  |
| 1988 | Novembre  | 7,7  | 17,7 | 14 |
| 1988 | Décembre  | -0,1 | 12,4 | 1  |
| 1989 | Janvier   | -0,3 | 10,8 | 31 |
| 1989 | Février   | 3,2  | 14,3 | 6  |
| 1989 | Mars      | 5,5  | 19,2 | 24 |

|      |           |      |      |     |
|------|-----------|------|------|-----|
| 1989 | Avril     | 9,1  | 20,7 | 21  |
| 1989 | Mai       | 13,6 | 27,0 | 25  |
| 1989 | Juin      | 18,3 | 31,1 | 15  |
| 1989 | Juillet   | 21,5 | 36,0 | 2   |
| 1989 | Août      | 21,1 | 35,4 | 23  |
| 1989 | Septembre | 17,3 | 32,4 | 9   |
| 1989 | Octobre   | 12,7 | 25,0 | 20  |
| 1989 | Novembre  | 7,8  | 19,3 | 14  |
| 1989 | Décembre  | 5,2  | 16,5 | 9   |
| 1990 | Janvier   | 2,4  | 10,4 | 23  |
| 1990 | Février   | 2,6  | 19,4 | 0   |
| 1990 | Mars      | 8,3  | 20,0 | 4   |
| 1990 | Avril     | 8,3  | 20,5 | 68  |
| 1990 | Mai       | 14,3 | 26,2 | 165 |
| 1990 | Juin      | 21,0 | 34,6 | 4   |
| 1990 | Juillet   | 21,7 | 35,8 | 12  |
| 1990 | Août      | 20,6 | 35,1 | 3   |
| 1990 | Septembre | 19,3 | 33,1 | 12  |
| 1990 | Octobre   | 12,4 | 26,1 | 1   |
| 1990 | Novembre  | 5,9  | 18,6 | 3   |
| 1990 | Décembre  | 1,6  | 12,4 | 13  |
| 1991 | Janvier   | -1,0 | 12,9 | 3   |
| 1991 | Février   | 1,4  | 13,0 | 53  |
| 1991 | Mars      | 6,0  | 15,9 | 165 |
| 1991 | Avril     | 8,9  | 19,8 | 53  |
| 1991 | Mai       | 11,6 | 23,4 | 26  |
| 1991 | Juin      | 17,9 | 31,3 | 39  |
| 1991 | Juillet   | 21,2 | 36,4 | 7   |
| 1991 | Août      | 20,5 | 36,0 | 7   |
| 1991 | Septembre | 17,8 | 31,2 | 8   |
| 1991 | Octobre   | 10,1 | 21,1 | 55  |
| 1991 | Novembre  | 4,6  | 17,6 | 1   |
| 1991 | Décembre  | 2,1  | 12,6 | 16  |
| 1992 | Janvier   | -0,6 | 11,2 | 4   |
| 1992 | Février   | 1,4  | 15,4 | 4   |
| 1992 | Mars      | 4,3  | 15,3 | 13  |
| 1992 | Avril     | 8,2  | 21,6 | 4   |
| 1992 | Mai       | 13,1 | 25,8 | 33  |
| 1992 | Juin      | 14,1 | 28,7 | 1   |
| 1992 | Juillet   | 19,8 | 34,6 | 7   |
| 1992 | Août      | 18,5 | 35,6 | 4   |
| 1992 | Septembre | 15,8 | 31,7 | 1   |
| 1992 | Octobre   | 9,8  | 24,0 | 0   |
| 1992 | Novembre  | 2,9  | 17,8 | 16  |
| 1992 | Décembre  | 2,6  | 13,8 | 2   |
| 1993 | Janvier   | -1,5 | 12,2 | 7   |
| 1993 | Février   | 2,0  | 13,0 | 32  |
| 1993 | Mars      | 5,5  | 17,3 | 47  |
| 1993 | Avril     | 7,9  | 21,9 | 8   |
| 1993 | Mai       | 13,2 | 26,7 | 5   |
| 1993 | Juin      | 18,5 | 34,6 | 5   |
| 1993 | Juillet   | 21,9 | 38,1 | 1   |
| 1993 | Août      | 21,6 | 36,1 | 0   |
| 1993 | Septembre | 15,2 | 29,6 | 10  |
| 1993 | Octobre   | 11,1 | 24,6 | 15  |
| 1993 | Novembre  | 7,7  | 15,1 | 71  |
| 1993 | Décembre  | 1,8  | 14,3 | 4   |

|      |           |      |      |    |
|------|-----------|------|------|----|
| 1994 | Janvier   | 1,9  | 13,2 | 49 |
| 1994 | Février   | 2,4  | 16,2 | 4  |
| 1994 | Mars      | 6,4  | 17,7 | 65 |
| 1994 | Avril     | 7,1  | 20,5 | 0  |
| 1994 | Mai       | 14,1 | 30,5 | 2  |
| 1994 | Juin      | 19,0 | 35,2 | 4  |
| 1994 | Juillet   | 21,6 | 37,8 | 1  |
| 1994 | Août      | 20,5 | 37,4 | 4  |
| 1994 | Septembre | 15,8 | 30,2 | 58 |
| 1994 | Octobre   | 12,3 | 22,9 | 55 |
| 1994 | Novembre  | 5,3  | 18,6 | 13 |
| 1994 | Décembre  | 1,3  | 15,9 | 0  |
| 1995 | Janvier   | -0,3 | 14,1 | 2  |
| 1995 | Février   | 1,8  | 18,7 | 5  |
| 1995 | Mars      | 5,3  | 16,9 | 41 |
| 1995 | Avril     | 7,5  | 18,9 | 35 |
| 1995 | Mai       | 14,7 | 30,3 | 1  |
| 1995 | Juin      | 17,9 | 32,6 | 3  |
| 1995 | Juillet   | 19,8 | 37,3 | 0  |
| 1995 | Août      | 21,0 | 36,3 | 5  |
| 1995 | Septembre | 14,2 | 30,2 | 11 |
| 1995 | Octobre   | 11,2 | 23,4 | 39 |
| 1995 | Novembre  | 6,4  | 20,4 | 0  |
| 1995 | Décembre  | 4,7  | 15,8 | 4  |
| 1996 | Janvier   | 4,7  | 14,6 | 22 |
| 1996 | Février   | 3,3  | 13,0 | 24 |
| 1996 | Mars      | 7,3  | 17,6 | 55 |
| 1996 | Avril     | 9,5  | 22,1 | 8  |
| 1996 | Mai       | 12,4 | 26,8 | 5  |
| 1996 | Juin      | 17,6 | 30,9 | 32 |
| 1996 | Juillet   | 20,5 | 35,9 | 12 |
| 1996 | Août      | 21,2 | 37,2 | 2  |
| 1996 | Septembre | 13,6 | 30,7 | 4  |
| 1996 | Octobre   | 8,4  | 25,2 | 3  |
| 1996 | Novembre  | 5,3  | 19,3 | 0  |
| 1996 | Décembre  | 2,7  | 15,3 | 25 |
| 1997 | Janvier   | 4,0  | 14,0 | 35 |
| 1997 | Février   | 2,1  | 18,5 | 0  |
| 1997 | Mars      | 3,6  | 20,1 | 5  |
| 1997 | Avril     | 9,6  | 21,4 | 46 |
| 1997 | Mai       | 14,3 | 28,2 | 3  |
| 1997 | Juin      | 18,1 | 34,3 | 0  |
| 1997 | Juillet   | 21,6 | 38,0 | 3  |
| 1997 | Août      | 20,2 | 34,9 | 34 |
| 1997 | Septembre | 17,1 | 30,8 | 15 |
| 1997 | Octobre   | 11,3 | 25,5 | 6  |
| 1997 | Novembre  | 6,2  | 20,3 | 3  |
| 1997 | Décembre  | 2,8  | 16,5 | 3  |
| 1998 | Janvier   | 2,4  | 15,3 | 7  |
| 1998 | Février   | 3,6  | 16,4 | 7  |
| 1998 | Mars      | 4,7  | 20,7 | 4  |
| 1998 | Avril     | 9,2  | 24,3 | 4  |
| 1998 | Mai       | 11,9 | 26,0 | 13 |
| 1998 | Juin      | 19,7 | 34,1 | 14 |
| 1998 | Juillet   | 21,8 | 38,8 | 1  |
| 1998 | Août      | 21,1 | 36,9 | 1  |
| 1998 | Septembre | 18,5 | 33,4 | 28 |

|      |           |      |      |    |
|------|-----------|------|------|----|
| 1998 | Octobre   | 9,9  | 24,0 | 7  |
| 1998 | Novembre  | 5,7  | 20,3 | 0  |
| 1998 | Décembre  | -1,2 | 13,7 | 11 |
| 1999 | Janvier   | 1,9  | 12,3 | 65 |
| 1999 | Février   | 2,0  | 12,3 | 12 |
| 1999 | Mars      | 6,8  | 18,1 | 10 |
| 1999 | Avril     | 8,8  | 25,8 | 9  |
| 1999 | Mai       | 15,5 | 31,6 | 0  |
| 1999 | Juin      | 18,7 | 36,3 | 0  |
| 1999 | Juillet   | 21,6 | 39,1 | 5  |
| 1999 | Août      | 22,7 | 38,2 | 10 |
| 1999 | Septembre | 17,2 | 33,4 | 3  |
| 1999 | Octobre   | 14,0 | 27,7 | 6  |
| 1999 | Novembre  | 4,1  | 17,0 | 3  |
| 1999 | Décembre  | 0,2  | 13,7 | 6  |
| 2000 | Janvier   | -2,4 | 11,9 | 4  |
| 2000 | Février   | 0,8  | 18,3 | 0  |
| 2000 | Mars      | 5,9  | 21,9 | 1  |
| 2000 | Avril     | 8,9  | 23,7 | 3  |
| 2000 | Mai       | 14,1 | 28,7 | 8  |
| 2000 | Juin      | 17,1 | 33,3 | 3  |
| 2000 | Juillet   | 22,8 | 39,0 | 0  |
| 2000 | Août      | 20,0 | 36,3 | 2  |
| 2000 | Septembre | 16,2 | 31,2 | 23 |
| 2000 | Octobre   | 8,3  | 22,4 | 40 |
| 2000 | Novembre  | 6,8  | 19,8 | 0  |
| 2000 | Décembre  | 3,2  | 17,0 | 2  |
| 2001 | Janvier   | 1,4  | 15,8 | 2  |
| 2001 | Février   | 1,4  | 17,0 | 1  |
| 2001 | Mars      | 7,8  | 23,6 | 0  |
| 2001 | Avril     | 8,7  | 24,8 | 2  |
| 2001 | Mai       | 12,6 | 26,8 | 2  |
| 2001 | Juin      | 19,8 | 36,4 | 0  |
| 2001 | Juillet   | 22,9 | 39,6 | 0  |
| 2001 | Août      | 21,8 | 38,3 | 11 |
| 2001 | Septembre | 17,5 | 32,4 | 9  |
| 2001 | Octobre   | 13,1 | 29,2 | 18 |
| 2001 | Novembre  | 4,8  | 17,8 | 14 |
| 2001 | Décembre  | 2,0  | 16,2 | 8  |
| 2002 | Janvier   | -0,6 | 15,4 | 0  |
| 2002 | Février   | 1,1  | 18,8 | 8  |
| 2002 | Mars      | 6,1  | 20,8 | 3  |
| 2002 | Avril     | 8,7  | 22,6 | 28 |
| 2002 | Mai       | 13,7 | 28,9 | 2  |
| 2002 | Juin      | 19,4 | 35,7 | 4  |
| 2002 | Juillet   | 20,9 | 38,5 | 2  |
| 2002 | Août      | 20,3 | 36,3 | 31 |
| 2002 | Septembre | 15,3 | 32,0 | 11 |
| 2002 | Octobre   | 9,7  | 27,1 | 15 |
| 2002 | Novembre  | 6,5  | 18,8 | 38 |
| 2002 | Décembre  | 4,8  | 16,4 | 7  |
| 2003 | Janvier   | 2,3  | 13,3 | 21 |
| 2003 | Février   | 2,8  | 14,9 | 11 |
| 2003 | Mars      | 7,8  | 20,7 | 25 |
| 2003 | Avril     | 9,9  | 23,6 | 8  |
| 2003 | Mai       | 13,1 | 29,8 | 15 |
| 2003 | Juin      | 21,1 | 35,9 | 1  |

|      |           |      |      |     |
|------|-----------|------|------|-----|
| 2003 | Juillet   | 22,1 | 40,1 | 8   |
| 2003 | Août      | 20,6 | 36,2 | 3   |
| 2003 | Septembre | 15,9 | 32,6 | 15  |
| 2003 | Octobre   | 13,8 | 25,6 | 47  |
| 2003 | Novembre  | 5,7  | 17,8 | 33  |
| 2003 | Décembre  | 2,2  | 14,3 | 5   |
| 2004 | Janvier   | 0,9  | 15,6 | 1   |
| 2004 | Février   | 3,0  | 17,3 | 14  |
| 2004 | Mars      | 5,9  | 20,5 | 25  |
| 2004 | Avril     | 9,1  | 23,0 | 19  |
| 2004 | Mai       | 11,0 | 24,6 | 19  |
| 2004 | Juin      | 17,9 | 34,7 | 25  |
| 2004 | Juillet   | 21,6 | 37,7 | 2   |
| 2004 | Août      | 21,4 | 38,1 | 9   |
| 2004 | Septembre | 16,1 | 31,7 | 44  |
| 2004 | Octobre   | 13,2 | 28,0 | 3   |
| 2004 | Novembre  | 4,3  | 16,2 | 23  |
| 2004 | Décembre  | 1,6  | 12,1 | 16  |
| 2005 | Janvier   | -2,9 | 12,3 | 6   |
| 2005 | Février   | -1,5 | 13,4 | 2   |
| 2005 | Mars      | 7,2  | 21,5 | 3   |
| 2005 | Avril     | 9,4  | 26,3 | 0   |
| 2005 | Mai       | 16,0 | 32,9 | 1   |
| 2005 | Juin      | 19,0 | 35,1 | 5   |
| 2005 | Juillet   | 22,7 | 40,4 | 0   |
| 2005 | Août      | 19,6 | 37,8 | 30  |
| 2005 | Septembre | 16,4 | 31,1 | 25  |
| 2005 | Octobre   | 12,9 | 26,6 | 38  |
| 2005 | Novembre  | 6,0  | 17,6 | 44  |
| 2005 | Décembre  | 1,4  | 13,1 | 8   |
| 2006 | Janvier   | 0,4  | 9,6  | 30  |
| 2006 | Février   | 2,8  | 13,9 | 12  |
| 2006 | Mars      | 5,5  | 22,4 | 6   |
| 2006 | Avril     | 11,1 | 26,6 | 11  |
| 2006 | Mai       | 15,9 | 29,6 | 43  |
| 2006 | Juin      | 18,2 | 34,8 | 0   |
| 2006 | Juillet   | 21,1 | 38,3 | 2   |
| 2006 | Août      | 21,2 | 37,5 | 3   |
| 2006 | Septembre | 15,5 | 29,7 | 25  |
| 2006 | Octobre   | 11,3 | 28,1 | 7   |
| 2006 | Novembre  | 6,3  | 19,5 | 20  |
| 2006 | Décembre  | 3,3  | 11,8 | 17  |
| 2007 | Janvier   | -0,7 | 16,3 | 2   |
| 2007 | Février   | 5,2  | 17,8 | 6   |
| 2007 | Mars      | 3,5  | 18,8 | 3   |
| 2007 | Avril     | 8,9  | 21,5 | 48  |
| 2007 | Mai       | 12,8 | 28,0 | 3   |
| 2007 | Juin      | 17,7 | 35,3 | 0   |
| 2007 | Juillet   | 21,7 | 38,4 | 3   |
| 2007 | Août      | 21,8 | 36,6 | 32  |
| 2007 | Septembre | 18,4 | 32,8 | 8   |
| 2007 | Octobre   | 11,4 | 24,7 | 175 |
| 2007 | Novembre  | 4,9  | 19,0 | 7   |
| 2007 | Décembre  | 1,2  | 13,3 | 10  |
| 2008 | Janvier   | 1,0  | 15,8 | 10  |
| 2008 | Février   | 3,7  | 16,9 | 36  |
| 2008 | Mars      | 5,6  | 20,2 | 3   |

|      |           |      |      |     |
|------|-----------|------|------|-----|
| 2008 | Avril     | 9,0  | 25,4 | 3   |
| 2008 | Mai       | 14,0 | 27,8 | 39  |
| 2008 | Juin      | 18,2 | 34,1 | 6   |
| 2008 | Juillet   | 21,7 | 38,7 | 14  |
| 2008 | Août      | 20,7 | 38,3 | 15  |
| 2008 | Septembre | 17,3 | 31,6 | 43  |
| 2008 | Octobre   | 11,0 | 20,8 | 251 |
| 2008 | Novembre  | 4,0  | 15,2 | 13  |
| 2008 | Décembre  | 0,9  | 12,0 | 10  |
| 2009 | Janvier   | 2,5  | 11,6 | 32  |
| 2009 | Février   | 1,8  | 15,7 | 19  |
| 2009 | Mars      | 6,5  | 19,6 | 55  |
| 2009 | Avril     | 6,6  | 20,4 | 14  |
| 2009 | Mai       | 13,3 | 28,8 | 4   |
| 2009 | Juin      | 18,1 | 34,5 | 9   |
| 2009 | Juillet   | 22,5 | 38,8 | 4   |
| 2009 | Août      | 21,0 | 38,0 | 3   |
| 2009 | Septembre | 14,9 | 27,5 | 96  |
| 2009 | Octobre   | 9,9  | 27,1 | 0   |
| 2009 | Novembre  | 4,6  | 21,2 | 0   |
| 2009 | Décembre  | 3,8  | 19,5 | 0   |
| 2010 | Janvier   | 2,8  | 17,1 | 13  |
| 2010 | Février   | 7,3  | 19,1 | 32  |
| 2010 | Mars      | 8,5  | 21,6 | 15  |
| 2010 | Avril     | 11,9 | 26,4 | 1   |
| 2010 | Mai       | 12,1 | 27,4 | 13  |
| 2010 | Juin      | 16,9 | 34,0 | 13  |
| 2010 | Juillet   | 22,6 | 39,3 | 8   |
| 2010 | Août      | 21,1 | 38,0 | 43  |
| 2010 | Septembre | 17,7 | 31,8 | 36  |
| 2010 | Octobre   | 10,8 | 24,9 | 37  |
| 2010 | Novembre  | 5,9  | 20,2 | 4   |
| 2010 | Décembre  | 3,5  | 17,6 | 1   |

**Annexe 3 : Analyses physico-chimiques des points d'eau utilisés dans l'ACP et l'AFD (A. Rahmani 2008)**

| Code | Ca <sup>++</sup> | Mg <sup>++</sup> | Na <sup>+</sup> | K <sup>+</sup> | Cl <sup>-</sup> | SO <sub>4</sub> <sup>--</sup> | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | Cond. | RS   | pH   |
|------|------------------|------------------|-----------------|----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|------------------------------|-------|------|------|
| S2   | 182              | 94               | 194             | 3              | 365             | 503                           | 270                           | 14                           | 2,4   | 1663 | 6,5  |
| F17  | 90               | 76               | 109             | 6              | 184             | 250                           | 227                           | 22                           | 1     | 880  | 8,5  |
| F16  | 168              | 83               | 230             | 11             | 390             | 523                           | 228                           | 23                           | 2,2   | 1533 | 7,6  |
| F15  | 172              | 97               | 250             | 9              | 422             | 470                           | 240                           | 17                           | 2,2   | 1680 | 8,5  |
| F12  | 832              | 560              | 1115            | 30             | 2477            | 2255                          | 268                           | 30                           | 6     | 7540 | 8    |
| F9   | 116              | 56               | 130             | 4              | 198             | 322                           | 242                           | 20                           | 1,1   | 1000 | 8,4  |
| F13  | 561              | 151              | 548             | 20             | 1160            | 1440                          | 309                           | 70                           | 4,4   | 4960 | 7,8  |
| F14  | 303              | 194              | 771             | 20             | 1165            | 1440                          | 260                           | 87                           | 5,2   | 4660 | 7,5  |
| P11  | 166              | 73               | 143             | 15             | 228             | 499                           | 310                           | 19                           | 1,7   | 1480 | 8,1  |
| P17  | 76               | 48               | 78              | 9              | 123             | 211                           | 187                           | 19                           | 0,8   | 680  | 8,4  |
| F19  | 107              | 43               | 32              | 4              | 34              | 192                           | 278                           | 30                           | 0,86  | 660  | 7,03 |
| F20  | 83               | 59               | 37              | 5              | 41              | 235                           | 242                           | 37                           | 0,86  | 740  | 7,1  |
| F8   | 401              | 92               | 557             | 10             | 855             | 1104                          | 278                           | 24                           | 4,8   | 3460 | 8    |
| F3   | 112              | 46               | 60              | 4              | 102             | 211                           | 231                           | 53                           | 0,9   | 720  | 7,8  |
| F4   | 108              | 51               | 138             | 7              | 197             | 302                           | 175                           | 22                           | 1,4   | 1080 | 8,4  |
| F7   | 208              | 75               | 390             | 7              | 416             | 720                           | 222                           | 26                           | 2,7   | 2200 | 8    |
| S1   | 108              | 47               | 78              | 5              | 129             | 178                           | 230                           | 27                           | 1     | 680  | 8    |
| F18  | 108              | 80               | 244             | 8              | 341             | 399                           | 248                           | 19                           | 1,75  | 1500 | 7,26 |
| F5   | 91               | 29               | 53              | 4              | 81              | 148                           | 196                           | 42                           | 0,78  | 660  | 7,29 |
| F21  | 176              | 79               | 136             | 9              | 102             | 656                           | 235                           | 8                            | 1,62  | 1500 | 7,02 |
| P18  | 215              | 172              | 557             | 27             | 641             | 1475                          | 73                            | 77                           | 3,73  | 3200 | 7,5  |
| S5   | 146              | 71               | 138             | 9              | 170             | 413                           | 257                           | 14                           | 1,6   | 1200 | 7,9  |
| F24  | 134              | 58               | 145             | 2              | 324             | 250                           | 290                           | 15                           | 1,7   | 1280 | 7,9  |
| F23  | 495              | 117              | 435             | 25             | 369             | 2150                          | 167                           | 8                            | 3,3   | 3500 | 7,05 |
| S4   | 88               | 46               | 104             | 3              | 161             | 202                           | 227                           | 0                            | 0,9   | 739  | 8,5  |



**RESUME :** L'Atlas saharien sud oranais où les Monts des Ksour forment une région montagneuse constituée de chaînons allongés orientés SO-NE. Les dépressions crétacées sont représentées par des synclinaux à fond plat surplombés par des anticlinaux principalement jurassiques. Les formations gréseuses crétacées appelées « Continental Intercalaire » de la région d'Aïn Séfra renferment une importante ressource en eau destinée à l'alimentation en eau potable et à l'irrigation. L'étude hydrogéologique et l'identification des aquifères de la région montrent l'importante interconnexion entre l'aquifère jurassique et le CI. La recharge naturelle des aquifères sous un climat semi-aride est le terme du bilan hydrique le plus délicat à déterminer. La méthodologie proposée est une approche par interpolations spatiales et temporelles des données de précipitations journalières et de températures moyennes mensuelles mesurées à une station, durant trois années repères (sèche, moyenne, humide). Elle est très « pratique » dans des régions où les données climatiques sont limitées et discontinues dans l'espace et dans le temps. Son application nécessite des connaissances sur la nature du sol, la surface et l'altitude des impluviums. Cette étude nous a permis d'estimer, à partir des gradients pluviométrique et thermique, la lame d'eau tombée sur les affleurements jurassiques à une altitude moyenne de 1600 m, et les valeurs de l'évapotranspiration dans tout le bassin étudié. La pluie efficace calculée, et le débit d'alimentation de l'aquifère, par son impluvium calcaréo-gréseux en altitude et gréseux dans les dépressions, montrent que l'aquifère du Continental Intercalaire est alimenté principalement par les affleurements du Jurassique surplombant les dépressions gréseuses, durant les années pluvieuses où les précipitations dépassent 300 mm par an. Les caractéristiques chimiques des eaux ont fait l'objet de différentes analyses statistiques afin de tenter d'expliquer l'origine d'une minéralisation assez élevée (entre 2000 et 4000 mg/l). Dans une première approche, l'emploi de l'analyse en composantes principales (ACP) met en évidence trois familles d'eau correspondant aux trois niveaux aquifères exploités. Dans une seconde étape, l'analyse factorielle discriminante croisée (AFD) caractérise l'importance et la dominance des paramètres responsables de cette minéralisation, en relation avec le cadre géostructural du système hydrogéologique des gouttières synclinales d'Aïn Séfra ; les contacts anormaux entre les formations gréseuses du Continental Intercalaire et les structures diapiriques argilo-gypso-salines du Trias forment les principales zones de contamination. Après avoir estimé la recharge efficace (qui varie entre 0 pour une année sèche et 684 mm/an une année humide) et identifié les écoulements souterrains et pour prévoir le comportement hydrodynamique des gouttières synclinales d'Aïn Séfra, il est primordial de réaliser un modèle mathématique. Nous n'avons pu réaliser que le modèle de l'unité hydrogéologique de Garet El Kheil, vu l'indisponibilité des données sur les deux autres unités (El Hanjir-Aïn Séfra, Aïn Séfra-Tiout). Nous avons choisi un calcul par différences finies à l'aide d'un code simple et pratique « ASMWIN ». Afin de déterminer l'impact du changement climatique et la surexploitation, deux scénarios d'exploitation ont été proposés : une recharge réduite de moitié (-50% :  $8 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$  au lieu de  $16 \cdot 10^6$ ) et un débit d'exploitation doublé (+100% :  $2.72 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$  au lieu de  $1.36 \cdot 10^6$ ). Ils nous ont révélé que la nappe est plus vulnérable aux changements climatiques qu'à la surexploitation, ce qui nous a permis de déduire que la nappe est encore en sous-exploitée.

**Mots clés :** Atlas saharien ; hydrodynamique ; pluie efficace ; hydrochimie ; analyse discriminante ; modélisation mathématique.

**ABSTRACT :** The Saharan Atlas Mountains, South of Oran includes the 'Ksour Ridge', a mountainous region comprising SW-NE ranges. Cretaceous depressions are represented by flat-bottomed synclines overhung by anticlines, mainly Jurassic. The sandstone formations, so-called Continental Intercalary, of the Ain Sefra region contain an unconfined significant water resource for drinking water and irrigation. The hydrogeological study and identification of aquifers prove the important interconnection between the Continental Intercalary and the Jurassic aquifers. In a recharge area characterized by a semiarid or an arid climate, therefore a low annual rainfall, effective rainfall is the hardest item to estimate, as it was demonstrated by classical monthly hydrological balance computations. The methodology proposed in this work relies on spatial and temporal interpolations of scarce climatic data. This methodology can be used to determine the recharge flow to aquifers of these zones. The Ain Sefra's syncline includes the sandstone aquifers of Continental Intercalary and of the Plio-Quaternary layers. Three years, with contrasting annual rainfalls, are chosen in this application: 1983 as dry year, 2006 as average year, and 2008 as humid one. This application requires information about the soil nature, thickness and porosity, the surface and the altitude of the recharge areas. The rainfall and the recharge flow to aquifers indicate that the principal recharge areas are the Jurassic outcrops, mainly during the humid years, when the annual rainfall exceeds 300 mm. The chemical characteristics of water have been submitted to different statistical analyses. As a first approach, a principal component analysis (PCA) displayed three clusters of water corresponding to the three aquifer layers which are exploited. Discriminant factor analysis (DFA) was used to characterize the importance and to rank the parameters responsible for this high mineralization (between 2000 and 4000 mg/l), namely: system characteristics (lithology), structural geology (fault and Triassic diapirs). After estimating the effective recharge (ranging between 0 for a dry year, and 684 mm/year for a humid one) and identifying groundwater flow, and in order to predict the hydrodynamic behavior of Ain Sefra's syncline, it is essential to implement a mathematical model. We were only able to establish the model of the Garet El Kheil hydrogeological unit, given the data unavailability on the other two units (El Hanjir-Ain Sefra, Ain Sefra-Tiout). We chose a finite difference method in permanent mode to improve knowledge of the hydraulic characteristics of aquifer, and to evaluate a complete hydrological balance, using the simple and convenient "ASMWIN" code. Exploitation of the model made it possible to determine the impact of the pumped yields, and the weather trends on the piezometric evolution of the aquifer. Two operating scenarios have been proposed: halving recharge (-50%:  $8 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$  instead of  $16 \cdot 10^6$ ) and doubling the well's yield (+100%:  $2.72 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$ , instead of  $1.36 \cdot 10^6$ ). We conclude that the groundwater resource is more vulnerable to the climate change than intensive use of aquifers, meaning that the aquifer is underexploited at present.

**Keywords:** Saharan Atlas; hydrodynamics; effective rainfall, hydrochemistry, discriminant factor analysis, mathematical modeling.

## الملخص :

جبال أطلس الصحراوي جنوبا المنطقة الوهرانية , المسماة جبال القصور تشكل سلسلة جبلية من جنوب غربي نحو شمال شرقي. المنخفضات هي عبارة عن مقعر مسطحة القاع للعصر الطباشيري محاطة بمرتفعات محدبة للعصر الجوراسي. صخور الحجر الرملي الطباشيري المسماة " القارة المتوسطة " لمنطقة عين الصفراء تحتوي على موارد مائية هامة تستعمل لمياه الشرب والري.

الدراسة الهيدروجيولوجية وتحديد طبقات المياه الجوفية في المنطقة بينت الترابط المهم بين طبقة المياه الجوفية الجوراسية و"القارة المتوسطة".

التغذية الطبيعية عن طريق الأمطار في مناخ شبه القاحل هو أصعب حد تقيما في معادلة "توازن الماء". المنهجية المقترحة لذلك هي محاولة التوزيع المكاني و الزماني لقيم الهطول اليومي و متوسط درجات الحرارة الشهرية في محطة القياس لمدينة عين الصفراء، وذلك خلال ثلاث سنوات (سنة جافة 1983، متوسطة 2006 و رطبة 2008). هي طريقة جد " عملية " خاصة في المناطق ذات البيانات المناخية المحدودة في المكان والزمان. يتطلب تطبيق هذه الطريقة معرفة التربة، مساحة و ارتفاع مناطق التغذية.

سمحت لنا هذه الدراسة بتقدير كمية الأمطار في المرتفعات (1600 م) و كمية المياه المتبخرة في كل الحوض، استنادا لمقياس هطول الأمطار و درجة الحرارة. الأمطار الفعالة المحسوبة، و معدل تغذية طبقة المياه الجوفية عن طريق الحجر الرملي الكلسي في المرتفعات و الحجر الرملي في المنخفضات تبين أن المياه الجوفية "للقارة المتوسطة" تتغذى أساسا من المرتفعات الجوراسية المحيطة بالمنخفضات الحجر الرملي خلال السنوات الرطبة حيث يتجاوز هطول الأمطار 300 ملم في السنة.

استعملت الخصائص الكيميائية للمياه في تحليل احصائي لمحاولة تفسير مصدر الأملاح المعدنية ( بين 2000 و 4000 ملغم / لتر). في النهج الأول، يسلط الضوء على ثلاث عائلات من المياه، الموافقة لثلاث مستويات للمياه الجوفية المستغلة. في النهج الثاني، يتم تمييز أهمية وهيمنة عنصر الانكسارات و صخور الترياسية الملحية في تمعدن المياه الجوفية "للقارة المتوسطة".

بعد تقدير الأمطار الفعالة (والتي تتراوح بين 0 في السنة الجافة و 684 مم / سنة في السنة الرطبة ) و تحديد خصائص تدفق المياه الجوفية؛ من المهم تحقيق نموذج رياضي يسمح لنا بتنبؤ سلوك الجيب المائي لمنطقة عين الصفراء. نظرا لقلّة البيانات انحصرت دراستنا في الجيب المائي "لغارت الخيل". استعملنا طريقة التباين التام في حالة النظام الدائم و ذلك باستخدام نظام حساب سهل. لتحديد تأثير تغير المناخ و الاستغلال المفرط على الجيب المائي قمنا باختيار سيناريوهين : الأول تخفيض كمية الأمطار الفعالة (-50 بالمائة: يعني ثمانية ملايين متر مكعب بدل ستة عشر مليون متر مكعب في السنة)، و الثاني مضاعفة حجم الاستغلال (+100 بالمائة : مليونين و سبع مائة و عشرون ألف متر مكعب بدل مليون و ثلاث مئة و ستون ألف متر مكعب). نتائج التنبؤات أظهرت أن الاستغلال الحالي لا يؤثر سلبا على للجيب المائي.

## الكلمات المفتاحية:

أطلس الصحراوي، هيدروديناميكية، الأمطار الفعالة، كيميائية المياه، التحليل التبايني، النموذج الرياضي.