

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

BADJI MOKHTAR-ANNABA UNIVERSITY  
UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR-ANNABA



جامعة باجي مختار- عنابة  
ANNÉE 2019

Faculté des Sciences de la Terre  
Département de Géologie

THÈSE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme  
de Doctorat En Sciences  
Option: Hydrogéologie

**LE MODÈLE WEAP POUR UNE GESTION  
INTÉGRÉE DES RESSOURCES EN EAU DU  
BASSIN VERSANT TRANSFRONTALIER DE LA  
MEDJERDA (NORD-EST ALGÉRIE)**

Présenté par

**Moncef BOUROUGA**

Directeur de thèse : CHAFFAI Hicham

Professeur Univ. Badji Mokhtar-Annaba

Co-Directeur de thèse : SAYAD Lamine

MCA Univ. Badji Mokhtar-Annaba

Soutenue devant le jury

Président : HANI Azzedine

Professeur Univ. Badji Mokhtar-Annaba

Examineurs: LABAR Sofiane

Professeur Univ. Chadli Bendjedid-El Tarf

BAHROUN Sofia

MCA Univ. Chadli Bendjedid - El Tarf

ZENATI Noureddine

MCA Univ. M<sup>ed</sup> Cherif Mesaadia-Souk Ahras

## Résumé

L'Algérie est classée parmi les pays africains déficitaires en eau. Ses ressources sont estimées à 18 Milliard de m<sup>3</sup> d'eau mobilisables (IPEMED 2013) avec une dotation moyenne par habitant à environ de 437 m<sup>3</sup>/hab./an, cette dotation classe l'Algérie comme pays en stress Hydrique. Cette situation va s'aggraver avec la croissance démographique, le développement économique et les aléas du changement climatique.

La gestion intégrée des ressources en eau s'avère une meilleure alternative pour faire face à cette problématique.

Cette étude traite l'évaluation de la demande en eau pour répondre aux besoins de ses utilisateurs dans le bassin versant transfrontaliers de la Medjerda, ce dernier est situé à l'extrême N-E Algérien, il est soumis à un climat tempéré avec une superficie de 1505.5 km<sup>2</sup>, et possède d'importantes potentialités en eau.

L'utilisation du logiciel Water Evaluation And Planning System (WEAP21), pour la modélisation des ressources en eau de notre bassin d'étude, en choisissant 2016 comme année de référence, un scénario de base de «demande en eau», et adoptés 3 scénarios, deux sur le changement climatique en se basant sur les projections climatiques à l'horizon 2020-2050, obtenu par le modèle UKHI issu du Global Water Partnership pour l'Algérie et ce sur 2 niveaux (Haut et Bas) et un scénario sur l'augmentation des terres irriguées sur la période de 32 ans (2017-2050). A partir des scénarios simulés par le modèle WEAP, il fait ressortir un manque hydrique à partir de l'an 2042.

**Mots clés:** ressources en eau, Medjerda, GIRE, bassin versant transfrontalier, UKHI, demande en eau, stress hydrique, modélisation, scénario, WEAP21

## Abstract

Algeria is classified among the African countries with a deficit in water, its resources are estimated at 18 billion m<sup>3</sup> of water that can be mobilized (IPEMED 2013), with an average per capita allocation of around 437 m<sup>3</sup> / inhabitant / year, which ranks Algeria as a Hydric stress country. this situation will worsen with population growth, economic development and the vagaries of climate change.

Integrated management of water resources is a better alternative to deal with this problem.

This study deals with the assessment of water demand to meet the needs of its users in the transboundary watershed of the Medjerda, the latter is located at the extreme NE Algerian, it is subject to a temperate climate, and of surface area. 1505.5 km<sup>2</sup>, and has significant water potential.

We used the Water Assessment and Planning System software (WEAP21), for the water resource modeling of our study basin, choosing 2016 as baseline year, a baseline scenario of "water demand", and adopted 3 scenarios, two on climate change, based on the 2020-2050 climate projections, obtained by the UKHI model derived from the Global Water Partnership for Algeria, on two levels (High and Low), and a scenario on the increase in irrigated land over the 32-year period (2017-2050). Based on the scenarios simulated by the WEAP model, a lack of water appeared from the year 2042.

**Key words:** water resources, Medjerda, IWRM, transboundary watershed, UKHI, water demand, water stress, modeling, scenario, WEAP21

تصنف الجزائر من بين الدول الإفريقية التي تعاني من عجز في المياه ، وتقدر مواردها بنحو 18 مليار متر مكعب من المياه التي يمكن تعبئتها (IPMED 2013) ، بمتوسط نصيب الفرد حوالي 437 متر مكعب / ساكن / سنة ، هذه الحصة صنفت الجزائر كدولة تعاني من الإجهاد المائي و سوف يتفاقم هذا الوضع مع النمو السكاني والتنمية الاقتصادية وتقلبات تغير المناخ.

تعتبر الإدارة المتكاملة للموارد المائية بديلا أفضل للتعامل مع هذه المشكلة تتناول هذه الدراسة تقييم الطلب على المياه لتلبية احتياجات مستخدميها في الأحواض المائية العابرة للحدود في المجرد ، ويقع الأخير في أقصى شمال شرق الجزائر ، وهو يخضع لمناخ معتدل ، ومساحة سطح 1505.5 كيلومتر مربع ، ولها إمكانات مائية كبيرة.

استخدمنا برنامج نظام تقييم وتخطيط المياه (WEAP 21) ، لنمذجة الموارد المائية في حوض الدراسة الخاص بنا واختبار عام 2016 سنة مرجعية ، سيناريو أساسي ل" الطلب على المياه "، واعتمدنا ثلاثة سيناريوهات ، اثنان حول تغير المناخ ، تم الحصول عليها بواسطة نموذج - المناخ ، استنادًا إلى توقعات المناخ في أفق (2020-2050) المستمد من النموذج UKHI عن الشراكة العالمية للمياه من أجل الجزائر ، و هذا على مستويين مرتفع ومنخفض ، و سيناريو حول الزيادة في الأراضي المروية و هذا على مدى فترة 32 سنة (2017-2050). بناءً على السيناريوهات المحاكاة نموذج WEAP ، ظهر نقص المياه منذ عام 2042

**الكلمات الرئيسية:** الموارد المائية ، الأحواض المائية العابرة للحدود ، الإدارة المتكاملة للموارد المائية مجردة ، UKHI الطلب على المياه ، الإجهاد المائي ، النمذجة ، السيناريو ، WEAP21

---

## ***DEDICACES***

*A la mémoire de mon père " رحمة الله عليه وأسكنه الجنة إنشاء الله "*

*A ma mère et khalti*

*A mon épouse*

*A mes deux filles Mayar et Aya*

*A mes frères et sœurs*

*A toute ma famille*

---

## **REMERCIEMENTS**

*Je tiens tout d'abord à remercier vivement **Pr CHAFFAI Hicham** qui m'a fait l'honneur de diriger ma thèse.*

*Un grand merci à **Mr SAYAD Lamine**, Maître de conférences à l'Université Badji Mokhtar, mon co-encadreur, je le remercie vivement pour son soutien illimité et sa disponibilité.*

*Je remercie également **Pr Hani Azzedine** qui m'a fait le grand honneur d'accepter de présider le jury.*

*J'adresse mes remerciements aussi à **Mr LABAR Sofiane** Professeur à l'université Chadli Bendjedid - El Tarf, **Mr ZENATI Noureddine** Maître de conférences à l'université Med Cherif Mesaadia - Souk Ahras et **Mlle BAHROUNE Sofia** Maître de conférences à l'université Chadli Bendjedid - El Tarf d'avoir acceptés d'être membres examinateurs de ma thèse.*

*Je ne manquerai jamais de remercier autant, **Mr DAIFALLAH Tarek** Maître de conférences à l'université de Khenchla qui n'a épargné aucun effort pour m'aider et orienter durant la réalisation de ce travail.*

*Mes sincères remerciements vont également au personnel de la DHW de Souk Ahras, en particulier **Mr AOUADI Salah** chef de service ressources en eau mobilisables, ainsi, **Mme SAHTOUT**, chef de bureau, et **BOUGHRARA Hocine** du service hydro agricole.*

*Mes vifs remerciements sont adressés à **Mr DIFI Azzedine**, Directeur de production à l'ADE Souk Ahras et **Mr AMAMRA Med Cherif** le directeur du barrage de Ain Dalia, ainsi que pour l'encadrement de l'ONA pour leurs aide.*

***MERCI** aussi à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*

---

## SOMMAIRE

Résumé .....	i
Abstract .....	ii
ملخص .....	iii
Introduction générale .....	1

### Chapitre I : Cadre général

1. Situation géographique .....	5
Aperçu socio économique et enjeux de développement de la W. de Souk Ahras .....	7
2. 1. Présentation de la wilaya .....	7
2. 2. Principaux enjeux de développement de la wilaya .....	8
3. La géologie .....	9
3. 1. La géologie régionale .....	9
3. 2. Géologie locale .....	11
3. 2. 1. - Lithostratigraphie .....	11
3. 2. 2. La tectonique .....	14
3. 2. 2. a. La tectonique de la région d'étude .....	14
3. 2. 2. b. Les phases tectoniques de la région d'étude .....	14
3. 3. 3. Cadre structural .....	14
3. 3. 3. a. Le Diapirisme .....	15
3. 3. 3. b. Les plissements .....	15
3. 3. 3. c. La tectonique cassante .....	15
4. Hydrogéologie .....	16
4. 1. Les principales nappes constituant l'aquifère de Souk Ahras .....	16
4. 1. 1. Le synclinal de Taoura .....	16
4. 1. 2. Les nappes d'eau secondaires .....	18
4. 2. Interprétation de la carte Hydrogéologique de la wilaya de Souk Ahras .....	19
5. Conclusion .....	20

### Chapitre II : Cadre morphométrique et hydrographique du B.V. de la Medjerda

1. Caractéristiques physiques.....	22
1. 1. Les caractéristiques morphométriques du bassin versant de la Medjerda .....	22
1. 1. 1. Superficie (A) .....	22
1. 1. 2. Le Périmètre (P).....	22
1. 1. 3. La courbe Hypsométrique .....	22
1. 1. 4. La forme du bassin .....	22
1. 1. 5. Le rectangle équivalent .....	23
1. 2. Le relief .....	23
1. 2. 1. Les altitudes caractéristiques .....	25
1. 2. 1. a. Les altitudes maximale et minimale .....	25
1. 2. 1. b. L'altitude moyenne .....	25
1. 2. 1. c. L'altitude médiane .....	25
1. 2. 2. Indice de pente .....	25
1. 2. 2. a. L'indice de pente global .....	25
1. 2. 2. b. L'indice de pente de Roche Ip.....	26
1. 2. 2. c. Dénivelé spécifique .....	27
1. 2. 2. d. Les classes des pentes .....	28
2. Le réseau hydrographique .....	29

2. 1. Les principaux affluents de l'oued Medjerda .....	30
2. 2. Le temps de concentration .....	30
2. 3. La densité de drainage .....	30
3. Récapitulation des caractéristiques physiographiques du BV de Medjerda.....	31
4. Conclusion .....	31

### Chapitre III: Hydroclimatologie

1. Introduction .....	33
2. Les stations de mesure .....	33
3. Les facteurs climatiques .....	33
3. 1. Les précipitations .....	33
3. 1. 1. Précipitations mensuelles .....	33
3. 1. 2. Précipitations annuelles .....	34
3. 1. 2. a. Les irrégularités interannuelles des précipitations annuelles .....	35
3. 1. 2. b. Calcul de la lame d'eau moyenne annuelle précipitée à l'échelle spatiale .....	36
3. 1. 2. b. i. La méthode arithmétique .....	36
3. 1. 2. b. ii. La méthode de Polygones de Thiessen .....	37
3. 2. La température .....	38
3. 3. Le vent .....	40
3. 4. L'humidité relative de l'air .....	40
4. Les indices climatiques .....	41
4.1. Indice de De Martonne .....	41
4.2. Indice d'aridité mensuel .....	42
4.3. Diagramme ombrothermique .....	43
4. 4. L'évapotranspiration .....	44
4. 4. 1. L'évapotranspiration potentielle (ETP) .....	44
4. 4. 1. a. L'estimation de l'évapotranspiration potentielle (ETP) .....	44
4. 4. 2. L'évapotranspiration réelle (ETR) .....	45
4. 4. 2. a. Estimation de l'évapotranspiration réelle .....	46
4. 4. 2. a. i. Formule de Thornthwaite .....	46
4. 4. 2. a. ii. Formule de Turc .....	46
4. 4. 2. a. iii. Formule de Coutagne .....	46
4. 4. 2. b. Comparaison entre les 3 formules .....	47
5. Bilan hydrique selon la formule de Thornthwaite .....	48
5. 1. Interprétation du bilan hydrique .....	50
6. Détermination du ruissellement .....	53
7. Estimation de l'infiltration .....	53
8. Conclusion .....	55

### Chapitre IV Hydrochimie

1. Introduction .....	57
2. Matériel et méthodes .....	57
2.1 Analyses hydrochimiques .....	57
2. 1. 1. Echantillonnage des points d'eau (forages) .....	57
2. 2. Méthodes d'analyses graphiques et empiriques .....	58
2. 2. 1. Fiabilité des analyses .....	58
2. 2. 2. Indices d'échange de base (I.e.b.) .....	58
2. 2. 3. Le Diagramme de Piper .....	58
2. 2. 4. Méthodes d'analyses statistiques multivariées .....	59
2. 2. 4. a. Analyse de corrélation .....	59

2. 2. 4. b. Analyse en composantes principales "ACP" .....	59
2. 2. 4. c. Classification hiérarchique ascendante "CHA" .....	60
3. Résultats et discussion .....	60
3.1. Variation spatiale des éléments physicochimiques .....	60
3. 1. a. Le Calcium .....	60
3. 1. b. Le Magnésium .....	61
3. 1. c. Le Sodium et potassium .....	62
3. 1. d. Les Chlorures .....	63
3. 1. e. Les Bicarbonates .....	63
3. 1. f. Les Sulfates .....	64
4. Cartographie des analyses hydrochimiques .....	65
5. Faciès chimique .....	67
5. 1. Formule ionique .....	67
5. 2. Diagramme de Piper .....	68
6. Dureté des eaux échantillonnées .....	69
7. Les rapports caractéristiques .....	70
7. 1. Couple $\text{Ca}^{2+}$ - $\text{SO}_4^{2-}$ : .....	70
7. 2. Couple $\text{Ca}^{2+}$ - $\text{HCO}_3^-$ .....	70
7. 3. Couple $\text{Ca}^{2+}$ - $\text{Cl}^-$ .....	71
7. 4. Couple $\text{Na}^+$ - $\text{Cl}^-$ .....	71
8. L'indice d'échange de base .....	71
9. Analyse en composantes principales ACP .....	27
9. 1. Analyse du cercle ACP (F1x F2) .....	75
10. Classification Ascendante Hiérarchique des eaux souterraines (CAH) .....	77
11. Aptitude des eaux à l'irrigation .....	78
11. 1. Introduction .....	78
11. 2. Les Facteurs déterminant l'usage agricole de l'eau .....	78
11. 2. 1. Le rapport d'adsorption du sodium (SAR) .....	78
11. 2. 2. Pourcentage de sodium (Na %) .....	79
11. 2. 3. Carbonate de sodium résiduel (RSC) .....	79
11. 2. 4. Indice de perméabilité (IP) .....	80
11. 2. 5. Calculs des paramètres .....	81
11. 3. Aptitude des eaux à l'irrigation .....	82
11. 3. 1. Classification des eaux par la méthode de Richards (Riverside) .....	82
11. 3. 2. Classification des eaux par la méthode de Wilcox .....	83
12. Conclusion .....	85

## **Chapitre V: Les ressources en eau et usagers dans le B. V. de la Medjerda**

1. Les ressources en eau .....	87
1. 1. Introduction .....	87
1. 2. Les apports pluviométriques.....	87
1. 3. Les ressources naturelles renouvelables .....	88
2. Les ressources en eau souterraines .....	89
2. 1. Les forages .....	89
2. 2. Les sources .....	90
3. Les ressources en eau superficielles .....	91
3. 1. Les ouvrages de stockage des eaux superficielles .....	91
3. 1. 1. Le barrage d'Ain Dalia .....	92
3. 1. 1. a. Paramètres physico chimique des eaux de barrage Ain Dalia .....	93

3. 1. 1. b. Répartition annuelles des prélèvements à partir du barrage d'Ain Dalia.....	94
3. 1. 2 Les retenues d'eau .....	95
4. Les eaux non conventionnelles .....	95
4. 1. La station d'épuration de Souk Ahras .....	95
4. 1. 1. Les caractéristiques techniques de la STEP de Souk Ahras .....	95
4. 1. 2. Paramètres d'exploitation de la STEP de Souk Ahras.....	96
o Caractéristiques des eaux brutes .....	96
o Caractéristique des eaux épurée .....	96
o Rendement d'élimination .....	96
4. 1. 3. Processus de la STEP de Souk Ahras .....	96
4. 1. 4. Bilan de l'auto surveillance de la STEP de Souk Ahras pour l'année 2016 .....	97
4. 1. 5. Bilan de suivi de la qualité des eaux de la STEP de Souk Ahras.....	98
4. 1. 5. a. Les matières en suspension MES .....	98
4. 1. 5. b. La demande biochimique en oxygène (DBO5) .....	98
4. 1. 5. c. La demande chimique en oxygène (DCO) .....	99
4. 2. La station d'épuration de Hanancha .....	99
4. 2. 1. Bilan de l'auto surveillance de la STEP de Hanancha pour l'année 2016 .....	99
4. 2. 2. Bilan du suivi de la qualité des eaux de la STEP de Hanancha .....	101
5. Débits et qualité de l'oued Medjerda .....	101
6. Les usagers de l'eau dans le bassin versant de la Medjerda .....	102
6. 1. Les usagés domestiques (dont l'alimentation en eau potable) .....	102
6. 1. 1. La population .....	102
6. 1. 2. Les eaux pour AEP par nature de ressource .....	104
6. 2 Les usagés agricoles .....	106
6. 2. 1. Situation de la campagne d'irrigation de l'année 2016 .....	108
6. 2. 2. Objectifs du service Hydro agricole .....	108
6. 3. L'industrie .....	109
7. Les contraintes liées aux ressources hydriques .....	109
8. Conclusion .....	110

## **Chapitre VI: Simulation de la gestion de la demande en eau par le modèle WEAP**

1. Gestion intégrée des ressources en eau en Algérie .....	112
1. 1. Les principes de la gestion intégrée des ressources en eau .....	112
1. 2. Intégration des principes de la GIRE dans la politique nationale .....	114
1. 2. 1. Principe écologique .....	114
1. 2. 2. Principe institutionnel .....	114
1. 2. 3. Principe instrumental: .....	114
1. 3. Présentation de l'Agence Nationale de Gestion Intégrée des Ressources en Eau ...	114
1. 4. Les institutions de la gestion de l'eau en Algérie .....	115
1. 5. Les directions impliquées dans la gestion de l'eau en Algérie .....	116
2. La modélisation dans la gestion des ressources en eau .....	118
2. 1. Outils de modélisation .....	118
2. 2. Le WEAP un modèle de modélisation des ressources en eau .....	118
2. 3. L'approche de WEAP .....	118
2. 4. La modélisation par WEAP .....	119
2. 4. 1. La définition de l'étude .....	119
2. 4. 2. L'Etat Actuel .....	119
2. 4. 3. Les Scénarios .....	119
2. 4. 4. Les Scénarios sont Evalués .....	119

---

2. 5. Introduction et traitement des données .....	119
2. 5. 1. Phase schématique .....	119
1. Les sites de ressources d'eau .....	119
2. Les sites de demandes en eau .....	119
3. Les liaisons de transmission .....	120
2. 5. 2. La vue des données .....	120
2. 5. 2. a. Compte actuel .....	121
2. 5. 2. b. Niveau d'activité annuelle .....	121
2. 5. 2. c. Demande en eau pour l'irrigation .....	122
2. 5. 2. d. Demandes en eau pour l'industrie .....	122
2. 5. 2. e. Distribution des ressources .....	123
2. 5. 2. f. Création des hypothèses clés .....	126
• Changement d'horizon de temps du secteur .....	126
• Calibration du model .....	127
2. 5. 3. Création des scénarios .....	127
2. 5. 3. a. Scenario de référence (SR) .....	127
2. 5. 3. b. Scenario de changement climatique (SCC) .....	128
2. 5. 3. b. i. Généralités sur le changement climatique et les modèles de projections ....	129
2. 5. 3. b. ii. Les projections climatiques et scénario futurs.....	130
2. 5. 3. c. Scenario d'extension de terres irriguées (SETI) .....	131
2. 5. 3. d. Scénario changement climatique et d'extension des terres irrigués .....	131
2. 6. Résultats .....	131
2. 6. 1. Ressources en eau .....	131
2. 6. 1. a. Evolution des Précipitations par scenario .....	131
2. 6. 1. b. Evapotranspiration réelle simulée par scénario.....	132
2. 6. 2. Demandes en eau .....	133
2. 6. 2. a. Evolution de nombre d'habitants pour scénarios tendanciels ( 3 scénarios) ...	133
2. 6. 2. b. Evolution des superficies de terres irriguées (3 scénarios) .....	133
2. 6. 2. c. Evolution des besoins en eau pour tous les usagers (3 scénarios) .....	134
2. 6. 2. d. Evolution des besoins totaux en eau (Water demand) par scénario .....	135
2. 6. 2. e. Evolution des demandes en eau (Supply requirement) .....	135
2. 6. 3. Eau distribuée .....	136
2. 6. 4. Evolution du stockage en eau du barrage par scénario .....	137
2. 6. 5. Demandes non satisfaites par scénario .....	137
3. L'indice de pénurie .....	138
4. Conclusion .....	139
<b>Conclusion générale</b>	141
Références bibliographique .....	144

## Liste des tableaux

N° Tableau		Page
01	Caractéristiques hydrogéologiques du synclinal de Taoura	17
02	Répartition des superficies en fonction des tranches d'altitude	24
03	Indice de pente de ROCHE	26
04	Classification de relief selon la méthode de l'OROSTOM à partir du D <sub>s</sub>	27
05	Répartition des pentes dans le bassin versant de la Medjerda	28
06	Caractéristiques morphométriques du bassin versant de Medjerda	31
07	Caractéristiques géographiques des stations météorologiques de la région	33
08	Hauteurs moyennes mensuelles des précipitations en mm	34
09	Précipitations annuelles et leurs variabilités	36
10	La lame d'eau calculée	37
11	Températures moyennes mensuelles (°C): Station de Souk Ahras (1986 – 2013)	38
12	Températures moyennes mensuelles (°C): Station d'Ain Dalia (1990 – 2015)	39
13	Relevés mensuelles du vent, (2003 -2013), Station de Souk Ahras	40
14	L'humidité relative moyenne mensuelle (2003 -2013), Station de Souk Ahras	40
15	Valeurs de l'indice d'aridité IM de De Martonne	41
16	Indices d'aridité mensuels (I) à la station de Souk Ahras	42
17	Indices d'aridité mensuels (I) à la station d'Ain Dalia	42
18	Les valeurs de l'ETP selon la formule de Thornthwaite, St.de Souk Ahras	45
19	Les valeurs de l'ETP selon la formule de Thornthwaite, St. de Ain Dalia	45
20	L'ETR par la méthode de Turc	46
21	L'ETR selon la formule de Coutagne	47
22	Les résultats de l'ETR selon les différentes méthodes	47
23	Bilan hydrique selon Thornthwaite, St. de Ain Dalia	48
24	Bilan hydrique selon Thornthwaite, St. de Souk Ahras	49
25	Résultats du ruissellement	53
26	Estimation de l'infiltration	54
27	Résultats du bilan hydrologique	54
28	Sommaire des paramètres chimiques (mg/l)	65
29	Détermination du faciès chimique des eaux par la formule ionique	67
30	Facies chimiques	68
31	Classification des eaux en fonction de la dureté	69
32	les indices d'échange de bases des eaux de forage	72
33	Matrice des corrélations	73
34	Valeurs propres et pourcentage des cinq axes principaux	73
35	Corrélations entre les variables et les axes principaux	74
36	Corrélations entre les individus et les axes principaux	75
37	Le risque du SAR dans l'eau d'irrigation	79
38	niveaux du risque dû au carbonate de sodium résiduel	80
39	Indice de perméabilité (IP)	80
40	Classification de la qualité des eaux souterraines en fct de son aptitude à l'irrigation	81
41	Répartition des apports pluviométriques annuels moyens	88
42	Forages destinés à l'AEP (ADE Souk Ahras 2016)	89
43	Inventaire des sources appartenant au bassin de la Medjerdaexploitées par laDRE Souk-Ahras 2016	90
44	Etat sur les ressources en eaux superficielles	91
45	Répartition des ressources en eaux superficielles mobilisées	91
46	Caractéristiques techniques du barrage d'Ain Dalia (ANBT)	92
47	Qualité des eaux de barrage d'Ain Dalia (ANBT)	93
48	Les petits barrages et retenues collinaire en exploitation	95
49	Volume des eaux épurées STEP Souk Ahars (2016)	97
50	Volume des eaux épurées STEP de Hanancha (2016)	100
51	Bilan suivi Qualité des eaux de la STEP de Hanancha	101
52	Evolution de la population par commune selon le recensement de 2008 dans le bassin versant de la Medjerda (DPAT 2014)	103

53	Rapport entre besoin et distribution en eau potable	105
54	Périmètres et aires d'irrigation	106
55	Répartition de la superficie irriguée par nature de ressources en eau	107
56	Répartition des modes d'irrigation par superficie irriguée	108
57	Répartition des types de cultures irriguée	108
58	Consommation des eaux pour les unités de production (2016)	109
59	Organisation du secteur de l'eau en Algérie (INECO 2009)	117
60	Evolution des apports annuels des précipitations par scénario	132
61	Evolution de l'évapotranspiration réelle annuelle par scénario	133
62	Evolution besoins en eau pour les usagers (tous scénarios)	135
63	Evolution de la distribution des pour les usagers (tous scénarios)	137
64	Seuils de l'indice de pénurie (Falkenmark et Widstrand, 1995)	138
65	Evolution de l'indice de pénurie d'eau (m3/an/hab.) en dans le bassin versant de la Medjerda	139

## Liste des figures

N° Figure		Page
01	Situation géographique du bassin versant de la Medjerda	05
02	Les communes au sein du bassin versant de la Medjerda	06
03	Schéma structurale des Maghrébides	09
04	Catre géologique du bassin versant de la Medjerda, (modifiée, BOUROUGA 2017)	13
05	Carte structurale des monts de la Haute Medjerda	15
06	Coupe hydrogéologique de la région de Taoura (DRE modifiée)	16
07	Unités hydrogéologique de la wilaya de souk Ahras (SOGREAH 2009)	18
08	Courbe hypsométrique du bassin versant de l'oued Medjerda	24
09	Carte de répartition de pentes du bassin versant de la Medjerda	27
10	Réseau hydrographique de l'oued Medjerda	29
11	Profil longitudinal de la Medjerda	29
12	Principaux affluents de l'oued Medjerda	30
13	Histogramme des précipitations moyennes mensuelles	34
14	Les précipitations annuelles - Station Souk Ahras	35
15	Les précipitations annuelles - Station Ain Dalia.	35
16	Polygones de Thiessen dans le bassin versant de la Medjerda	37
17	Températures moyennes mensuelles en °C à la Station de Souk Ahras	38
18	Températures moyennes mensuelles en °C à la Station de Ain Dalia	39
19	Variation des valeurs (Max_Min_Moy) mensuelles en °C à la Station de Ain Dalia	39
20	Diagramme Ombrothermique : Station de Ain Dalia	43
21	Diagramme Ombrothermique : Station de Souk Ahras	43
22	Représentation graphique du bilan de Thornthwaite, St. de Ain Dalia	50
23	Représentation graphique du bilan hydrologique, St. de Ain Dalia	51
24	Représentation graphique du bilan de Thornthwaite, St. de Souk Ahras	51
25	Représentation graphique du bilan hydrologique, St. de Souk Ahras	52
26	Inventaire des points d'eau (Forages)	57
27	Variations spatiale du Calcium	61
28	Variations spatiale du Magnésium	62
29	Variations spatiale du Sodium et du Potassium	62
30	Variations spatiale des Chlorures	63
31	Variations spatiale des Bicarbonates	64
32	Variations spatiale des Sulfates	64
33	Distribution spatiale des anions	66
34	Distribution spatiale des cations	66
35	Diagramme de piper	68
36	Relation $Ca^{2+}$ - $SO_4^{2-}$	70
37	Relation $Ca^{2+}$ - $HCO_3^-$	70
38	Relation $Ca^{2+}$ - $Cl^-$	71
39	Relation $Na^+$ - $Cl^-$	71
40	Histogramme des valeurs propres	74
41	Cercle des corrélations des variables dans le plan F1xF2	76
42	Projection des individus sur le plan factoriel F1x F2	76
43	Classification ascendante hiérarchique des observations-Variables (C.A.H)	77
44	Classification des eaux destinées à l'irrigation (diagramme de Richards)	82
45	Classifications des eaux destinées à l'irrigation (diagramme de Wilcox)	84
46	Situation des forages dans le bassin de l'Oued Medjerda	88
47	Inventaire des forages dans le bassin versant de la Medjerda	90
48	Barrage d'Ain Dalia (Souk Ahras)	93
49	Répartition des prélèvements du barrage d'Ain Dalia (2016)	94
50	Variation mensuelle des réserves en eau du barrage Ain Dalia(2016)	94
51	Process de la STEP de Souk Ahras	96
52	Evolution mensuelle des volumes d'eaux brutes et épurées à la STEP de Souk Ahras(2016)	97
53	Evolution mensuelle des MES de la STEP de Souk Ahras	98

54	Evolution mensuelle du DBO5 de la STEP de Souk Ahras	98
55	Evolution mensuelle de la DCO de la STEP de Souk Ahras	99
56	Evolution mensuelle des volumes des eaux brutes et épurées à la STEP de Hanancha(2016)	100
57	Répartition des usagers de l'eau dans le BV de la Medjerda	102
58	Répartition de la population du bassin versant de la Medjerda	104
59	Répartition nature de ressources en eau pour l'AEP	105
60	Répartition des eaux agricoles par nature de ressource	107
61	Les composantes de la gestion des ressources en eau	113
62	Les Cinq Agences de bassins hydrographiques en Algérie	116
63	Schématisation des sites de demandes et des ressources en eau sur WEAP	120
64	Vue de données	120
65	Niveau d'activité annuelle des sites de demandes domestiques	121
66	Niveau d'activité annuelle des sites de demandes Agricoles	122
67	Consommation annuelles des unités industrielles	122
68	Niveau d'activité annuelle un site de demandes industrielle	123
69	Horizon de calcul pour le scénario	126
70	Volume observé / Volume simulé	127
71	Scénario de référence	128
72	deux hypothèses de projection climatique	129
73	Evolution de la température de l'hémisphère Nord	130
74	Projections d'élévation de température moyenne globale en fonction des différents scénarios (GIEC, 2013)	130
75	Evolution des Précipitations annuelles par scénario (2016-2050)	131
76	Evolution de l'évapotranspiration par scénario (2016-2050)	132
77	Evolution de nombre d'habitant pour tous les scénarios	133
78	Evolution des superficies irriguées dans le bassin versant pour tous scénarios	134
79	Evolution besoins en eau pour les usagers (tous scénarios)	134
80	Evolution des besoins totaux en eau par scénario	135
81	Evolution de demandes totales en eau par scénario (2016-2050)	136
82	Volume en eau distribué pour tous les usagers par scénario	136
83	Evolution du volume stocké dans le barrage Ain Dalia simulé par le WEAP pour différents scénarios	137
84	Volume de demande en eau non satisfaite par scénario	138

---

## Liste des acronymes

**ABH** : Agence des Bassins Hydrographiques  
**AEP** : Alimentation en Eau Potable  
**ACP** : Analyse des composantes principales  
**ADE** : Algérienne des Eaux  
**ANBT** : Agence Nationale des Barrages et de Transfert  
**ANRH** : Agence Nationale des Ressources Hydrauliques  
**BNEDER** : Bureau National d'Etude pour le Développement Rural  
**BV** : Bassin Versant  
**C.A.H** : Classification Ascendante hiérarchique  
**CSM** : Constantinois - Seybouse - Mellègue  
**DD** : Développement Durable  
**DHW** : Direction de l'Hydraulique de la Wilaya  
**DPAT** : Direction de Planification et d'Aménagement du Territoire  
**DRE** : Direction des Ressources en Eau  
**DSA** : Service l'hydro-agricole, Souk-Ahras.  
**DUH** : Direction d'Urbanisme et d'Habitat  
**ETP** : l'évapotranspiration potentielle  
**ETR** ; l'évapotranspiration réelle  
**FAO** : Food and Agricultur Organization  
**GIEC**: Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat  
**GIRE** : Gestion Intégrée des Ressources en Eau  
**GPI** : Grand Périmètre Irrigué  
**IEB** : L'indice d'échange de base  
**IPMED**: Institut de Prospective Economique du Monde Méditerranéen  
**IRD** : Institut de Recherche en Développement  
**MRE** : Ministère des Ressources en Eau  
**NUD** : Programme des Nations Unie pour le Développement  
**OIE** : Office International de l'Eau  
**ONA** : Office National d'Assainissement  
**ONID** : Office National d'Irrigation et de Drainage  
**ONM** : Office National de Météorologie  
**ONS** : Office National de Statistiques  
**ORSTOM** : Office des Recherches Scientifiques et Technologiques d'Outre Mer  
**PMH**: Petite et Moyenne Hydraulique  
**PSEM**: Pays sud et Est-méditerranéens  
**RADP** : Regional Agricultural Development Program  
**RCP**: Representative Concentration Pathway  
**RIOB** : Réseau International des Organismes de Bassin  
**RFU** : des réserves facilement utilisables  
**SAU** : surface totale utile  
**SEI** : Stockholm Environment Institue  
**SOGREAH**: SociétéGrenobloised'Etudesetd'ApplicationsHydrauliques  
**STEP** : Station d'épuration  
**SRES** : Special Report on Emissions Scenarios  
**UKHI**: United Kingdom Meterological Office High Resolution  
**USGS** : United States Geological Suvey  
**WEAP**: Water Evaluation And Planning

### Introduction générale

Selon le rapport de l'ONU (2008), plus de 1,4 milliards de personnes n'ont pas accès à l'eau potable dans le monde et la demande pour cette ressource indispensable et irremplaçable s'accroît de plus en plus avec l'accroissement démographique, industriel et au changement climatique.

Dans le même rapport, l'Algérie se trouve parmi les pays d'Afrique touchés par le stress hydrique, dans la catégorie des pays les plus pauvres en matière de potentialités hydriques, soit en dessous du seuil théorique de rareté fixé par la Banque Mondiale à 1000 m<sup>3</sup> par habitant et par an et cette situation va s'aggraver à l'horizon de 2025.

L'accès durable aux ressources en eau est une préoccupation majeure qui concerne tous les pays du bassin méditerranéen. Le changement climatique et la croissance urbaine et démographique attendus dans la région, risquent d'aggraver la situation de stress hydrique qui frappe déjà la plupart des pays du Sud et de l'Est de la Méditerranée (PSEM). En Algérie, plusieurs facteurs peuvent expliquer la situation de stress hydrique. Les retards accumulés dans les décennies 1980 et 1990 pour ajuster l'offre à la demande en eau. En effet, le ratio ressources en eau par habitant et par an qui était de 1500 m<sup>3</sup> en 1962 n'était plus que de 720 m<sup>3</sup> en 1990, de 630 m<sup>3</sup> en 1998 et de 500 m<sup>3</sup> aujourd'hui. Les contraintes physiques liées au relief et à la morphologie du pays, la baisse de la pluviométrie depuis trois décennies, avec un pic de sécheresse en 2001-2002, le phénomène de désertification des sols qui accentue la menace de sécheresse (et d'évapotranspiration), en particulier dans l'Ouest algérien, la croissance de la demande en eau (multipliée par quatre en quarante ans), notamment dans le Nord du pays et dans les zones urbaines (IPMED 2013).

La politique algérienne de gestion de l'eau est centrée de plus sur la mobilisation de nouvelles ressources que sur la recherche d'une utilisation rationnelle des ressources déjà disponibles. Les associations d'usagers, et d'une façon générale la société civile, sont encore peu organisées et la consultation de leurs représentants des usagers demeure quasi-inexistante en Algérie (Plan Bleu, 2010).

Pour palier à cette problématique, l'Algérie a fixé un objectif de développer l'approche de la gestion de l'eau, en installant officiellement en décembre 2014, l'agence nationale de la gestion des ressources en eau, créée par le décret exécutif n°11-262 du 30 Juillet 2011 et placée sous la tutelle du Ministère des Ressources en eau et de l'Environnement, qui assure

les missions d'orientation, d'animation, de coordination et d'évaluation des agences de bassin hydrographique.

Le concept de gestion intégrée des ressources en eau (GIRE) est défini par le global water partnership (GWP) comme un processus facilitant le développement et la gestion coordonnées de l'eau, de la terre et des ressources qui leur sont liées, afin de maximiser le bien-être économique et social qui en découle, d'une manière équitable et sans compromettre la durabilité d'écosystèmes vitaux (Abu-Zeid, 1998).

Plusieurs chercheurs scientifiques ont utilisés plusieurs outils pour traiter la problématique de la gestion des ressources, dans différents sites, afin de trouver des pistes d'orientation, qui représente un outil d'aide pour les planificateurs et les décideurs dans leurs plans d'actions. Parmi ces chercheurs, Hervé (2003) en traitant le liens entre la productivité et l'allocation équitable de l'eau dans le bassin de la rivière Olifants en Afrique du Sud et Daifallah (2017) en Algérie, sur les ressources en eau et leurs utilisations dans le bassin versant de l'Oued Kébir Ouest N-E Algérien, ainsi que Bouznad (2017), les ressources en eau et gestion intégrée dans la vallée de Oued Righ, dans le Sahara septentrional

Pour traiter la question de la GIRE dans le bassin d'étude, nous avons adopté l'approche WEAP (Water Evaluation and Planning System), qui se base sur l'analyse du bilan hydrique et tient compte de variables explicatives de natures diverses, tels que les précipitations, eaux de surface, eaux souterraines, installations de traitement, exigences des écosystèmes, demande en eau, génération de pollution, etc. Ce model "WEAP", applicable dans plusieurs domaines : municipal, agricole, aménagement des bassins versants, fluviaux, etc.

Le modèle WEAP a été développé par le Stockholm Environment Institute (SEI). Il fonctionne mensuellement sur principe de base de la comptabilité de bilan hydrique. L'utilisateur représente le système en termes de ses différentes sources de d'approvisionnement (comme les rivières, les eaux souterraines et les réservoirs), les prélèvements, la demande en eau et les exigences de l'écosystème (SEI, 2001). Dans WEAP, l'effort de modélisation de scénarios typique comprend trois étapes. Tout d'abord, une année de compte courant est choisie pour servir d'année de base du modèle; deux un scénario de référence est établi à partir des comptes courants pour simuler l'évolution probable du système sans intervention; et troisièmement, des scénarios hypothétiques créés pour modifier le «Scénario de référence» et évaluez les effets des modifications apportées aux politiques et / ou aux technologies.

Les données utilisées dans la modélisation pour les comptes courants, sont classés pour une période, Pour la répartition des ressources disponibles, plusieurs options ont été testées en élaborant plusieurs scénarios et les futures demandes en eau sont projetées.

La zone de recherche appartient au bassin versant transfrontalier de la Medjerda, qui compose le grand bassin Constantinois-Seybouse-Mellègue (CSM), selon la division hydrographique, qui se trouve dans la zone la plus arrosée de l'Algérie et par conséquent elle est la plus riche en eau de surface (45 % de potentialité nationales).

La présente recherche présente une modeste contribution à la connaissance des potentialités hydriques que recèle le bassin versant transfrontalier de La Medjerda et vise à la confrontation entre ces ressources qui existent actuellement dans le dit bassin versant et les demandes actuelles et leurs tendances futures selon un scénario de référence et d'autres scénarios qui tiennent compte de l'effet du changement climatique et l'extension des terres irriguées sur le devenir quantitatif de l'eau dans la zone d'étude.

Cette thèse est structurée comme suit:

1. Introduction générale
2. Cadre général de la zone d'étude
3. Cadre morphométrique et hydrographique
4. hydroclimatologie
5. Hydrochimie
6. Ressources en eau et usagers
7. Simulation de la demande en eau par le modèle WEAP
8. Conclusion générale

# Chapitre I

## CADRE GÉNÉRAL

### 1. Situation géographique

Le bassin versant transfrontalier de la Medjerda est situé à l'extrême Nord-Est de l'Algérie, il appartient au grand bassin versant Constantinois-Seybouse-Mellègue (CSM), selon la classification de l'ABH et porte le code (1201), il s'étend du 7°34' et 8°25' de longitude Est et du 36°04' et 36°25' de latitude Nord, il couvre une superficie de 1505.5 Km<sup>2</sup> et il est drainé par l'oued Medjerda et ses affluents (Fig. 1). Il se trouve presque totalement inclus dans le territoire administratif de la wilaya de Souk Ahras. Il est limité par les bassins versant suivants:

- Au Nord, par le bassin versant côtier constantinois.
- A l'Ouest, par le bassin versant de la Seybouse.
- Au Sud, par le bassin versant de Mellègue.
- A l'Est, par la frontière Tunisienne.

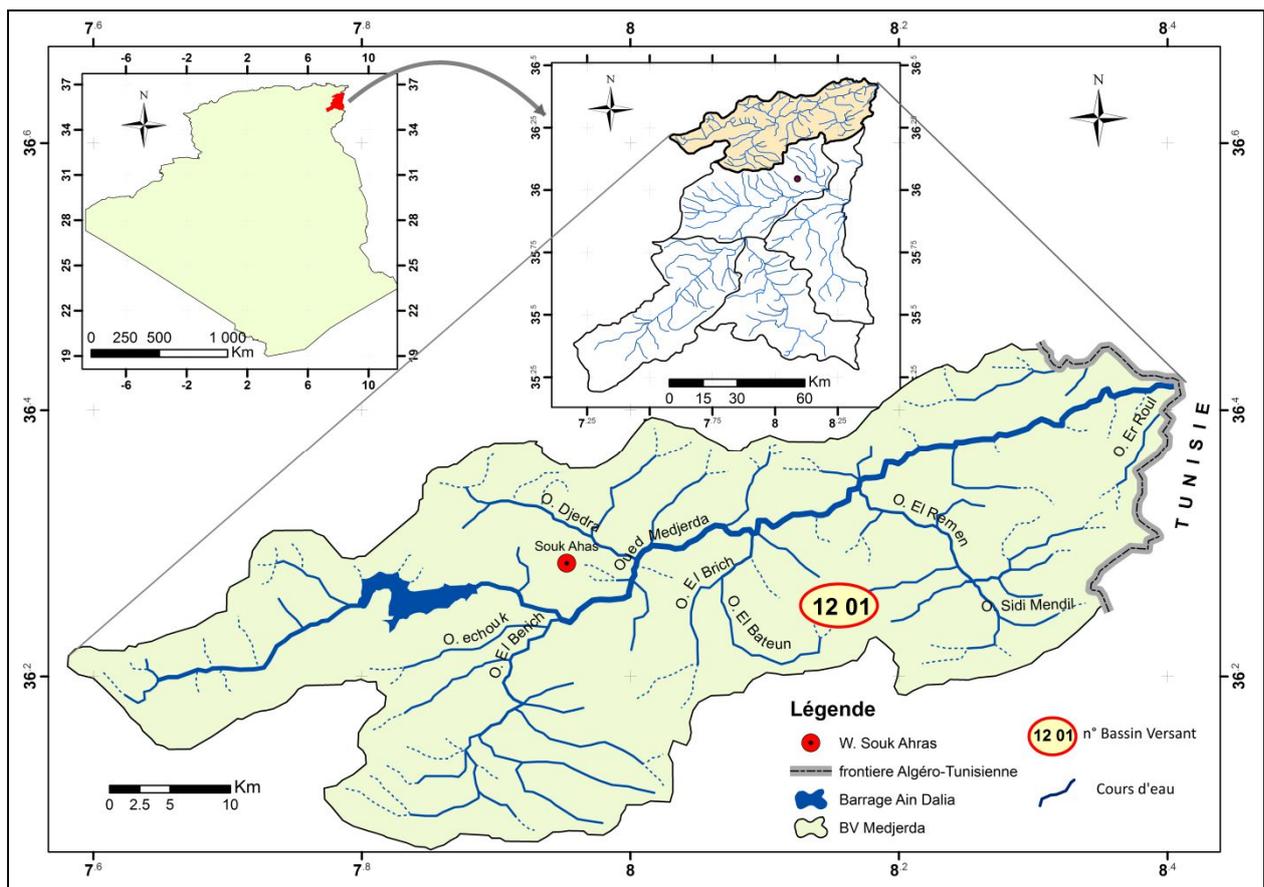


Figure 1: Situation géographique du bassin versant de la Medjerda

Le cours d'eau principal, la Medjerda prend sa source sur les monts de Souk-Ahras (Ras El Alia, 1317 m), s'incurve vers le Nord Est et s'écoule au centre de la plaine de khemissa ensuite il entre dans la région triasique de souk Ahras et s'enfonce profondément dans les terrains tendres, ensuite il prend une direction SW-NE subséquente en quittant le trias, la Medjerda prend une direction SW-NE subséquente qu'elle garde jusqu'à la frontière tunisienne.

La zone d'étude occupe une position charnière entre l'Atlas Tellien au nord et l'Atlas Saharien dans sa partie sud. Elle est formée par un massif montagneux sur la majorité de sa surface, ce massif est un ensemble de montagnes situées de part et d'autre du cours supérieur.

La Zone d'étude compte 15 communes qui font partie des 26 incluses dans la wilaya de souk Ahras (Fig. 2). Certaines communes ont des parties de leurs surfaces hors limite du bassin versant.

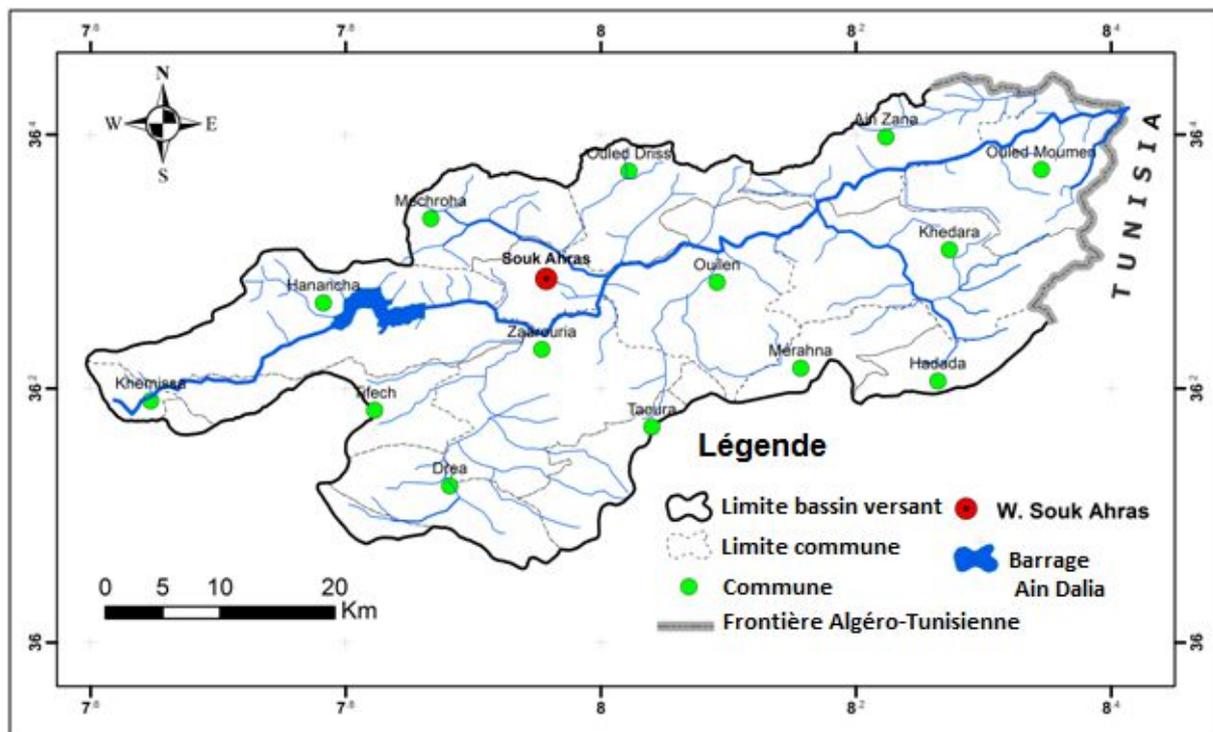


Figure 2: Les communes au sein du bassin versant de la Medjerda

## 2. Aperçu socio économique et enjeux de développement de la wilaya de Souk Ahras

### 2. 1. Présentation de la wilaya

Selon le rapport de la DPAT (2014), la wilaya de souk Ahras couvre un territoire de 4359,65 km<sup>2</sup>, elle est limitée :

- au Nord, par la wilaya d'El Tarf et Guelma,
- à l'Ouest, par la wilaya d'Oum El Bouaghi,
- au Sud, par la wilaya de Tébessa
- à l'Est, par la Tunisie, avec la quelle elle partage une bande frontalière de 88 km.

Sur le plan administratif, la wilaya de Souk Ahras est issue du découpage de 1984, elle compte 26 communes regroupées en 10 daïras. La wilaya de Souk Ahras appartient à l'ensemble tellien, une chaîne de montagne qui s'étend d'Ouest en Est sur l'ensemble de la partie Nord du pays.

Le territoire de la wilaya est compartimenté en deux ensembles physiques et naturels bien distincts:

- Une zone au Nord, montagneuse, relativement bien arrosée et abritant un couvert végétal forestier appréciable, au climat tempéré.
- Une zone au Sud, correspondant au domaine des hautes plaines, au climat semi aride et abritant une végétation de type steppique.

Selon les résultats préliminaires du RGPH 2008, la wilaya de Souk Ahras compte 438 127 habitants. Le taux d'accroissement démographique entre les recensements 1987 et 2008 est estimé à 1,9 %. Une forte concentration de la population est constatée au niveau du chef lieu de wilaya (3 362 hab/km<sup>2</sup>). Cependant, la population rurale reste dominante (60 % de la population totale). D'après l'estimation de la DPAT(2014), le taux de la population active est 42,86% et le taux de la population occupée est de 71,59 %.

L'agriculture est la principale activité économique de la wilaya. Bien que peu rémunératrice, elle occupe près de 30 000 habitants.

En matière de satisfaction des besoins en alimentation en eau potable, la wilaya dispose, d'un réseau d'adduction et de distribution d'une longueur de 955 Km (605 Km/Urban et 350 Km/rural), donnant un taux de raccordement moyen de 92 % en 2007. Ce taux est appelé à évoluer à 95% (objectif attendu par la réalisation du programme quinquennal du DPAT 2014-2019) de même pour la dotation moyenne/habitant qui est actuellement de 90 l/j à 130 l/j/h au Chef-lieu de Wilaya).

La wilaya dispose d'un patrimoine forestier s'étendant sur près de 110 323 ha, constitué de diverses essences (Pin d'Alep, Chêne Liège, Chêne Zen...) qui constituent une réserve naturelle en même temps qu'un gisement économique appréciable : production de bois et liège, apiculture, pacage et source d'emplois pour les riverains au titre des travaux forestiers.

L'activité industrielle, modeste, est représentée par cinq (05) unités du secteur public et 15 autres de type PME du secteur privé. Elle procure 2000 emplois directs. Les branches d'activité présentes sont : le textile, la production de papier, de verre et de peinture, la menuiserie générale, les matériaux de construction, le conditionnement du lait et la minoterie.

## 2. 2. Principaux enjeux de développement de la wilaya

Le diagnostic territorial a permis d'identifier les grands enjeux auxquels devra faire face la wilaya de Souk Ahras dans les années à venir; ces enjeux mettent l'accent à la fois sur les atouts et les handicaps, les opportunités et les menaces qui débouchent sur les grands défis qu'elle devra relever d'ici 2030.

Quatre (04) enjeux majeurs qui se déclinent en 9 enjeux sont identifiés pour l'aménagement et le développement futur du territoire de la wilaya de souk Ahras, il s'agit de :

### A. Aller à un territoire durable:

- L'eau: Une gestion raisonnée et une valorisation optimale des ressources en eau dans le but de rechercher la meilleure adéquation entre besoins et ressources.
- Les sols: Une préservation et une mise en valeur des zones de montagne et steppiques et une valorisation du potentiel hydro agricole de la wilaya;
- La biodiversité: Une sauvegarde et une valorisation des écosystèmes;
- Le patrimoine: Une protection, une mise en valeur des sites patrimoniaux.
- Les risques majeurs: Une prise en compte des risques naturels, climatiques et technologiques

### B. Créer les dynamiques du rééquilibrage territorial:

- La consécration de l'équilibre territorial;

### C. Assurer l'attractivité et la compétitivité du territoire de la wilaya:

- L'insertion dans la dynamique interrégionale
- L'expansion économique dans une optique de développement durable.

### D. Mettre en œuvre l'équité territoriale:

- La contribution à une meilleure insertion des espaces ruraux dans le développement de la wilaya et la poursuite l'effort de rattrapage en faveur des zones défavorisés.

### 3. Aperçu géologique

#### 3. 1. La géologie régionale

##### Introduction

La géologie de l'Algérie du Nord est représentée du Nord vers le Sud par deux chaînes :

La chaîne alpine dite Maghrébide, qui fait de l'orogénèse alpin et la chaîne Atlasique (Delga, 1969).

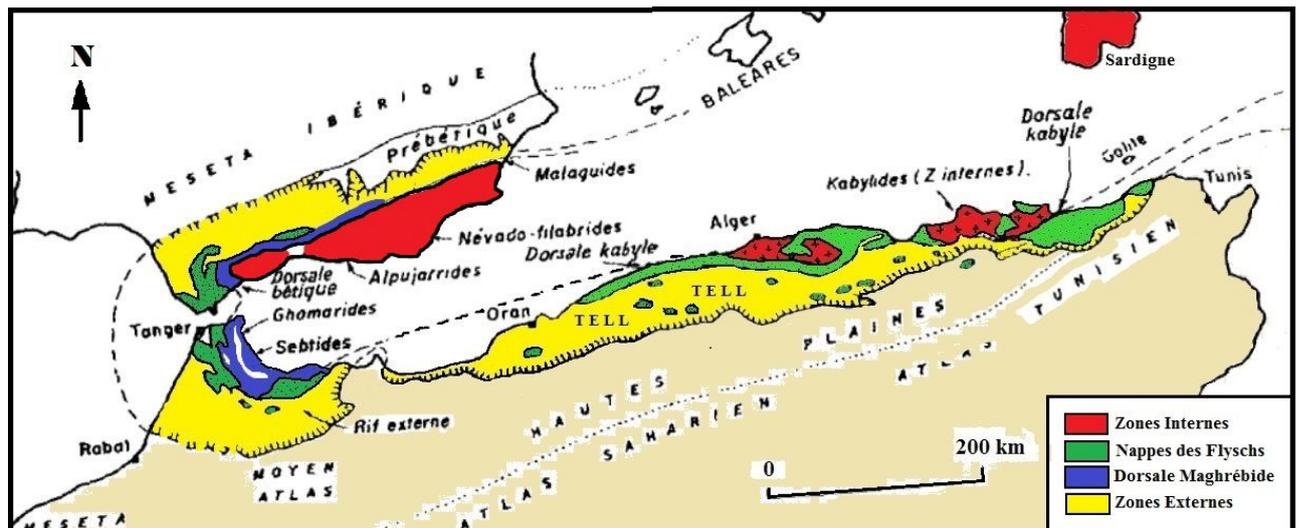


Figure 3 : Schéma structural des Maghrébides ( d'après M. Durand-Delga et J.M. Fontboté, 1980)

#### 1. 2. La chaîne Maghrébide

La chaîne Maghrébide est constituée du Nord vers le Sud par trois principaux ensembles: Le domaine interne, le domaine des flyschs et le domaine externe (Fig. 3).

##### 1. 2. 1. Le domaine interne

Appelé aussi socle kabyle ou Kabylide, il est composé de massifs cristallophylliens métamorphiques (gneiss, marbres, amphibolites, micaschistes et schistes) et d'un ensemble sédimentaire paléozoïque (Ordovicien à Carbonifère) peu métamorphique.

Le socle kabyle est bordé au sud par les unités mésozoïques et cénozoïques de la Dorsale Kabyle appelée parfois « **chaîne calcaire** » à cause de l'importance du Jurassique inférieur calcaire.

Le socle est par endroits recouvert en discordance par des dépôts détritiques d'âge Oligocène supérieur – Miocène inférieur, appelés **Oligo-Miocène Kabyle**.

Ce domaine est exceptionnellement étroit et ne dépasse jamais quelques km de largeur.

##### 1. 2. 2. Le domaine des flyschs

Il est constitué par un ensemble des nappes à matériel détritique de crétacés-paléogènes qui affleurent dans les zones littorales sur 800 km de long. Il s'agit essentiellement de dépôts de

mer profonde mis en place par des courants de turbidités. On distingue du Nord au Sud deux grands groupes de flyschs, les flyschs maurétaniens et les flyschs massyliens auxquels s'ajoutent un troisième groupe de flyschs plus récent, les flyschs numidiens d'âge Oligocène supérieur – Burdigalien inférieur.

#### **1. 2. 2. a. Les flyschs maurétaniens**

Sont relativement épais et occupent une position interne dans le domaine des flyschs. Ils sont composés d'alternances de bancs argileux, calcaires et gréseux. Déposées du Crétacé inférieur à l'Eocène.

#### **1. 2. 2. b. Les flyschs massyliens**

Occupent une position externe dans le domaine des flyschs et comportent une série péli-to-quartzitique d'âge Crétacé inférieur surmontée par une série péli-to-micro-bréchique d'âge Crétacé supérieur.

#### **1. 2. 2. c. Les flyschs numidiens**

Constitués de niveaux gréseux d'âge Oligocène terminal- Aquitanien épais de plusieurs centaines de mètres qui reposent sur des argilites versicolores oligocènes. Ces flyschs reposent anormalement à la fois sur les zones internes et sur les zones externes.

#### **1. 2. 3. Le domaine externe**

En Algérie orientale, le domaine externe comprend les séries telliennes, les séries de l'avant pays allochtone ou parautochtone, et les séries de l'avant pays atlasique autochtone.

#### **1. 2. 3. a. Les séries telliennes**

Ils sont constitués par un ensemble de nappes allochtones pelliculaires constituées principalement par de marnes d'âge Crétacé moyen à Néogène et qui ont été charriées sur une centaine de km vers le Sud. On distingue du Nord au Sud.

#### **1. 2. 3. a. i. Les unités ultra-telliennes**

A composition marno-calcaires claires typique d'âge Crétacé inférieur;

#### **1. 2. 3. a. ii. Les unités telliennes (sensu-stricto)**

Formées de Lias de plate-forme surmonté de Jurassique plus marneux, puis par le Crétacé détritique, devient marneux à argilo-calcaire et enfin, l'Eocène aux marnes épaisses

#### **1. 2. 3. a. iii. Les unités péni-telliennes**

Désignent des séries présentant du Lias au Sénonien supérieur, des alternances de faciès telliens et de faciès néritiques. Les formations éocènes riches en nummulites, constituant la couverture de ces séries.

#### **1. 2. 3. b. L'avant pays allochtone**

Ont été regroupées en trois grands ensembles : une organisation sétifienne, une organisation constantinoise, une organisation Algéro- Tunisienne (Vila, 1980).

#### **1. 2. 3. b. i. L'organisation constantinoise**

Regroupe les séries néritiques au Nord, et les séries des Sellaoua au Sud à sédimentation terrigène. Les séries néritiques, épaisse formation carbonatée mésozoïque, faiblement

déplacée, chevauchent les écaïlles des Sellaoua et les unités Sud-sétifiennes. Cet ensemble de formations a été plissé par la phase éocène supérieure.

### **1. 2. 3. b. ii. L'organisation Sétifiennne**

Constitue l'ensemble allochtone Sud-Sétifien. Les unités sont composées de carbonates mésozoïques à intercalations pélagiques. Á l'Est, les séries Sud-Sétifiennes s'intercalent entre l'unité néritique constantinoise et les écaïlles atlastiques.

### **1. 2. 3. b. iii. L'organisation Algéro-Tunisienne**

Elle concerne les avants pays à faciès de sillon plissés et écaillés. Les structures plissées sont rapportées à la phase éocène supérieure. Les plis de grande courbure sont parfois injectés de diapirs d'évaporites triasiques

### **1. 2. 3. c. L'avant pays atlastique autochtone et parautochtone**

Comprend « les monts du Hodna et du Belezma, le Nord des Aurès, les hautes plaines d'Oum El Bouaghi et d'Ain Beida, les monts de Souk Ahras et plus au Sud les Djebels Ouasta, Ouenza, Boukhadra, Mesloulou » (Vila, 1980) injectés de diapirs. L'avant pays se distingue par des séries mésozoïques très épaisses de plate-forme subsidente, à intercalations gréseuses (Vila, 1980).

## **3. 2. Géologie locale**

Le territoire de la wilaya de souk Ahras faisait partie de la zone alpine plissée, est localisé en bordure du bloc et des hauts plateaux.

La superposition de certains complexes structuraux est parfois observée. Le complexe autochtone inférieur et quatre complexes allochtones de flyshs (tellien, Guerrouche, microbrèche) sont mis en évidence.

Les terrains rencontrés sur le territoire de la wilaya appartiennent aux formations carbonatées marines, terrigènes et évaporitiques du trias, Crétacé; Paléogène et Néogène. Les faciès continentaux sont représentés par des formations meubles ou faiblement cimentées du Pliocène, Plio-Quaternaire et Quaternaire

### **3. 2. 1. - Lithostratigraphie**

Les différents âges des formations rencontrées varient du Trias au Quaternaire (Fig. 4).

#### **TRIAS**

Les plus anciens terrains rencontrés dans la wilaya sont des dépôts du Trias marin ou lagunaire. Ils affleurent dans les structures diapiriques de Tifech au Nord-Ouest de souk Ahras, il s'agit de faciès argilo-gypseux versicolores avec un mélange chaotique de marne, argiles bariolés, il est également représenté par des cargneules de couleur jaune ou brune, de calcaires dolomitiques bleu noir, de calcaires marneux en plaquette de couleur grise ou beige, de dolomie et calcaires divers, de psammites et grés.

- **Crétacé inférieur**

- **Aptien**

Il est formé par une alternance de marnes grises ou noirâtres, des calcaires dont la puissance atteint plusieurs centaines de mètre, des marno-calcaires, de grés gris ou blanchâtres à patine brune, souvent calcareux.

- **Albien-Cénomaniens**

Il est rencontré sous forme d'intercalation de marnes de couleur grise, de marnocalcaires de couleur gris foncé et de calcaires de couleur gris. Il apparaît au Nord dans l'anticlinal de l'oued Mougras (Sidi El Hemissi, Djebels Graouet et Bourzine) et s'étend jusqu'à la frontière Tunisienne.

- **Crétacé supérieur**

- **Le Cénomaniens**

Il est rencontré sous forme d'intercalation de marnes de couleur grise, de marnocalcaires de couleur gris foncé et de calcaires de couleur gris. La puissance de ces formations est de plus de 500 m

- **Le Turonien**

Le Turonien se présente principalement par une intercalation monotone de calcaire gris foncé à patine grise ou jaune, et de marnes, la puissance de ces formations atteint les 200 m.

- **Coniacien**

Le Coniacien est rencontré sous forme d'intercalation de marnes avec quelque passées détritiques, marno-calcaire et calcaires marneux à patine jaune, avec une puissance de 250 m.

- **Santonien**

Formé par une intercalation de calcaires de couleur gris, de calcaires marneux et marnes grises foncées à petits lits de calcaires, l'épaisseur de ces formations est de 400m.

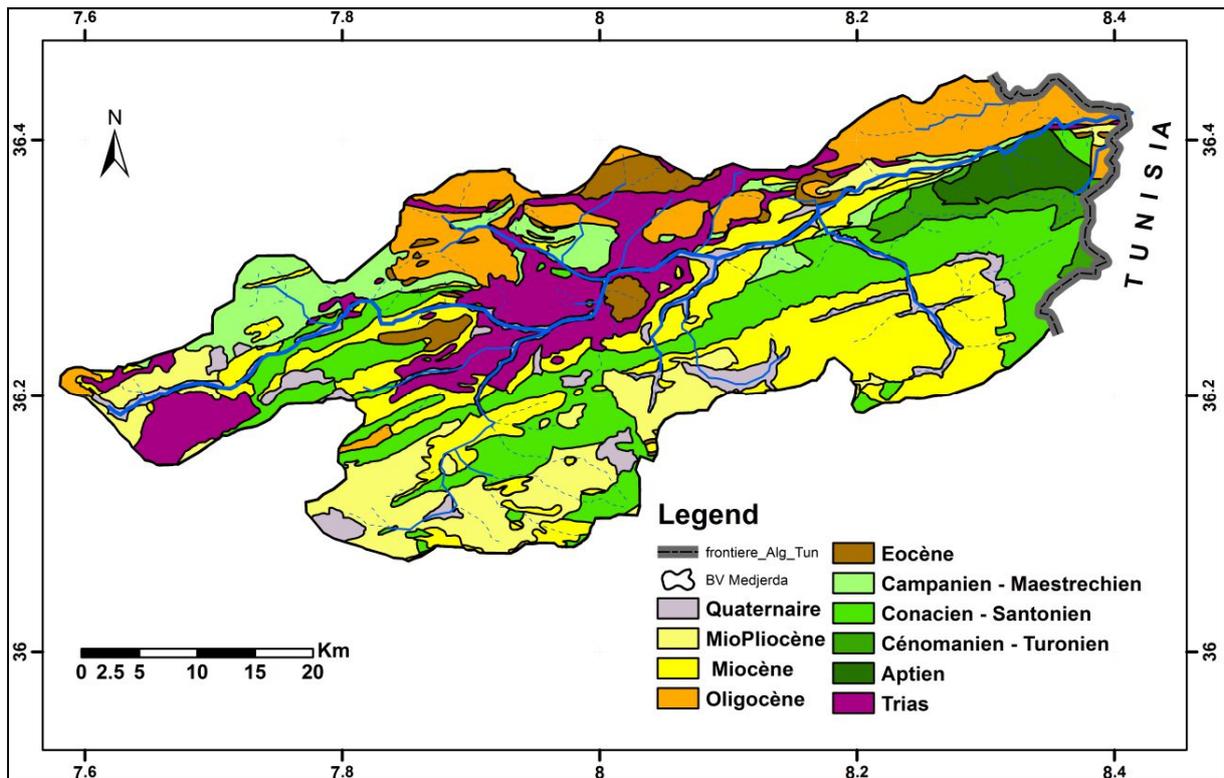
- **Campanien**

Du point de vue lithologique, la base du Campanien présente une grande uniformité avec les marnes grises tantôt bleutées, tantôt verdâtres à petits lits de calcaires. Dans sa partie supérieure, il est formé par une intercalation de calcaires, marno-calcaires et marnes blanchâtres. La puissance de ces formations est de 400 m.

- **Maestrichtien**

Affleurant en quelques points isolés, les terrains du Maestrichtien constituent conjointement avec les roches du Campanien supérieur. Le Maestrichtien est constitué de calcaires à rares passées marneuse, et aussi par des marnes argileuses et calcaire, la puissance de ces formations est de 350 m.

Les calcaires du Crétacé apparaissent au Nord de la zone d'étude, dans le territoire de la commune de Hennancha, Zaarouria où il constitue les différents djebels tels que Dekma, Zaarouria, Zelaz et Bourzine.



**Figure 4: Esquisse géologique du bassin versant de la Medjerda  
(modifiée, BOUROUGA 2017)**

- **Paléogène**

• **L'Eocène**

L'Eocène est très peu observé dans le territoire de la wilaya de Souk-Ahras. Il n'apparaît que sous forme de lambeaux dans la région Nord.

Il renferme des roches carbonatées marneuses et des dépôts conglomératiques. Sa puissance est de 200 m.

• **L'Oligocène**

Est largement étendu à l'extrême nord de la région, se présente sous un faciès numidien et une alternance de grès et d'argiles.

- **Néogène**

• **Le miocène**

Il forme une puissante série terrigène participant au remplissage des dépressions intra-montagneuse et constitue le cœur des structures synclinales.

Il est subdivisé en deux termes: Miocène inférieur-moyen et supérieur.

Le miocène inférieur-moyen est constitué de conglomérats, grès, argiles et marne.

Ces dépôts sont largement répandus dans la partie centrale du territoire. Son épaisseur varie de 80 à 100 m.

- **Le Mio-Pliocène**

Englobe toutes les formations continentales postérieures à la dernière avancée marine du Miocène. Il est représenté par des marnes blanches à gypse, des calcaires bicolores gris bleu et jaune vif, des argiles et des conglomérats rouges, remplissant le synclinal de Taoura-Mérahna où l'épaisseur atteint les 350 m.

- **Le Quaternaire**

Une partie importante de la région est recouverte par des dépôts continentaux. Le quaternaire ancien est représenté par des travertins, des calcaires lacustres, des argiles et limons de teinte rouge et une croûte calcaire. Le quaternaire moyen est représenté par les terrains de pente avec des limons et fragments de croûte calcaire, les dépôts détritiques gravitationnels tels que les dépôts de pente, brèches, cailloutis, sables et limons. Le quaternaire supérieur comprend les terrains de pente, de dépôts torrentiels et d'autres sédiments meubles.

### **3. 2. 2. La tectonique**

#### **3. 2. 2. a. La tectonique de la région d'étude**

Sur les zones telliennes (zone septentrionale) et sahariennes, les monts de la Haute Medjerda sont marqués par une phase orogénique importante qui s'étend depuis la fin du Lutétien jusqu'au Quaternaire (David, 1956).

#### **3. 2. 2. b. Les phases tectoniques de la région d'étude**

D'après L. David (1956), les principales phases tectoniques sont les suivantes:

- Phase préliminaire, post-Lutétien et anté-Bartonien : elle est responsable des premiers véritables plissements des assises antérieures.
- Première phase majeure post-Oligocène et anté-Miocène antérieure à la transgression miocène,
- Deuxième phase majeure, post-Miocène inférieur et anté- Miocène supérieur : il s'agit d'une nouvelle phase paroxysmale qui met fin à l'existence de la mer dans l'Est Algérien. C'est au cours de cette période que les nappes de glissement reposent toutes sur le Miocène.
- Phase post-Miocène et anté-Pliocène : elle se distingue par une période de distension au cours de laquelle certains panneaux du socle s'enfoncent progressivement. Ainsi, on assiste à la naissance des bassins d'effondrement.
- Phase post-Pliocène : elle entraîne la fin du régime subsidés des bassins d'effondrement.

### **3. 3. 3. Cadre structural**

Les principaux traits structuraux (Fig. 5) dans notre région, représentée par le diapirisme, les plissements et la tectonique cassante.

### 3. 3. 3. a. Le Diapirisme

Notre zone d'étude fait partie de l'atlas saharien, qui est caractérisé par les diapirs, orientées selon la direction NE-SW, il est connu par l'affleurement des roches de Trias (Fig. 05), sous formes de masses chaotiques où dominent le gypse, les argiles et les dolomies (Vila & al 1993). Les activités diapiriques sont d'âge aptien,

La plupart des diapirs dessinent une disposition morphologique en dômes percés de direction NE-SW, affleurant sous forme de corps elliptiques étirés, formant un chapelet de masses argilo-gypso-carbonatées.

### 3. 3. 3. b. Les plissements

Les formations sédimentaires dans son ensemble ont été plissées suivant une direction NE-SW, qui sont celles de l'atlas tellien ou l'atlas Saharien., ces plissements ont eu lieu au cours du paléogène (Eocène supérieur- Oligocène), il s'agit de :

- de l'anticlinal de Sidi Mohammed Sassi ;
- du synclinorium de Montesquieu-Gambetta-Mérahna ;
- de l'anticlinal du Dj. Zellez-Dj. Zarouria-Hammam Tassa-Dj. Berda-Dj. Graouet ;
- de l'anticlinal du Dj. Serou-Dj. Dekma-Dj. Bou kebech ;
- du synclinorium de la haute Medjerda ;
- des plis telliens.

### 3. 3. 3. c. La tectonique cassante

La zone d'étude est caractérisée par une tectonique cassante (failles) :

- Les failles d'effondrement orientées NNW-SSE : elles sont développées sur la bordure orientale du bassin (exemple bassin de Gambetta, et de Nador n'Bails) ;
- Les failles transversales majeures : ces failles affectent à la fois les chaînons telliens et sahariens, s'ajoute une tectonique triasique.

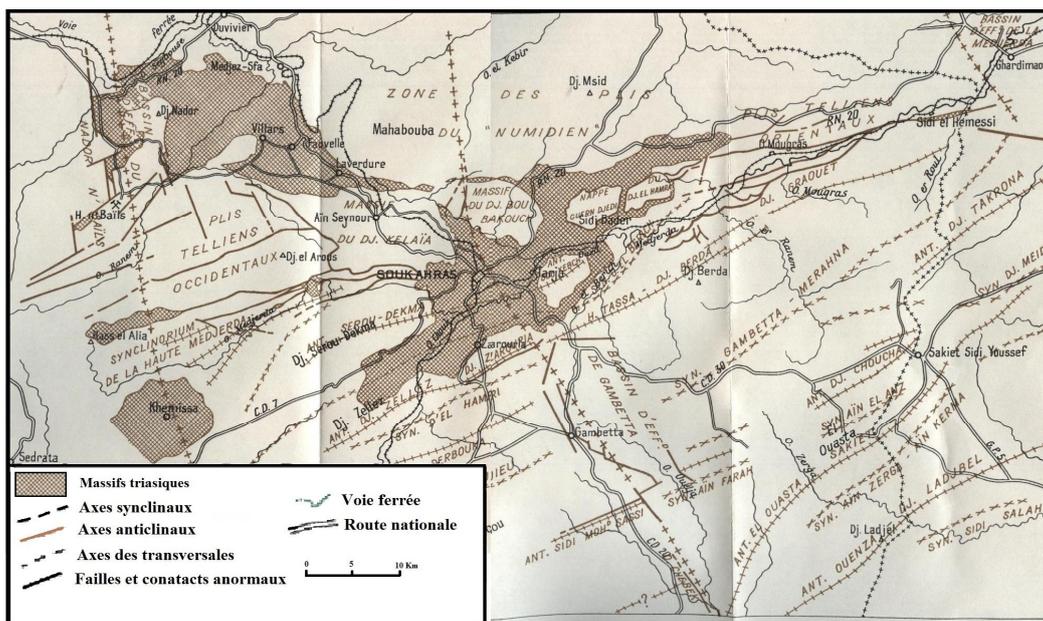


Figure 5 : Carte structurale des monts de la Haute Medjerda (David, 1956)

## 4. HYDROGÉOLOGIE

### 4. 1. Les principales nappes constituant l'aquifère du bassin versant de la Medjerda

La zone d'étude est formée essentiellement par plusieurs unités hydrogéologiques, la principale se situe dans le synclinal de Taoura qui se trouve dans les terrains géologiques calcaires du Crétacé et du Cénozoïque avec de grande potentialité et quelques aquifères secondaires de faible potentialité.

#### 4. 1. 1. la nappe du Synclinal de Taoura

Le synclinal de Taoura est situé au sud du bassin versant, il couvre une superficie de 585 km<sup>2</sup> (PNE 2006). Il est formé par la superposition de plusieurs horizons aquifères, l'un superficiel dans le Mio-Plio-Quaternaire relativement de faible potentialité et d'autres plus profonds, les formations susceptibles de contenir des aquifères sont les calcaires du Crétacé supérieur fissurés et karstifiés (Maestrichtien, Campanien et Turonien), son épaisseur variant entre 50 et 110 m (Fig. 6) et présentent des potentialités aquifères intéressantes (Tab. 1). Les forages ont donné des débits compris entre 5 et 90 l/s.

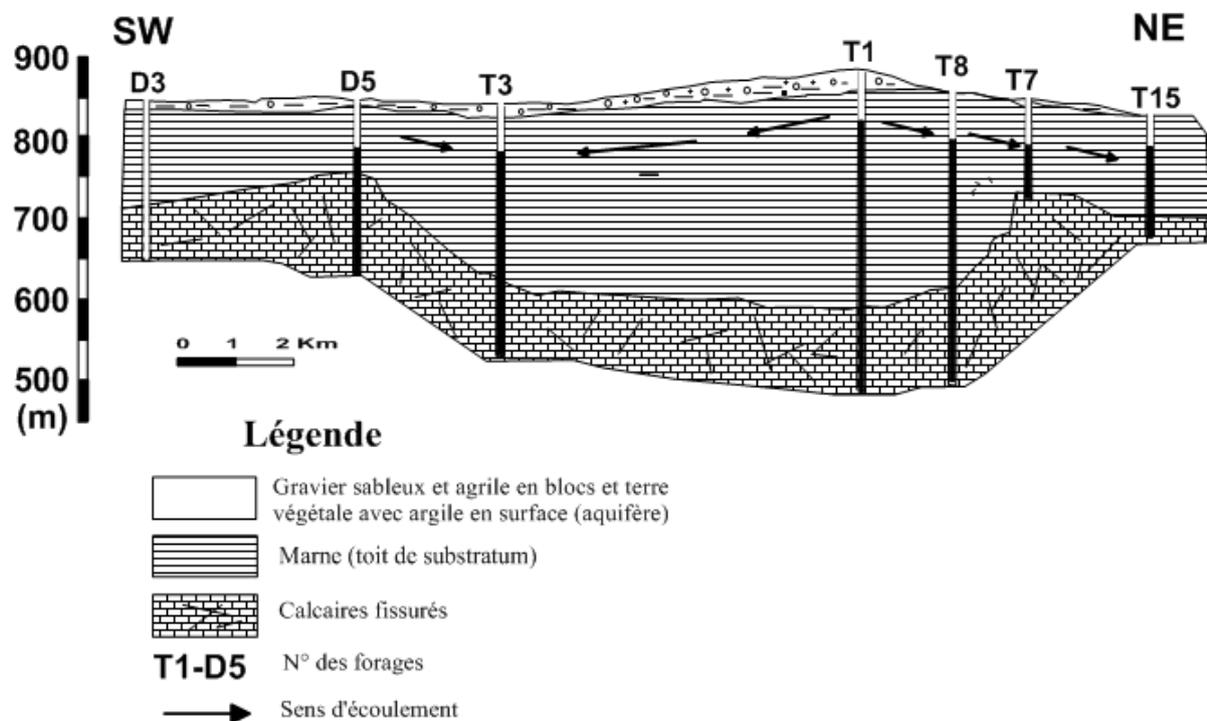


Figure 6: Coupe hydrogéologique de la région de Taoura (DRE modifiée)

Tableau 1: Caractéristiques hydrogéologiques du synclinal de la Taoura.

Formation	Lithologie	Epaisseur (m)	Caractéristiques hydrogéologiques
Quaternaire	Alluvions fluviales, galets et blocs éboulis.	/	Perméable
Plio-Quaternaire	Grès, conglomérats, argiles, marnes.	50m	Semi-perméable
Pliocène	Conglomérats, gravélites, grès, argiles et marnes.	700 à 200m au niveau de Merahna	Semi-perméable
Miocène - supérieur - moyen - inférieur	- Dépôts indifférenciés, marnes, argiles, grès, gravélites, grès glauconieux. - Grès, conglomérats, marnes, argilites. - Grès, marnes, argilites.		Aquifère Imperméable
Eocène - Priabonien - Yprésien- Lutétien	Marnes calcaires, lumachelles calcaire nummulitiques, marnes.		25 à 30m
Paléocène	Marnes-calcaires.	80 à 200m	Imperméable à Semi-perméable
Crétacé supérieur - Maestrichtien supérieur	- Marnes, calcaires-marneux.	100 à 140m	Semi-perméable
<b>Maestrichtien inférieur</b>	<b>- Calcaires blancs crayeux, calcaires à rares passées de marnes.</b>	<b>200 à 250m</b>	<b>Aquifère karstique</b>
<b>Campanien sup</b>	<b>Marnes à bancs calcaires - Calcaires gris claire, à quelques inter-lits de marne.</b>	<b>50 à 70m 80 à 100m</b>	<b>Semi-perméable Aquifère karstique</b>
Santonien supérieur- Campanien inférieur	Marnes, calcaires	Dépasse 250m	Semi-perméable
Santonien inférieur	Marnes, calcaires.	?	Semi-perméable
- Coniacien	Marnes, marno-calcaires et Calcairesmarneux	?	Semi-perméable
<b>- Turonien</b>	<b>Calcaires, marnes.</b>	<b>100 à 150m Aquifère karstique</b>	
Crétacé inférieur Terme supérieur Terme inférieur	- Marnes, siltstones et calcaires - marneux - Marnes, calcaires, grès	900 m ?	Aquifère karstique thermal

4. 1. 2. Nappes d'eau secondaires

a. Système massif Karstique de l'éocène

Cette nappe est située à Ouled Driss, au Nord-Est de la région d'étude, se trouve dans les formations calcaires dolomitiques d'âge éocène, connue par son faible potentiel hydrique, et captée par quelques forages de faible débit de l'ordre de 2 l/s.

b. Aquifère Plio-quaternaire

Cet aquifère est appartient à la nappe de Sedrata Tiffech, contenue dans les argiles sableuses, de grès, de graviers plus ou moins argileux du Mio-Pliocène et de calcaires dure attribués au Mio-Plio-Quaternaire, son potentiel est faibles, le débit des forages est de 2 à 3 l/s.

c. Aquifère Mio-pliocène

Les grès miocènes ont développé un aquifère assez important, qui s'étend sur une superficie d'environ de 66 Km<sup>2</sup>. exploitée par plusieurs forages au niveau de Heddada et trente (30) puits destinés à l'irrigation avec un débit faible de 1.5 à 3 l/s et quatre (04) sources au niveau de Merahna. Ces forages sont destinés à l'alimentation en eau potable des communes de Heddada, Khedara, Ouled Moumen et le Sud de Sidi Fredj

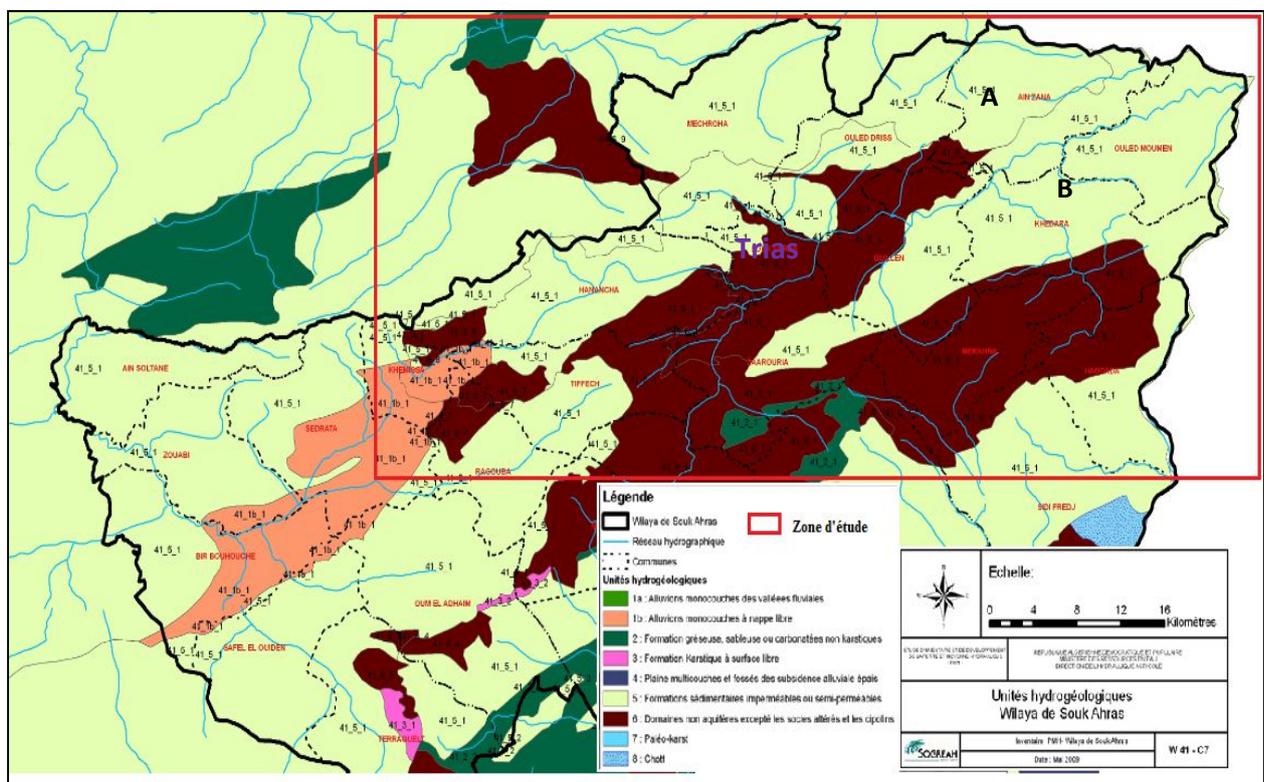


Figure 7: Unités hydrogéologique de la wilaya de souk Ahras (SOGREAH 2009)

#### 4. 2. Interprétation de la carte Hydrogéologique de la wilaya de Souk Ahras

L'analyse de l'environnement hydrogéologique de la wilaya de Souk Ahras, réalisé par SOGREAH (Société Grenobloise d'Etudes et d'Applications Hydrauliques 2009), illustré dans la Figure 7 a permis d'identifier la nature des matériaux et les structures des formations existantes ainsi que les ressources d'eau souterraines qui les recèlent.

La région d'étude est caractérisée par des formations allant du Trias jusqu'au Quaternaire constituées, généralement, par des calcaires, des argiles, des marnes, des grés et des cailloutis.

Les caractéristiques hydrogéologiques des différentes zones de la zone d'étude wilaya de Souk Ahras sont représentées comme suit:

- **Zone A**

C'est la zone montagneuse au Nord-est de la wilaya, se trouve en amont de l'oued Medjerda. La partie majeure de cette zone est constituée d'argiles rouges numidiennes, sur lesquelles reposent des grés peu perméables. Ces grés sont fragmentés en nombreux panneaux indépendantes, ses unités hydrogéologique appartiennent au système d'aquifère de l'Atlas Tellien, constitués d'aquifères multicouches, sans nappe libre et avec un aquifère plus profond et captif. Les sources sont nombreuses, et leurs débits sont faibles et comme les réserves sont toujours réduites elles tarissent fréquemment en été (période du déficit hydrique). On trouve aussi des affleurements des marnes et calcaires marneux du crétacé supérieur et l'éocène, quasiment imperméables sauf quelques bancs calcaires éocènes qui donnent naissance à de petites sources.

- **Zone B**

C'est la zone de plaines et de collines, se trouve en aval de l'oued Medjerda. Elle enveloppe principalement une succession d'épaisses séries marneuses et de calcaires du crétacé supérieur. Dans le creux des synclinaux se trouvent des argiles et grés miocènes et des formations de cailloutis, argiles sableuses, limons. Les structures synclinales du crétacé supérieur peuvent contenir des nappes aquifères alimentées par des infiltrations sur les calcaires eux-mêmes, les grés et sables miocènes et les alluvions du Quaternaire lorsque ces différentes formations sont en contact. Quant les calcaires sont trop profonds, il est probable qu'ils ne sont plus assez karstifiés pour avoir une bonne perméabilité d'ensemble. Des nappes phréatiques s'établissent dans les formations quaternaires reposant sur les argiles miocènes. Ces nappes sont drainées par différents affluents de l'oued Medjerda et l'oued Cheref.

- **Zone des affleurements Triasiques**

Ces zones correspondent à des affleurements de marnes, gypses et roches plus résistantes (notamment calcaires et cargneules en blocs). Elles sont très pauvres en eaux souterraines, seuls quelques "blocs" calcaires de grandes dimensions (1 à 2 km<sup>2</sup>) renferment de petites nappes qui donnent naissance à de petites sources.

## 5. Conclusion

Le bassin versant transfrontalier de la Medjerda est situé à l'extrême Nord-Est de l'Algérie, il appartient dans sa totalité dans les limites administrative de la wilaya de Souk Ahras, sa géologie est caractérisée par des formations sédimentaires dont l'âge le plus ancien est le Trias allant jusqu'au Quaternaire, constituée généralement par des calcaires, des grès, des marnes, des cailloutis et des alluvions. Elle représente une zone charnière entre l'Atlas Tellien au Nord et l'Atlas Saharien au Sud.

Les principaux traits structuraux de ce bassin, représentée par le diapirisme, les plissements et la tectonique cassante (failles), s'ajoute une tectonique triasique.

La zone d'étude est formée essentiellement par plusieurs unités hydrogéologiques, la principale se situe dans le synclinal de Taoura, qui se trouve dans les terrains géologiques calcaires du crétacé, qui recèle un potentiel considérable en ressources en eau, et d'autres nappes secondaires de faible potentialité hydrique.

## Chapitre II

# **CADRE MORPHOMETRIQUE ET HYDROGRAPHIQUE DU BASSIN VERSANT DE LA MEDJERDA**

## 1. Caractéristiques physiques

L'objectif de l'étude physique est la détermination des caractéristiques géométriques du bassin versant transfrontalier de la Medjerda. Nous avons utilisé l'outil Système d'information géographique sous ArcGis 10.3 à partir des images satellitaires du USGS avec des coordonnées géographiques WGS 1984, et projetées sur le système métrique en UTM zone 32, pour le calcul automatiquement des paramètres morphométriques et hydrométriques du bassin versant.

La longueur totale de l'Oued Medjerda est de 106.2 km. La Medjerda prend sa source dans la commune de Khemissa située à une altitude d'environ 1317 m, on observe un profil altimétrique raide sur les premiers kilomètres du cours d'eau comme illustré en figure 8.

### 1. 1. Les caractéristiques morphométriques du bassin versant de la Medjerda

#### 1. 1. 1. La Superficie (A)

Le bassin versant étant l'aire de réception des précipitations et d'alimentation des cours d'eau, les débits vont être en partie reliés à sa superficie (Tab. 2). Le bassin versant étudié s'étale sur une superficie totale de 1505.5 Km<sup>2</sup>.

#### 1. 1. 2. Le Périmètre (P)

Le périmètre du bassin est de 243 Km, cette mesure est obtenue sur la carte de la zone d'étude tracée par le logiciel ArcGis 10.3 et représente la ligne de partage des eaux.

#### 1. 1. 3. La courbe Hypsométrique

La courbe hypsométrique exprime la répartition de la surface d'un bassin versant en fonction de l'altitude (Fig. 8), ce qui permet à l'hydrologue d'estimer le comportement hydrologique et hydraulique du bassin et son système de drainage.

#### 1. 1. 4. La forme du bassin

L'indice admis par les hydrologues pour caractériser la forme d'un bassin versant est l'indice de compacité de GRAVELIUS (K<sub>c</sub>) qui est le rapport du périmètre du bassin versant à celui du cercle ayant la même surface.

$$K_c = \frac{0.28 P}{\sqrt{A}} = 1.75$$

**K<sub>c</sub>**: L'indice de Gravelius

**P**: Périmètre (Km)

**A**: Superficie (Km<sup>2</sup>)

Cet indice est proche de 1 pour un bassin versant de forme quasiment circulaire et supérieure à 1 lorsque le bassin est de forme allongée.

Pour le BV de la Medjerda l'indice de compacité est de 1,75, donc il possède une forme très allongée. Un autre facteur de forme est celui de Horton, 1945 :  $R_F$ , représente l'aire (A) du BV par rapport à sa longueur (L) est utilisé pour prédire l'intensité de l'écoulement à l'exutoire d'un BV. Un facteur de forme élevé ( $> 0.5$ ) indique un BV de forme plutôt circulaire.

$$R_F = \frac{A}{L_{BV}^2} = 0.26$$

Avec:

$R_F$ : Facteur de Horton

A: Superficie (Km<sup>2</sup>)

$L_{BV}$ : Longueur du bassin versant (Km)

### 1. 1. 5. Le rectangle équivalent

Le rectangle équivalent se définit comme le rectangle qui a la même surface et le même périmètre que le bassin versant. C'est L. Roche en 1963 qui a fait introduire cette notion pour pouvoir comparer les bassins versants entre eux, du point de vue de l'influence de leurs caractéristiques sur l'écoulement. Le rectangle équivalent est défini comme le rectangle de longueur  $L_e$  et de largeur  $l_e$  qui a la même surface, même périmètre, même indice de compacité et même répartition hypsométrique que le bassin versant.

$$L_e = \frac{K_c \sqrt{A}}{1.12} \left[ 1 + \sqrt{1 - \left( \frac{1.12}{K_c} \right)^2} \right] = 107.2 \text{ Km} \quad \text{avec } K_c \geq 1.12$$

$$l_e = \frac{K_c \sqrt{A}}{1.12} \left[ 1 - \sqrt{1 - \left( \frac{1.12}{K_c} \right)^2} \right] = 14 \text{ Km} \quad \text{avec } K_c \geq 1.12$$

avec:

$L_e$ : Longueur du rectangle équivalent en Km

$l_e$ : Largeur du rectangle équivalent en Km

$K_c$ : L'indice de Gravelius

A: Superficie (Km<sup>2</sup>)

### 1. 2. Le relief

Le relief d'un bassin versant est caractérisé par sa répartition de sa courbe hypsométrique. Cette courbe hypsométrique est tracé graphiquement en reportant en ordonnée les altitudes exprimés en mètres et en abscisse le pourcentage de la surface du bassin, rapportée à la surface totale du bassin. La répartition hypsométrique est donnée par le pourcentage de la surface comprise entre les différentes courbes de niveau à la surface totale. Cette courbe hypsométrique fournit une vue synthétique de la pente du bassin, représente la répartition de la surface du bassin versant en fonction de son altitude (Fig. 8).

Tableau 2: Répartition des superficies en fonction des tranches d'altitude

Tranche d'altitude (m)	La surface partielle $A_i$ (Km <sup>2</sup> )	La surface partielle (%)	La surface cumulée (%)	La surface au limite de l'inférieure (%)	Hauteur moyenne $H_i$ (m)	$\frac{H_i * A_i}{A}$
226- 300	5.21	0.35	0.35	100.0	263	0.9
300 - 400	21.12	1.40	1.75	99.7	350	4.9
400 - 500	59.14	3.93	5.68	98.3	450	17.7
500 - 600	119.47	7.94	13.61	94.3	550	43.6
600 - 700	216.92	14.41	28.02	86.4	650	93.6
700 - 800	322.43	21.42	49.44	72.0	750	160.6
800 - 900	268.75	17.85	67.29	50.6	850	151.7
900 - 1000	156.19	10.37	77.66	32.7	950	98.6
1000 - 1100	214.53	14.25	91.91	22.3	1050	149.6
1100 - 1200	99.53	6.61	98.52	8.1	1150	76.0
1200 - 1300	22.11	1.47	99.99	1.5	1250	18.4
1300 - 1400	0.18	0.01	100.00	0.0	1350	0.2
	<b>1505.5</b>				<b>Hmoy</b>	<b>815.8</b>

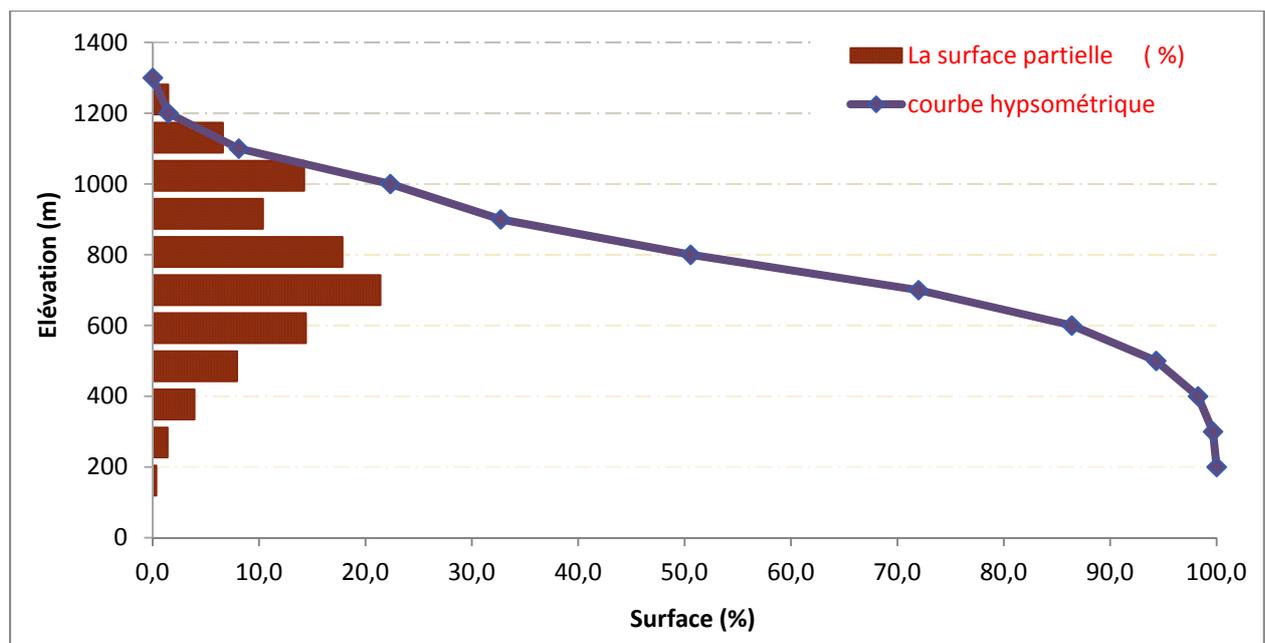


Figure 8: Courbe hypsométrique du bassin versant de l'oued Medjerda

### 1. 2. 1. Les altitudes caractéristiques

#### 1. 2. 1. a. Les altitudes maximale et minimale

Elles sont obtenues directement à partir de cartes topographiques. L'altitude maximale représente le point le plus élevé du bassin tandis que l'altitude minimale considère le point le plus bas, généralement à l'exutoire. Elles déterminent l'amplitude altimétrique du bassin versant et interviennent aussi dans le calcul de la pente.

#### 1. 2. 1. b. L'altitude moyenne

L'altitude moyenne du bassin versant de la Medjerda peut être calculée par la formule suivante:

$$H_{\text{moy}} = \sum \frac{A_i * h_i}{A} = 815.8 \text{ m}$$

Avec :

$H_{\text{moy}}$  : altitude moyenne du bassin (m) ;

$A_i$  : aire comprise entre deux courbes de niveau (km<sup>2</sup>) ;

$h_i$  : altitude moyenne entre deux courbes de niveau (m) ;

$A$  : superficie totale du bassin versant (km<sup>2</sup>).

$$H_{\text{moy}} = 815.8 \text{ m}$$

#### 1. 2. 1. c. L'altitude médiane

L'altitude médiane correspond à l'altitude lue au point d'abscisse 50% de la surface totale du bassin sur la courbe hypsométrique. Pour le bassin de la Medjerda, elle est de 805 m (cf. Fig. 8), cette valeur est très proche à l'altitude moyenne de 815.8 m (Tab. 3).

### 1. 2. 2. L'indice de pente

La pente se définit comme l'inclinaison d'une surface par rapport à l'horizontal

#### 1. 2. 2. a. L'indice de pente global

Sur la courbe hypsométrique on définit la dénivelée

$$D = H5 \% - H95\%$$

Entre la quelle s'inscrit 90 %, de l'aire du bassin;  $L$  étant la longueur du rectangle équivalent. Cet indice, très facile à calculer, est des plus utilisés. Il sert de base à une des classifications O.R.S.T.O.M remplacé par l'IRD (Institut de recherche pour le développement),

L'indice de pente global selon la formule suivante:

$$I_g = \frac{D}{L_e}$$

H5% = 1150 m

H95% = 485 m

Le = 107.2 Km

**I<sub>g</sub> = 6.2 m/km**

### 1. 2. 2. b. L'indice de pente de Roche I<sub>p</sub>

Peut être estimé par la formule suivante :

$$I_p = \frac{1}{\sqrt{L}} \sum \sqrt{A_i (h_i - h_{i-1})}$$

**I<sub>p</sub>**: Indice de pente de ROCHE (m/km)

**L**: longueur du rectangle équivalent (m) ;

**A<sub>i</sub>** : fraction de surface comprise entre les côtes a<sub>i</sub> et a<sub>i-1</sub> (%) ;

**h<sub>i</sub> et h<sub>i-1</sub>** : différence entre les courbes de niveaux i et i-1 (Km).

**Tableau 3 : Indice de pente de ROCHE**

Tranche d'altitude (m)	A (%)	h <sub>i</sub> - h <sub>i-1</sub>	A * (h <sub>i</sub> - h <sub>i-1</sub> )	√A * (h <sub>i</sub> - h <sub>i-1</sub> )
226-300	0.35	74	25.63	5.06
300-400	1.40	100	140.30	11.84
400-500	3.93	100	392.82	19.82
500-600	7.94	100	793.54	28.17
600-700	14.41	100	1440.83	37.96
700-800	21.42	100	2141.68	46.28
800-900	17.85	100	1785.12	42.25
900-1000	10.37	100	1037.47	32.21
1000-1100	14.25	100	1424.97	37.75
1100-1200	6.61	100	661.12	25.71
1200-1300	1.47	100	146.84	12.12
1300 - 1400	0.01	100	1.18	1.09

L = 107.2 km ;

D'où **I<sub>p</sub> = 29 %**.

### 1. 2. 2. c. Dénivelée spécifique

Elle sert à la classification du bassin versant, calculée par la formule suivante:

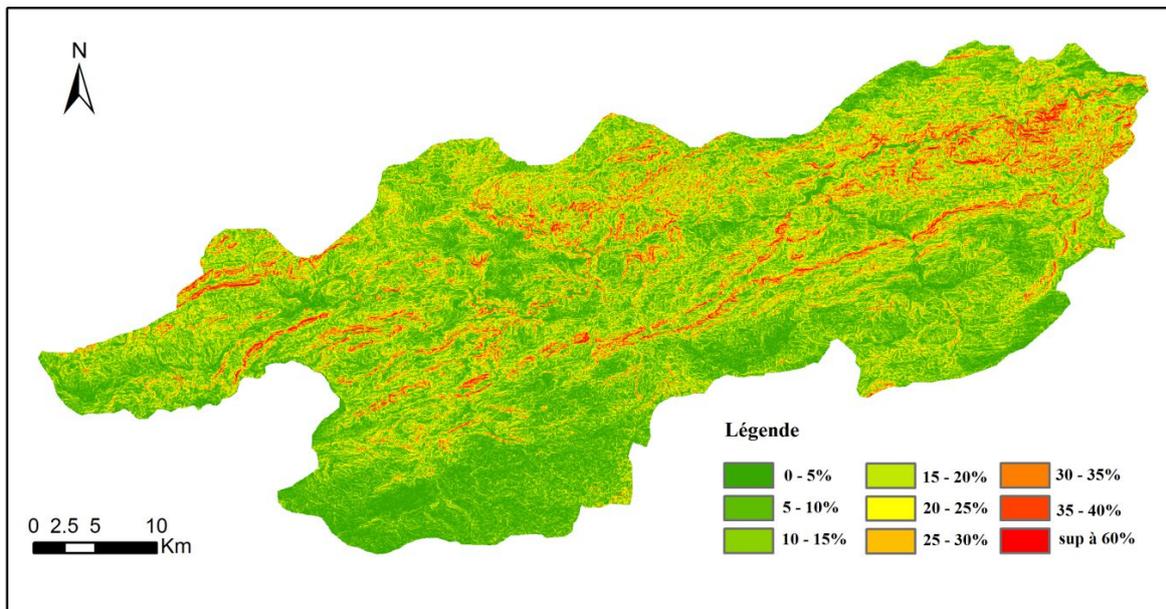
$$D_s = I_g * \sqrt{A}$$

$$D_s = 240.7$$

Selon la Classification de relief selon la méthode de l'ORSTOM à partir du  $D_s$ , le bassin versant de la Medjerda se trouve dans la classe R5, présente un relief assez fort (Tab. 4).

**Tableau 4: Classification de relief selon la méthode de l'ORSTOM à partir du  $D_s$**

Classe	$D_s$	Type de relief
<b>R1</b>	$D_s < 10$ m	Relief très faible
<b>R2</b>	$10 \text{ m} < D_s < 25$ m	Relief faible
<b>R3</b>	$25 \text{ m} < D_s < 50$ m	Relief assez faible
<b>R4</b>	$50 \text{ m} < D_s < 100$ m	Relief modéré
<b>R5</b>	<b><math>100 \text{ m} &lt; D_s &lt; 250</math> m</b>	<b>Relief assez fort</b>
<b>R6</b>	$250 \text{ m} < D_s < 500$ m	Relief fort
<b>R7</b>	$D_s > 500$ m	Relief très fort



**Figure 9: Carte de répartition de pentes du bassin versant de la Medjerda**

### 1. 2. 2. d. Les Classes des pentes

La pente topographique exprime l'inclinaison des versants par rapport à l'horizontal. C'est un facteur essentiel de l'écoulement de l'eau de surface, puisque ce dernier a tendance à avoir plus d'énergie cinétique et vive en présence des fortes pentes et dénivelées (Fig. 9). Et par conséquent, elle assure une réponse hydrologique rapide et une dynamique érosive agressive (Tricart 1957). L'intensité de l'écoulement est fonction de la pente comme suit :

Un écoulement faible : pente inférieure à 10 %, un écoulement fort : pente égale à 10 % et enfin un écoulement très fort : pente supérieur à 20 %.

Dans le bassin de la Medjerda, on a pu faire ressortir sept classes de pente (Tab. 5).

✓ **La classe des pentes (moins de 5 %) :**

Représente 18.1 % du bassin versant de la Medjerda, avec une superficie partielle de cette classe de 272.17 km<sup>2</sup>, caractérise les basses terrasses de l'Oued Medjerda et constitue une surface favorable à l'agriculture et au pâturage.

✓ **La classe des pentes (5 – 10 %) :**

S'étend sur la plus grande surface du bassin versant de la Medjerda au près de 388.64 km<sup>2</sup>, ce qui représente 25.8 % du bassin. Ces surfaces sont utilisées par les agriculteurs surtout celles de céréalicultures extensives.

✓ **La classe des pentes (10 - 15 %) :**

Cette classe occupe une superficie importante de 345.99 km<sup>2</sup> soit 23,0 % de la superficie totale du bassin. Ces pentes s'étendent au niveau des collines et des versants.

✓ **La classe des pentes (15 - 20 %) :**

Occupe une superficie importante de 345.99 km<sup>2</sup> soit 23,1 % de la superficie totale du bassin.

✓ **Les classes des pentes (> 20 %) :**

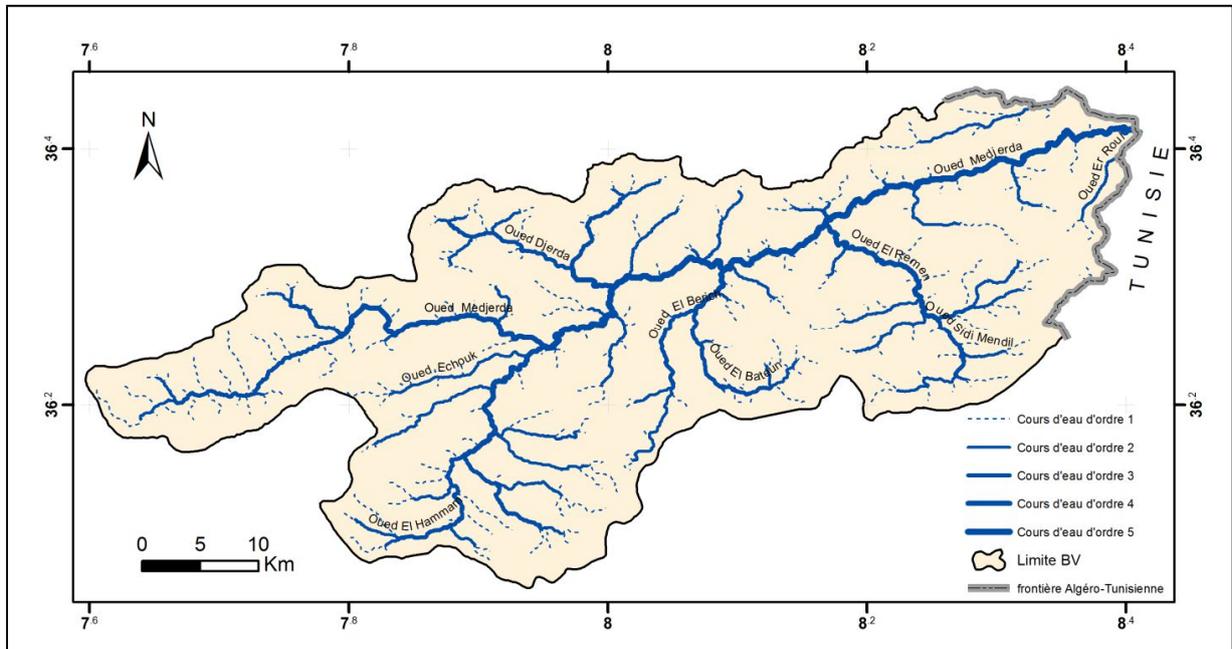
Dans cette catégorie, nous avons la classe entre 20 et 25 % qui représente 16.3% de la surface du bassin versant, et de 9.7% pour la classe de 25 à 30 %, et enfin la classe de pente de plus de 30% avec 1.9% de la surface du BV. La répartition de cette classe de pentes est rencontrée dans les versants des hautes montagnes.

**Tableau 5: Répartition des pentes dans le bassin versant de la Medjerda**

Classe de Pente (%)	La surface partielle (Km <sup>2</sup> )	La surface (%)	La surface cumulée (%)
0 _ 5	272.17	<u>18.1</u>	18.1
<u>5</u> _ 10	<u>388.64</u>	<u>25.8</u>	43.9
10 _ 15	345.99	<u>23.0</u>	66.9
15 _ 20	244.92	<u>16.3</u>	83.1
20 _ 25	146.71	9.7	92.9
25 _ 30	78.81	5.2	98.1
30 et plus	28.30	1.9	100

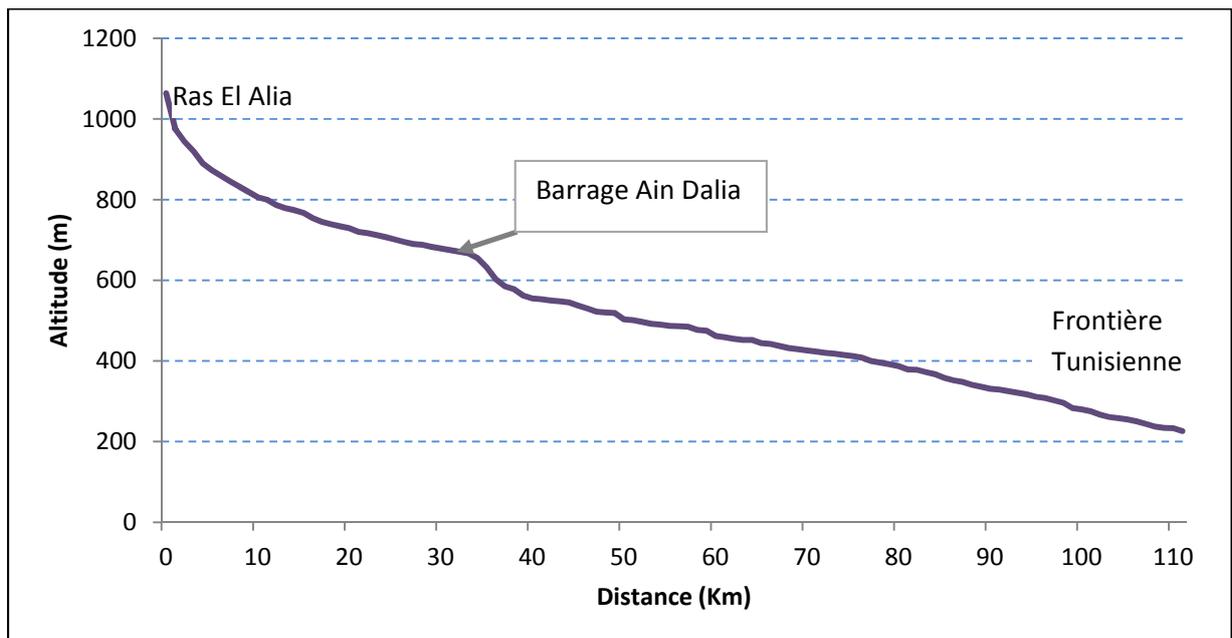
## 2. Le réseau hydrographique

Le réseau hydrographique est constitué de l'ensemble de chenaux qui drainent les eaux de surface vers un exutoire. Dans le cas de notre étude, la ramification du réseau a été ordonnée suivant l'ordre de Strahler (Fig. 10).



**Figure 10: Réseau hydrographique de l'oued Medjerda**

Le profil longitudinal de notre bassin d'étude est schématisé sur le graphique (Fig.11) ci-dessous.



**Figure 11: Profil longitudinal de la Medjerda**

## 2. 1. Les principaux affluents de l'oued Medjerda

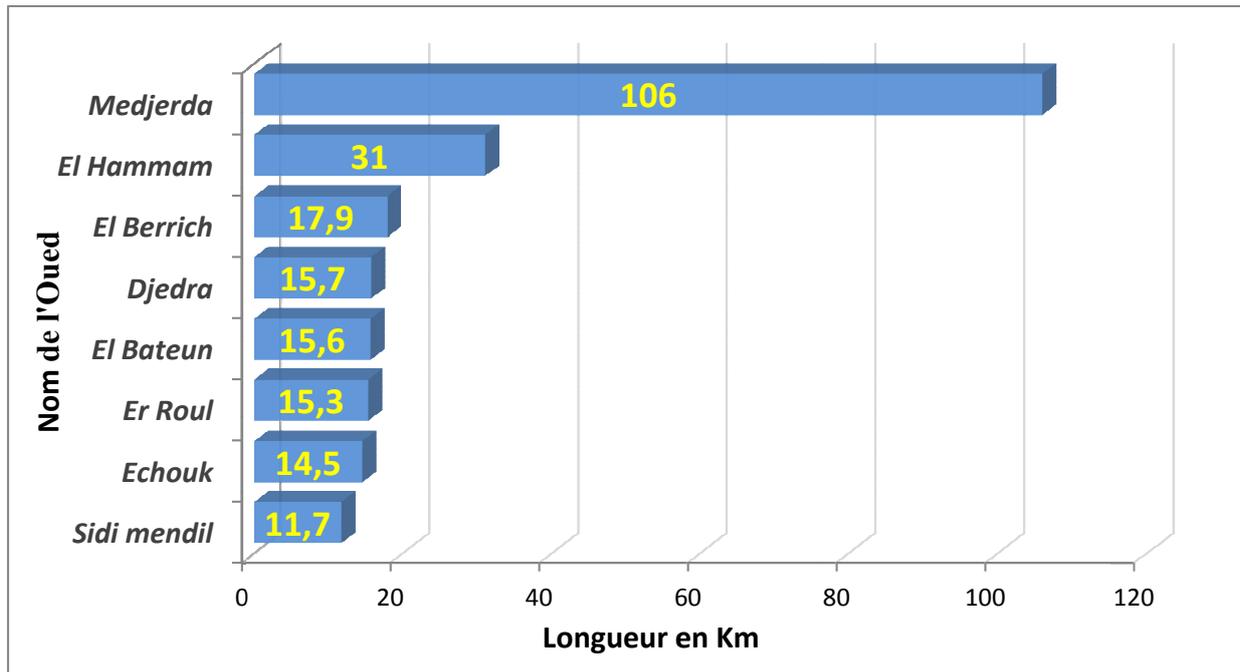


Figure 12 : Principaux affluents de l'oued Medjerda

## 2. 2. Le temps de concentration

Le temps de concentration  $T_c$  des eaux sur un bassin versant est un paramètre caractéristique important, se définit comme le maximum de durée nécessaire à une goutte d'eau pour parcourir le chemin hydrologique entre un point du bassin et l'exutoire de ce dernier.

Le  $T_c$  est déterminé par la relation de GIANDOTTI,

$$T_c = \frac{4\sqrt{A} + 1.5 L_p}{0.8\sqrt{H_{moy} - H_{min}}} T_c = 21h 10 min$$

Avec;

$L_p$  : La longueur en Km du Talweg principal,

$H_{moy}$  et  $H_{min}$ : sont respectivement les altitudes moyennes et minimales du B.V en (m)

## 2. 3. La densité de drainage

La densité de drainage est le rapport de la longueur totale des canaux d'écoulement à la superficie du bassin versant. Elle reflète la dynamique du bassin.

$$D_d = \frac{\sum L_i}{A} = 0.55 \text{ Km/ Km}^2$$

Le réseau hydrographique de la Medjerda a une longueur totale ( $\sum L_i$ ) de 825 Km, la densité de drainage est de l'ordre de 0,55 km/ km<sup>2</sup>.

### 3. Récapitulation des caractéristiques physiographiques du bassin versant de Medjerda

Toutes les caractéristiques hydrographiques du bassin versant de la Medjerda sont reprises dans le tableau récapitulatif suivant (Tab. 6).

**Tableau 6: Caractéristiques morphométriques du bassin versant de Medjerda**

Paramètres	Unités	Valeurs
<b>Superficie</b>	km <sup>2</sup>	1505.5
<b>Périmètre</b>	km	243
<b>Indice de Gravélius</b>	--	1.75
<b>Rectangle équivalent</b>	<b>Longueur</b>	km
	<b>Largeur</b>	km
<b>Altitude maximale</b>	m	1361
<b>Altitude minimale</b>	m	226
<b>Hauteur 5%</b>	m	1150
<b>Hauteur 95%</b>	m	226
<b>Hauteur moyenne</b>	m	815.8
<b>Hauteur médiane</b>	m	805
<b>Indice global de pente</b>	m/Km	6.2
<b>Dénivelé spécifique</b>	-	240.7
<b>Longueur du thalweg</b>	km	106
<b>Temps de concentration</b>	h	<b>21.10</b>

### 4. Conclusion:

L'étude morphométrique a mis en évidence l'appartenance du bassin versant transfrontalier de la Medjerda à un milieu de montagne du l'atlas tellien. Il est caractérisé par une forme allongée, ce qui fait que les eaux précipitées mettent du temps pour atteindre l'exutoire, ceci est confirmé par le résultat du temps de concentration qui est de 21h10' et la densité de drainage moyenne de l'ordre de 0,55 km/km<sup>2</sup>. Ce bassin est encadré par un relief accidenté, avec la dominance des classes altimétriques de 600 à 900 m et d'une altitude moyenne considérable  $H_{moy} = 815.8$  m. Le relief du bassin est qualifié assez fort, selon les valeurs de l'indice de pente globale ( $I_p = 6.2$  m/km) et de la dénivelée spécifique ( $D_s = 240.7$  m/km), plus de 65% de la superficie du bassin ont des pentes entre 5 et 20%.

## Chapitre III

# HYDROCLIMATOLOGIE

## 1. Introduction

Dans cette partie, nous nous sommes intéressés aux principaux facteurs indispensables à l'établissement du bilan hydrique, tels que les précipitations, la température et l'évapotranspiration, qui permettent d'expliquer les variations des composantes du régime hydrologique et de déterminer le type de climat qui caractérise la région d'étude.

## 2. Les stations de mesure :

La Wilaya de Souk Ahras comporte quatre stations météorologiques. Pour notre région d'étude on s'est basé sur les données de deux stations celle de Souk Ahras et celle du barrage Ain dalia (Tab. 7). Ces deux stations sont toujours fonctionnelles et se trouvent à l'intérieur du bassin versant de la Medjerda, la zone d'étude.

- La station de Souk Ahras, dispose d'une série d'observation complète de 28 ans (1986 – 2013).
- La station du barrage d'Ain Dalia, totalise une série d'observation de 26 ans (1990 – 2018).

**Tableau 7:Caractéristiques géographiques des stations météorologiques de la région**

Nom de la Station	Code ANRH	Coordonnées					Période d'observation
		WGS 1984 (DM)		Lambert (Km)			
		Longitude	Latitude	X (Km)	Y (Km)	Z (m)	
<b>Souk Ahras</b>	12.01.01	7°58'E	36°17'N	967,25	342,25	880	1986 – 2013
<b>Ain Dalia</b>	12.01.01	7°52'E	36°15'N	953,30	340,40	670	1990 – 2018

## 3. Les facteurs climatiques

### 3. 1. Les précipitations

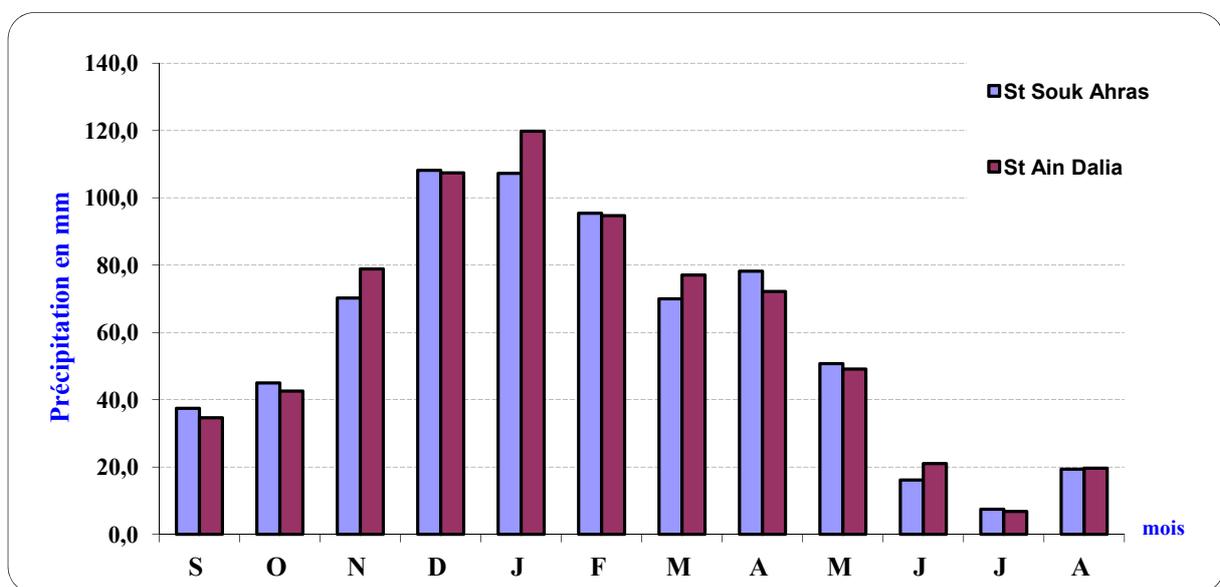
La précipitation est un facteur fondamental pour caractériser le climat d'une région. Elle joue un rôle primordial dans l'alimentation des nappes aquifères et aussi dans le comportement hydrologique des cours d'eau.

#### 3. 1. 1. Précipitations mensuelles

Les hauteurs des pluies enregistrées dans les stations : Souk Ahras et Ain Dalia sont illustrées dans le tableau (Tab. 8).

**Tableau 8: Hauteurs moyennes mensuelles des précipitations en mm**

Mois / Station	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Aout	Total mm/an
<b>Souk Ahras</b>	37.5	45.0	70.2	108.2	107.3	95.4	70.0	78.2	50.8	16.1	7.5	19.4	<b>705.4</b>
<b>Ain Dalia</b>	34.7	42.6	78.9	107.4	119.8	94.7	77.0	72.2	49.1	21.0	6.8	19.7	<b>723.9</b>

**Figure 13 : Histogramme des précipitations moyennes mensuelles**

Le tableau 8 et la figure 13 montrent que les valeurs des précipitations mensuelles sont très proches au niveau des deux stations météorologiques de Souk Ahras et celle d'Ain Dalia, avec des pics de 107.3 mm et de 119.8 mm respectivement au mois de Janvier et atteints son minimum de 7.5 mm et 6.8 mm respectivement au mois de Juillet.

### 3. 1. 2. Précipitations annuelles

La pluviométrie moyenne annuelle enregistrée sur cette période est de 705.4 mm au niveau de la station de Souk Ahras et 723.9 mm au niveau de la station d'Ain Dalia, toutefois, la pluviométrie annuelle est très variable d'une année à l'autre. Cette variabilité interannuelle des précipitations est également caractéristique du climat méditerranéen (Fig. 14 et 15).

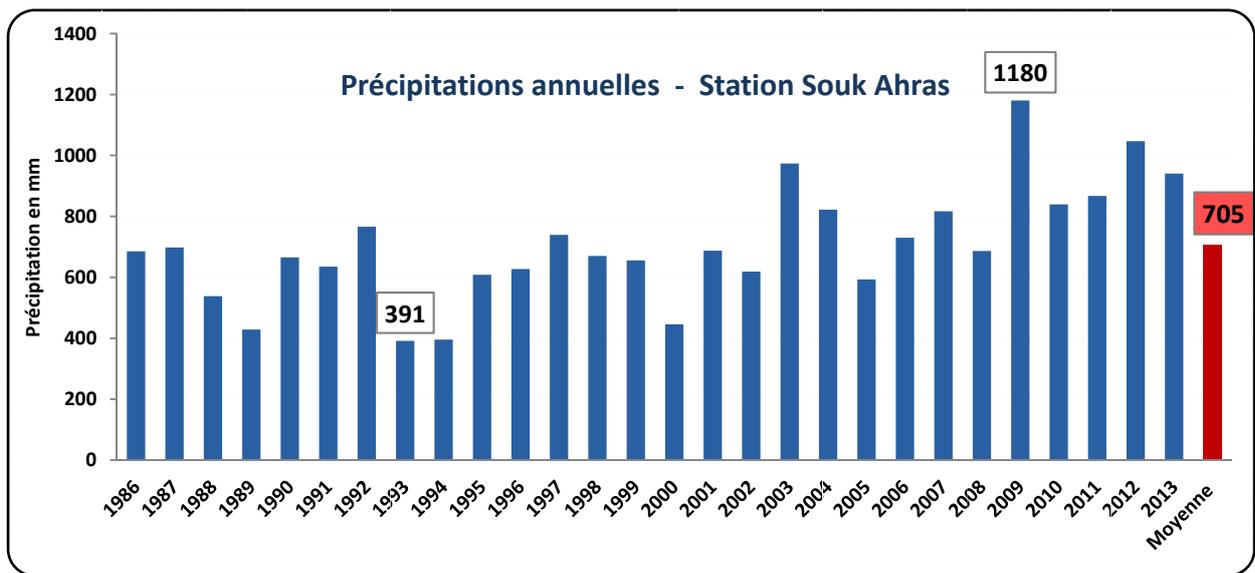


Figure 14 : Les précipitations annuelles - Station Souk Ahras

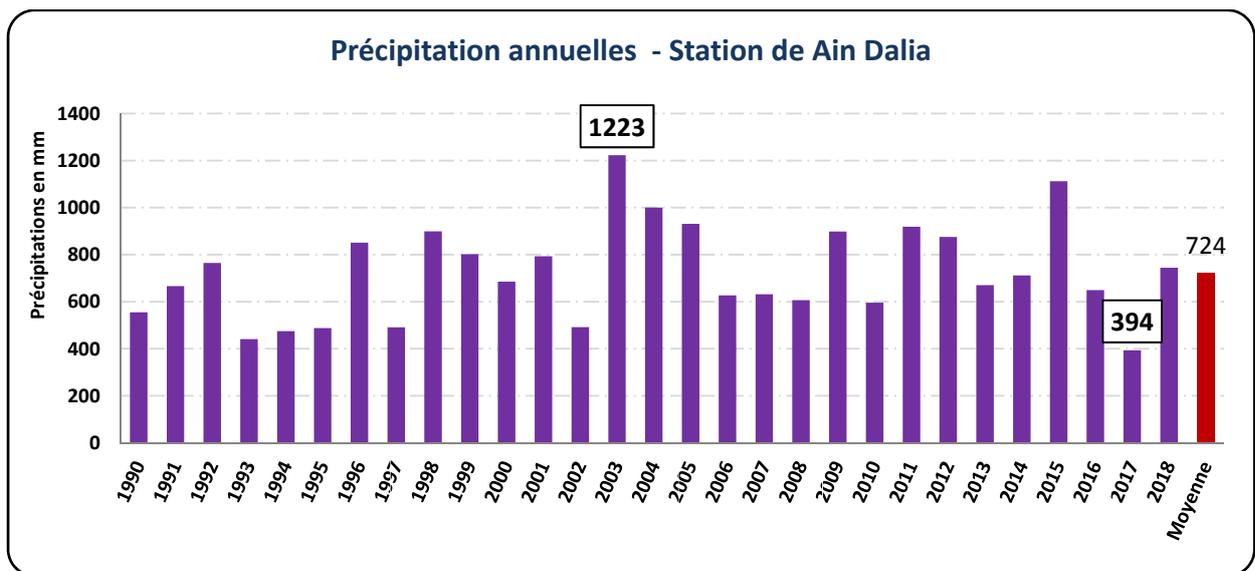


Figure 15 : Les précipitations annuelles - Station Ain Dalia

### 3. 1. 2. a. Les irrégularités interannuelles des précipitations annuelles

Les irrégularités interannuelles des précipitations sont traduites par le coefficient de variation (cv) égale au rapport de l'écart type à la moyenne.

Les pluviométries maximales ont été observées en 2008/2009 à la station de Souk Ahras et en 2002/2003 à celle d'Ain Dalia. La pluviométrie minimale a été enregistrée en 1992/1993 à la station de Souk Ahras et en 2016/2017 à celle d'Ain Dalia (Tab. 9).

Tableau 9 : Précipitations annuelles et leurs variabilités

Station P (mm)	St. Souk Ahras	St. Ain Dalia
<b>Max</b>	1180.4	<b>1222.9</b>
<b>Année</b>	2008-09	<b>2002-03</b>
<b>Min</b>	391.2	<b>393.8</b>
<b>Année</b>	<u>1992-93</u>	<u><b>2016-17</b></u>
<b>Moyenne (<math>\mu</math>)</b>	705.4	<b>723.9</b>
<b>Ecart type (<math>\sigma</math>)</b>	188,4	<b>204.8</b>
<b>n</b>	28	<b>29</b>
<b>Coefficient de variation (Cv)</b>	<b>0,16</b>	<b>0,17</b>

Avec :

$$cv = \frac{\sigma P}{\bar{P}}$$

$$\sigma P : \text{Ecart type} = \sqrt{\frac{\sum (P_i - \bar{P})^2}{n}}$$

$$\bar{P} : \text{la moyenne} = \frac{\sum P_i}{n}$$

**n**: taille de l'échantillon

Les coefficients de variations varient peu d'une station à l'autre, ils sont compris entre 0.16 et 0.17, ce qui se traduit par une certaine régularité de la distribution des précipitations moyennes annuelles tant au niveau spatial que temporel

### 3. 1. 2. b. Calcul de la lame d'eau moyenne annuelle précipitée à l'échelle spatiale

En climat méditerranéen, la moyenne pluviométrique ne reflète pas la réalité climatique, pourtant sa détermination demeure nécessaire pour l'étude de l'abondance fluviale et permet de cerner la variabilité des précipitations sur de longues séries d'observations (Daifallah, 2017).

Deux méthodes ont été utilisées pour le calcul de la lame d'eau précipitée sur le bassin de la Medjerda.

#### 3. 1. 2. b. i. La méthode arithmétique

$$\bar{P} = \frac{\sum P_i}{n}, \quad \bar{P} = 714.7 \text{ mm}$$

**P** : La lame d'eau moyenne précipitée pour l'ensemble du bassin est égale à :

**P<sub>i</sub>** : Précipitation annuelle moyenne à chaque station pluviométrique en mm;

**n** : nombre de station.

**3. 1. 2. b. ii. La méthode de Polygones de Thiessen**

C'est une méthode géométrique qui consiste à attribuer à chaque pluviomètre une zone d'influence (fig. 16), la hauteur des précipitations recherchée sur le bassin est égale à :

$$\bar{P} = \frac{\sum(\bar{P}_i * A_i)}{A} \quad , \quad \bar{P} = 711.9 \text{ mm}$$

$\bar{P}$  : Lamme d'eau annuelle moyenne précipitée en mm ;

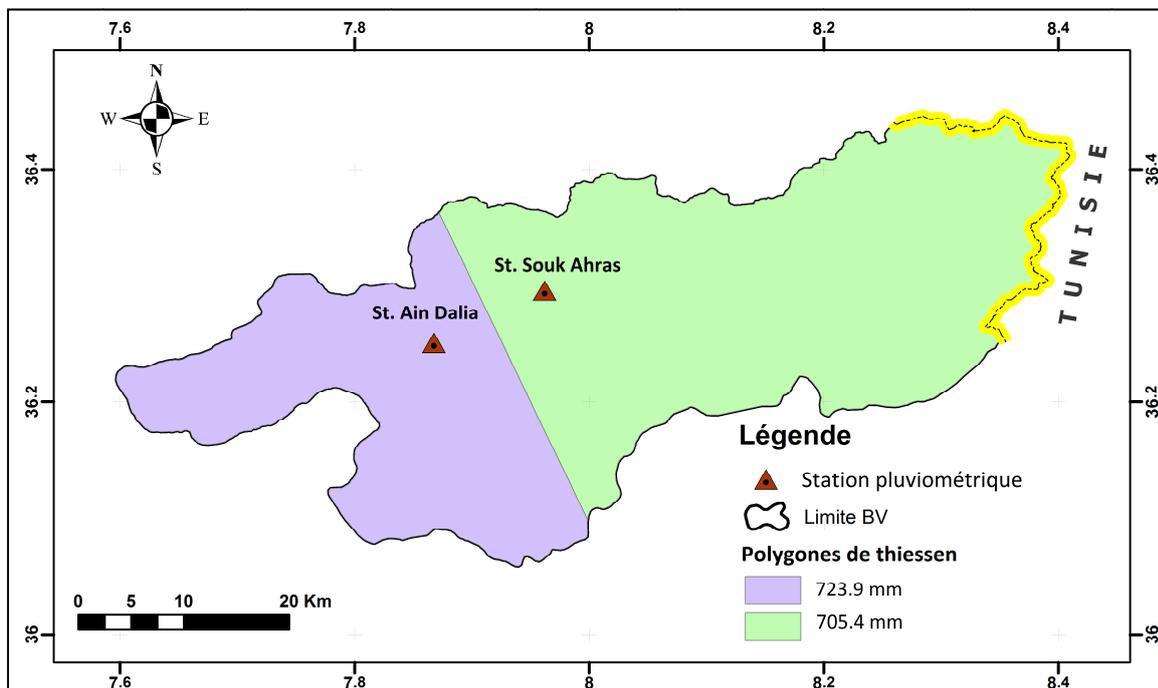
$\bar{P}_i$  : Précipitation moyenne annuelle pour chaque poste pluviométrique en mm;

$A$  : Surface planimétrie de polygone considéré en Km<sup>2</sup>;

$A$  : Surface totale du bassin en Km<sup>2</sup>.

**Tableau 10 : la lame d'eau calculée**

Station	Polygone	Pi (mm)	Ai (km <sup>2</sup> )	Pi*Ai (mm.km <sup>2</sup> )
Souk Ahras	1	705.4	976.5	688823.10
Ain Dalia	2	723.9	529.1	383015.49
<b>Total</b>			<b>1505.5</b>	<b>1071838.59</b>



**Figure 16: Polygones de Thiessen du bassin versant de la Medjerda**

Les résultats de calcul de la moyenne pondérée par la méthode de Thiessen, P = 711.9 mm et la moyenne arithmétique de 714.7mm. Les deux valeurs de la lame d'eau moyenne précipitée sur l'ensemble du bassin sont très proches, toutefois, nous avons adopté la première parce que elle est la plus fiable.

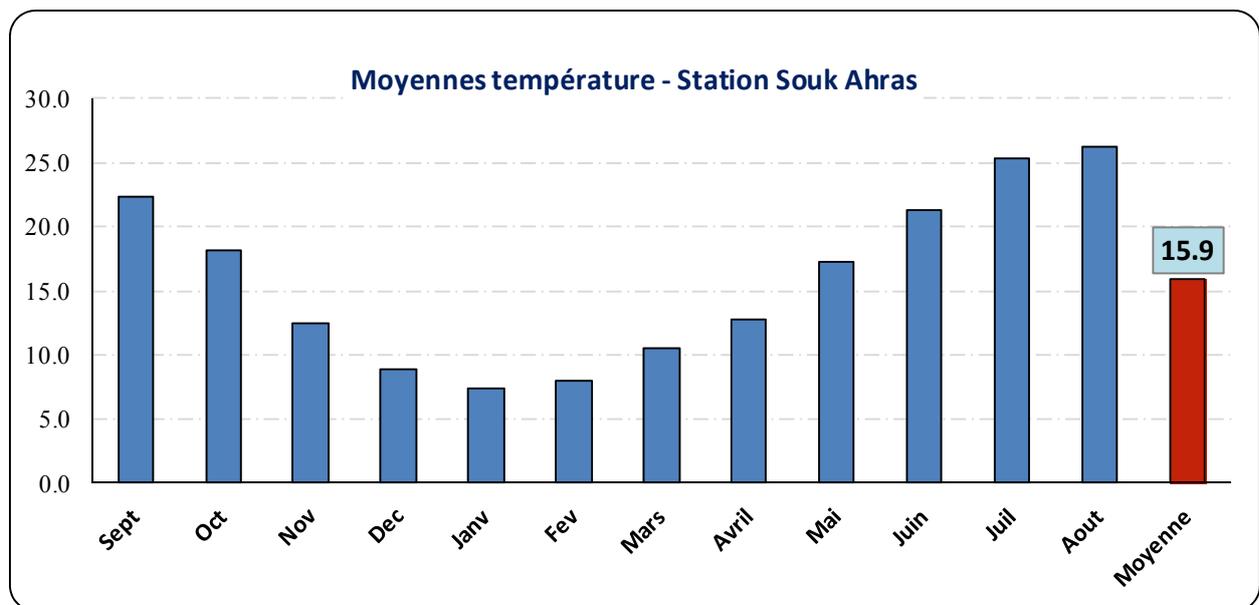
### 3. 2. La température

La température est un facteur important régissant le phénomène de l'évapotranspiration et donc le déficit de l'écoulement annuel et saisonnier, elle intervient dans le développement du rythme biologique des végétaux, et elle facilite l'établissement du bilan hydrique.

Les données de températures disponibles sont des valeurs moyennes mensuelles observées au niveau des deux stations.

**Tableau 11: Températures moyennes mensuelles (°C): Station de Souk Ahras (1986 – 2013)**

Mois	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Moy./an (° C)
<b>St. Souk Ahras</b>	22.4	18.1	12.5	8.8	7.4	7.9	10.6	12.7	17.3	21.3	25.3	26.2	15.9



**Figure 17: Températures moyennes mensuelles en °C à la Station de Souk Ahras**

La consultation du tableau 11 et la figure 17 des températures moyennes mensuelles pour une période de 28 ans (1986-2013) pour la station météorologique de Souk Ahras, on peut distinguer deux saisons : une froide, qui s'étale du mois de Novembre au mois d'avril, où la température moyenne mensuelle la plus basse est celle du mois de janvier (7.4 °C), et l'autre chaude à partir du mois de mai jusqu'au mois d'octobre avec une températures moyenne mensuelle la plus élevé est celle du mois d'Aout (26.2 °C).

Tableau 12 : Températures moyennes mensuelles (°C): Station d'Ain Dalia (1990 – 2015)

Mois	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Moy./an (°C)
<b>St.Ain Dalia</b>	21.0	18.4	14.6	12.6	11.9	12.6	14.3	15.8	18.3	21.6	24.7	24.7	17.5

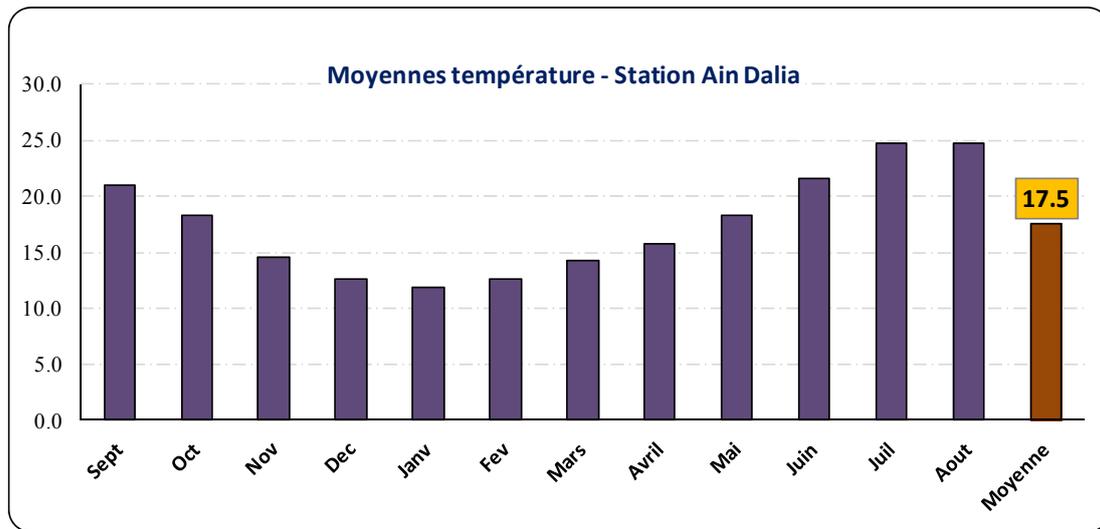


Figure 18 : Températures moyennes mensuelles en °C à la Station de Ain Dalia

D'après les températures moyennes mensuelles pour une période de 26 ans (1990-2015) pour la station météorologique d'Ain Dalia, récapitulés dans le tableau 12 et la figure 18, on peut distinguer deux saisons : une froide, qui s'étale du mois de Novembre au mois d'avril, avec une température moyenne mensuelle la plus basse est celle du mois de janvier (11.9 °C), et l'autre chaude à partir du mois de mai jusqu'au mois d'octobre avec une températures moyenne mensuelle la plus élevée est celle du mois d'Aout (24.7 °C).

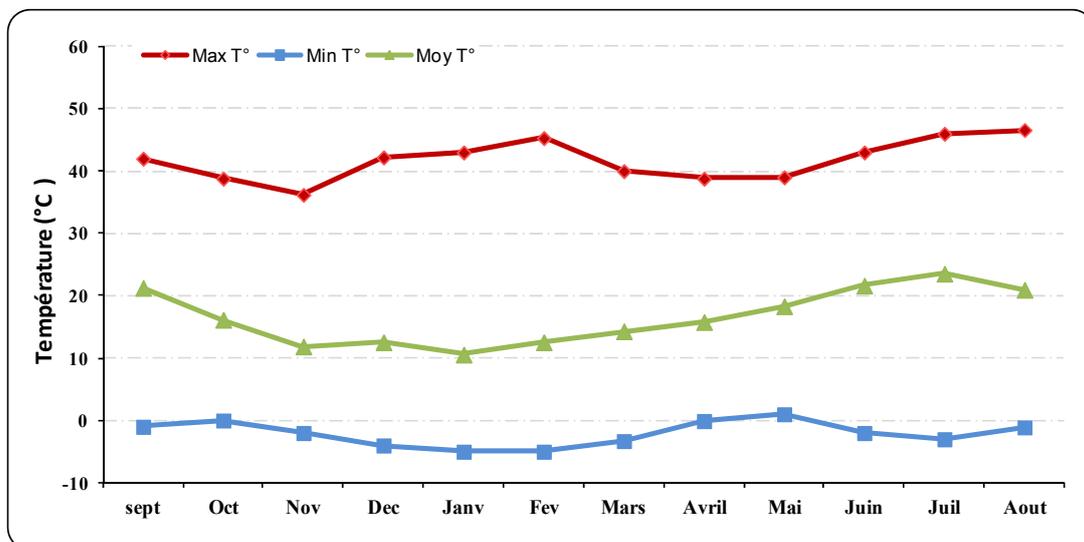


Figure 19 : Variation des valeurs (Max\_Min\_Moy) mensuelles en °C à la Station d'Ain Dalia

A l'échelle annuelle, les variations sont peu importantes (en moyenne de 5°C d'écart) à l'échelle de la période considérée (Fig. 19).

### 3.3. Le vent :

Le vent est la conséquence du déplacement de l'air. C'est la résultante des forces de pression. Il est caractérisé par sa vitesse (m/s) et sa direction ou provenance indiquée en degré par rapport au Nord (Lebourgeois, 2010).

Le vent souffle d'une façon générale du Nord au Sud en hiver et du Sud au Nord en été. Mais ils peuvent prendre plusieurs directions durant la journée. On peut noter de rares directions du vent du Nord vers Sud le matin et vers le Nord-Est le soir avec des vitesses sous-mentionnés (Tab. 13), selon B.N.E.D.E.R (2011).

**Tableau 13: Relevés mensuelles du vent, (2003 -2013), Station de Souk Ahras**

Mois	Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
<b>V (moy)</b>	2.8	2.7	3.3	3.6	3.4	3.9	3.8	3.7	3	3.1	3.1	2.8
<b>V (max)</b>	32	30	37	34	32	37	30	34	27	35	31	34

(V moy) : vitesse moyenne du vent; V (max) : vitesse maximale; L'unité en m/s

### 3.4. L'humidité relative de l'air

L'humidité relative de l'air correspond au rapport de la tension de vapeur réelle observée à la tension de vapeur saturante à la même température.

**Tableau 14: L'humidité relative moyenne mensuelle (2003 -2013), Station de Souk Ahras**

Mois	Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Moy.
<b>Humidité (%)</b>	77.8	67.9	67.3	72	67.3	58.6	51.4	52.5	63	67.9	73.3	78.4	66.5

Le lecture du tableau 14, montre que la variation l'humidité relative moyenne mensuelle au cours de l'année est significative, avec un maximum de 78,4 % au mois de Décembre et un minimum de 51,4 % au mois de Juillet.

## 4. Les indices climatiques

### 4.1. Indice de De Martonne

De Martonne a défini comme fonction climatologique l'indice d'aridité du climat par le quotient:

$$\mathbf{IM} = \frac{\mathbf{P}}{\mathbf{T+10}}$$

Cet indice permet de caractériser le pouvoir évaporant de l'air à partir de la température.

**IM** : indice d'aridité annuelle.

**P** : précipitations moyennes annuelles en mm.

**T** : températures moyennes annuelles en °C.

L'aridité augmente quand la valeur de l'indice IM diminue. Une faible aridité correspondant à des pluies abondantes et/ou des températures basses. De Martonne a proposé six grands types de climats selon les valeurs de l'indice annuel.

- Si  $IM < 5$  : climat hyperaride.
- Si  $5 < IM < 7,5$  : climat désertique.
- Si  $7,5 < IM < 10$  : climat steppique.
- Si  $10 < IM < 20$  : climat semi-aride.
- Si  $20 < IM < 30$  : climat tempéré.
- Si  $IM > 30$  : climat Humide (écoulement abondant).

Nous avons appliqué cette formule pour les paramètres des deux stations :

- La station de Souk Ahars, avec  $P = 705.4$  mm, et  $T = 15.9$  °C.
- La station de Ain Dalia avec  $P = 723.9$  mm, et  $T = 17.5$  °C.

Les résultats de l'application de la formule de De Martonne sont récapitulés dans le tableau 15.

**Tableau 15: Valeurs de l'indice d'aridité IM de De Martonne.**

Station	P (mm)	T°C	IM (de Martonne)	Type de climat
Station de Souk Ahars	705.4	15.9	<b>27.2</b>	Tempéré
Station d'Ain Dalia	723.9	17.5	<b>26.3</b>	Tempéré

Les résultats de l'indice d'aridité annuel obtenus dans le (tab. 15) montrent que la zone d'étude est soumise à un climat tempéré.

#### 4.2. Indice d'aridité mensuel:

L'indice d'aridité mensuel est défini par la relation suivante :

$$I = 12 P / T^{\circ} + 10$$

**I** : Indice d'aridité mensuel

**P** : Précipitations moyennes mensuelles en mm

**T°** : Température moyenne mensuelle en °C.

L'application de la formule ci-dessus a permis de dresser les tableaux 16 et 17.

**Tableau 16: Indices d'aridité mensuels (I) à la station de Souk Ahras.**

Mois	I	Etage bioclimatique
Septembre	13.9	semi-aride
Octobre	19.2	semi-aride
Novembre	37.4	Humide
Décembre	68.9	Humide
Janvier	74.1	Humide
Février	63.8	Humide
Mars	40.9	Humide
Avril	41.3	Humide
Mai	22.3	tempéré
Juin	6.2	Désertique
Juillet	2.5	hyperaride
Aout	6.4	Désertique

**Tableau 17: Indices d'aridité mensuels (I) à la station de Ain Dalia**

Mois	I	Etage bioclimatique
Septembre	13.4	semi-aride
Octobre	18.0	semi-aride
Novembre	38.5	Humide
Décembre	57.2	Humide
Janvier	65.6	Humide
Février	50.4	Humide
Mars	38.0	Humide
Avril	33.6	Humide
Mai	20.8	tempéré
Juin	8.0	Steppique
Juillet	2.4	hyperaride
Aout	6.8	Désertique

Selon la classification précédente de **De Martonne**, et au niveau des deux stations, le mois de Mai est soumis à un climat tempéré, les mois de décembre, janvier, février, mars et avril le climat devient humide. La période de sécheresse commence à partir du mois de juin, où on enregistre les climats désertique, steppique et hyperaride et ce jusqu'au mois d'Août, les mois de septembre et octobre sont caractérisés par un climat semi-aride.

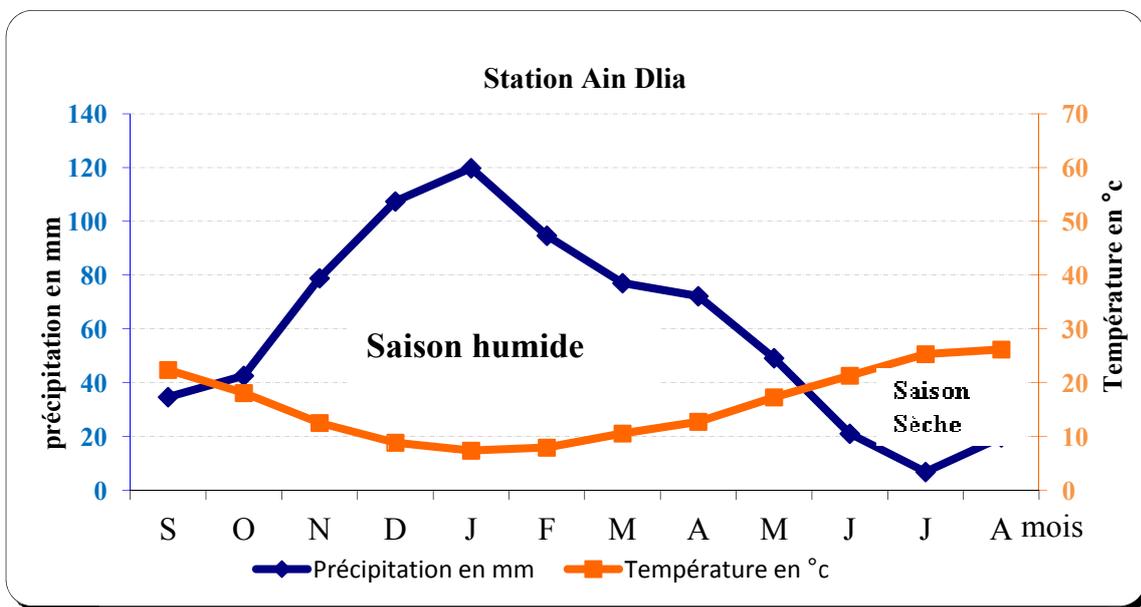
**4. 3. Diagramme ombrothermique :**

Le diagramme ombrothermique est une représentation graphique des températures en °C et quantités de précipitations moyennes mensuelles (mm) en un lieu donné où :  $P = 2T$

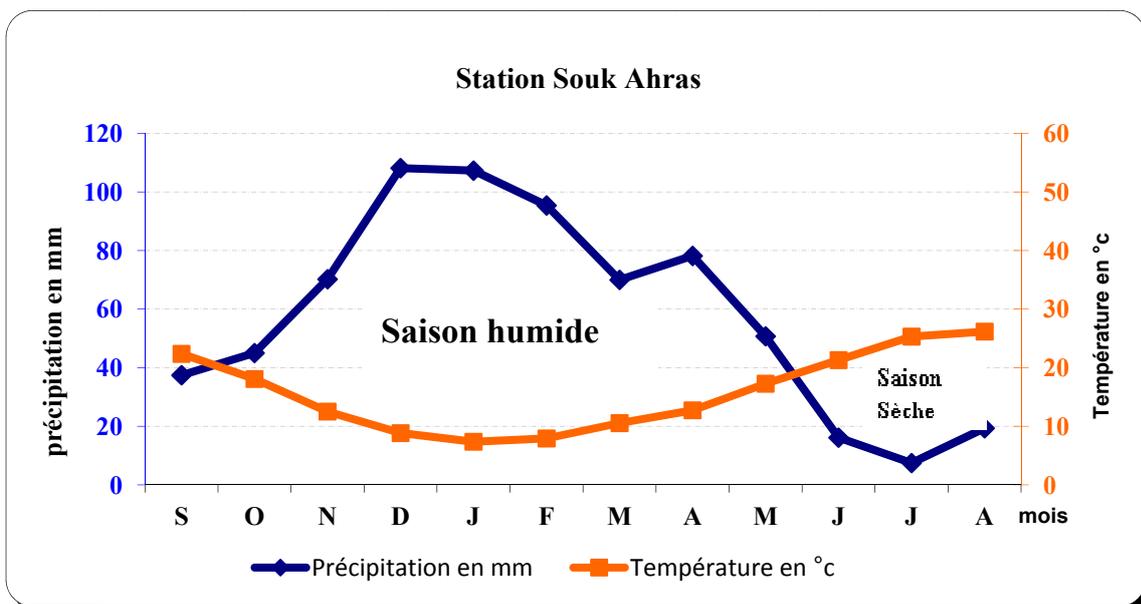
L'intérêt du diagramme ombrothermique est qu'il permet d'un seul coup d'œil de caractériser un climat.

D'après les diagrammes dans les figures 20 et 21, deux saisons bien distinctes peuvent être déterminées :

- Une saison sèche : qui s'étend du mois de Juin jusqu'au mois de Septembre.
- Une saison humide : qui s'étale du mois d'octobre jusqu'au mois de Mai.



**Figure 20: Diagramme Ombrothermique : Station de Ain Dalia**



**Figure 21: Diagramme Ombrothermique : Station de Souk Ahras**

#### 4. 4. L'évapotranspiration

L'évapotranspiration (ET) concerne l'ensemble des processus renvoyant dans l'atmosphère sous forme gazeuse une partie des précipitations (forme liquide). Ce phénomène combine les pertes en eau par évaporation directe d'eau liquide (eau libre ou eau du sol dans les 15 premiers cm environ) et par transpiration de la biomasse. L'évapotranspiration s'exprime en mm d'eau pour une période donnée et peut intervenir à tout moment du cycle de l'eau à condition qu'il y ait assez d'eau à évapotranspirer et une énergie suffisante (Lebourgeois, 2010).

L'évapotranspiration se distingue par:

- L'évapotranspiration potentielle (ETP).
- L'évapotranspiration réelle (ETR).

##### 4. 4. 1. L'évapotranspiration potentielle (ETP)

Thornthwaite, en 1948 est le premier à introduire le concept d'évapotranspiration potentielle, dans un contexte de classification du climat : « Il y a une distinction entre le volume d'eau qui est effectivement évapotranspiré et celui qui pourrait être évapotranspiré, s'il était disponible. Lorsque la disponibilité en eau augmente, l'évapotranspiration atteint un maximum qui dépend uniquement du climat. C'est ce que nous pourrions appeler évapotranspiration potentielle (Ludovic, 2004).

##### 4. 4. 1. a. L'estimation de l'évapotranspiration potentielle (ETP)

Pour l'estimation de l'évapotranspiration potentielle on a utilisé la formule de « *Thornthwaite* ».

##### - Formule empirique de Thornthwaite

C.W.Thornthwaite a établi une correction entre la température moyenne mensuelle et l'évapotranspiration mensuelle, cet auteur définit d'abord un indice thermique mensuel (i), où :

$$i = \left[ \frac{T}{5} \right]^{1.5} \quad ; \quad I = \sum_1^{12} i \quad ; \quad a = \left( \frac{1.6}{100} \right) I + 0.5$$

$$ETP = 16 \left( \frac{10 T}{I} \right)^a k$$

Avec :

- **ETP** : Evapotranspiration potentielle en mm.
- **T** : Température moyenne mensuelle en °C.
- **i** : Indice thermique mensuel.
- **I** : Indice thermique annuel.
- **K** : Coefficient d'ajustement
- **a**: exposant climatique.

L'application de la formule de C.W.Thornthwaite sur les deux stations, nous a permis de dresser les tableaux suivants:

**Tableau 18: Les valeurs de l'ETP selon la formule de Thornthwaite, St. de Souk Ahras**

Mois	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Aout	Annuel
T °C	22.4	18.1	12.5	8.8	7.4	7.9	10.6	12.7	17.3	21.3	25.3	26.2	
i	9.5	6.9	4.0	2.4	1.8	2.0	3.1	4.1	6.4	8.8	11.4	12.0	<b>72.2</b>
k	1.05	0.91	0.75	0.70	0.73	0.78	1.02	1.15	1.32	1.33	1.33	1.24	<b>12.31</b>
ETP (mm)	<b>109.2</b>	<b>66.6</b>	<b>29.9</b>	<b>15.7</b>	<b>12.1</b>	<b>14.6</b>	<b>30.6</b>	<b>47.1</b>	<b>89.5</b>	<b>127.7</b>	<b>169.8</b>	<b>167.2</b>	<b>879.9</b>

D'après les données de la station de Souk Ahras : **I = 72.2** et **a =1.65**.

**Tableau 19: Les valeurs de l'ETP selon la formule de Thornthwaite, St. de Ain Dalia**

Mois	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Aout	Annuel
T °C	21.0	18.4	14.6	12.6	11.9	12.6	14.3	15.8	18.3	21.6	24.7	24.7	
i	8.6	7.0	5.0	4.0	3.7	4.0	4.8	5.6	7.0	9.0	11.0	11.0	<b>80.7</b>
k	1.1	0.9	0.8	0.7	0.7	0.8	1.0	1.2	1.3	1.3	1.3	1.2	<b>12.31</b>
ETP (mm)	<b>93.0</b>	<b>63.4</b>	<b>34.6</b>	<b>24.7</b>	<b>23.5</b>	<b>27.5</b>	<b>45.5</b>	<b>61.2</b>	<b>91.8</b>	<b>124.4</b>	<b>158.4</b>	<b>147.3</b>	<b>895.4</b>

D'après les données de la station de Ain Dalia: **I = 80.7** et **a =1.79**.

#### 4. 4. 2. L'évapotranspiration réelle (ETR)

Par définition, on appelle évapotranspiration réelle effective actuelle ou encore déficit d'écoulement (ETR) la somme de l'évaporation et de la transpiration réelle pour une surface donnée et une période définie.

Lorsque les précipitations moyennes mensuelles (P) sont supérieures à l'évapotranspiration potentielle; l'évapotranspiration réelle est égale à l'évapotranspiration potentielle  $ETR=ETP$ , et lorsque le volume des précipitations mensuelles est inférieur à l'ETP, l'ETR le sera aussi égal tant que les réserves en eau du sol seront capables d'équilibrer la balance, au-delà il aura un déficit.

#### 4. 4. 2. a. Estimation de l'évapotranspiration réelle

On a essayé d'estimer l'évapotranspiration réelle par les formules suivantes :

- Formule de Thornthwaite
- Formule de Turc
- Formule de Coutagne

##### 4. 4. 2. a. i. Formule de Thornthwaite

Cette méthode est décrite plus loin (Bilan hydrique selon la formule de Thornthwaite),

##### 4. 4. 2. a. ii. Formule de Turc

La formule de *Turc* permet d'évaluer l'évapotranspiration réelle à partir de la hauteur moyenne des précipitations en mm et de la température moyenne annuelle en °C.

$$\text{ETR} = \frac{P}{\sqrt{0.9 + P^2/L^2}}$$

Avec :  $L = 300 + 25 \times T + 0.05 \times T^3$

Tel que :

- **P** : Précipitations moyennes annuelles (mm)
- **T** : Températures moyennes annuelles (°C)
- **ETR** : Evapotranspiration réelle (mm)
- **L** : Pouvoir évaporant,

A partir de cette méthode les résultats sont récapitulés dans le (tab. 20).

Tableau 20: L'ETR par la méthode de Turc

Station	P (mm)	T °C	L	ETR (mm/an)
Souk Ahras	705.4	15.9	898.5	573
Ain Dalia	723.9	17.5	1005.5	608

##### 4. 4. 2. a. iii. Formule de Coutagne

Cette formule permet de calculer l'évapotranspiration réelle en faisant intervenir la pluviométrie et la température.

$$\text{ETR} = P - \lambda P^2$$

où  $\lambda = 1 / (0.8 + 0.14T)$ .

Avec :

ETR : évapotranspiration réelle, en (mm/an).

P : précipitation moyenne mensuelle, en (mm/an).

T : température moyenne annuelle, en (°C).

Cette formule n'est valable que si les précipitations sont comprises entre :  $1 / 8\lambda < P < 1 / 2\lambda$ .

L'application de cette formule a donné le résultat représenté dans le tableau 21.

**Tableau 21: L'ETR selon la formule de Coutagne**

Station	P (mm)	T °C	$\lambda$	ETR (mm/an)
Ain Dalia	723.9	17.5	0.308	571
Souk Ahras	705.4	15.9	0.330	541

#### 4. 4. 2. b. Comparaison entre les 3 formules

La finalité de la comparaison réside dans les écarts décelés lors de l'application des trois méthodes (Tab. 22) à fin de donner une meilleure approche à l'estimation de l'ETR. Ce qui par la suite fera ressortir la formule la mieux appropriée à notre région d'étude.

Il est clair que la formule de Thornthwaite convient aux régions humides de la zone tempérée, contrairement à celle de Turc qui présente un caractère universel.

**Tableau 22: Les résultats de l'ETR selon les différentes méthodes**

Station	Souk Ahras	Ain Dalia
Méthode	ETR (mm/an)	ETR (mm/an)
Thornthwaite	393.1	457.8
Turc	573	608
Coutagne	541	571

### 5. Bilan hydrique selon la formule de Thornthwaite :

- ❖ Le bilan hydrologique établi mensuellement selon la méthode de C.W. Thornthwaite a l'avantage d'estimer pour chaque mois l'évapotranspiration réelle ETR, la réserve facilement utilisable (RFU), le déficit agricole (Da) et l'excédent (Ex), qui sont considérés comme des éléments clés en hydrologie, car ils permettent l'estimation des réserves naturelles des aquifères.
- ❖ D'après les études menées par les directions de l'hydraulique de la wilaya (DHW) et de l'agriculture (DSA), la RFU est estimé à 67 mm pour la région de Souk-Ahras.
- ❖ Les paramètres utilisés sont:
  - **T** : Température mensuelle °C
  - **P** : Précipitation mensuelle (mm)
  - **IT**: Indice thermique
  - **RFU**: Réserve facilement utilisable (mm)
  - **K** : Coefficient de latitude
  - **ETR** : Evapotranspiration réelle (mm)
  - **ETP** : Evapotranspiration potentielle (mm)
  - **DA** : Déficit agricole (mm)
  - **EXD** : Excédent (mm)

**Tableau 23: Bilan hydrique selon Thornthwaite, St. d'Ain Dalia**

Mois	Tp	IT	CL	ETPC	Pr	BH	CH	VR	RU	ETPR	Déf	Exc.
<b>S</b>	21.0	8.6	1.05	93.0	34.7	-58.4	-0.6	0.0	0.0	34.7	58.4	0.0
<b>O</b>	18.4	7.0	0.91	63.4	42.6	-20.9	-0.3	0.0	0.0	42.6	20.9	0.0
<b>N</b>	14.6	5.0	0.75	34.6	78.9	44.3	1.3	44.3	44.3	34.6	0.0	0.0
<b>D</b>	12.6	4.0	0.70	24.7	107.4	82.7	3.3	22.7	67.0	24.7	0.0	60.0
<b>J</b>	11.9	3.7	0.73	23.5	119.8	96.3	4.1	0.0	67.0	23.5	0.0	96.3
<b>F</b>	12.6	4.0	0.78	27.5	94.7	67.2	2.4	0.0	67.0	27.5	0.0	67.2
<b>M</b>	14.3	4.8	1.02	45.5	77.0	31.6	0.7	0.0	67.0	45.5	0.0	31.6
<b>A</b>	15.8	5.6	1.15	61.2	72.2	11.0	0.2	0.0	67.0	61.2	0.0	11.0
<b>M</b>	18.3	7.0	1.32	91.8	49.1	-42.7	-0.5	-42.7	24.3	91.8	0.0	0.0
<b>J</b>	21.6	9.0	1.33	124.4	21.0	-103.4	-0.8	-24.3	0.0	45.3	79.1	0.0
<b>J</b>	24.7	11.0	1.33	158.4	6.8	-151.6	-1.0	0.0	0.0	6.8	151.6	0.0
<b>A</b>	24.7	11.0	1.24	147.3	19.7	-127.7	-0.9	0.0	0.0	19.7	127.7	0.0
<b>Annuel</b>	<b>17.5</b>	<b>80.7</b>		<b>895.4</b>	<b>723.9</b>	<b>-171.5</b>				<b>457.8</b>	<b>437.5</b>	<b>266.1</b>

**Tableau 24: Bilan hydrique selon Thornthwaite, St. de Souk Ahras**

Mois	Tp	IT	CL	ETPC	Pr	BH	CH	VR	RU	ETPR	Déf	Exc.
S	22.4	9.5	1.05	109.2	37.5	-71.8	-0.7	0.0	0.0	37.5	71.8	0.0
O	18.1	6.9	0.91	66.6	45.0	-21.6	-0.3	0.0	0.0	45.0	21.6	0.0
N	12.5	4.0	0.75	29.9	70.2	40.4	1.4	40.4	40.4	29.9	0.0	0.0
D	8.8	2.4	0.70	15.7	108.2	92.5	5.9	26.6	67.0	15.7	0.0	65.8
J	7.4	1.8	0.73	12.1	107.3	95.2	7.9	0.0	67.0	12.1	0.0	95.2
F	7.9	2.0	0.78	14.6	95.4	80.8	5.5	0.0	67.0	14.6	0.0	80.8
M	10.6	3.1	1.02	30.6	70.0	39.4	1.3	0.0	67.0	30.6	0.0	39.4
A	12.7	4.1	1.15	47.1	78.2	31.1	0.7	0.0	67.0	47.1	0.0	31.1
M	17.3	6.4	1.32	89.5	50.8	-38.8	-0.4	-38.8	28.2	89.5	0.0	0.0
J	21.3	8.8	1.33	127.7	16.1	-111.5	-0.9	-28.2	0.0	44.4	83.3	0.0
J	25.3	11.4	1.33	169.8	7.5	-162.3	-1.0	0.0	0.0	7.5	162.3	0.0
A	26.2	12.0	1.24	167.2	19.4	-147.9	-0.9	0.0	0.0	19.4	147.9	0.0
<b>Annuel</b>	<b>15.9</b>	<b>72.2</b>		<b>879.9</b>	<b>705.4</b>	<b>-174.5</b>				<b>393.1</b>	<b>486.8</b>	<b>312.3</b>

❖ **Formule de vérification**

Afin de vérifier l'exactitude des résultats, on applique les formules de vérification suivantes :

$P = \sum ETR + \sum EX$	➔	$P = 393.1 + 312.3 = 705.4 \text{ mm. St. Souk Ahras}$
		$P = 457.8 + 266.1 = 723.9 \text{ mm. St. Ain Dalia}$
$ETP = \sum ETR + \sum DA$	➔	$ETP = 393.1 + 486.8 = 979.9 \text{ mm. St. Souk Ahras}$
		$ETP = 437.5 + 457.8 = 895.4 \text{ mm. St. Ain Dalia}$
$DA = \sum ETP - \sum ETR$	➔	$DA = 879.9 - 393.1 = 486.8 \text{ mm. St. Souk Ahras}$
		$DA = 895.4 - 457.8 = 437.5 \text{ mm. St. Ain Dalia}$
$EXC = \sum P - \sum ETR$	➔	$EXC = 879.9 - 393.1 = 486.8 \text{ mm. St. Souk Ahras}$
		$EXC = 895.4 - 457.8 = 437.5 \text{ mm. St. Ain Dalia}$

Nous constatons que les résultats issus des bilans hydriques sont vérifiés.

5. 1. Interprétation du bilan hydrique

- Pour la station d’Ain Dalia, l’ETP atteint son maximum au mois de Juillet (158.4 mm) et son minimum au mois de Janvier (23.5 mm), l’excédent (EXD) commence à partir du mois de Décembre et s’étale jusqu’au mois d’Avril avec un maximum au mois de janvier (96.3 mm), l’épuisement du stock commence du mois de mai jusqu’au mois de juillet, et un déficit agricole maximum au mois de Juillet de 151.6 mm, (Fig. 22 et 23).
- Pour la station de Souk Ahras, l’ETP atteint son maximum au mois de Juillet (169.8 mm) et son minimum au mois de Janvier (12.1 mm), l’excédent (EXD) commence à partir du mois de Décembre et s’étale jusqu’au mois d’Avril avec un maximum au mois de janvier (95.2 mm), l’épuisement du stock commence du mois de mai jusqu’au mois de juillet, et un déficit agricole maximum au mois de Juillet de 162.3 mm, (Fig. 24 et 25).
- $P = ETR$  : les précipitations sont suffisantes pour alimenter le sol, les réserves facilement utilisables ne seront pas alimentées.
- $P < ETP$  : le sol utilise ses réserves utiles jusqu’au épuisement de celles-ci, on aura donc un déficit agricole (**Da**) tel que :  $Da = ETP - P$
- $P > ETP$  alors  $ETP = ETR$ , on aura donc une quantité d’eau qui sera égale à:  $P - ETP$  qui va alimenter la **RFU** (réserve facilement utilisable) alors il est plein à l’excédent.

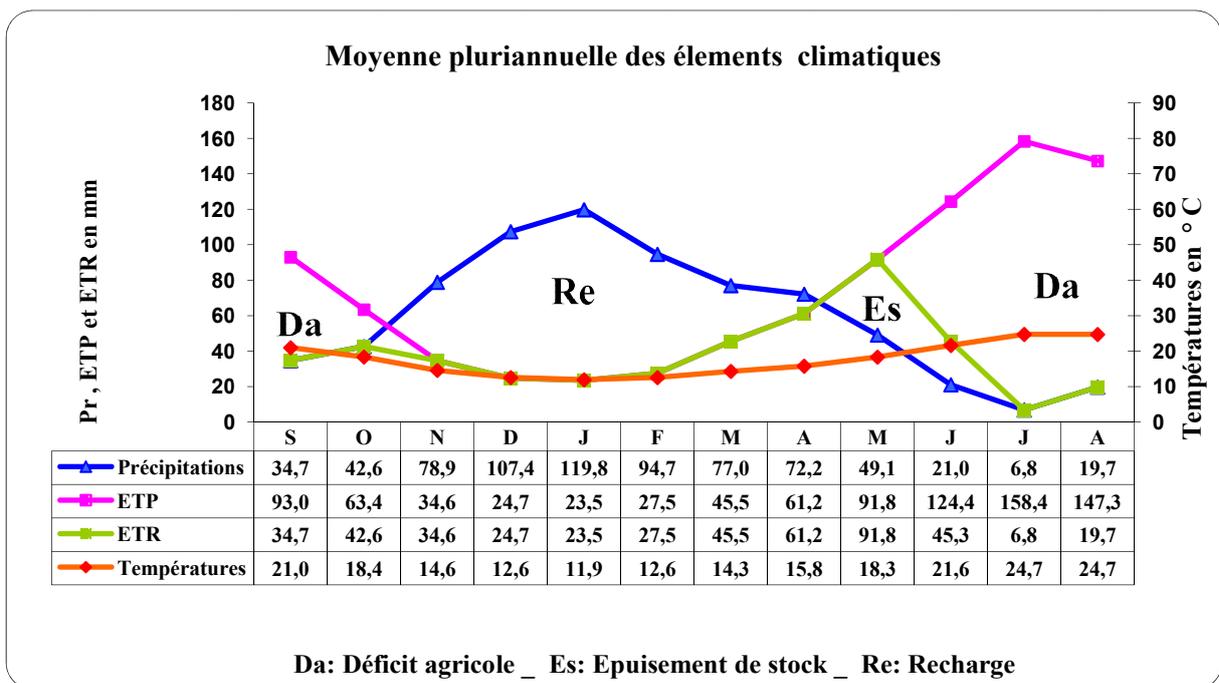


Figure 22: Représentation graphique du bilan de Thornthwaite, St. d'Ain Dalia

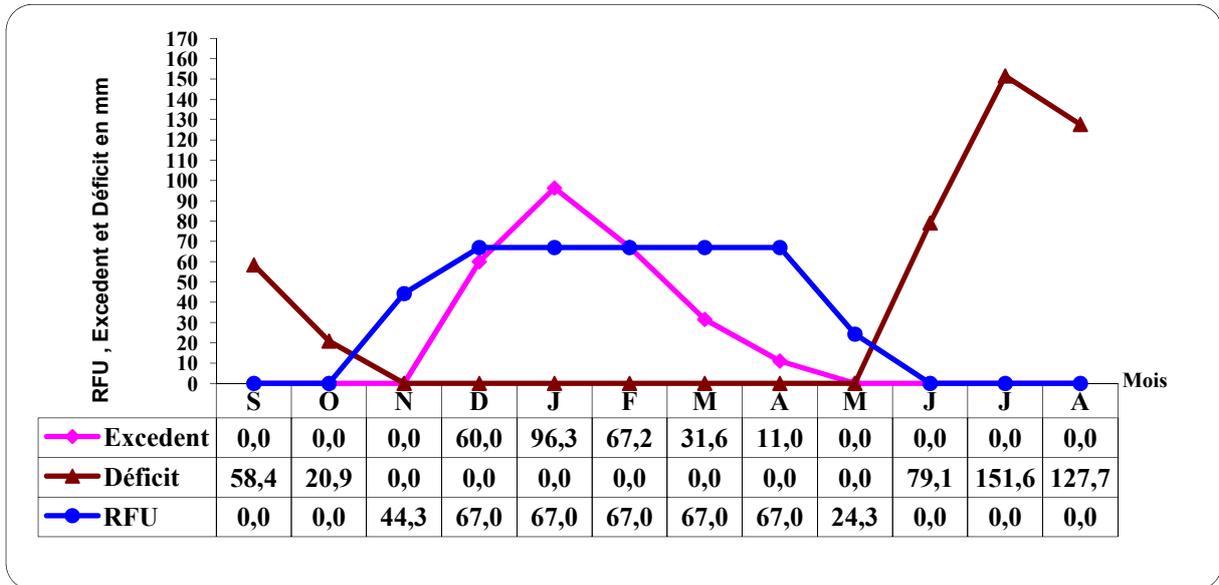


Figure 23: Représentation graphique du bilan hydrologique, St. d'Ain Dalia

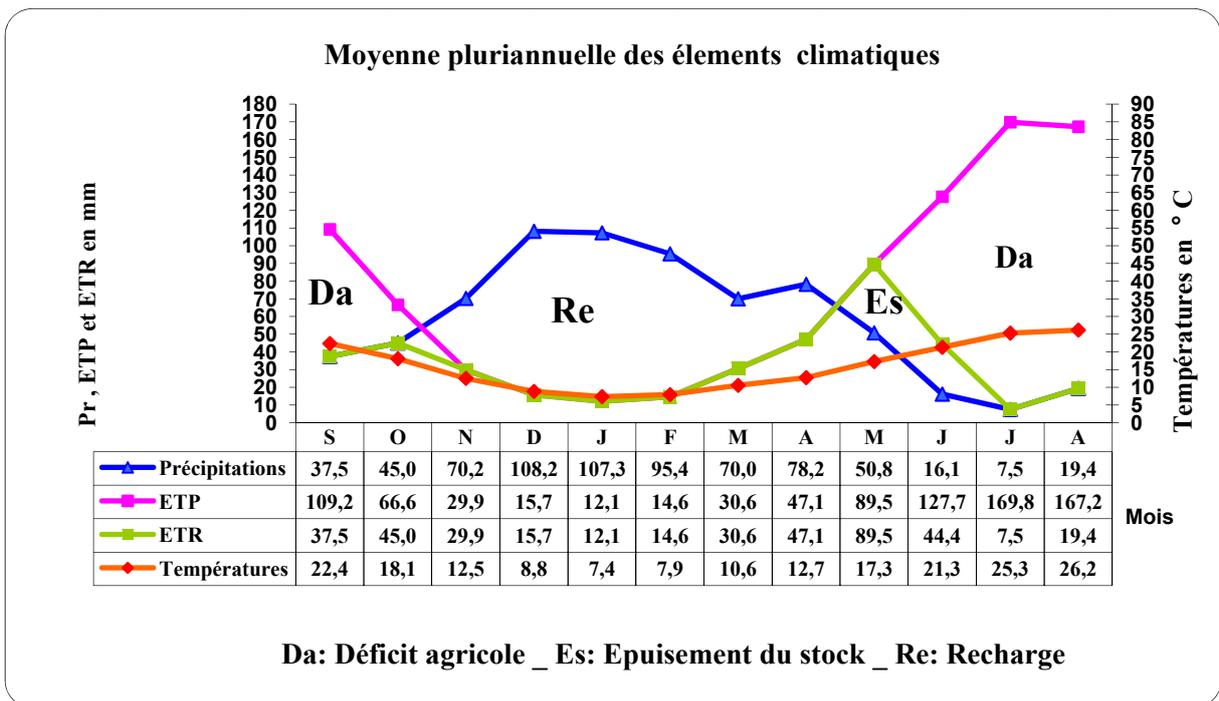


Figure 24: Représentation graphique du bilan de Thornthwaite, à la St. de Souk Ahras

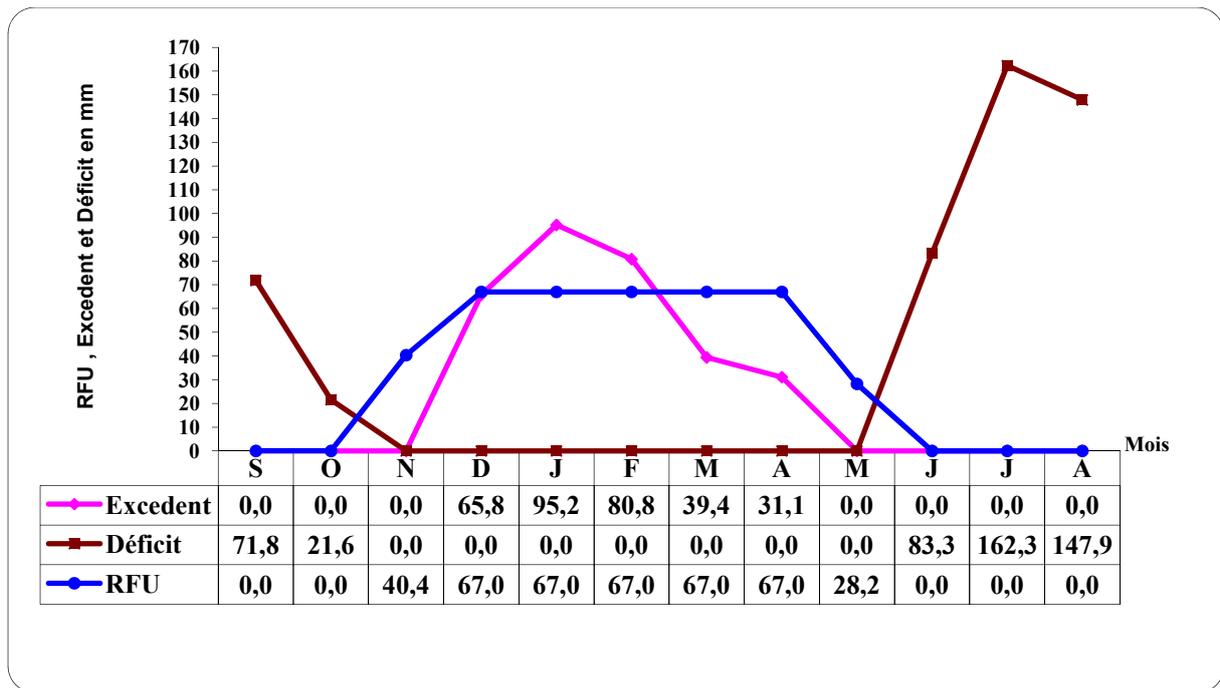


Figure 25: Représentation graphique du bilan hydrologique, à la St. de Souk Ahras

L'établissement des bilans hydrologiques des deux stations montre que la région est définie par deux périodes distinctes :

- Une première déficitaire, où l'alimentation du stock en eau est nulle, cette période s'étend du mois de Mai jusqu'au mois de Novembre, connue par une forte température et une évapotranspiration intense.
- Une deuxième période, représentée par la recharge du stock, allant du mois de Décembre jusqu'au mois d'Avril, connue par une forte pluviométrie et une faible température.

## 6. Détermination du ruissellement

Les gouttes qui arrivent à la surface du sol comblent les pertes par infiltration et stockage, puis forment une couche d'eau. Dès que l'épaisseur de cette lame d'eau est suffisante pour que les forces de gravité compensent les tensions de surface (Yen, 1986), le ruissellement commence

Le ruissellement est donné par la formule empirique de TIXERONT BERKALOFF

$$R = \frac{P^3}{3ETP^2} \quad \text{Si } P < 600 \text{ mm}$$

Cette formule est modifiée par ROMANTCHOK (1974), et devienne comme suit:

$$R = \frac{P^3}{3} \quad \text{Si } P > 600 \text{ mm}$$

Avec :

R : Ruissellement en m ;

P : Précipitation moyenne mensuelle en m ;

ETP : L'évapotranspiration calculée par la méthode de THORNTHWAITE en m.

La lame d'eau ruisselée des précipitations des deux stations est reportée dans le tableau 25:

**Tableau 25: Résultats du ruissellement**

Station	P (m)	ETP (m)	R (m)	R (%)
Souk Ahras	0.7054	<b>0.8799</b>	0.1169	16.52
Ain Dalia	0.7239	<b>0.8954</b>	0.1264	17.47

## 7. Estimation de l'infiltration :

L'infiltration est un paramètre très important dans l'établissement du bilan hydrique, et par définition étant le mouvement de l'eau dans un sol en passant par la surface, pour recharger une partie du sol puis les nappes aquifères.

Elle dépend de plusieurs facteurs:

- La nature du sol.
- La perméabilité et la porosité du terrain,
- La couverture végétale,
- L'intensité de la pluie
- La topographie du terrain

L'estimation de l'infiltration est déterminée en tirant sa valeur de l'équation du bilan global

$$P = R + I + ETR. \quad \text{Donc:} \quad I = P - R - ETR$$

Avec :

**P** : Précipitations moyennes mensuelles (mm)

**ETR** : Evapotranspiration réelle moyenne selon le bilan de Thornthwaite en mm

**R** : Ruissellement (mm)

**I** : L'infiltration (mm)

- Si  $I > 0$  : Les entrées sont supérieures aux sorties.
- Si  $I < 0$  : Les entrées sont inférieures aux sorties.

**Tableau 26: Estimation de l'infiltration**

Station	P (mm)	ETR (mm)	R (mm)	I (mm)	I (%)
Souk Ahras	705.4	393.1	116.9	195.4	27.7
Ain Dalia	723.9	457.8	126.4	139.7	19.3

**Tableau 27: Résultats du bilan hydrologique**

Station	P (mm)	ETR (mm)	R (mm)	I (mm)
Souk Ahras	705.4	393.1	116.9	195.4
Ain Dalia	723.9	457.8	126.4	139.7
Moyenne	714.7	425.5	121.7	167.6
Taux en %	100	59.53	17.02	23.45

Ces résultats renseignent que l'évapotranspiration dans le bassin d'étude est importante, avec une moyenne sur les deux stations météorologiques qui est de 59.53%. La partie des précipitations efficaces qui ruissellent représente 17.02 % de ces précipitations, alors que le taux qui s'infiltré et participe à la recharge des nappes est plus important, soit 23.45% des précipitations.

## 8. Conclusion :

- ❖ La région d'étude appartient à un milieu du climat tempéré. Il est caractérisé par deux saisons distinctes, une humide qui s'étale du mois de Novembre jusqu'au mois d'Avril et une autre sèche allant du mois de Mai au mois de Septembre.
- ❖ Ce climat est influencé par :
  - Une précipitation moyenne annuelle de 723.9 mm/an, (pour la St. d'Ain Dalia).
  - Une précipitation moyenne annuelle de 705.4 mm/an (pour la St. de Souk Ahras).
  - Une température moyenne annuelle de 17.5 °C, (pour la St. d'Ain Dalia).
  - Une température moyenne annuelle de 15.9 °C, (pour la St. de Souk Ahras).
- ❖ L'estimation du bilan hydrique a montré qu'à partir du mois de Décembre, l'apport considérable de la pluie, la chute de la température et la diminution de l'évapotranspiration permettent la recharge du sol, mais un déficit agricole enregistré à partir du mois de Juin jusqu'au mois de novembre.
- ❖ Une évapotranspiration potentielle (ETP) de 895.4 mm/an à la station d'Ain Dalia et de 879.9 mm/an à la station de Souk Ahras.
- ❖ Une évapotranspiration réelle (ETR) de 457.8 mm/an à la station d'Ain Dalia et de 393.1 mm/an à la station de Souk Ahras.
- ❖ Une estimation de ruissellement:
  - de 116.9 mm soit 15.52 % ; au niveau de la station de Souk-Ahras
  - de 126.4 mm soit 17.47 % ; au niveau de la station d'Ain Dalia
- ❖ Une estimation du taux d'infiltration :
  - de 195.4 mm soit 27.7% ; au niveau de la station de Souk-Ahras
  - de 139.7 mm soit 19.3 % ; au niveau de la station d'Ain Dalia

## Chapitre IV

# HYDROCHIMIE

## 1. Introduction

La qualité des eaux souterraines est la résultante de tous les processus et réactions qui agissent sur l'eau provenant du produit qu'elle condense dans l'atmosphère jusqu'à ce qu'elle soit évacuée par un puits. Par conséquent, la détermination de la qualité de l'eau souterraine est importante pour observer l'adéquation de l'eau pour un usage particulier (Shivran, 2006).

Les formations géologiques au travers desquelles, elles circulent ou dans lesquelles elles séjournent influencent également la composition chimique des eaux. L'activité anthropique caractérisée par une agriculture intense peut entraîner également une dégradation de la qualité des eaux causée par l'utilisation massive des engrais.

## 2. Matériel et méthodes

### 2.1 Analyses hydrochimiques

#### 2. 1. 1. Echantillonnage des points d'eau (forages)

Les analyses ont touché 21 forages d'eau répartis dans la zone d'étude (Fig. 26). Ces forages captent les différents aquifères existants, l'eau prélevée a été conservé à une température de 4°C et transportée au laboratoire de la qualité à Tébessa et d'autres faites par l'ANRH. Les méthodes d'analyses pratiquées sont celles préconisées par les normes (Rodier, 2009).

Le dosage des éléments chimiques s'est limité aux ions majeurs ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  et  $\text{HCO}_3^-$ ),

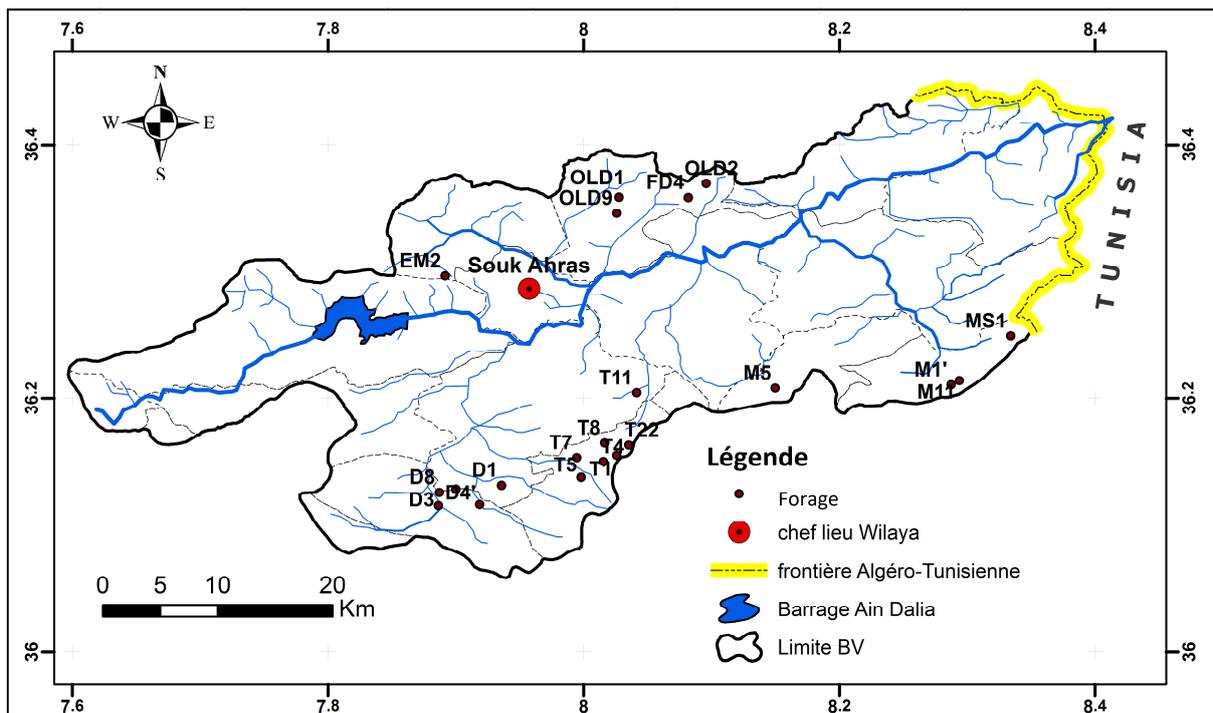


Figure 26: Inventaire des points d'eau (forages)

## 2. 2. Méthodes d'analyses graphiques et empiriques

L'étude du chimisme des eaux souterraines prélevées a pour but d'identifier les faciès des eaux et l'origine des principaux éléments chimiques ; il se réalise par l'exploitation des rapports caractéristiques et qui sont considérés comme des indicateurs de la qualité de l'eau (Olive, 1996)

### 2. 2. 1. Fiabilité des analyses

Le calcul de la balance ionique (**BI**) s'appuie sur le principe que la somme des anions majeurs et la somme des cations majeurs sont équivalentes (concentrations exprimées en méq/l) permet le calcul de l'erreur, selon la formule :

$$BI = \frac{\sum(\text{cations}) - \sum(\text{anions})}{\sum(\text{cations}) + \sum(\text{anions})} * 100$$

Une analyse chimique des eaux n'est considérée comme représentative et acceptable que lorsque la balance ionique est inférieure ou égale à 06 %.

### 2. 2. 2. Indice d'échange de base (I.e.b.)

L'utilisation de l'indice d'échange de base (i.e.b.) permet de mettre en évidence les modifications du chimisme de l'eau au cours de son trajet souterrain. Par définition, l'i.e.b est le rapport entre les ions échangés et les ions de même nature primitivement existants dans l'eau. Il est obtenu par la relation suivante :

$$i. e. b. = \frac{[r_{Cl^-} - r(Na^+ + K^+)]}{r_{Cl^-}}$$

- Si l'i.e.b. est négatif alors les ions  $Ca^{2+}$  et  $Mg^{2+}$  de l'eau sont échangés contre les ions  $K^+$  et  $Na^+$  des formations encaissantes, l'eau est d'origine cristalline;
- Si l'i.e.b. est positif alors les ions  $Na^+$  et  $K^+$  de l'eau sont remplacés par les ions  $Mg^{2+}$  et  $Ca^{2+}$  des formations encaissantes, l'eau est d'origine sédimentaire;
- Si l'i.e.b. = 0 alors il y a un équilibre entre les compositions chimiques de l'eau et celle du terrain encaissant.

### 2. 2. 3. Le Diagramme de Piper

Le Diagramme de Piper est l'une des représentations les plus classiques pour comparer les compositions chimiques des eaux naturelles. Il permet une représentation des cations et anions sur deux triangles spécifiques dont les côtés témoignent des teneurs relatives de chacun des ions majeurs par rapport au total des ions. La position relative d'un résultat analytique sur

chacun de ces triangles permet de préciser en premier lieu la dominance cationique et anionique. A ces deux triangles, est associé un losange sur lequel est reportée l'intersection des deux lignes issues des points identifiés sur chaque triangle. Ce point d'intersection représente l'analyse globale de l'échantillon. Cette position permet de préciser le faciès de l'eau naturelle concernée. (Elalaoui, 2010)

Le diagramme de Piper permet également :

- ♦ D'illustrer l'évolution chimique d'une eau dans un aquifère ainsi que les mélanges d'eaux de minéralisations différentes ;
- ♦ D'avoir une idée sur la lithologie à partir des analyses chimiques ;
- ♦ D'avoir une relation entre le chimisme de l'eau et la nature lithologique de l'encaissant ;
- ♦ La projection de plusieurs échantillons en même temps :
  - ✓ Pour suivre leurs évolutions dans le temps et dans l'espace ;
  - ✓ Pour les comparer ;
  - ✓ Pour avoir une idée sur la notion de mélange.
- ♦ De suivre les propriétés physico-chimiques au cours de leur évolution spatiotemporelle.

#### **2. 2. 4. Méthodes d'analyses statistiques multivariées**

##### **2. 2. 4. a. Analyse de corrélation**

Les statistiques bivariées, en particulier l'analyse de corrélation, sont utilisées dans le but de détecter tout d'abord les incohérences entre les variables, mais aussi les liaisons entre elles, prises deux à deux. Les liaisons linéaires, si elles existent, sont obtenues par un calcul numérique. Le coefficient de corrélation linéaire de Bravais Pearson « R », lequel donne une idée sur le réseau d'interrelations et de dépendances linéaires existant entre les éléments chimiques, le coefficient de Bravais-Pearson est compris entre -1 et 1, indique une présomption de liaison linéaire entre les deux séries d'autant qu'il se rapproche de 1 en valeur absolue. (Lefebvre, 1988)

##### **2. 2. 4. b. Analyse en composantes principales "ACP"**

L'analyse en composantes principales (ACP ou PCA en anglais), ou selon le domaine d'application la transformation de Karhunen–Loève (KLT), est une méthode de la famille de l'analyse des données et plus généralement de la statistique multi-variée, qui consiste à transformer des variables liées entre elles (dites « corrélées » en statistique) en nouvelles variables décorréelées les unes des autres. Ces nouvelles variables sont nommées

« composantes principales », ou axes principaux. Elle permet au praticien de réduire le nombre de variables et de rendre l'information moins redondante.

Il s'agit d'une approche à la fois géométrique (les variables étant représentées dans un nouvel espace, selon des directions d'inertie maximale) et statistique (la recherche portant sur des axes indépendants expliquant au mieux la variabilité, la variance des données). Lorsqu'on veut compresser un ensemble de  $N$  variables aléatoires, les  $n$  premiers axes de l'analyse en composantes principales sont un meilleur choix, du point de vue de l'inertie ou de la variance. Cette analyse multidimensionnelle des données est une méthode factorielle et linéaire qui traite des caractères numériques (dans notre cas, les résultats des analyses chimiques).

Elle permet de mettre en évidence les ressemblances chimiques entre les différentes eaux et/ou les différents pôles d'acquisition de la minéralisation.

#### 2. 2. 4. c. Classification hiérarchique ascendante "CHA"

Il existe de nombreuses techniques statistiques visant à partitionner une population en différentes classes ou sous-groupes. La méthode statistique de la Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) a pour objectif de déterminer l'origine de la minéralisation des eaux. La CAH est une technique qui mesure la dissimilarité ou la similarité entre les échantillons afin de définir un critère d'agrégation des classes (Templ et al, 2008).

Le principe de la CHA est de rassembler des individus selon un critère de ressemblance défini au préalable qui s'exprimera sous la forme d'une *matrice de distances*, exprimant la distance existant entre chaque individu pris deux à deux. Deux observations identiques auront une distance nulle. Plus les deux observations seront dissemblables, plus la distance sera importante.

La CHA va ensuite rassembler les individus de manière itérative afin de produire un dendrogramme ou arbre de classification. La classification est ascendante car elle part des observations individuelles ; elle est hiérarchique car elle produit des classes ou groupes de plus en plus vastes, incluant des sous- groupes en leur sein. En découpant cet arbre à une certaine hauteur choisie, on produira la *partition* désirée.

### 3. Résultats et discussion

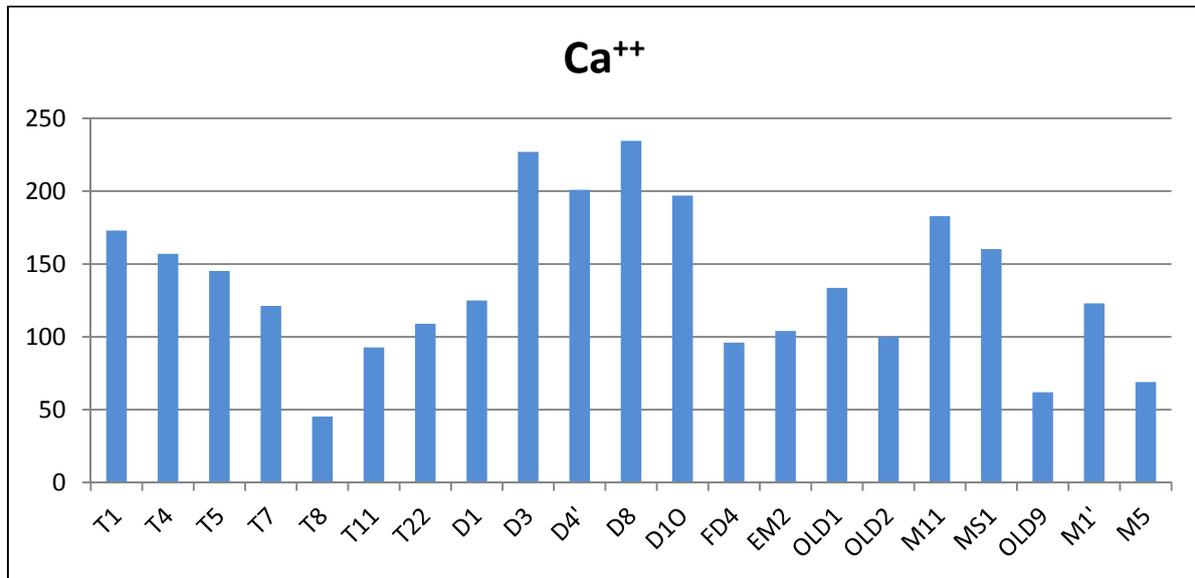
#### 3.1. Variation spatiale des éléments physicochimiques

##### 3. 1. a. Le Calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ )

Les ions calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) proviennent principalement de la dissolution des formations carbonatées et gypseuses. et également dans certains minéraux des roches ignées. (Parizot, 2008). La présence des ions  $\text{Ca}^{2+}$  dans l'eau est liée principalement à deux origines naturelles:

soit la dissolution des formations carbonatées ( $\text{CaCO}_3$ ), soit la dissolution des formations gypseuses ( $\text{CaSO}_4$ ).

Les teneurs sont très variables (Fig. 27); le minimum est de 45.3 mg/l est enregistré au niveau du forage T8, alors que le maximum est de 234.5 mg/l, au niveau du forage D8 qui capte la nappe profonde de Taoura.



**Figure 27: Variations spatiale du Calcium**

La répartition du calcium est tributaire de la lithologie des formations, les teneurs les plus élevées sont observées dans le Sud de la zone d'étude siège de l'alimentation constituée par les calcaires de Synclinal de Taoura

### 3. 1. b. Le Magnésium ( $\text{Mg}^{2+}$ )

Les ions magnésium ( $\text{Mg}^{2+}$ ) proviennent de l'eau de mer et de la dissolution des formations carbonatées riches en magnésium (dolomite), également du phénomène d'échange cationique avec le sodium. (Parizot, 2008)

Il en résulte principalement de la dissolution des formations dolomitiques. Il peut également provenir de la dissolution de  $\text{MgSO}_4$  (sulfate Magnésien) dans les terrains gypsifères. Les valeurs en  $\text{Mg}^{2+}$  varient entre 11 et 46 mg/l (Fig. 28).

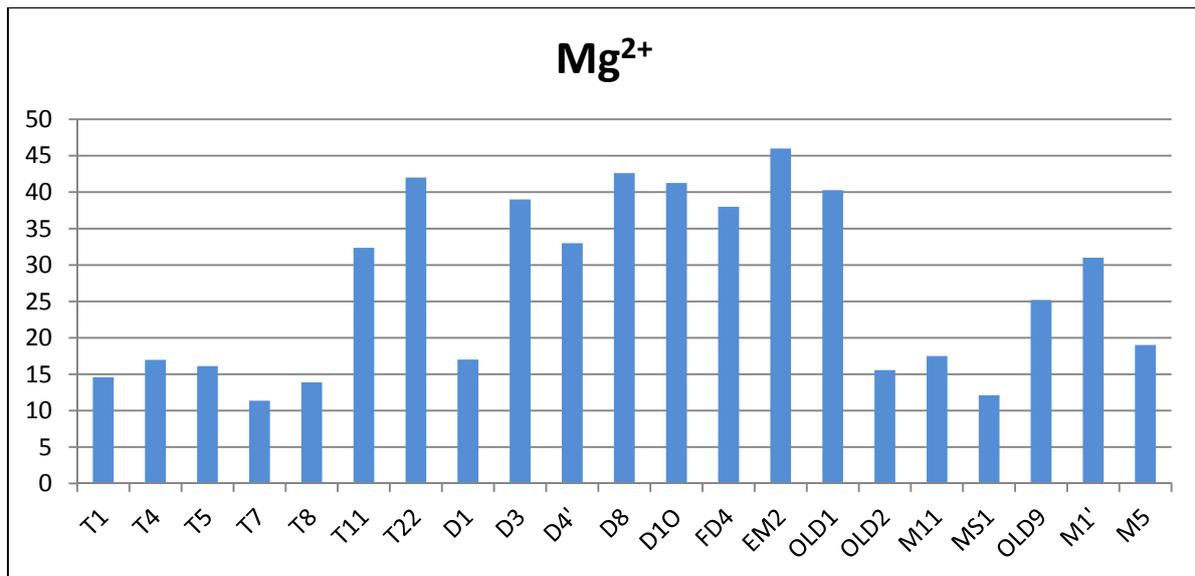


Figure 28: Variations spatiale du Magnésium

3. 1. c. Le Sodium et potassium (Na<sup>+</sup> + K<sup>+</sup>)

Le cation sodium (Na<sup>+</sup>) est très abondant sur la terre. On le retrouve dans les roches cristallines et les roches sédimentaires (sables, argiles, évaporites). Le Sodium est soumis aux mêmes processus d'adsorption/désorption que le calcium et le magnésium. (Sekiou, 2014)

Le sodium provient du lessivage des formations riches en NaCl et des formations argileuses et argilo-marneuses et l'invasion de l'eau salé.

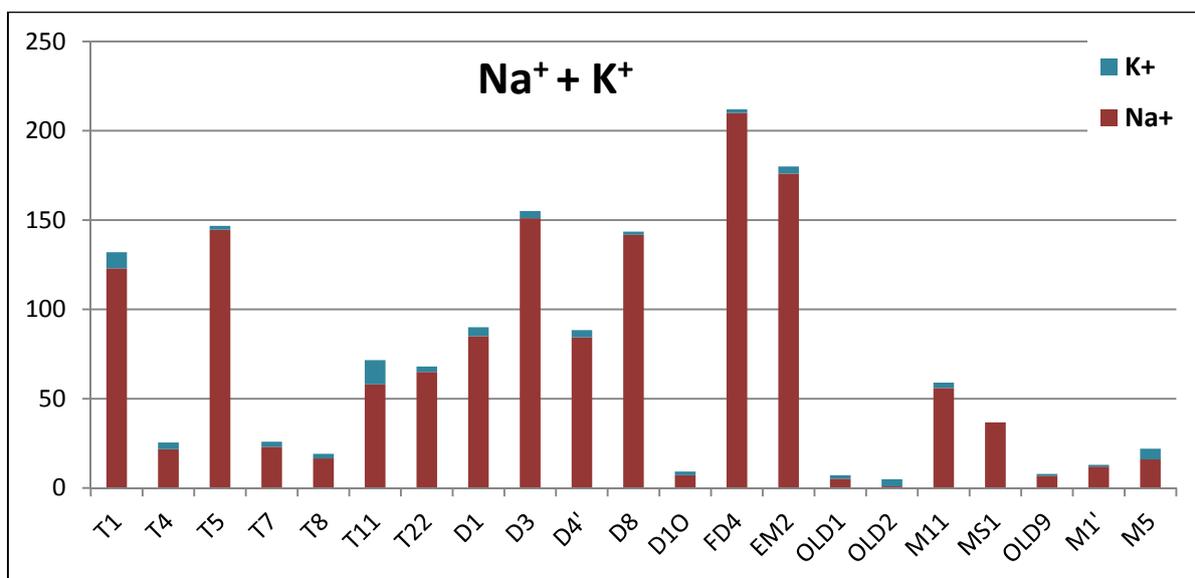


Figure 29: Variations spatiale du Sodium et du Potassium

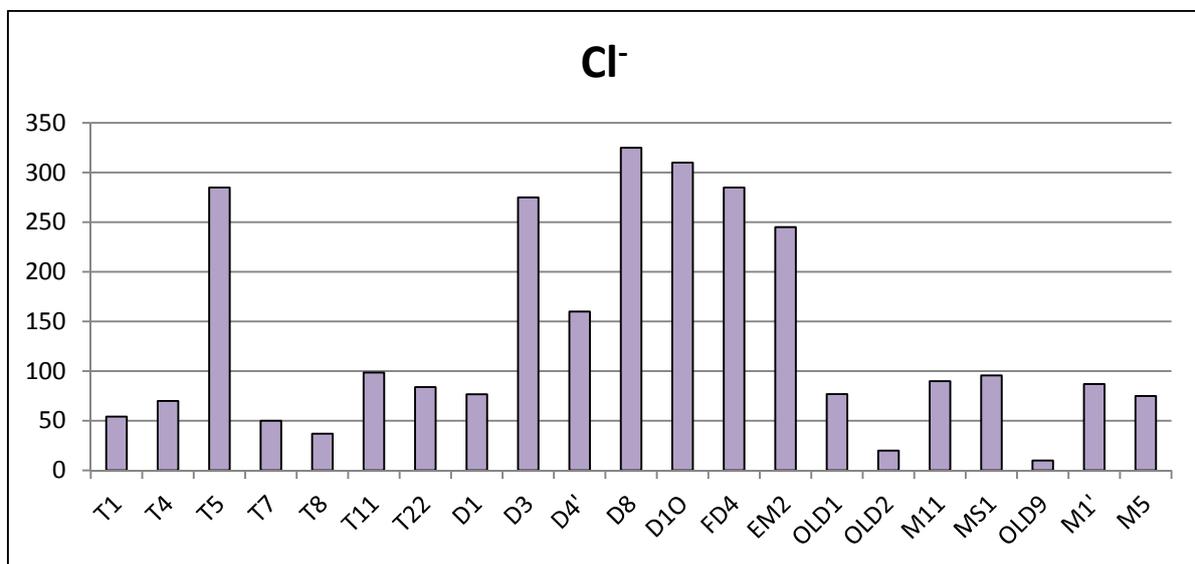
Les concentrations de sodium sont dues essentiellement aux formations argilo-marneuse du Trias qui affleure dans des endroits déterminés dans la zone d'étude, les

concentrations du sodium oscillent entre 210 mg/l au niveau de FD4 et 8 mg/l à OLD9 (Fig. 29).

Le Potassium ( $K^+$ ) est un élément principalement rencontré dans les roches ignées et les argiles. D'une manière générale, les eaux souterraines présentent rarement des teneurs en Potassium supérieures à 10 mg/l. (Parizot, 2008)

### 3. 1. d. Les Chlorures ( $Cl^-$ )

Les chlorures proviennent essentiellement de la dissolution des sels naturels par lessivage des terrains salifères et des rejets des eaux usées, industrielles et domestiques.



**Figure 30: Variations spatiale des Chlorures**

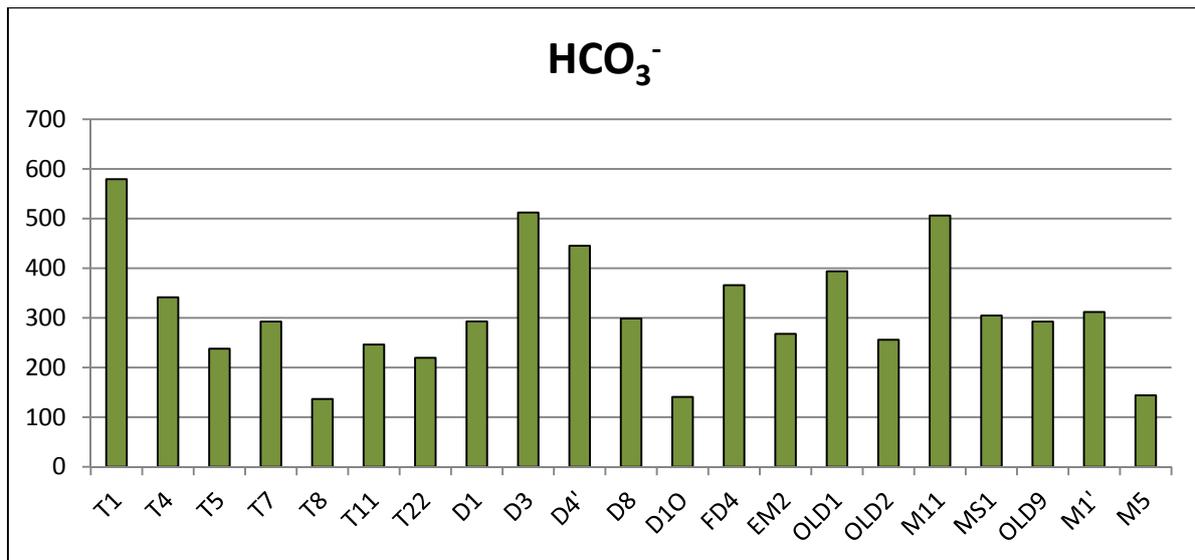
L'ion  $Cl^-$  est présent en petite quantité sur la terre. La source principale de chlorure dans les eaux est due à la dissolution de roches sédimentaires, l'intrusion marine, et en particulier les interactions eau-roches ignées. (Parizot, 2008)

Les chlorures suivent la même évolution que le Sodium (Fig. 30). Ces fortes concentrations peuvent se traduire par la dissolution des formations évaporitiques et gypseuses très abondantes dans notre terrain d'étude FD4, D8 et D10 avec des concentrations supérieures à 300 mg/l.

### 3. 1. e. Les Bicarbonates ( $HCO_3^-$ )

La dissolution des minéraux carbonatés et l'action du  $CO_2$  des eaux météoriques et du sol sont, d'une manière générale, à l'origine des Bicarbonates, (Parizot, 2008).

La présence des bicarbonates dans l'eau est due à la dissolution des formations carbonatées par des eaux chargées en gaz carbonique.



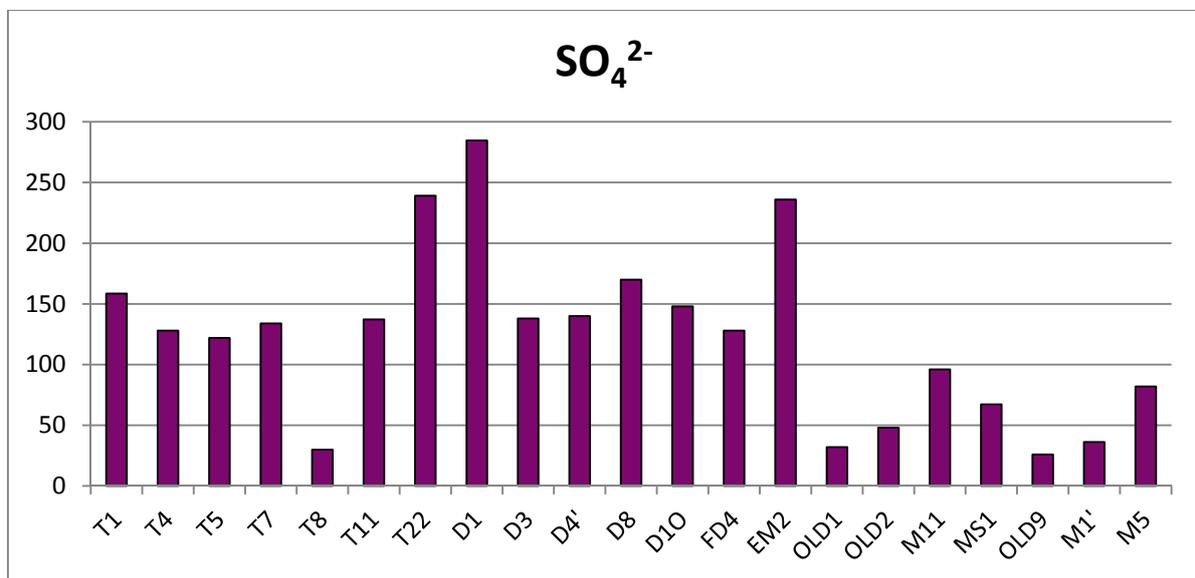
**Figure 31: Variations spatiale des Bicarbonates**

Les forages qui représentent des teneurs élevées en bicarbonates atteignent, en profondeur, les formations calcaires du crétacé du synclinal de Taoura (Fig. 31).

### 3. 1. f. Les Sulfates

Les origines des sulfates dans les eaux sont variées : l'oxydation des minéraux riches en soufre ou le lessivage de formations évaporitiques, (Sekiou, 2014).

La présence des ions sulfates dans l'eau est liée à la dissolution des formations gypseuses.



**Figure 32: Variations spatiale des Sulfates**

Les plus fortes concentrations des sulfates sont observées dans les forages T22, D1, EM2, dépassant les 200 mg/l (Fig. 32), elles sont dues à l'existence de passage gypseux et évaporitiques du Trias.

Le tableau 28 récapitule les valeurs des paramètres hydrochimiques majeurs des 21 échantillons des eaux de forage de la région d'étude, avec limites entre minimum et maximum, avec aussi la moyenne, médiane et l'écart type de chaque paramètre.

**Tableau 28: Sommaire des paramètres chimiques (mg/l)**

Paramètres (mg/l)	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
<b>Min</b>	45.3	11.37	0.93	0	10	136.79	26
<b>Max</b>	234.54	52.35	210	14.33	325	579.5	284.64
<b>Médiane</b>	122.2	29.7	47.4	2.9	85.5	292.9	128.0
<b>Moyenne</b>	128.2	28.7	68.3	4.1	133.5	300.1	119.3
<b>Ecart type</b>	51.5	12.9	65.8	3.7	103.1	112.0	72.2

#### 4. Cartographie des analyses hydrochimiques

Pour illustrer la répartition des éléments chimiques dans la zone d'étude, nous avons opté pour l'outil cartographique des éléments majeurs.

L'examen des cartes de distribution spatiales des concentrations des ions dans la zone d'étude (Fig. 33 et 34), relatives à la distribution spatiale des anions et des cations respectivement. Ces cartes nous ont permis de constater que dans celle des anions, les bicarbonates prédominent par rapport aux autres anions avec de valeurs allant de 136 à 580 mg/l, et une moyenne de 293 mg/l, dépend principalement à la dissolution de formations carbonatées. Les chlorures et les sulfates avec un degré moindre, de valeurs moyennes de 85 et 128 mg/l respectivement, influencés par les formations triasiques salifères. Pour les cations, le calcium est généralement l'élément dominant et ses teneurs variant de 45 à 235 mg/l, ceci est due essentiellement à la nature des terrains traversés carbonatés ou gypseux, les formations qui caractérise notre terrain d'étude. On note aussi la présence du sodium avec des teneurs de 21 mg/l en minimum pour atteindre les 210 en maximum.

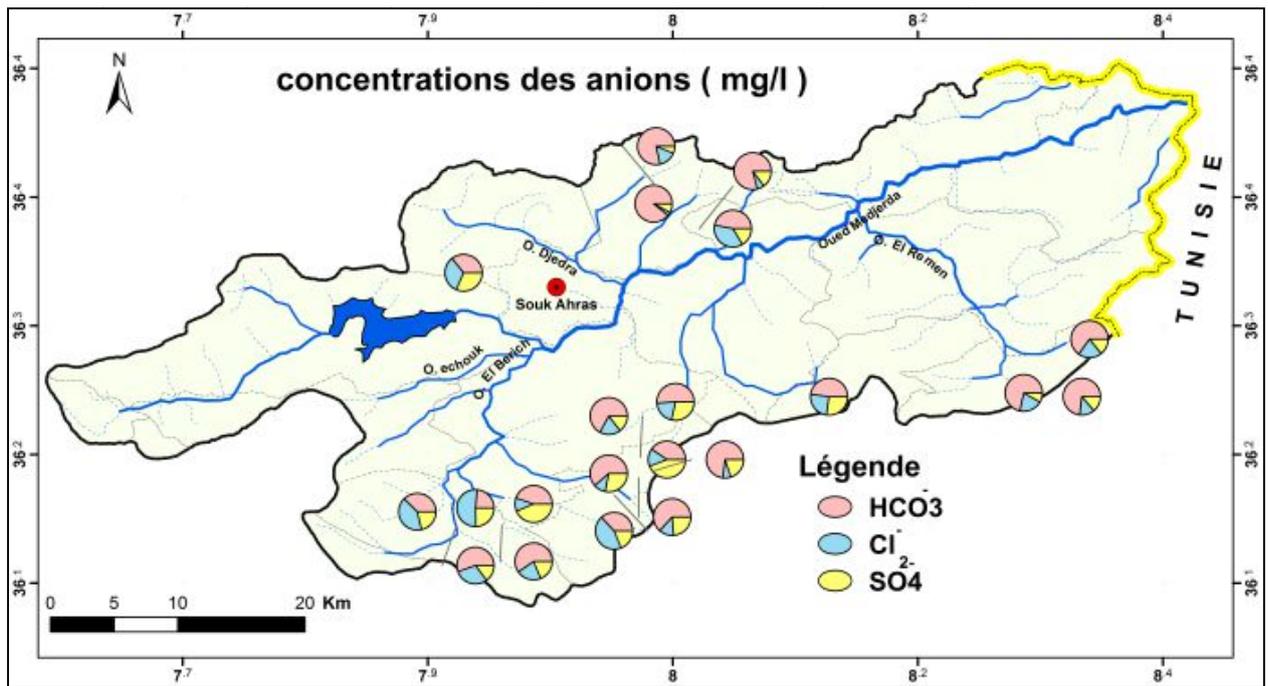


Figure 33: Distribution spatiale des anions

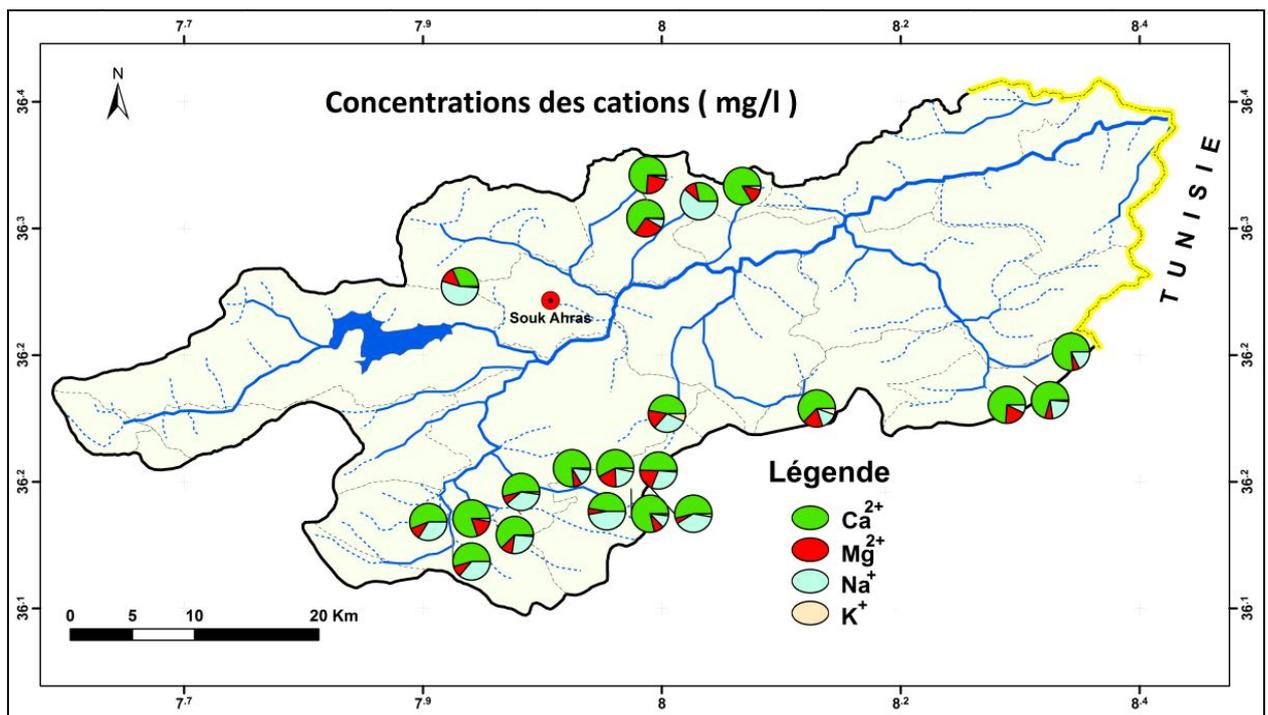


Figure 34: Distribution spatiale des cations

## 5. Faciès chimique

La représentation des analyses chimiques par la méthode triangulaire de Piper et par la formule ionique détermine les faciès chimiques des eaux des différents prélèvements effectués, ils sont résumés dans le (Tab.29), on peut noter la prédominance du faciès Bicarbonaté calcique, représenté par 14 échantillons d'eau sur 21, de 3 échantillons, pour le faciès chloruré calcique, et 2 échantillons pour les faciès chloruré sodique et sulfaté calcique chacun (Tab. 30).

### 5. 1. Formule ionique

Cette formule à pour but de classer par ordre décroissant les quantités en réaction en (még/l) des groupes anions et cations (Tab. 29). Elle permet de définir les caractéristiques physico-chimiques des eaux de l'aquifère en relation avec sa lithologie et de classer les eaux de même origine.

**Tableau 29: Détermination du faciès chimique des eaux par la formule ionique**

Nom Forage	Formule ionique	Faciès chimique
T1	$r\text{HCO}_3^-$ , $r\text{SO}_4^{2-}$ , $r\text{Cl}^-$ $r\text{Ca}^{2+}$ , $r(\text{Na}^++\text{k}^+)$ , $r\text{Mg}^{2+}$	Bicarbonaté calcique
T4	$r\text{HCO}_3^-$ , $r\text{SO}_4^{2-}$ , $r\text{Cl}^-$ $r\text{Ca}^{2+}$ , $r\text{Mg}^{2+}$ , $r(\text{Na}^++\text{k}^+)$	Bicarbonaté calcique
T5	$r\text{Cl}^-$ , $r\text{HCO}_3^-$ , $r\text{SO}_4^{2-}$ $r\text{Ca}^{2+}$ , $r(\text{Na}^++\text{k}^+)$ , $r\text{Mg}^{2+}$	Chloruré calcique
T7	$r\text{HCO}_3^-$ , $r\text{SO}_4^{2-}$ , $r\text{Cl}^-$ $r\text{Ca}^{2+}$ , $r(\text{Na}^++\text{k}^+)$ , $r\text{Mg}^{2+}$	Bicarbonaté calcique
T8	$r\text{HCO}_3^-$ , $r\text{Cl}^-$ , $r\text{SO}_4^{2-}$ $r\text{Ca}^{2+}$ , $r\text{Mg}^{2+}$ , $r(\text{Na}^++\text{k}^+)$	Bicarbonaté calcique
T11	$r\text{HCO}_3^-$ , $r\text{SO}_4^{2-}$ , $r\text{Cl}^-$ $r\text{Ca}^{2+}$ , $r\text{Mg}^{2+}$ , $r(\text{Na}^++\text{k}^+)$	Bicarbonaté calcique
T22	$r\text{SO}_4^{2-}$ , $r\text{HCO}_3^-$ , $r\text{Cl}^-$ $r\text{Ca}^{2+}$ , $r\text{Mg}^{2+}$ , $r(\text{Na}^++\text{k}^+)$	Sulfaté calcique
D1	$r\text{SO}_4^{2-}$ , $r\text{HCO}_3^-$ , $r\text{Cl}^-$ $r\text{Ca}^{2+}$ , $r(\text{Na}^++\text{k}^+)$ , $r\text{Mg}^{2+}$	Sulfaté calcique
D3	$r\text{HCO}_3^-$ , $r\text{Cl}^-$ , $r\text{SO}_4^{2-}$ $r\text{Ca}^{2+}$ , $r(\text{Na}^++\text{k}^+)$ , $r\text{Mg}^{2+}$	Bicarbonaté calcique
D4	$r\text{HCO}_3^-$ , $r\text{Cl}^-$ , $r\text{SO}_4^{2-}$ $r\text{Ca}^{2+}$ , $r(\text{Na}^++\text{k}^+)$ , $r\text{Mg}^{2+}$	Bicarbonaté calcique
D8	$r\text{Cl}^-$ , $r\text{HCO}_3^-$ , $r\text{SO}_4^{2-}$ $r\text{Ca}^{2+}$ , $r(\text{Na}^++\text{k}^+)$ , $r\text{Mg}^{2+}$	Chloruré calcique
D10	$r\text{Cl}^-$ , $r\text{SO}_4^{2-}$ , $r\text{HCO}_3^-$ $r\text{Ca}^{2+}$ , $r\text{Mg}^{2+}$ , $r(\text{Na}^++\text{k}^+)$	Chloruré calcique
FD4	$r\text{Cl}^-$ , $r\text{HCO}_3^-$ , $r\text{SO}_4^{2-}$ $r(\text{Na}^++\text{k}^+)$ , $r\text{Ca}^{2+}$ , $r\text{Mg}^{2+}$	Chloruré Sodique
EM2	$r\text{Cl}^-$ , $r\text{HCO}_3^-$ , $r\text{SO}_4^{2-}$ $r(\text{Na}^++\text{k}^+)$ , $r\text{Ca}^{2+}$ , $r\text{Mg}^{2+}$	Chloruré Sodique
M11	$r\text{HCO}_3^-$ , $r\text{Cl}^-$ , $r\text{SO}_4^{2-}$ $r\text{Ca}^{2+}$ , $r(\text{Na}^++\text{k}^+)$ , $r\text{Mg}^{2+}$	Bicarbonaté calcique
MS1	$r\text{HCO}_3^-$ , $r\text{Cl}^-$ , $r\text{SO}_4^{2-}$ $r\text{Ca}^{2+}$ , $r(\text{Na}^++\text{k}^+)$ , $r\text{Mg}^{2+}$	Bicarbonaté calcique
M1'	$r\text{HCO}_3^-$ , $r\text{Cl}^-$ , $r\text{SO}_4^{2-}$ $r\text{Ca}^{2+}$ , $r\text{Mg}^{2+}$ , $r(\text{Na}^++\text{k}^+)$	Bicarbonaté calcique
M5	$r\text{HCO}_3^-$ , $r\text{Cl}^-$ , $r\text{SO}_4^{2-}$ $r\text{Ca}^{2+}$ , $r\text{Mg}^{2+}$ , $r(\text{Na}^++\text{k}^+)$	Bicarbonaté calcique
OLD1	$r\text{HCO}_3^-$ , $r\text{Cl}^-$ , $r\text{SO}_4^{2-}$ $r\text{Ca}^{2+}$ , $r\text{Mg}^{2+}$ , $r(\text{Na}^++\text{k}^+)$	Bicarbonaté calcique
OLD2	$r\text{HCO}_3^-$ , $r\text{SO}_4^{2-}$ , $r\text{Cl}^-$ $r\text{Ca}^{2+}$ , $r\text{Mg}^{2+}$ , $r(\text{Na}^++\text{k}^+)$	Bicarbonaté calcique
OLD9	$r\text{HCO}_3^-$ , $r\text{SO}_4^{2-}$ , $r\text{Cl}^-$ $r\text{Ca}^{2+}$ , $r\text{Mg}^{2+}$ , $r(\text{Na}^++\text{k}^+)$	Bicarbonaté calcique

Tableau 30 : Facies chimiques

Nom du forage	Facies chimique
T1 - T4 - T7 - T8 - T11 - D3 - D4 M11 - MS1 - M1' - M5 - OLD1 - OLD2 - OLD9	Bicarbonaté calcique
T5 - D8 - D10	Chloruré calcique
FD4 - EM2	Chloruré sodique
T22 - D1	Sulfaté calcique

5. 2. Diagramme de Piper

Le diagramme de Piper permet la visualisation d'un grand nombre d'analyse et de suivre l'évolution du chimisme de eaux des nappes d'eaux.

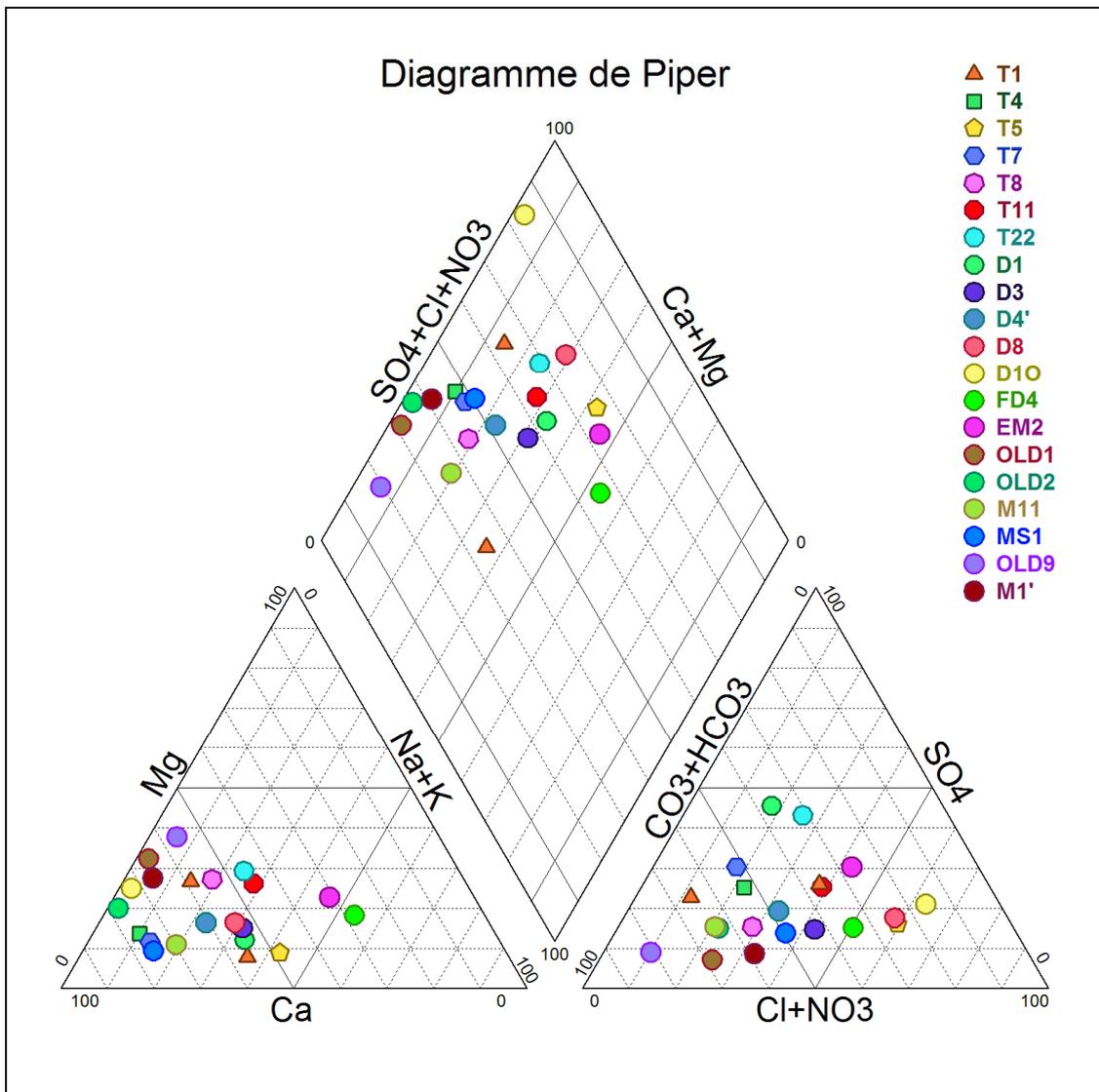


Figure 35: Diagramme de piper

Le diagramme de piper correspondant aux échantillons des 21 points d'eau représentés dans la figure 35. On observe dans le triangle des anions une dispersion, avec la légère dominance des bicarbonates par rapport aux sulfates, ce qui traduit les faciès bicarbonaté, qui a comme origine la dissolution des formations carbonatés et évaporitiques. Dans le triangle des cations, l'ion dominant est le calcium. Ces résultats sont confirmés dans le losange où nous avons un faciès global bicarbonaté calcique.

Cette représentation a mis en évidence les faciès chimiques de quatre grandes catégories d'eau de la zone d'étude, montrés dans le tableau 30 avec principalement le faciès bicarbonaté calcique qui prédomine avec un taux de 66.67% influencé par les formations carbonatés. Le faciès sulfaté calcique représente 9.5%, il est du probablement au lessivage des formations triasiques, le faciès chloruré calcique représentant 14.3% peut être expliqué par la présence des formations salifères du Mio-Plio-Quaternaire et enfin, 9.5% représente le taux du faciès chloruré sodique qui prend son origine dans les formations évaporitiques.

#### 6. Dureté des eaux échantillonnées

La dureté totale (TH: Titre Hydrométrique) est exprimée en degrés français selon la formule suivante :  $TH \text{ en } ^\circ F = 5 (Ca^{2+} + Mg^{2+})$

Avec  $Ca^{2+}$  et  $Mg^{2+}$  en milliéquivalent par litre.

Selon la dureté des eaux des échantillons des points d'eau, on obtient dans le tableau 31 la classification des eaux en fonction de la dureté:

**Tableau 31 : Classification des eaux en fonction de la dureté**

Classes de dureté (°f)	0 à 7	7 à 15	15 à 25	25 à 32	32 à 42	42 et +
Catégories d'eau	Très douce	Douce	Moyennement dure	Assez dure	Dure	Très dure
Forage	/	/	T8-M5	OLD2-OLD9	T7-T11-D1-FD4	T1-T4-T5T22-D3-D4-D8-D10-EM2-OLD1-M11-MS1

L'eau très dure est l'eau la plus répandue, elle constitue 76% des points d'eaux souterraines dans notre région d'étude, elle englobe les forages T1-T4-T5T22-D3-D4-D8-D10-EM2-OLD1-M11-MS1 à cause de la nature lithologique du réservoir, le reste est classées de moyennement dure à dure.

## 7. Les rapports caractéristiques

Les rapports ioniques ont été calculés à partir des résultats des analyses chimiques de l'ensemble des points d'eau, les concentrations sont en milliéquivalents par litre.

L'étude des rapports caractéristiques les plus courants en hydrochimie permet de préciser le milieu de provenance des eaux souterraines et de comparer leurs concentrations en éléments chimiques. L'étude a concerné les rapports suivants :  $\text{Ca}^{2+}/\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}/\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}/\text{Cl}^-$ , et  $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$ .

### 7. 1. Couple $\text{Ca}^{2+} - \text{SO}_4^{2-}$ :

L'examen de cette relation montre une évolution proportionnelle des sulfates et du calcium (Fig. 36). Cette relation traduit la dissolution des sulfates de calcium d'origine évaporitique.

Cette relation confirme l'existence du faciès sulfaté calcique.

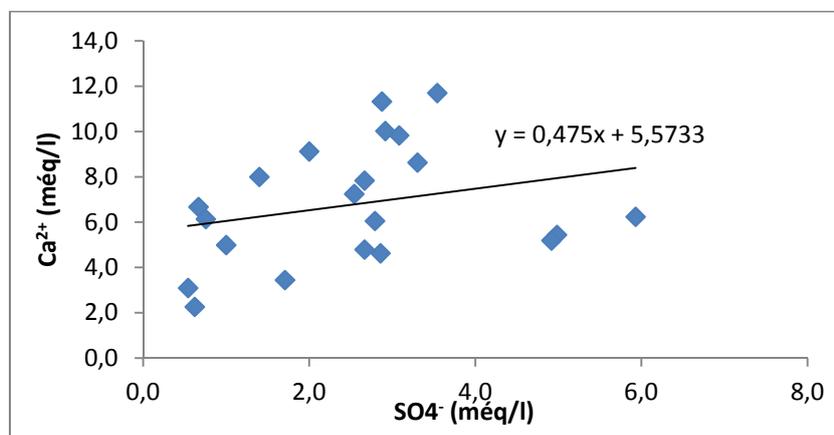


Figure 36: Relation  $\text{Ca}^{2+} - \text{SO}_4^{2-}$

### 7. 2. Couple $\text{Ca}^{2+} - \text{HCO}_3^-$

L'examen de cette relation montre une évolution proportionnelle des bicarbonates et du calcium (Fig. 37). Cette relation traduit la dissolution des formations carbonatées d'âge crétacé. Cette relation confirme l'existence du faciès bicarbonaté calcique.

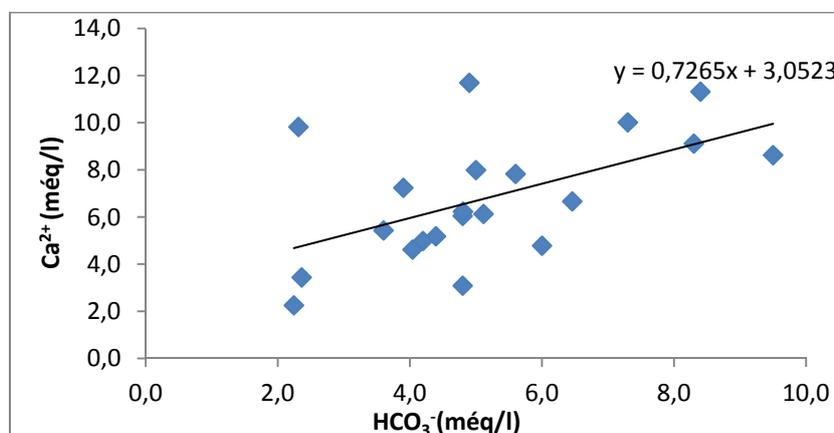


Figure 37 : Relation  $\text{Ca}^{2+} - \text{HCO}_3^-$

### 7. 3. Couple $\text{Ca}^{2+}$ - $\text{Cl}^-$ :

L'examen de cette relation montre une évolution proportionnelle des chlorures et du calcium (Fig. 38). Cette relation traduit la dissolution des formations salées du Mio-Plio-Quaternaire. Cette relation confirme l'existence du faciès chloruré calcique.

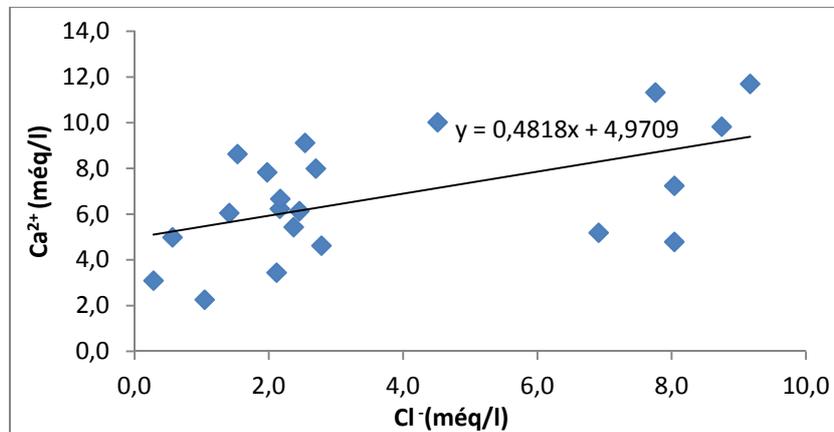


Figure 38 : Relation  $\text{Ca}^{2+}$  -  $\text{Cl}^-$

### 7. 4. Couple $\text{Na}^+$ - $\text{Cl}^-$ :

L'examen de cette relation montre une évolution proportionnelle des chlorures et du sodium (Fig. 39). Cette relation traduit la dissolution d'un chlorure de sodium d'origine salifère. Cette relation confirme également l'existence du faciès chloruré sodique

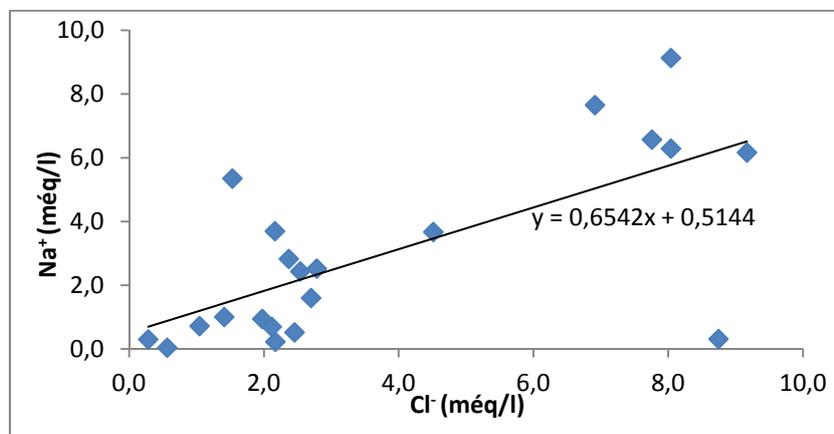


Figure 39 : Relation  $\text{Na}^+$  -  $\text{Cl}^-$

## 8. L'indice d'échange de base

L'utilisation de l'indice d'échange de base (i.e.b.) permet de mettre en évidence les modifications du chimisme de l'eau au cours de son trajet souterrain. Par définition, l'i.e.b est le rapport entre les ions échangés et les ions de même nature primitivement existants dans l'eau. Il est obtenu par la relation suivante (Scholler, 1956):

$$\text{i. e. b.} = \frac{[\text{rCl}^- - \text{r}(\text{Na}^+ + \text{K}^+)]}{\text{rCl}^-}$$

- Si l'i.e.b. est négatif alors les ions  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$  de l'eau sont échangés contre les ions  $\text{K}^+$  et  $\text{Na}^+$  des formations encaissantes.
- Si l'i.e.b. est positif alors les ions  $\text{Na}^+$  et  $\text{K}^+$  de l'eau sont remplacés par les ions  $\text{Mg}^{2+}$  et  $\text{Ca}^{2+}$  des formations encaissantes.
- Si l'i.e.b. = 0 alors il y a un équilibre entre les compositions chimiques de l'eau et celle du terrain encaissant.

**Tableau 32 : les indices d'échanges de bases des eaux de forages**

N° Forage	T1	T4	T5	T7	T8	T11	T22	D1	D3	D4'	D8
<b>i.e.b</b>	-2.64	0.47	0.21	0.24	0.25	-0.03	-0.23	-0.77	0.14	0.16	0.32
N° Forage	D1O	FD4	EM2	OLD1	OLD2	M11	MS1	OLD9	M1'	M5	
<b>i.e.b</b>	0.96	-0.14	-0.12	0.87	0.75	0.01	0.41	-0.15	0.78	0.60	

Les résultats de l'i.e.b. sont résumés dans le (tab. 32), 67% des échantillons montrent des valeurs d'i.e.b positives, donc un déficit de  $\text{Na}^+$  et  $\text{K}^+$  par rapport au  $\text{Cl}^-$  et une solubilisation du calcium. 33% des valeurs d'i.e.b sont négatives elles correspondent aux zones où il y a un échange du  $\text{Ca}^{2+}$  de l'eau contre  $\text{Na}^+$  de l'aquifère.

### 9. Analyse en composantes principales ACP

L'ACP, est une méthode largement utilisée dans de très nombreux domaines se rapportant à l'environnement pour mettre en évidence les associations entre les individus et/ou les variables (Weening et Erikson1994). L'analyse en composantes principales a été utilisée par de nombreux chercheurs afin de mettre en évidence sur des cours d'eaux les influences saisonnières et anthropiques.

L'ACP a été effectué sur une matrice de données constituée de 7 variables ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  et  $\text{HCO}_3^-$ ) et de 21 individus.

Le coefficient de corrélation entre la variable et l'axe considéré présente l'apport de la variable dans la composition de l'axe factoriel principal, autant que ce coefficient est important, autant que la variable contribue à la conception de cet axe.

**Tableau 33: Matrice des corrélations**

	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>
Ca <sup>2+</sup>	1						
Mg <sup>2+</sup>	0,245	1					
Na <sup>+</sup>	0,299	0,373	1				
K <sup>+</sup>	-0,116	-0,059	0,097	1			
Cl <sup>-</sup>	<b>0,541</b>	<b>0,601</b>	<b>0,690</b>	-0,182	1		
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	<b>0,544</b>	-0,002	0,357	0,115	0,001	1	
SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	0,268	0,301	<b>0,544</b>	0,282	0,359	0,043	1

L'examen du tableau 33 montre des rapports de corrélations très significatifs, notamment entre les éléments de la minéralisation, qui pourrait apporter des compléments d'information sur l'état des eaux souterraines. Le calcium est positivement corrélée avec les Bicarbonates ( $r=0.544$ ), les Chlorures ( $r =0.541$ ), représentant la minéralisation des eaux dont l'origine est liée aux caractéristiques lithologiques de l'aquifère de Taoura. Le sodium est positivement corrélée au chlorures ( $r =0.690$ ), les sulfates ( $r =0,544$ ) et les chlorures sont très positivement liées au magnésium ( $r =0,601$ ), par présence des formations évaporitiques.

Une valeur propre représente la variation des individus sur l'axe correspondant. Le premier axe principal F1 explique seul 40.38 % de la variation totale, F2 explique 18.97 % de la variance totale a une valeur propre. Le pourcentage cumulé est représentatif, de 59.35% de l'information totale (Tab. 34).

**Tableau 34: valeurs propres et pourcentage des cinq axes principaux**

Numéro d'Axe	Valeur propre	% Total	Cumulative
1	2,826	40,381	2,826
2	1,328	18,974	4,154
3	1,261	18,021	5,416
4	0,603	8,623	6,020
5	0,552	7,898	6,573

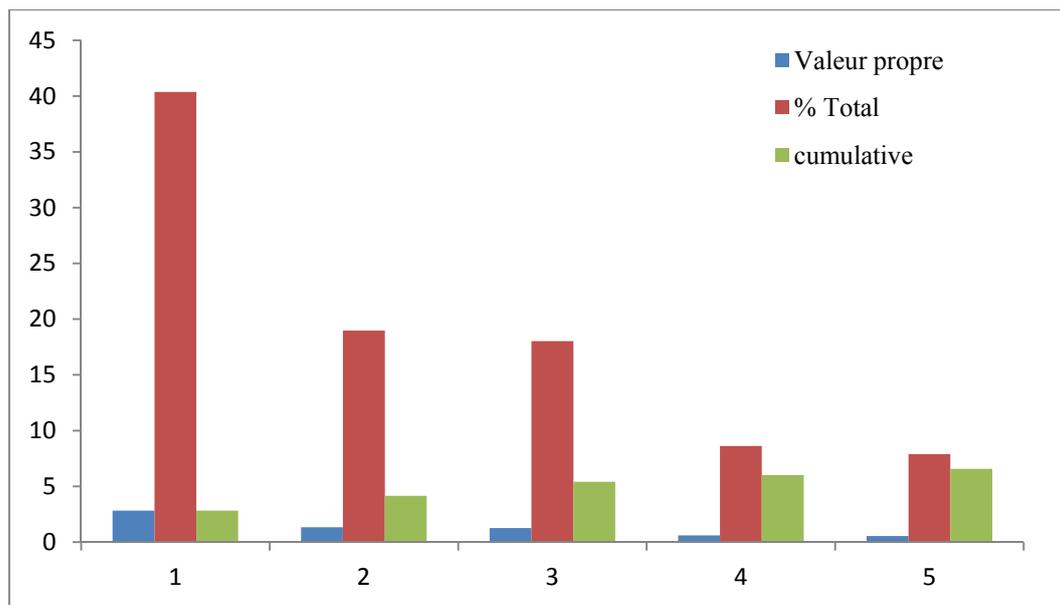


Figure 40: Histogramme des valeurs propres

Tableau 35: Corrélations entre les variables et les axes principaux

	Factor 1 (40.38%)	Factor 2 (18.97%)	Factor 3 (20.02%)	Factor 4 (8.62%)	Factor 5 (7.89%)
<b>Ca<sup>2+</sup></b>	-0,679564	-0,196687	-0,529104	0,045899	0,437212
<b>Mg<sup>2+</sup></b>	-0,643444	0,422352	0,149578	0,568996	-0,046353
<b>Na<sup>+</sup></b>	-0,827930	-0,107298	0,166073	-0,264505	-0,445491
<b>K<sup>+</sup></b>	-0,017081	-0,653268	0,623329	0,320518	0,037747
<b>C<sup>1-</sup></b>	-0,849237	0,395702	-0,026089	-0,047851	-0,031393
<b>HCO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	-0,380675	-0,697671	-0,514168	0,118332	-0,218078
<b>SO<sub>4</sub><sup>-</sup></b>	-0,631675	-0,171867	0,527261	-0,297939	0,333367

**Tableau 36: Corrélations entre les individus et les axes principaux**

	<b>Factor 1 (40.38%)</b>	<b>Factor 2 (18.97%)</b>	<b>Factor 3 (20.02%)</b>	<b>Factor 4 (8.62%)</b>	<b>Factor 5 (7.89%)</b>
<b>T1</b>	-0,63101	-3,24660	-0,10907	-0,06216	-0,33178
<b>T4</b>	0,73803	-0,68209	-0,43654	-0,26383	0,71077
<b>T5</b>	-0,88414	0,69299	-0,05029	-1,42403	-0,45573
<b>T7</b>	1,33674	-0,39496	-0,11957	-0,85909	0,47774
<b>T8</b>	2,79190	0,93750	0,44037	-0,42074	-0,59177
<b>T11</b>	0,42830	-1,37196	2,62640	1,56742	0,02390
<b>T22</b>	-0,43218	0,74107	1,40830	0,09505	0,62088
<b>D1</b>	-0,26817	-0,95823	1,42855	-1,36983	0,88440
<b>D3</b>	-2,83789	-0,67894	-1,11261	0,52997	-0,25575
<b>D4'</b>	-1,27190	-0,72251	-0,80501	0,46287	0,32555
<b>D8</b>	-2,93834	1,00600	-0,56074	0,03122	0,55864
<b>D10</b>	-1,09806	2,03016	-0,05166	0,57234	1,65265
<b>FD4</b>	-1,96726	0,79589	0,29755	-0,39972	-1,99948
<b>EM2</b>	-2,21835	0,81873	1,69553	-0,13339	-0,67098
<b>OLD1</b>	0,68692	0,41738	-1,17251	1,53158	-0,27715
<b>OLD2</b>	2,19714	-0,11676	-0,14094	0,07631	0,00708
<b>M11</b>	0,02775	-1,34503	-1,56834	-0,12531	0,05431
<b>MS1</b>	1,02845	0,24908	-1,45159	-0,89064	0,26609
<b>OLD9</b>	2,24401	0,68273	-0,51996	0,33969	-0,79471
<b>M1'</b>	1,09579	0,78726	-1,01160	0,65492	-0,20660
<b>M5</b>	1,97227	0,35828	1,21373	0,08739	0,00194

### 9. 1. Analyse du cercle ACP (F1 x F2)

Le cercle de corrélation formé par les axes F1 et F2 (Fig. 41) affiche 59.35 % de l'information totale, montre, selon l'axe F1 (40.38 %) et l'axe F2 (18.97 %) les observations suivantes : La répartition des variables mesurées sur le plan des axes F1 et F2 - montre que le long de l'axe F1 se regroupe dans un ensemble la majorité des variables en rapport avec la minéralisation. Il s'agit des chlorures, des sulfates, du calcium, le sodium et du magnésium qui représente l'information relative à la minéralisation totale des eaux de l'aquifère. Le long de l'axe F2 se regroupe les bicarbonates, et le potassium. L'axe F2 résume l'information relative à l'influence de la dissolution des formations évaporitiques salifères et carbonatées au niveau des zones d'alimentation.

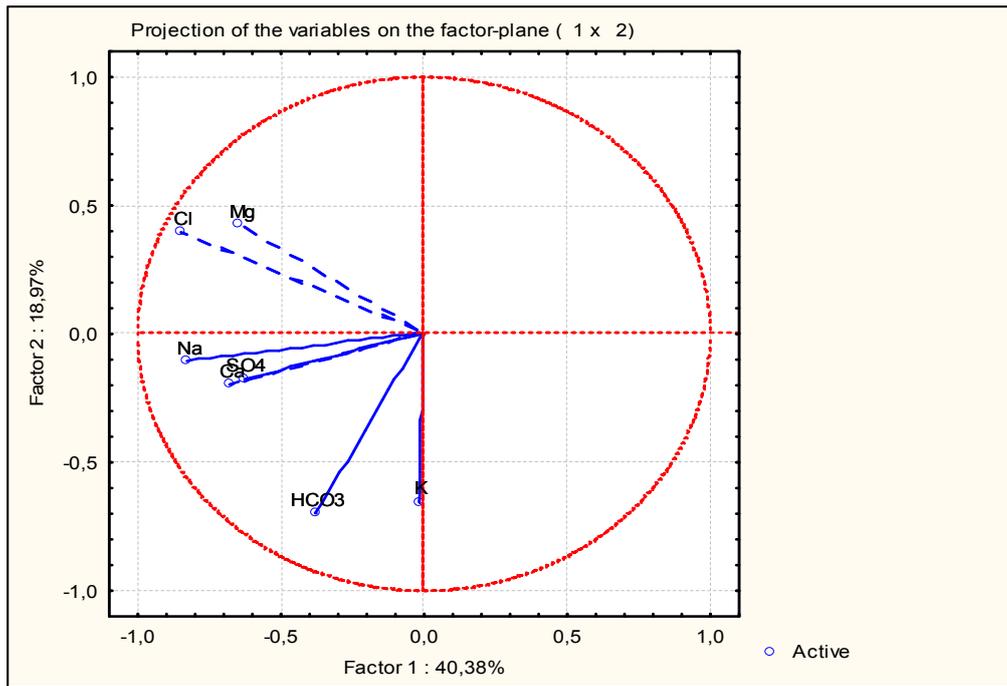


Figure 41: Cercle des corrélations des variables dans le plan F1xF2

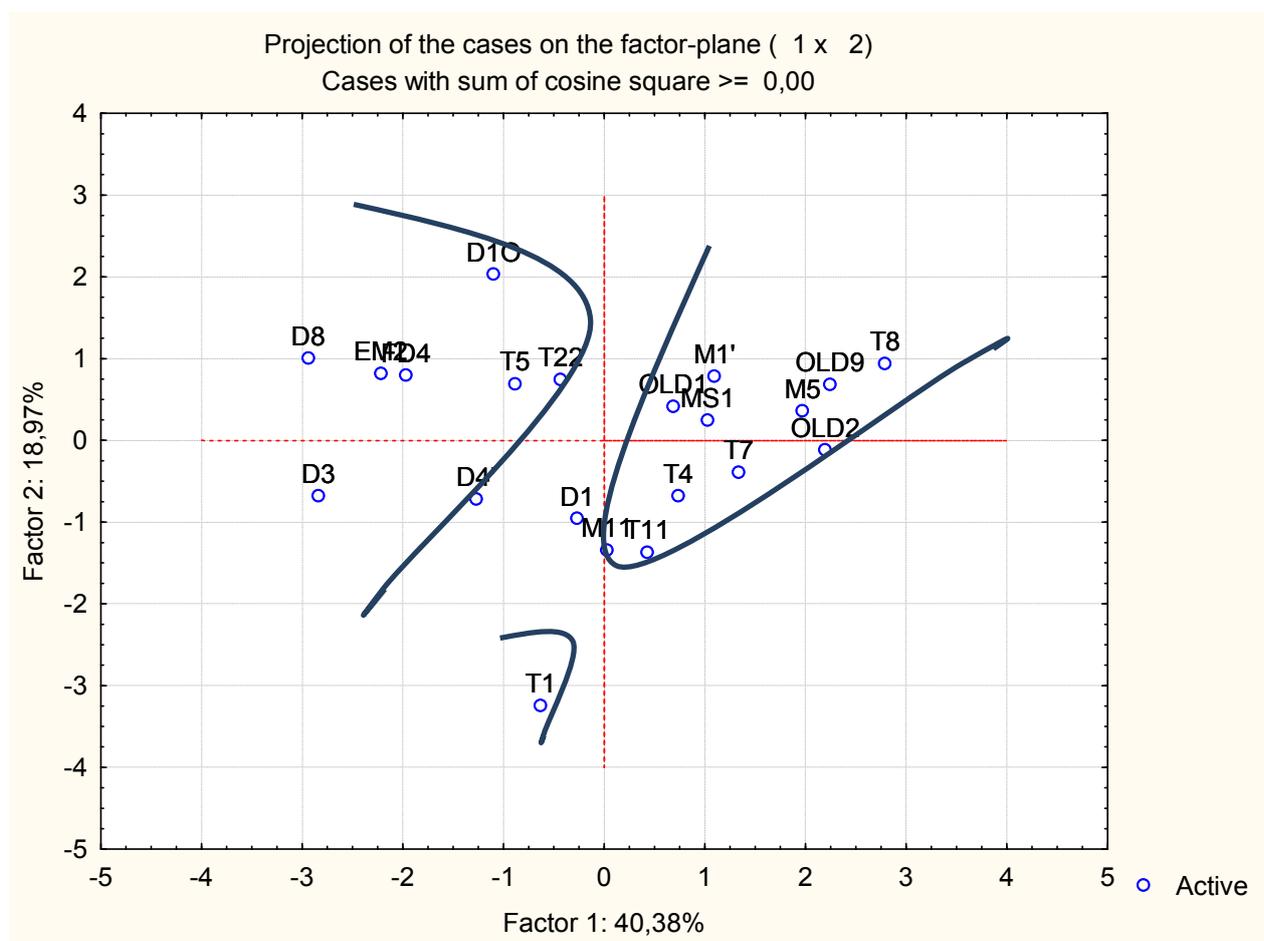
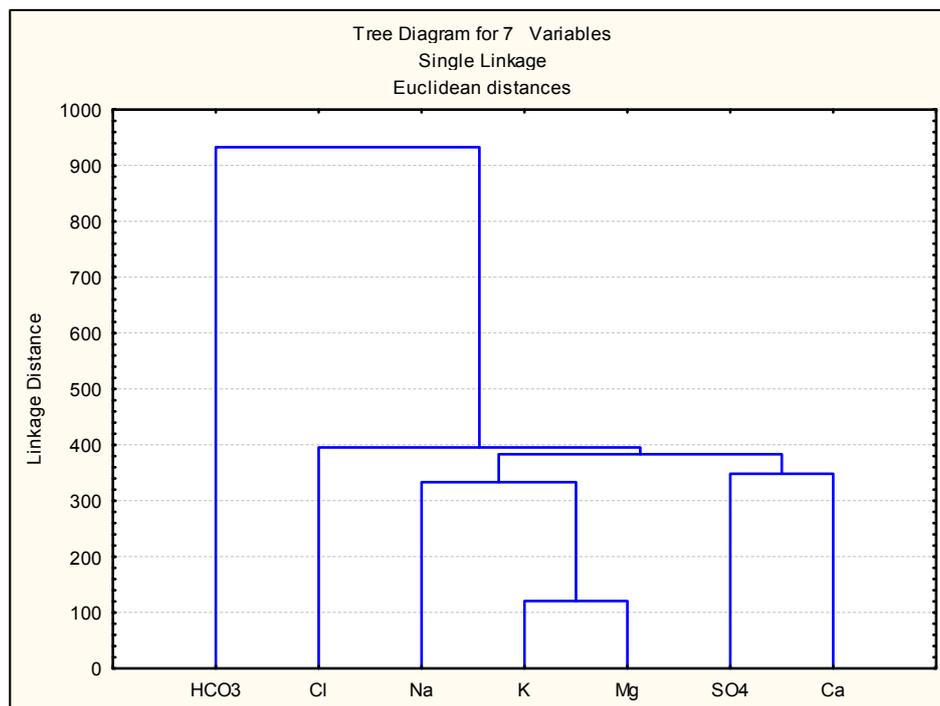


Figure 42: Projection des individus sur le plan factoriel F1x F2

La projection des individus sur le plan F1xF2 (Fig. 42) montre un nuage de points : T1, T7, T4, T11 et T8 captant l'aquifère de Taoura et trois autres forages qui captent la nappe des calcaires dolomitiques de l'éocène d'Ouled Driss (OLD9 DLD2 OLD1), et un autre nuage de points moins dense que le précédent, sont les forages qui captent la nappe de Taoura au niveau de Dréa et le dernier point c'est le forage T1 dans l'aquifère de Taoura.

### 10. Classification Ascendante Hiérarchique des eaux souterraines (CAH)

Le dendrogramme (Fig. 42) confirme les résultats de l'ACP et révèle deux groupes dont l'un est représenté par deux sous-groupes. Le premier groupe comprend :



**Figure 43: .Classification ascendante hiérarchique des observations-Variables (C.A.H)**

Le regroupement des paramètres mesurés selon deux tendances :

- Un groupe principal représenté par les formations bicarbonatées du synclinal de Taoura
- Un groupe secondaire constitué par les variables restants, la liaison se fait comme suit :

Une dépendance entre calcium et les sulfates qui sont en relation étroite avec le magnésium et le potassium, ces deux couples sont liés au sodium, Le tout est en relation avec les Chlorures qui constituent les zones d'alimentation en bordures, ce groupe est relié aux bicarbonates.

## 11. Aptitude des eaux à l'irrigation

### 11. 1. Introduction

La concentration et la composition des constituants dissous dans les eaux souterraines déterminent sa qualité pour l'utilisation de l'irrigation. L'adéquation des eaux souterraines à l'irrigation est susceptible de réduire les effets des constituants minéraux contenus dans l'eau sur les plantes et le sol (Richards L.A.).

L'effet des sels sur le sol, provoquant des modifications de la structure du sol, de sa perméabilité et de son influence sur la croissance des plantes.

La zone d'étude comporte plusieurs aquifères, représentant des masses d'eau transfrontalières entre l'Algérie et la Tunisie.

Le but recherché dans cette partie du travail est de déterminer si ces eaux conviennent à l'irrigation. L'aptitude de l'eau à l'irrigation est fonction non seulement de la concentration totale en sels, mais aussi par le type de sels et les ions qui la constituent.

### 11. 2. Les Facteurs déterminant l'usage agricole de l'eau

Plusieurs paramètres régissent la description et la classification des eaux destinées à l'irrigation. Les paramètres chimiques importants pour juger le degré d'utilisation de l'eau pour l'irrigation sont le sodium (**% Na**), le taux d'adsorption du sodium (**SAR**), le carbonate de sodium résiduel (**RSC**) et l'indice de perméabilité (**PI**).

#### 11. 2. 1. Le rapport d'adsorption du sodium (SAR)

Paramètre chimique important pour estimer le degré d'adéquation de l'eau pour l'irrigation en tant que teneur en sodium ou risque d'alcali pour les cultures, qui est exprimé en taux d'adsorption de sodium (SAR).

Les ions calcium et magnésium sont importants car ils tendent à contrer l'effet du sodium. Une concentration plus élevée de SAR entraîne une dégradation de la structure physique du sol. Le sodium est adsorbé et s'attache aux particules de sol. Le sol devient alors dur et compact lorsqu'il est sec et imperméable à la pénétration de l'eau (Wilcox, L.V, 1948).

Le SAR est calculé à partir du rapport sodium sur calcium et magnésium, il est défini par la relation suivante:

$$\text{SAR} = \frac{\text{Na}^+}{\sqrt{(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/2}}$$

**Tableau 37: Le risque du SAR dans l'eau d'irrigation**

Le risque du SAR dans l'eau d'irrigation		
	SAR	Notes
<b>Nul</b>	<b>&lt; 3.0</b>	Pas de restriction sur l'utilisation d'eau
<b>Léger à modéré</b>	<b>3.0 - 9.0</b>	Entre 3 et 6, une attention particulière doit être portée sur les récoltes sensibles. Entre 6 et 8 du gypse doit être utilisé. Récoltes non sensibles. Des échantillons de sol doivent être prélevés et examinés tout les 1 ou 2 jours pour déterminer s'il y a une augmentation des teneurs en Sodium.
<b>Elevé</b>	<b>&gt; 9.0</b>	Dommage sévère.

Les résultats du SAR calculés, sont récapitulés dans le tableau de classification de la qualité des eaux souterraines en fonction de son aptitude à l'irrigation (tab. 40), 95 % des échantillons des points d'eau de SAR sont comprises de 0 à 3, avec aucune restriction sur l'utilisation d'eau, toutefois, les points FD4 et EM2 de valeurs 4.6 et 3.6 respectivement, qui nécessite une attention particulière doit être portée sur les récoltes sensibles.

### 11. 2. 2. Pourcentage de sodium (Na %)

Le pourcentage de sodium (% Na) est également largement utilisé pour évaluer l'adéquation de la qualité de l'eau pour l'irrigation. L'excès de sodium dans les eaux souterraines entraîne des effets indésirables, car le Na réagit avec le sol pour réduire sa perméabilité et favorise une croissance faible voire nulle de la plante. Le % Na est calculé en respectant les proportions relatives des cations présents dans l'eau, où les concentrations d'ions sont exprimées en méq/l

$$\text{Na \%} = \frac{\text{Na}^+ + \text{K}^+}{\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{Na}^+ + \text{K}^+} \quad (\text{en méq/l})$$

Les valeurs calculées de Na% vont de 2.2 % minimum à 53.7 au maximum, avec une moyenne de 21.1%, D'une manière générale, le % de Na ne devrait pas dépasser 60% dans les eaux d'irrigation

### 11. 2. 3. Carbonate de sodium résiduel (RSC)

La somme excédentaire de carbonate et de bicarbonate dans les eaux souterraines par rapport à la somme de calcium et de magnésium influence également l'aptitude des eaux souterraines à l'irrigation.

- Le RSC est un paramètre important pour évaluer l'adéquation de l'eau d'irrigation, se calcule grâce à l'équation suivante :

$$\text{RSC} = (\text{CO}_3^- + \text{HCO}_3^-) - (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$$

- C'est un autre moyen de calculer la teneur en sodium grâce au  $\text{Mg}^{2+}$  et au  $\text{Ca}^{2+}$ . Cette valeur peu apparaitre dans certains rapport d'analyse d'eau

**Tableau 38: niveaux du risque dû au carbonate de sodium résiduel**

Niveau du risque	Nul	Léger à modéré	Sévère
RSC (méq/l)	<1,25	1,25-2,5	>2,5

Les classifications des eaux souterraines à des fins d'irrigation selon les valeurs RSC indiquent que la totalité des échantillons très inférieure à 1,25 méq/l (tab. 40), ce qui indique que les catégories de qualité sans danger pour l'irrigation.

#### 11. 2. 4. Indice de perméabilité (IP)

La perméabilité du sol est affectée par l'utilisation à long terme d'eau d'irrigation à forte teneur en sel, influencée par les teneurs en  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  et  $\text{HCO}_3^-$  du sol. L'IP est défini par l'équation suivante

$$\text{IP \%} = \frac{(\text{Na}^+ + \sqrt{\text{HCO}_3^-}) * 100}{(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{Na}^{2+})}$$

Avec  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  et  $\text{HCO}_3^-$  en méq/l

**Tableau 39: Indice de perméabilité (IP)**

Norme	Nombre d'échantillons	Taux (%)	Classe
<b>0 &lt; IP &lt; 20</b>	1	4.8	Excellente
<b>20 &lt; IP &lt; 40</b>	9	42.9	Bonne
<b>40 &lt; IP &lt; 60</b>	10	47.6	Admissible
<b>60 &lt; IP &lt; 80</b>	1	4.8	Douteuse

Source : Doneen 1961

Les valeurs de l'IP calculée de la classe excellente à bonne représentent 47.6 % des échantillons des points d'eau, et de 47.6% pour la classe admissible, et de 4.8 % dans la classe douteuse, il s'agit des eaux du forage FD4 (Tab. 40).

A travers cette classification, les eaux de la région, étant qualifiés de bonne à admissible, et par conséquent elles peuvent être utilisés pour l'irrigation sans aucun souci.

### 11. 2. 5. Calculs des paramètres

Pour faciliter l'opération de classification, l'ensemble des données des paramètres liés à l'aptitude des eaux à l'irrigation, qui sont calculés par les méthodes précédemment cités sont récapitulés dans le tableau suivant:

**Tableau 40: Classification de la qualité des eaux souterraines en fonction de son aptitude à l'irrigation.**

Nom du forage	SAR	Na%	RSC	IP%	CE $\mu\text{S/cm}$
T1	2.4	36.2	-0.3	55.5	1594.6
T4	0.4	10.1	-3.6	32.5	1074.5
T5	3.0	42.5	-4.7	55.6	1550.0
T7	0.5	13.4	-2.2	40.0	943.1
T8	0.6	18.8	-1.2	53.8	1850.0
T11	1.3	28.3	-3.2	46.2	2070.0
T22	1.3	24.6	-5.3	40.3	2660.0
D1	1.9	33.4	-2.8	52.0	1253.5
D3	2.4	31.5	-6.1	44.9	2001.7
D4'	1.5	22.8	-5.4	38.8	1584.3
D8	2.2	29.0	-10.3	39.2	2050.0
D10	0.1	2.7	-10.9	13.5	1269.4
FD4	4.6	53.7	-1.9	67.9	1800.0
EM2	3.6	46.4	-4.6	58.6	1600.0
OLD1	0.1	2.7	-3.5	27.1	1002.1
OLD2	0.0	2.2	-2.1	33.1	530.0
M11	1.1	19.2	-2.3	40.9	1270.0
MS1	0.8	15.1	-4.0	36.2	1073.1
OLD9	0.2	5.9	-0.4	45.6	550.0
M1'	0.3	5.9	-3.6	30.2	906.6
M5	0.4	14.5	-2.6	39.2	519.6
<b>Max.</b>	<b>4.6</b>	<b>53.7</b>	<b>-0.3</b>	<b>67.9</b>	<b>2660.0</b>
<b>Min.</b>	<b>0.0</b>	<b>2.2</b>	<b>-10.9</b>	<b>13.5</b>	<b>519.6</b>
<b>Moy.</b>	<b>1.4</b>	<b>21.9</b>	<b>-3.9</b>	<b>42.4</b>	<b>1388.2</b>
<b>Ecart Type</b>	<b>1.3</b>	<b>15.0</b>	<b>2.7</b>	<b>12.2</b>	<b>567.8</b>

### 11. 3. Aptitude des eaux à l'irrigation

Deux méthodes ont été adoptées pour la classification des eaux souterraines du bassin versant transfrontalier de la Medjerda, cités ci-dessous

1. La méthode de RICHARDS, il met en évidence différentes classes d'eau qui a été définies sur la base du taux d'absorption de sodium (S.A.R) et sur la concentration de l'eau sous la forme de la conductivité électrique.

2. La classification de Wilcox fondée sur la conductivité électrique et la teneur en sodium dans l'eau exprimée en pourcentage.

#### 11. 3. 1. Classification des eaux par la méthode de Richards (Riverside)

Les valeurs obtenues à partir des échantillons analysés ont été reportés sur le diagramme de Richards (Fig. 44).

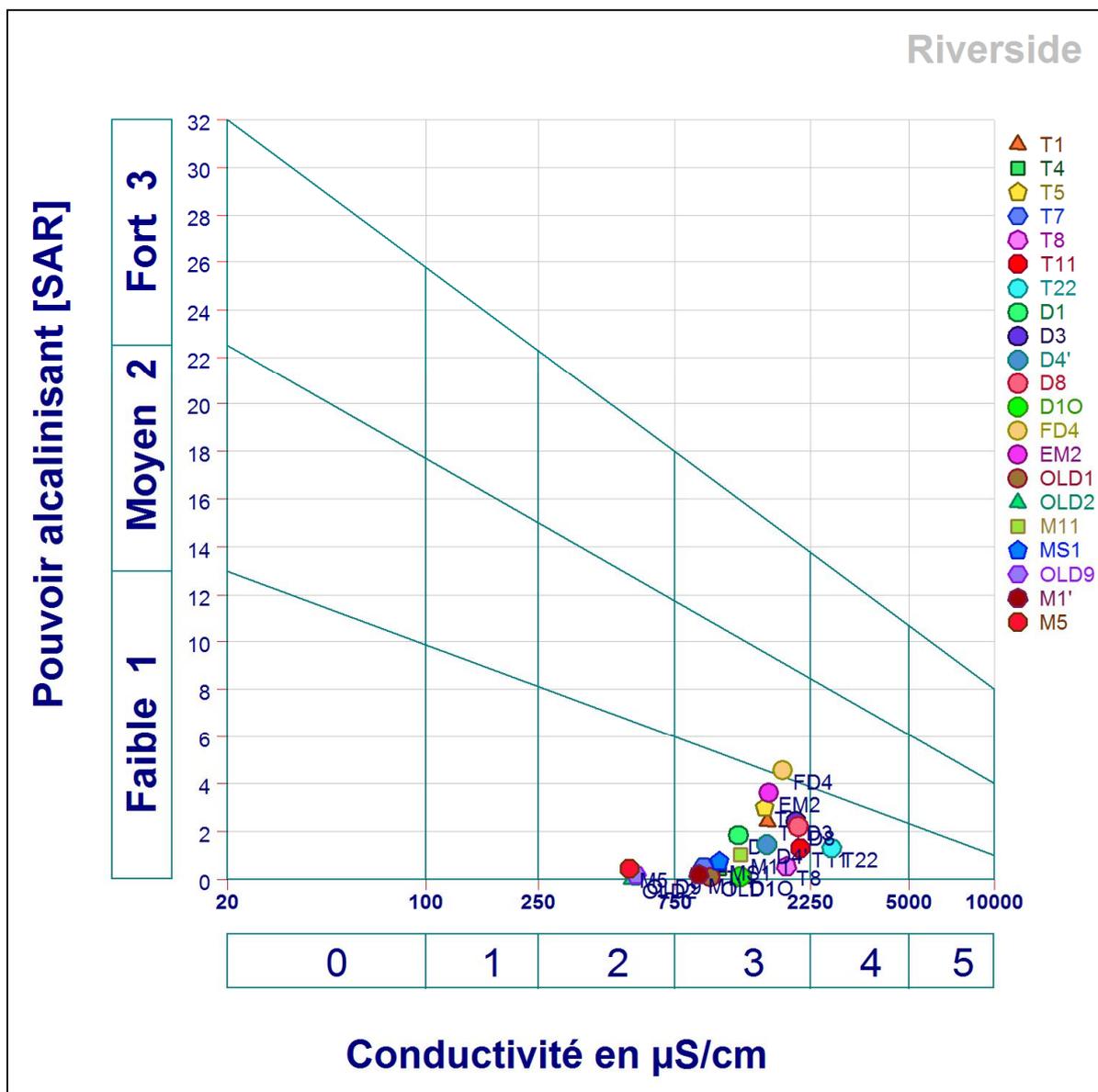


Figure 44: Classification des eaux destinées à l'irrigation (diagramme de Richards)

À partir de la conductivité électrique et la valeur du SAR, on a pu dégager la présence des trois classes suivantes :

**C2S1 (bonne):** Eau pouvant être utilisée sans contrôle particulier pour l'irrigation, représentée par les points d'eau suivants: M5, OLD9 et OLD2

**C3S1 (admissible):** En général, eau convenant à l'irrigation de cultures tolérantes au sel, sur des sols bien drainés. L'évolution de la salinité doit cependant être contrôlée. Dans notre cas les points d'eau sont : M1', OLD1, D10, T7, T4, MS1, M11, D4', T8, D1, T11, D8, T1, D3, T5, EM2 et FD4.

**C4S1 (médiocre):** En général, eau fortement minéralisée pouvant convenir à certaines espèces bien tolérantes aux sels sur des sols bien drainés et lessivés, caractéristiques des eaux de forage T22.

Il ressort de cette classification que les eaux des différentes nappes sont en général bonne à admissible pour l'irrigation, à l'exception du forage T22, très minéralisé et que ces eaux sont médiocres pour l'irrigation, convenir à certaines espèces.

### 11. 3. 2. Classification des eaux par la méthode de Wilcox

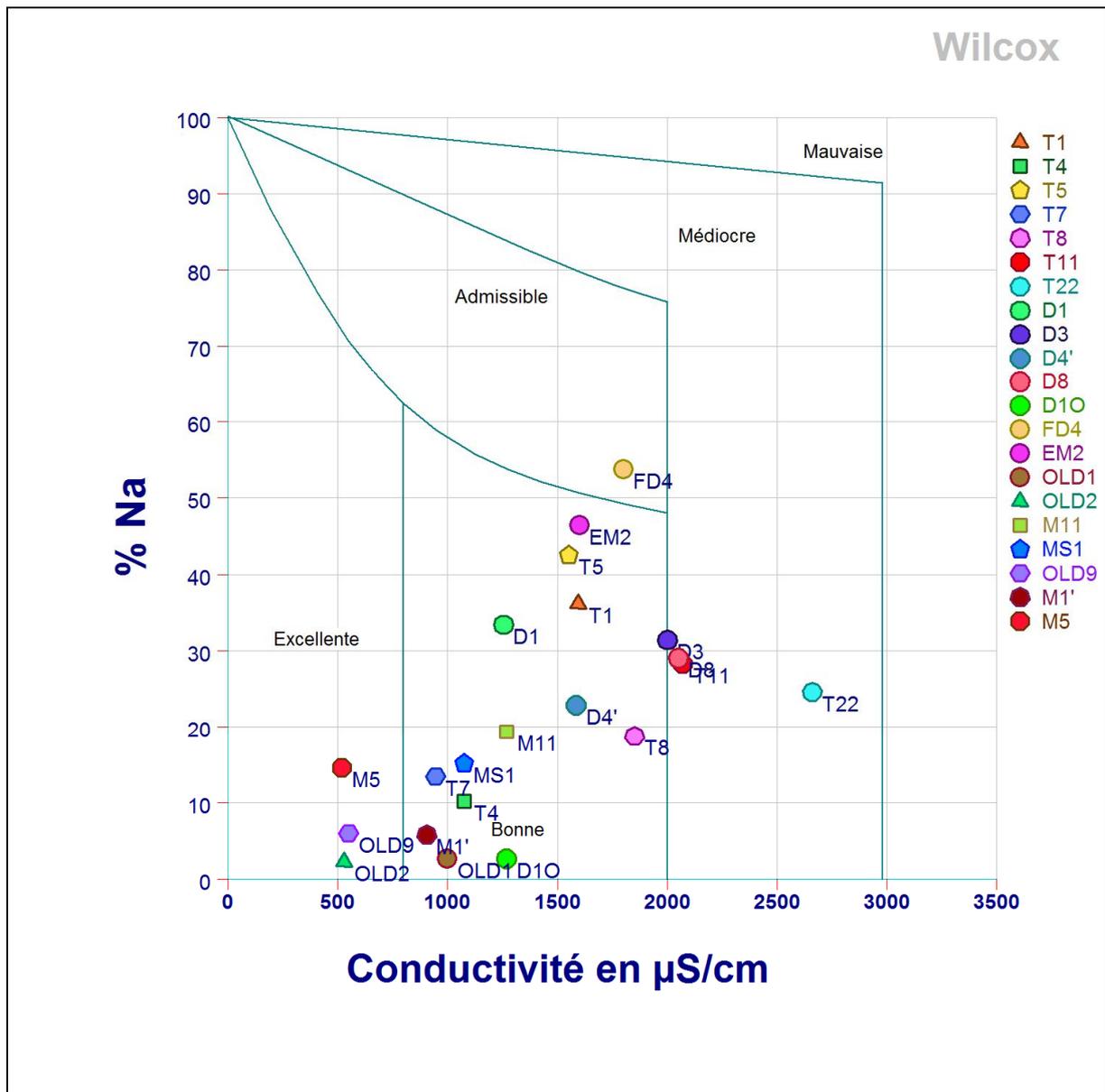
Le diagramme de Wilcox est basé sur la formule dite pourcentage de  $\text{Na}^+$ , elle s'écrit :

$$\text{Na}\% = \frac{\text{Na}^+ + \text{K}^+}{\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{Na}^+ + \text{K}^+} * 100$$

La classification de Wilcox est fondée sur la combinaison de la teneur en sodium dans l'eau et la conductivité électrique, généralement connu en %, cette classification définit cinq classes : excellente, bonne, admissible, médiocre et mauvaise.

Le diagramme selon la classification de Wilcox (fig. 45), montre que les eaux souterraines des deux nappes appartiennent aux quatre classes suivantes: Excellent, Bonne, Admissible et médiocre.

- **La classe Excellente** : représentée par les forages M5, OLD9 et OLD2 captant les formations des graviers du Mio-Pliocène au niveau de la nappe libre.
- **La classe Bonne** regroupe les points d'eau captant suivants: M1', OLD1, D10, T7, T4, MS1, M11, D4', T8, D1, T1, D3, T5, EM2
- **La classe Admissible**, représentée par un seul forage le FD4.
- **La classe Médiocre**, représentée par les trois forages D8, T11 et T22



**Figure 45: Classifications des eaux destinées à l'irrigation (diagramme de Wilcox)**

Donc le diagramme de Wilcox (fig.44), tracé avec Na% en fonction de la conductivité électrique CE, montre que les eaux des nappes d'eau de la zone d'étude sont modérément minéralisés, ils sont de qualité excellente, soit de 14.3% des points d'eau, à bonne de 66.67%, à admissible de 4.8%, et en fin médiocre de 14.3% des points d'eau.

## 12. Conclusion

L'étude hydrochimique des eaux souterraines de la zone d'étude nous a permis de tirer les points suivants: L'examen des cartes de distribution spatiales des concentrations des ions montre une prédominance des bicarbonates par rapport aux autres anions avec de valeurs allant de 136 à 580 mg/l, dépend principalement au lessivage des formations carbonatés, les chlorures et les sulfates se trouvent à un degré moindre. Pour les cations, le calcium est généralement l'élément dominant et ses teneurs variant de 45 à 235 mg/l, ceci est due essentiellement à la nature des terrains traversés, carbonatés ou gypseux.

Le faciès chimique bicarbonaté calcique prédomine avec un taux de 66.67%, les formations carbonatés peuvent être à l'origine de ce faciès, le faciès sulfaté calcique représente de 9.5%, est du probablement au lessivage des formations triasiques, les faciès chloruré calcique représentant 14.3%, peuvent être expliqué par la présence des formations salifères du Mio-Plio-Quaternaire.

L'eau très dure est l'eau la plus répandue, elle constitue 76% des échantillons des points d'eau de notre terrain d'étude.

L'indice d'échange de base nous a renseigné que 67% des échantillons montrent des valeurs d'i.e.b positives, donc un déficit de  $\text{Na}^+$  et  $\text{K}^+$  par rapport au  $\text{Cl}^-$  et une solubilisation du calcium, et que 33% des valeurs d'i.e.b sont négatives, elles correspondent aux zones où il y a un échange du  $\text{Ca}^{2+}$  de l'eau contre  $\text{Na}^+$  de l'aquifère.

Le dendrogramme illustre deux groupes dont l'un est un faciès à dominante sulfaté calcique, le deuxième groupe représente globalement les eaux du type bicarbonaté calcique.

L'étude de l'aptitude des eaux à l'irrigation a révélé que les eaux des nappes d'eau de la zone d'étude sont modérément minéralisés, ils sont de qualité excellente à bonne de 81%, et admissible à médiocre de 19%, selon la classification de wilcox.

## Chapitre V

# LES RESSOURCES EN EAU ET USAGERS DANS LE BASSIN VERSANT DE LA MEDJERDA

## 1. Les ressources en eau

### 1. 1. Introduction

La gestion de l'eau est l'activité qui consiste à planifier, développer, distribuer et gérer l'utilisation optimisée des ressources en eau, du point de vue quantitatif et qualitatif ([www.aquaportail.com](http://www.aquaportail.com)).

Cette partie repose sur l'étude quantitative des ressources en eau et leur usagers dans le bassin versant transfrontalier de la Medjerda, en présentant tous les apports hydriques superficiels (barrages, retenues collinaires et oueds) et souterraines (forages, puits et sources), sur une période d'une année de référence (2016), tout en basant sur les données fournies par les différents organismes chargés de la gestion de ces ressources d'une part, et d'autre part l'étude des usagers de ces ressources.

Bien que doté d'une situation géographique favorable, à l'extrême Nord-Est de l'Algérie, le bassin versant transfrontalier de la Medjerda, appartient à une zone de climat essentiellement tempéré.

Le régime des précipitations est caractérisé par une variabilité temporelle et spatiale. L'alternance des épisodes de sécheresse et de forte hydraulicité est un caractère de plus en plus marquant des régimes climatiques et hydrologiques du pays.

Les précipitations moyennes annuelles varient comme suit :

- P= 705.4 mm/an à la station de Souk Ahras
- P= 723.9 mm/an à la station de Ain Dalia.

### 1. 2. Les apports pluviométriques

Les apports pluviométriques sont ainsi inégalement répartis sur le territoire du bassin versant. Les apports pluviométriques en Hm<sup>3</sup>/an, d'une année moyenne, sont calculés à partir de pluviométrie moyenne estimée dans chaque station et la superficie contrôlée par chacune d'entre eux.

$$Q = P_i * 1000 * A_i$$

Avec :

Q : Apport pluviométrique en m<sup>3</sup>/an ;

P<sub>i</sub> : Pluviométrie moyenne de la station i en mm,

A<sub>i</sub> : Superficie du polygone contrôlé par la station i en Km<sup>2</sup>.

Les résultats sont récapitulés dans le tableau :

Tableau 41 : Répartition des apports pluviométriques annuels moyens

<i>Station pluviométrique</i>	<i>Pluviométrie Moyenne Pi (mm)</i>	<i>Superficie Ai (km<sup>2</sup>)</i>	<i>Apports pluviométriques Q (Hm<sup>3</sup>/an)</i>
Souk Ahras	705.4	976.5	688.82
Ain Dalia	723.9	529.1	383.01
<b>Moyenne du bassin versant</b>			<b>1071.83</b>

Dans ce contexte climatique, globalement les apports pluviométriques sur l'ensemble du territoire sont estimés à près de 1071.83 millions de m<sup>3</sup> par an, 59.45% de cet apport représente l'évapotranspiration (Fig. 46). Ces apports sont estimés à partir des résultats des ruissellements calculés par la méthode de Tixeront-Berkaloff et Romantchouk, et de l'infiltration tirée du bilan hydrique.

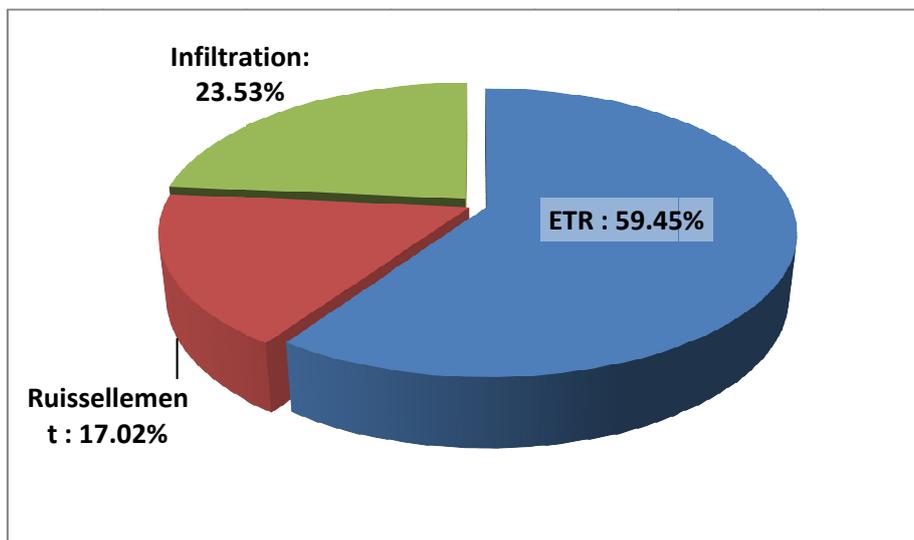


Figure 46: Répartition des apports en eau en % dans le bassin versant

### 1. 3. Les ressources naturelles renouvelables

Sur ces apports pluviométriques, la pluie utile (efficace) ou ressources renouvelables ne constituent que près de 434.6 millions de m<sup>3</sup>, soit près de 40.55% de ces apports qui contribuent aux écoulements d'eaux de surface et la recharge des nappes d'eau souterraines. Les ressources en eau de surface renouvelables sont estimées aux environs de 182.4 millions

de m<sup>3</sup> par an, soit 42% de ces apports utiles, et celles en eau souterraine est estimée à 252.2 millions de m<sup>3</sup> par an, soit 58%.

## 2. Les ressources en eau souterraines

Le bassin versant de la Medjerda comprend de nombreuses unités hydrogéologiques avec plusieurs aquifères, avec un apport annuel estimé à 252.2 Hm<sup>3</sup>, Néanmoins, son exploitation reste faible, ces nappes sont exploitées par de nombreux forages, puits et sources qui sont nombreuses dans notre site d'étude.

### 2. 1. Les forages:

Les eaux souterraines sont exploitées par plusieurs forages, qui sont destinés que ce soit en AEP et en AEI (Tab. 42), avec un débit annuel estimé à 5.2 Hm<sup>3</sup>/an, ou en irrigation, avec un débit annuel de 0.67 Hm<sup>3</sup>/an.

**Tableau 42: Forages destinés à l'AEP (ADE Souk Ahras 2016)**

Nom champ	Commune	Nombre de forage en exploitation	Type et nom de la nappe	Q (m <sup>3</sup> /j)	Année de mise en service	Qualité Eau	Nom des forages
<b>Mriss</b>	Souk Ahras	1	Nappe de Mriss	216	2003	Bonne	MRS 2
	Mechroha	1	Mechroha	160	2002	Bonne	MH1
<b>Taoura</b>	Taoura	9	Nappe de Taoura	1220	2008	Bonne	T1Bis
				1656	2006	Médiocre	T4
				2160	1980	Bonne	T1
				1800	1985	Bonne	T7
				1440	1981	Bonne	T8
				864	2007	Médiocre	T22
				1440	2015	Bonne	T 20
				1080	2015	Bonne	T 23
				1152	2011	Médiocre	T17 tert
	Dréa	3	Dréa	1440	1985	Bonne	D3
				4900	1988	Bonne	D'4
288				2007	Bonne	D10	
<b>Henchir Moussa</b>	Ouillen	1	Ouillen	130	1993	Moyenne	T11
<b>Heddada</b>	Heddada	3	Heddada	1800	1983	Bonne	MS1
				475	2008	Bonne	MS2
			BirLouhichi	194	1996	Médiocre	M1Bis
<b>Ouled Driss</b>	Ouled Driss	2	Ouled Driss	288	1992	Médiocre	OLD1
				288	2004	Bonne	OLD 2
				-	2008	-	OLD5

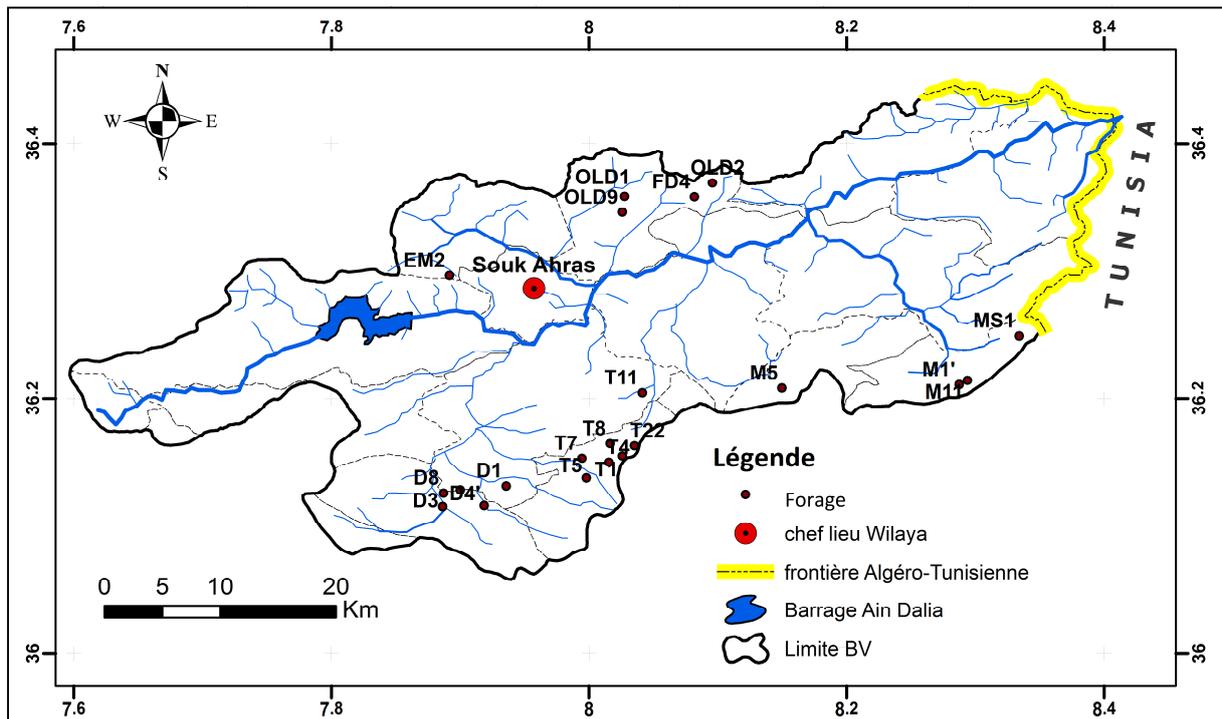


Figure 47: Inventaire des forages dans le bassin versant de la Medjerda

## 2. 2. Les sources

La zone d'étude compte un nombre de 15 sources, qui sont réparties sur 6 communes à travers la wilaya de Souk-Ahras, elles donnent en totalité un débit de 51,5 l/s, (tab. 43).

Ces sources sont destinées en grande majorité à l'alimentation en eau potable des dites communes.

Tableau 43: Inventaire des sources appartenant au bassin de la Medjerda exploitées par la DRE Souk-Ahras 2016

Dénomination	Localisation	Commune	Q (l/s)	Destination
El Bouaa	Ain Zana	Ain Zana	10	AEP Ain Zana
Ras El Kef	Ouled Moumen	Ouled Moumen	5.5	AEP O. moumen
El Foudh	El Foudh	Ouled Moume,	3	AEP Zone Eparses
Ain Grigen	Zaarouria	Zaarouria	5	AEP Souk Ahras
4 sources (Ain Nouna-Meska-Melha-Derdoura)	Djelail	Zaarouria	2	AEP Zone Eparses
Rzas El Oued	Ras El Oued	Ouled Driss	8	AEP Ouled Driss
Ben Ouire	Hennancha	Hennanaha	12	AEP Hennancha
Ain Fayala	Ain Fayala	Hennanacha	4	AEP Ain Fayala
3 sources (Boussessou-Madour-Kd Hamra)	Boussessou	Drea	2	AEP Drea
<b>Total : 14</b>			<b>51.5</b>	

### 3. Les ressources en eau superficielles

Le volume total brut ruisselé annuel calculé, sur l'ensemble du bassin versant avoisine les 182.4 Hm<sup>3</sup>. On estime à 34.1.5 Hm<sup>3</sup> le volume d'eau mobilisée (Tab. 44).

Le stockage des eaux sont assurées par le barrage de Ain Dalia destiné à l'alimentation en eau potables et trois petits barrage de capacité totale de 8.7 Hm<sup>3</sup> et deux retenues collinaire de capacité totale de 0.08 Hm<sup>3</sup> destiné à l'irrigation de la petite et moyenne hydraulique (PMH), et d'autres barrage sont en cours de réalisation, il s'agit du barrage de l'oued Djedra, et celui de l'oued Renem.

Ces ressources en eau, sur l'année de référence 2016, sont répartis par type d'usager, et à partir de quelle source de mobilisation, sont représentés dans le tableau 45.

**Tableau 44: Etat des ressources en eaux superficielles**

Superficie de l'unité (ha)	Volume ruisselé (Hm <sup>3</sup> )	Ressource mobilisée (Hm <sup>3</sup> )	% ressource mobilisée	Observation
<b>1505.500</b>	182.45	34.15	19%	Faible exploitation de la ressource superficielle

**Tableau 45: Répartition des ressources en eaux superficielles mobilisées**

Type d'usagé des eaux	Source de mobilisation	Volume mobilisé en Hm <sup>3</sup>
<b>AEP et AEI</b>	- Barrage d'Ain Dalia	31.5
	- Retenues d'eau	0.75
<b>Agriculture</b>	- Prises au fil de l'eau	1.53
	- Seuils déversoirs et autres	0.36
<b>Total</b>		<b>34.15</b>

#### 3. 1. Les ouvrages de stockage des eaux superficielles

Le bassin versant de la Medjerda dispose de plusieurs ouvrages de stockage des eaux superficielles qui sont en exploitation tels que le barrage d'Ain Dalia de capacité de stockage de 76 Hm<sup>3</sup>, et un autre en cours de réalisation, il s'agit du barrage de Oued Djedra de capacité de stockage de 45 Hm<sup>3</sup>, tous pour assurer l'alimentation en eau potable pour la population de Souk Ahras et d'autres wilayets avoisinantes et il y aussi quelques petits barrages et de retenues collinaires destinés à des fins agricoles.

### 3. 1. 1. Le barrage d'Ain Dalia

Le barrage Ain Dalia se trouve à une dizaine de kilomètres au Sud de la wilaya de Souk Ahras, mis en service en 1987, constitué sur l'Oued Medjerda, draine un sous bassin d'une superficie de 193 km<sup>2</sup>. Ce barrage dispose d'une capacité de retenue totale de 76 millions m<sup>3</sup>, destinée à l'alimentation en eau potable (AEP) et en eau industrielle (AEI) de la Wilaya de Souk Ahras et un transfert vers les wilayas de Tébessa et Oum El Bouaghi, avec un volume journalier de prélèvement autorisé de 90 000 m<sup>3</sup>/j (ADE, 2016).

**Tableau 46 : Caractéristiques techniques du barrage Ain Dalia (ANBT)**

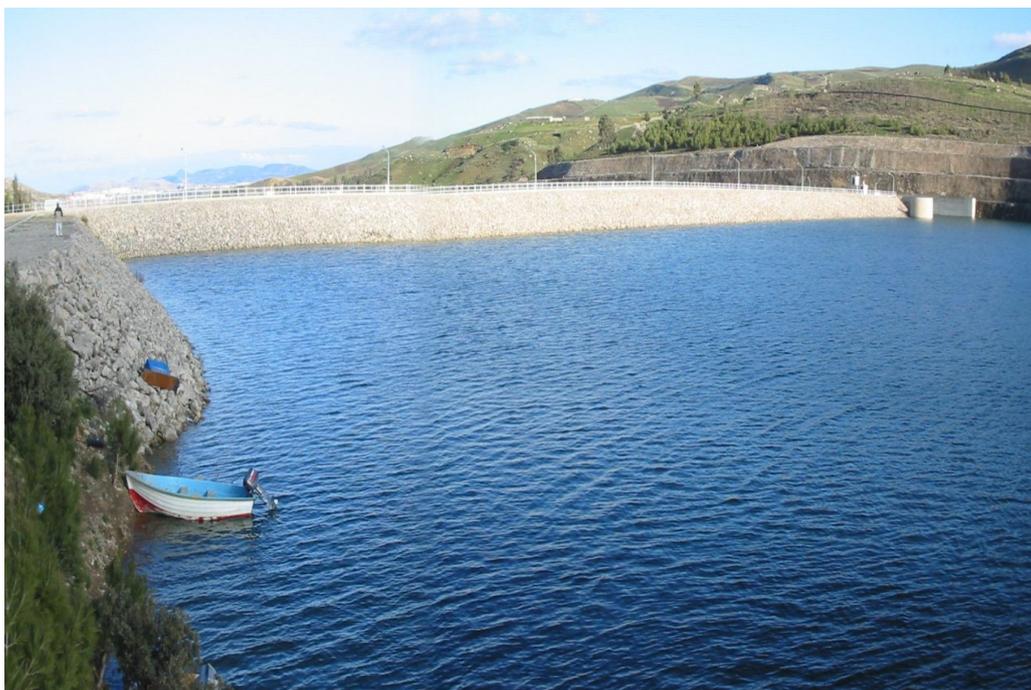
<b>Barrage</b>	
<b>Mise en service</b>	Février 1987
<b>Type</b>	Enrochement
<b>Oued</b>	Medjerda
<b>Niveau crête</b>	715.50 m
<b>Hauteur au dessus du fond de la vallée</b>	55 m
<b>Longueur de la crête</b>	300 m
<b>Largueur de la crête</b>	9 m
<b>Nature des fondations</b>	Marnes + Grés
<b>Retenues</b>	
<b>Capacité brute initial (niv. 710)</b>	82,00 millions de m <sup>3</sup>
<b>Capacité brute actualisé (niv. 710)</b>	76.07 millions de m <sup>3</sup>
<b>Volume annuel régularisable:</b>	45,00 millions de m <sup>3</sup>
<b>Envasement moyen annuel</b>	00,75 millions de m <sup>3</sup> /an
<b>Hydrologie</b>	
<b>Superficie du bassin versant</b>	193 K m <sup>2</sup>
<b>Pluviométrie inter annuelle moyenne sur le BV</b>	700 mm
<b>Apport inter annuel moyen</b>	50,00 millions de m <sup>3</sup>
<b>Tour de prise d'eau</b>	
<b>Hauteur totale (au dessus des fondations</b>	40,60 m
<b>3 prises d'eau</b>	686,00 – 693,90 – 701,80 m NGA

### 3. 1. 1. a. Paramètres physico chimique des eaux de barrage Ain Dalia

La qualité des eaux du barrage d'Ain Dalia d'après les analyses faites par l'ANRH est de bonne qualité pour l'alimentation en eau potable. Des analyses faite par l'ANBT mensuellement pour suivre la qualité des ses eaux (tab. 47), en comparaison avec les normes algériennes relatives à la qualité de l'eau de consommation humaine (JORA, 2011).

**Tableau 47: Qualité des eaux de barrage d'Ain Dalia (ANBT)**

Paramètres	Teneur	Norme
pH	7,95	6,5 - 8,5
Résidu sec a 105 ° (Minéralisation) R S( mg/l)	436	200
Oxygène dissous O <sub>2</sub> d (%)	88,46	50-90
Nitrates NO <sub>3</sub> (mg/l)	08	50
Nitrates NO <sub>2</sub> (mg/l)	0,016	0.2
Ammoniaques NH <sub>4</sub> (mg/l)	0,050	0.01-0.1
Phosphates PO <sub>4</sub> (mg/l)	0,150	Traces
Demande Biochimiques en oxygènes DBO <sub>5</sub> (mg/l)	2,7	< 5
Demande chimique en oxygènes DCO (mg/l)	13	< 20
Matières organiques MO (mg/l)	4,8	< 5

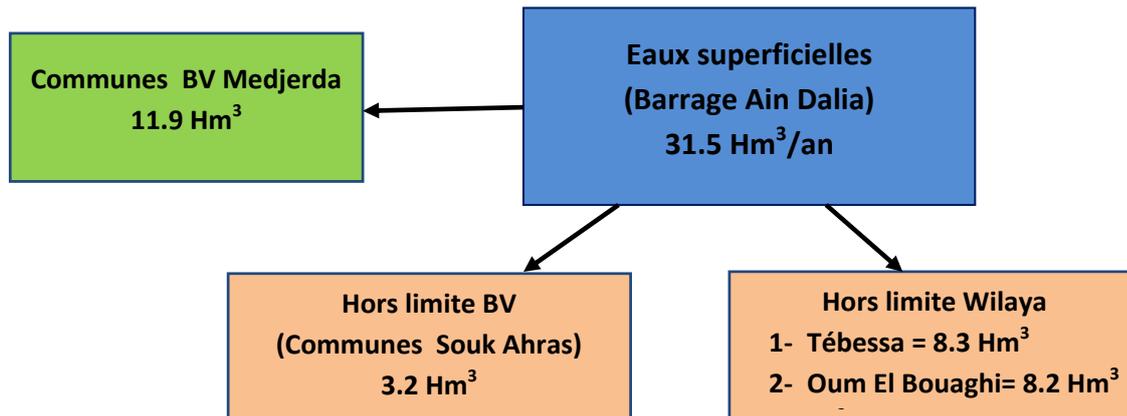


**Figure 48: Barrage d'Ain Dalia (Souk Ahras)**

**3. 1. 1. b. Répartition annuelles des prélèvements à partir du barrage d’Ain Dalia**

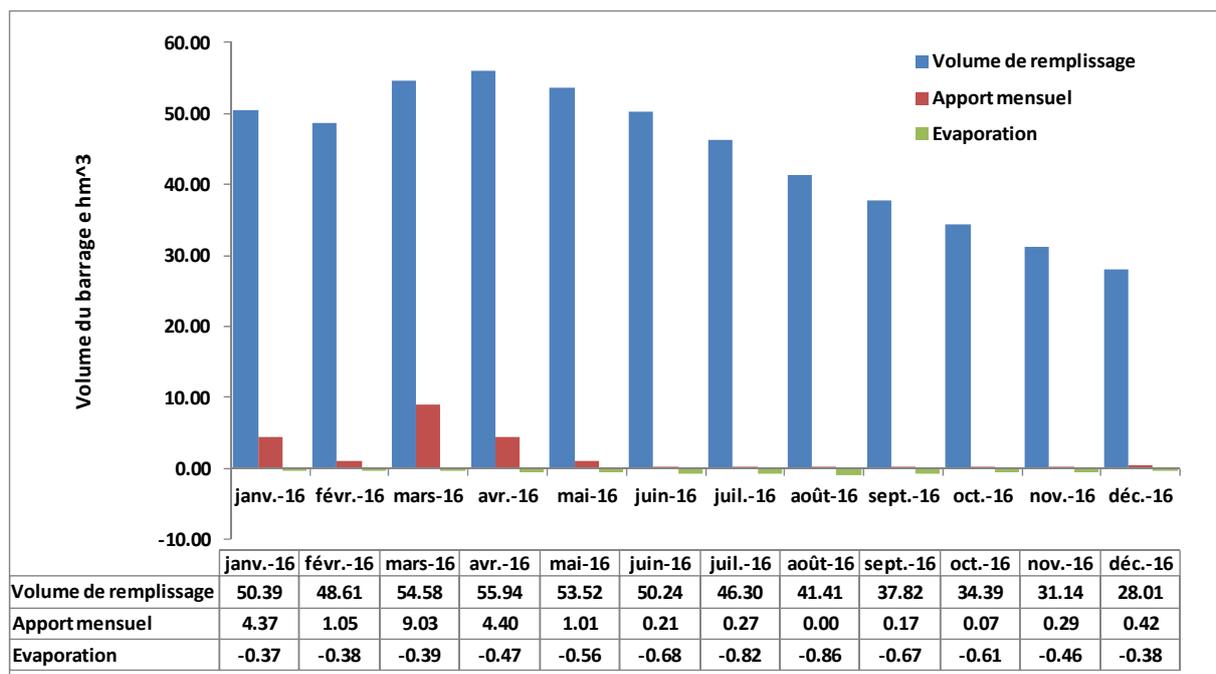
Le barrage d’Ain Dalia qui assure l'alimentation en AEP pour la wilaya de souk Ahras et approvisionne aussi les wilayas limitrophes, il s'agit de Tébessa et Oum El Bouaghi.

Le prélèvement annuel pour l'année 2016 est de 31.5 Hm<sup>3</sup>, répartis comme montré dans la figure 49, avec un débit de prélèvement journalier autorisé de 90 000 m<sup>3</sup>/j.



**Figure 49: Répartition des prélèvements du barrage d’Ain Dalia (2016)**

Le suivi du niveau de remplissage du barrage de Ain Dalia nous a permis de constater que le niveau du barrage s'est diminué considérablement au cours de l'année 2016, avec un écart entre début de et fin de l'année (2016) de -22 Hm<sup>3</sup> (Fig. 50). Ceci s'explique par la diminution de la pluviométrie durant ces dernières années.



**Figure 50: Variation mensuelle des réserves en eau du barrage Ain Dalia (2016)**

### 3. 1. 2. Les retenues d'eau

Le bassin versant de la Medjerda compte plusieurs retenues d'eau destinées à l'irrigation, elles sont résumées dans le tableau suivant (Tab. 48).

**Tableau 48: Les petits barrages et retenues collinaire en exploitation**

Nom du petit barrage ou retenue collinaire	Commune	Capacité Totale (Hm <sup>3</sup> )	Volume utile (Hm <sup>3</sup> )	Volume Régularisé (Hm <sup>3</sup> )	Volume exploité (Hm <sup>3</sup> )	Superficie irriguée (ha)
Petit Barrage de Tiffech	Tiffech	5.80	3.9	2.62	0.2	300
Petit Barrage de Battoum	Taoura	2.10	1.17	1.305	0.2	130
Petit barrage Mazraa (Henchir El Guigueb)	Mechroha	0.80	0.8	0.17	0.3	100
Retenue Collinaire Ain Tamtmat	Taoura	0.04	0.025	0.04	0.03	10
Retenue Collinaire Guelna	Ouillene	0.04	0.038	0.025	0.02	5
<b>Total ouvrages</b>	/	<b>8.78</b>	<b>5.93</b>	/	<b>0.75</b>	<b>545</b>

## 4. Les eaux non conventionnelles

### 4. 1. La station d'épuration de Souk Ahras

La station d'épuration de Souk-Ahras de capacité de 150 000 eq/hab. et de débit journalier de 30 000 m<sup>3</sup>/j, est destinée à traiter les eaux usées domestiques de la ville de Souk Ahras avant leur rejet dans l'Oued de Medjerda, son objectif principal est la protection de l'oued Medjerda et la production de l'eau épurée à des fins agricoles, (ONA Souk Ahras), avec un (projet de création d'un périmètre irrigué de Dardoura de 300 ha (DRE Souk Ahras).

Les eaux usées sont acheminées gravitairement à travers un réseau d'assainissement avant de subir les étapes d'épuration.

#### 4. 1. 1. Les caractéristiques techniques de la STEP de Souk Ahras

Organisme gestionnaire : ONA / Unité Souk Ahras  
 Date de mise en service : Janvier 2003  
 Type de Station : Boue Activée à faible charge  
 Capacité : 150 000 Eq/Hab.  
 Débit journalier : 30 000 m<sup>3</sup>/j  
 Localisation : à environ 5 km de la ville  
 Superficie : 13 Hectares  
 Type de réseau : Unitaire  
 Taux de raccordement à la station : 70 %

#### 4. 1. 2. Paramètres d'exploitation de la STEP de Souk Ahras

Production de Boue : 6300 kg/j

Charge Massique : 0,07 Kg DBO<sub>5</sub>/Kg MS .j

Charge Volumique : 0,34 Kg DBO<sub>5</sub>/m<sup>3</sup>/j

Age de boue : 21 jours

Milieu Récepteur : Oued Medjerda

- **Caractéristiques des eaux brutes :**

MES : 400 mg/l

DBO<sub>5</sub>: 300 mg/l

- **Caractéristique des eaux épurées :**

MES : 30 mg/l

DBO<sub>5</sub>: 30 mg/l

DCO : 90 mg/l

- **Rendement d'élimination :**

Les matières en Suspension : 90 %

Les matières Organique : 92 %

#### 4. 1. 3. Process de la STEP

De l'entrée de la station jusqu'au rejet dans le milieu naturel, les différentes étapes du traitement des eaux usées et les principales opérations sont montrés dans la figure 51.

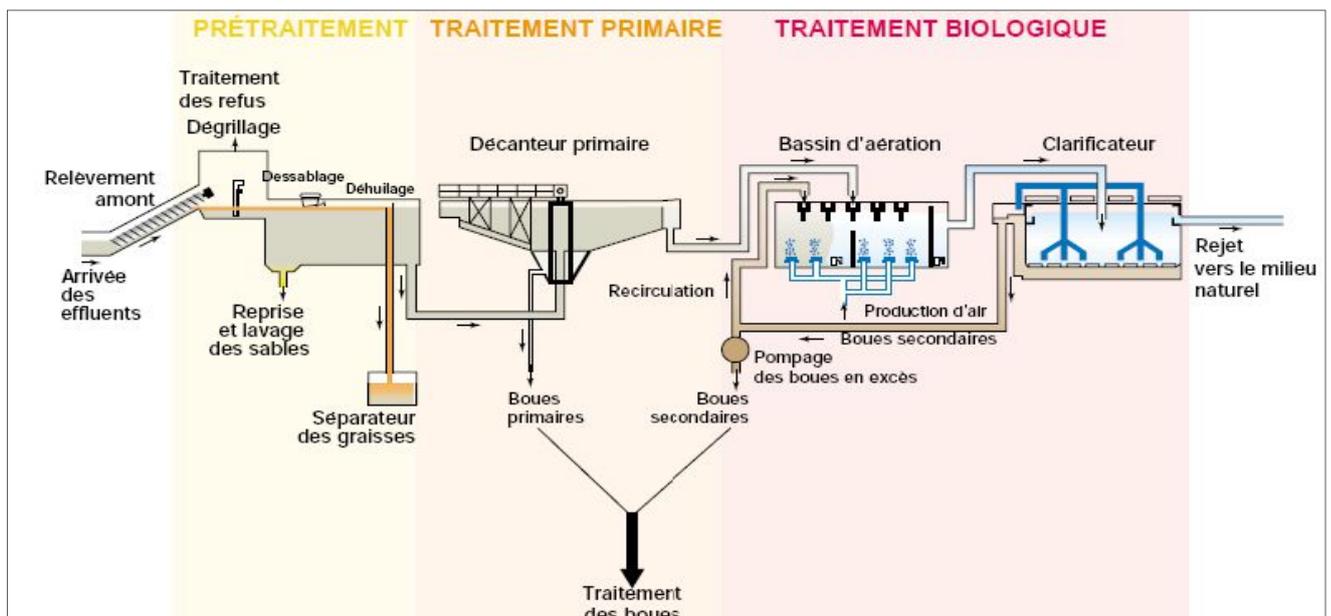


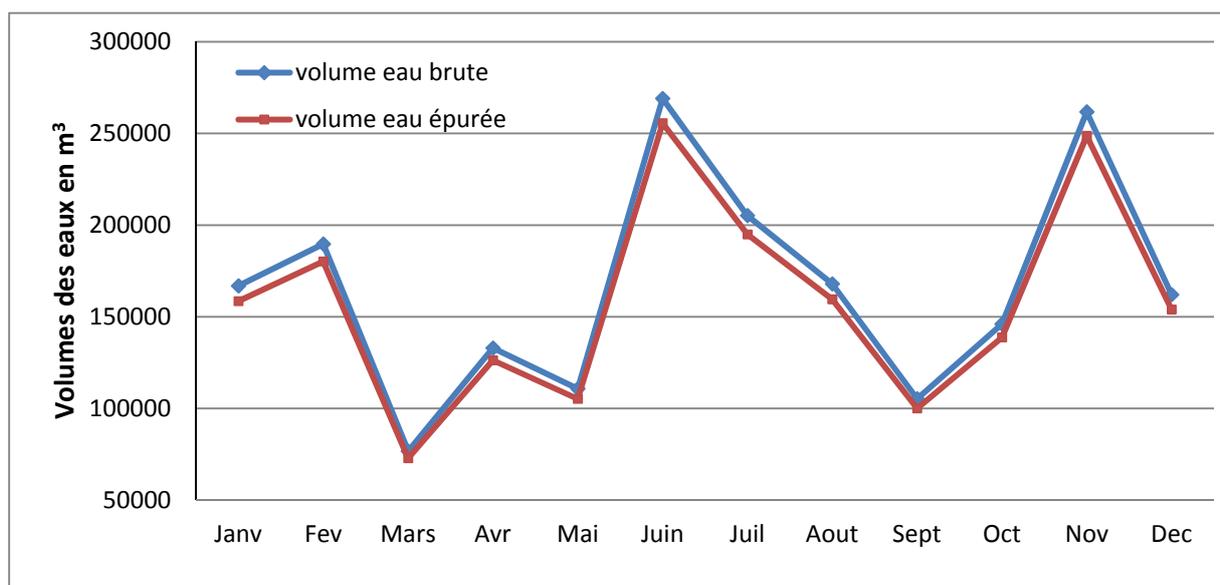
Figure 51: Process de la STEP de Souk Ahras

#### 4. 1. 4. Bilan de l'auto surveillance de la STEP de Souk Ahras pour l'année 2016

Durant l'année 2016, la station d'épuration de Souk Ahras a épuré un volume total annuel d'eau brute de 1.99 Hm<sup>3</sup> (Tab. 49), d'une capacité annuelle de 10.95 Hm<sup>3</sup> (Fig. 52), ce qui représente un taux d'utilisation de 18 %. Le rendement d'épuration de la station est de 95%.

**Tableau 49: Volume des eaux épurées STEP Souk Ahras 2016**

Mois	Volume eau brute (m <sup>3</sup> )	Volume eau épurée (m <sup>3</sup> )
Janv.	166842	158503
Fév.	189689	180206
Mars	76694	72850
Avr.	132930	126270
Mai	110763	105225
Juin	269040	255588
Juil.	205189	194928
Aout	167927	159531
Sept	105300	100035
Oct.	146041	138739
Nov.	261780	248691
Déc.	162068	153965
<b>Cumul année</b>	<b>1994263</b>	<b>1894530</b>
<b>Cumul année en hm<sup>3</sup></b>	<b>1.99</b>	<b>1.89</b>
<b>Rendement = 95 %</b>		



**Figure 52: Evolution mensuelle des volumes d'eaux brutes et épurées à la STEP de Souk Ahras (2016)**

#### 4. 1. 5. Bilan de suivi de la qualité des eaux de la STEP de Souk Ahras

Le suivi de la qualité des eaux s'est limité aux paramètres physico-chimiques de pollution suivants: Les MES, la DBO<sub>5</sub> et la DCO, les autres paramètres de pollution (NK, N-NH<sub>4</sub>, NGL et Pt) ne sont pas faits, suite au manque de réactifs (Rapport ONA Souk Ahras 2016).

##### 4. 1. 5. a. Les matières en suspension MES

Les valeurs des effluents à l'entrée varient de 145 à 185 mg/l et celles de la sortie de entre 9 et 21 mg/l, qui sont inférieure à la norme algérienne pour les eaux usées de 35mg/l (Fig. 53).

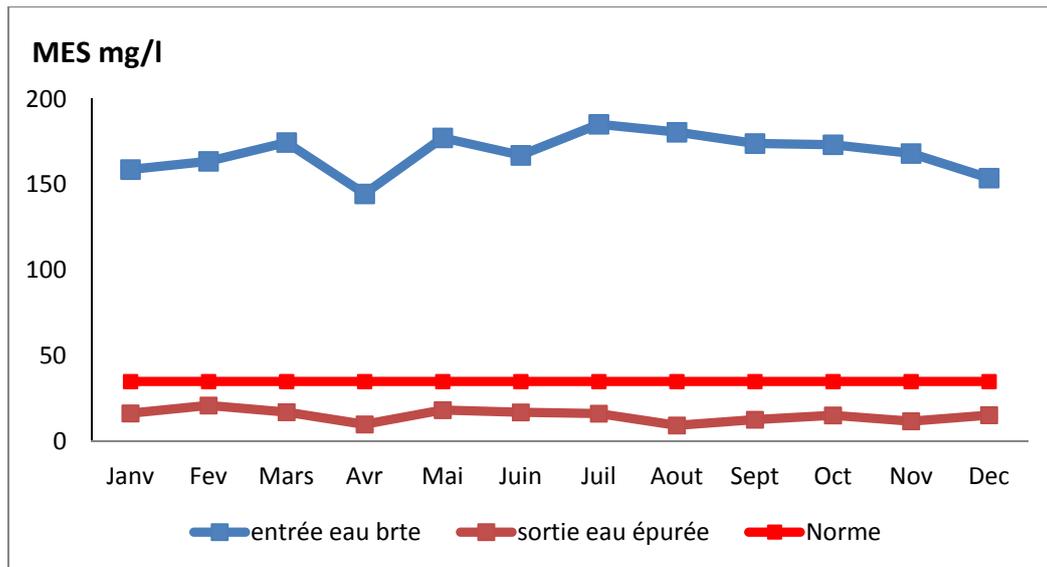


Figure 53: Evolution mensuelle des MES de la STEP de Souk Ahras

##### 4. 1. 5. b. La demande biochimique en oxygène (DBO5)

Les valeurs des effluents à l'entrée varient de 37 à 155 mg/l et celles de la sortie entre 2 et 10 mg/l, qui sont inférieure à la norme algérienne pour les eaux usées de 35mg/l (Fig. 54).

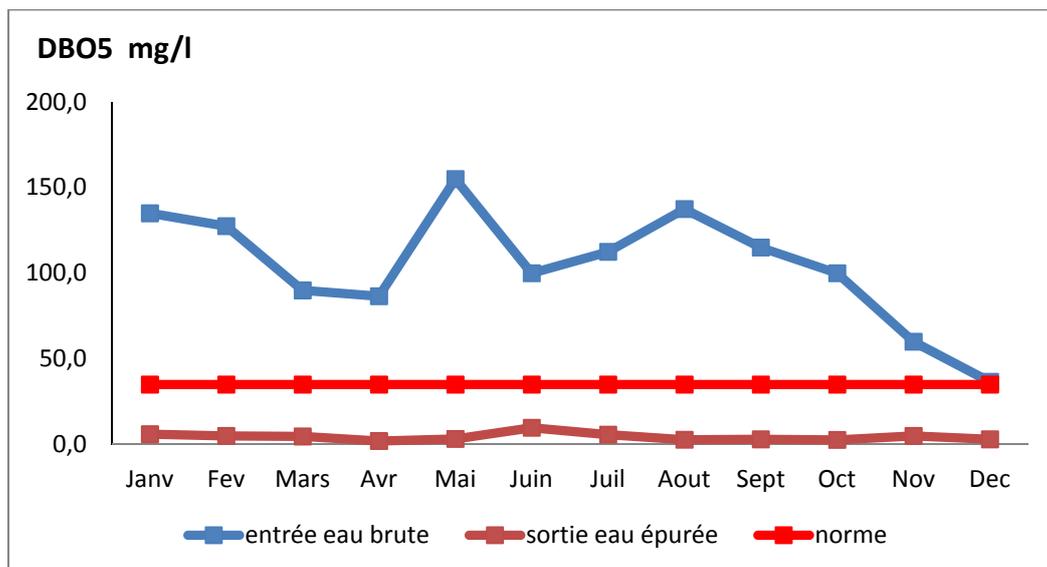
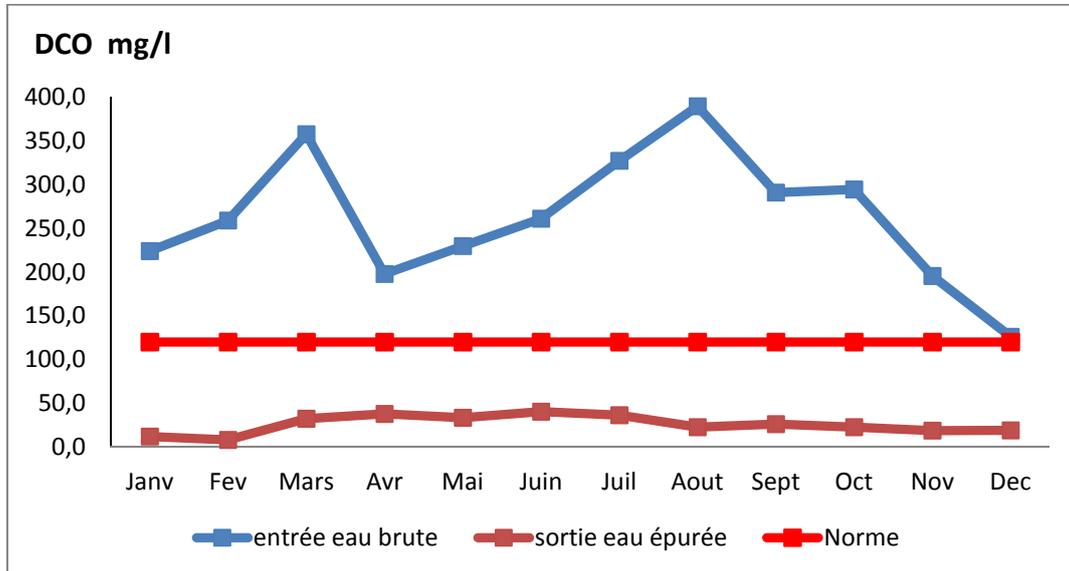


Figure 54: Evolution mensuelle du DBO5 de la STEP de Souk Ahras

#### 4. 1. 5. c. La demande chimique en oxygène (DCO)

Les valeurs des effluents à l'entrée varient de 126 à 290 mg/l et celles de la sortie de entre 8 et 40 mg/l, qui sont inférieure à la norme algérienne pour les eaux usées de 120 mg/l (Fig. 55).



**Figure 55: Evolution mensuelle de la DCO de la STEP de Souk Ahras**

L'examen du bilan de la station d'épuration de souk Ahras, quantitativement est sous exploité, avec un taux d'exploitation de 18 % de sa capacité nominale, et sur le plan qualitative, les eaux épurées présentes des valeurs des paramètres physico-chimique de pollution inférieurs aux normes algériennes requises, ce qui démontre l'efficacité du process d'épuration des eaux usées.

#### 4. 2. La station d'épuration de Hanancha

La STEP de Hanancha est situé à 29 km du chef lieu de la wilaya de Souk Ahars, Elle est sur la rive gauche de l'oued Hraïchir, affluent de l'oued Medjerda, a été mise en service en 1991 pour protégé le barrage d'Ain Dalia.

La capacité de la station est 17300 eq/hab et de débit journalier de 3000 m<sup>3</sup>/j. Les eaux brutes sont de nature domestiques collectées par un réseau unitaire, Elles sont épurées par le procédé de charbon activé à faible charge (aération prolongée). Les agriculteurs puisent l'eau dans cet oued pour irriguer les parcelles en aval de la STEP.

##### 4. 2. 1. Bilan de l'auto surveillance de la STEP de Hanancha pour l'année 2016

Durant l'année 2016, la station d'épuration de Souk Ahras a épuré un volume total annuel d'eau brute de 0.2 Hm<sup>3</sup> (Tab. 50), d'une capacité annuelle de 1.1 Hm<sup>3</sup>, ce qui représente un taux d'utilisation de 18 %. Le rendement d'épuration de la station est de 95% (Fig. 56).

Tableau 50: Volume des eaux épurées STEP de Hanancha (2016)

Mois	Volume eau brute (m <sup>3</sup> )	Volume eau épurée (m <sup>3</sup> )
Janv.	16926.0	16089.0
Fév.	15522.0	14742.0
Mars	18476.0	17546.0
Avr.	19110.0	18150.0
Mai	20133.7	19127.0
Juin	19200.0	18240.0
Juil.	18724.0	17794.0
Août	18445.0	17515.0
Sept.	14300.0	13585.0
Oct.	15200.0	14440.0
Nov.	18060.0	17157.0
Déc.	19034.0	18082.3
<b>Cumul année</b>	<b>213130.7</b>	<b>202467.3</b>
<b>Cumul année en Hm<sup>3</sup></b>	<b>0.21</b>	<b>0.20</b>
<b>Rendement = 95 %</b>		

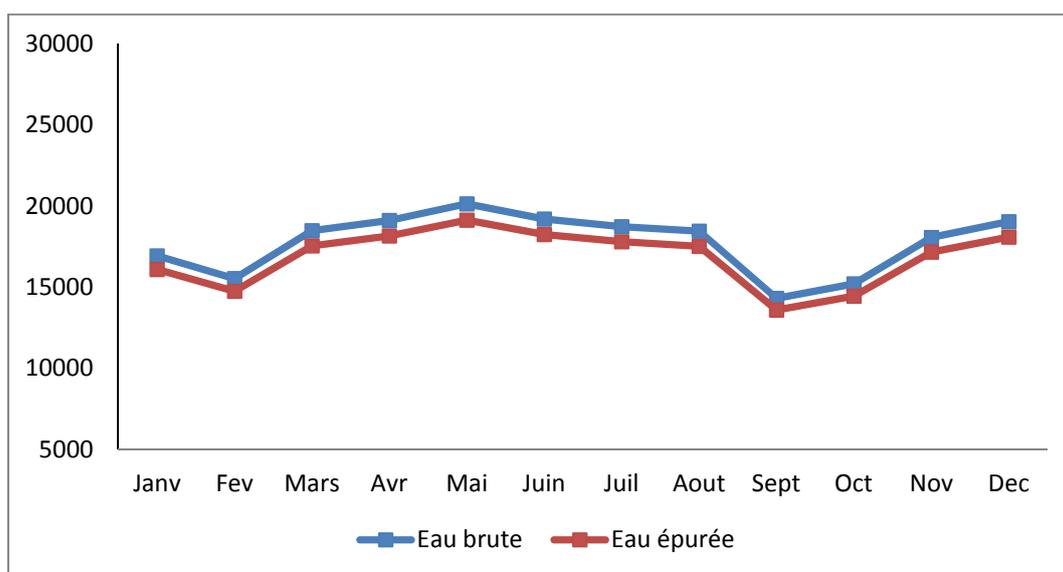


Figure 56: Evolution mensuelle des volumes des eaux brutes et épurées à la STEP de Hanancha (2016)

#### 4. 2. 2. Bilan du suivi de la qualité des eaux de la STEP de Hanancha

Le suivi de la qualité des eaux s'est limité aux paramètres physico-chimiques de pollution suivants: Les MES, la DBO5 et la DCO (Tab. 51), les autres paramètres de pollution (NK, N-NH<sub>4</sub>, NGL et Pt) ne sont pas faits, suite au manque de réactifs (Rapport ONA Souk Ahras 2016).

**Tableau 51: Bilan suivi Qualité des eaux de la STEP de Hanancha**

Paramètres	Unité	Entrée STEP (Eau brute)	Sortie STEP (Eau épurée)	Norme
MES	(mg/l)	194.90	100.45	35
DBO5	(mg/l)	160.00	41.67	35
DCO	(mg/l)	436.42	266.25	120

L'examen du bilan de la station d'épuration de Hanancha, sur le plan quantitatif est sous exploité, avec un taux d'exploitation de 18 % de sa capacité nominale, et sur le plan qualitatif, les eaux épurées présentes des valeurs des paramètres physico-chimiques de pollution supérieurs aux normes Algériennes requises.

#### 5. Débits et qualité de l'oued Medjerda

Selon les études de (A.B.H. 2001), l'Oued Medjerda affiche un débit qui varie considérablement avec la saison, allant de 1 000 m<sup>3</sup>/s en hiver à 1 m<sup>3</sup>/s en été.

Des mesures de débits de l'Oued Medjerda près du chef-lieu de Souk Ahras, ont été effectuées durant les périodes de basses, moyennes et hautes eaux (Guasmi, 2003), ces mesures montrent que durant la période des basses eaux le débit atteint 0,168 m<sup>3</sup>/s, pour la période des hautes eaux le débit maximum est de 1,271 m<sup>3</sup>/s.

Sur le plan de la qualité des eaux de l'oued Medjerda, plusieurs recherches ont été réalisées pour arriver aux conclusions suivantes:

- des niveaux élevés de paramètres testés ont été observés sur l'oued Medjerda. En aval de la STEP, de nombreux cas pour une demande chimique en oxygène (de 118 à 296 mg/l),
- une demande biologique en oxygène (de 33 à 145 mg/l),
- des nitrites (de 0,14 à 0,68 mg/l) et des ions ammonium (de 2,64 à 11,92 mg/l),
- du plomb (0,04 à 2,08 mg/l) et cadmium (0,1 à 0,2 mg/l) au cours de la période de l'étude et en dehors des limites de conformité avec les directives algériennes. Nous pouvons également conclure que les plus bas niveaux d'ions métalliques ont été enregistrés pendant les périodes d'inondations et ceci est certainement dû à la forte dilution qui fait face à la rivière après les précipitations. Les

résultats obtenus ont confirmé l'impact négatif sur les caractéristiques physico-chimiques, ce qui implique que l'eau de cette rivière pose un problème majeur de pollution (Nait Merzoug 2012).

Les résultats présentent un taux de pollution très élevé dans l'oued Medjerad (Guasmi, 2009). L'étude de la qualité microbiologique des eaux de l'oued Medjerda montre l'existence de plusieurs germes pathogènes qui présentent des risques très importants de maladies transmissibles aux utilisateurs (Barour, 2012).

## 6. Les usagers de l'eau dans le bassin versant de la Medjerda

A l'échelle du bassin versant de la Medjerda, ce sont près de 40 millions de m<sup>3</sup> qui sont prélevés chaque année. 78.7 % des prélèvements sont réalisés dans les eaux superficielles et 21.3 % dans les eaux souterraines.

La part des prélèvements d'eau pour l'alimentation en eau potable est de 74.3 %, contre 25.4 pour l'usage agricole, et seulement 0.3% pour les besoins industriels (Fig. 57).

En termes de ressources, l'eau superficielle est surtout utilisée pour l'alimentation en eau potable de 51.7% des prélèvements totaux du bassin, et l'irrigation de 11%, tandis que l'industrie n'utilise que 0.3%. L'eau souterraine est surtout utilisée pour l'alimentation en eau potable de 22% des prélèvements totaux du bassin et 15% des prélèvements pour l'irrigation.

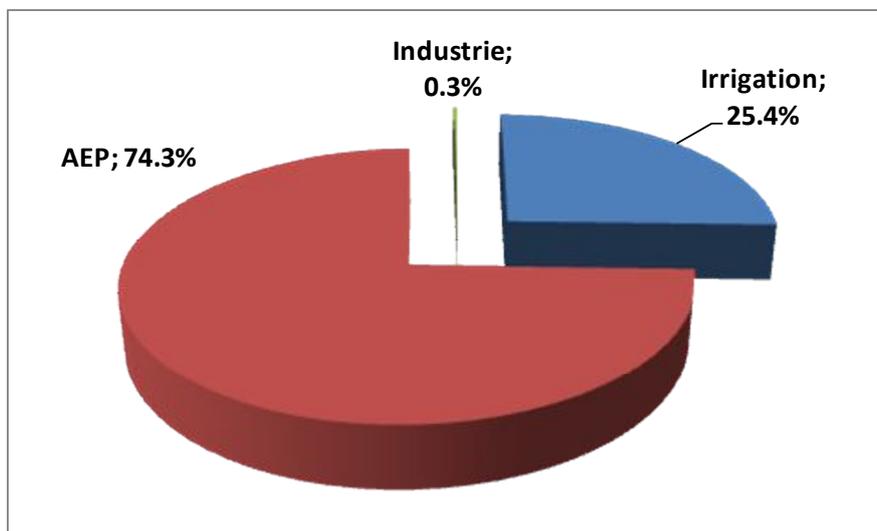


Figure 57: Répartition des usagers de l'eau dans le BV de la Medjerda

### 6. 1. Les usagers domestiques

#### 6. 1. 1. La population

L'étude démographique dans un bassin hydrographique pose un problème du zonage, car les données sont collectées dans la plupart des cas selon les limites administratives. Notre bassin versant la Medjerda ne fait pas exception; les données sont collectées selon le bilan de la DPAT 2014 de la wilaya de Souk Ahras. Les communes retenues dans ce chapitre sont celles qui se situent dans les limites du bassin versant (Tab. 52).

Les données de population des communes de la wilaya de Souk Ahras incluses partiellement dans le territoire du bassin versant, ne sont pas prises en compte parce que la majorité de leurs surfaces se localise à l'extérieur de la limite du bassin.

**Tableau 52 : Evolution de la population par commune selon le recensement de 2008 dans le bassin versant de la Medjerda (DPAT 2014)**

Commune	Population 2008	Taux d'accroissement 2008 -2015	Population 2016	Taux d'accroissement 2015 -2020	Population 2020
<b>Souk Ahras</b>	155259	2.00	181019	1.50	192127
<b>Mechroha</b>	21802	2.40	26331	2.30	28839
<b>Taoura</b>	18933	1.00	20603	1.50	21868
<b>Merahna</b>	13319	2.00	15636	2.20	17058
<b>Henencha</b>	15790	0.80	16896	1.20	17722
<b>Zaarouria</b>	11234	1.00	12225	1.50	12975
<b>Ouled driss</b>	11303	1.00	12264	1.20	12863
<b>Heddada</b>	7351	2.00	8630	2.20	9415
<b>Khedara</b>	8329	1.00	9037	1.20	9479
<b>Ain zana</b>	7499	0.80	8008	1.00	8334
<b>Ouilen</b>	6544	1.00	7100	1.20	7447
<b>Dreaa</b>	6408	1.00	6956	1.25	7311
<b>Ouled Moumen</b>	4682	0.50	4911	1.30	5172
<b>Tiffech</b>	6037	1.20	6648	1.30	7001
<b>Khemissa</b>	3517	0.50	3678	1.00	3828
<b>Total</b>	<b>298007</b>		<b>339944</b>		<b>361436</b>

Le taux d'accroissement est obtenu à partir de l'équation suivante : Sur la base de nombre d'habitant recensé en 2008 par l'ONS, et le taux d'accroissement de la population habite le bassin, on a estimé leur évolution pour les différents horizons, en exploitant la formule suivante :

$$PF = PA (1 + T)^n$$

Avec :

PF : population future

PA : population actuelle

T : taux d'accroissement

La population du bassin versant dans cette année de référence (2016) est 339944 habitant, avec une densité de l'ordre de 140 hab. /km<sup>2</sup>.

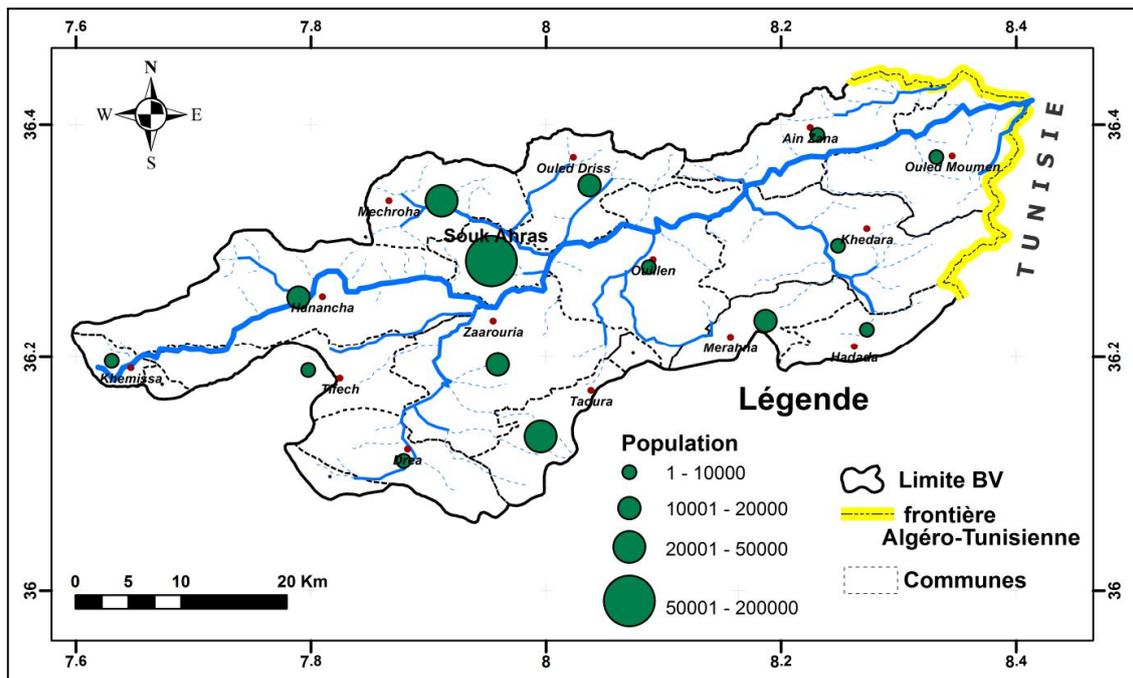


Figure 58: Répartition de la population du bassin versant de la Medjerda

La forte concentration de la population (Fig. 58) est constatée au niveau du chef lieu de wilaya (4061 hab. /km<sup>2</sup>, mais la population rurale reste dominante (60 % de la population totale).

Dans son rapport le DPAT et selon l'ONS, le taux d'accroissement démographique de la wilaya de Souk Ahras va connaître une baisse, pour passer de 2.15% entre 1987-1998, à 1.6% entre 1998-2008 et à 1.35% entre 2000-2030 (DPAT 2014).

### 6. 1. 2. Les eaux pour AEP par nature de ressource

La production en eaux souterraines et eaux des sources pour l'année 2016 est de l'ordre de 5.310 Hm<sup>3</sup>, soit un volume journalier de 14 550 m<sup>3</sup>.

Pour permettre un fonctionnement permanent des forages et afin de préserver les nappes relevant de l'unité, le régime d'exploitation est fixé à 20 heures de pompage par jour, sur les 21 forages avec un débit total moyen de 200 l/s.

La production des eaux de surface est subordonnée au régime des quotas alloués à partir de l'unité de production d'Ain Dalia (prélèvement approuvé par le comité ministériel).

Le volume prévisionnel pour l'année 2016 est de l'ordre de 18.59 Hm<sup>3</sup>, soit 50900 m<sup>3</sup>/j, sur la base d'une dotation journalière de 150 l/hab/j. On note un déficit en eau d'AEP de l'ordre de 1.39 Hm<sup>3</sup>/an (Tab. 53).

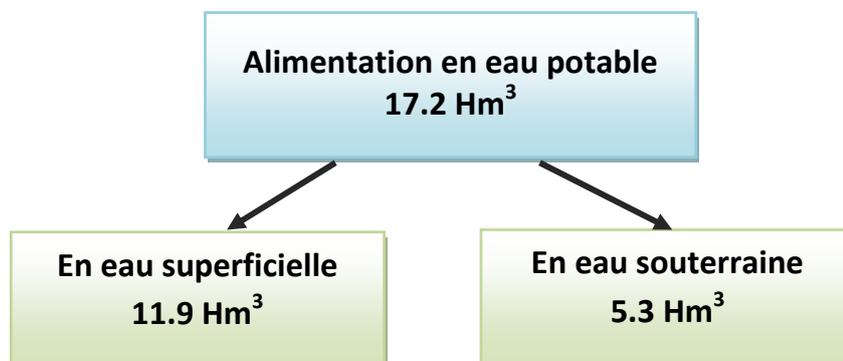


Figure 59: Répartition des eaux d'AEP par nature de ressource

Tableau 53: Rapport entre besoin et distribution en eau potable

Commune	Population 2016	Besoins AEP (Hm <sup>3</sup> )	Distribution en AEP	
			A partir d'eau superficielle (m <sup>3</sup> )	A partir d'eau souterraine (m <sup>3</sup> )
Souk Ahras	181019	9.911	8180000	2215185
Mechroha	26357	1.443	700000	44530
Taoura	20502	1.122	840000	402230
Merahna	15605	0.854	550000	283970
Hennencha	16829	0.921	290000	368000
Zaarouria	12165	0.666	280000	473040
Ouled driss	12240	0.670	140000	168145
Heddada	8613	0.472	340000	491290
Khedara	9019	0.494	155000	41975
Ain zana	7993	0.438	68000	105000
Ouilen	7086	0.388	84000	283970
Dreaa	6939	0.380	255000	105560
Ouled Moumen	4873	0.267	33000	105000
Tifech	6641	0.364	0	171418
Khemissa	3660	0.200	0	47450
<b>Total BV Medjerda</b>	<b>339541</b>	<b>18.590</b>	<b>11915000</b> <b>11.9 hm<sup>3</sup></b>	<b>5306763</b> <b>5.3 hm<sup>3</sup></b>

## 6. 2 Les usagers agricoles

Le bassin versant de la Medjerda est un bassin à vocation agricole, la superficie des terres agricoles utiles des communes qui se trouvent au sein de notre bassin versant de la Medjerda SAU = 124 501 ha, sur une superficie globale de 238 250 ha, ce qui représente 52.3 % (certains communes ont des parties qui se trouvent hors limite de notre bassin versant d'étude)

Les ressources en eaux souterraines du système d'aquifères de l'Atlas Tellien et le domaine des Monts de Souk Ahras sont les plus exploitées par l'irrigation. Néanmoins, leurs exploitations restent faibles par rapport à leurs potentiels. Cette exploitation en eau souterraine est estimée à 3.44 Hm<sup>3</sup>.

Les ressources superficielles sont modérément exploitées. Les prélèvements superficiels pour l'irrigation se concentrent dans l'exploitation de 3 petits barrages et 2 retenues collinaires de volume exploités de 0.75 Hm<sup>3</sup> sur une capacité totale de 8.78 Hm<sup>3</sup> (Tab. 38), destinés à l'irrigation des périmètres et des aires d'irrigation (Tab. 54) et aussi des prélèvements à partir de l'oued Medjerda et ses affluents pérennes.

**Tableau 54: Périmètres et aires d'irrigation**

Nom du petit périmètre	Lieu dit	Commune	Superficie (ha)	Origine de la ressource
<b>Périmètre d'irrigation Tiffech</b>	Tiffech	Tiffech	328	PB Tiffech
<b>Périmètre d'irrigation Battoum</b>	Battoum	Battoum	280	PB Battoum
<b>Périmètre d'irrigation Mazraa(non équipé)</b>	Henchir El-Guigueb	Mechroha	100	PB Mazraa
<b>Aire d'irrigation Guelna</b>	Guelna	Ouillene	10	RC Guelna (non équipé)
<b>Aire d'irrigation Ain Tamtmat</b>	Ain Tamtmat	Taoura	10	RC Ain Tamtmat
<b>Aire d'irrigation à Sidi Bader</b>	Sidi Bader	Ouillene	150	Seuil Déversoir Sidi Bader
<b>Aire d'irrigation à Hemissi</b>	Hemissi	Ouled Moumen	50	Seuil Déversoir Hemissi

**PB** : Petit barrage

**RC** : Retenue collinaire

Tableau 55: Répartition de la superficie irriguée par nature de ressources en eau

Nature ressources en eau	Type d'ouvrage des ressources en eau	Quantités
Ressources en eau superficielles	A partir des petits barrages	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nombre de petits barrages = 03</li> <li>• Nombre périmètres = 03</li> <li>• Superficie = 530 ha</li> <li>• Capacité = 8.7 Hm<sup>3</sup></li> <li>• Volume exploité en 2016 = 0.7 Hm<sup>3</sup></li> </ul>
	A partir des retenues collinaires	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nombre de retenues collinaires existantes = 02</li> <li>• Nombre de périmètre = 02</li> <li>• Superficie = 15 ha</li> <li>• Capacité = 0,08 Hm<sup>3</sup></li> <li>• Volume exploité en 2016 = 0.05 Hm<sup>3</sup></li> </ul>
	A partir des prises au fil d'eau	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nombre de prises 97</li> <li>• Superficies 1530 ha</li> <li>• Volume exploité = 1.53 Hm<sup>3</sup></li> </ul>
	Autres : <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Seuils déversoirs :</li> <li>○ mares</li> <li>○ épandage des crues</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nombre 07</li> <li>• superficies 1155 ha</li> <li>• Volume exploité = 0.36 Hm<sup>3</sup></li> </ul>
Ressources en eau souterraines	A partir des forages	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 32 forages exploités</li> <li>• Superficie totale est de 358 ha (forages opérationnels)</li> <li>• Volume exploité = 0.67 Hm<sup>3</sup></li> </ul>
	A partir des puits	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 187 puits exploités</li> <li>• Superficie totale est de 374 ha</li> <li>• Volume exploité = 1.38 Hm<sup>3</sup></li> </ul>
	A partir des sources	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nombre 44 pour une</li> <li>• Superficie de 440 ha</li> <li>• Volume exploité = 1.39 Hm<sup>3</sup></li> </ul>

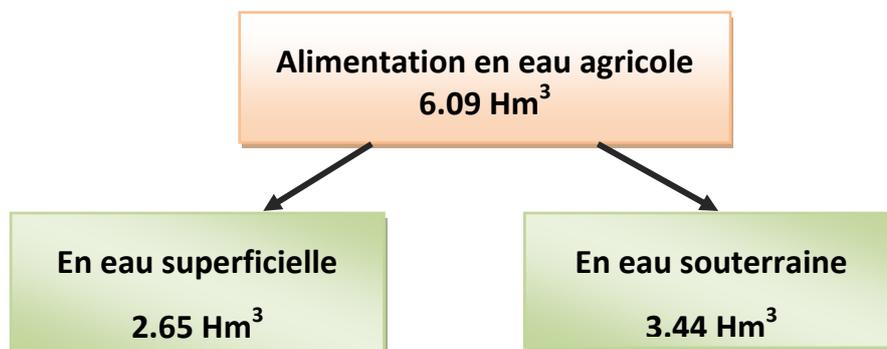


Figure 60: Répartition des eaux agricoles par nature de ressource

En termes d'irrigation, l'irrigation gravitaire est le mode d'irrigation le plus fréquemment utilisé avec 59 %, ensuite par aspersion de 23% et en fin le goutte à goutte avec 18% (Tab. 56).

**Tableau 56: Répartition des modes d'irrigation par superficie irriguée**

Mode d'irrigation	Gravitaire	Aspersion	Goutte à goutte	Total
Superficie irriguée (ha)	1994	775	593	3362
Taux (%)	59	23	18	100

La principale culture pratiquée dans la zone d'étude est le maraîchage (1700 ha), ce qui représente un taux de 50.6%, suivi de l'arboriculture (1220 ha), soit un taux de 36.3%. La campagne d'irrigation de l'année 2016 a connu une SAU irriguée étant de 3362 ha (Tab. 57).

**Tableau 57: Répartition des types de cultures irriguées**

Maraichage	Arboriculture	Culture industrielle	Céréales	Cultures fourragères	Autres	TOTAL
1700	1220	100	89	65	188	<b>3362</b>
50.6%	36.3%	3.0%	2.6%	1.9%	5.6%	<b>100%</b>

### 6. 2. 1. Situation de la campagne d'irrigation del'année2016

La campagne d'irrigation menée pendant l'année 2016 n'a pas été satisfaisante et n'a pas atteint son objectif, seule une superficie de 3362 ha irriguée, ce qui représente 2.7% de la SAU. Cette surface irriguée s'est diminuée de par rapport à l'objectif annuel de 5000 ha, et ce suite à plusieurs raisons, tels que certains ouvrages ont été asséchés (barrage d'Ain-Sfa), autres ont été vidangés volontairement pour permettre des travaux de réhabilitation (barrage de Tiffech) et certains ouvrages sont mal exploités (barrage de Mazraa et Seuils déversoirs).

### 6. 2. 2. Objectifs du service Hydro agricole

L'objectif escompté du service hydraulique et agricole est d'arriver à faire l'extension des terres irriguées de la wilaya de Souk Ahras de 5000 ha à 8000 (taux d'augmentation de 60%), en se basant sur le développement des investissements (GPI +PMH), toutefois ces programmes sont non retenus actuellement, et ce pour plusieurs raisons à savoir la priorité allouée à l'alimentation en eau potable et à l'assainissement suite à la dernière crise économique, ou la plupart des projets sont gelés en favorisant les investissements de l'AEP lors du passage aux comités d'arbitrage .

### 6. 3. L'industrie

L'industrie dans le bassin versant de la Medjerda est considérée comme un utilisateur d'une importance insignifiante par rapport des deux premiers usagers.

Sa consommation annuelle est de 0.07 Hm<sup>3</sup>/an, alimenté depuis le réseau de l'AEP, cette consommation est répartie sur les unités de productions suivantes (Tab. 58):

- 1- ENAP, est une entreprise publique économique qui a pour métier de base la production des revêtements organiques à savoir les peintures, les résines, émulsions siccatifs et colles, avec une capacité de production annuelle de 150000 tonnes en produits peintures et vernis et 50000 tonnes des produits semi-finis (résine, émulsions et siccatifs)
- 2- EATIT (Lasa), Entreprise algérienne des textiles industriels et technique
- 3- Briqueterie Taghaste, est une entreprise privée installée dans la commune de Zaarouria de capacité de production de 200 000 tonnes de briques par an
- 4- Verrerie de l'est, pour la fabrication de verre de table

**Tableau 58: Consommation des eaux pour les unités de production (2016)**

Nom des entreprises	Volume d'eau distribuée pour 2016 (m <sup>3</sup> )	Volume d'eau distribuée pour 2016 (Hm <sup>3</sup> )
<b>ENAP</b>	26670	0.027
<b>EATIT (LASA)</b>	7780	0.008
<b>Briqueterie Taghaste</b>	27314	0.027
<b>Verrerie de l'est</b>	8109	0.008
<b>Total</b>	<b>69873</b>	<b>0.070</b>

### 7. Les contraintes liées aux ressources hydriques

Parmi les principales contraintes de la wilaya dans le secteur des ressources en eaux, il y a lieu de citer notamment, le relief très accidenté, le déficit en infrastructures de mobilisation de la ressource hydrique, l'éparpillement de la population, la sous-exploitation des forêts et le déficit en infrastructures et équipements de proximité indispensables.

Absence d'études hydrogéologiques de la région, afin de connaître de plus les potentialités en eaux.

Les trois usagers des ressources en eau engendrent actuellement un souci majeur, car ces sont des domaines responsables des plus importantes sources de pollution, tels que la pollution urbaine représentée par les rejets urbains de l'ensemble des communes qui sont déversés sans traitement préalable dans l'Oued Medjerda et ses affluents, une pollution industrielle, à partir

des unités de production qui déversent leurs effluents au niveau de l'Oued Medjerda, et une Pollution agricole, due à l'existence de plusieurs fermes pratiquant divers types d'élevages (ex. : Complexe avicole) et ne disposant d'aucun équipement de sécurité contre la pollution et à l'utilisation intensive des engrais et de pesticides.

## 8. Conclusion

La zone d'étude possède un potentiel important de ressources en eau, estimé à 252.2 millions de m<sup>3</sup> d'apport annuel en souterraine, captés par plusieurs forages, puits et sources, et des eaux superficielles, estimés à de 182.4 millions de m<sup>3</sup> d'apport annuel, une partie de ces eaux emmagasinées dans un seul barrage de Ain Dalia de capacité de 76 Hm<sup>3</sup>, et quelques petits barrages et retenues collinaires, d'autres s'écoules à travers l'oued Medjerda et ses affluents, s'ajoute des eaux non conventionnelles des deux STEP, qui sont en sous exploitation, et ne participe pas d'une manière efficace au volume d'eau annuellement mobilisée.

Ces ressources sont principalement exploités en AEP avec 74.3 %, l'agriculture de 25.4%, et en fin l'industrie avec un taux de 0.3%.

L'alimentation en eau potable a bénéficié d'un volume totale de 17.2 Hm<sup>3</sup> sur par rapport à un besoin estime à 18.6 Hm<sup>3</sup>, enregistrant ainsi un déficit de 1.39 Hm<sup>3</sup>.

La campagne d'irrigation menée pendant l'année 2016 a touché seulement une superficie de 3362 ha irriguée, ce qui représente 2.7% de la SAU, et n'a pas atteint l'objectif fixé par le service hydro agricole de 5000 ha.

## **Chapitre VI**

# **SIMULATION DE LA GESTION DE LA DEMANDE EN EAU PAR LE MODELE WEAP**

## 1. Gestion intégrée des ressources en eau

### 1. 1. Les principes de la gestion intégrée des ressources en eau

La gestion intégrée des ressources en eau (GIRE) a pour définition (Fondation 2IE, 2010).

La GIRE est un processus qui encourage la mise en valeur et la gestion coordonnée de l'eau, des terres et des ressources associées en vue de maximiser de manière équitable le bien-être économique et social qui en résulte d'une manière équitable, sans compromettre la durabilité d'écosystèmes vitaux [GWP, Partenariat Mondial de l'Eau (2000)].

La GIRE est un processus d'attribution de fonctions à des systèmes d'eau, d'établissement de normes, de mise en vigueur (surveillance) et la gestion. Elle comprend la collecte de données, l'analyse de processus physiques et socioéconomiques, la considération des différents intérêts et la prise de décisions par rapport à la disponibilité, l'exploitation et l'usage des ressources en eau (Hofwegen et Jaspers, 1999).

La GIRE est une question de planification et de gestion coordonnées, de l'eau et d'autres ressources naturelles en vue de leur utilisation équitable, efficace et durable (Calder, 1999).

La GIRE exprime l'idée que les ressources en eau devraient être gérées de façon holistique, en coordonnant et en intégrant tous les aspects et les fonctions du prélèvement de l'eau, de la surveillance de l'eau et de la fourniture des services liés à l'eau, afin que ceux qui dépendent des ressources en profitent durablement et équitablement (CE, 1998).

La GIRE serait comme un outil visant à utiliser durablement l'eau pour répondre aux différents besoins, en permettant à la fois de :

- lutter contre les catastrophes naturelles et les risques d'érosion, d'inondation ou de sécheresse, en prenant en compte la gestion de l'eau et de l'espace ;
- satisfaire de façon fiable les besoins des populations urbaines et rurales en eau potable de qualité, afin d'améliorer l'hygiène et la santé et de prévenir les grandes épidémies ;
- assurer la suffisance agroalimentaire par l'assainissement des terres agricoles et l'irrigation appropriée ;
- développer de manière harmonieuse l'industrie, la production énergétique, la pratique des loisirs et les transports par voie d'eau ;
- Prévenir et combattre les pollutions de toutes origines et de toutes natures, afin de préserver les écosystèmes aquatiques, notamment en vue de protéger la faune et d'optimiser la production piscicole pour l'alimentation, de satisfaire les besoins des différents usages et de façon plus générale de préserver la biodiversité des milieux aquatiques, RIOB (atelier de Mars 2000).

Une des pierres angulaires de la philosophie de la GIRE est que l'unité de base de gestion de l'eau devrait être un «bassin versant» ou «bassin de cours d'eau de surface». Un bassin versant est une entité physique naturelle qui dispose d'un système intégré contiguë d'eau de surface avec un exutoire unique. La gestion de l'eau par bassin versant est donc basée sur la réalité écologique physique. En raison de cette philosophie de base, de nombreux pays gèrent désormais leur eau par bassin versant, et de nombreux organismes de bassin (OB) et d'autres Autorités de gestion de l'eau de bassins versants ont été créés (Vanessa, 2015).

Le but de la gestion intégrée est d'assurer que les ressources en eau soient gérées de façon durable pour répondre au bien-être environnement social et économique des usagers.

La gestion intégrée reconnaît s'inscrive dans une démarche systémique, elle considère que la préservation des usages de l'eau est conditionnées par celles des milieux aquatiques.

La gestion intégrée est un processus qui a pour finalité de donner une vision partagée sur les ressources en eau locales, leurs vulnérabilités et leurs potentiels

- Dans la gestion des ressources en eau, on peut identifier trois composantes (Fig. 61) :  
Le bassin, c'est le milieu qui conditionne l'offre en eau avec sa variabilité spatio-temporelle, les usages, ce sont les sociétés qui conditionnent les demandes en eau et leur priorité.  
Les aménagements ce sont les ouvrages destinées à mobiliser et partager la ressource.
- La gestion tient une position centrale car elle recouvre différents aspects : techniques, réglementaires, économiques, participatifs qui peuvent porter sur les 3 composantes (Pouget, 2003).

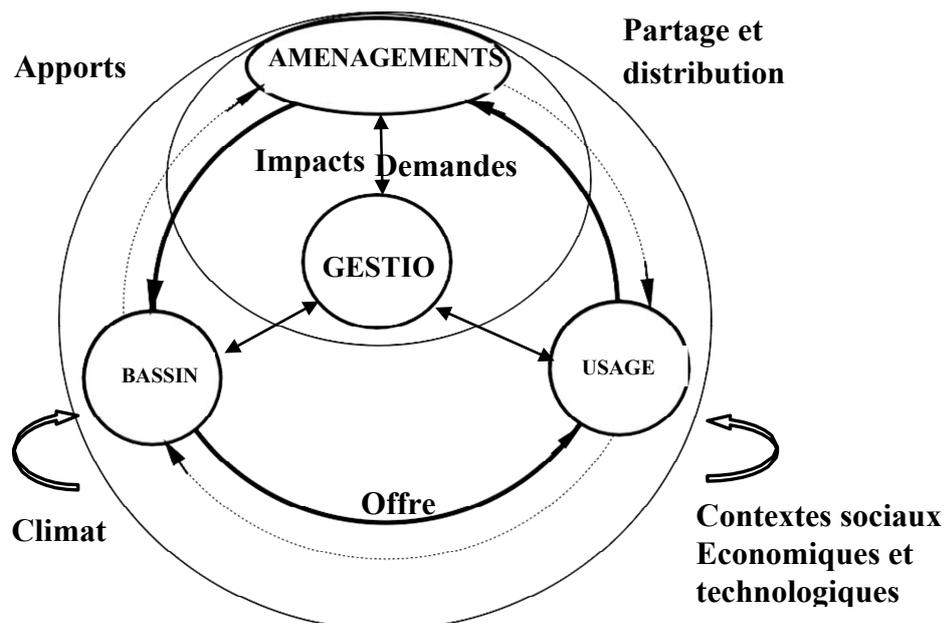


Figure 61: Les composantes de la gestion des ressources en eau (Pouget et al., 2003)

## **1. 2. Intégration des principes de la GIRE dans la politique nationale**

Vu que l'eau est un élément de survie, notamment en Algérie, qui conditionne fortement le développement social et économique, et les défis majeurs relatives à la gestion des ressources en eau. C'est à ce constat que l'Algérie a pris conscience de la nécessité et de l'urgence de modifier sa politique de l'eau depuis déjà une vingtaine d'années. Elle a adopté la GIRE comme approche de développement des ressources en eau en 1996, les actions conduites par l'Algérie se sont inscrites dans les principes du développement durable, (Kherbache, 2014) ces principes sont les suivants

### **1. 2. 1. Principe écologique:**

Les eaux douces sont une ressource finie et vulnérable, essentielle pour le maintien de la vie, le développement et l'environnement. En Assurer une gestion quantitative et qualitative des eaux de surface et des eaux souterraines, avec la protection efficace des ressources en eau et des écosystèmes hydriques contre la pollution

### **1. 2. 2. Principe institutionnel:**

La mise en valeur et l'aménagement des eaux doivent s'appuyer sur une démarche participative, impliquant les usagers, les planificateurs et les décideurs à tous les niveaux ; et désignation des structures chargées de la gestion globale des eaux. Dans le cadre de la politique nationale de développement, l'agence nationale de gestion intégrée des ressources en eau, (AGIRE) est chargée de réaliser, au niveau national, toutes actions concourant à une gestion intégrée des ressources en eau (Décret exécutif n° 11-262 du 30 juillet 2011).

### **1. 2. 3. Principe instrumental:**

L'eau a une valeur économique dans toutes ces utilisations concurrentes et devrait être reconnue comme un bien économique. Ce principe repose sur l'idée que l'eau étant peu abondante, il y a lieu de prêter plus d'attention à la valeur économique des utilisations alternatives et d'accorder une plus grande place aux instruments économiques (les droits d'utilisation de l'eau, les frais d'utilisation, etc...)

## **1. 3. Présentation de l'Agence Nationale de Gestion Intégrée des Ressources en Eau**

En Décembre 2014, l'Agence de Gestion Intégrée des Ressources en Eau (AGIRE) est officiellement installée pour développer cette approche dans la gestion de l'eau en assurant des missions d'orientation, d'animation, de coordination et d'évaluation des ABH. Chargée de réaliser, au niveau national, toutes actions relatives à la gestion intégrée des ressources en eau,

l'AGIRE, créée par le décret exécutif n°11-262 du 30 Juillet 2011 et placée sous la tutelle du Ministère des Ressources en Eau et de l'Environnement, a pour principales missions de :

- Réaliser toutes enquêtes, études et recherches liées au développement de la gestion intégrée des ressources en eau.
- Développer et coordonner les systèmes de gestion intégrée de l'information sur l'eau au niveau national.
- Contribuer à l'élaboration, à l'évaluation et à l'actualisation des plans à moyen et long terme de développement sectoriel.
- Contribuer à la gestion des actions d'incitation à l'économie de l'eau et à la préservation de la qualité des ressources en eau.

Par ailleurs, l'AGIRE assure les sujétions de service public mises à sa charge par l'Etat, maître d'ouvrage, en collaboration avec les agences de bassins hydrographiques. Il s'agit notamment de :

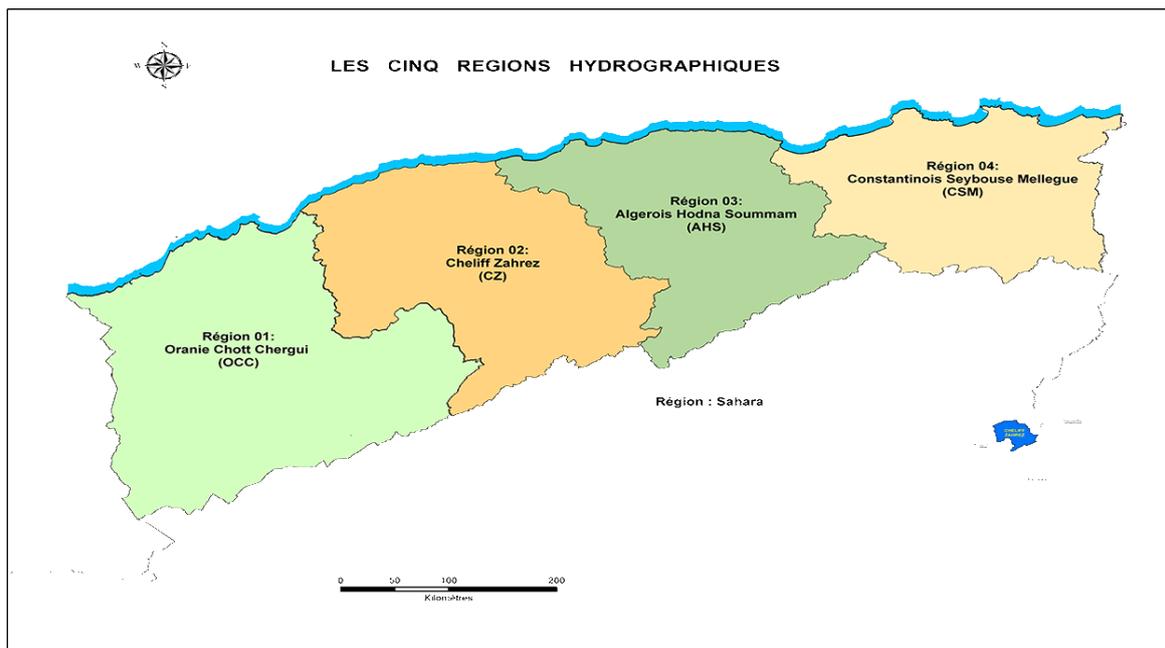
- Assurer le recueil et le traitement des données et indicateurs relatifs aux paramètres quantitatifs caractérisant les ressources en eau et les milieux naturels ainsi que leurs usages.
- Réaliser les opérations techniques de délimitation du domaine public hydraulique naturel particulièrement les oueds et les plans d'eau naturels.
- Élaborer tous documents et mener toutes actions d'information et de sensibilisation des différentes catégories d'utilisateurs sur l'économie de l'eau et la préservation de sa qualité.

#### **1. 4. Les institutions de la gestion de l'eau en Algérie**

Cinq Agences de bassins hydrographiques sous tutelle du MRE, créées dans le cadre de la nouvelle politique de l'eau (1996):

- l'Agence de bassin hydrographique Algérois-Hodna- Soummam,
- l'Agence de bassin hydrographique Chellif-Zahrez,
- l'Agence de bassin hydrographique Constantinois- Seybousse-Mellegue
- l'Agence de bassin hydrographique Oranie- Chott Chergui,
- l'Agence de bassin hydrographique Sahara.

Ces cinq agences sont chargées de la gestion intégrée des ressources en eau et s'appuient sur des Comités de bassins.



**Figure 62: Les Cinq Agences de bassins hydrographiques en Algérie**

Les Agences ont principalement pour mission:

- ✓ d'élaborer et de mettre à jour le cadastre hydraulique et la balance hydraulique du bassin hydrographique, et de collecter dans ce but toutes données statistiques, tous documents et informations sur les ressources en eau, les prélèvements et les consommations d'eau,
- ✓ de participer aux opérations de surveillance de l'état de pollution des ressources en eau et de définition des spécifications techniques relatives aux rejets des eaux usées et aux dispositifs de leur épuration,
- ✓ de mener toutes actions d'information et de sensibilisation des usagers domestiques, industriels et agricoles en vue de promouvoir l'utilisation rationnelle et la protection des ressources en eau.

### 1. 5. Les directions impliquées dans la gestion de l'eau en Algérie

Outre Le Ministère des ressources en eau (MRE) chargé de l'orientation de la politique de l'eau, de la planification, de la réglementation et de la supervision des activités. D'autres entités (Tab. 59) s'occupent de la planification, des études, de la construction et de l'entretien des équipements et de la fourniture des services d'eau et d'assainissement ainsi que des services d'irrigation.

Tableau 59: Organisation du secteur de l'eau en Algérie (INECO 2009)

<i>Domaine</i>	<i>Ministère des ressources en eau</i>	<i>Agences nationale</i>	<i>Administrati on locale</i>	<i>Utilisateur final</i>
<i>Planification</i>	<i>Direction de la planification et des affaires économiques (DPAE)</i>		Directions Régional de la wilaya	
<i>Grand infrastructure hydraulique</i>	<i>Direction de la mobilisation des ressources en eau (DMRE)</i>	<i>l'Agence nationale des barrages et transferts (ANBT)</i> Etudes de faisabilité Implantation et gestion		
<i>Irrigation</i>	<i>Direction de l'hydraulique agricole (DHA)</i>	Agence nationale de l'irrigation et de drainage (ONID) Gestion des périmètres irrigués		Agriculteurs & associations de l'irrigation
<i>Distribution de l'eau</i>	<i>Direction de l'alimentation en eau potable (DAEP)</i>	<i>Agence nationale de distribution d'eau (ADE)</i> Elaboration des études de faisabilité Implantation des réseaux d'AEP Gestion en générale		
<i>Collection des eaux usées et traitement</i>	<i>Direction de l'assainissement et de la protection de l'environnement (DAPE)</i>	<i>Office nationale pour l'assainissement (ONA)</i> études de faisabilité Implantation et gestion		
<i>Gestion des bassins versants/ Etudes générales</i>	<i>Direction des études et des aménagements hydrauliques (DEAH)</i>	Agences de bassins hydrographiques (ABH) <i>Agence nationale des ressources en eau (ANRH)</i>		

## **2. La modélisation dans la gestion des ressources en eau**

### **2. 1. Outils de modélisation**

Une des principales raisons de modéliser les ressources en eau est de cerner les processus en jeux pour une gestion durable et d'avoir une image spatiale sur l'état de différents variables explicatives en rapport avec la ressource sur une étendue importante (Droogers, 2002).

La modélisation permet d'analyser des scénarios de gestion et de mesurer des tendances éventuelles (croissance démographique, changement climatique, etc.) (Droogers, 2005). L'interprétation de ces scénarios fournis aux décideurs une base de données sur l'évaluation et la planification des ressources en eau.

### **2. 2. Le WEAP un modèle de modélisation des ressources en eau**

Le WEAP utilise une approche intégrée permettant de simuler les interactions entre des variables explicatives naturelles (précipitations, évapotranspiration, ruissellement, etc.) avec des composants d'aménagements (réservoirs, pompage, etc.), permettant d'aboutir à une vision globale de plusieurs facteurs pertinents à la gestion des ressources en eau.

Le WEAP (Water Evaluation And Planning System) est développé par « Stockholm Environment Institute's Boston Center at the Tellus Institute, USA ». C'est un outil de planification des ressources en eau ; il permet d'évaluer une gamme complète d'options de développement de l'eau et de gestion, et tient compte des multiples utilisations concurrentes de l'eau. Le choix du logiciel utilisé dans cette étude est basé sur la disponibilité, l'accessibilité et la flexibilité des paramètres qui le composent et qui permettent l'exploitation d'un large éventail de bases de données collectées.

### **2. 3. L'approche de WEAP**

Opérant avec les principes de base de la balance d'eau, WEAP est applicable aux systèmes municipaux et agricoles, à des zones de planification uniques ou pour des systèmes complexes de rivières à limites étendues. De plus, WEAP peut traiter une large gamme de questions; analyses sectorielles de la demande, préservation de l'eau, droit à l'eau et priorités d'allocation, simulation des eaux souterraines et de surface, gestion des retenues, production d'énergie hydraulique, suivi des pollutions, exigences des écosystèmes, mesures de vulnérabilité et les analyses de bénéfice - coût des projets. L'analyste représente le système en terme de ses diverses sources de fourniture d'eau (rivières, cours d'eau, eau souterraine, barrages et stations de dessalement) ; les retraits, les transferts et les possibilités de traitement des eaux usées ; les exigences des écosystèmes ; les demandes en eau et la génération de pollution.

## 2. 4. La modélisation par WEAP

Les applications de WEAP incluent généralement plusieurs étapes.

### 2. 4. 1. La définition de l'étude

Qui identifie la période de simulation, les limites spatiales, les composantes du système et la configuration du problème.

### 2. 4. 2. L'état Actuel

Qui peut être considéré comme une étape de calage dans l'élaboration d'une application, fourni une vue instantanée de la demande en eau actuelle, de la charge de pollution, des ressources et des fournitures pour le système. Les hypothèses de base doivent être construites dans cet Etat Actuel pour représenter les politiques, les coûts et les facteurs qui affectent la demande, la pollution, la fourniture et l'hydrologie.

### 2. 4. 3. Les Scénarios

Sont construits sur la base de l'Etat Actuel. Ils permettent d'explorer les impacts d'hypothèses alternatives ou des politiques sur la disponibilité et l'usage de l'eau dans le futur.

### 2. 4. 4. Les Scénarios sont Evalués

À l'égard de la suffisance de l'eau, des coûts et des bénéfices, de la compatibilité avec les objectifs environnementaux et à l'égard de la sensibilité à l'incertitude dans l'estimation des variables clefs.

## 2. 5. Introduction et traitement des données

Pour exploiter le logiciel, un tutorial de format PDF et plusieurs vidéos démonstratives sont disponible sur le site web : <http://www.weap21.org>

### 2. 5. 1. Phase schématique :

Sur la page d'accueil du WEAP, une interface schématique nous a permis placer le suivant:

#### 1. Les sites de ressources d'eau:

- Tracer le réseau hydrographique de l'oued Medjerda et de placer également les sites,
- Le site des eaux superficielles par le Barrage Ain Dalia,
- Le site des eaux souterraines, l'ensemble des aquifères représentée par une seule nappe.

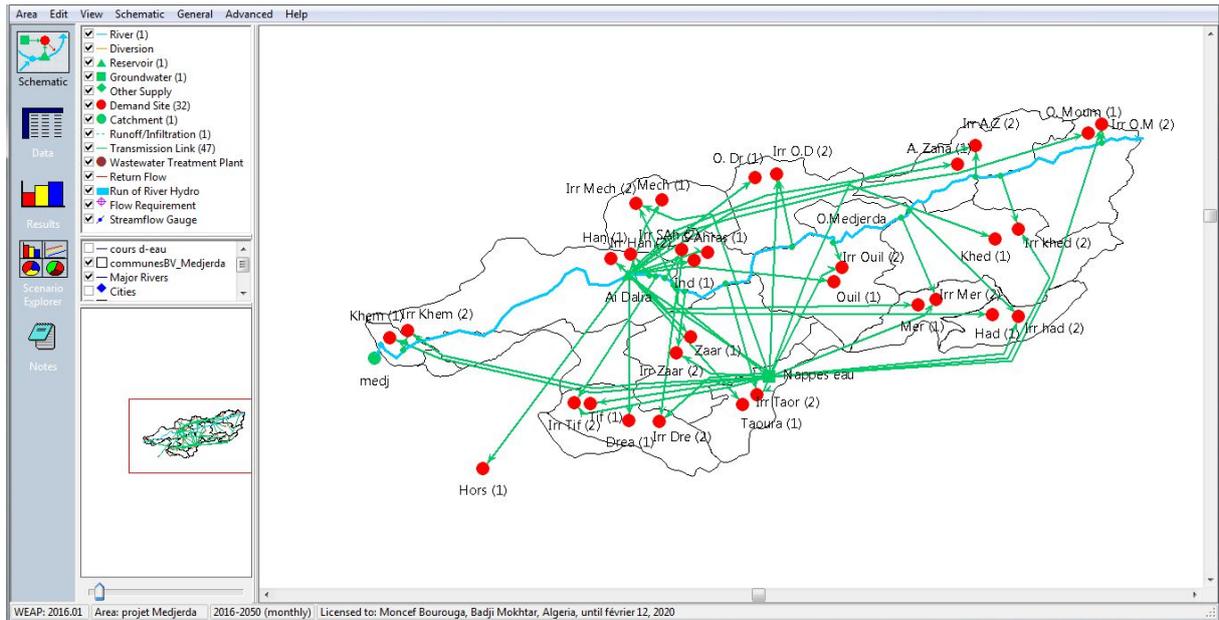
#### 2. Les sites de demandes en eau

- Les chefs lieu du douze communes existantes dans le bassin versant,
- Le cite de demande hors limite de notre bassin d'étude

- Les cites agricole pour chaque commune
- Le site de la de demande industrielle pour les communes possédant des unités industrielles.

**3. Les liaisons de transmission**

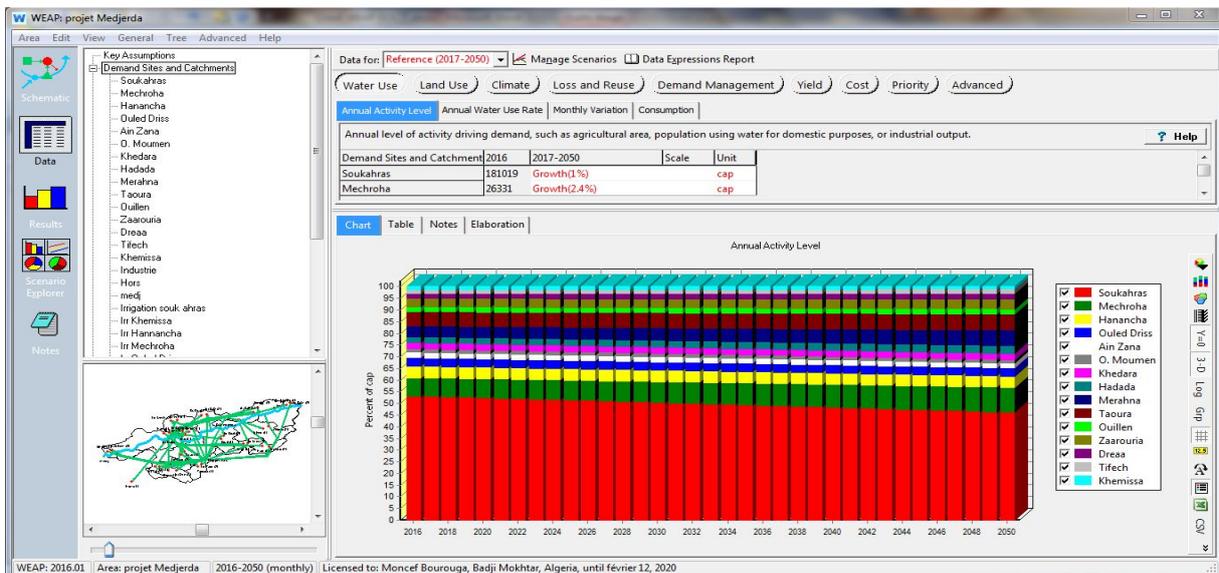
Les liaisons de sites de ressources d'eau avec les sites de demandes respectives.



**Figure 63: Schématisation des sites de demandes et des ressources en eau sur WEAP**

**2. 5. 2. La vue des données**

Cette partie, nous permet de créer des variables et des relations, entrer des hypothèses et des projections utilisant des expressions mathématiques et des relations dynamiques avec Excel



**Figure 64: Vue de données**

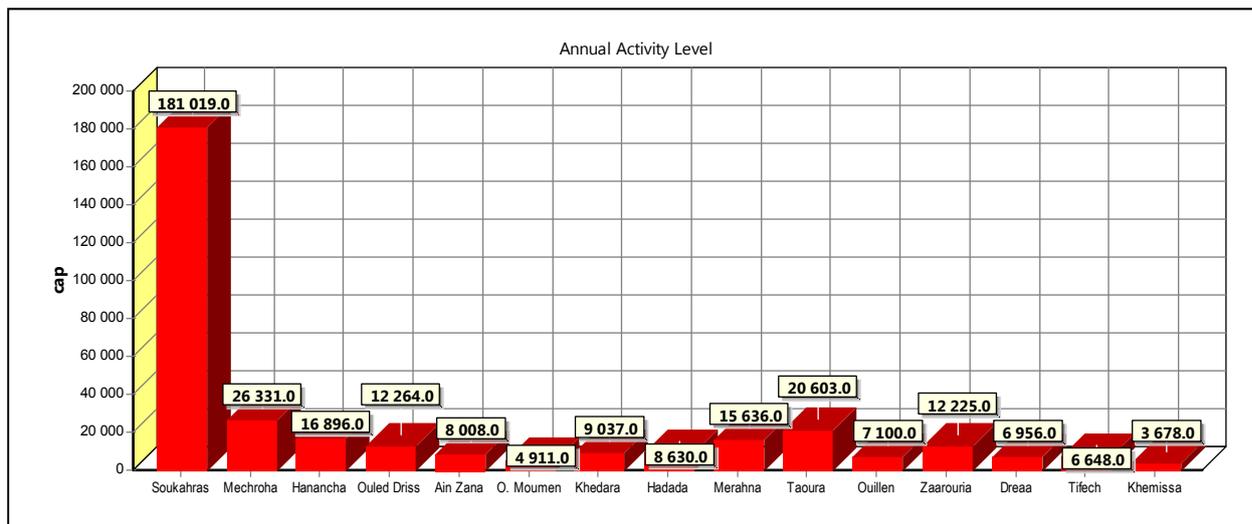
### 2. 5. 2. a. Compte actuel

C'est l'année de référence qui sert comme année de base du modèle et tout le système d'information (les données de la demande et de la distribution de l'eau) est introduit dans l'état actuel. L'année 2016 c'est l'année de référence et ses données construisent le compte d'état actuel « Current Account », pour cette étude, et à partir duquel les scénarios sont construits. Les Scénarios explorent les changements possibles du système dans les années futures, après l'année de l'état actuel.

### 2. 5. 2. b. Niveau d'activité annuelle

Il détermine la demande tel que le nombre d'utilisateurs de l'eau pour l'AEP, l'irrigation et pour l'industrie (niveau de consommation d'eau par unité d'activité). La demande annuelle représente la quantité d'eau exigée par chaque demande. La consommation d'eau est calculée en multipliant le niveau de l'activité annuelle par un taux d'usage. Les niveaux de l'activité sont utilisés dans l'analyse de la demande en eau de WEAP comme une mesure d'activité sociale et économique.

Les sites de demande domestique sont représentés par le nombre d'habitants actuels, calculé par le logiciel WEAP en utilisant le nombre d'habitants de 2016, après le recensement national de 2008 et le taux d'accroissement. Les résultats de calcul sont représentés dans la figure suivante (Fig.65).

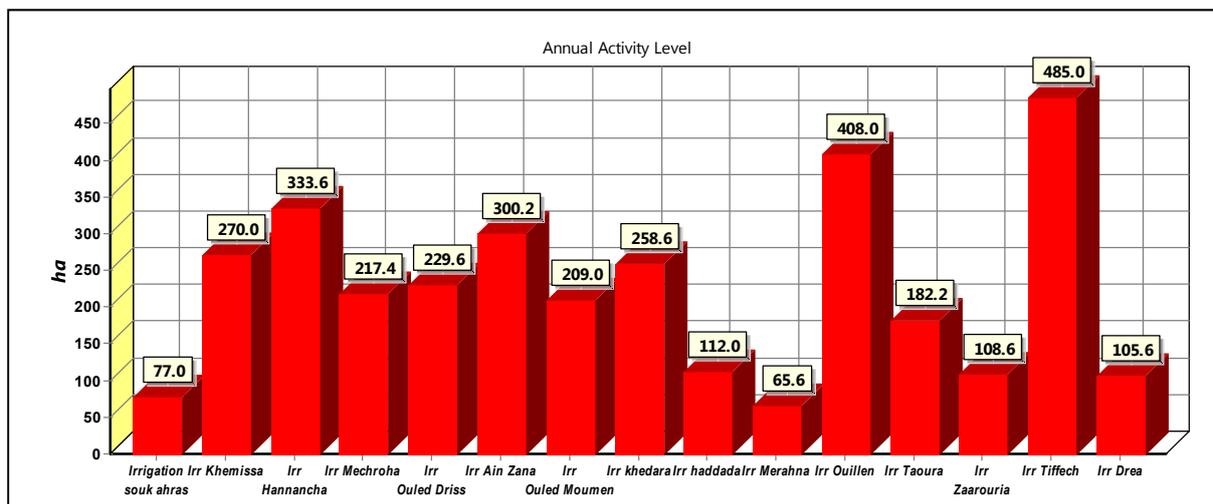


**Figure 65: Niveau d'activité annuelle des sites de demandes domestiques**

Pour pouvoir estimer la demande mensuelle en eau domestique, une dotation moyenne de 150 litres par jour par habitant ( $54.75 \text{ m}^3/\text{an}/\text{hab.}$ ) a été choisie,

### 2. 5. 2. c. Demande en eau pour l'irrigation

Comme niveau d'activité annuel, on a introduit les superficies en hectares des terres agricoles irriguées pour chaque commune et la superficie de la première tranche actuellement active du seul périmètre irrigué existant dans le bassin (Fig. 66).

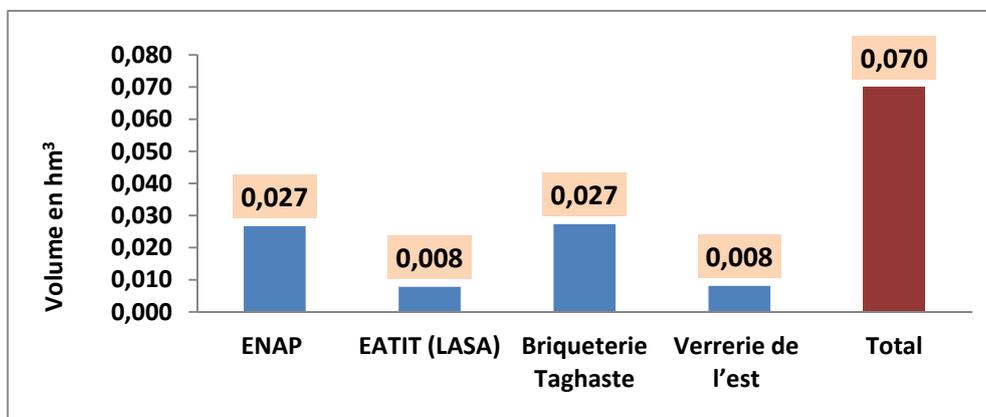


**Figure 66: Niveau d'activité annuelle des sites de demandes Agricoles**

Afin de permettre au logiciel la simulation des demandes en eau agricole, il a été adapté la dotation de l'Algérie, avec une dose de 5000 m<sup>3</sup> par hectare (Zella, 2006). On note les communes de Tiffech, Ouillen et Hanancha ont des superficies irriguées plus importantes que les autres.

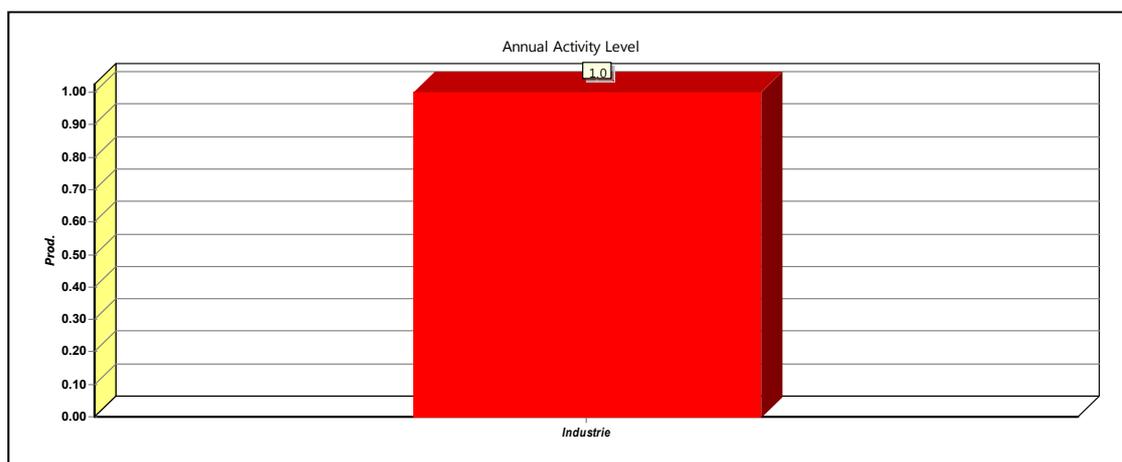
### 2. 5. 2. d. Demandes en eau pour l'industrie

Les demandes en eau industrielles sont renseignées directement auprès des unités industrielles existantes dans le bassin. Comme la zone d'étude ne possède que quatre unités qui totalisent un volume de consommation annuel de 0.07 Hm<sup>3</sup> (Fig. 67), soit 0.3 % de la consommation globale par rapport aux autres usagers, en AEP et en irrigation.



**Figure 67: Consommation annuelles des unités industrielles**

Vu que le volume de consommation en eau de ces unités industrielles est dérisoire par rapport aux autres consommateurs, nous avons opté à les représenté par un (01) seul site de demande sur notre modèle (Fig. 68).



**Figure 68: Niveau d'activité annuelle un site de demande industrielle**

### 2. 5. 2. e. Distribution des ressources

La section des approvisionnements et des ressources détermine les quantités, la disponibilité et l'affectation des approvisionnements, simule les flux mensuels des cours d'eau, y compris les interactions entre eaux de surface et souterraines, la production hydroélectrique et le stockage des réservoirs et des eaux souterraines.

- **Méthodes de simulation des ressources en eau**

Il existe quatre méthodes, au choix, pour simuler des processus de captage comme l'évapotranspiration, le ruissellement, l'infiltration et les demandes d'irrigation.

Nous avons choisi la méthode de coefficient simplifié, Simplified Coefficient Methods (Rainfall Runoff & Irrigation Demands Only), et ce par la disponibilité de données, et elle s'adapte à notre objectif.

L'approche de cette méthode repose sur les besoins de cultures, qui sont calculés en supposant un site de demande avec des processus hydrologiques et agro-hydrologiques simplifiés tels que les précipitations, l'évapotranspiration et la croissance des cultures en mettant l'accent sur l'agriculture irriguée et les précipitations.

Les équations suivantes ont été utilisées pour mettre en œuvre cette approche où les indices LC représentent la couverture terrestre, HU l'unité hydroélectrique, TS le décalage horaire (par exemple, le mois), I irrigué et NI non irrigué:

- Precip disponible pour ET  $LC = \text{Precip}_{HU} * \text{surface}_{LC} * 10^{-5} * \text{Precip Effective}_{LC}$
- ET potentielle  $LC = \text{ET reference}_{HU} * K_{cLC} * \text{surface}_{LC} * 10^{-5}$
- Precip Shortfall  $LC,I = \text{Max}(0, \text{ET potentielle}_{LC,I} - \text{Precip disponible pour ET}_{LC,I})$
- Besoin d'alimentation  $LC,I = (1 / \text{Irr Frac}_{LC,I}) * \text{PrecipShortfall}_{LC,I}$

$$\text{Besoin d'alimentation}_{HU} = \sum_{LC,I} \text{Besoin d'alimentation}_{LC,I}$$

Les quatre équations ci-dessus sont utilisées par le modèle pour déterminer la quantité d'eau supplémentaire (supérieure aux précipitations disponibles) nécessaire pour répondre à la demande d'évapotranspiration de la couverture terrestre (et de l'unité hydroélectrique totale) tout en tenant compte des rendements d'irrigation.

Sur la base du système de priorités, les quantités suivantes peuvent être calculées:

Approvisionnement  $HU$  = calculé par l'algorithme d'allocation WEAP

$$\text{Supply}_{LC,I} = \text{Supply}_{HU} * (\text{Besoin d'alimentation}_{LC,I} / \text{Besoin d'alimentation}_{HU})$$

$$\text{ET Actuel}_{LC,NI} = \text{Min}(\text{ET potentiel}_{LC,NI}, \text{Precip disponible pour ET}_{LC,NI})$$

$$\text{ET Actuel}_{LC,I} = \text{Min}(\text{ET potentiel}_{LC,I}, \text{Prec. dispon. ET}_{LC,I}) + \text{Irr Frac}_{LC,I} * \text{Besoin}_{LC,I}$$

$$\text{EFLC} = \sum_{TS} \text{ET Actuel}_{LC} / \sum_{TS} \text{ET potentiel}_{LC}$$

En conséquence, le rendement réel peut être calculé à l'aide de l'équation suivante:

$$\text{Rendement Actuel}_{LC} = \text{Rendement Potentiel}_{LC} * \text{Max}(0, (1 - \text{facteur de réponse rendement}_{LC} * (1 - \text{EFLC})))$$

$$\text{Rendement}_{LC} = \text{Rendement Actuel}_{LC} * \text{surface}_{LC}$$

$$\text{Valeur de marché}_{LC} = \text{Rendement}_{LC} * \text{Prix de marché}_{LC}$$

Dans la méthode Demande d'irrigation uniquement, le ruissellement n'est pas calculé. Dans la méthode de ruissellement pluvial, le ruissellement vers les eaux souterraines et les eaux de surface peut être calculé avec les équations suivantes:

$$\text{Ruissellement}_{LC} = \text{Max}(0, \text{Precip disponible pour ET}_{LC} - \text{ET potentiel}_{LC}) + (\text{Precip}_{LC} * (1 - \text{Precip Effective}_{LC})) + (1 - \text{Irr Frac}_{LC,I}) * \text{Alimentation}_{LC,I}$$

$$\text{Ruissellement vers GW}_{HU} = \sum_{LC} (\text{Ruissellement}_{LC} * \text{Ruissellement vers GW Fraction}_{LC})$$

$$\text{Ruissellement vers eau de surface}_{HU} = \sum_{LC} (\text{Ruissellement}_{LC} * (1 - \text{Ruissellement vers GW Fraction}_{LC}))$$

Les unités et définitions pour toutes les variables ci-dessus sont:

- Zone [ha] - Zone de couverture terrestre

- Précipitation [mm] - Précipitation
- Precip Effective [%] - Pourcentage de précipitations pouvant être utilisé pour l'évapotranspiration
- Precip disponible pour ET [mm] - Précipitations disponibles pour l'évapotranspiration
- Kc [-] - coefficient de récolte
- ET référence [mm] - Évapotranspiration de la culture de référence
- ET potential [mm] - Évapotranspiration potentielle des cultures
- Precip Shortfall [mm] - Déficit d'évapotranspirations si seules les précipitations sont prises en compte
- IrrFrac [%] - Pourcentage d'eau fournie disponible pour l'ET (efficacité de l'irrigation)
- Besoin d'alimentation [mm] - Besoin en irrigation des cultures
- Offre [mm] - Quantité fournie à l'irrigation (calculée par allocation WEAP)
- EF [-] - Fraction de l'évapotranspiration potentielle satisfaite, moyennée sur la saison (date de plantation à date de récolte)
- Facteur de réponse rendement (Yield Response Factor) [-] - Facteur saisonnier qui définit l'évolution du rendement lorsque ET Actuel est inférieur à ETP potentiel (stress hydrique).
- Rendement potentiel [KG / ha] - Le rendement potentiel maximal dans des conditions optimales d'approvisionnement en eau.
- Rendement actuel [Kg / ha] - Le rendement réel compte tenu de l'évapotranspiration disponible
- Rendement [Kg] - Rendement réel pour la classe de terre
- Prix du marché [\$ / kg] - Valeur unitaire de la récolte.
- Valeur de marché [\$] - Valeur totale de la récolte pour la classe de terre.
- Ruissellement vers GW Fraction [-] - Fraction de ruissellement allant dans les eaux souterraines
- Ruissellement vers GW [mm] - Ruissellement vers les eaux souterraines
- Ruissellement vers eau de surface [mm] - Ruissellement vers les sources d'eau de surface

### 2. 5. 2. f. Création des hypothèses clés

Le WEAP permet de créer de nouvelles variables hypothèses pour la modélisation des scénarios, interprété par trois étapes, le premier, une année choisie pour servir comme année de base pour le modèle «Comptes Actuels», ensuite un scénario de référence « Référence » est établi à partir des Comptes actuels pour simuler la même évolution du système sans intervention, et en fin des scénarios « Quoi si » peuvent être créés pour changer le scénario « Référence » et évaluer les effets des changements des politiques, climatique ou autres.

- **Changement d'horizon de temps du secteur**

Le compte courant est créé depuis la zone d'étude. On change juste l'année de la fin des scénarios. Ce qui donne comme compte courant l'année 2016 et on choisit l'année 2050 comme fin des scénarios (Fig. 69).

**Years and Time Steps**

Time Horizon

Current Accounts Year: 2016

Last Year of Scenarios: 2050

Time Steps per Year

12

Add Leap Days?

Time Step Boundary

Based on calendar month

All time steps are equal length

Set time step length manually

Water Year Start

January

#	Title	Abbrev.	Length	Begins	Ends
1	January	Jan	31	1 Jan	31 Jan
2	February	Feb	28	1 Feb	28 Feb
3	March	Mar	31	1 Mar	31 Mar
4	April	Apr	30	1 Apr	30 Apr
5	May	May	31	1 May	31 May
6	June	Jun	30	1 Jun	30 Jun
7	July	Jul	31	1 Jul	31 Jul
8	August	Aug	31	1 Aug	31 Aug
9	September	Sep	30	1 Sep	30 Sep
10	October	Oct	31	1 Oct	31 Oct

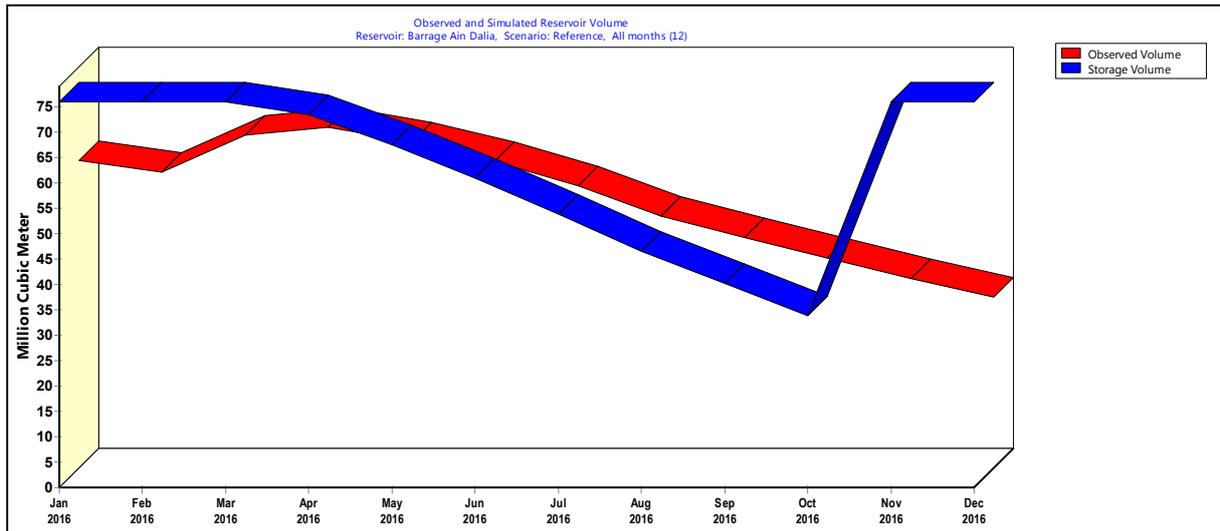
Time Step Name Format: October / Oct

The study period will run from January, 2016 to December, 2050.

Figure 69: Horizon de calcul pour le scénario

- **Calibration du model**

Pour étalonner notre logiciel, les Volumes moyens mensuels de remplissage barrage observés d'une période de cinq ans (2011-2016) ont été exploités. La figure ci-dessous présente une comparaison entre le volume de stockage observé et simulé par WEAP (Fig. 70).



**Figure 70: Volume observé / Volume simulé**

Pour juger la performance de la simulation WEAP, le coefficient de Nash-Sutcliffe (NSE) est utilisé. Il s'agit d'une statistique normalisée qui détermine l'importance relative de la variance résiduelle («bruit») par rapport à la variance des données mesurées («information») (Nash & Sutcliffe, 1970). NSE est calculé comme indiqué dans l'équation suivante:

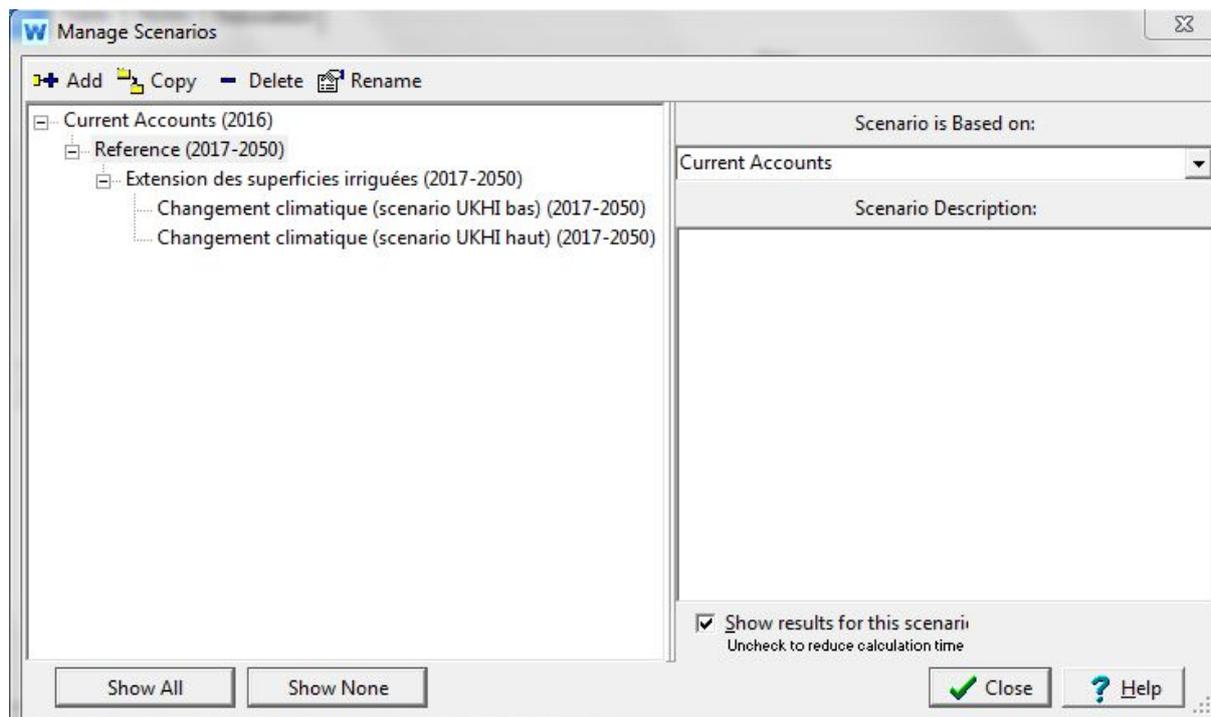
$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (V_0^t - V_m^t)^2}{\sum_{t=1}^T (V_0^t - \bar{V}_0)^2}$$

Où  $V_0^t$  est le volume de stockage mensuel mesuré (observé),  $V_m^t$  est le volume de stockage moyen mensuel simulé,  $\bar{V}_0$  est la moyenne des volumes de stockage mesurés sur la période d'observation. Cette expression tend vers 1 lorsque le volume calculé tend vers le débit mesuré, le calcul abouti à une valeur de 57 %, la simulation est significative.

### 2. 5. 3. Création des scénarios

#### 2. 5. 3. a. Scenario de référence (SR)

Le scénario de référence (SR) est un scénario hérité du compte courant. Il faut changer sa description pour refléter son rôle réel (Fig. 71).



**Figure 71: Scénario de référence**

La barre d'outils située en haut à gauche du Gestionnaire de scénarios (Manage scenarios) nous permet d'ajouter, de copier, de supprimer et de renommer des scénarios. La situation actuelle (2016) est étendue à l'avenir vers (2017 à 2050).

Les scénarios adoptés pour notre étude, se focalise sur :

1. Les scénarios sur le changement climatique, en se basant sur les projections climatique à l'horizon 2020- 2050 pour l'Algérie, obtenu par le modèle UKHI issu du Global Water Partnership, du modèle IS92a sur deux hypothèses haut et bas.
2. l'augmentation des terres irrigués, suite à la sa faible exploitation par rapport à la surface agricole utile disponible dans la zone d'étude.

### **2. 5. 3. b. Scenario de changement climatique (SCC)**

Selon les résultats du projet national ALG / 98 / G31 (Elaboration de la stratégie nationale et du plan d'action pour le changement climatique), le nord-est de l'Algérie est soumis aux conséquences du réchauffement climatique avec réduction des apports et augmentation de la température (Abdelguerfi, 2003).

Selon le modèle UKHI (United Kingdom Meterological Office High Resolution) en adoptant le scénario « IS92a » du GIEC avec les deux hypothèses haut et bas (Fig. 72).

Saison	Paramètre Climatique	2020		2050	
		Bas	Haut	Bas	Haut
Automne	T °C (+)	0,8	1,1	1,2	2,2
	P % (-)	6	8	10	15
Hiver	T °C (+)	0,65	0,8	0,95	1,6
	P % (-)	10	10	16	16
Printemps	T °C (+)	0,85	0,95	1,25	1,9
	P % (-)	5	9	10	20
Eté	T °C (+)	0,85	1,05	1,25	2,1
	P % (-)	8	13	15	22

**Figure 72: deux hypothèses de projection climatique**

Donc on aura deux scénarios pour le changement climatique:

1. Scénario changement climatique (selon UKHI- IS92a\_ bas)
2. Scénario changement climatique (selon UKHI- IS92a \_ haut)

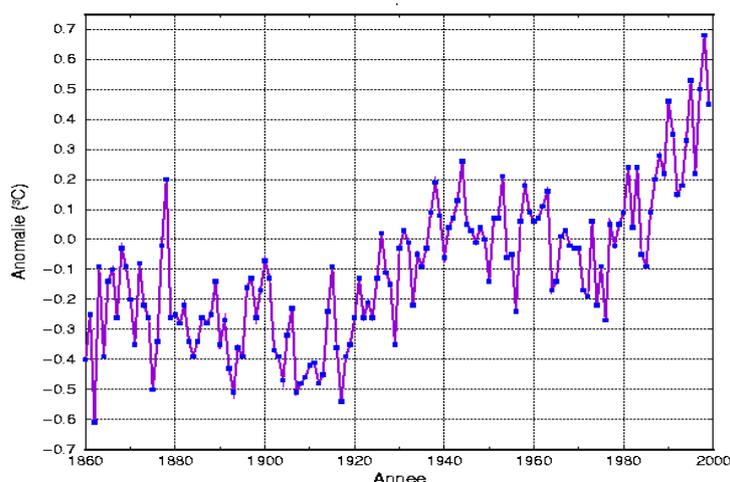
### 2. 5. 3. b. i. Généralités sur le changement climatique et les modèles de projections

Le réchauffement climatique, est par définition, l'augmentation des températures liées à l'activité industrielle et notamment à l'effet de serre : on parle donc parfois du réchauffement climatique dit « d'origine anthropique ». Il s'agit donc d'une forme de réchauffement climatique dont les causes ne sont pas naturelles mais économiques et industrielles.

Le réchauffement du système climatique est sans équivoque et, depuis les années 1950, beaucoup de changements observés sont sans précédent depuis des décennies voire des millénaires. L'atmosphère et l'océan se sont réchauffés, la couverture de neige et de glace a diminué, le niveau des mers s'est élevé et les concentrations des gaz à effet de serre ont augmenté. En un point donné, les fluctuations inter-annuelles du climat peuvent être considérables, mais l'analyse de données, météorologiques ou autres, sur de larges régions et pour des périodes de quelques décennies ou plus, laissent apparaître d'importantes variations systématiques.

En moyenne globale, la température de surface a augmenté de 0,3 à 0,6 °C environ depuis la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle. Les données recueillies depuis 1990 et les nouvelles analyses effectuées depuis n'ont pas modifié les estimations de cette augmentation de température.

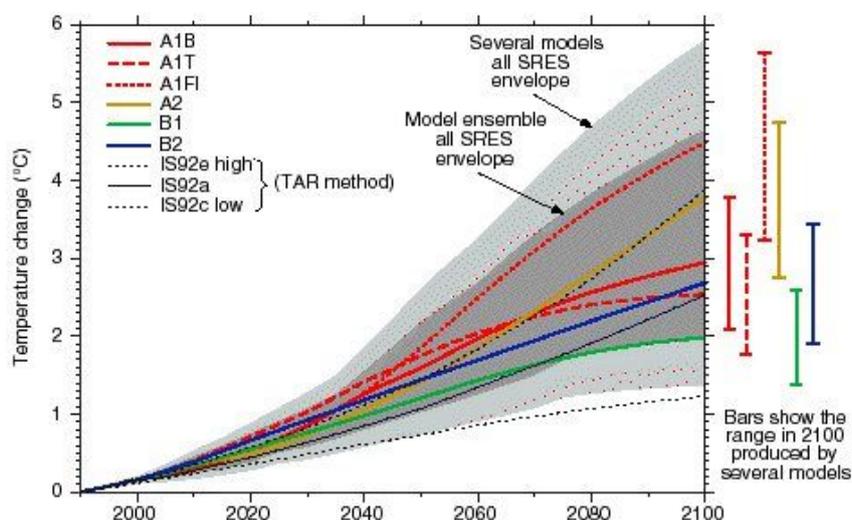
La période chaude et persistante du phénomène El Niño / Oscillation australe – phénomène à l'origine de sécheresses et d'inondations dans de nombreuses régions – observée entre 1990 et la mi-1995 a été inhabituelle par rapport à la situation au cours des 120 dernières années (Jouzel, 2003).



**Figure 73: Evolution de la température de l'hémisphère Nord**

### 2. 5. 3. b. ii. Les projections climatiques et scénario futurs

Le GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) est créé en 1988 avec pour objectif d'étudier l'évolution du phénomène de réchauffement climatique et ses conséquences. Il rassemble des centaines de scientifiques, climatologues, géologues, océanographes, biologistes, mais aussi des économistes, sociologues, ou ingénieurs et d'autres spécialistes de divers domaines afin d'avoir une vision globale de ce phénomène.



**Figure 74: Projections d'élévation de température moyenne globale en fonction des différents scénarios (GIEC, 2013)**

La communauté scientifique a défini par conséquent des nouvelles simulations de modèles climatiques remplaçant les simulations du rapport spécial sur les scénarios d'émissions SRES et IS92. Ce sont les profils représentatifs d'évolution de concentration (RCP) qui prévoient

différents scénarios de concentrations atmosphériques du CO<sub>2</sub>. Ils sont identifiés par leur forçage radiatif total pour l'an 2100 par rapport à 1750 et sont du plus optimiste au plus pessimiste RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 et RCP8.5 (5<sup>e</sup> rapport du GIEC, novembre 2014).

### 2. 5. 3. c. Scénario d'extension de terres irriguées (SETI)

Dans ce scénario, nous avons défini une augmentation du taux des surfaces des terres irriguées de 60% chaque 10 ans, ce taux inspiré de l'objectif du service hydro agricole de la wilaya de Souk Ahras dans le projet quinquennale 2014-2019 (PMH, 2016).

### 2. 5. 3. d. Scénario changement climatique et d'extension des terres irriguées

Ce scénario est basé sur le croisement des trois scénarios précédents.

## 2. 6. Résultats

### 2. 6. 1. Ressources en eau

#### 2. 6. 1. a. Evolution des Précipitations par scénario

Pour les scénarios qui ne tiennent pas compte de l'effet du changement climatique (SR et SETI), les précipitations annuelles sont constantes sur toute la période de simulation (Fig. 75) ce qui implique un apport annuel de 1075.7 millions de mètre cube (Tab. 60).

L'effet du changement climatique (SCC) par ses deux niveaux (haut et bas) est bien apparu, avec une diminution progressive des apports pluviaux allant de 1061 Hm<sup>3</sup> en 2020 à 963 Hm<sup>3</sup> en 2050 pour SCC niveau bas, et de 1056.8 Hm<sup>3</sup> en 2020 à 926 Hm<sup>3</sup> en 2050 pour SCC niveau haut, voir (Tab. 60).

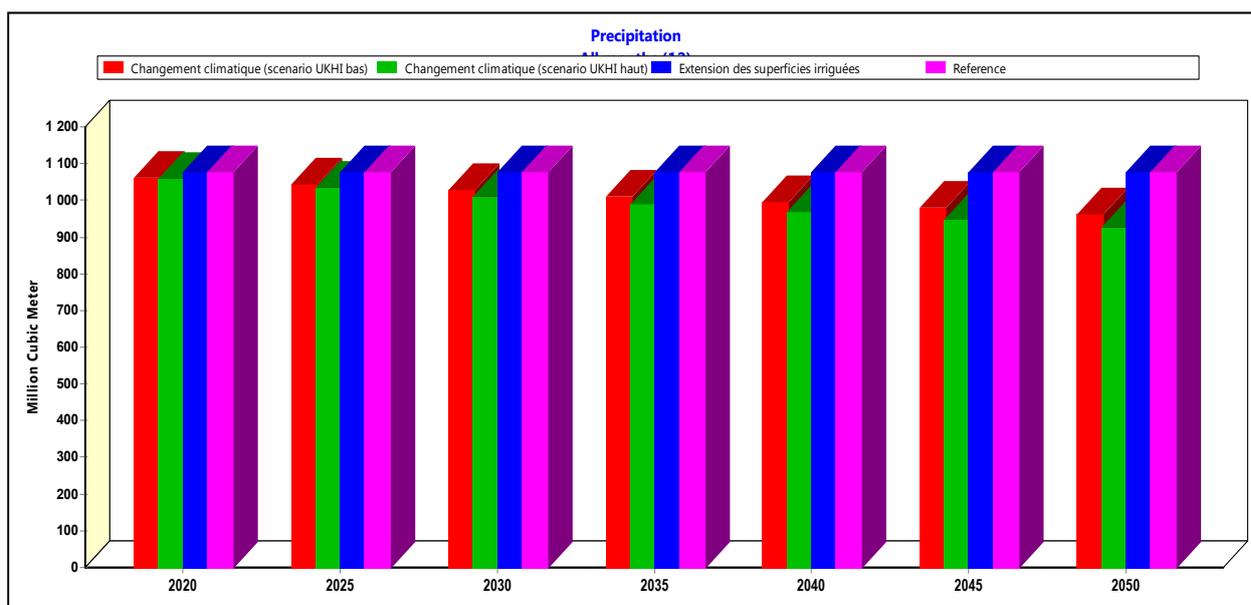


Figure 75: Evolution des Précipitations annuelles par scénario (2016-2050)

Tableau 60: Evolution des apports annuels des précipitations par scénario

Scénarios	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Apport en précipitation en Hm <sup>3</sup> SCC (IS92_bas)	1061.8	1045	1028	1011	995	979	963
Apport en précipitation en Hm <sup>3</sup> SCC (IS92_haut)	1056.8	1034	1011	989	967	946	926
Apport en précipitation en Hm <sup>3</sup> (SETI)	1075.7	1075.7	1075.7	1075.7	1075.7	1075.7	1075.7
Apport en précipitation en hm <sup>3</sup> (Référence)	1075.7	1075.7	1075.7	1075.7	1075.7	1075.7	1075.7

### 2. 6. 1. b. Evapotranspiration réelle simulée par scénario

L'ETR restera constant pour le scénario de référence et celui de (SETI), avec la valeur de 636.3 mm, et ce jusqu'au 2050 (Tab. 61).

L'ETR diminuera pour les scénarios (SCC) de ces deux niveaux, d'environ 635.1 mm en 2020 à une moyenne de 613.9 mm en 2050, soit une différence de 21.4 mm pour le scénario (SCC- IS92\_niveau bas), de 631.7 mm en 2020 à une moyenne de 586.9 mm en 2050, soit un écart de 37.5 mm pour le scénario (SCC- IS92\_niveau haut), voir (Tab. 61 et Fig. 76). Cette diminution due à l'insuffisance de l'eau disponible à cause de la diminution des précipitations.

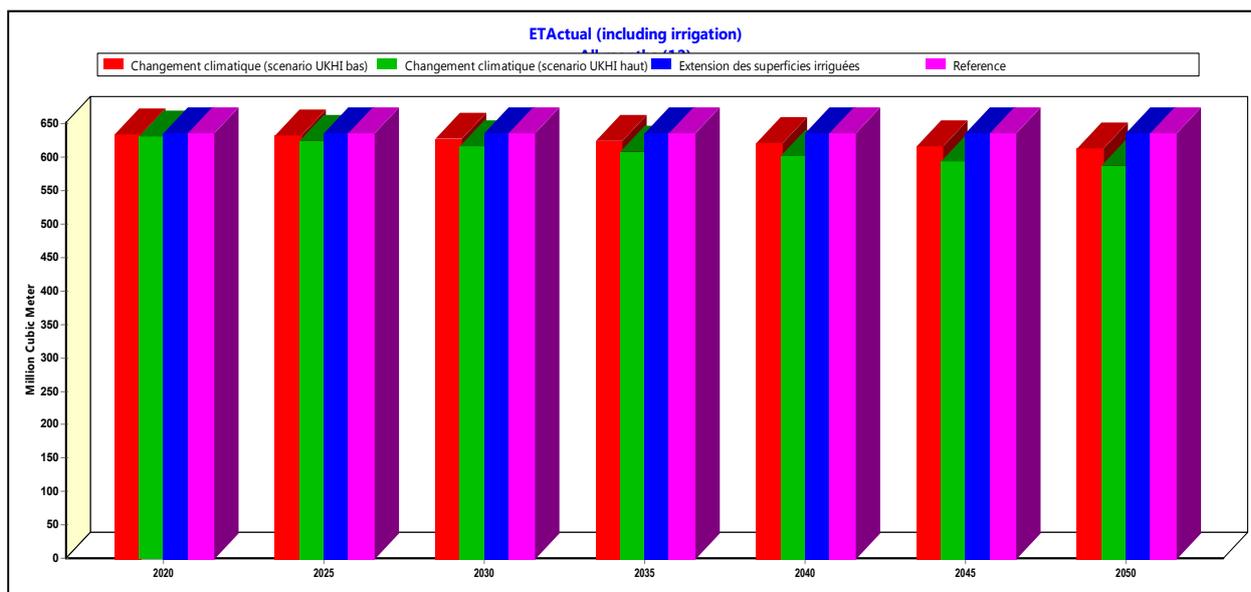


Figure 76: Evolution de l'évapotranspiration par scénario (2016-2050)

Tableau 61: Evolution de l'évapotranspiration réelle annuelle par scénario

Scénarios	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
ETR en mm SCC (UKHI bas)	635.1	632.2	628.3	624.5	620.9	617.3	613.9
ETR en mm SCC (UKHI haut)	631.7	624.8	616.9	609.1	601.6	594.2	586.9
ETR en mm (SETI)	636.3	636.3	636.3	636.3	636.3	636.3	636.3
ETR en mm Référence	636.3	636.3	636.3	636.3	636.3	636.3	636.3

## 2. 6. 2. Demandes en eau

L'évolution des demandes en eau sont liées directement à l'accroissement du nombre des usagers, et l'extension des superficies de terres irrigués (désigné par Niveau d'activité annuelle).

### 2. 6. 2. a. Evolution de nombre d'habitants pour scénarios tendanciels (3 scénarios)

Dans les trois scénarios, la population dans les quinze (15) communes existantes dans le bassin versant, passe de 339 942 en 2016 à 549 242 habitants en 2050 (Fig. 77).

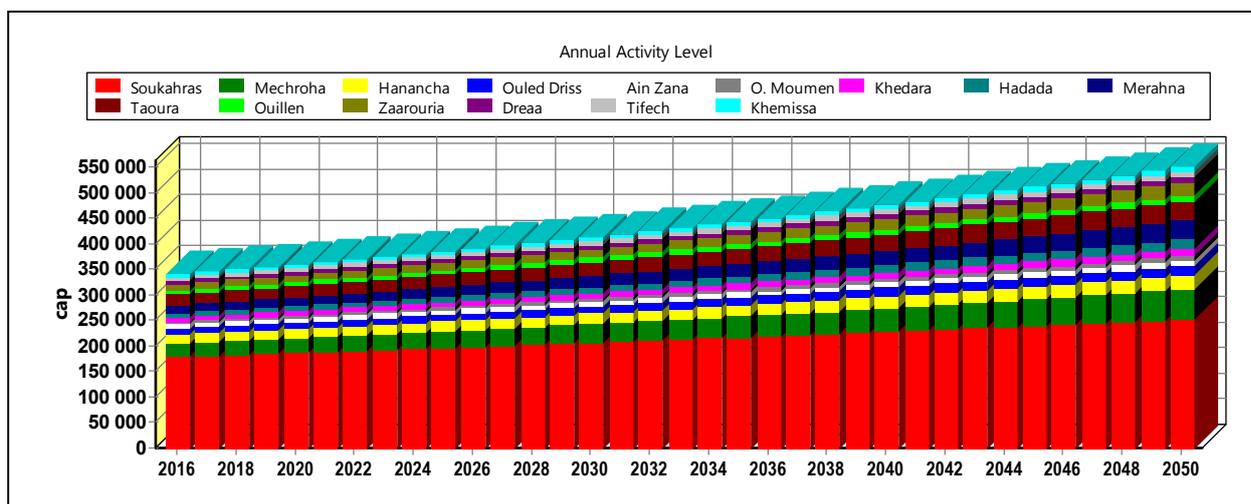


Figure 77: Evolution de nombre d'habitant pour tous les scénarios

### 2. 6. 2. b. Evolution des superficies de terres irriguées (3 scénarios)

Dans les trois scénarios, les superficies des terres irriguées à travers les quinze (15) communes existantes dans le bassin versant, passe de 3362 ha (soit 2.7% de la SAU) en 2016 à 16923 ha, soit (13.5% de SAU) en 2050 (Fig. 78).

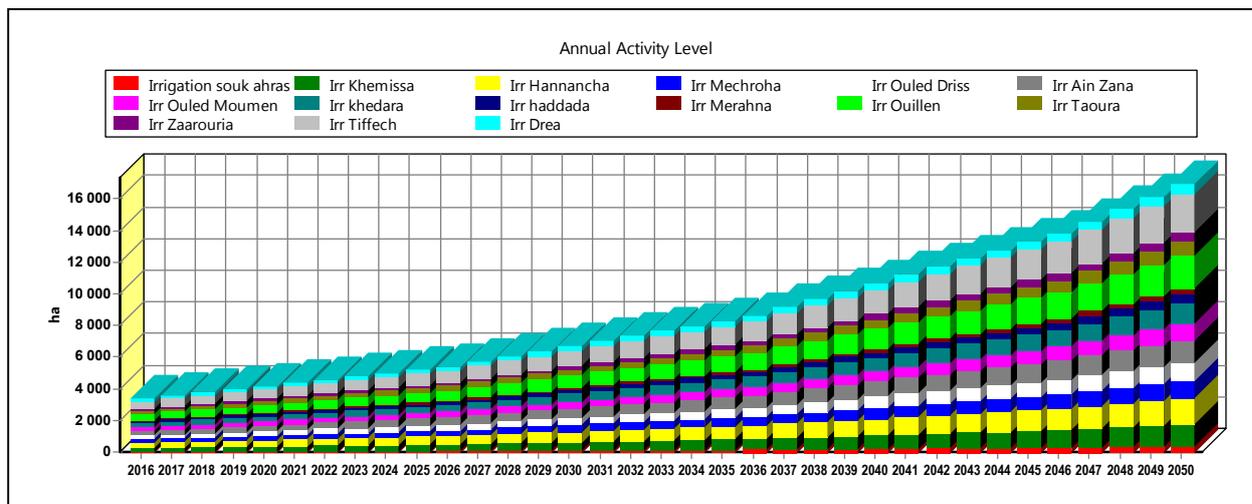


Figure 78: Evolution des superficies irriguées dans le bassin versant pour tous scénarios

2. 6. 2. c. Evolution des besoins en eau pour tous les usagers (3 scénarios)

Les besoins en eau sont nettement évolués de l'année de référence 2016 de 55.2 Hm<sup>3</sup> pour 60.3 Hm<sup>3</sup> en 2020 à 134.5 Hm<sup>3</sup> en fin de scénario 2050 (Tab. 62 et Fig. 79) avec les principaux consommateurs suivants:

- Pour l' AEP, les besoins en eau passe de 19.7 Hm<sup>3</sup>, en 2020 à 30.1 Hm<sup>3</sup> en 2050, ce qui représente un augmentation de 53%, dont la commune de Souk Ahras considérée comme le grand demandeur, de plus de 46% du besoin total en AEP, soit 13.9 Hm<sup>3</sup>.
- Pour l'irrigation des terres agricoles, les besoins en eau connaissent une augmentation, de 20.9 Hm<sup>3</sup> en 2020 à 84.7 Hm<sup>3</sup> en 2050, ce qui indique une augmentation de 63.8 Hm<sup>3</sup>, suite à l'extension des terres irriguées, surtout pour les communes de Tiffech et Ouillen.

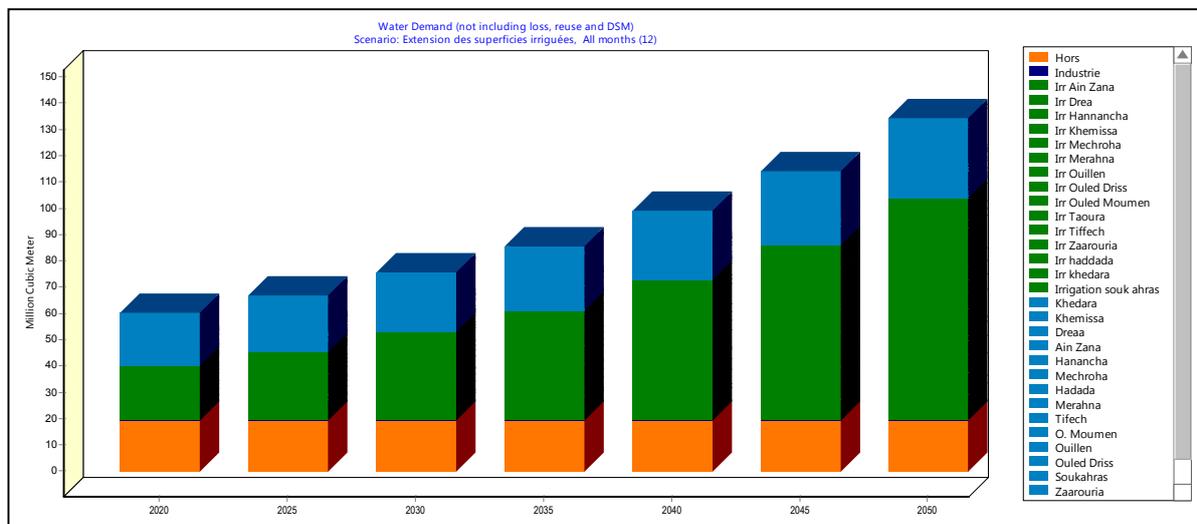


Figure 79: Evolution besoins en eau pour les usagers (tous scénarios)

Tableau 62: Evolution besoins en eau pour les usagers (tous scénarios)

Site de demande	2016	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
AEP (Hm <sup>3</sup> )	18.7	19.7	21.1	22.6	24.2	26.0	28.0	30.1
Irrigation (Hm <sup>3</sup> )	16.8	20.9	25.9	33.4	41.5	53.5	66.4	84.7
Hors BV (Hm <sup>3</sup> )	19.7	19.7	19.7	19.7	19.7	19.7	19.7	19.7
<b>Total (Hm<sup>3</sup>)</b>	<b>55.2</b>	<b>60.3</b>	<b>66.7</b>	<b>75.7</b>	<b>85.4</b>	<b>99.2</b>	<b>114.1</b>	<b>134.5</b>

### 2. 6. 2. d. Evolution des besoins totaux en eau (Water demand) par scénario

La figure 80 nous renseigne bien sur l'évolution des besoins totaux en eau pour tous les scénarios. Une croissance notable pour les trois scénarios il s'agit du scénario du changement climatique (SCC), avec les deux niveaux (haut et bas) du modèle UKHI- IS92a, et aussi le scénario (SETI). Les besoins totaux passeront de 55 Hm<sup>3</sup> à plus de 134.5 Hm<sup>3</sup>.

Cette évolution est liée à l'extension des superficies des terres irriguées. Une faible augmentation des besoins en eau pour le scénario de référence, suite à l'accroissement modéré de la population, allant de 55 Hm<sup>3</sup> en 2016 à 66.7 Hm<sup>3</sup> en 2050.

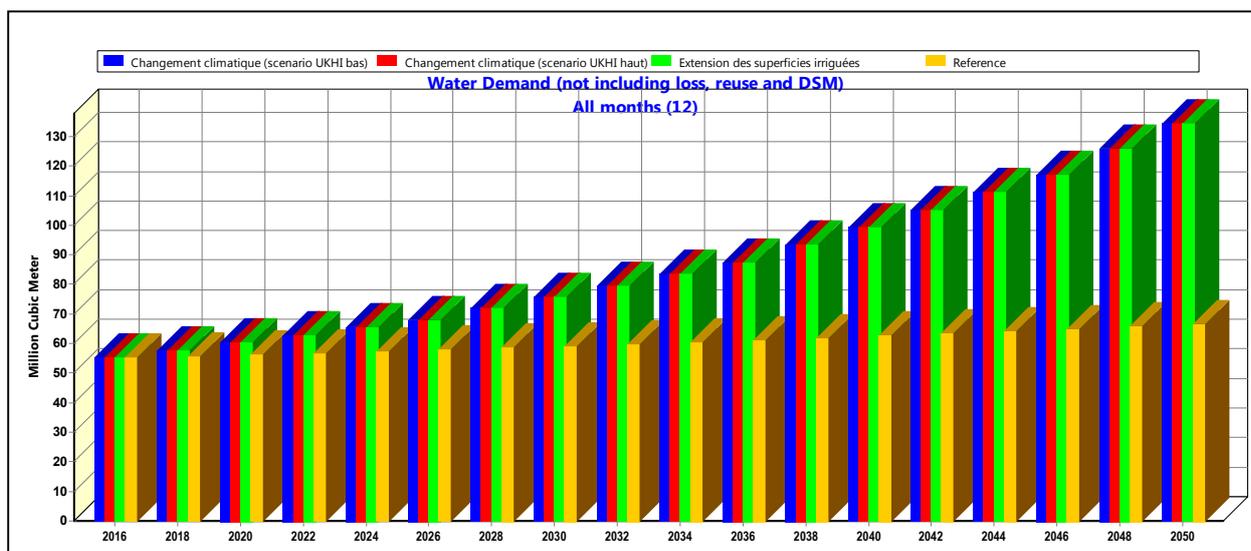


Figure 80: Evolution des besoins totaux en eau par scénario

### 2. 6. 2. e. Evolution des demandes en eau (Supply requirement)

L'historique dans la figure 81 montre l'évolution de la demande en eau totale (toutes les pertes inclus) dans le bassin versant de la Medjerda. Une augmentation importante de ces demandes dans le cas des deux scénarios, où le volume d'eau demandé passe de 69 Hm<sup>3</sup> en 2016 à 94 Hm<sup>3</sup> en 2030, pour atteindre 168.1 Hm<sup>3</sup> en 2050 pour les scénarios SCC et SETI.

Pour le scénario de référence (SR), Une faible augmentation de la demande durant la période de simulation, allant de 69 Hm<sup>3</sup> en 2016 à 83.3 Hm<sup>3</sup> en 2050.

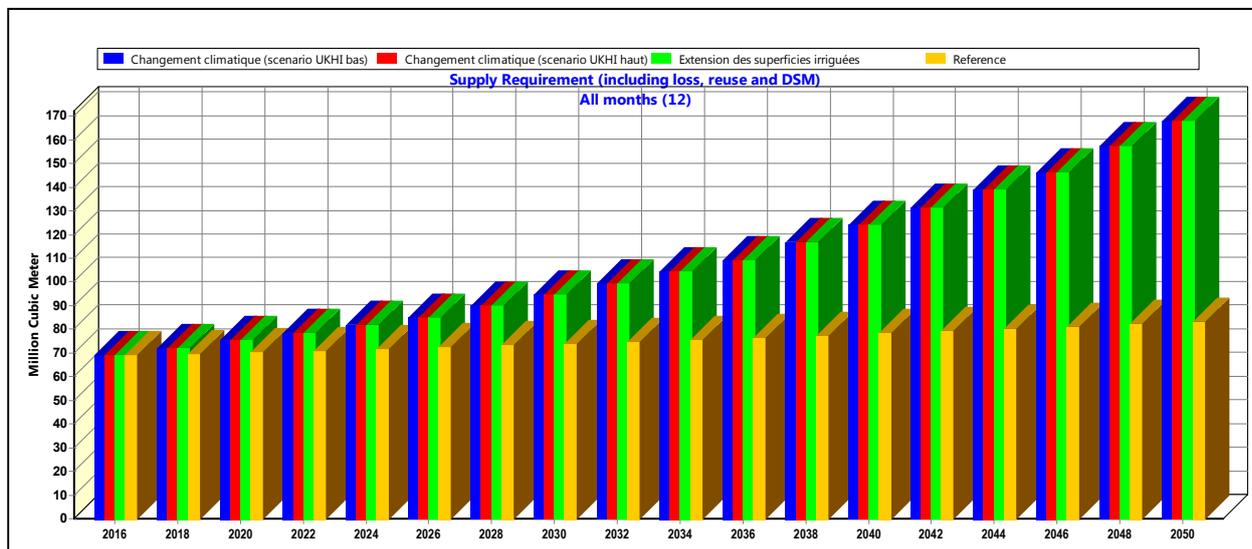


Figure 81: Evolution de demandes totales en eau par scénario (2016-2050)

2. 6. 3. Eau distribuée

Les volumes en eau distribués est d'environ 69 Hm<sup>3</sup> en 2016 pour les différents scénarios, leurs évolutions ne change pas d'un scénario à autre, se lèvent à 94 Hm<sup>3</sup> en 2030 pour atteindre les 148 Hm<sup>3</sup> en 2050, dépassant ainsi le double de l'année de référence.

Pour le scénario de référence on enregistre une faible augmentation de la distribution pour le scénario de référence, due à la faible augmentation de la population, allant de 69 Hm<sup>3</sup> en 2016 à 83.3 Hm<sup>3</sup> en 2050 (Tab. 63).

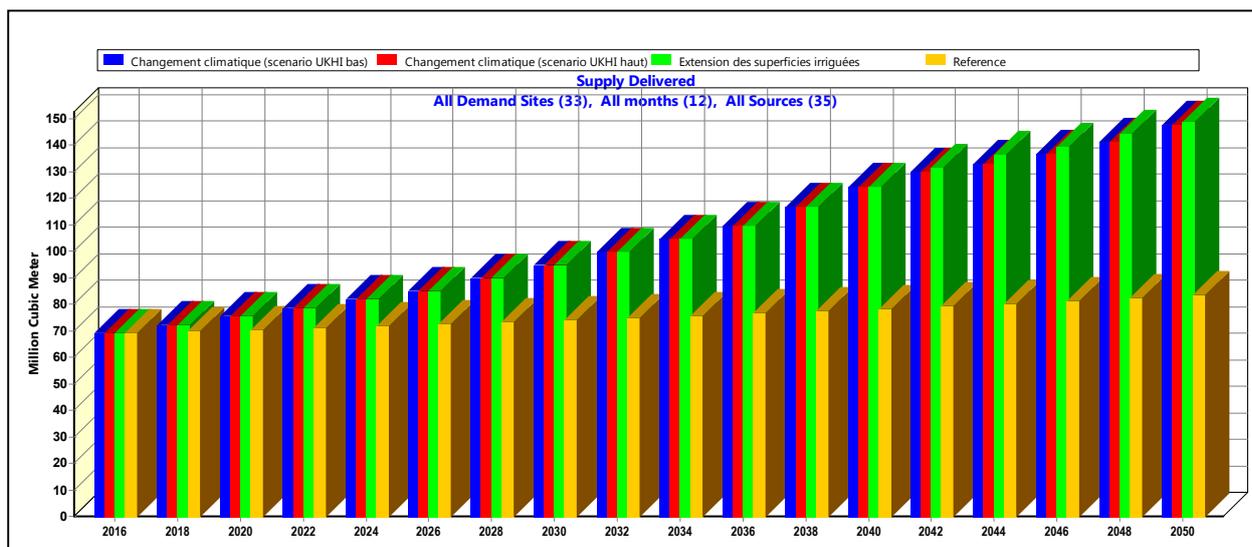


Figure 82: Volume en eau distribué pour tous les usagers par scénario

Tableau 63: Evolution de la distribution des pour les usagers (tous scénarios)

Site de demande	2016	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
SCC (IS92 <sub>bas</sub> ) Hm <sup>3</sup>	69.0	75.3	83.4	94.6	106.8	124.0	134.4	147.5
SCC (IS92 <sub>haut</sub> ) Hm <sup>3</sup>	69.0	75.3	83.4	94.6	106.8	124.0	134.4	147.5
(SETI) Hm <sup>3</sup>	69.0	75.3	83.4	94.6	106.8	124.0	137.7	148.7
(SR) Hm <sup>3</sup>	69.0	70.3	72.1	74.0	76.0	78.3	80.7	83.3

#### 2. 6. 4. Evolution du stockage en eau du barrage par scénario

Le graphique de la figure 83 montre le volume stocké dans le barrage d'Ain Dalia en fin de mois pour les 3 scénarios adoptés, une légère stabilité des fluctuations mensuelles pour le scénario de référence, tandis que on enregistre une diminution du niveau de stockage du barrage, qui commence à partir de l'an 2025, et s'accroît jusqu'à l'année du fin de scénario en 2050, pour les scénarios (SCC et SETI), sous l'effet du changement climatique.

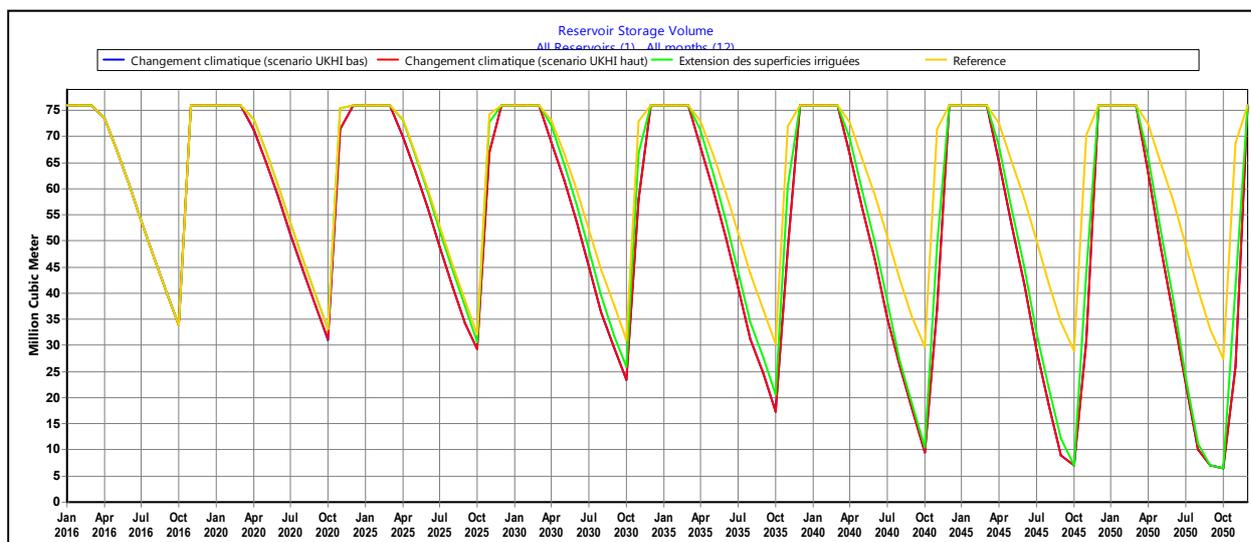


Figure 83: Evolution du volume stocké dans le barrage Ain Dalia simulé par le WEAP pour différents scénarios

#### 2. 6. 5. Demandes en eau non satisfaites par scénario

Étant donné que l'eau non satisfaite est la différence entre la quantité d'eau demandée et la quantité d'eau distribuée. A partir de la figure 84, tous les demandeurs sont satisfait à 100 %, jusqu'à 2042 où commence l'apparition des demandes non satisfaites, interprétées par un manque de 1.6 Hm<sup>3</sup> en 2042, pour arriver à un manque de 20.5 Hm<sup>3</sup> à la fin de période de

simulation en 2050, pour le scénario le plus pessimiste et celui qui rassemble les deux niveaux haut et bas du modèle (UKHI-IS92a) sur le changement climatique, ensuite vient le scénario (SETI) à un degré moindre de 0.6 Hm<sup>3</sup> en 2043, jusqu'à un manque de 19.3 Hm<sup>3</sup> en 2050.

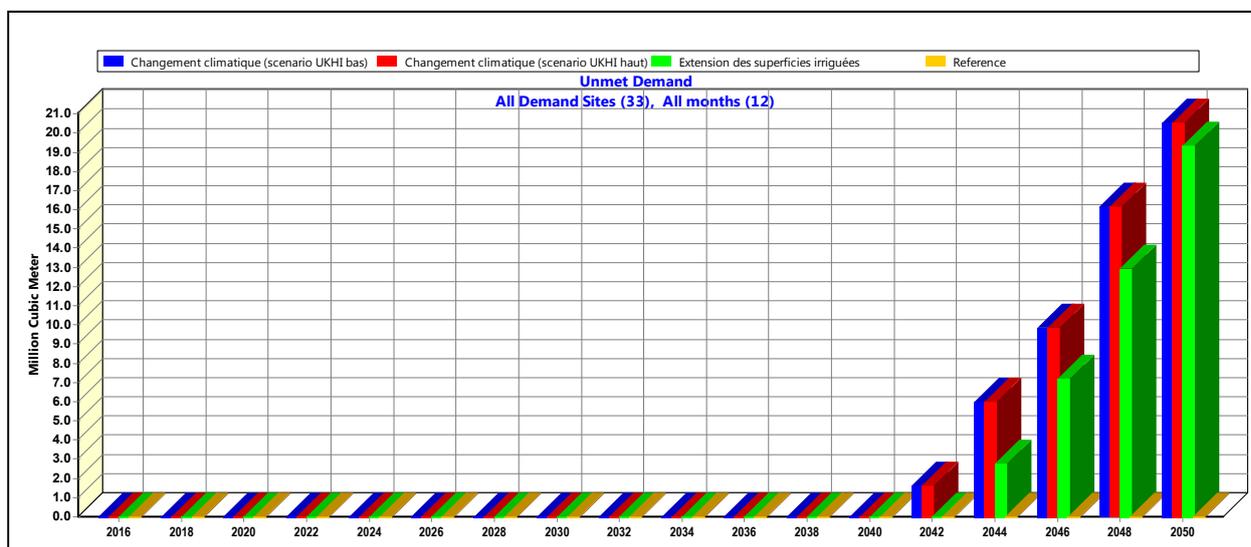


Figure 84: Volume de demande en eau non satisfaite par scénario

### 3. L'indice de pénurie

La pénurie d'eau, temporaire ou structurelle, résulte d'une insuffisance quantitative et/ou qualitative de la ressource hydrique disponible par rapport à la demande.

L'indice de pénurie est la disponibilité en eau par mètre cube et par habitant dans l'ensemble du bassin versant.

Les seuils proposés par Falkenmark et Widstrand (1995), fournissent des ordres de grandeur utiles pour apprécier le problème d'eau douce dans le bassin. Ce problème dépendra beaucoup de la croissance de la population jusqu'en 2050 et de la disponibilité en eau mobilisables projetée pour différents scénarios.

Tableau 64: Seuils de l'indice de pénurie (Falkenmark et Widstrand, 1995)

Seuil	Indication
Moins de 500 m <sup>3</sup>	seuil de pénurie (Sacrificity)
De 500 à 1000 m <sup>3</sup>	seuil de tension (Stress)
De 1000 à 3000 m <sup>3</sup>	ressources suffisantes à l'heure actuelle
Au dessus de 3000 m <sup>3</sup>	ressources abondantes

Le calcul de l'indice de pénurie dans le bassin versant de la Medjerda a conduit aux résultats illustrés dans le tableau 65.

On a désigné par « Sans impact » avec seulement le cas de l'accroissement modéré de la population avec un taux de 1.25%, et « impact du changement climatique » avec ces deux niveaux (Haut et bas), le cas du « impact de l'extension des terres irriguées ».

D'après le tableau, pour les scénarios tendanciel de l'accroissement de la population et de l'extension des terres irriguées, les ressources resteront suffisantes jusqu'à l'horizon 2030, au delà commence la tension sur la ressource, qui arrive à 800 m<sup>3</sup>/an/hab. en fin de l'an 2050. Dans le cas le l'impact du changement climatique, le bassin entrera en tension (Stress) après l'an 2025, qui arrive à 636 m<sup>3</sup>/an/hab. en fin de l'an 2050 pour le SCC (IS92a bas) et de 617 m<sup>3</sup>/an/hab. en fin de l'an 2050 pour le SCC (IS92a haut).

Le bassin versant reste loin du phénomène de la pénurie en fin de scénario, et reste même supérieur à la moyenne nationale actuelle de 350 m<sup>3</sup>/an/hab.

**Tableau 65: Evolution de l'indice de pénurie d'eau (m<sup>3</sup>/an/hab.) en dans le bassin versant de la Medjerda**

Années	2016	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
<b>Sans impact (accroissement de la population)</b>	1293	1224	1142	1065	993	924	860	800
<b>Impact extension des superficies irriguées</b>	1293	1224	1142	1065	993	924	860	800
<b>Impact Changement climatique (IS92a bas)</b>	1293	1188	1072	968	873	787	708	636
<b>Impact changement climatique (IS92a haut)</b>	1293	1184	1063	956	858	770	689	617

#### 4. Conclusion

Le bassin versant transfrontalier de la Medjerda dispose d'un potentiel important de ressources en eau, et plus particulièrement souterraines, exploitées pour répondre aux besoins des différents usagers à l'intérieur et à l'extérieur de son territoire.

Le logiciel WEAP nous a offert l'opportunité d'utiliser nos données de ces ressources pour la simulation de son évolution et leurs usagers jusqu'à l'horizon 2050.

Pour la création de scénario, Nous avons adoptés un Le scénario de référence (SR), qui est un scénario hérité du compte courant, et trois scénarios futurs, deux sur le changement climatique (SCC), en se basant sur les projections climatique à l'horizon 2020 - 2050 pour l'Algérie, obtenues par le modèle UKHI\_IS92a sur deux hypothèses (Haut et Bas), et un scénario sur l'extension des terres irrigués (SETI).

Les résultats montrent une parfaite satisfaction des demandeurs d'eau dans le bassin jusqu'à l'an 2042, là où la non satisfaction commencera pour les deux derniers scénarios, pour les quels le déficit passe de 1.6 Hm<sup>3</sup> en 2042 de, pour arriver à 20.5 Hm<sup>3</sup> en 2050, par ailleurs, pour le scénario de l'augmentation des terres irrigués, le modèle prévoit un retard d'une année pour la non satisfaction en eau qui commence en 2043 de 0.6 Hm<sup>3</sup> pour atteindre 19.3 Hm<sup>3</sup> à la fin de la simulation. L'application de l'indice de pénurie indique une éventuelle tension (stress) qui touchera le bassin versant à partir de l'an 2030 pour les scénario tendancier de l'accroissement de la population et de l'extension des terres irriguées, les ressources resteront suffisantes jusqu'à l'horizon 2030, au delà commence la tension sur la ressource, qui arrive à 800 m<sup>3</sup>/an/hab en fin de l'an 2050 et pour le cas le l'impact du changement climatique, le bassin entrera en tension (Stress) après l'an 2025, qui arrive à 800 m<sup>3</sup>/an/hab. en fin de l'an 2050. Le bassin versant reste loin du phénomène de la pénurie en fin de scénario, et reste même supérieur à la moyenne nationale actuelle de 350 m<sup>3</sup>/an/hab.

### Conclusion générale

Le bassin versant transfrontalier de la Medjerda, est situé à l'extrême Nord-Est de l'Algérie, il appartient au bassin versant Constantinois-Seybouse-Mellègue (CSM), selon la classification de l'Agence de Bassin Hydrographique (ABH), et s'étend du 7°34' et 8°25' de longitude Est et du 36°04' et 36°25' de latitude Nord, il couvre une superficie de 1505.5 Km<sup>2</sup>, et se trouve presque totalement inclus dans le territoire administrative de la wilaya de Souk Ahras avec une population de 340 000 habitants. Ce bassin versant est drainé par l'oued Medjerda qui prend sa source sur les monts de Souk-Ahras (Ras el Alia 1317 m), d'une longueur de 106 Km, et continue son parcours en Tunisie pour se jeter dans le golfe de Tunis..

La zone d'étude est occupée une position charnière entre l'Atlas Tellien au nord et Saharien dans sa partie sud, d'étude faisait partie de la zone alpine plissée, est localisé en bordure du bloc et des hauts plateaux. Les terrains rencontrés appartiennent aux formations carbonatés marines, terrigènes et évaporitiques du Trias, Crétacé, Paléogène et Néogène. Les faciès continentaux sont représentés par des formations meubles ou faiblement cimentées du Pliocène, Plio-Quaternaire et Quaternaire. La tectonique se distingue par deux grandes unités fondamentales qui se présentent dans la zone des monts de la Medjerda, ou se trouve notre site d'étude, il s'agit des chaînes telliennes et de l'Atlas saharien qui se trouvent directement en contact. Les principaux traits structuraux sont représentés par le diapirisme, les plissements et une tectonique cassante.

L'analyse des caractéristiques morphométriques du bassin versant de la Medjerda a permis de dégager les principaux paramètres qui ont une influence certaine sur le dynamisme des eaux surtout superficielles, qui y circulent. La forme rectangulaire (allongée) du bassin, la dominance des classes altimétriques de 600 à 900 m et d'une altitude moyenne considérable  $H_{\text{moy}} = 815.8$  m, un temps de concentration long (supérieur à 21 heures) et la densité de drainage moyenne de l'ordre de 0,55 km/km<sup>2</sup>. Le relief du bassin est qualifié d'assez fort, selon les valeurs de l'indice de pente globale ( $I_p = 6.2$  m/km) et de la dénivelée spécifique ( $D_s = 240.7$  m/km), plus de 65% de la superficie du bassin ont des pentes situées entre 5 et 20%.

La région d'étude appartient à un milieu du climat tempéré. Elle est caractérisée par deux saisons distinctes, une humide qui s'étale du mois de Novembre jusqu'au mois d'Avril et une autre sèche allant du mois de Mai au mois de Septembre.

Les précipitations moyennes annuelles de 723.9 mm/an, et de 705.4 mm/an, et des températures moyennes annuelles de 17.5 °C, 15.9 °C, pour les stations d'Ain Dalia et de Souk Ahras respectivement.

L'évapotranspiration potentielle (ETP) de 895.4 mm/an et 879.9 mm/an, et l'évapotranspiration réelle (ETR) de 457.8 mm/an et 393.1 mm/an dans les stations de Ain Dalia et de Souk Ahras respectivement.

L'estimation de ruissellement est de 116.9 mm et 126.4 mm et l'estimation de l'infiltration de 139.7 mm/an et 195.4 dans les stations de Ain Dalia et de Souk Ahras respectivement.

L'étude hydrochimique, a permis de montrer que le faciès bicarbonaté calcique prédomine avec un taux de 66.67%, les formations carbonatées peuvent être à l'origine de ce faciès. Le faciès sulfaté calcique représente de 9.5% est dû probablement au lessivage des formations triasiques. Le faciès chloruré calcique représentant 14.3%, peut être expliqué par la présence des formations salifères du Mio-Plio-Quaternaire.

Le taux de 76% des eaux sont très dures. L'indice d'échange de base nous renseigne que 67% des échantillons montrent des valeurs d'i.e.b positives, donc un déficit de  $\text{Na}^+$  et  $\text{K}^+$  par rapport au  $\text{Cl}^-$  et une solubilisation du calcium. 33% des valeurs d'i.e.b sont négatives.

Le bassin versant de la Medjerda reçoit pour une année pluviométrique moyenne un apport d'eau naturelle qui dépasse les 1071  $\text{Hm}^3$ , environ deux tiers est absorbé par l'évapotranspiration et seulement environ 435  $\text{Hm}^3$  se retrouvent dans le bassin partagée entre le ruissellement et l'infiltration. Donc, les ressources mobilisables en eau de surface sont de l'ordre de 435  $\text{Hm}^3$  dont seulement 34,24  $\text{Hm}^3$  sont mobilisées actuellement, soit 19 %. Ces ressources sont captées par plusieurs forages, puits et sources et des eaux superficielles emmagasinées notamment dans un seul barrage d'Ain Dalia d'une capacité de 76  $\text{hm}^3$ ; il alimente en AEP la population de la wilaya de Souk Ahras et deux wilayas limitrophes. S'ajoute à ce potentiel, des eaux non conventionnelles des deux STEP de souk Ahras et Hanancha. Toutefois, leur exploitation reste très minime et ne participe pas d'une manière efficace au volume d'eau annuellement mobilisable. Ces ressources d'eau sont principalement exploités en AEP avec 74.3 %, et l'agriculture de 25.4% et en fin l'industrie avec seulement 0.3%.

L'utilisation du modèle WEAP nous a offert l'opportunité d'utiliser nos données sur ces ressources pour la simulation de l'évolution des ressources en eau et leurs usages jusqu'à l'horizon 2050. Nous avons adopté trois scénarios, deux sur le changement climatique (SCC), en se basant sur les projections climatiques à l'horizon 2020- 2050 pour l'Algérie, obtenu par le

modèle (IS92a) sur deux niveaux (Haut et Bas) et un sur l'extension des terres irrigués (SETI). Les résultats montrent une parfaite satisfaction des demandeurs d'eau dans le bassin jusqu'à 2042, où la non satisfaction commencera pour les deux premiers scénarios, pour le quel le déficit commence en 2042 avec  $1.6 \text{ Hm}^3$ , pour arriver à  $18.3 \text{ Hm}^3$  en 2050, alors que pour le (SETI) le déficit commence en 2043 avec  $0.6 \text{ Hm}^3$  pour atteindre  $19.3 \text{ Hm}^3$  à la fin de la simulation.

L'application de l'indice de pénurie indique une éventuelle tension (stress) qui touchera le bassin versant à partir de l'an 2030 pour le scénario tendanciel de l'accroissement de la population et de l'extension des terres irriguées. Les ressources resteront suffisantes jusqu'à l'horizon 2030, au delà commence la tension sur la ressource qui arrive à  $800 \text{ m}^3/\text{an}/\text{hab.}$  en fin de l'an 2050. Pour le cas le l'impact du changement climatique, le bassin entrera en tension (Stress) après l'an 2025 et qui arrive à  $800 \text{ m}^3/\text{an}/\text{hab.}$  à la fin de l'an 2050. Le bassin versant reste loin du phénomène de la pénurie en fin de scénario et reste même supérieur à la moyenne nationale de  $350 \text{ m}^3/\text{an}/\text{hab.}$

### Recommandations

- ✓ Développer les techniques de mobilisation des ressources en eau mobilisables à travers tout le bassin versant.
- ✓ Développer les techniques et les bonnes pratique pour l'économie de l'eau afin de minimiser les pertes et de l'utilisation rationnelle des ces ressources à tous les niveaux, de la source d'eau jusqu'au lieu de consommation et de maximaliser son niveau d'exploitation.
- ✓ L'exploitation de La STEP de souk Ahras à 60% de ces capacités nous permet d'avoir un volume annuel en eau épurée de  $6.5 \text{ Hm}^3$ , soit 45% d'eau superficielles mobilisée.
- ✓ Le changement du système d'irrigation, vers la reconversion au système de goutte à goutte et de l'aspersion à la place du mode gravitaire, ces systèmes offre plusieurs avantages, tels que l'utilisation d'une façon efficiente et donne un bon rendement des cultures.
- ✓ inciter les agriculteurs de l'utilisation des eaux épurées pour quelques cultures spécifiques.

## Références bibliographiques

- Abdelguerfi A. Ramdane S.A.** 2003. Plan d'Action et Stratégie Nationale sur la biodiversité, Evaluation des besoins en matière de renforcement des capacités nécessaires à l'évaluation et la réduction des risques menaçant les éléments de la diversité biologique en Algérie, Bilan des expertises. FEM/PNUD, Projet ALG/97/G31, tome VII, 156p.
- A.B.H** agence de Bassin hydrographique. 2005. Le bassin versant de la Medjerda-Mellègue. Les Cahiers de l'Agence. Journal N°9. 28 p.
- Abu-Zeid M.A.** 1998. Water and sustainable development: The vision for world water, life and environment, water policy, vol. 1, p9-19.
- A.N.R.H.** 1995. Liste des stations climatologique et pluviométrique de l'A.N.R.H et l'O.N.M.
- A.N.R.H.** 2002. Atlas des températures et des évapotranspirations de l'Algérie du Nord.
- Agence de l'eau.** 1999. Connaissance et gestion des ressources en eaux souterraines dans les régions karstiques. Guide technique N°3 : 40 p.
- Aggoun B.** 1993. Etude hydrogéologique de la région de Terreguelt en vue de l'alimentation en eau potable de la ville de Sedrata. Mémoire d'Ingénieur I.S.T. Université d'Annaba-Algérie.
- Agence du service Géologique de l'Algérie,** (2016), Ministère de l'industrie et des mines, Ressources minérales de l'Algérie, Wilaya de Souk Ahras, édition ASGA.
- Allali Khalil.** 2005. Modèle de contrôle optimal de l'utilisation des eaux conventionnelles et non conventionnelles en agriculture. Actes du séminaire Euro Méditerranéen « Les instruments économiques et la modernisation des périmètres irrigués », M.S. Bachta (éd. sci.) Séance 2. Analyse de la demande en eau, Sousse, Tunisie, 10p.
- Alayat H. et Lamouroux C.** 2007. Caractérisation physico-chimiques des eaux thermo-minérales des monts de la Cheffia (extrême Nord-Est Algérien). Press. Therm Climat. Société française d'hydrologie et de climatologie médicales, pp. 191-199.
- Aouadi et Zeghadnia S.** 1990 : Approche hydrogéologique de la plaine de Sedrata-Tiffech et estimation approximative des ressources et réserves en eau souterraine. Mémoire d'Ingénieur I. S. T. Université d'Annaba.
- Bakalowicz M.** 2005. Notions de base de géologie pour l'hydrogéologie et la géologie de l'environnement. 70 p.
- Barour A.A., Benslama M., Chefrou A., Barour C.** 2012. Contribution à l'étude microbiologique des eaux de l'oued Medjerda dans l'extrême Est Algérien : Souk Ahras, Rev. Sci. Technol., Synthèse 25: 88- 96.
- Benhammadi H, Chaffai H.** 2017. Climate and human impact on the Karstic environment in the semi-arid zone of the Chéria plateau (Northeast of Algeria). J. Bio. & Env. Sci. Vol. 11, No. 4, p. 146-151.
- Besson E.** 2008. Cinq défis pour les Pays du Sud et de l'Est de la Méditerranée, rapport Secrétariat d'Etat à la Prospective, à l'Evaluation des politiques publiques et au Développement de l'économie numérique PSEM, 28p.

- B.N.E.D.E.R.** (Bureau national des études pour le développement rural). 1999. Etude d'aménagement Hydro-Agricole de la Medjerda. Phase I et II.
- B.N.E.D.E.R.** (Bureau national des études pour le développement rural), (2007), Etude d'exécution des périmètres irrigués de Sidi Badr et Hemissi. Mission I et II : Etude préliminaire et hydrologique, 25p.
- B.N.E.D.E.R.** (Bureau national des études pour le développement rural), (2007), Etude des périmètres irrigués de Sidi Badr et Hemissi. Mission III : Schéma d'aménagement, 18p.
- Bonnet M., Bélarozière-Bouillillan O., Juisserand CI. et Roux P.** 1970. Calcul automatique des "Bilans d'eau" mensuels et annuels par la méthode de Thornthwaite et de Turc, 18p.
- Boulgueraguer Z, Chaffai H, Toumi N, Saidi S, Djorfi S, Djabri L.** 2018. Origin of mineralization and impact of anthropogenic pollution on water quality in Boussellam wadi and its environment, Wilaya of Sétif (North-East Algeria). *J. Bio. Env. Sci.* **12(6)**, 176-185.
- Bourouga M.** 2015. Déminéralisation des eaux de forage de la région d'Ouled Abbès et son impact sur l'environnement (Souk Ahras, extrême Nord-Est Algérien), mémoire de Magister, Université Badji-Mokhtar, Annaba, Algérie, 122p.
- Bousnoubra H.** 1982. Etude hydrogéologique du synclinale de Taoura (Souk-Ahras) extrême Nord-Est Algérien. Mémoire de DEA. USTL Montpellier II. France, 45p.
- Bousnoubra H.** 1985. Hydrogéologie de quelques réservoirs karstiques du Nord est Algérien. Synthèse de connaissance actuelle, apport du traitement statistique des données hydrométriques. Thèse troisième cycle USTL. Montpellier II, France, 162p.
- Bousnoubra H.** 2002. Ressources en eaux des régions de Skikda, Annaba, ElTarf, Guelma, Souk-Ahras (N-E Algérien) (Evaluation, gestion et perspective; Vulnérabilité et protection), Thèse de doctorat d'état, 159p
- Bouznad I.** 2017. Ressources en eau et gestion intégrée dans la vallée d'Oued Righ, (Sahara septentrional algérienne), Thèse de doctorat, Université de Annab, 158p.
- Calder IR.** 1999. The blue revolution, land use and integrated water resource management, Londres, Earthscan.
- Castany G.** 1963. Traité pratique des eaux souterraines. Ed. Dunod, 2ème édition, (1968), Paris, France.
- Chadi M.,** 2004. Cadre géologique et structural des séries crétacées néritiques du constantinois (Est- Algérien). Thèse de doctorat. pp17-37.
- Chaffai H, Laouar R, Hani A, et Baali F.** 2006. Les formations karstiques du plateau de Chéria (Algérie). Identification et évaluation des ressources en eau. *Larhyss Journal*, N°05 121-131. <http://larhyss.net/ojs/index.php/larhyss/article/view/71/65>.
- Chaffai H, Toubal A, Lacroix M, Boubelli S, et Djabri L.** 2013. Hydrogéologie d'un système aquifère en zone semi-aride. Cas de la région de Khenchela (Algérie). *Courrier du Savoir*, N°15, 41-45. <http://revues.univ-biskra.dz/index.php/cds/article/view/39>.

- Chaffai H.** 1986. Evaluation des ressources en eaux de la plaine de Chéria (Algérie). Synthèse et analyse des données. Thèse Doctorat 3ème cycle, USTL, Montpellier II, France 245 p.
- Castany G. et Margat J.** 1977. Dictionnaire français d'Hydrogéologie. Bureau de recherche de géologie minière, 249p.
- Castany G.** 1982. Principes et méthodes de l'hydrogéologie. Ed. Dunod; Université – Bordas, Paris, France. 238p.
- CE.** 1998. Towards sustainable water resources management: a strategic approach. Bruxelles, Belgique, Commission européenne.  
[http://europa.eu.int/comm/development/body/publications/water/en/frontpage\\_en.htm](http://europa.eu.int/comm/development/body/publications/water/en/frontpage_en.htm) (accédé le 19 novembre 2004).
- Coutagne A.** 1948. Contribution à l'étude de l'écoulement en Algérie, Annuaire Hydrologique de l'Algérie 1947/48, DSCH SCEGGT, Alger, pp 3-55.
- Chouabi A.** 1987 : Etude géologique de la région de Hammam N'Bail sud-est de Guelma, Algérie, secteur des zones externes de la chaîne de Maghrébines. Thèse de doctorat 3ème cycle, université Paul Sabotier, Toulouse.
- Feuilletes S.** 2001. vers une gestion de la demande sur une nappe en acces libre( exploration des interactions ressource usages par les systemes multi-agents) application a la nappe de kairouan, tunisie centrale, these de doctorat, universite montpellier ii.
- Daifallah T.** 2017. Ressources en eau et leurs utilisations dans le bassin versant de l'Oued Kébir Ouest (Nord Est algérien), Thèse de doctorat, Université de Annab, 170p.
- Dali N.** 2018. Contribution a l'actualisation et gestion durable des ressources en eau des bassins des hauts plateaux constantinois, Thèse de doctorat d'état, Université Badji-Mokhtar, Annaba, Algérie 193p
- David L.** 1953. L'âge Pliocène d'une partie des formations continentales de la région de Souk Ahras. pp216-218.
- David L.** 1953. L'importance des déplacements tangentiels dans la zone sud-tellienne des environs de Souk Ahras. pp 287-289.
- David. L.** 1956. Etude géologique des Monts de la Haute Medjerda. Service de la carte géologique de l'algérie, Alger, 289p.
- Décret exécutif n° 11-262** du 30 juillet 2011. Relatif à la création de l'agence nationale de gestion intégrée des ressources en eau « AGIRE ». Journal officiel de la république algérienne. 2011.
- Décret exécutif n° 11-125** du 17 Rabie Ethani 1432 correspondant au 22 mars 2011 relatif à la qualité de l'eau de consommation humaine.
- Décret N°10-24** du 12 janvier 2010. Relatif au cadre de concertation en matière de gestion intégrée des ressources en eau. Journal officiel de la république algérienne. 2010
- De Martonne EMM.** 1940. Traité de Géographie Physique. Sixième édition revue et corrigée. Tome premier. Notions générales, Climat, Hydrographie. Edition Armand Colin, 496 pages.
- Direction des ressources en eau DRE W.** 2016. Souk Ahras, Service de l'hydraulique agricole, Bilan annuel Hydro agricole PMH, 65p.

- Djaba H.** 2010. Ressources en eau et perspectives de gestion intégrée dans le bassin versant de Medjerda (Souk Ahras, Nord-Est d'Algérie). Mémoire de magister. Département de géologie. Université Badji Mokhtar Annaba.
- Doneen.** 1961. The influence of crop and soil on percolating water. Proc 1961 Biannual Conference on Groundwater Recharge pp 156-163.
- Droogers P. et Bastiaanssen W.** 2002. Irrigation Performance using Hydrological and Remote Sensing Modeling. J. Irrig. Drain Eng., 128(1), 11–18. In : Droogers P et al. (2011).
- Droogers, P., & Aerts, J.,** (2005). Adaptation strategies to climate change and climate variability: a comparative study between seven contrasting river basins. Physics and Chemistry of the Earth, 30: 339 – 346.I
- El Alaoui Elfels A.H., Hajhouji Y,** (2010). L'hydrochimie et qualité des eaux de surfaces et souterraines du Haouz, Maroc.
- Fondation 2IE** (institut international d'ingénierie de l'eau et de l'environnement, (2010), manuel technique de gestion intégrée des ressources en eau, 141p.
- Friane F.,** (2000) : Ressources et approvisionnement en eau dans la région de Souk-Ahras (Essai de synthèse). Mémoire d'Ingénieur en hydrogéologie. Université Badji-Mokhtar, Annaba, Algérie. 82p.
- Ghachi A.** (1990) : Hydrogéologie et utilisation de la ressource en eau en Algérie. Office des publications universitaires.
- Ghachi A.,** 1986. Hydrologie et utilisation de la ressource en eau en Algérie, OPU. 512 p.
- Global Water Partnership,(2000),** Integrated Water Resources Management. TAC Background Papers, no 4, 67 pp.
- Guasmi I.** (2009) : Pollution des eaux et pouvoiar auto-épurateur de l'Oued Medjerda (Nord –Est Algérien) Thèse de doctorat d'état, Université Badji-Mokhtar, Annaba, Algérie 198p.
- Hofwegen, P.J.M. van, Jaspers, F.G.W.** (1999). Analytical framework for integrated water resources management : guidelines for assessment of institutional frameworks. (IHE monograph). Delft, Pays-Bas, IHE.
- Halimi F.** 2008. Etude géologique et géostatistique du gisement de Fer de Châabet El Ballout –Souk Ahras- (N-E algérien). Mémoire de Magister, Université Badji Mokhtar-Annaba.
- Hamad A., Baali F., Hadji R., Zerrouki H., Besser H., Mokadem N., Legrioui R., Hamed Y.** 2018. Hydrogeochemical characterization of water mineralization in Tebessa-Kasserine karst system (Tuniso-Algerian Transboundrybasin), Euro-Mediterr J Environ Integr., 3:7.
- Hamlat, A., Errih, M., & Guidoum, A.** 2013. Simulation of water resources management scenarios in western Algeria watersheds using WEAP model. *Arabian Journal of Geoscience*, 2225–2236.
- Hem, J.D.** 1985. Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water (3rd ed). USGeological survey water-supply Paper 2254-2263.

- Herve L.** 2003. Testing water demand management scenarios in a water-stressed basin in South Africa: application of the WEAP model. *Physics and Chemistry of the Earth*, Volume 28, Issues 20–27, Pages 779–786.
- Huber-Lee A.** 2003. Water, Climate, Food, and Environment in the Sacramento Basin, contribution to the ADAPT Project, 2003.
- Jouzel Jean** 2003. Rapport de 1995 du GIEC sur les changements climatiques et leur évolution, Laboratoire des Sciences du Climat et l'Environnement, CEA-CNRS-UVSQ
- Joyce B.** 2006. Climate change impacts on water for agriculture in California: a case study in the Sacramento valley, white paper, California climate change center, march 2006.
- Khelfaoui F.** 2014. Qualité et gestion intégrée des ressources en eau dans le bassin versant du Saf-Saf (nord-est algérien), Thèse de doctorat, Université d'Annaba.
- Kherbache N.** 2014. La problématique de l'eau en Algérie : Enjeux et contraintes, mémoire de magistère, Université Abderrahmane Mira, Bejaia, 250p.
- Kotti F.C., Gil M., Habaieb H., Dieulin C., Calvez R., Ben Ali H.** 2016. Etude des pluies et des débits sur le bassin versant de la Medjerda, Tunisie Study of rainfall and discharges in the Medjerda watershed, Tunisia, Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, Section Sciences de la Terre, 2016, n° 38, 19-28.
- Kriviakine, B., Kovalenko, E., Vnouchkov, V., Dereski, B.** 1990. Rapport final sur les résultats de l'étude complémentaire des feuilles N0 : 77 Souk-Ahras, N0 : 78, Oued Mougras, N° : 100 M'Daourouche à l'échelle : 1/500000.
- Kiniouar H.** 2018. Analyse multicritère et caractérisation du modèle de gestion intégrée des ressources en eau de la vallée du Rhumel, Thèse de doctorat d'état, Université Badji-Mokhtar,
- Laborde J.P.** 2000. Eléments d'hydrologie de surface, Edition 2000, 192p.
- Lefebvre J.** 1988. Introduction aux analyses statistiques multidimensionnelles avec exemples d'applications, 3ième édition, 273p.
- Lebourgeois F.** (2010), Enseignant-Chercheur Cours de bioclimatologie à l'usage des forestiers.
- LeGoulven P.** 2005. Gestion intégrée des ressources en eau: définitions, allocations de la ressource sur un bassin versant et gestion de la demande en eau. Cours de DEA SEEC, UMII, Montpellier, France. In Christin Fabien (2008).
- Ludovic O.** 2004. Recherche d'un modèle d'évapotranspiration potentielle pertinent comme entrée d'un modèle pluie-débit global, thèse doctorat.
- Marc Morel.** 1999. Acquisition et constitution d'une information hydrologique de base, Editions H.G.A, Bucarest, 203 p.
- Mate.** 2011. Projet national ALG/98/G31. *Elaboration de la stratégie et du plan d'action national des changements climatiques*. Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, Algérie.
- Mokatel N.** 2006. Qualité des eaux de l'Oued Medjerda, région de Souk-Ahras (Nord-Est Algérien). Mémoire d'Ingénieur en hydrogéologie. Université Badji-Mokhtar, Annaba, Algérie 64p.
- Mudry J.** 2004. Hydrogéologie Objets, méthodes, applications, 292 p.

- Musy A., Higy C.** 2004. Hydrologie: Une science de la nature. PPUR presses polytechniques.
- Nait Merzoug A., Merazig H.** 2012. Water Pollution of Oued Medjerda in Algerian Souk Ahras Region, *intechopen*, 529- 540.
- Nash, J. E., Sutcliffe, J.V.** 1970. River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 282-290.
- Nouiri I.** 2016. Outils d'aide à la décision pour la gestion optimale des ressources en eau, *Revue bibliographique, méthodologie et cas d'études en Tunisie*, institue national agronomique de Tunis, p 65.
- Nouiri I.** 2007. Optimisation multiobjectif de la chloration dans les réseaux d'alimentation en eau potable par algorithmes génétiques, Thèse de doctorat en sciences agronomiques, Institut National Agronomique de Tunisie
- Olive P.** 1996. Introduction à la géochimie des eaux continentales, *Iditura Didactica si pedagogica*, R.A. Bucuresti, 130 p.
- Oliver J.E.** 2006. *Encyclopedia of World Climatology*. Springer.
- Ouanouki B.** 2014. Demande en eau et Impact de la réutilisation des eaux usées traitées et des boues en agriculture et dans les techniques forestières, thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure Agronomique– El Harrach Alger. *Water analysis. Trans. Amer. Geophys. Union*, 25, 914-923.
- Piper A.M.** 1944. A graphique procedure in the geochemical interpretation.
- Parizot M.** 2008. Contrôle de surveillance de la qualité des masses d'eau souterraine de la Guyane conformément à la Directive Cadre Européenne sur l'Eau : saison des pluies 2008 Rapport final BRGM/RP-56890-FR.
- PMH.** 2016. Bilan de l'hydraulique agricole (PMH), Direction de Ressources en Eau de la wilaya de Souk-Ahras ,Service de l'Hydraulique Agricole, bureau du suivi de la gestion et de l'exploitation, 65p.
- Pouchard Alexandre** (2014), Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat a publié son cinquième rapport, avec des projections de plus en plus pessimistes. [www.lemonde.fr/les-decodeurs/article/2014/11/04/climat-5-rapports-du-giec-5-chiffres-alarmants\\_4517326\\_4355770.html](http://www.lemonde.fr/les-decodeurs/article/2014/11/04/climat-5-rapports-du-giec-5-chiffres-alarmants_4517326_4355770.html)
- Pouget J.C.** 2003. Un environnement de modélisation pour tester l'allocation de ressources en eau HyD2002 et ses applications, Actes de l'atelier du PCSI, 2-3 décembre 2003, Montpellier, France.
- Rajendra P., Sadashivaiah C. and Rangna G.** 2009. The concept of hydrochemical facies was developed in order to understand and identify the water composition in different classes. ( Hydrochemical Characteristics and Evaluation of Groundwater Quality of Tumkur Amanikere Lake Watershed, Karnataka, India PRASAD - E-Journal of Chemistry.
- Richards L.A.** 1954. Diagnosis and Improvement of Saline Alkali Soils, *Agriculture*, 160, Handbook 60. US Department of Agriculture, Washington DC.
- Roche M.** 1963. *Hydrologie de surface*. Ed. Gauthier, Villars (France), 430 p.
- Rodier J.** 1996. L'analyse de l'eau, eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer. 8e édition Dunod, Paris, France.

- Rouaibia F.** 2018. Caractéristiques hydrogéologiques et hydrochimiques de la partie aval d'Oued Medjerda, Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar-Annaba, 152 p.
- Samie G.** 1953. Etude hydrologique de la haute –Medjarda. pp106 - 116.
- Savornin J.**1928. Recherches d'eau dans la région de Gambetta. 32 p.
- Sayad L., Djabri L., Bouhsina S., Bertrand C., Hani A., Chaffai H.** 2017. Hydrochemical study of Dreaan–Annaba aquifer system (NE Algeria). Journal of Water and Land Development (JWLD), No. **34(VII–IX)**, 259-263. DOI: [10.1515/jwld-2017-0061](https://doi.org/10.1515/jwld-2017-0061)
- SEI.** 2008. WEAP (Water Evaluation and Planning): User Guide for WEAP21. Stockholm Environment Institute, Boston USA. Available from [www.seib.org/weap/](http://www.seib.org/weap/).
- SEI.** 2011. WEAP: Water Evaluation and Planning System. Stockholm Environment Institute, Boston, USA.
- Sekiou F., Kellil A.** 2014. Caractérisation et classification empirique, graphique et statistique multivariable d'eaux de source embouteillées de l'Algérie, Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n°20, pp. 225-246.
- Shivran H.S., Dinesh Kumar D., Singh R.V.** 2006. Improvement of water quality through biological denitrification. J Environ Sci Eng 48(1):57–60.
- Scholler H.** 1956. Géochimie des eaux souterraines : Application aux eaux des gisements de pétrole. Revue de l'institut Fr. du Pétrole et Ami. Des combustibles liquides, n° mars, avril, juin, juillet, août 1955 et I vol. 213 p. Ed. Techniq, Paris.
- SOGREAH** (Société Grenobloise d'Etudes et d'Applications Hydrauliques). 1999. Etude d'inventaire et de développement de la Petite et moyenne hydraulique, wilaya de Souk ahras, N° 23400 74, 48p.
- Subramani T., Rajmohan N., Elango L.** 2009. Groundwater geochemistry and identification of geochemical processes in a hard rock region, South India, springer science
- Thivet G.** 2008. Gestion de la demande en eau en Méditerranée, progrès et politiques, XIIIème Congrès Mondial de l'Eau.
- Templ M., Filzmoser P., Reimann C.** 2008. Cluster analysis applied to regional geochemical data: Problems and possibilities. Appl. Geochem **23**, 2198-2213.
- Thorne D.W. and Peterson H.B.** 1954. Irrigated Soils. Constable and Company Limited, London, 113.
- Tlili M.** 2008. Le système bidimensionnel urgonien du Mellègue (NE Algérien). Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar-Annaba, 189p.
- Toubal W.** 1993. Etude du forage T1 dans le synclinal de Toura. Mémoire d'ingénieur d'état, Université d'Annaba, 40p.
- Vila J.M.** 1980. La chaîne alpine d'Algérie orientale et des confins algéro- Tunisiens, thèse de doctorat d'état. Université de Pet M. Curie.
- Vanessa Vaessen, Ramon Brentführer.** 2015. L'intégration de la gestion des eaux souterraines pour les Organismes de Bassins Transfrontaliers en Afrique - un manuel de formation produit par AGW-Net, BGR, IWMI, Cap Net, RAOB, et IGRAC».

- Wenning R.J., Erickson G.A.** 1994. Interpretation and analysis of complex environmental data using chemometric methods. *TrAC Trends in Analytical Chemistry* **13(10)**, 446-457. DOI: 10.1016/0165-9936(94) 85026-7.
- Wilcox L.V.** 1948. *Classification and Use of Irrigation Waters*. U.S. Department of Agriculture, Washington DC, 962.
- Wildi W.** 1983. La chaîne tello-rifaine (Algérie, Maroc, Tunisie) : structure, stratigraphie et évolution du Trias au Miocène, *Revue de géologie dynamique et de géographie physique*, Paris, Masson, vol. 24, 3, pp. 201-297.
- William Johnson.** 1995. WEAP: A Comprehensive and Integrated Model of Supply and Demand, *Proceedings of the 1995 Georgia Water Resources Conference*, held April 11 and 12, 1995.
- Yates D.** 2005. Weap21-a demand-, priority-, and preference-driven water planning model: Part 2, aiding freshwater ecosystem service evaluation. *Water International*, Volume 30, Number 4, Pages 501–512.
- Yen B.C.** 1986. Rainfall-runoff process on urban catchments and its modelling. *Urban Drainage Modelling*, Dubrovnik, Pergamon Press editor, London, UK, 3-26.
- Zakar M., Chuan M., Issoufou A.** 2011. Application of Water Evaluation and Planning (WEAP): A Model to Assess Future Water Demands in the Niger River (In Niger Republic), *Modern Applied Science* Vol. 5, N°1.
- Zella L., Smadhi D.** 2006. Gestion de l'eau dans les pays arabes, *Larhyss Journal*, ISSN 1112-3680, N° 05, pp.157-169.

### Sites consultés

<https://www.aquaportail.com>  
<http://www.seib.org/weap>  
<http://www.weap21.org>  
[http://cnigs.ht/pitdd/index.php?option=com\\_content&view=article&id=200&Itemid=298](http://cnigs.ht/pitdd/index.php?option=com_content&view=article&id=200&Itemid=298)  
<http://etudiant-tunisien.besaba.com/hydrologie/chapitre2.html>  
<https://www.gwp.org/en/GWP-Mediterranean/>  
<http://www.mree.gov.dz>  
<http://www.earthexplorer.usgs.gov>  
<http://www.who.int/fr/>  
<http://www.manicore.com/documentation/serre/scenario.html>

### Cartes consultées :

- Cartes géologique et topographique de Souk-Ahras au 1/200000.
- Carte structurale au 1/500000, la chaîne Alpine d'Algérie Nord orientale et des confins Algéro-tunisiens-1978.
- Cartes géologique et topographique de Souk-Ahras au 1/50000 avec notice explicative.