

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Echahid Hamma Lakhdar El-Oued

Faculté de Technologie
Département d'Hydraulique et de Génie Civil



MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme Master en Hydraulique

Option : *Ouvrages Hydrauliques*

THEME

*Contribution à l'identification de la
réserve facilement utilisable dans une
zone hyper aride
(Cas de la vallée d'Oued Souf)*

Présenté par : RAMOULI Aimen
DOU Yassine

Dirigé par :
Mr. KHECHANA Salim

Devant le jury composé de :

PRESIDENT : Mr. MILOUDI Abdelmonem

EXAMINATEUR : Mme ZAIR Nadjat

Promotion : Juin 2018

Remerciements

Tout d'abord, nous commençons par remercier le bon Dieu qui nous a doté de la volonté, du courage et surtout de la patience pour produire ce travail et qui nous a aidé à faire face à toutes les difficultés rencontrées lors de son élaboration.

Nos sincères remerciements vont à nos parents qui ont sacrifié leur vie pour notre éducation.

*Nos vifs remerciements vont à notre encadreur, Monsieur **KHECHANA Salim**, pour avoir accepté de nous encadrer et nous diriger tout au long de la réalisation de ce projet, et pour tous les conseils instructifs et judicieux et leur disponibilité.*

*Nous tenons à remercier Monsieur **MERDASSI Samir**, ses conseils précieux, ses justes critiques témoignant de l'intérêt qu'il lui portait ont été un encouragement permanent.*

*Nous tenons à remercier sincèrement et du profond du cœur Monsieur **SAHARAOUI Bachir** pour son aide et générosité permanente en cas de besoin.*

Nous remercions également Monsieur le président de jury d'avoir accepté de présider le jury de cette thèse. Nous exprimons nos respectueux dévouements aux membres de jury, pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant de jurer la commission d'examen de notre travail.

*A tous nos enseignants qui nous ont transmis le meilleur de leur savoir et en particulier Monsieur **MANI Mohamed** pour ses conseils et son soutien infaillible durant les moments durs. Un grand merci, pour Monsieur **MILOUDI Abdelmonem** pour ses conseils et son aide au cours de la période d'étude.*

Nous remercions les plus sincères à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Aïmen, Yassine

Dédicace

*Je dédie ce modeste travail à ma chère mère,
à mon père qui m'ont toujours soutenu
et aidé à affronter les difficultés, pour tous
ce qui ont fait pour que je puisse les
honorer, et leur patience durant ma vie.*

*A mes très chers frères et à mes chères
sœurs, à toute ma famille
A mes chers amis.*

Aïmen, Yassine

الملخص

يعتبر غور وادي سوف منطقة جد جافة ويمثل خزاناً كبيراً جداً من المياه الجوفية. يقع هذا الحوض في الجنوب الشرقي من الصحراء الجزائرية بمساحة تقدر بـ 11738 كلم². مملوكة مساحة فلاحية إجمالية مقدرة بـ 1591869 هكتار، تشهد المنطقة حركة فلاحية كبيرة معتمدة على إمكاناتها الطبيعية، ومدفوعة من قبل البرامج الزراعية المكثفة والتي أدت إلى إدخال محاصيل جديدة خاصة محصول البطاطا.

تمتلك المنطقة خاصية مميزة من الناحية الجيولوجية، فضلاً عن الظروف التكتونية والجغرافية الحجرية التي سمحت بإنشاء سلسلة رسوبية ذات صخور متنوعة في الزمن، منتظمة ومتجانسة في الفضاء. الدراسة الجيولوجية هي التي تسمح لنا بتحديد التكوين الطبقي الإقليمي ابتداء من عصر المايوبليوسين وصولاً إلى العصر الرباعي.

يسمح لنا توليف البيانات المناخية بتحديد طبيعة المناخ في المنطقة، حيث تتميز بمناخ صحراوي شديد الجفاف ذو صيف حار وجاف وشتاء معتدل، مع نسب تساقط جد منخفضة، على النقيض، تكون درجة الحرارة مرتفعة وتتجاوز أحياناً 50 درجة مئوية مع إشعاعات شمسية طويلة. هذا ما يؤدي إلى تبخر شديد وارتفاع الرطوبة النسبية في فصل الشتاء أكثر منها في الصيف.

لغرض التخطيط لاستغلال موارد المياه الجوفية، تظهر الدراسة الهيدرولوجية أن نظام طبقات المياه الجوفية في منطقة الدراسة يتشكل من ثلاث طبقات: طبقة المياه الجوفية الحرة (طبقة المياه السطحية)، طبقة الـ CT وطبقة الـ CI.

نظراً لاعتماد المنطقة على نشاط الفلاحة أساساً في اقتصادها، تعتبر المياه الجوفية ثروة أساسية يعتمد عليها سكان المنطقة. انطلاقاً من هذا المبدأ واعتماداً على الخصائص الجيولوجية والهيدرومناخية، حاولنا في هذا العمل إيجاد قيمة مخزون الماء سهل الاستعمال في التربة الرملية لهذه المنطقة شديدة الجفاف من خلال عدة طرق قمنا فيها بالعديد من التحاليل لتحديد عدة معايير مميزة للتربة الرملية. تعتبر معرفة قيمة هذا المقدار ذات أهمية كبيرة في النشاط الزراعي، حيث تهدف إلى تكييف كميات مياه السقي حسب احتياج المحصول الزراعي وبالتالي التخطيط للاستغلال العقلاني والمنهجي للثروة المائية في نشاط الفلاحة.

■ **الكلمات المفتاحية:** غور وادي سوف، مخزون الماء سهل الاستعمال، السقي، منطقة جد جافة، تربة رملية.

Abstract

The valley of Souf is an hyper-arid region and represents a unit of water resource. It is located in the south-east of the Algerian Sahara, with an area of 11,738 km². With a total agricultural area estimated at 1,591,869 hectares, the Souf region has a strong agricultural dynamic based on its natural potential, driven by various agricultural programs that have led to the introduction of new crops, especially the potato crop.

The region has a specific geological particularity, as well as tectonic and palaeogeographic conditions have allowed the creation of a sedimentary series of rocks with a lithology: varied in time, regular and homogeneous in space. It is the geological investigation that enables us to identify the regional stratigraphy which energy of Miopliocène until the Quaternary.

The combination of climatic data allows us to determine the climate in the region. It is characterized by a very dry desert climate with hot, dry summers and mild winters. Rainfall is very low. In contrast, the temperature is high and sometimes exceeds 50°C with long solar radiation. This leads to intense evaporation and higher relative humidity in winter than in summer.

For the purpose of planning the exploitation of groundwater resources, the hydrological study shows that the aquifer system in this area consists of three levels: phreatic table, the Terminal Complex (TC) and the Continental Intercalary (CI).

Due to the region's dependence on agriculture in its economy, groundwater is a fundamental resource on which people depend. Based on this principle and using geological and hydroclimatic characteristics, we have tried in this work to find the value of easily usable reserve in the sandy soil of this very dry region, through several methods in which we have done many analyzes to identify many characteristics of this sandy soil. The value of this amount is of great importance in agricultural activity. It aims at adapting the quantities of irrigation water according to the needs of the agricultural crop and thus planning for the rational and systematic exploitation of water resources in agriculture.

- **Keywords:** The valley of Souf, easily usable reserve, irrigation, hyper-arid region, sandy soil.

Résumé

La vallée de Souf est une région hyper aride et représente une unité de ressource en eau. Elle est située au Sud-Est du Sahara algérien, avec une superficie de 11,738 km². Ayant une superficie agricole totale de 1,591,869 hectares, la région du Souf connaît une forte dynamique agricole s'appuyant sur ses potentialités naturelles, impulsée par les différents programmes agricoles, ces derniers sont à l'origine de l'introduction de nouvelles cultures notamment la culture de la pomme de terre.

La région à une particularité spécifique de point de vue géologique, ainsi que les conditions tectoniques et paléogéographiques ont permis la mise en place d'une série sédimentaire avec une lithologie variée dans le temps, régulière et homogène dans l'espace. C'est l'étude géologique qui nous permet d'identifier la stratigraphie régionale en allant de Miopliocène jusqu'au Quaternaire.

La synthèse des données climatiques nous permet de distinguer que la région est caractérisée par un climat hyper aride de type saharien avec un été chaud et sec et un hiver doux, les précipitations sont très faibles, par contre la température est élevée et qui dépasse parfois les 50°C avec un rayonnement solaire excessif. Ce qui conduit à une évaporation intense et une humidité relative plus importante en hiver qu'en été.

Dans l'objectif de la planification de l'exploitation des ressources en eaux souterraines, l'étude hydrogéologique montre que le système aquifère d'El-Oued est constitué de trois nappes : nappe libre (phréatique), nappe de complexe terminal et nappe de continentale intercalaire.

En raison de la dépendance de la région principalement de l'activité agricole dans son économie, les eaux souterraines sont une ressource fondamentale dont dépendent les habitants. Sur la base de ce principe, et en fonction des caractéristiques géologiques et hydroclimatique, nous avons essayé de trouver dans ce travail une valeur de la réserve en eau facilement utilisable dans le sol sableux de cette région hyper aride à travers plusieurs façons dont nous avons fait de nombreux tests pour identifier plusieurs critères du le sol sableux. La valeur de cette quantité est d'une grande importance dans l'activité agricole : elle vise à adapter les quantités d'eau d'irrigation en fonction des besoins de la culture agricole et à planifier ainsi l'exploitation rationnelle et systématique des ressources d'eau dans l'agriculture.

- **Mots clés :** vallée de Souf, région hyper aride, réserve facilement utilisable, irrigation, sol sableux.

Liste des abréviations

AEP : Alimentation en Eau Potable.
ANRH : Agence Nationale des Ressources Hydriques.
CI : Continental Intercalaire.
CT : Complexe Terminal.
DSA : Direction de Service Agricole d'El-Oued.
ETP : EvapoTranspiration Potentiel.
ETM : EvapoTranspiration Maximal.
ETR : EvapoTranspiration Réelle.
Hcc : Humidité pondérale à la Capacité au Champ.
Hpf : Humidité pondérale au Point de Flétrissement.
MKSA : système international d'unités.
MO : Matière Organique.
ONM : Office National Météorologique.
OSS : Observatoire du Sahara et du Sahel.
RDU : Réserve Difficilement Utilisable.
RFU : Réserve Facilement Utilisable.
RU : Réserve Utile.
RUS : Réserve Utile de Survie.

Table des matières

Remerciements

Dédicace

الملخص

Abstract

Résumé

Liste des abréviations

Table des matières i

Liste des tableaux v

Liste des figures vi

INTRODUCTION GENERALE1

Chapitre I : Géologie

I. INTRODUCTION 4

II. SITUATION GEOGRAPHIQUE 4

III. APERÇUS HISTORIQUE SUR LA REGION D'ETUDE 5

IV. ETAT DE CONNAISSANCE 6

IV. 1. Le relief 6

IV. 2. Climat et végétation 7

IV. 3. Développement agricole 7

V. GEOLOGIE..... 8

V. 1. Géologie de la région 8

V. 2. Stratigraphie 9

V. 2. 1. Formations de l'ère Secondaire 9

V. 2. 2. Formations de l'ère Tertiaire 11

V. 2. 3. Formations du Quaternaire 12

V. 3. Géomorphologie 14

V. 3. 1. Tercha..... 14

V. 3. 2. Louss 14

V. 3. 3. Salsala ou Smida 14

V. 3. 4. Tefza..... 14

V. 4. Interprétation des coupes..... 14

V. 5. Tectonique 16

VI. CONCLUSION..... 17

Chapitre II : Hydroclimatologie

I. INTRODUCTION	19
II. ETUDE DES PARAMETRES CLIMATIQUES	19
II. 1. Les précipitations	19
II. 2. La température	20
II. 3. Synthèse climatique	22
II. 3. 1. Indice d'aridité.....	22
II. 3. 2. Diagramme pluviothermique	23
II. 4. L'humidité	24
II. 5. L'évaporation.....	25
II. 6. Le vent	25
II. 7. L'insolation.....	27
III. CALCUL DES PARAMETRES DU BILAN HYDRIQUE	27
III. 1. Evapotranspiration ou déficit d'écoulement	27
III. 1. 1. Calcul l'évapotranspiration	28
III. 2. La réserve facilement utilisable (RFU)	30
IV. ETABLISSEMENT DU BILAN HYDRIQUE	30
V. CONCLUSION	31

Chapitre III : Hydrogéologie

I. INTRODUCTION	34
II. CADRE HYDROGEOLOGIQUE	34
II. 1. La nappe phréatique	36
II. 2. Le complexe terminal (Potien)	37
II. 3. Le continental intercalaire (Barremo-Albien)	39
II. 4. Litho stratigraphie des nappes d'El-Oued	40
II. 4. 1. Nappe phréatique	40
II. 4. 2. Le complexe terminal	41
II. 4. 3. Le continentale intercalaire	41
III. ETUDE DES COUPES HYDROGEOLOGIQUES	42
IV. L'ETUDE PIEZOMETRIQUE.....	44
IV.1. La carte piézométrique de la nappe CT de la vallée du Souf en 2011	44
V. ESTIMATION DES RESERVES	46
VI. INVENTAIRE DES POINTS D'EAU	47
VII. CARACTERISTIQUES HYDRODYNAMIQUES DE LA NAPPE DU CT	48
VII. 1. Expérimentations des pompes d'essais	48

VII. 2. Essais des pompages.....	48
VII. 3. Interprétation des données des essais du pompage à longue durée	49
VII. 3. 1. Forage F 87 (El-Houd-commune de Guemar).....	49
VII. 4. Etat des forages	52
VII. 4. 1. Forages à l'arrêt	52
VII. 4. 2. Forages abandonnés.....	53
VIII. LA REMONTEE DES EAUX DE LA NAPPE PHREATIQUE ET SES CAUSES PRINCIPAUX	53
IX. CONCLUSION.....	53

Chapitre IV : Estimation de la Réserve Facilement Utilisable

I. INTRODUCTION	56
II. DEFINITION.....	56
II. 1. Réserve utile en eau	56
II. 2. Réserve facilement utilisable	57
III. ESTIMATION DE LA RESERVE FACILEMENT UTILISABLE	58
III. 1. Estimation par la formule de Hallaire	58
III. 1. 1. Charge en éléments grossiers	59
III. 1. 2. Profondeurs maximales d'enracinement	59
III. 1. 3. L'humidité du sol	60
III. 1. 3. 1. L'humidité pondérale	61
III. 1. 3. 2. L'humidité volumique	61
III. 1. 3. 3. La capacité au champ	61
III. 1. 3. 4. Le point de flétrissement	62
III. 1. 3. 5. Humidité équivalente	62
III. 1. 3. 6. Humidité hygroscopique	62
III. 1. 4. Potentiel hydrique	63
III. 1. 5. La densité apparente	65
III. 2. Estimation par les teneurs volumiques en eau	68
III. 2. 1. Fonctions de pédotransfert	69
III. 2. 2. Méthode des coefficients de texture.....	69
III. 2. 2. 1. Estimations de Jamagne et al., (1977)	69
III. 2. 2. 2. Estimation de Jamagne et Bétrémieux, (1992).....	72
III. 3. Estimation par la formule de Rawls	74
III. 4. Méthode empirique	75
IV. CONCLUSION.....	75

CONCLUSION GENERALE.....	76
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	78

Liste des tableaux

Tab. II. 1 : Les précipitations moyennes mensuelles (1978-2013)	20
Tab. II. 2 : La température moyennes mensuelles (1978-2013).....	21
Tab. II. 3 : Classement en fonction de l'indice d'aridité (selon De Martonne)	22
Tab. II. 4 : Couples température/ précipitation moyennes mensuelle.....	23
Tab. II. 5 : Humidité relative moyenne mensuelle (1978-2013).....	24
Tab. II. 6 : L'évaporation moyenne mensuelle (1978-2013)	25
Tab. II. 7 : Les vitesses du vent moyennes mensuelles (1978-2013).....	26
Tab. II. 8 : Répartition moyenne mensuelle d'insolation (1990-2008).....	27
Tab. II. 9 : Résultats de l'ETP issus de l'application de la formule de Thornthwaite (1978-2013).....	29
Tab. II. 10 : Bilan hydrique d'après Thornthwaite (1978-2013)	31
Tab. III. 1 : Récapitulatif des systèmes aquifères d'El-Oued (Bousalsal B, 2007)	42
Tab. III. 2 : Épaisseur moyen des différents aquifères et estimation de la réserve	47
Tab. III. 3 : Calcul de débit spécifique, valeurs débits /rabattements 87 (El-Houd).....	49
Tab. IV. 1 : Caractères morphologiques essentiels des sols (Cah. ORSTOM, ser. Pédol., vol. XXV, n °4,1989-1990).....	59
Tab. IV. 2 : Tableau des coefficients de texture (Jamagne et al., 1977)	71

Liste des figures

Fig. I. 1 : Situation de la zone d'étude (extrait de la carte Michelin n° 953).....	5
Fig. I. 2 : L'extension de la zone agricole du Souf (ANRH, 2005)	8
Fig. I. 3 : Log stratigraphique du Forage F1 dans l'Albien (ANRH, 1993).....	13
Fig. I. 4 : Coupe Géologique N°01 (ANRH, 1989)	15
Fig. I. 5 : Coupe géologique N°02 (ANRH, 1989)	15
Fig. I. 6 : Coupe géologique N°03 (ANRH, 1989)	16
Fig. II. 1 : Diagramme de précipitations moyennes mensuelles (1978-2013)	20
Fig. II. 2 : Diagramme de températures moyennes mensuelles (1978-2013)	21
Fig. II. 3 : Courbe pluviothermique (1978-2013).....	23
Fig. II. 4 : Diagramme de l'humidité relative moyenne mensuelle (1978-2013)	24
Fig. II. 5 : Diagramme de l'évaporation moyenne mensuelle (1978-2013).....	25
Fig. II. 6 : Diagramme des vitesses du vent moyennes mensuelles (1978-2013)	26
Fig. II. 7 : Diagramme de l'insolation moyennes mensuelles (1990-2013)	27
Fig. III. 1 : Carte hydrogéologique du Sahara Septentrional (UNESCO, 1972 modifiée par Guendouz et al, 2003)	35
Fig. III. 2 : Coupe hydrogéologique à travers le Sahara (UNESCO, 1972).....	36
Fig. III. 3 : Zone d'alimentation de la nappe phréatique et le sens d'écoulement de la nappe (Cote Marc, 2006)	37
Fig. III. 4 : Limites de l'aquifère du Complexe terminale avec les niveaux piézométrique et les sens d'écoulement (Baba SY et al., 2006)	39
Fig. III. 5 : Limite de l'aquifère du Continental Intercalaire avec le niveau piézométrique et le sens d'écoulement (Baba SY et al., 2006)	40
Fig. III. 6 : Coupe Hydrogéologique du Souf (ANRH, 1989)	43
Fig. III. 7 : Coupe Hydrogéologique d'El- Hamraia, El-Oued (ANRH, 1989)	44
Fig. III. 8 : Carte piézométrique de la nappe CT de la vallée du Souf en 2011 (Kechana, 2014).....	46
Fig. III. 9 : Courbe débit / Rabattement à F 87 (El-Houd).....	49
Fig. III. 10 : Essai de pompage à longue durée à F 87 (EL-Houd)	51
Fig. IV. 1 : Illustration des limites haute et basse de la réserve utile (GCHP2E, 2016)	57
Fig. IV. 2 : Différents types d'eau dans le sol (CTA, 1976).....	63
Fig. IV. 3 : Relation potentiel - humidité pour trois types de sol (CTA, 1976).	64
Fig. IV. 4 : Relation potentiel - humidité (effet d'hystérésis), (CTA, 1976).....	65
Fig. IV. 5 : Diagrammes de classification des textures (Jamagne, 1967)	70

Fig. IV. 6 : Triangle de coefficient des textures Jamagne et Bétrémieux (1992).....	72
Fig. IV. 7 : Résultat virtuel de la superposition des strates composant le sol (GI, 2018)	73

INTRODUCTION GENERALE

L'eau travaille pour nous de maintes façons, nous rendant la vie plus facile et plus agréable. Elle constitue un élément essentiel non seulement pour l'être humain mais pour tous les types de plantes et d'animaux. C'est une composante majeure des mondes minéral et organique. Dans le monde présent, elle contribue de multiples façons à la qualité de notre vie, elle participe à toutes les activités quotidiennes. C'est est un élément fondamental pour l'alimentation humaine, les utilisations domestiques, les activités de transport, les activités commerciales, les utilisations sociales et culturelles et surtout pour la production : agricole, animale et industrielle (utilisations spécifiques aux produits, aux procès de fabrication, de conditionnement et de conservation).

L'eau figure parmi les éléments essentiels auxquels font recours les êtres vivants, y compris les plantes, pour se nourrir, se construire et vivre. Aucun végétal digne de ce nom, même le cactus, ne pourrait se passer d'eau, ne serait-ce alors que quelques millilitres par an. L'eau est nécessaire à la plante comme à tout être vivant. A l'échelon cellulaire, elle participe au maintien des structures et permet le déroulement du métabolisme. Elle contribue au port des végétaux et commande divers mouvements d'organes (feuilles, étamines) et de cellules (stomates) et participe à l'allongement cellulaire.

En agriculture irriguée, l'eau utilisée par les cultures est partiellement ou totalement fournie par l'homme. L'eau d'irrigation est prélevée sur un point d'eau (rivière, lac ou nappe aquifère) et conduite jusqu'au champ grâce à une infrastructure de transport appropriée. Pour satisfaire leurs besoins en eau, les cultures irriguées bénéficient à la fois de l'apport d'eaux de pluie naturelles plus ou moins fiables et de celui d'eaux d'irrigation. L'irrigation constitue un outil de gestion efficace contre les aléas des précipitations. Dans une région hyper aride, dont l'exemple de la vallée de Souf, les précipitations sont très faibles. De ce fait, l'irrigation est un intrant indispensable à la production agricole dont les apports en eau sont assurés par le système aquifère de la région.

La gestion intégrée et rationnelle des ressources en eau et la maîtrise des techniques hydro agricoles sont aujourd'hui une nécessité en vue d'assurer un développement harmonieux et durable et ce, pour une agriculture moderne et performante. Optimiser et préserver la ressource en eau est au centre des préoccupations agricoles. C'est un enjeu majeur

pour sécuriser les productions. La gestion quantitative et qualitative de l'eau est un défi partagé. Pour éviter tout gaspillage d'eau, il est nécessaire de savoir la valeur de la Réserve Facilement Utilisable (RFU), c'est la quantité d'eau dans le sol facile à absorber par les racines.

Dans cette optique, ce travail a été axé principalement sur la contribution à l'identification de la réserve facilement utilisable dans la zone hyper aride de la vallée d'Oued Souf en mettant sur pied un plan de travail à 04 chapitres. Le premier est consacré à la géologie : nous nous sommes donc attachés à définir le cadre général de notre région d'étude, dans le but d'en tirer une monographie géographique, topographique et géologique. Au cours du deuxième chapitre nous avons étudié l'hydroclimatologie régionale en analysant les facteurs climatiques pour ressortir les régimes pluviométriques à savoir la période humide et la période sèche et le type de climat caractérisant la région d'étude. Le troisième chapitre traite de l'hydrogéologie du système aquifère d'Oued-Souf, en définissant sa géométrie et ses paramètres hydrodynamiques par l'interprétation des essais de pompages. Dans le dernier chapitre, on a essayé, en se basant sur les parties précédentes, d'estimer la valeur de la réserve facilement utilisable dans la région hyper aride de la vallée de Souf à partir de plusieurs méthodes.

Chapitre I

Géologie

I. INTRODUCTION :

La géologie est la base de toute étude en hydrogéologie, car elle permet la détermination des horizons susceptibles d'être aquifères, et du fait que l'extension des eaux souterraines dépasse de loin les limites des régions où elle pleut, que les unités aquifères existantes ont une très grande extension et débordent largement au-delà de la zone étudiée, il nous a paru préférable de présenter la géologie générale de la région et de donner par la suite en détail la description de chaque formation aquifère.

II. SITUATION GEOGRAPHIQUE :

La wilaya d'El Oued est située au Sud-Est de l'Algérie, et de Nord-Est du Sahara septentrional. Elle est à environ 700 Km au Sud-est d'Alger et à 350 Km à l'Ouest de Gabes (Tunisie).

La wilaya est limitée :

- Au Nord par les wilayas de Biskra, Khenchela, Tébessa.
- À l'Ouest par les wilayas de Biskra, Djelfa et Ouargla.
- Au Sud par la wilaya d'Ouargla.
- À l'Est par la république Tunisie.

La vallée de Souf n'est pas un bassin versant mais une unité de ressource en eau qui est délimitée :

- Au Sud par la mer de dunes du grand erg oriental.
- À l'Est par une série de chotts.
- À l'Ouest par Oued-Righ (fleuve de fossile) et par la ligne de palmeraie qui court de Biskra à Touggourt.

Les coordonnées géographiques :

- Latitude : 33° 19' 59N.
- Longitude : 6° 52' 59E.

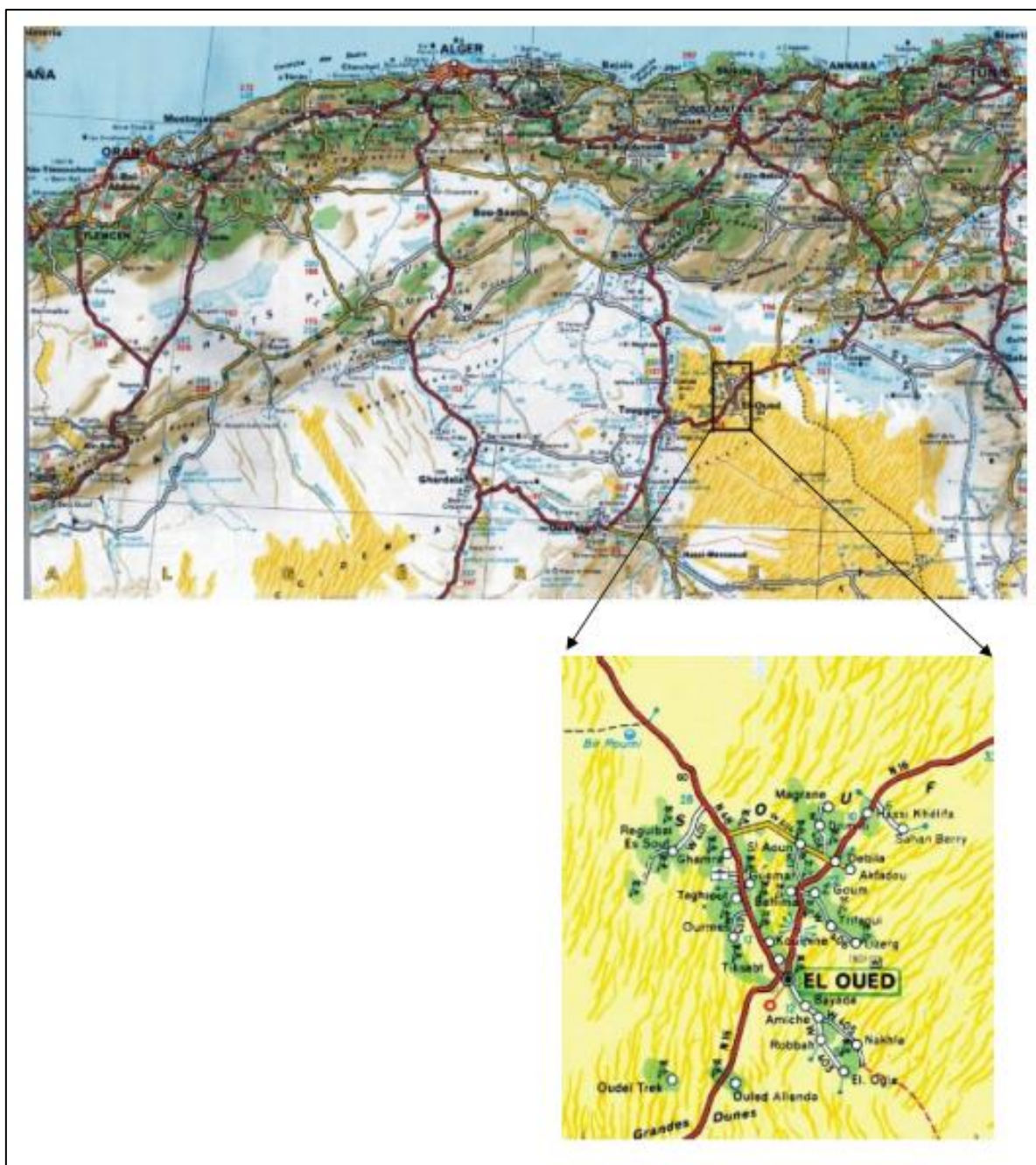


Fig. I. 1 : Situation de la zone d'étude (extrait de la carte Michelin n° 953)

III. APERÇUS HISTORIQUE SUR LA REGION D'ETUDE :

La vallée de Souf, située au Sud-Est du pays au centre d'une grande cuvette synclinale, est une unité de ressource en eau, appelée aussi région du Bas-Sahara. Elle est aussi le chef-lieu d'El-Oued, l'une de principales oasis du Sahara septentrional algérien dans l'Erg oriental. Elle devint une commune depuis 1957, une wilaya depuis janvier 1984.

Les caractéristiques de la région étaient responsables de déterminer l'agriculture comme l'activité principale des habitants. Les cuvettes (Ghouts) que creusait l'agriculture et

dans lesquelles sont plantés ses palmiers, permettaient à ces derniers de fournir les besoins d'eau à partir de la nappe phréatique qui était tout proche.

Comme tous le Sahara, Le Souf a été habité de temps immémorial. Il est certain que des populations se sont déplacées ici et là à travers les âges. En effet tous laissent à penser que la région était plus accueillante pour le nomadisme qu'elle ne l'est aujourd'hui. La faune et la flore étaient bien plus riches. Pour preuve, le sol a permis la conservation de vestiges. D'ailleurs en 1957, on a découvert à l'est de Hassi Khalifa, un squelette de Mammouth en bon état de préservation ; ce qui prouve que la vie existe sur ces terres depuis très longtemps. D'autres sites comme le terrain actuel de l'aéroport de Guemar ont décelé des silex, des lames bifaces ou des haches, ce qui prouve encore l'ancienneté de la vie dans le Souf.

Puis la région a continué à se développer à travers les vas et viens de nomade venant principalement de Lybie et d'Ethiopie. Et ces déplacements incessants ont duré plusieurs siècles, les nomades remontant au nord du Sahara pour chercher des pâturages pour leurs cheptel l'hiver venus. Mais une hypothèse prouvera que le Souf fut aussi visités par des populations non nomades venant d'occident comme peut le prouver des pièces de monnaies retrouvés dans plusieurs communes venant du Rome antique. Mais il reste toutefois acquis que le nomadisme fut la principale réalité dans la région. Ces nomades étaient des tribus berbères dont la plus importante était les Zénatas. Leurs lieux de vie correspondaient aux vieilles communes que sont El-Oued, Z'Goum, Guemar.

Mais vint le temps de la conquêtes arabo-musulmane et l'arrivée des Adouans (d'origine yéménite). C'est non seulement l'arrivée des arabes mais également celui de l'Islam dans la région (la vieille mosquée de Z'Goum date d'ailleurs de cette époque). Puis une troupe de nomades arabes vient également s'installer à El-Oued autour de 1051, il s'agit des Béni-Hillal. Mais les Hillaliens stoppèrent petit à petit leur semi sédentarité afin de s'installer définitivement dû à une grande lassitude, la disparition progressive du cheptel à cause des maladies mais surtout à l'attraction exercés par la culture des dattes. En effet, à condition de la creuser, chacun pouvait avoir sa propre palmeraie.

Ainsi est né le Souf et les villages qui se mirent à pousser les uns après les autres pour obtenir ce que l'on a aujourd'hui.

IV. ETAT DE CONNAISSANCE :

IV. 1. Le relief :

Les reliefs de la région sont formés essentiellement par trois formes principales :

- Une zone sableuse qui se présente sous un double aspect l'Erg et le Sahara.

- Une forme de plateau rocheux qui s'étend vers le Sud avec une alternance de dunes et crêtes rocheuses.
- Une zone de dépression caractérisée par la présence de chotts qui plonge vers l'Est.

La région de Souf se trouve dans la partie Nord de grand Erg oriental qui est caractérisée par un ensemble des dunes de sable d'origine continentale et d'âge quaternaire. Ces dunes sont déposées longitudinalement portant la dénomination du (SIF ou SABRE) dépassent parfois 60 m de hauteur, entre les cordons dunaires se forment les plateaux déprimés souvent assez étendus et parfois caillouteux ou recouverts par les vieilles formations d'encroûtements gypseux du Quaternaire.

IV. 2. Climat et végétation :

La région d'étude est caractérisée par un climat Saharien avec un été chaud et sec et un hiver doux, les précipitations sont très faibles, par contre la température est élevée et qui dépasse parfois les 50°C. Ce qui conduit à une évaporation intense et une humidité relative plus importante en hiver qu'en été.

Notons que les principales contraintes climatiques restent la fréquence régulière des vents et de leur violence. Toutes ces conditions climatiques vont influencer énormément la végétation qui est quasi inexistante sauf quelques plantes qui s'adaptent au climat Saharien tel que Halfa, Harra et surtout les palmiers dattiers.

IV. 3. Développement agricole :

La région du Souf connaît une forte dynamique agricole s'appuyant sur ses potentialités naturelles (hydriques, climatiques, édaphiques...etc.), impulsée par les différents programmes agricoles, ces derniers sont à l'origine de l'introduction de nouvelles cultures notamment la culture de la pomme de terre, qui a pris un essor particulier dans la région.

La Wilaya d'Oued-Souf dispose d'une superficie agricole totale de 1,591,869 hectares, mais la superficie réellement exploitée est de 100,000 hectares. La superficie irriguée est de 92,000 hectares. (DSA : Direction de Service Agricole d'El-Oued, 2017).

Cependant la mise en valeur des terres irriguées dans la région d'Oued-Souf est possible le long de la frontière Algéro-Tunisienne, qui ne présente pas actuellement de problèmes particuliers d'aménagement.

Quant à l'extension ou à la création de zones de mise en valeur des terres agricoles dans la vallée du Souf, c'est déconseillé pour le moment, sauf si l'irrigation se fait par les eaux de la nappe phréatique, du fait que l'utilisation des eaux de cette dernière pour l'agriculture permettra de rabattre le niveau d'eau, qui est actuellement proche de la surface du sol.

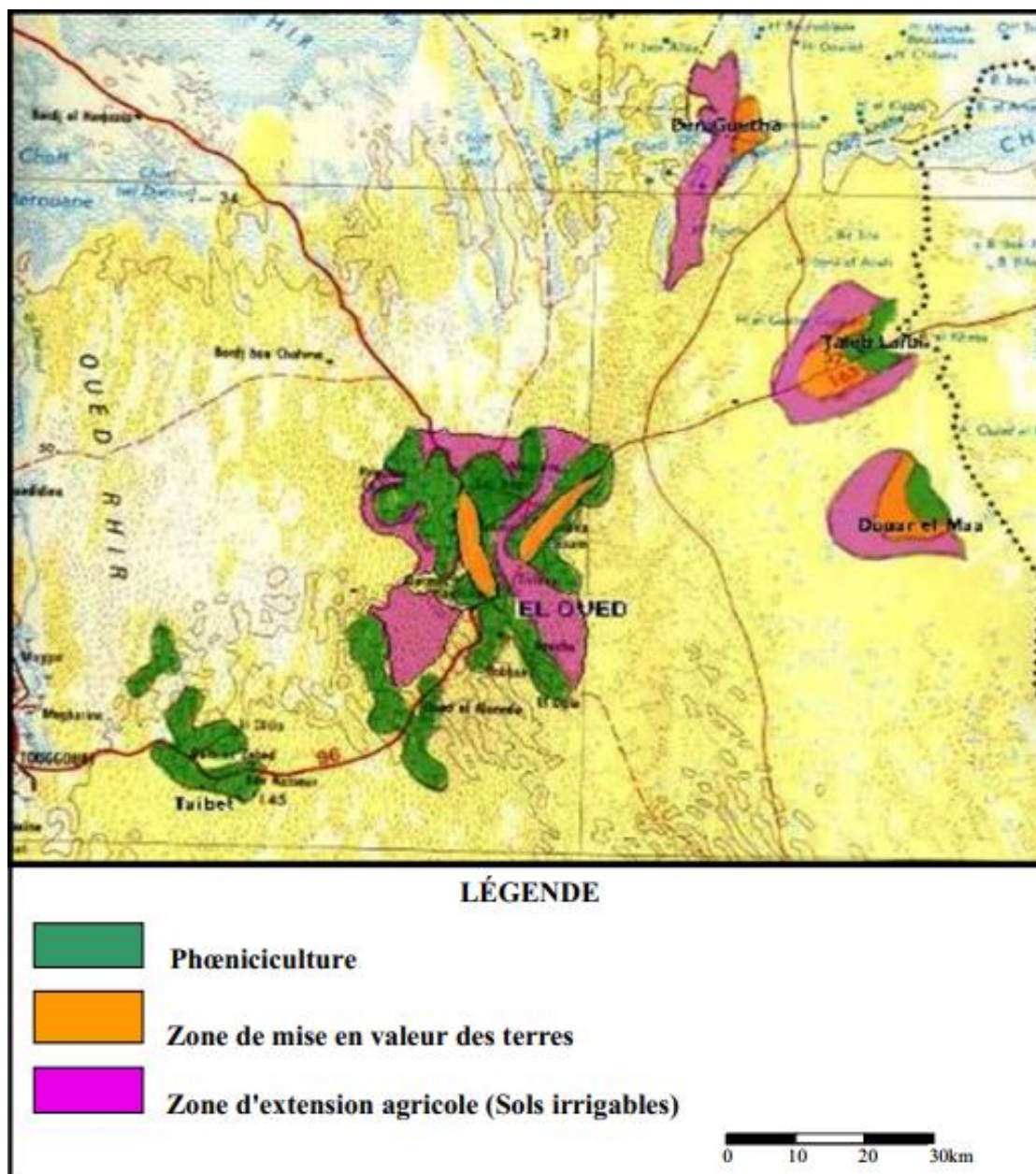


Fig. I. 2 : L'extension de la zone agricole du Souf (ANRH, 2005)

V. GEOLOGIE :

V. 1. Géologie de la région :

La région d'étude fait partie du bassin du Sahara septentrional de l'Algérie ou plus précisément du bassin oriental. Ce bassin limité à l'Ouest par la dorsale du M'Zab au Sud par les Hamadas du Tademaït et de Tinghert se prolonge en Libye à l'Est par les plateaux du Dahar Tunisien, au Nord par les monts des Aurès et des Nememcha.

Le bassin apparaît comme une vaste cuvette ouverte vers le Nord dont les bordures de hauteur modeste s'inclinent en pente douce vers la partie déprimée matérialisée par l'axe

SSW-NNE des Oueds Mya et Righ, vers le Nord au contraire dressé au-dessus d'une dépression longitudinale occupée par des Chotts avec un fond inférieur au niveau de la mer.

Dans sa moitié Sud, ce synclinal est traversé par un grand axe anticlinal Nord-Sud, siège de plusieurs gisements pétroliers, c'est le haut fond d'Amguid-El Biod. Cet axe n'est plus apparent dans les formations du Miopliocène. Dans le bassin du Sahara oriental, une seconde zone haut a existé du Cénomanién au Miopliocène entre Hassi Messaoud et la frontière Tunisienne. Cette structure est orientée Est-Ouest, elle sépare la fosse des Chotts au Nord du reste du bassin d'où son rôle important dans l'hydrogéologie de la région. Le long du versant Sud de l'Atlas existe une immense fosse de subsidence.

La région est toujours tectoniquement active. Celui-ci indiqué par la présence de divers indices (conglomérats pliocènes) redressés à la vertical terrasse Quaternaire ancien à 20 mètres au-dessus du lit actuel des oueds dans la région de Negrine et Ferkane.

Localement, les formations des dunes éoliennes, atteignant des dizaines de mètres de hauteur, couvrent la surface. Plus profond se trouve des formations continentales du Quaternaire constitués d'un mélange d'évaporites, sables et argiles, formant une couche plus au moins tendue.

V. 2. Stratigraphie :

D'après (Cornet 1964, Bel 1968) et les coupes de sondages établies à partir des forages, les profondeurs des étages varient d'une région à l'autre.

Sur la base des logs de forage de l'Albien faite par l'ANRH (1993) sur la région d'Oued-Souf, nous citons les principales strates repérées dans cette région, en allant de la plus ancienne vers le plus récente (Fig. I. 3 : Log de forage F1 de l'Albien) :

V. 2. 1. Formations de l'ère Secondaire :

- **Le Barrémien :**

Selon les forages du continental intercalaire, il est étendu à travers toute la région. Il présente une lithologie d'alternance de grès avec passages d'argiles et parfois des intercalations de calcaire dolomitique, on rencontre également des sables avec présence de silex. L'épaisseur moyenne de cet étage est de l'ordre de 200 à 230 mètres.

- **L'Aptien :**

Cet étage est constitué principalement par des formations dolomitiques, marneuses et marno-calcaires. D'après les coupes géologiques des forages réalisés dans la région, il est le seul étage dont l'épaisseur ne dépasse pas les 30 mètres.

- **L'Albien :**

C'est un étage constitué par une alternance de marnes, de grès de sables et par des calcaires avec passages de silex et d'argile.

Il est bordé en bas par le toit de la barre aptienne, et en haut par des faciès argilo carbonatés. D'après les coupes de sondages des forages Albien, l'épaisseur de cet étage varie de 100 à 150 mètres.

- **Le Vraconien :**

C'est une zone de passage entre l'Albien sableux et le Cénomanién argilo carbonaté. Le Vraconien est constitué principalement d'une alternance irrégulière de niveaux argilo dolomitiques. On montre aussi des argiles sableuses et de rares passées de grès ; à ciment calcaire.

Dans la zone étudiée, l'épaisseur de cet étage varie entre 250 et 300 mètres. En raison de l'importance de ses niveaux argileux, il constitue une importante couverture de l'Albien.

- **Le Cénomanién :**

Cet étage est constitué par une alternance de dolomies, de calcaires dolomitiques, de marnes dolomitiques, d'argiles et d'anhydrites. Il joue le rôle d'un écran imperméable.

Sa limite inférieure est caractérisée par l'apparition d'évaporites et de dolomies qui la distingue nettement, quant à la limite supérieure, elle est caractérisée par l'apparition d'évaporites et de calcaires correspondants à la limite inférieure du Turonien.

- **Le Turonien :**

C'est la base du complexe terminale. Il est généralement carbonaté et constitué par des calcaires dolomitiques et des dolomies micro cristallines compactes avec des intercalations de calcaires Turoniens et parfois de marnes.

Les forages de la région montrent que son épaisseur varie d'un endroit à un autre, elle dépasse parfois 650 mètres.

- **Le Sénonien :**

La plupart des régions du Sahara algérien possède un Sénonien formé de deux ensembles très différents du point de vue faciès : l'un correspond au Sénonien lagunaire situé à la base et l'autre au Sénonien carbonaté au sommet.

1. **Le Sénonien lagunaire :**

La limite de ce sous étage est bien distinguée. Ce Sénonien est caractérisé par un faciès évaporé avec des argiles où ces derniers sont aisément différenciés de ceux du Turonien.

En plus, il contient des anhydrites, des calcaires dolomitiques d'argiles et surtout des bancs de sel massif dont l'épaisseur avoisine 150 mètres. La limite supérieure de cette formation est représentée par le toit de la dernière intercalation anhydride.

2. Le Sénonien carbonaté :

Ce second sous étage est constitué par des dolomies, des calcaires dolomitiques avec des intercalations marno-argileuses et en grande partie par des calcaires fissurés. Son épaisseur dépasse parfois les 300 mètres.

Il est à noter qu'il existe une continuité lithologique entre le Sénonien carbonaté et l'Eocène, qui présentent des calcaires de même nature avec présence de nummulites.

V. 2. 2. Formations de l'ère Tertiaire :

- **L'Eocène :**

Il est formé par des sables et des argiles, et parfois des gypses et des graviers.

Dans la région d'étude, l'Eocène est carbonaté à sa base, tandis que le toit est marqué par des argiles de type lagunaire. L'épaisseur de cet horizon varie entre 150 et 200 mètres.

- **Le Miopliocène :**

Il repose en discordance indifféremment sur le Primaire d'une part et sur le Crétacé inférieur, le Turonien, le Cénomaniens et l'Eocène d'autre part, il appartient à l'ensemble appelé communément Complexe Terminale (CT).

La plupart des coupes de sondages captant cet horizon, montrent que le Miopliocène est constitué par un empilement de niveaux alternativement sableux, sablo argileux avec des intercalations gypseuses et des passées de grès.

Sur toute l'étendue du Sahara oriental, Bel et Demargne séparent cet horizon en 4 niveaux :

1. Niveau argileux :

Il est peu épais et existe uniquement dans la zone centrale du Sahara oriental. Avec l'Eocène lagunaire, les argiles de la base du Miopliocène constituent une barrière peu perméable entre les nappes du Sénono-Eocène carbonatées et celle du Pontien sableux.

2. Niveau grès sableux :

Il présente une grande importance sur le plan hydrogéologique, c'est à ce niveau que se rattache le principal horizon aquifère du Complexe Terminal. Son épaisseur reste presque régulière sur toute l'étendue du Sahara oriental. Sa composition varie de sa base à son sommet ; à sa partie inférieure on trouve parfois des graviers alors que la partie supérieure se charge progressivement d'argiles.

3. Niveau argileux :

C'est un niveau sans intérêt hydrogéologique, il renferme des lentilles sableuses qui peuvent former le quatrième niveau (sableux) du Miopliocène.

4. Niveau sableux :

Ce niveau constitue le deuxième horizon aquifère du complexe terminal, du point de vue hydrogéologique, ces niveaux sableux présentent un grand intérêt car ils correspondent à la nappe des sables du Complexe Terminal.

V. 2. 3. Formations du Quaternaire :

Ce sont des dunes de sable dont le dépôt se poursuit encore de nos jours. Les terrains quaternaires représentent la couverture superficielle qui se localisent surtout au niveau des dépressions et couvrent la plus grande extension au niveau du bas Sahara, ils sont formés d'un matériel alluvial et éolien d'où on trouve la formation des alluvions sableuses et argileuses.

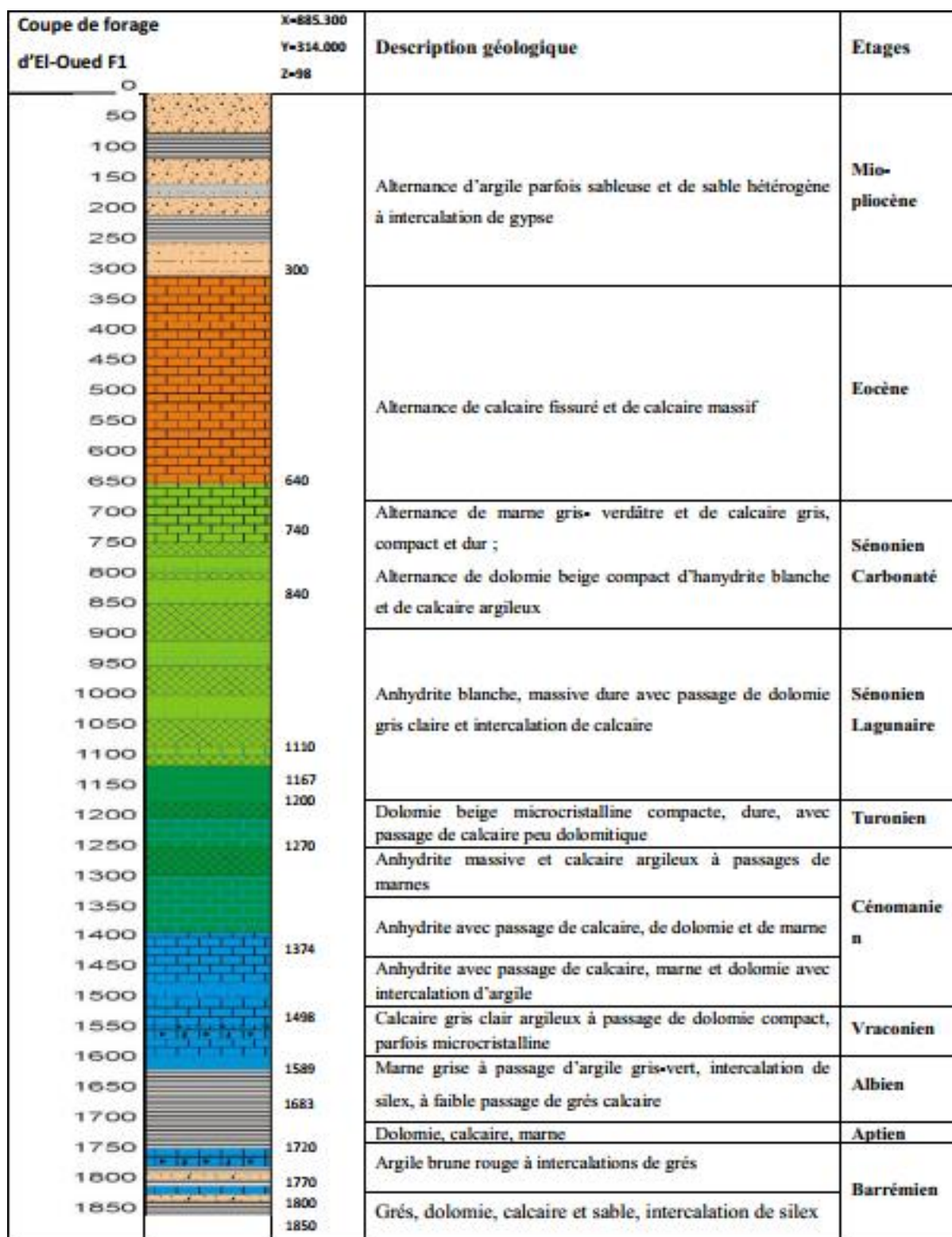


Fig. I. 3 : Log stratigraphique du Forage F1 dans l'Albien (ANRH, 1993)

V. 3. Géomorphologie :

Le sous-sol présente des contrastes frappants. C'est ainsi qu'au Sud, à 6 kilomètres d'El-Oued et jusqu'à El-Ogla 24 Km plus loin, on remarque l'absence totale de (Tefza) (pierre à plâtre calcaire), tandis que sur un autre axe allant de El-Oued à Ghamra (en passant par Tiksebt, Kouinine et Guemar) la (Tefza) y occupe tout le terrain.

Ainsi deux bandes de terrains sédimentaires, de formations différentes, renfermant des roches dissemblables dont dépend de la qualité de la nappe aquifère, prolongent de part et d'autre sur les principaux axes du Souf.

Une coupe dans le sol, montre la présence de :

V. 3. 1. Tercha :

Formé de fins cristaux qui lui donnent un aspect de grès ; se rencontre en plaques continues ou en bancs extrêmement durs, il est composé de cristaux en fer.

V. 3. 2. Louss :

Le Louss est fait de cristaux de gypse en fer de lames imbriqués, il se rencontre sous forme de couches continues, très dures de réseaux mélangés au sable, de bancs isolés ou de colonnes qui semblent être constituées autour d'anciennes racines gypseuses.

V. 3. 3. Salsala ou Smida :

Se trouve en plaques continues ou en bancs extrêmement durs, il est composé de cristaux en fer comme le Louss, mais c'est plus fins et plus serrés.

V. 3. 4. Tefza :

C'est un grès blanc assez dur, et constitue la pierre à chauffer qui donnera le plâtre. (Tercha, Louss, Salsala, Smida et Tefza sont les appellations locales, utilisés pour les différentes couches géologiques).

V. 4. Interprétation des coupes :

L'établissement des coupes a pour but, d'établir une corrélation lithologique du sous-sol, ainsi que d'identifier l'extension géographique, l'épaisseur approximative de la nappe et l'épaisseur utile des couches.

- **Coupe N° 1 :**

Cette coupe est faite sur la base des coupes de forages, elle est orientée selon l'axe N-S. On remarque que l'épaisseur du Miopliocène diminue dans le sens étudié. Au niveau H₁₁¹⁰⁴, on remarque l'absence des formations quaternaires représentées par des sables ; cette lacune ne peut être expliquée que par l'effet d'une érosion, ces formations tendent à s'épaissir vers le Sud. (Fig. I. 4).

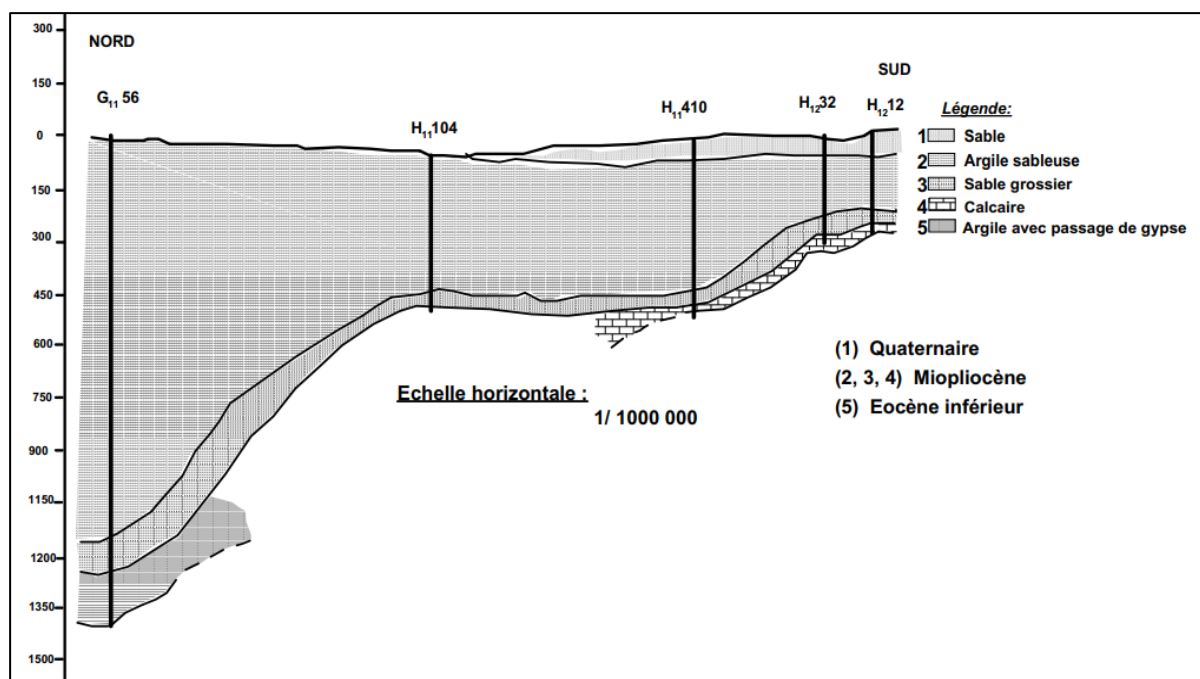


Fig. I. 4 : Coupe Géologique N°01 (ANRH, 1989)

- **Coupe N° 2**

La coupe N° 2 orientée du NE vers le SW, en allant de la région dite Merzaga vers Ourmès, on remarque au niveau du forage (H₁₂⁵²), l'absence du Quaternaire du fait de l'érosion éolienne. Les formations Miopliocènes sont caractérisées par une épaisseur considérable (plus de 200 m). Cette dernière devient régulière sur tout le reste de la région, au contraire de celle de Quaternaire dont les sables changent d'une région à l'autre (Fig. I. 5).

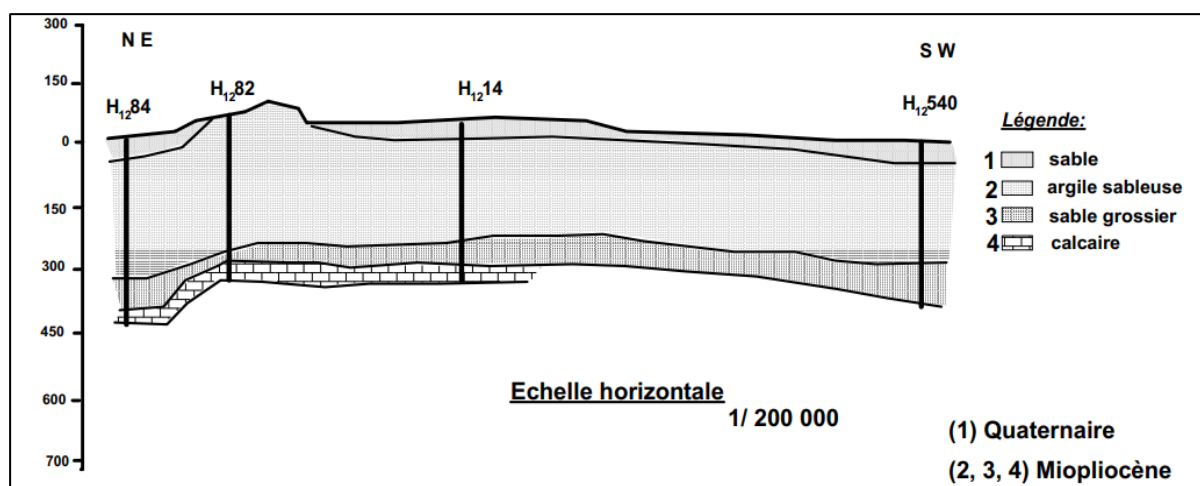


Fig. I. 5 : Coupe géologique N°02 (ANRH, 1989)

- **Coupe N° 3 :**

La coupe N° 3 est orientée du NO vers le SE, elle est différente des autres surtout du point de vue stratification ; cette dernière entre croisée, ce qui donne naissance à des "biseautages". Cette situation est bien visible dans les quatre premiers forages. On constate

que l'épaisseur des formations quaternaires, est plus importante au Nord-Ouest qu'au Sud-Est. (Fig. I. 6).

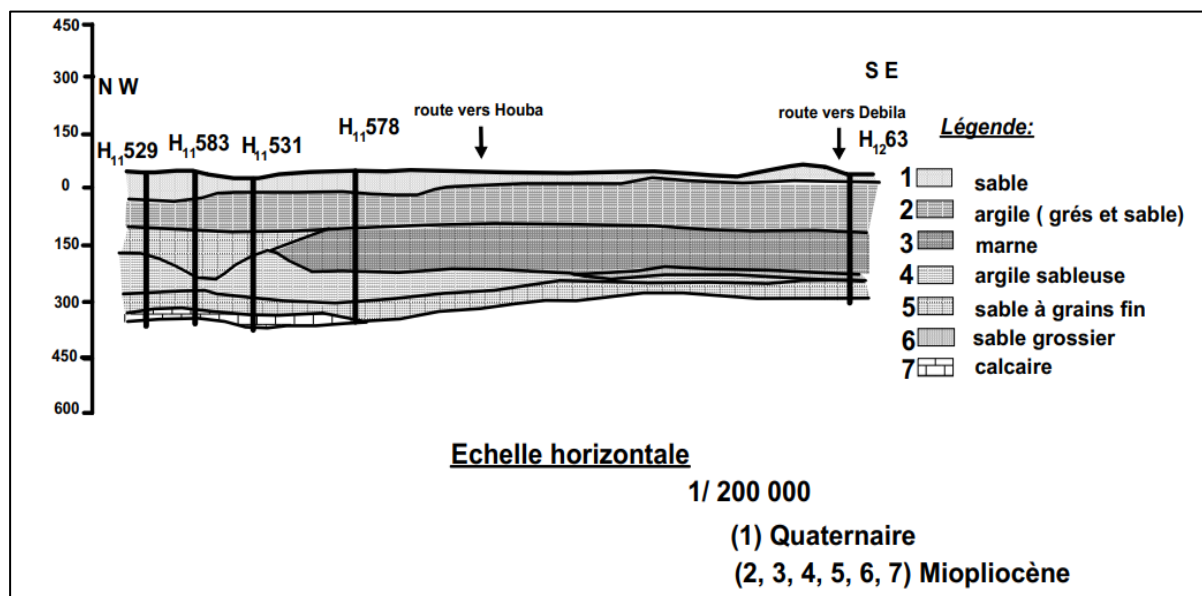


Fig. I. 6 : Coupe géologique N°03 (ANRH, 1989)

V. 5. Tectonique :

Le bassin sédimentaire, vaste zone d'épandage, constitue une importante dépression topographique sous-tendue par une cuvette structurale en forme de synclinal dissymétrique. La série sédimentaire est marquée, au centre de la fosse, par d'importants accidents tectoniques sub-verticaux.

La série sédimentaire lagunaire recouvrant la plate-forme crétacé forme un vaste synclinal dont le fond a un très grand rayon de courbure. Les courbes sédimentaires semblent s'épaissir du Nord d'El-Oued vers le centre de cette dépression, ce qui montre que l'approfondissement suit de près la sédimentation. Donc, il faut noter qu'au cours de la jeunesse de l'immense dépression au début du Quaternaire et sous l'effet de la sédimentation, le centre de celle-ci (dépression) se déplace en fonction du temps vers le Nord tout en donnant naissance à des nouvelles dépressions correspondant actuellement à la zone des chotts, où leur naissance ne s'est effectuée qu'à la fin du Quaternaire.

Ces caractéristiques ont favorisé la formation dans le Souf et dans tout le bas Sahara de plusieurs formations aquifères à comportement hydrodynamique variable en fonction de leurs faciès.

L'aquifère Quaternaire du Souf présente une épaisseur moyenne de 40 mètres. Son substratum est structuré en de nombreuses dépressions, dômes et sillons. Il affleure au NO de la région de Foulia et se situe à moins de 10 mètres de profondeur aux extrémités NE de la

région d'étude. La série sédimentaire lagunaire recouvrant la plate-forme crétacée forme un vaste synclinal dont le fond est doté d'un très grand rayon de courbure.

VI. CONCLUSION :

Après avoir montré les caractéristiques géologiques de la région d'étude, la relation entre la tectonique et la lithologie régionales est devenue valide. Ce sont ces conditions tectoniques et paléogéographiques qui ont permis le développement d'une lithologie variée dans le temps, régulière et homogène dans l'espace.

La caractérisation de la formation géologique de chaque étage et de sa composition rocheuse a expliqué cette relation ; les conditions précédemment vues ont favorisé la formation dans le Souf, ainsi que dans tout le bas Sahara de plusieurs formations aquifères à comportement hydrodynamique variable en fonction de leurs faciès. La stratigraphie de la région est caractérisée par des séries sédimentaires allant de Crétacé inférieur jusqu'au dépôts de Quaternaire.

Ainsi, les formations du Quaternaire récentes forment l'aquifère détritique de la nappe phréatique, il est surtout sableux à gréseux avec parfois du gypse et des argiles localisées particulièrement dans la partie N-E où il se termine par une croûte gypseuse, son substratum est argileux imperméable parfois très peu sableux à son sommet ou alors gypsifère en totalité.

Chapitre II

Hydroclimatologie

I. INTRODUCTION :

Le climat joue un rôle essentiel dans la morphologie du relief, sur la végétation, la genèse et le type de sols et sur les activités agricoles.

Le climat algérien est caractérisé par sa grande variabilité de précipitations et des températures annuelles, cette variation est due essentiellement aux irrégularités topographiques et aux influences opposées de la Méditerranée et du Sahara.

De ce fait, l'Algérie se trouve partagée en trois zones climatiques distinctes, la première avec un climat méditerranéen au Nord, la seconde semi-aride vers l'intérieur du pays dans les hauts plateaux et enfin la troisième avec un climat aride, caractéristique du grand Sahara, dont la zone d'étude en fait partie.

Dans ce chapitre, on va analyser les facteurs climatiques et ressortir les régimes pluviométriques à savoir la période humide et la période sèche et le type de climat caractérisant la région d'étude.

Pour réaliser une étude détaillée sur les paramètres climatiques de la région, une station correspondant a été sélectionnée : station climatique de l'ONM (Office National Météorologique) de Guemar.

Les caractéristiques géographiques de cette station sont :

- Code ANRH : 13 04 14.
- Altitude : 64m.
- Longitude : 06°47'E.
- Latitude : 33°30'N.

II. ETUDE DES PARAMETRES CLIMATIQUES :

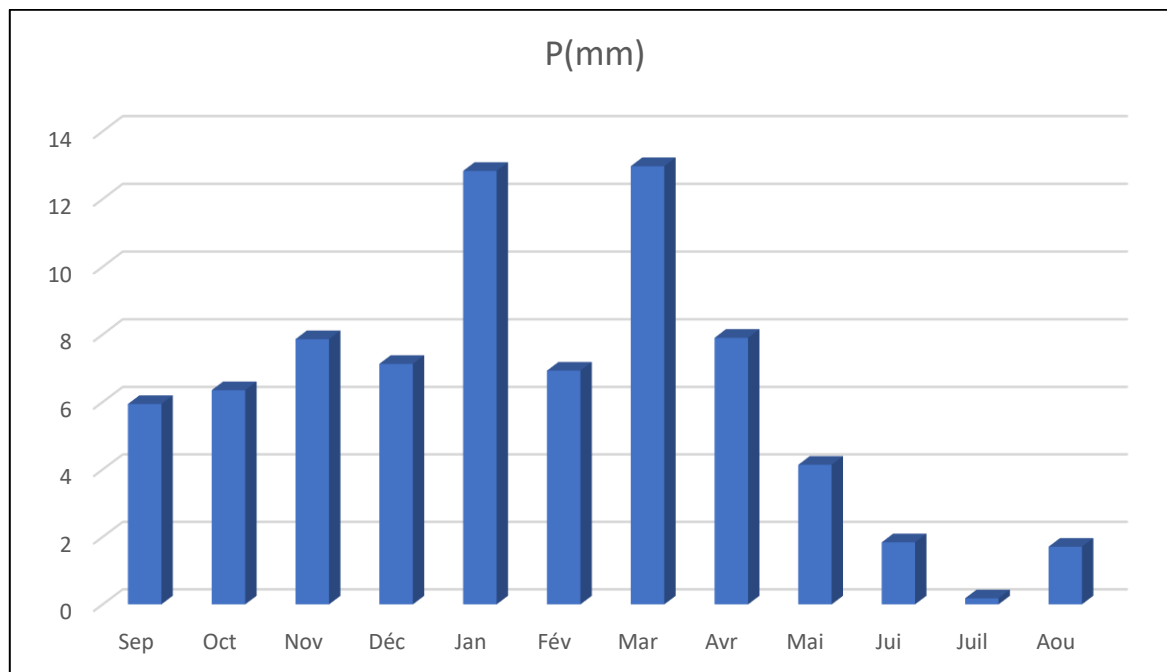
II. 1. Les précipitations :

Ce paramètre climatique désigne des cristaux de glace ou des gouttelettes d'eau qui, ayant été soumis à des processus de condensation et d'agrégation à l'intérieur des nuages, sont devenus trop lourds pour demeurer en suspension dans l'atmosphère et tombent au sol. En effet, c'est un facteur fondamental pour caractériser le climat d'une région. L'étude de la pluviométrie aura pour but d'évaluer la lame d'eau tombée sur l'ensemble du bassin versant et son influence sur l'alimentation des nappes ainsi que son rôle dans le comportement hydrodynamique et hydrochimique des eaux souterraines.

Le tableau (II. 1) ci-dessous donne les précipitations moyennes mensuelles observées durant la période (1978-2013).

Tab. II. 1 : Les précipitations moyennes mensuelles (1978-2013)

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	MPC
P(mm)	5.94	6.35	7.86	7.13	12.83	6.93	12.97	7.9	4.14	1.84	0.18	1.71	75.78

**Fig. II. 1 : Diagramme de précipitations moyennes mensuelles (1978-2013)**

Ce diagramme présente une variabilité des précipitations dans le temps, où la pluviométrie maximale est de l'ordre de 12.97mm enregistré pendant le mois de mars, et le minimum est de l'ordre de 0.18mm enregistré pendant le mois de juillet, la précipitation annuelle est 75.78mm.

II. 2. La température :

Il s'agit d'un paramètre majeur qui influence le climat d'une région. Les températures moyennes mensuelles et annuelles régissent directement, en interaction avec les autres facteurs météorologiques (les précipitations, l'insolation, l'hygrométrie...etc.), le phénomène d'évaporation et par la même, le déficit d'écoulement annuel et saisonnier.

C'est donc cet effet caractéristique du régime thermique qui nous intéresse spécialement d'autant plus que l'évapotranspiration atteint des valeurs importantes dans notre région.

La température dans la région d'étude est constamment variable, avec des écarts qui dépassent parfois 20°C entre la nuit et le jour.

A l'ombre, les minimaux de températures progressent régulièrement de 3°C à 25°C, alors que les maximaux de 15°C à 40°C et c'est selon la durée de l'ensoleillement. Ces valeurs sont élevées entre le début du mois de janvier et la fin du mois de Juillet.

Le tableau (II. 2) ci-dessous donne les valeurs de la température moyenne mensuelle observées durant la période (1978-2013).

Tab. II. 2 : La température moyennes mensuelles (1978-2013)

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	Moy
T(°C)	28.84	22.27	15.75	11.03	10.43	12.81	16.38	20.19	25.28	30.09	32.84	32.78	21.56

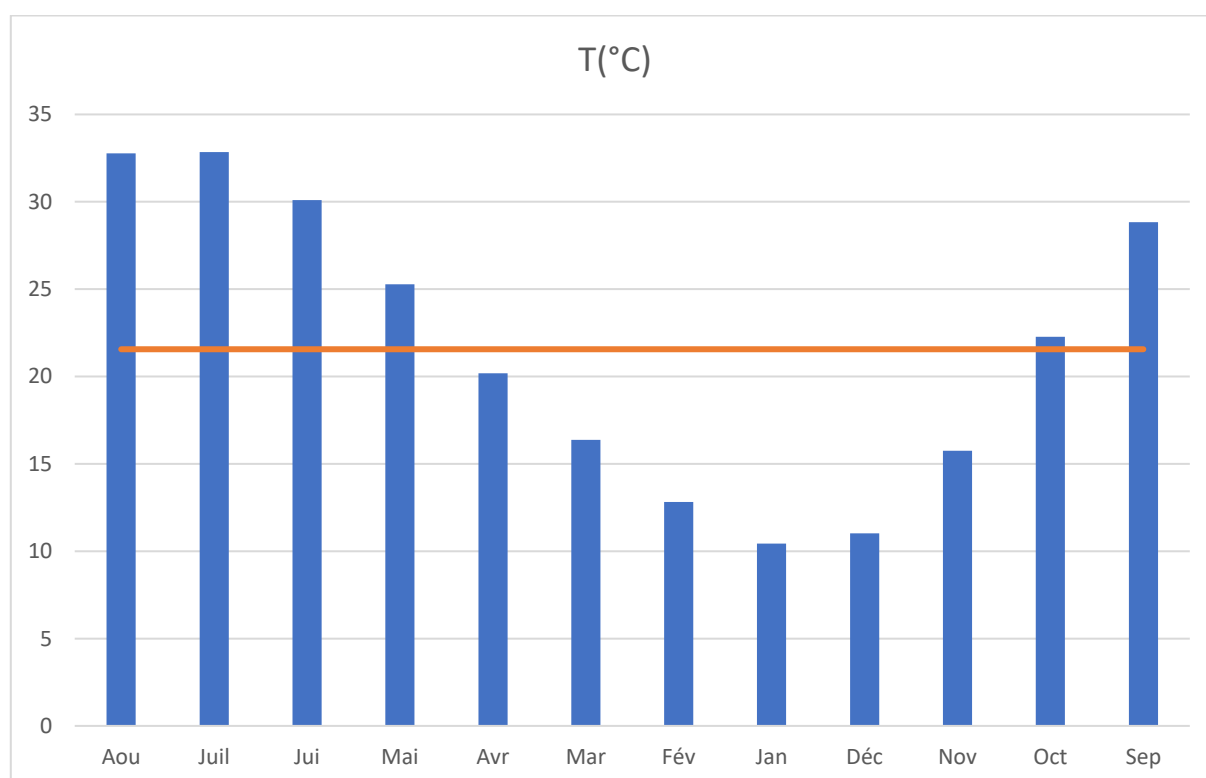


Fig. II. 2 : Diagramme de températures moyennes mensuelles (1978-2013)

Ce diagramme montre une variabilité de température dans le temps sur une période de 35 ans : La période qui s'étale du mois de novembre au mois d'avril correspond à la période froide avec un minimum durant le mois de janvier 10.43°C, alors que la période chaude commence à partir du mois de mai jusqu'au mois de septembre avec un maximum de température relevé pendant le mois d'août 32.78°C, la moyenne annuelle est de l'ordre de 21.56°C.

II. 3. Synthèse climatique :

La combinaison des données des précipitations et celles des températures permet de mettre en évidence :

- Les périodes sèches et humides au cours de l'année grâce au diagramme pluviothermique de Gaussen.
- Le domaine climatique ou le type de climat suivant la méthode d'Emberger et/ou le calcul de l'indice d'aridité.

II. 3. 1. Indice d'aridité :

Cet indice permet d'identifier le type de climat dans la région d'étude à l'aide de la formule de De Martonne :

$$I = \frac{P}{10 + T} \dots \dots (1)$$

Avec :

I : indice d'aridité.

P : précipitation moyenne mensuelle (mm).

T : température moyenne annuelle (°C).

▪ Application numérique :

P = 75.78 mm

T = 21.56 °C

Donc :

$$I = \frac{75.78}{10 + 21.56}$$

$$I = 2.40$$

Tab. II. 3 : Classement en fonction de l'indice d'aridité (selon De Martonne)

Valeur de l'indice d'aridité	Type de climat
$I < 05$	Climat hyper aride
$05 < I < 07.5$	Climat steppique
$07.5 < I < 10$	Climat semi-aride
$10 < I < 20$	Climat hyper aride
$20 < I < 30$	Climat tempéré
30	Climat humide

$I = 2.40 < 05$, Ce qui confirme que la région de Souf est caractérisée par un climat hyper aride.

II. 3. 2. Diagramme pluviothermique :

Pour accéder à la détermination de la période sèche et celle humide caractéristiques de la zone étudiée, on peut établir la courbe pluviothermique. Celle-ci se base sur les données des précipitations et des températures mensuelles sur la même période d'observation.

Par définition, un mois sec présente un total moyen des précipitations inférieur ou égale au double de la température moyenne du même mois. En effet, cette relation permet d'établir un diagramme pluviothermique sur lequel les températures sont portées à une échelle double des précipitations (in Baygnons).

Une période est considérée déficitaire en eau lorsque les températures correspondantes passent au-dessus de la courbe des précipitations. Dans le cas contraire où la courbe des précipitations passe au-dessus de celle des températures, la période correspondante est humide.

Tab. II. 4 : Couples température/ précipitation moyennes mensuelle.

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou
2T(°C)	57.68	44.54	31.5	22.06	20.86	25.62	32.76	40.38	50.56	60.18	65.68	65.56
P(mm)	5.94	6.35	7.86	7.13	12.83	6.93	12.97	7.9	4.14	1.84	0.18	1.71

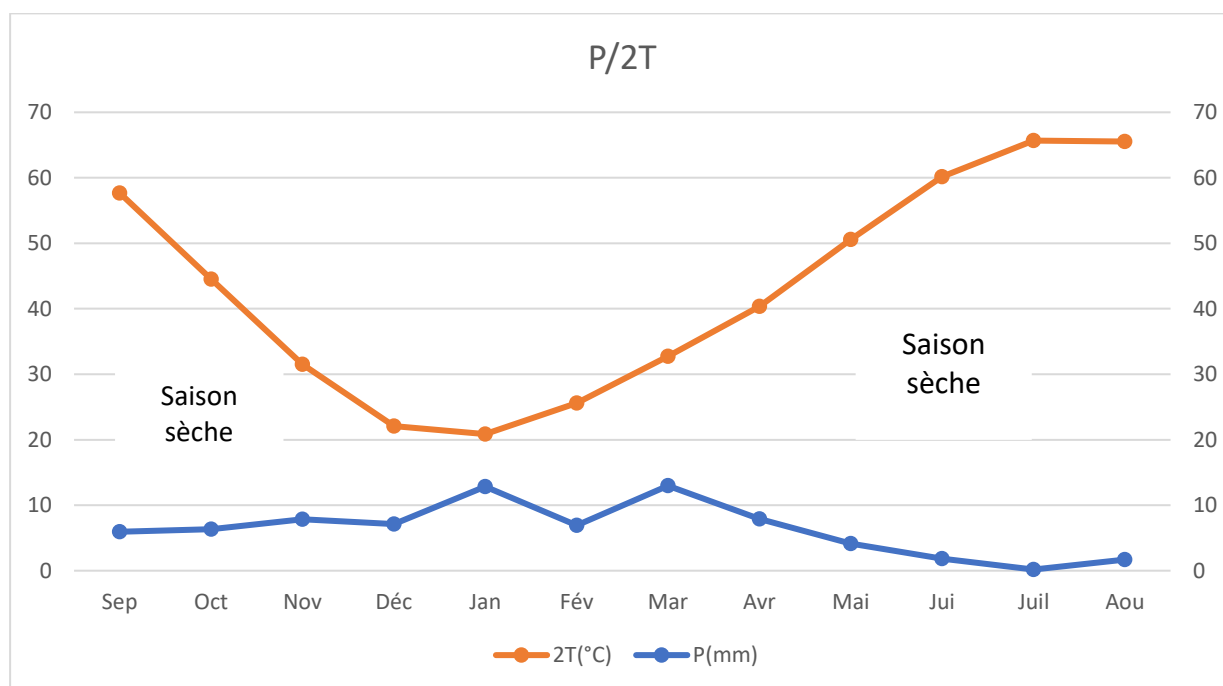


Fig. II. 3 : Courbe pluviothermique (1978-2013)

A partir de ce diagramme et des définitions déjà citées, on constate que l'année hydrologique de la région d'étude est caractérisée uniquement par une période sèche et ne

présente pas des périodes humides, même pour le mois de janvier qui est marqué par la température la plus basse (10.43°C) et le mois de mars par la précipitation la plus élevée (12.97mm).

La détermination de cette période a une importance primordiale pour les besoins en eau d'irrigation.

II. 4. L'humidité :

L'humidité est un état de climat qui représente le pourcentage de l'eau existant dans l'atmosphère, elle a des effets sur les altérations chimiques telles que l'oxydation.

Le tableau suivant donne les valeurs d'humidité relative moyenne, observées durant la période de (1990-2013).

Tab. II. 5 : Humidité relative moyenne mensuelle (1990-2013)

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	Moy
HR%	46.93	52.72	60.04	66.81	65.87	56.22	49.49	43.43	38.5	34.74	31.9	34.63	48.44

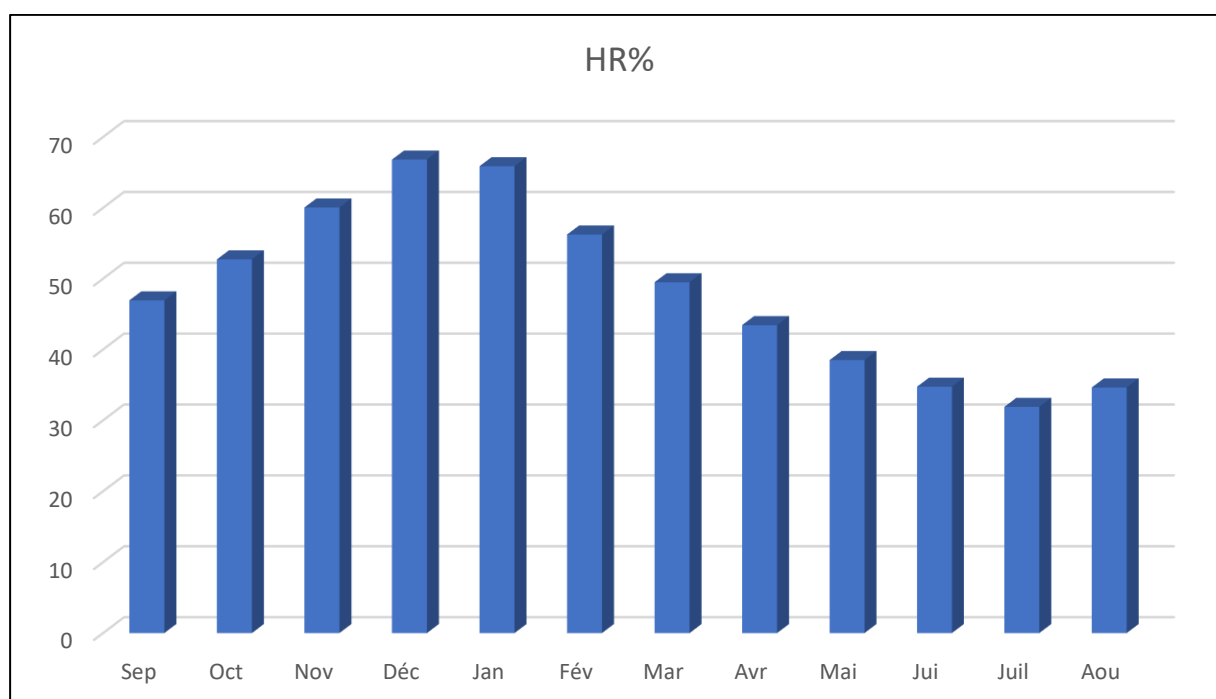


Fig. II. 4 : Diagramme de l'humidité relative moyenne mensuelle (1990-2013)

Le diagramme (Fig. II. 4) permet de distinguer les mois secs des mois relativement humides. On remarque grâce à ces valeurs que (HR > 50%) les mois humides sont janvier, février, octobre, novembre, décembre et les mois secs caractérisant le reste de l'année.

L'humidité moyenne de la région représentée dans le tableau, où on remarque un minimum enregistré pendant le mois de juillet avec une valeur de l'ordre de 31.9 %, c'est la saison d'été, et un maximum enregistré pendant le mois de décembre avec une valeur de 66.81 %, c'est la saison d'hiver.

II. 5. L'évaporation :

Le tableau suivant (II. 6) porte les valeurs moyennes mensuelles de l'évaporation durant la période (1990-2013). L'évaporation la plus élevée se produit en mai, juin, juillet et août, et la plus faible en janvier. En moyenne elle est de 47.38 mm par an.

Tab. II. 6 : L'évaporation moyenne mensuelle (1990-2013)

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	EMC
EVAP(mm)	46.3	42	37	32.5	31	34.5	45.5	52	59.4	67.7	66.1	54.6	47.38

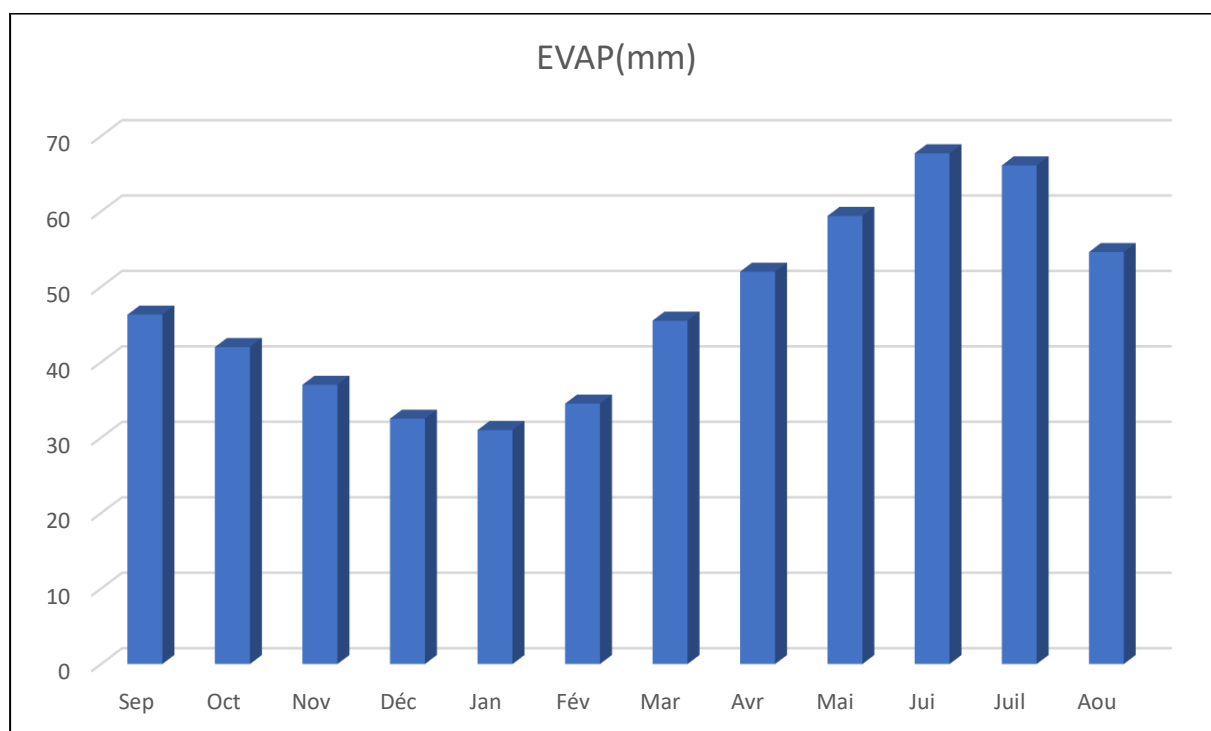


Fig. II. 5 : Diagramme de l'évaporation moyenne mensuelle (1990-2013)

II. 6. Le vent :

Les vents sont fréquents, les plus violents se situent au printemps. La direction dominante est Nord-Est, à l'exception des mois d'hivers dont la direction est Sud-Ouest. Le sirocco (Chihili) présente le vent caractérisant la saison d'été souffle fréquemment dans la région, prenant un sens Sud-Nord et jeter des courants d'air chaud parfois avoisiner des vagues de sables. Il faut aussi parler des vents de sables qui ont leurs saisons de prédilection

entre février et avril (durant le printemps). Mais heureusement, les véritables tempêtes restent très rares.

On remarque qu'au printemps les vents sont les plus forts dominés par le vent d'Est communément appelé "El-Bahri".

Ce dernier souffle principalement pendant la période qui s'étale d'Avril à Juillet. En été, il apporte de la fraîcheur, mais il est peu apprécié au printemps car il donne naissance au vent de sable et retarde la floraison des cultures locales tel que le tabac et le palmier.

Ces vents de sable donnent au ciel une couleur jaune et peuvent durer jusqu'à trois jours consécutifs avec une vitesse moyenne de 30 à 40 km/h.

La vitesse moyenne des vents enregistrée pour la période de (1990-2013) est reportée sur le tableau (II. 7).

Tab. II. 7 : Les vitesses du vent moyennes mensuelles (1990-2013)

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	Moy
Vent (m/s)	2.2	1.69	1.6	1.56	1.83	2.34	2.85	3.08	3.07	2.92	2.45	2.17	2.31

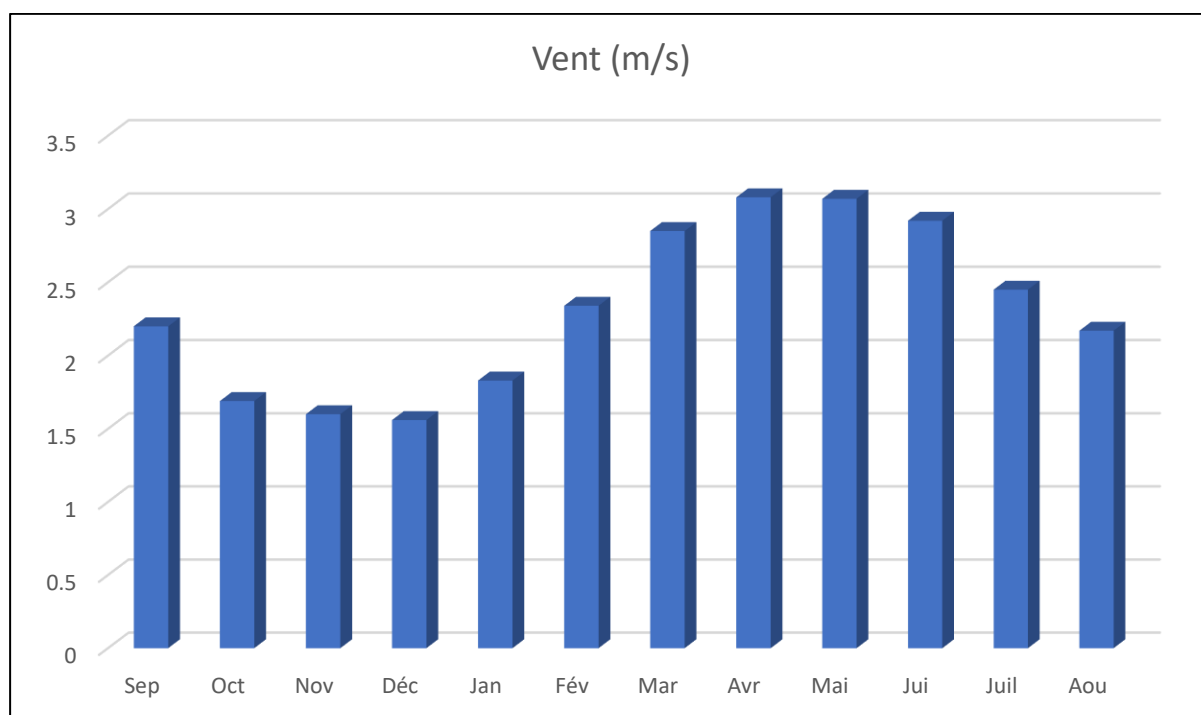


Fig. II. 6 : Diagramme des vitesses du vent moyennes mensuelles (1990-2013)

D'après le tableau et le diagramme précédents on peut remarquer que la vitesse du vent moyenne oscille entre 1.56 m/s enregistrée durant le mois de décembre et 3.08 m/s pour le mois d'avril, les vitesses du vent moyennes annuelles est 2.31 m/s.

II. 7. L'insolation :

Encore appelée radiation solaire globale, correspond à la période durant laquelle le soleil peut briller. C'est un paramètre dont la détermination est facile par des mesures directes ou par dépouillement des bandes héliographiques.

Tab. II. 8 : Répartition moyenne mensuelle d'insolation (1990-2013)

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	Moy
Ins (h)	228	274.4	257.2	233.6	240.2	248.6	276.5	288.6	307.5	345.9	351.9	331.7	282

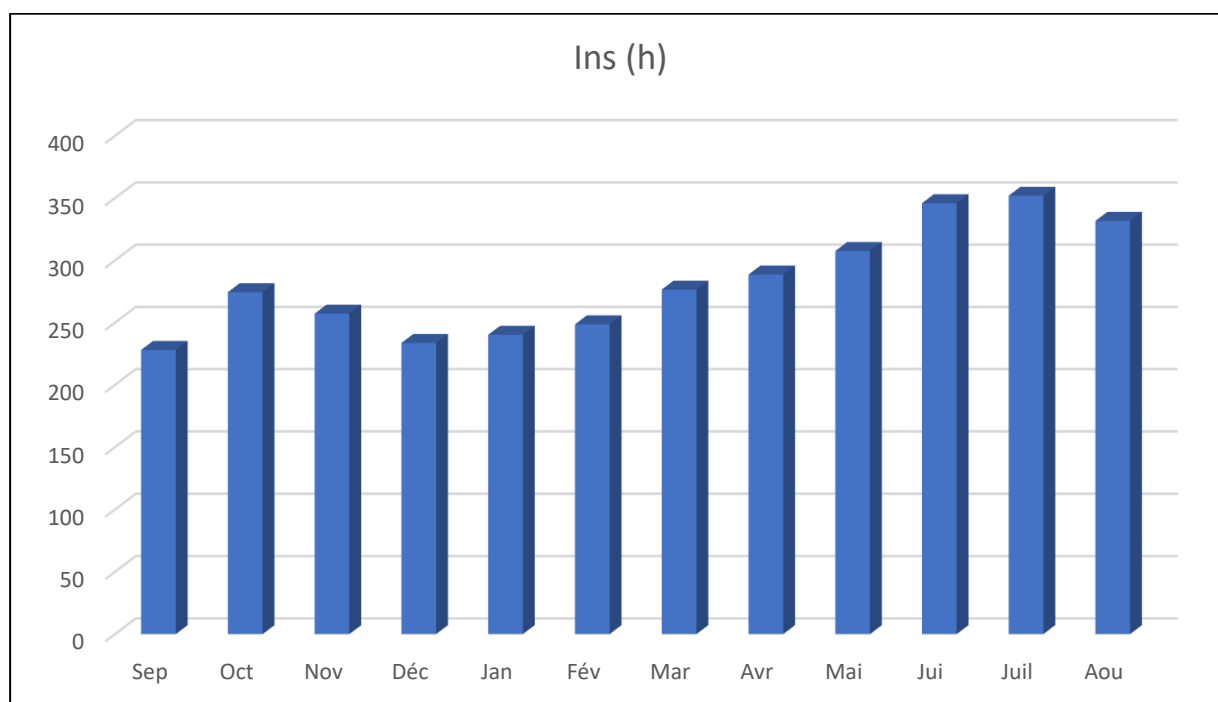


Fig. II. 7 : Diagramme de l'insolation moyennes mensuelles (1990-2013)

La répartition des moyennes mensuelles d'insolation nous permet de constater que la brillance du soleil est maximum au cours du mois de juillet avec une moyenne de 351.9 heures, et le minimum est enregistré pendant le mois de septembre avec une moyenne de 228 heures.

Dans la région, le rayonnement solaire est excessif (le moyen annuel est de 282 h/ans) ce qui se traduit par un pouvoir évaporant élevé.

III. CALCUL DES PARAMETRES DU BILAN HYDRIQUE :

III. 1. Evapotranspiration ou déficit d'écoulement :

La connaissance du bilan hydrique d'une région consiste à évaluer la répartition des précipitations entre l'écoulement, l'infiltration et l'évaporation.

L'évapotranspiration est définie comme étant une restitution de l'eau sous forme de vapeur de la surface terrestre à l'atmosphère. Ce concept englobe aussi bien la lame d'eau évaporée à partir du sol que celle transpirée par les plantes. Elle est donc un élément très important pour l'établissement du bilan hydrique et dépend des plusieurs paramètres : la température, les précipitations, l'humidité de l'air, le couvert végétal.

III. 1. 1. Calcul l'évapotranspiration :

L'évapotranspiration potentielle présente la quantité d'eau pouvant être restituée à l'atmosphère par transpiration des êtres vivants et évaporation du sol et des surfaces d'eaux libres, si celui-ci contient en permanence la quantité d'eau suffisante. Quant à l'évapotranspiration réelle (ETR), elle correspond à la quantité d'eau effectivement transpirée et évaporée.

On utilise la méthode de Thornthwaite pour le calcul de l'évapotranspiration potentielle (ETP) et cette dernière avec la formule de Turc pour estimer l'évapotranspiration réelle (ETR).

a. L'évapotranspiration potentielle (ETP) :

Elle est exprimée par la relation de Thornthwaite :

$$ETP = 16 k \times \left(\frac{10T}{I} \right)^a \dots \dots (2)$$

Avec :

ETP : évapotranspiration potentielle (mm).

T : température moyenne mensuelle de l'air (°C).

I : Indice thermique annuel: $I = \sum i$

i : Indice thermique mensuel: $i = \left(\frac{T}{5} \right)^{1.514}$

a : constant: $a = \left(\frac{1.6}{100} \right) I + 0.5$

k : coefficient de correction, qui dépend du temps et de la latitude.

Les résultats sont portés sur le tableau suivant :

Tab. II. 9 : Résultats de l'ETP issus de l'application de la formule de Thornthwaite (1978-2013)

Mois	T (°C)	i	K	ETP (mm)
Septembre	28.84	14.19	1.03	140.79
Octobre	22.27	9.59	0.97	72.22
Novembre	15.75	5.68	0.88	29.03
Décembre	11.03	3.31	0.86	12.28
Janvier	10.43	3.04	0.88	11.02
Février	12.81	4.15	0.86	17.45
Mars	16.81	6.27	1.03	39.59
Avril	20.19	8.27	1.09	64.45
Mai	25.28	11.62	1.19	119.35
Juin	30.09	15.13	1.2	181.23
Juillet	32.84	17.28	1.22	226.28
Aout	32.78	17.23	1.15	212.39
Total	259.12	115.76	-	1190.67

b. l'évapotranspiration réelle (ETR) :

Pour le calcul de l'ETR, nous appliquerons plusieurs méthodes, mais l'ETR s'écarte plus ou moins de l'ETP, selon le climat et la nature de la surface évaporant

• **Méthode de Thornthwaite :**

Pour le calcul de l'évapotranspiration réelle, on utilise cette méthode, où on distingue deux cas principaux :

1. Si $P - ETP > 0$; c'est-à-dire : $P > ETP$, dans ce cas $ETR = ETP$.

2. Si $P - ETP < 0$; c'est-à-dire : $P < ETP$, ce cas est subdivisé encore en deux cas :

a. Si $P + RFU > ETP \Rightarrow ETR = ETP$.

b. Si $P + RFU < ETP \Rightarrow ETR = P + RFU$.

Les résultats des calculs sont résumés dans les tableaux (II. 10).

• **Formule de Turc :**

C'est une méthode empirique qui se base sur de nombreuses données hydrologiques, cette expression est la suivante :

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}} \dots \dots (3)$$

ETR : L'évapotranspiration réelle annuelle en (mm).

P : précipitation moyenne annuelle en (mm).

L : paramètre exprimant le pouvoir évaporant de l'atmosphère, il a pour expression :

$L = 300 + 25t + 0.05t^3$ d'où T est la température moyenne annuelle en °C.

▪ **Application numérique :**

On a :

$P = 75.78\text{mm}$

$T = 21.56^\circ\text{C}$

Donc :

$$L = 300 + 25 \times 21.56 + 0.05 \times (21.56)^3$$

$$L = 1,340.09$$

Donc :

$$\text{ETR} = \frac{75.78}{\sqrt{0.9 + \frac{75.78^2}{1340.09^2}}}$$

$$\text{ETR} = 79.74\text{mm}$$

III. 2. La réserve facilement utilisable (RFU) :

Elle présente la quantité d'eau emmagasinée dans la couche pédologique (RFU) qui est facilement utilisable par les plantes et nécessaire pour leur bon fonctionnement physiologique. Son degré de saturation dépend de plusieurs facteurs :

- La nature, la composition lithologique et l'épaisseur de la couche superficielle.
- La profondeur du niveau piézométrique de la nappe aquifère.
- Le climat de la région.
- Le type de la couverture végétale.

On prend $\text{RFU} = 50\text{mm}$, C'est la valeur maximale de la réserve facilement utilisable, mais seulement dans les régions sahariennes (d'après les agronomes de l'Institut National d'agronomie d'Alger).

IV. ETABLISSEMENT DU BILAN HYDRIQUE :

La formule générale du bilan d'eau donne l'égalité des apports et des pertes évaluées sur une grande période.

$$P = \text{ETR} + \text{EX} \dots \dots (4)$$

Avec :

P : Précipitation en (mm).

ETR : la lame d'eau évaporée réellement en (mm).

EX : Excédent (mm).

$$EX = R + I = P - ETP \dots\dots (5)$$

R : ruissellement (mm).

I : infiltration (mm).

Le déficit :

$$DA = ETP - ETR \dots\dots (6)$$

Le tableau (II. 10), résume le calcul du bilan hydrique par la méthode de Thornthwaite pour la station météorologique de Guemar à partir de la pluviométrie et des températures mensuelles.

Tab. II. 10 : Bilan hydrique d'après Thornthwaite (1978-2013)

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	Total
P	5.94	6.35	7.86	7.13	12.83	6.93	12.97	7.9	4.14	1.84	0.18	1.71	75.78
ETP	140.79	72.22	29.03	12.28	11.02	17.45	39.59	64.45	119.35	181.23	226.28	212.39	1126.08
P-ETP	-134.85	-65.87	-21.17	-5.15	1.81	-10.52	-26.62	-56.55	-115.21	-179.39	-226.1	-210.68	-
ETR	5.94	6.35	7.86	7.13	11.02	6.93	12.97	7.9	4.14	1.84	0.18	1.71	73.97
EX	0	0	0	0	1.81	0	0	0	0	0	0	0	1.81
DA	134.85	65.87	21.17	5.15	0	10.52	26.62	56.55	115.21	179.39	226.1	210.68	1052.11
RFU	0	0	0	0	1.81	0	0	0	0	0	0	0	-

Au terme de ce bilan hydrique selon Thornthwaite, nous pouvons dire que :

- L'ETP atteint son maximum au mois de Juillet (226.28 mm) et elle est minimale au mois de Janvier (11.02 mm).
- La constitution de la RFU s'effectue uniquement au mois de Janvier avec une valeur de 1.81 mm et le reste de l'année est épuisée.
- La pluviométrie annuelle dépasse une fois l'évapotranspiration potentielle pendant une année.
- La sécheresse présente la partie prédominante de l'année hydrologique avec une durée de 11 mois de l'année (sauf Janvier).
- Durant toute l'année, il y a un déficit agricole d'où la nécessité d'irriguer.
- L'excédent est presque nul durant toutes les saisons, d'où l'alimentation de l'aquifère ne se fait probablement donc qu'à partir des limites.

V. CONCLUSION :

La synthèse des données climatique sa permis de ressortir les résultats suivants :

- La région d'Oued-Souf est caractérisée par un climat désertique ou hyper aride, avec un été chaud et sec et un hiver plutôt doux.
- Les précipitations sont faibles et irrégulières, de l'ordre de 75.78 mm, et ne jouent généralement aucun rôle dans la recharge directe des nappes, sauf lorsqu'elles sont intenses.
- La température moyenne est de 21.56 °C pour la période (1978-2013), avec un maximum de 32.84 °C au mois de juillet et un minimum au mois de janvier 10.43 °C.
- Les températures sont élevées, 21.56°C en moyenne annuelle et 32.84°C au mois le plus chaud, ce qui explique la forte évaporation. L'humidité relative moyenne annuelle est de 48.44 %.
- Le mois le plus humide est décembre, caractérisé par une forte humidité (moyenne de 66.81 %) et d'un faible rayonnement solaire (moyenne de 233.6 heures), et le mois le plus sec est juillet, caractérisé par une faible humidité (moyenne de 31.9 %).
- La radiation solaire est très élevée (moyenne de 282 heures) dont la brillance du soleil est maximum au cours du mois de juillet avec une moyenne de 351.9 heures ce qui traduit un pouvoir évaporant excessif.
- Les vents sont de direction Est et Nord-Est avec une vitesse pouvant atteindre 40 km/h. C'est le paramètre le plus régulier dans la zone d'étude.
- L'évapotranspiration potentielle calculée par la formule de Thornthwaite nous donne 1,190.67mm pour la période (1978-2013), l'évapotranspiration réelle est de 73.97 mm pour la même période. Elle est de 79.74 mm selon la méthode de Turc. Le déficit est de 1,052.11 mm.

Chapitre III

Hydrogéologie

I. INTRODUCTION :

L'étude hydrogéologique a pour objectif la planification de l'exploitation des ressources en eaux souterraines, ceci après avoir une idée sur la structure et la géométrie de la nappe, les caractéristiques des réservoirs d'eaux souterraines, les modalités de leur écoulement et des conditions aux limites (entrées et sorties d'eau).

Le dimensionnement de la couche mouillée et l'estimation de volume de réservoir nécessitent la mise en évidence :

- Des niveaux piézométriques grâce à la carte piézométrique.
- De la carte de substratum de l'aquifère.
- Des paramètres hydrodynamiques de la nappe (perméabilité, transmissivité, coefficient d'emmagasinement, porosité).

La structure hydrogéologique du système aquifère de la région de Souf pourrait être schématisée de la façon suivante :

- Une nappe libre constituée essentiellement de sables et exploitée par un grand nombre de puits.
- Deux nappes profondes reconnues par les forages profonds (le Continental Intercalaire CI et le Complexe Terminal CT).

II. CADRE HYDROGEOLOGIQUE :

La zone d'étude fait partie du Système Aquifère du Sahara Septentrional (SASS) s'étend sur une vaste zone dont les limites sont situées en Algérie, Tunisie et Libye (fig.III.1), dont l'extension couvre une superficie d'environ 1,000,000 km² (OSS, 2003) et s'étend du Nord au Sud, depuis l'Atlas saharien jusqu'aux affleurements du Tidikelt et du rebord méridional du Tinrhert, et d'Ouest en Est depuis la vallée du Guir-Saoura jusqu'au Graben de Hun en Libye.

Ce système a fait l'objet de plusieurs études depuis les années 1960 (GEOPETROLE, 1964 ; BEL et CUCHE, 1969 ; UNESCO, 1972 ; De Marsily et al., 1978 ; GEOMATH, 1994 ; Besbes et Zammouri, 1988 ; Zammouri, 1990 ; Besbes et al., 2003), qui ont contribué à la description des principales formations aquifères et à la délimitation de leurs extensions.

Ce bassin, vaste zone d'épandage, constitue une importante dépression topographique, laquelle est sous-tendue par une cuvette structurale en forme de synclinal dissymétrique. Il renferme une série de couches aquifères qui ont été regroupées en deux réservoirs, appelés le Continental Intercalaire (CI) et le Complexe Terminal (CT).

Sur la base des rapports OSS (2003), ainsi que les études de Busson (1970) et Fabre (1976), les termes CI et CT sont définies comme suit :

Le terme « Continental Intercalaire » désigne un épisode continental localisé entre deux cycles sédimentaires marins :

- À la base, le cycle du Paléozoïque qui achève l'orogénèse hercynienne.
- Au sommet, le cycle du Crétacé supérieur, résultant de la transgression cénomanienne.

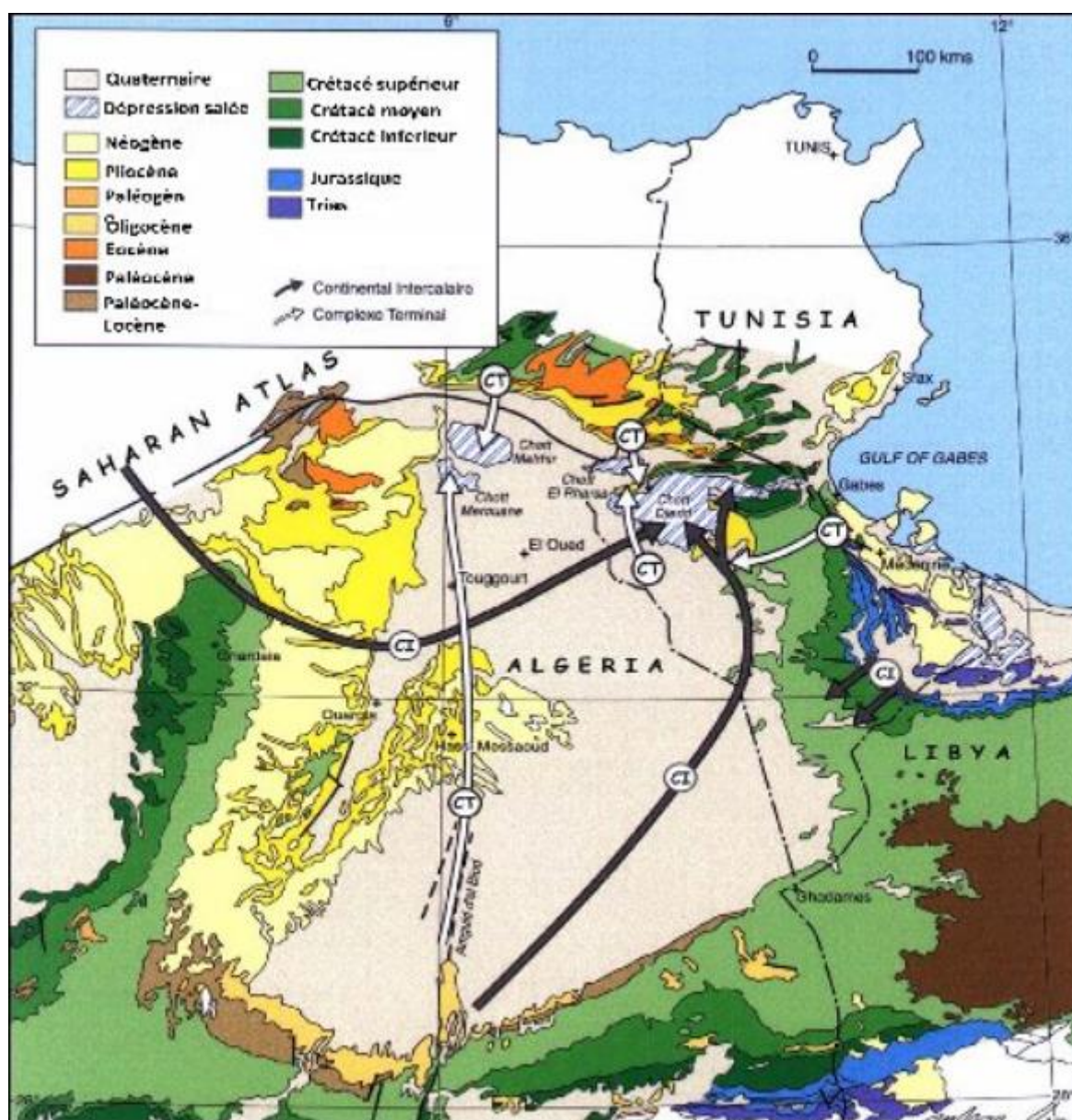


Fig. III. 1 : Carte hydrogéologique du Sahara Septentrional (UNESCO, 1972 modifiée par Guendouz et al, 2003)

Le Complexe Terminal est, quant à lui, un ensemble assez peu homogène incluant des formations carbonatées du Crétacé supérieur et des épisodes détritiques du Tertiaire, principalement du Miocène.

Une coupe schématique orientée Sud-Ouest Nord-Est à travers le Sahara (fig. III. 2) montre la nature et la disposition typique des principales formations du système aquifère du Sahara. Celui-ci comporte, à sa base, des formations paléozoïques marines surmontées en discordance par les formations continentales du Secondaire et du Tertiaire épaisses de plusieurs milliers de mètres.

Le Quaternaire y succède, constitué essentiellement de sables dunaires dont l'épaisseur peut atteindre quelques centaines de mètres.

Les accidents importants qui jalonnent la dorsale d'Amguid-El Biod ont affecté le réservoir du Continental Intercalaire dans la partie Sud du domaine, mais ne peuvent pas constituer une barrière hydraulique, puisque dans cette zone les écoulements sont parallèles aux failles qui, de plus, constituent plutôt des voies privilégiées pour l'écoulement que des véritables barrières (UNESCO, 1972).

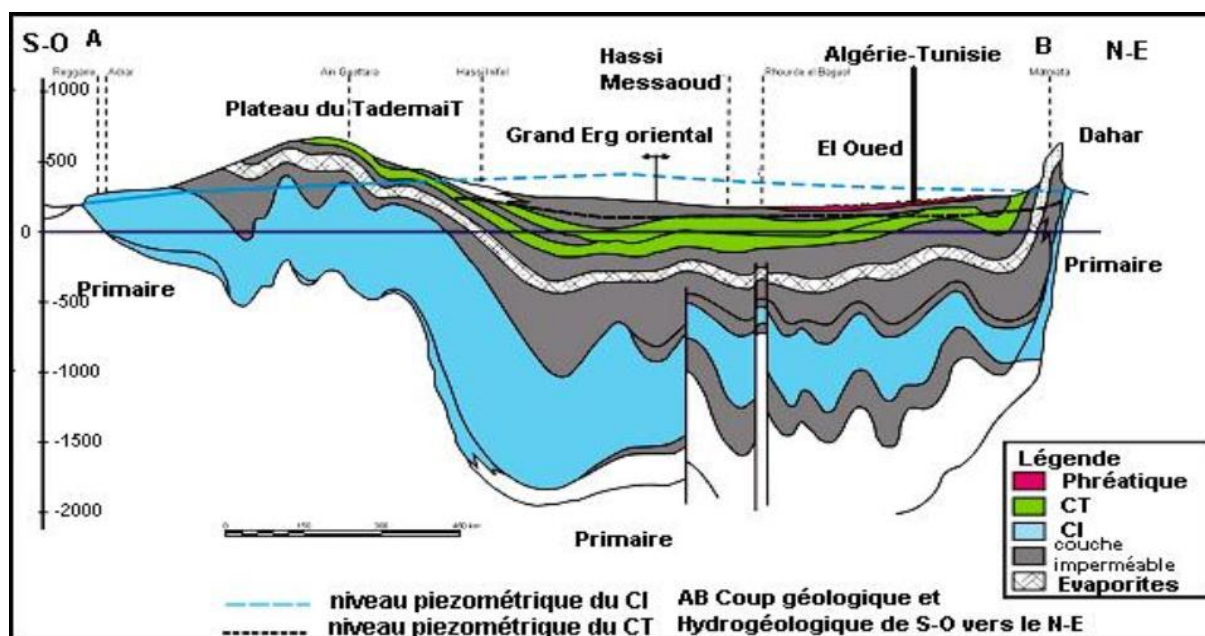


Fig. III. 2 : Coupe hydrogéologique à travers le Sahara (UNESCO, 1972)

II. 1. La nappe phréatique :

La nappe phréatique présente dans toute l'Oasis du Souf, correspond essentiellement à la partie supérieure des formations Continentales déposées à la fin du Quaternaire.

La nappe libre est contenue dans des sables fins, intercalés par des tufs ou des lentilles d'argiles sableuses et gypseuses. Ce type de lithologie favorise le phénomène d'infiltration et le processus de la remontée capillaire.

Cette nappe repose sur une bonne assise argileuse compacte et plastique imperméable d'une épaisseur de 20 m. La profondeur de l'aquifère varie entre 10 et 40 m, et son épaisseur

peut atteindre localement 100 m (Saibi, 2009). Elle est exploitée par 1,040 puits équipés de groupes motopompes (HPO & BG, 2002).

La perméabilité moyenne de la nappe libre est de 10^{-4} m/s (Kherici, 1996). Sa transmissivité horizontale et son coefficient d'emmagasinement ont été estimés respectivement à 10^{-2} et 0.2 m²/s (Levassor, 1978).

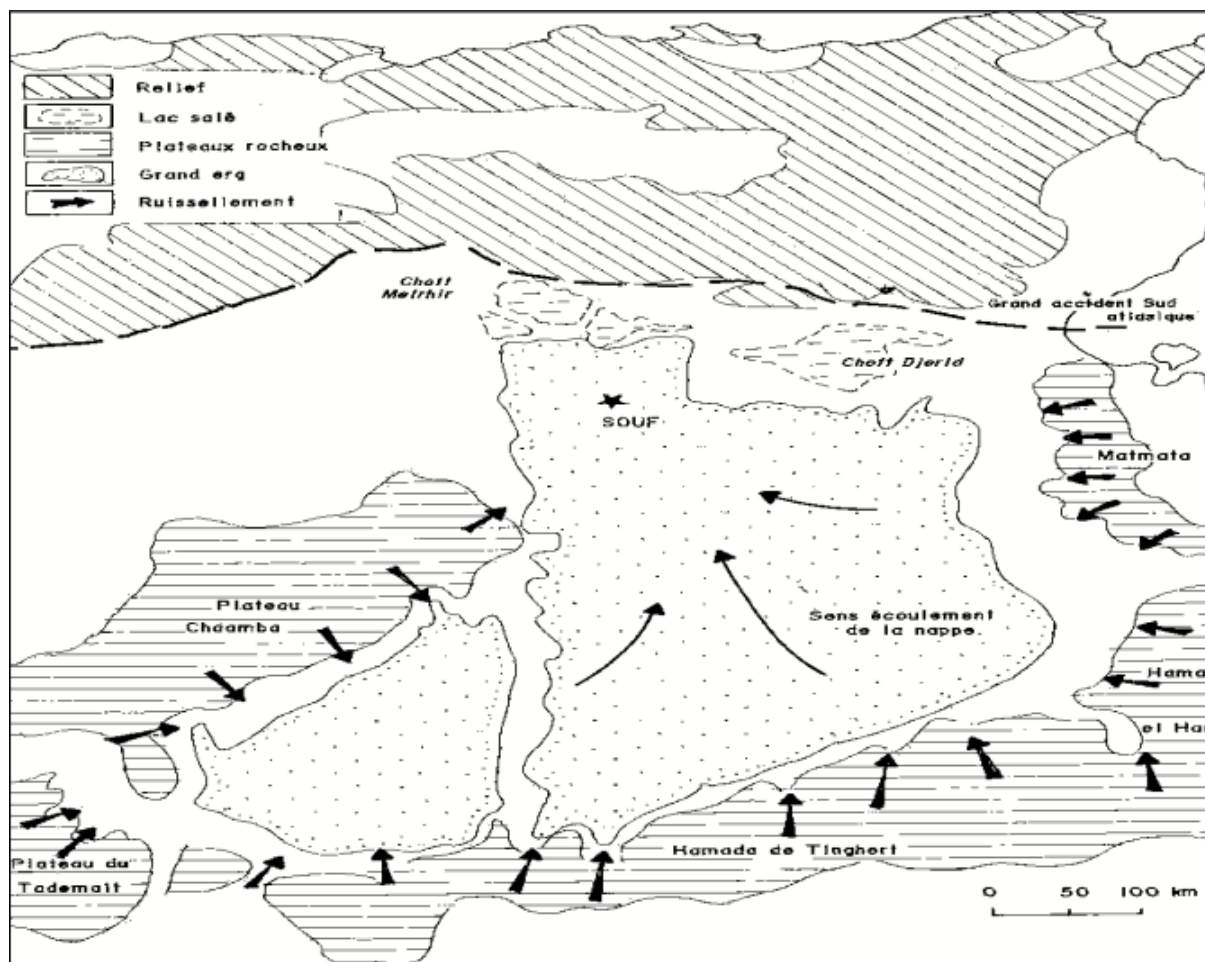


Fig. III. 3 : Zone d'alimentation de la nappe phréatique et le sens d'écoulement de la nappe (Cote Marc, 2006)

II. 2. Le complexe terminal (Potien) :

D'après l'étude géologique, il est marqué que les formations du Complexe Terminal sont très hétérogènes, avec présence des assises perméables du Sénonien calcaire et du Miopliocène. En fait, il est possible d'y distinguer trois ensembles aquifères principaux, séparés localement les uns des autres par des horizons semi-perméables ou imperméables. Ces trois ensembles sont représentés par les calcaires et dolomies du Sénonien et de l'Eocène inférieur, par des sables, grès et graviers du Pontien et, par les sables du Miopliocène.

Dans le Souf, le meilleur niveau aquifère est contenu dans les sables du Pontien inférieur (Dubost, 2002). Ceux-ci sont séparés des calcaires éocènes par les argiles sableuses

et les marnes de la base du Continental Terminal (CI). En revanche, la nappe paraît en continuité avec les argiles et les sables du Miopliocène, mais ceux-ci sont souvent d'une moins bonne perméabilité.

En allant du Sud vers le Nord de la région, le toit de la nappe principale s'enfonce rapidement en passant de 150 m à El Oued pour atteindre 450 m en bordure des chotts (Sife lMenadi).

La surface piézométrique est située à quelques dizaines de mètres au-dessus du niveau de la mer : l'eau est ascendante dans le Sud (El Oglâ) et nettement jaillissante au Nord (Oeltzschner, 2003).

C'est d'ailleurs dans le Souf septentrional que les sables grossiers du Pontien inférieur ont plus de 100 m d'épaisseur et l'eau a une qualité assez bonne (3 g/l de résidu sec). Jusqu'à 2004 la nappe du Complexe Terminal est captée par 103 forages moyens, donnant un débit total de 3122 l/s ; dont 32 forages sont destinés à l'irrigation avec un débit de 995 l/s et 71 forages destinés à l'AEP avec un débit de 2,128 l/s (HPO & BG ; 2004).

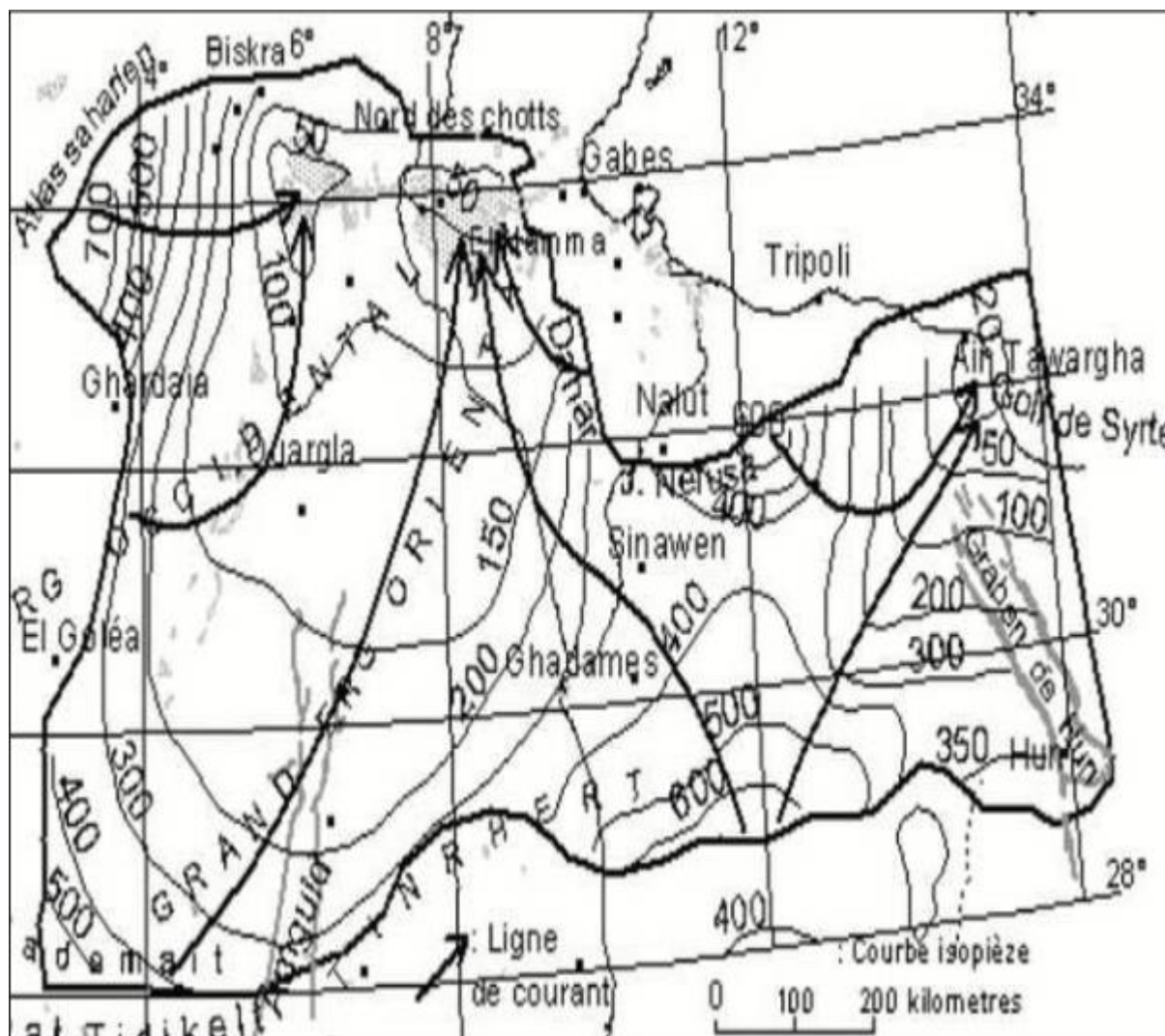


Fig. III. 4 : Limites de l'aquifère du Complexe terminale avec les niveaux piézométrique et les sens d'écoulement (Baba SY et al., 2006)

II. 3. Le continental intercalaire (Barremo-Albien) :

La formation du Continental Intercalaire est représentée par des dépôts continentaux sablo-gréseux et sablo-argileux du Crétacé Inférieur.

C'est un système aquifère multicouche, dont la profondeur atteint localement 2,000 mètres et une puissance variante entre 200 et 400 mètres. Le CI est qualifié dès 1945 de « plus grand système hydraulique du Sahara » Savornin (1945).

Le trait marquant de ce réservoir aquifère est son volume considérable dû à la fois à son extension sur plus de 600,000 km² et son épaisseur moyenne de plusieurs centaines de mètres.

Cependant, bien que l'intérêt majeur de ce système aquifère soit constitué par les grandes quantités d'eau qui y ont été stockées pendant les périodes pluvieuses du Quaternaire (UNESCO, 1972). Dans la région d'étude, cette nappe est captée par trois forages profonds

d'une profondeur de (1,800 à 2,100 m), donnant un débit total de 680 l/s dont deux forages pour l'alimentation en eau potable (AEP) de la ville d'El Oued (430 l/s) et un forage pour l'irrigation à Sahan Berry d'un débit de 250 l/s, l'épaisseur du réservoir est importante et varie de 200 à 400 m, sa température atteint 60°C et la pression en tête de puits fermé est de 25 à 27 bars (HPO & BG ; 2004).

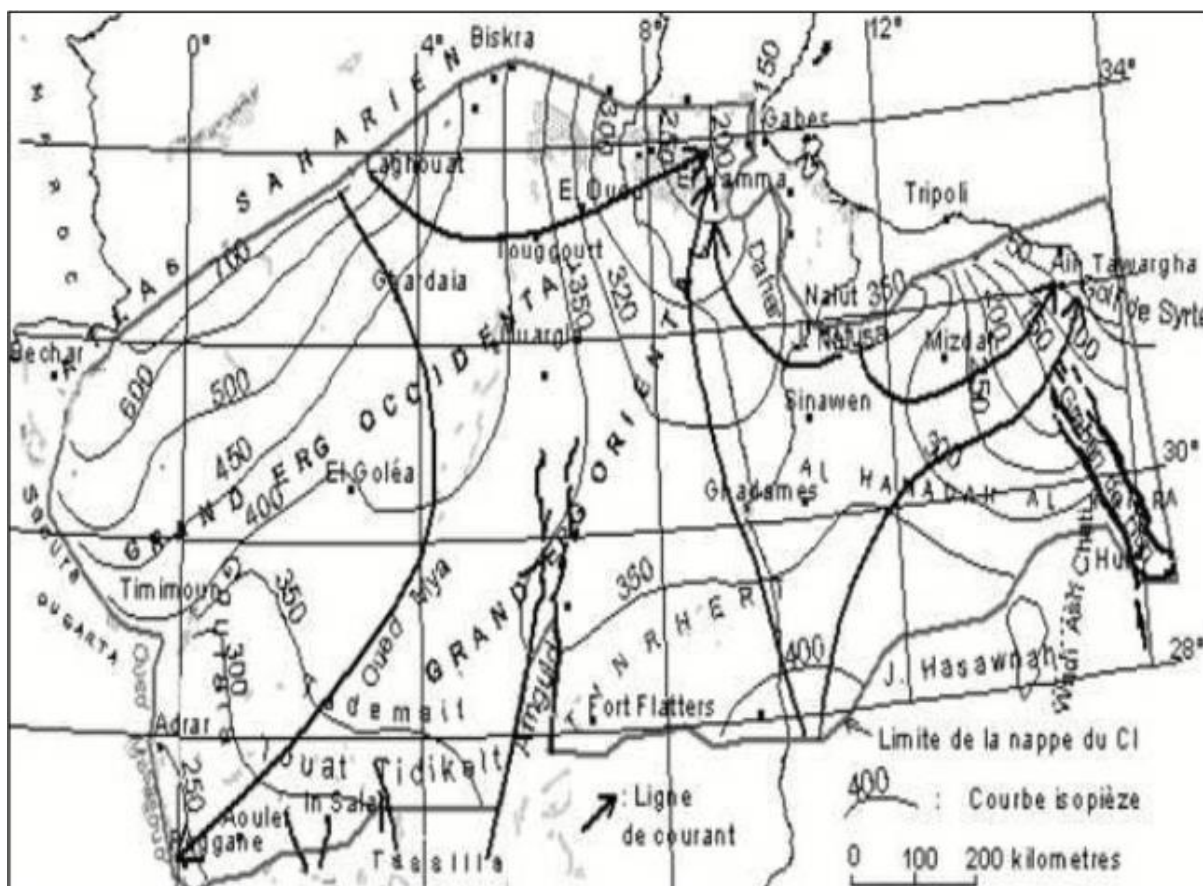


Fig. III. 5 : Limite de l'aquifère du Continental Intercalaire avec le niveau piézométrique et le sens d'écoulement (Baba SY et al., 2006)

II. 4. Litho stratigraphie des nappes d'El-Oued :

Les coupes des sondages profonds réalisées dans la région, montrent que les nappes aquifères d'el-oued, composées des formations suivants (tableau III. 1) :

II. 4. 1. Nappe phréatique :

D'âge Quaternaire, cette nappe est constituée de sable, sable argileux, argile sableuse, avec des intercalations de gypse et des lentilles argileux d'âge quaternaire et Miopliocène. Le substratum est argileux.

II. 4. 2. Le complexe terminal :**a) La nappe de Sable :**

Est essentiellement constitué de sable, sable argileux, avec des intercalations de gypse et décalcaire. Le toit est argileux et le mur est constitué d'argiles lagunaires et de marnes d'âge Eocène moyen correspondant au toit de la nappe des calcaires.

b) La nappe des calcaires :

Est constituée de calcaires à silex : au niveau supérieur d'âge Eocène inférieur et de calcaires gypseux au niveau inférieur d'âge Sénonien carbonaté. Sa limite supérieure rencontre l'Eocène moyen qui est formé par des argiles lagunaires et des marnes, tandis que sa limite inférieure rentre en contact avec le Sénonien lagunaire, constitué d'évaporites et d'argiles.

II. 4. 3. Le continentale intercalaire :

La nappe du continental intercalaire représente le plus important aquifère dans le Sahara septentrional. Elle est constituée par des sables et des grès d'âge Crétacé inférieur. Cette nappe est confinée entre un toit, constituée par une épaisse couche d'argiles et de marnes d'âge Cénomaniens, alors que le mur est constitué argiles, lui conférant caractère captif.

Tab. III. 1 : Récapitulatif des systèmes aquifères d'El-Oued (Bousalsal B, 2007)

COUPE	NATURE H-GEOLOGIQUE		NATURE LITHOLOGIQUE	ETAGE		ERE
	Nappe Phréatique		Sables			Quaternaire
	Niveau imperméable		Argiles			
	Nappe des sables	Complexe Terminal	Sables	Pliocene		Tertiaire
	Semi-perméable		Argiles gypseuses			
	Nappe des sables		Sables grossiers, graviers	Pontien	Miocène	
	Niveau imperméable		Argiles lagunaire, marnes	Moyen	Eocène	
	Nappes des calcaires (perméable)		Calcaires fissuré	Inferieur		
	Semi-perméable	Evaporites, argiles	Sénonien lagunaires	Crétacé	Secondaire	
	Niveau imperméable	Argiles, marnes	Cenomanien			
	Nappe de Continental Intercalaire	Sables, Grès	Albien			

III. ETUDE DES COUPES HYDROGEOLOGIQUES :

Du fait de la difficulté d'aborder en détail l'étude de toutes les nappes de la région de Souf, nous avons effectué 02 coupes hydrogéologiques pour pouvoir visualiser la géométrie et la superposition des aquifères (Fig. III. 6) et une coupe (Fig. III. 7) confirme les informations rapportées par la géophysique.

- **Lithologie de la nappe :**

- 1- calcaire de l'Eocène inférieure marin et de l'Eocène moyen évaporés.
- 2- argiles sableuses et marnes de la base du complexe terminal.
- 3- sables grossiers du Pontien inférieur.
- 4- argiles et gypses dominants.
- 5- argiles et sables dominants.
- 6- argiles, sables et gypses (les trois derniers étages appartiennent au Miopliocène).

7- niveau hydrostatique de la nappe du Pontien inférieur.

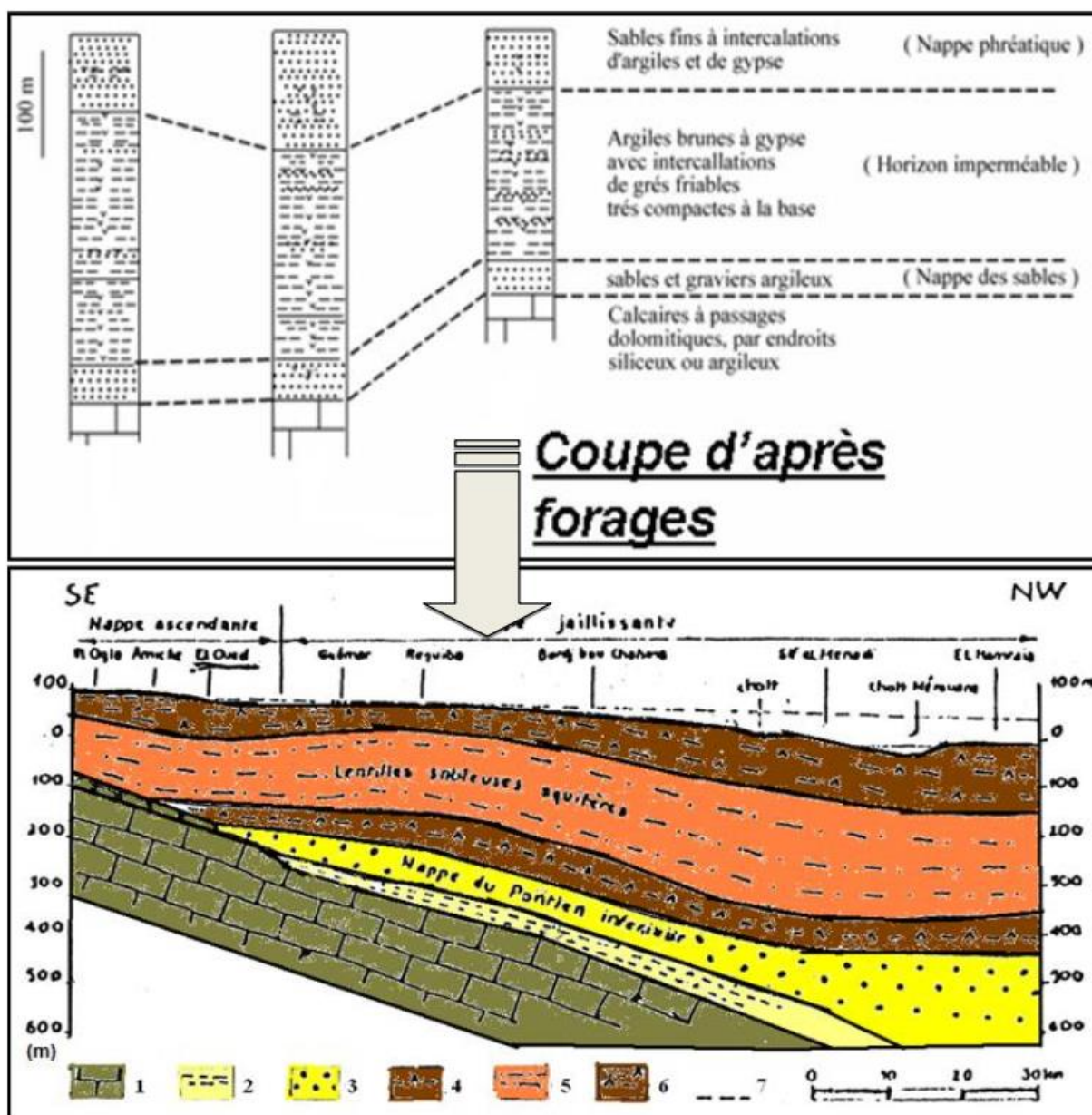


Fig. III. 6 : Coupe Hydrogéologique du Souf (ANRH, 1989)

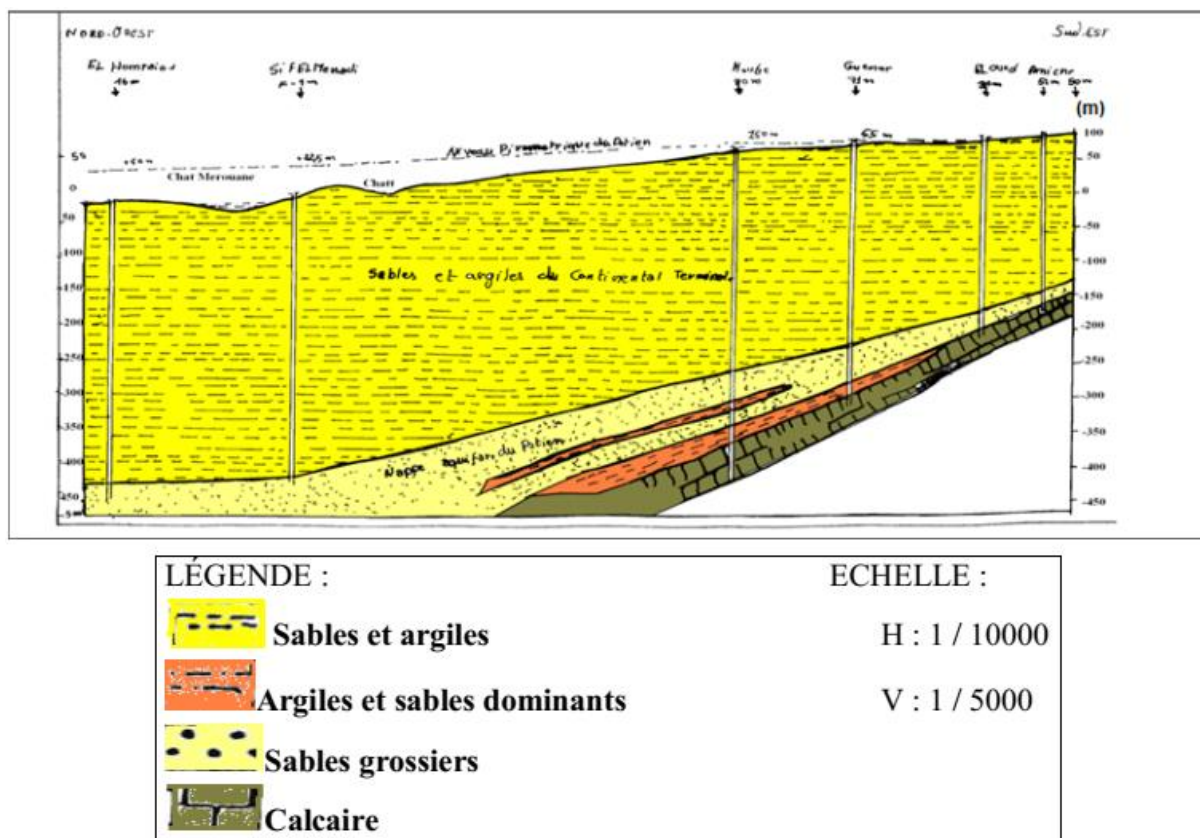


Fig. III. 7 : Coupe Hydrogéologique d'El- Hamraia, El-Oued (ANRH, 1989)

IV. L'ETUDE PIEZOMETRIQUE :

Le but de la carte piézométrique est la présentation de la configuration de l'aquifère et de schématiser la fonction conduite du réservoir et le comportement hydrodynamique de l'aquifère, elle traduit la morphologie de la surface d'eau de la nappe à une époque déterminée.

Une campagne piézométrique effectuée pendant les basses eaux a permis de suivre l'évolution de la piézométrie de la nappe.

IV. 1. La carte piézométrique de la nappe CT de la vallée du Souf en 2011 :

La carte montre que la surface piézométrique n'est pas régulière, une zone basse située au Nord-Ouest à Hassi Khalifa où le niveau piézométrique est compris entre 21 et 25 m, on remarque aussi que le niveau piézométrique dans la commune d'El-Oued varie entre 70 et 75 m. Les hauts niveaux piézométriques de la nappe sont situés à Robbah 81.9 m et Trifaoui qui marque une valeur de 80 m, On doit tirer la valeur de gradient hydraulique à partir la carte piézométrique et multiplier cette valeur par la perméabilité.

- **Le gradient hydraulique :**

$$i = \Delta H / L$$

Avec :

ΔH : la différence de charge entre deux points alignés aux lignes de courants.

L : la distance entre ces deux points.

La valeur moyenne de gradient hydraulique est 2.5×10^{-3} (i_{ab} et i_{cd}).

- **La vitesse d'écoulement :**

La vitesse d'écoulement des eaux demeure variable d'une région à une autre. La légère variation constatée au niveau des équipotentiels :

$$V = K \times i \dots \dots (1)$$

Avec :

K : la conductivité hydraulique ou coefficient de perméabilité (m/s) ;

i : Le gradient hydraulique.

On remarque que cette valeur est très faible, indiquant une faible pente de la surface piézométrique et par conséquent une faible vitesse d'écoulement.

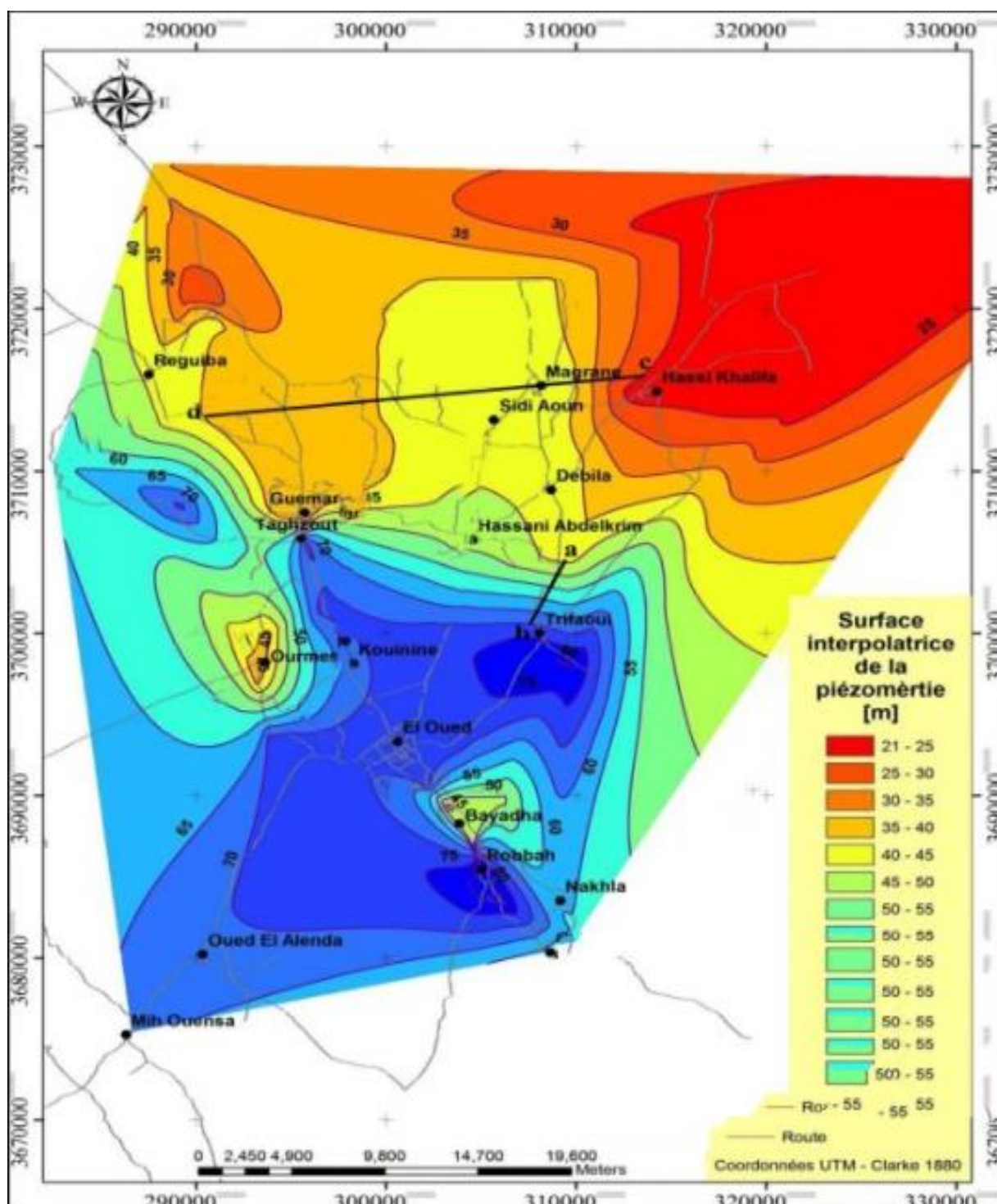


Fig. III. 8 : Carte piézométrique de la nappe CT de la vallée du Souf en 2011 (Kechana, 2014)

V. ESTIMATION DES RESERVES :

Les études hydrogéologiques montrent que le Sahara renferme d'énormes réserves d'eaux souterraines, constituée par des grès de porosité 25%, le bassin considéré ayant 600,000 Km² (en Algérie), l'étude UNESCO (1972) évalue approximativement la réserve d'eau moyenne de l'ensemble des aquifères du CI et du CT à 60,000 × 10⁹ m³.

MARGAT (1992), sans détail précis sur la méthode de calcul, fait état de $40,000 \times 10^9 \text{ m}^3$ de réserves aquifères du CI. Il évalue la réserve du CT (couvrant $350,000 \text{ Km}^2$) à $20,000 \times 10^9 \text{ m}^3$.

Nous tentons, ici, d'évaluer la ressource dans les aquifères du Sahara septentrional au-dessous de la région du Souf. Les réserves totales contenues dans le réservoir représentent le volume total des formations aquifères, auquel est appliquée la porosité efficace (OSS 2002).

L'estimation des réserves, des aquifères de la nappe phréatique, du CT et du CI est rendue possible après la connaissance de l'épaisseur moyen de chaque aquifère.

Le volume utile ou la réserve est calculé par la formule :

$$V = e \times s \times ne \dots\dots (2)$$

Où :

V : La réserve de la nappe (m^3).

e : Epaisseur moyenne (m).

s : La superficie (m^2).

ne : La porosité efficace.

D'après les études faites par l'ANRH pour mieux connaître les aquifères du Sahara septentrional, ces études nous a permis d'avoir une estimation de l'épaisseur moyen de chaque aquifères.

Tab. III. 2 : Épaisseur moyen des différents aquifères et estimation de la réserve

Aquifère	Nappe phréatique	CT	CI
Epaisseur mouillée	45 m	342 m	385 m
Superficie s	$11738 \text{ km}^2 = 11738000000 \text{ m}^2$		
Porosité efficace ne	12.49×10^{-2}	5×10^{-2}	5×10^{-2}
Réserves (m^3)	$65.97 \times 10^9 \text{ m}^3$	$200 \times 10^9 \text{ m}^3$	$226 \times 10^9 \text{ m}^3$

VI. INVENTAIRE DES POINTS D'EAU :

La nappe du complexe terminal dans la vallée d'Oued-Souf est très sollicitée notamment pour l'AEP, d'après l'inventaire 2012 on a montré que la majeure parties des forages ; au nombre de 106, a comme destination principale l'alimentation en eau potable et que 24 forages sont utilisés pour l'irrigation.

• Caractéristiques des puits de la nappe phréatique :

Les points d'eau retenus durant la campagne piézométrique sont répartis d'une manière inégale à travers la plaine. Ils sont pour la plupart des puits domestiques non

couverts, creusés à la main et construits en brique ou en pierre, de profondeur et diamètre variable de 1 à 2 mètres, équipé généralement de motopompes non adaptées aux caractéristiques du puits. Ils sont destinés à l'irrigation des cultures saisonnières.

VII. CARACTERISTIQUES HYDRODYNAMIQUES DE LA NAPPE DU CT :

La méthode des pompages d'essais a permis la détermination des caractéristiques hydrauliques de la nappe de complexe terminal.

C'est une méthode dont le principe est simple, consiste à représenter expérimentalement par des graphiques, les courbes et les droites des fonctions mathématiques régissant l'écoulement des eaux souterraines vers les ouvrages de captage.

L'étude des graphiques obtenus après la réalisation expérimentale de la méthode permet :

- D'analyser l'évolution du cône de dépression de la surface piézométrique ;
- De préciser les principales caractéristiques hydrauliques de la nappe ;
- De voir en temps réel l'effet de l'exploitation de l'aquifère.

VII. 1. Expérimentations des pompages d'essais :

- **Essais de puits :**

Le principe est d'exécuter le pompage par palier de débit de courte durée avec la mesure du niveau d'eau dans le puits. Cet essai permet de déterminer les caractéristiques du complexe : aquifère / ouvrage de captage. La manière la plus rentable sans très solliciter la nappe, est de n'extraire que la réserve régulatrice afin d'éviter une surexploitation minière de la ressource. Cela n'est applicable que si le débit d'exploitation est rigoureusement inférieur au débit critique en respectant le nombre d'heure de pompage par jour.

- **Essais de nappe :**

Cet essai est réalisé en un seul palier de débit de longue durée, avec la mesure des niveaux d'eau dans le forage (rabattement) et dans des piézomètres si c'est possible. Le but de cet essai est de déterminer les divers paramètres hydrodynamiques de l'aquifère (Transmissivité, Coefficient d'emménagement...). Il faut noter que l'interprétation des résultats obtenus se fait strictement après l'identification du type d'aquifère.

VII. 2. Essais des pompages :

Des essais de pompage par paliers et de longue durée ont été réalisés sur un site réparti dans la zone d'étude de la vallée d'Oued- Souf, à Guemar (F 87- EL-Houd).

L'essai par paliers est composé de quatre paliers de 6 heures chacun à débit constant, séparés par un intervalle d'au moins 12 heures. Quant à l'essai de longue durée, il a consisté

en un pompage à débit constant de 72 heures suivi de 24 heures de remontée. Son interprétation a permis de calculer la transmissivité, le coefficient de perméabilité, le coefficient de perméabilité verticale et la porosité efficace.

L'interprétation des pompages d'essais repose sur des méthodes d'approximation graphique.

Après l'utilisation du logiciel (Aquifer Test), ces méthodes sont toutes basées sur les hypothèses suivantes :

1. Le débit est supposé constant pendant toute la durée de pompage ;
2. La surface de la nappe est supposée horizontale ;
3. le forage capte la nappe sur la totalité de son épaisseur ;
4. L'écoulement est supposé laminaire ;
5. L'aquifère est illimité.

VII. 3. Interprétation des données des essais du pompage à longue durée :

VII. 3. 1. Forage F 87 (El-Houd-commune de Guemar) :

Ce forage est implanté dans la partie Nord-Ouest de la ville de Guemar à proximité de la route RN 48 entre Guemar-Réguiba Wilaya d'EL-Oued au coordonnées Lambert (X=881,700 m, Y = 327,900 m) de 363 m de profondeur.

L'essai qui a été réalisé a duré 72 heures pour la descente et avec un débit constant de 45 l/s.

Tab. III. 3 : Calcul de débit spécifique, valeurs débits /rabattements 87 (El-Houd)

Palier	Niveau dynamique (m)	Rabattement Δs (m)	Débit (l/s)
1	27.28	03.32	20
2	29.75	05.79	30
3	32.20	08.24	40
4	33.45	09.49	45

a. Débits spécifiques :

Après l'utilisation du logiciel (Aquifer Test), le débit spécifique est déterminé à partir de la droite débits- rabattement à un temps de 360 minutes (6h). Les rabattements correspondent aux différents paliers sont respectivement : 3.32m, 05.79 m, 8.24m et 9.49m (Tableau III. 3).

$$q = \frac{Q}{\Delta s} \dots \dots (3)$$

Avec :

q : Débits spécifiques (m^2/s) ;

Q : Débit (m^3/s) ;

Δs : rabattement (m).

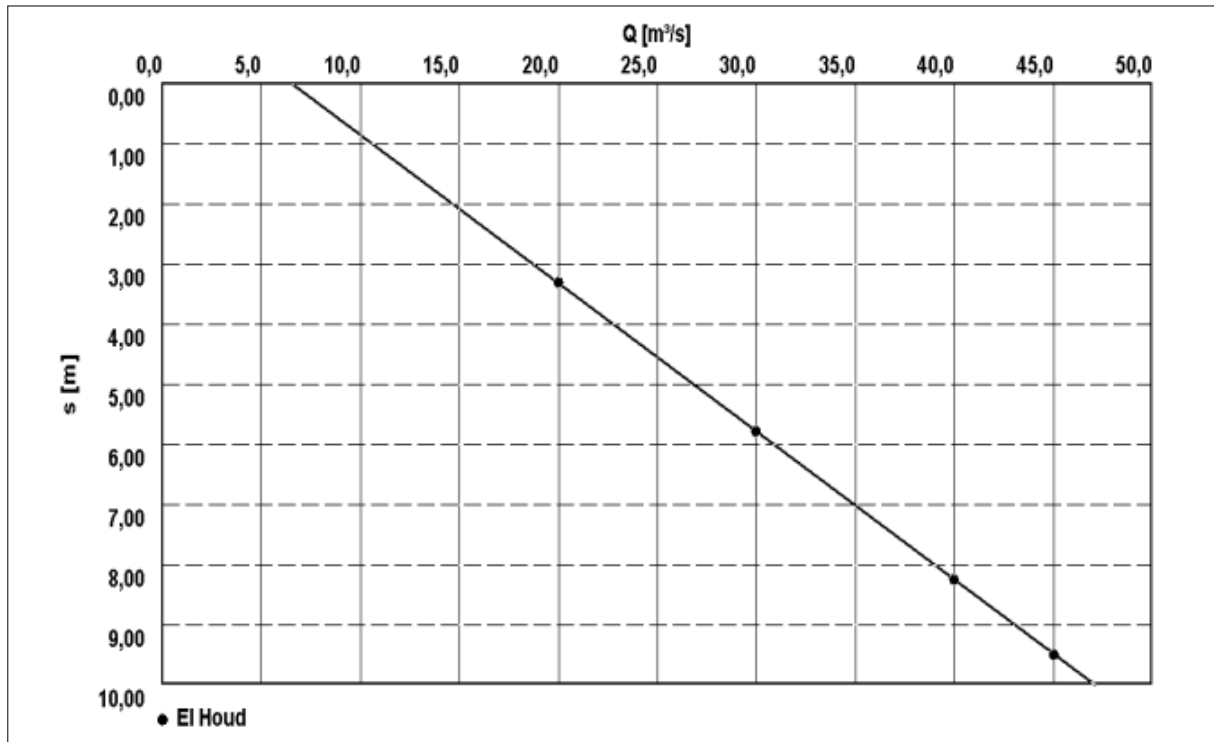


Fig. III. 9 : Courbe débit / Rabattement à F 87 (El-Houd) (Khechana,2014)

Le débit spécifique est $4,05 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$

b. Perméabilité :

"La perméabilité est l'aptitude d'un réservoir à se laisser traverser par l'eau sous l'effet d'un gradient hydraulique" (G. CASTANY). Elle est mesurée notamment par le coefficient de perméabilité K défini par la loi de Darcy comme le volume d'eau gravitaire traversant une unité de section perpendiculaire à l'écoulement en 1 seconde sous l'effet d'une unité de gradient hydraulique. En prenant comme unités le m^2 et le m^3 , K est exprimé en m/s .

- **Coefficient de perméabilité (K) :**

Le coefficient de perméabilité dépend à la fois des caractéristiques du réservoir (granulométrie, porosité efficace) et des caractéristiques du fluide (viscosité, donc température, et masse volumique).

Le coefficient de perméabilité d'un sol est un coefficient important dépendant de :

- La granulométrie du sol.

- La nature du sol.
- Les caractéristiques physiques du liquide, viscosité (eau).
- Degré de consolidation du sol.

D'après les calculs, le coefficient de la perméabilité K est : 4.73×10^{-4} m/s.

c. Calcul du coefficient d'emmagasinement :

La storativité S d'un aquifère, ou coefficient d'emmagasinement, est le volume d'eau libérée ou stockée par l'aquifère par unité d'aire horizontale de l'aquifère par unité de variation du gradient hydraulique. La storativité dépend en général des propriétés élastiques de l'eau et du milieu.

Le coefficient d'emmagasinement est obtenu par calcul numérique dans le deuxième terme de l'expression de Jacob. Ou, plus simplement, avec t_0 , lorsqu'il peut être déterminé, par l'expression suivante : $S = 2.25T t_0 / r^2$. Il faut noter que ce paramètre ne peut être calculé correctement que si on a des mesures au niveau d'un piézomètre ce qui n'est pas le cas pour les présents essais.

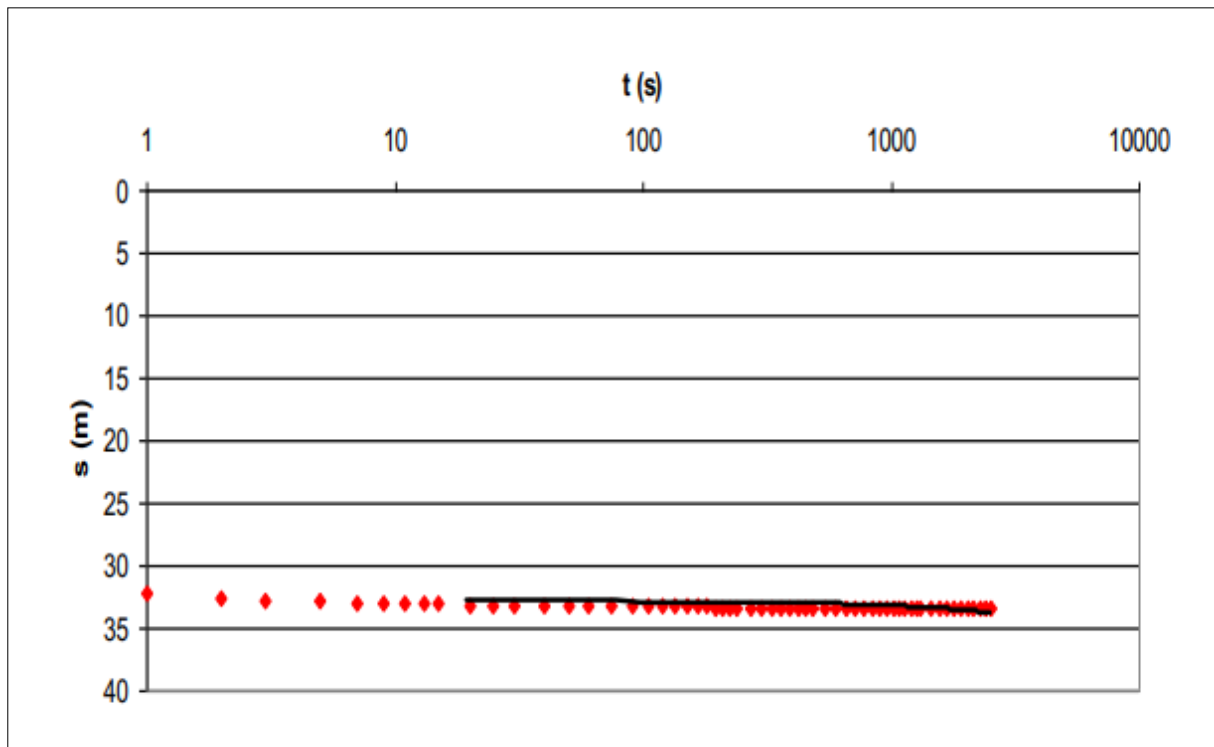


Fig. III. 10 : Essai de pompage à longue durée à F 87 (EL-Houd) (Khechana,2014)

La transmissivité est 3.12×10^{-3} m²/s

La transmissivité est le débit d'eau qui s'écoule par unité de largeur d'un aquifère sous l'effet d'une unité de gradient hydraulique. Elle représente la capacité de l'aquifère à

transmettre l'eau à travers une unité de surface. Elle peut donc nous situer sur la perméabilité du milieu.

Selon que cette valeur est élevée ou faible l'aquifère peut être jugé bon ou mauvais. Pour sa détermination plusieurs méthodes empiriques ont été établies (Théis, Cooper-Jacob). Dans le cadre de notre étude, la méthode utilisée est celle de Cooper- Jacob.

- **L'approximation logarithmique de Cooper-Jacob :**

La transmissivité est calculée par la pente de la droite représentative l'échelle des coordonnées n'étant pas homogène, la pente est déterminée par l'accroissement des rabattements (ou des profondeurs des niveaux d'eau) au cours d'un module logarithmique.

$$T = \frac{0.183Q}{C} \dots \dots (4)$$

T : La transmissivité en (m²/s).

Q : Le débit (longue durée) en (m³/s).

C : La pente moyenne (‰).

- **Par la méthode de Théis :**

L'équation de la remontée, après arrêt du pompage est la suivante :

$$R = \frac{Q}{4\pi T} \text{Log} \left(\frac{t + t'}{t'} \right) \Rightarrow R = \frac{Q}{4\pi s} \text{Log} \left(1 + \frac{t}{t'} \right) \dots \dots (5)$$

T : La transmissivité en (m²/s).

Q : Le débit (longue durée) en (m³/s).

R : Le rabattement (moyen) en tout point, à partir de l'arrêt du pompage en (m).

t : Le temps écoulé depuis le début du pompage en (s).

t' : Le temps écoulé depuis l'arrêt du pompage (temps de remontée) en (s).

E : L'épaisseur de l'aquifère (m).

Les transmissivités sont homogènes sur la même station d'essai et les valeurs sont semblables, que ce soit en pompage ou après l'arrêt de celui-ci. D'une station à l'autre, les écarts sont peu importants, de l'ordre de 1 à 4 entre les extrêmes avec 3.12×10^{-3} m²/s à Guemar. La transmissivité est de 3.12×10^{-3} m²/s. La perméabilité est de 4.73×10^{-4} m/s est du même ordre que la perméabilité mesurée lors des essais d'infiltration (1.6×10^{-4} m/s).

VII. 4. Etat des forages :

VII. 4. 1. Forages à l'arrêt :

Lors de cette opération d'inventaire, il a été constaté que 70 forages sont à l'arrêt pour les raisons suivantes : manque d'équipements, problème d'alimentation en électricité, manque d'entretien dû à l'ensablement, etc.

L'exploitation de ces derniers nécessite seulement une prise en charge et un entretien régulier.

VII. 4. 2. Forages abandonnés :

Il a été remarqué durant cet inventaire que 13 forages captant la nappe du CT, se trouvent dans un état de dégradation très avancée, leur bouchage est indispensable afin d'éviter les fuites pouvant contaminer les autres nappes par la salinité.

VIII. LA REMONTEE DES EAUX DE LA NAPPE PHREATIQUE ET SES CAUSES PRINCIPALES :

Dans les années 1940, la nappe phréatique de la vallée d'Oued Souf représentait la ressource unique pour l'approvisionnement en eau potable de la population et l'abreuvement du cheptel, ainsi que pour l'arrosage des cultures vivrières (10,000 puits traditionnels actuellement).

Au fur et à mesure de l'augmentation de la population et du recours aux forages profonds (CT-CI), une montée progressive et persistante de la nappe phréatique a été largement remarquable dans les années 1990.

A cause d'un développement urbain anarchique venant perturber l'équilibre naturel qui existait auparavant, les premières apparitions de ce phénomène s'adressent à l'année 1969 et ont pris de l'ampleur dans les années 80.

La technique d'exploitation de la nappe phréatique dans la vallée du Souf est le ghout qui est sous forme de cuvette entonnoir aménagé dans le sable qui permet aux racines des palmiers d'atteindre la zone de remontée capillaire de la nappe superficielle (-15m). Actuellement, la région souffre des conséquences négatives de la remontée des eaux de la nappe phréatique, surtout du fait de l'inondation de la grande partie des ghouts ainsi que des zones basses de la ville et de sa périphérie.

Les causes de cette remontée sont multiples, dont les principales sont :

- Plus de rejets et moins de prélèvement.
- Mauvaise gestion des eaux.
- Exploitation des nappes profondes.
- Les systèmes d'assainissement utilisés (fosses septiques).

IX. CONCLUSION :

Le système aquifère d'El-Oued est constitué de trois nappes : nappe libre (phréatique), et deux nappes captives (nappe de complexe terminal et nappe de continentale intercalaire).

L'étude des essais de pompage par paliers et à longue durée qui a été effectué au niveau des 03 stations a permis d'identifier les paramètres hydrodynamiques de la nappe du CT avec un débit soutiré qui oscille entre 10 l/s à 55.5 l/s, une transmissivité moyenne de $5.26 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, une porosité efficace estimée à 5% et une perméabilité comprise entre 10^{-3} et 10^{-4} m/s pour la nappe la plus exploitée du Miopliocène, ce qui nous donne une valeur moyenne de coefficient de perméabilité $K = 2.55 \times 10^{-4} \text{ m/s}$.

La zone d'étude présente des potentialités en eau très importantes qui sont évaluées à $10.08 \text{ m}^3/\text{s}$ [Prélèvements ($2.84 \text{ m}^3/\text{s}$) + Disponibilités ($7.25 \text{ m}^3/\text{s}$)].

La piézométrie de CT selon l'inventaire (2003) dans la région du Souf varie entre 20 m à Benguecha et 81.9 m dans la région de Robbah. Le niveau statique varie entre 3.75m à HassiKhalifa et 40 m à Guemar. Nous remarquons par ailleurs l'existence de l'artésianisme à Douar El Ma, Hamraia et Taleb Larbi.

La profondeur moyenne de la nappe du CT varie entre 200 et 600 mètres. Quant à l'épaisseur utile de cette nappe, elle est de 50 mètres environ.

L'interprétation de la remontée des eaux a pour but de décrire les conséquences et les impacts de ce problème sur les différents secteurs, et de chercher les causes dont la principale est l'exploitation irrationnelle des nappes profondes.

Chapitre IV

Estimation de la Réserve Facilement Utilisable

I. INTRODUCTION :

En ce qui concerne l'alimentation en eau des plantes, le sol joue essentiellement un rôle de réservoir. Ce sont les caractéristiques de ce réservoir et son mode de fonctionnement qu'il est utile de connaître dans un périmètre d'irrigation, qu'il s'agisse pour un ingénieur de dimensionner le réseau de distribution ou, pour les usagers, de bien utiliser l'eau qui est mise à leur disposition.

Le sol est un système à 3 phases : solide, liquide, gazeuse. Ses propriétés physiques résultent des rapports entre les éléments solides et les deux fluides air et eau. La phase solide (45 à 65%) est celle dont le volume est le plus constant, tandis que les volumes occupés par les phases liquides et gazeuses sont très variables.

II. DEFINITIONS :

II. 1. Réserve utile en eau :

La capacité de stockage d'un sol correspond au volume d'eau maximal pouvant être retenu par les différents horizons contre la seule force de gravité. De cette réserve totale en eau, seule une partie peut être utilisée par la végétation : elle correspond à la réserve utile en eau du sol.

La réserve utile (RU) correspond à la fraction de la réserve qui est exploitable par la plante, C'est-à-dire, la réserve utile est la fraction accessible par les racines et absorbable par leur succion. Elle est exprimée en millimètres. C'est une variable d'état, qui dépend des propriétés physico-chimiques du sol, de sa composition granulométrique, de l'arrangement des particules de sol et de la distribution de la porosité. L'eau utilisable par les plantes est égale au volume d'eau emmagasiné par la tranche de sol explorée par les racines entre deux états hydriques caractéristiques : la capacité au champ (l'eau que peut retenir le sol après écoulement de l'eau gravitaire, ou ressuyage) et le point de flétrissement permanent (au-delà duquel le végétal ne peut plus extraire l'eau) (Fig. IV. 1).

La RU est composée de la RFU (réserve facilement utilisable) et la RDU (réserve difficilement utilisable).

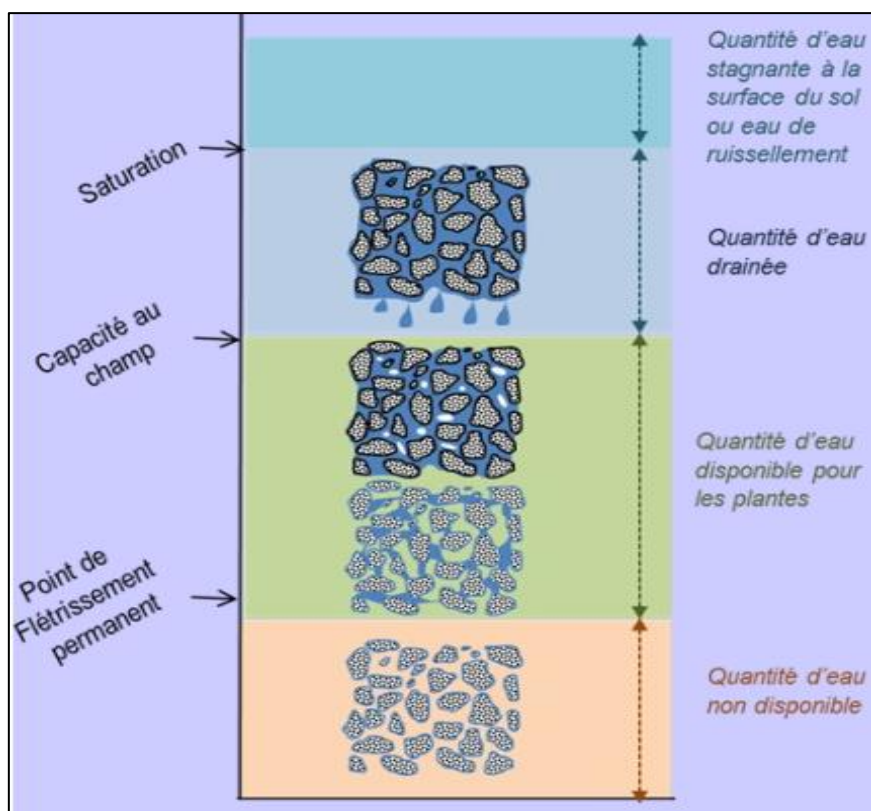


Fig. IV. 1 : Illustration des limites haute et basse de la réserve utile (GCHP2E, 2016)

II. 2. Réserve facilement utilisable :

La RFU représente l'eau facilement mobilisable par les cultures, elle dépend de la profondeur du sol et de l'enracinement de la végétation. C'est " celle que les plantes peuvent facilement utiliser par leur tension osmotique sans avoir à freiner l'ETR " (Lambert, 1996).

Bouchet et Hallaire (1964), examinant la notion de réserve facilement utilisable (RFU), ont conclu que les variations du rapport de la RFU à la réserve utile (RU) pouvaient s'expliquer par le niveau d'évapotranspiration potentielle instantané précité et par les caractéristiques de diffusion de l'eau du sol vers les racines et à travers la plante ; ces auteurs envisageaient la possibilité, pour ce rapport RFU/RU, de pouvoir varier entre 0 et 1. Le maintien de cette gamme de variation beaucoup trop large correspondait à leur souci d'expliquer les fluctuations de l'évapotranspiration d'une culture à un très faible pas de temps, sans véritablement chercher à faire un bilan hydrique sur une longue période. Entre ces deux situations extrêmes, une hypothèse intermédiaire revient à se fixer une valeur la plus plausible de ce rapport RFU/RU. Là encore, les valeurs utilisées varient, suivant la plupart des auteurs, entre les valeurs 1/3 et 2/3. Pour un sol riche en matière organique (plus de 3%), il faut majorer la RFU à hauteur de 50% (Poirée, Ollier, 1962). Selon Doorendos et Kassam (1980), le rapport RFU/RU dépend de la culture, du niveau d'évapotranspiration maximal (ETM) et, secondairement, de la texture du

sol. Les auteurs fournissent des valeurs de ce rapport pour quatre groupes de cultures différentes et pour des niveaux d'ETM variant entre 2 et 10 mm par jour.

Selon ces résultats, la RFU peut être estimée aux 2/3 de la RU pour des sols sableux, à 1/2 de la RU pour un sol limoneux et à 1/3 pour un sol argileux.

L'apport en eau pour un végétal doit donc être égal à la RFU mais ne doit pas excéder la RU. Sinon l'excédent s'infiltre dans les profondeurs sans intérêt pour la plante, bien au contraire.

Donc à chaque arrosage, vous alimentez la RFU. L'approche empirique de cette réserve mériterait d'être précisée par des études qui associeraient des mesures dans le sol et le suivi d'un indicateur de la plante.

L'estimation de la RFU doit donc intégrer l'eau facilement utilisable des horizons prospectés par la plante. Cette détermination est, bien sûr, appliquée aussi pour l'ensemble de la réserve utile, dont la réserve difficilement utilisable (ou réserve utile de survie) mise à contribution dans la dernière phase de la culture ou phase de maturation (RDU ou RUS = RU - RFU).

III. ESTIMATION DE LA RESERVE FACILEMENT UTILISABLE :

Etant donné le rapport $(RFU/RU) = 2/3$, l'estimation de la réserve facilement utilisable est basée sur le calcul de RU.

III. 1. Estimation par la formule de Hallaire :

La réserve utile en eau d'un sol peut être calculée par la relation suivante :

$$RU = (H_{cc} - H_{pf}) \times D_a \times Z \times (1 - C_x)$$

Avec :

RU : la réserve volumique en eau du sol (mm) ;

H_{cc} : Humidité pondérale à la Capacité au Champ (%) ;

H_{pf} : Humidité pondérale au Point de Flétrissement (%) ;

(H_{cc} - H_{pf}) : humidité équivalente (%) ;

D_a : la densité apparente (g / cm³) ;

Z : l'épaisseur du sol (mm) ;

C_x : la charge en éléments grossiers, la réserve utile de ces éléments étant considérée nulle.

En pratique, la réserve utile en eau d'un sol correspond à la somme des réserves de chaque horizon jusqu'à une profondeur limite correspondant à la profondeur maximale de prospection racinaire.

La réserve utile d'un sol dépend donc de trois grands facteurs :

- De la charge en éléments grossiers ;

- De la profondeur maximale d'enracinement ;
- De la teneur en eau volumique correspondant à la différence entre le volume d'eau retenu à la capacité au champ (saturation de la microporosité) et le volume d'eau retenu au point de flétrissement permanent ; ces volumes étant eux-mêmes dépendant de la composition granulométrique (texture), de la densité apparente (qui traduit la structure), de la charge en matière organique, etc.

III. 1.1. Charge en éléments grossiers :

Les charges en éléments grossiers ont été estimées sur le terrain au moyen de six classes d'abondance.

Pour les calculs de réserve, ces classes sont recodées en (valeurs de charge) en utilisant la médiane de chaque classe :

- classe 0 - charge nulle 0%..... 0
- classe 1 - très faible charge 0% à 5% de cailloux 0,025
- classe 2 - faible charge 5% à 25% de cailloux 0,150
- classe 3 - charge moyenne 25% à 50% de cailloux 0,375
- classe 4 - forte charge 50% à 75% de cailloux 0,625
- classe 5 - très forte charge 75% à 100% de cailloux 0,875

Selon le tableau ci-dessous, une région dont le sol est de nature sableuse présente une charge presque nulle en éléments grossiers.

Texture	Eléments grossiers %	Structure
Limono-sableuse	0	Fragmentaire grumeleuse
Limono-argileuse	65	Fragmentaire grumeleuse
Sableuse	0	Grumeleuse fine à tendance particulière

Tab. IV. 1 : Caractères morphologiques essentiels des sols (Cah. ORSTOM, ser. Pédol., vol. XXV, n °4,1989-1990)

III. 1. 2. Profondeurs maximales d'enracinement :

Le volume de sol prospectable par les racines conditionne l'alimentation hydrique et minérale de la plante. Le volume effectivement prospecté dépend du développement du système racinaire. En l'absence de contrainte, la plupart des essences végétales peut développer des systèmes racinaires profonds (2 mètres et plus) et ceci, quelle que soit l'architecture générale des systèmes (Köstler et al., 1968 ; Stone et Kalisz, 1991 ; Van Rees et Comerford, 1986 ; Canadell et al., 1996 ; Jackson et al., 1996 ; Polomski et Kuhn, 1998).

L'architecture du système racinaire est cependant très sensible aux conditions pédologiques comme la texture, la densité apparente, la stabilité structurale, la perméabilité et l'aération (Köstler et al., 1968 ; Levy, 1968 ; Berben, 1973 ; Belgrand, 1983 ; Fitter, 1987 ; Lucot, 1994). De ce fait, l'enracinement peut être entravé par différentes contraintes comme un facteur chimique, un facteur hydrique, ou un facteur physique.

Certaines contraintes sont un obstacle absolu (présence d'une roche massive, d'un horizon induré ou d'une nappe d'eau permanente). Dans ces conditions, la profondeur maximale d'enracinement correspond à la profondeur d'apparition de l'obstacle. Dans de nombreux cas cependant, les contraintes ne sont que relatives.

La compacité des horizons peut également être considérée comme une contrainte relative. Si à un accroissement de la compacité du sol correspond une diminution marquée du développement et de la ramification des racines (Berben, 1973 ; Thomas, 1999), l'augmentation progressive de la densité apparente avec la profondeur n'a pas la même influence sur l'enracinement qu'un changement brutal.

- **L'impact de la profondeur d'enracinement :**

L'introduction de la profondeur d'enracinement observée in situ conduit à une sous-estimation de la RU. D'une part, l'estimation de la densité racinaire sur un plan ne fournit pas obligatoirement une bonne image de la répartition volumique des racines aux faibles densités.

D'autre part, la notion de RFU est une simplification relative à un fonctionnement global. Si l'on veut prendre en compte la répartition racinaire, il faudrait intégrer les mécanismes complexes de transfert d'eau des zones non prospectées par les racines vers ces dernières, et des remontées capillaires des zones sous-jacentes. Ces mécanismes ne sont pas intégrés dans les modèles classiques de bilan hydrique basés sur la RFU. Un modèle de transfert multicouches serait nécessaire. Rechercher une précision en introduisant la mesure du front racinaire, peut conduire à des erreurs importantes, tout au moins dans ce type de sol.

Toutefois il est évident que des cultures à enracinement superficiel explorent une RU plus faible qu'une culture à enracinement profond.

III. 1. 3. L'humidité du sol :

L'humidité du sol joue un rôle important dans le maintien de la vie sur la Terre, sa première utilisation est de permettre la croissance de la végétation. Elle conditionne également la mise en place du peuplement végétal (germination des semences, émergence, implantation du système racinaire, etc.).

Surveiller l'humidité de sols améliore les décisions d'irrigation. Son évaluation est donc importante en hydrologie et en agronomie, et constitue un paramètre d'alerte pour la

désertification. Apporter seulement l'eau nécessaire à la plante au bon moment procure une vigueur accrue des plants, des rendements optimaux des cultures, une meilleure qualité des récoltes, une résistance des plantes aux maladies, une plus grande valorisation de l'eau et une diminution du coût de l'irrigation.

Elle est déterminée essentiellement par la valeur de la capacité au champ (volume maximal d'eau qu'un sol peut retenir) et de la valeur du point de flétrissement (volume minimal d'eau dans le sol pour qu'un plant ne meure pas).

L'humidité d'un sol peut être exprimée soit en humidité pondérale, soit en humidité volumique.

III. 1. 3. 1. L'humidité pondérale :

Elle est définie par la relation :

$$H_p = \frac{P_e}{P_s}$$

P_e : Poids d'eau.

P_s : Poids de sol sec.

III. 1. 3. 2. L'humidité volumique :

Elle est définie par la relation :

$$H_v = \frac{V_e}{V_s}$$

V_e : Volume d'eau.

V_s : Volume de sol.

On peut exprimer l'humidité volumique en fonction de l'humidité pondérale :

$$H_v = H_p \times D_a$$

Il est donc indispensable de connaître la densité apparente de la terre sèche lorsque l'on veut passer de l'humidité pondérale à l'humidité volumique ou inversement.

III. 1. 3. 3. La capacité au champ :

La capacité au champ c'est le volume maximal d'eau que peut retenir le sol dans les micro porosités, les macro porosités étant drainées. On parle aussi de capacité de rétention en eau du sol. La capacité de rétention de l'eau par un sol varie selon sa texture et sa compaction. La quantité d'eau disponible pour les cultures est différente d'un sol à un autre. Si on compare le sol à une éponge on pourra dire que c'est le moment où l'éponge est pleine, où elle ne goutte plus car toutes les porosités accessibles sont pleines. Pour connaître la capacité au champ de son sol, il faut attendre deux à trois jours de ressuyage après saturation du sol par les pluies et

faire la mesure avec un appareil de mesure de l'humidité. Il semble que ce pF puisse varier de 1,5 à 2,5 selon les types de sol et le climat.

Lorsque l'on explique les échanges d'eau dans le sol, on a l'habitude de comparer le sol à une éponge. Ainsi la capacité au champ s'obtient quand l'éponge est saturée d'eau et qu'elle ne goutte plus. Si l'éponge goutte cela signifie qu'il y a trop d'eau, l'eau est alors drainée en profondeur.

Cette eau est perdue pour le développement de la culture, elle ruisselle ou percole vers le sous-sol. Connaître la capacité au champ de sa parcelle est déterminant pour calculer la dose d'eau maximale à apporter à sa culture.

III. 1. 3. 4. Le point de flétrissement :

La définition du point de flétrissement permanent pour les plantes pose moins de difficulté, principalement parce que la teneur en eau varie peu dans le domaine de potentiel correspondant à cet état hydrique. Le point de flétrissement permanent est l'état hydrique du sol auquel les plantes ne peuvent plus puiser de l'eau et flétrissent de manière irréversible. On serre très fort l'éponge et plus une seule goutte d'eau s'en échappe.

Elle correspond à l'humidité pour laquelle la force de succion du sol équilibre la force de succion des cellules des racines : le débit d'eau du sol à la plante s'annule. C'est également une notion variable selon la nature de la plante. On convient en général de la définir comme correspondant à une pression de succion dans le sol de 15 atmosphères, bien que certaines plantes soient capables d'extraire par leurs racines de l'eau à des tensions bien supérieures.

L'humidité au point de flétrissement correspond approximativement au pF 4.2, cette humidité est plus délicate à mesurer. En l'absence des données précis on admettra qu'elle vaut la moitié de l'humidité à la capacité de rétention : $H_{pf} = 1/2 H_{cc}$.

III. 1. 3. 5. Humidité équivalente :

C'est la différence ($H_{cc} - H_{pf}$). Cette mesure est faite en laboratoire : on extrait l'eau d'un échantillon de sol à saturation, au moyen d'une centrifugeuse produisant une accélération de 1,000 fois l'accélération de la pesanteur pendant 30 mn.

III. 1. 3. 6. Humidité hygroscopique :

C'est l'humidité d'un sol séché à l'air. L'eau du sol est alors en équilibre avec la tension de vapeur d'eau dans l'air.

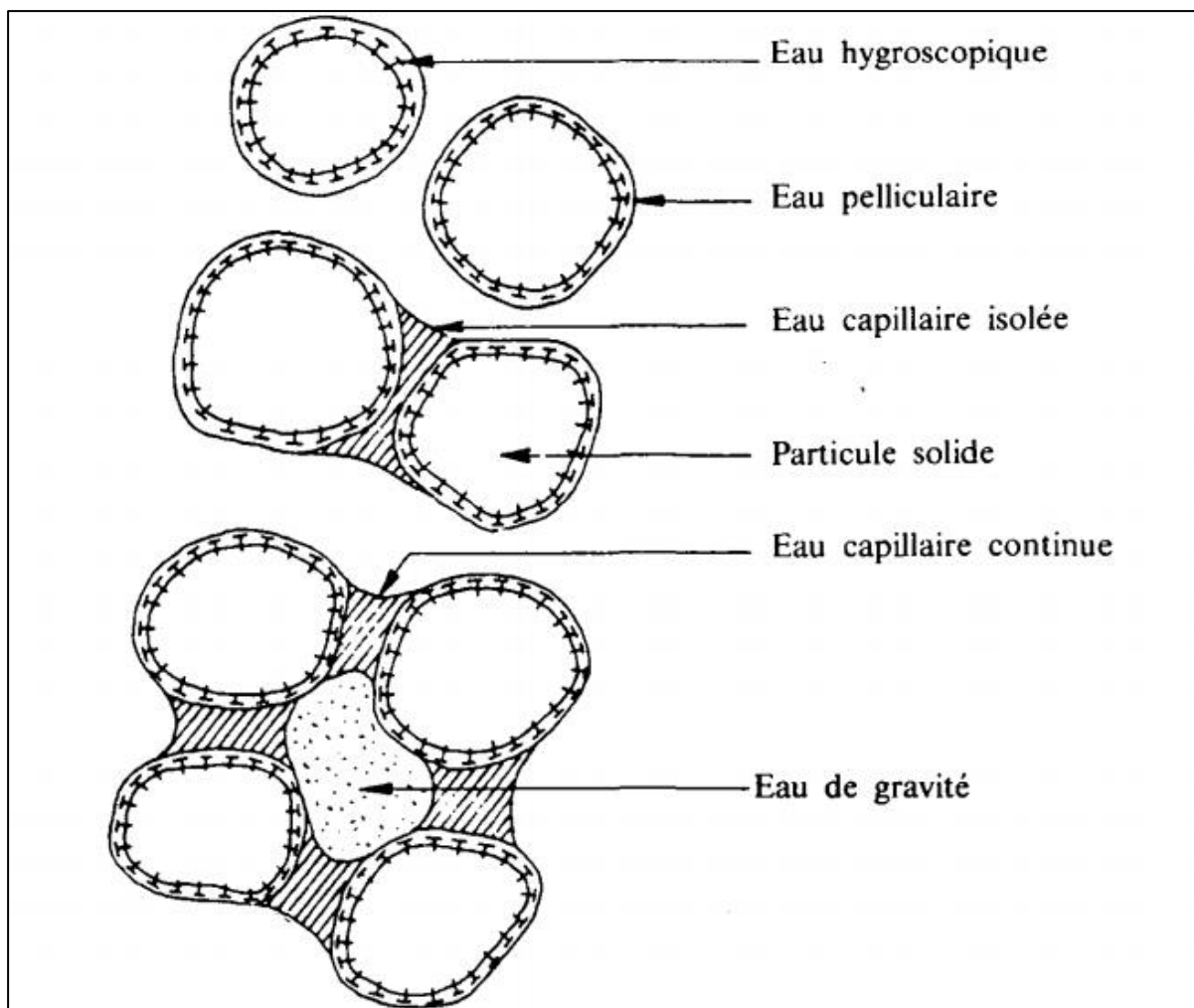


Fig. IV. 2 : Différents types d'eau dans le sol (CTA, 1976).

III. 1. 4. Potentiel hydrique :

Le potentiel hydrique correspond à l'énergie qu'il est nécessaire de fournir à l'unité de masse d'eau pure pour la faire passer, au cours d'une transformation réversible, de l'état d'eau libre à la pression atmosphérique, à l'état qu'elle a dans le système considéré.

Le potentiel hydrique ainsi défini est négatif en milieu non saturé (c'est généralement le cas de l'eau du sol) ; il est positif pour l'eau sous pression. La définition du potentiel hydrique fait qu'il s'exprime en principe en unités d'énergie par unité de masse, soit en Joules/kg dans le système MKSA.

Dans la pratique, on le rapporte à l'unité de volume d'eau, et il a la dimension d'une pression. On peut donc l'exprimer en atmosphères, en bars, en kg/cm^2 , ou en mètres de colonne d'eau. On parle alors plutôt de tension, que l'on donne généralement en valeur absolue, sans tenir compte du signe.

Le potentiel hydrique est la résultante de différents phénomènes agissant sur l'eau, et dont les plus importants sont :

- la pesanteur (Ψ_n) ;
- la tension superficielle et les phénomènes de capillarité (Ψ_m) ;
- le potentiel osmotique de l'eau (Ψ_o) ;
- le potentiel de turgescence (Ψ_t).

Le système est en équilibre lorsque le potentiel hydrique total est le même en tout point.

$$h = \Psi_n + \Psi_m + \Psi_o + \Psi_t = \text{constante.}$$

Le pF défini de la manière d'une échelle logarithmique des potentiels hydriques :

$$pF = \log h$$

h étant exprimé en centimètres de colonne d'eau.

- **Relation entre le pF et l'humidité du sol :**

La tension de l'eau du sol est évidemment en relation étroite avec sa teneur en eau : le pF varie en raison inverse de l'humidité du sol. La mesure du pF permet donc une mesure indirecte de l'humidité, à condition de tenir compte des points suivants :

- la relation tension-humidité est différente pour chaque type de sol : par exemple, pour les 2 mêmes valeurs de pF, les valeurs correspondantes de l'humidité seront d'autant plus importantes et présenteront entre elles des différences d'autant plus grandes, que la teneur en éléments fins sera plus élevée ;

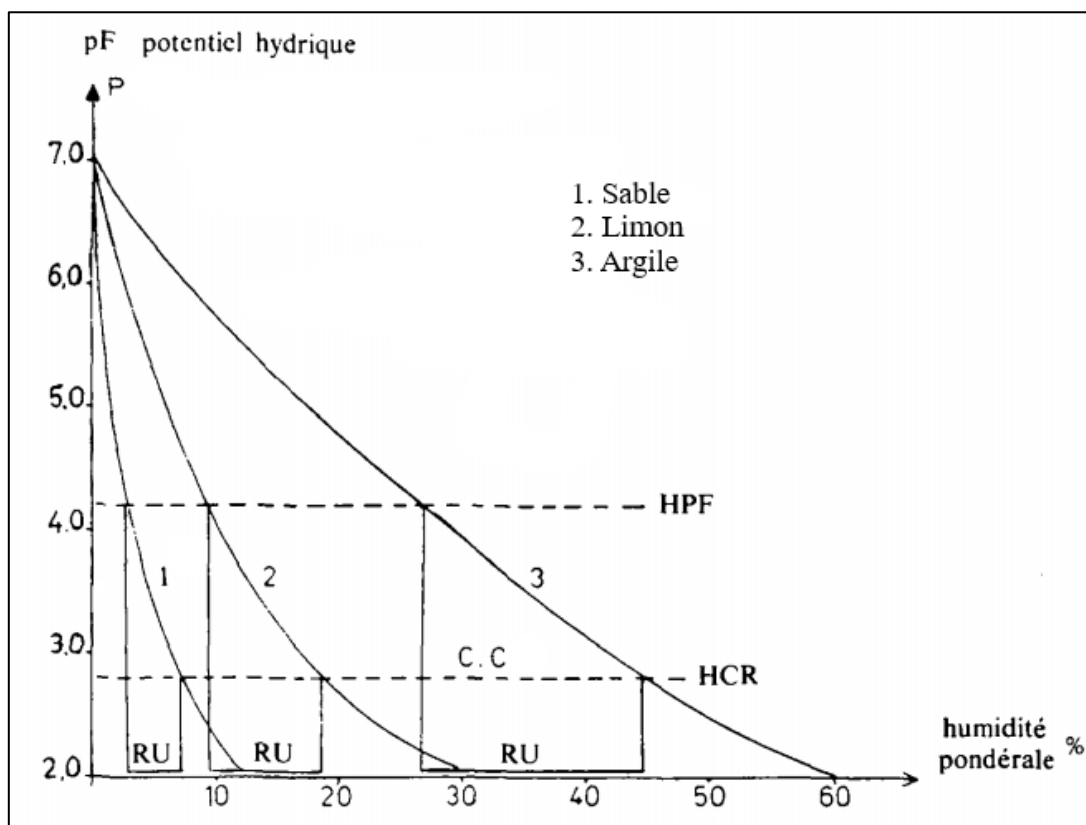


Fig. IV. 3 : Relation potentiel - humidité pour trois types de sol (CTA, 1976).

- cette relation n'est pas la même en phase d'humectation et en phase de dessiccation : pour une même valeur de l'humidité d'un sol, le pF est moins élevé dans la phase de réhumectation que dans la phase de dessiccation. On observe donc un retard ou « hystérésis ». Ce phénomène est très nettement marqué sur des sols riches en argiles, mais presque insignifiant sur des sols sableux ;

- enfin, toujours pour une même valeur d'humidité, le pF est d'autant plus élevé que la vitesse de dessèchement est plus rapide.

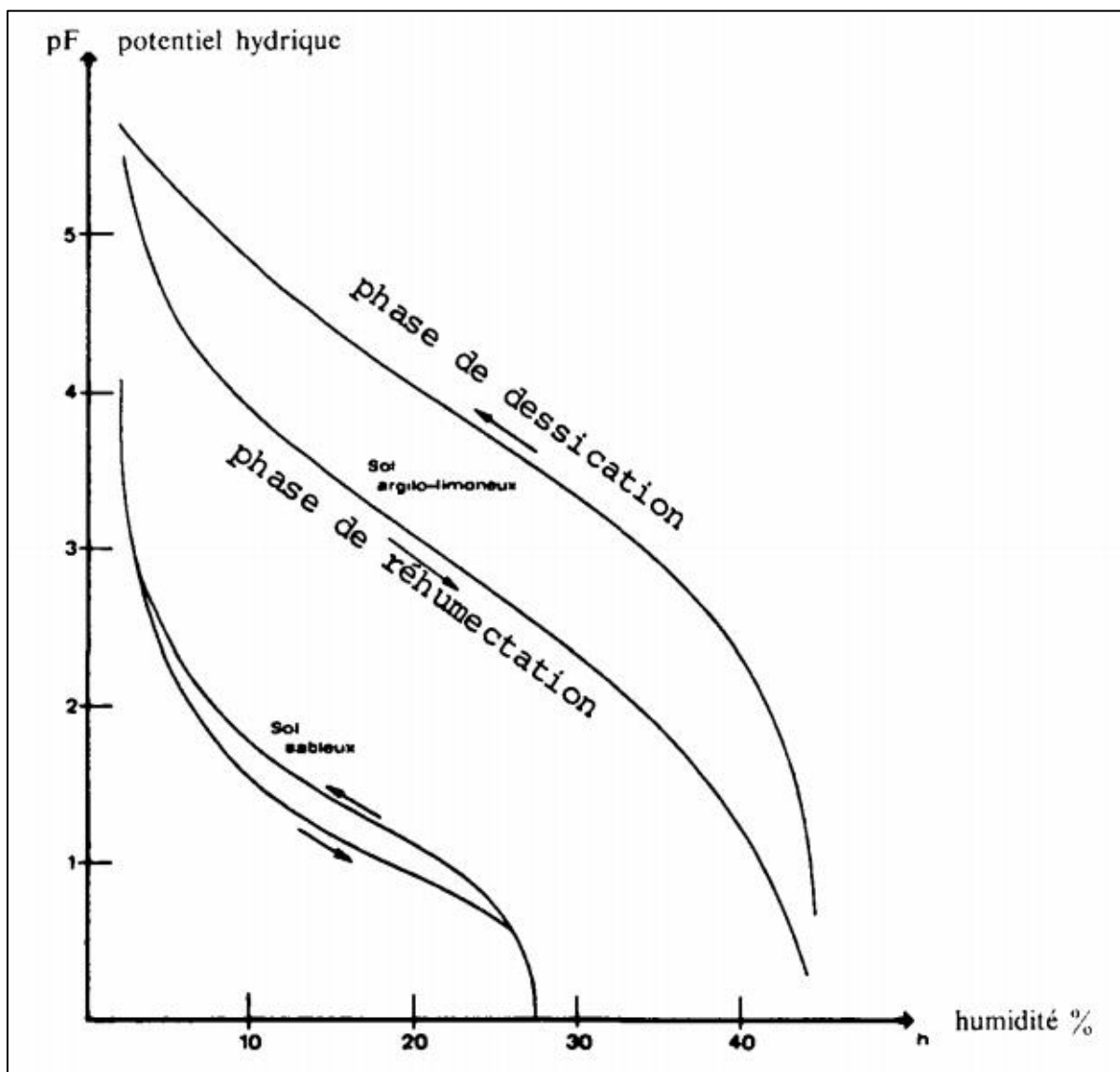


Fig. IV. 4 : Relation potentiel - humidité (effet d'hystérésis), (CTA, 1976).

III. 1. 5. La densité apparente :

La densité apparente est l'un des paramètres les plus importants dans les études portant sur la structure du sol. Elle est, en effet, liée à la nature et à l'organisation des constituants du sol (CHAUVEL, 1977). Elle permet en outre, de calculer la porosité et d'apprécier ainsi indirectement la perméabilité, la résistance à la pénétration des racines (MAERTENS, 1964),

la cohésion des horizons (YORO, 1983 ; YORO et ASSA, 1986) et la réserve en eau du sol (HENIN, MONNIER et GRAS, 1969).

Son étroite relation avec le type de structure fait qu'elle est faible dans "les sols à structure grumeleuse stable" comme le chernozem dont les agrégats sont en grumeaux (DUCHAUFOLJR, 1970). Dans les sols tropicaux, les horizons humifères, relativement structurés (de BOISSEZON, 1965) se caractérisent par des densités apparentes plus faibles que celles des horizons minéraux sous-jacents à structure massive (BLIC, 1975 ; KOUAKOU, 1981 ; YORO, 1983).

Sa connaissance peut permettre de déterminer ou d'orienter les travaux de préparation du sol tels que le labour, le sous-solage, le pulvérisage, le hersage.

Elle peut être évaluée au laboratoire sur des échantillons, ou sur le terrain dans des horizons en place selon que l'on veut déterminer la porosité texturale, la microporosité ou la macroporosité. Au laboratoire, sont essentiellement utilisées la méthode à la paraffine et à l'eau et la méthode au pétrole. Ces deux méthodes conviennent surtout pour la mesure de la densité apparente des mottes (VIZIER, 1971), des petits agglomérats (MONNIER, STENGEL et FIES, 1973) et des agrégats (YORO, 1983). Pour les mesures in situ, il existe quatre méthodes : la méthode au cylindre, la méthode au sable, la méthode au densitomètre à membrane et la méthode par gammamétrie.

Les descriptions, les avantages et les limites d'utilisation de ces méthodes, sont repris dans le Bulletin de Groupe de Travail édité par l'ORSTOM (AUDRY et al., 1973). Ce bulletin n'aborde malheureusement pas le problème de l'uniformité ou de la dispersion des densités apparentes déterminées dans un même sol ou horizon à partir de plusieurs méthodes. En outre, divers travaux (BERGER, 1964 ; COLLINET, 1988) mentionnant la porosité calculée à partir de la densité apparente, ne précisent pas laquelle des quatre méthodes de terrain a été utilisée. Certains travaux comme ceux de (BLIC, 1987) s'appuient sur les densités apparentes obtenues en utilisant alternativement deux méthodes. Or, au cours de quelques-unes de nos études (YORO, 1983 ; GODO et al., 1989) nous avons remarqué que pour un même horizon nous obtenons des densités apparentes sensiblement différentes lorsque nous utilisons simultanément la méthode au sable et la méthode au densitomètre à membrane. Nos constatations n'étant pas fondées sur une analyse statistique ne permettaient pas de dégager l'influence de la méthode sur la valeur de la densité apparente.

Cette étude est une contribution à la connaissance de la variation des valeurs mesurées de la densité apparente d'un sol ou d'un horizon donné en fonction des méthodes de mesure.

- **Principes des méthodes de terrain :**

Les principes de la méthode au cylindre (C), de la méthode au sable (S) et de la méthode au densitomètre à membrane (M) sont fondés sur la détermination du poids spécifique apparent d'un volume de sol prélevé.

Le volume est estimé immédiatement sur le terrain alors que le poids est évalué au laboratoire après séchage et pesée. La connaissance de ces deux variables permet de calculer la densité apparente selon la relation :

$$Da = Ps/Vt$$

Ps : le poids sec de l'échantillon,

Vt : le volume de l'échantillon prélevé et séché (cm³).

Des deux variables, le volume apparaît le plus important car sa détermination nécessite beaucoup d'attention et de doigté (AUDRY et al., 1973). Un geste en plus ou en moins et le volume est surestimé ou sous-estimé.

- **Application numérique :**

On réécrit la formule de Hallaire tenant compte la charge nulle en éléments grossiers et le rapport RFU / RU = 2/3 :

$$RU = (H_{cc} - H_{pf}) \times Da \times Z$$

Après les données obtenues au laboratoire étaient :

$$H_{cc} = 4.42 \text{ \%};$$

$$H_{pf} = H_{cc} / 2 = 2.21 \text{ \%};$$

$$Da = 1.27 \text{ g / cm}^3.$$

Pour une moyenne de profondeur de racines égale à 1 mètre :

$$RU = (0.0442 - 0.0221) \times 1.27 \times 1000$$

$$RU = 28.067 \text{ mm}$$

$$RFU = \frac{2}{3} \times 28.067$$

$$RFU = 18.71 \text{ mm}$$

Pour une moyenne de profondeur de racines égale à 60 cm :

$$RU = (0.0442 - 0.0221) \times 1.27 \times 600$$

$$RU = 16.8402 \text{ mm}$$

$$RFU = \frac{2}{3} \times 16.8402$$

$$RFU = 11.2268 \text{ mm}$$

III. 2. Estimation par les teneurs volumiques en eau :

La teneur en eau volumique correspond à la différence entre la teneur en eau à la capacité au champ (saturation de la microporosité) et au point de flétrissement permanent (Veihmeyer et Hendrickson, 1927). Cette définition fait appel à deux états caractéristiques de l'eau dans le sol, définis par les agronomes par une approche essentiellement statique, sur la fraction terre fine du sol.

$$\theta = (H_{cc} - H_{pf}) \times DA$$

Avec :

θ : le teneur en eau volumique ;

Les humidités pondérales caractéristiques n'ayant pas été mesurées sur les sols du réseau, il est nécessaire d'estimer les capacités en eau utile de chaque horizon à partir de leurs caractéristiques physico-chimiques pour accéder à la réserve utile de ces sols. Ces estimations ne sont pas triviales. Comme le constate Bastet (1999), nous n'avons encore qu'une connaissance très approximative des propriétés hydrauliques des sols à l'échelle du territoire national et notamment des propriétés de rétention en eau. A cette constatation, nous pouvons ajouter que la majorité des études ne concernant que des sols agricoles ou ne prenant pas en compte l'effet du mode d'occupation du sol sur ses propriétés hydriques ; sauf rares exceptions (Droogers et Bouma, 1997 ; Bigorre, 2000). L'examen de la littérature montre qu'il n'existe pas de résultats probants comparant et quantifiant les propriétés physiques des sols cultivés (Bigorre, 2000).

La réserve en eau des sols étant un paramètre important dans le calcul des bilans hydriques et minéraux, il nous a donc semblé nécessaire de rechercher plusieurs méthodes de calcul des teneurs en eau, non pas pour obtenir une valeur précise et absolue des réserves (celles-ci ne pouvant être connues que par l'application de méthodes lourdes), mais pour évaluer l'erreur potentielle introduite dans les calculs de bilans par les différentes méthodes d'estimation des réserves en eau. Ces méthodes sont classées en deux groupes :

- Les fonctions de pédotransfert (FPT).
- Les méthodes dites des coefficients de texture ;

Remarque :

Nous soulignerons ici l'absence de consensus sur les valeurs caractéristiques de potentiel hydrique.

La teneur en eau à la capacité au champ correspond à la teneur en eau du sol après ressuyage, lorsque tout écoulement gravitaire a cessé. Cette valeur ne peut théoriquement être déterminée qu'in situ. Les différents auteurs utilisent donc des valeurs d'humidité

correspondant à une capacité au champ déterminée au laboratoire qui varie selon les études, la nature des échantillons, etc. de -330 hPa (pF 2.5).

Le point de flétrissement permanent correspond au potentiel hydrique à partir duquel les racines ne peuvent plus extraire l'eau du sol. La valeur de pF 4,2 (-15 000 hPa) est communément admise par les agronomes pour les plantes cultivées et les semis forestiers.

III. 2. 1. Fonctions de pédotransfert :

Par le terme fonction de pédotransfert (FPT, Bouma, 1989), on entend toute fonction mathématique destinée à relier les propriétés de rétention en eau des sols à leurs caractéristiques physico-chimiques (texture, densité apparente, porosité, teneur en matière organique ou en carbone, capacité d'échange cationique, etc.). Un grand nombre de fonctions ont été publiées depuis les années 60, les unes permettant d'estimer des teneurs en eau à des valeurs ponctuelles de potentiel matriciel, d'autres permettant d'estimer de façon continue les quantités d'eau retenues en fonction du potentiel matriciel.

III. 2. 2. Méthode des coefficients de texture :

La méthode des coefficients de texture consiste à utiliser des tables proposant des moyennes elles-mêmes établies par plusieurs mesures d'humidités pondérales (à la capacité au champ et au point de flétrissement permanent) sur divers échantillons de sol.

III. 2. 2. 1. Estimations de Jamagne et al., (1977) :

Les résultats les plus souvent cités, et les plus couramment utilisés lorsqu'il est nécessaire de calculer une réserve utile en eau, sont ceux publiés par Jamagne et al., 1977. Des estimations moyennes de réserve en eau ont été proposées pour 15 classes de texture après des mesures sur plusieurs centaines d'échantillons prélevés dans le département. Cette méthode est intéressante pour classer hiérarchiquement les réserves potentielles de plusieurs solum mais elle reste assez grossière pour plusieurs raisons. Les mesures des teneurs en eau à la capacité au champ et au point de flétrissement ont été réalisées sur des échantillons remaniés (séchés et tamisés à 2 mm), or cette méthode détruit la structure du sol et ne reflète plus la porosité de celui-ci. Les coefficients proposés ne tiennent compte que de la texture des horizons ; la densité apparente, qui traduit la structure, n'est pas prise en compte, ni la charge en matière organique. Enfin, les valeurs de réserve en eau utile varient peu entre les différentes classes de texture (Bruand et al., 1996).

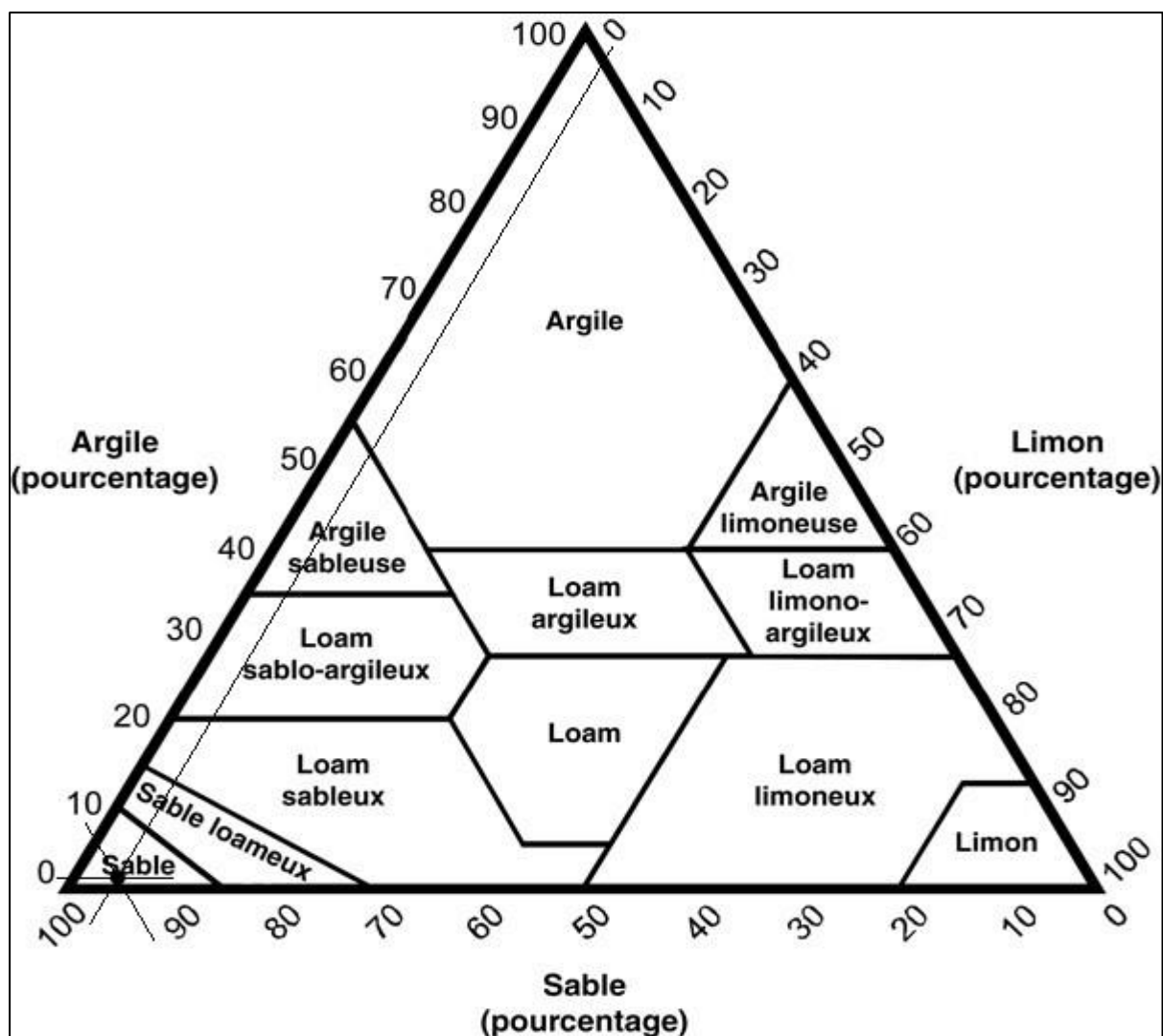


Fig. IV. 5 : Diagrammes de classification des textures (Jamagne, 1967)

Tab. IV. 2 : Tableau des coefficients de texture (Jamagne et al., 1977)

Texture	Hcc (g/100g)	HpF (g/100g)	Da (g/cm ³)	RU (mm/cm)
Sable	8	3	1.35	0.70
Sable limoneux	12	5	1.40	1.00
Sable argileux	19	10	1.50	1.35
Limon léger sableux	15	7	1.50	1.20
Limon sableux	19	9	1.45	1.45
Limon moyen sableux	20	9	1.45	1.60
Limon sablo-argileux	22	11	1.50	1.65
Limon argilo-sableux	24	12	1.45	1.75
Limon léger	17	8	1.45	1.30
Limon moyen	23	10	1.35	1.75
Limon argileux	27	13	1.40	1.95
Argile sableuse	33	22	1.55	1.70
Argile	37	25	1.45	1.75
Argile limoneuse	32	19	1.40	1.80
Argile lourde	33.5	21.5	1.40	1.675

$$RU = Da \times \frac{(Hcc - HpF)}{10}$$

RU : réservoir utilisable maximal en mm d'eau / cm de sol.

Hcc : humidité pondérale à la capacité au champ (pF = 2,5) ;

HpF : humidité pondérale au point de flétrissement permanent (pF = 4,2) ;

Da : densité apparente (g/cm³).

▪ **Application numérique :**

Selon la méthode de (Jamagne et al.), on calcule la RU par l'équation donnée ci-dessus en utilisant les paramètres de la région d'étude :

Hcc = 8 %;

HpF = 3 %;

Da = 1.35 g/cm³.

En appliquant l'équation :

$$RU = 1.35 \times (8 - 3) / 10$$

$$RU = 0.675 \approx 0.70 \text{ mm/cm}$$

On déduit la valeur de la RFU :

$$RFU = \frac{2}{3} RU$$

$$RFU = \frac{2}{3} \times 0.70$$

$$RFU = 0.4667 \text{ mm/cm}$$

Pour une moyenne de profondeur de racines égale à 1 mètre :

$$RFU = 0.4667 \times 100 = 46.67 \text{ mm}$$

Pour une moyenne de profondeur de racines égale à 60 cm :

$$RFU = 0.4667 \times 60 = 28 \text{ mm}$$

III.2. 2. 2. Estimation de Jamagne et Bétrémieux, (1992) :

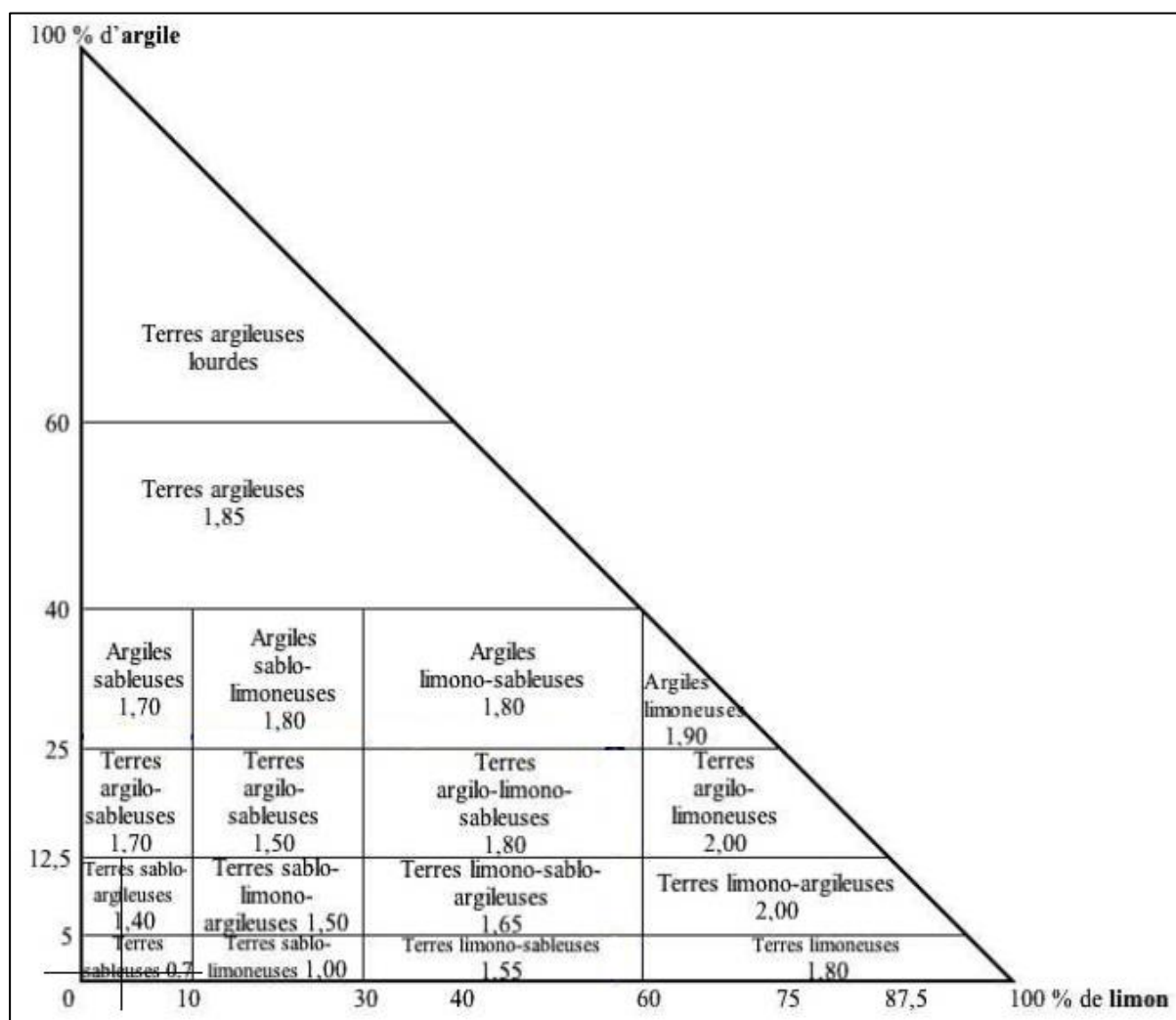


Fig. IV. 6 : Triangle de coefficient des textures Jamagne et Bétrémieux (1992)

On détermine la RFU max selon la profondeur du sol et l'enracinement de la culture.

On effectue une expérience pour déterminer la structure granulométrique du sol de la région :

On prend un échantillon du sol dans un récipient transparent, gradué, muni d'un système de fermeture et qui permet une lecture facile, on ajoute de l'eau, on ferme le récipient et on agite verticalement puis horizontalement pendant environ trois minutes jusqu'au mélange bien l'ensemble. Les particules solides commencent à sédimenter. On attend deux à trois jours pour que la quasi-totalité des particules solides soient au fond du récipient et que l'eau soit presque nette avec un taux négligeable d'impuretés (MO). A ce moment, on observe que les particules solides sont organisées en trois strates différentes qui sont du bas vers le haut, couche de sable, de limon et d'argile qui reste à la surface du mélange. On mesure la hauteur de chaque strate et on calcule son pourcentage :

(Hauteur de sables x 100) / hauteur totale = % de sables ;

(Hauteur de limons x 100) / hauteur totale = % de limons ;

(Hauteur d'argiles x 100) / hauteur totale = % d'argiles.

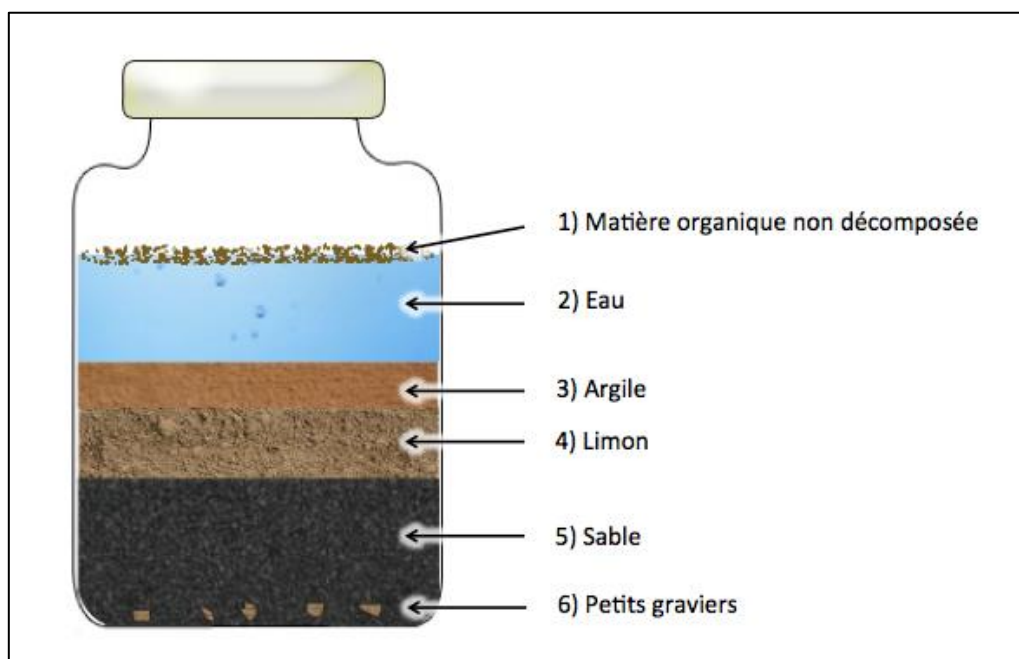


Fig. IV. 7 : Résultat virtuel de la superposition des strates composant le sol (GI, 2018)

D'après l'analyse granulométrique du sol de la région :

- sables : 96 %

- limons : 3 %

- Argiles : 1 %

Le triangle des textures indique : Terre sableuses ; RU = 0.7 mm/cm.

Sur 1 m de sol :

$$RU = 0.7 \times 100$$

$$RU = 70 \text{ mm}$$

Donc :

$$RFU = 46.67 \text{ mm}$$

Sur 60 cm de sol :

$$RFU = 28 \text{ mm}$$

III. 3. Estimation par la formule de Rawls :

Cette estimation est basée sur l'analyse granulométrique du sol. Elle utilise la formule suivante :

$$RU = (W_{330} - W_{15000}) \times Z$$

Avec :

W_{330} : la teneur en eau du sol à -330 hPa (mm/m), c'est-à-dire la capacité au champ :

$$W_{330} = 257.6 - (2 \times Sa) + (3.6 \times Ar) + (29.9 \times Mo)$$

W_{15000} : la teneur en eau à -15000 hPa (mm/m), c'est-à-dire le point de flétrissement :

$$W_{15000} = 26 + (5 \times Ar) + (15.8 \times Mo)$$

Ar : la teneur en argile (%) ;

Sa : la teneur en sable (%) ;

MO : la teneur en matière organique (%) ;

Z : l'enracinement (m).

▪ Application numérique :

D'après l'analyse granulométrique :

- sables : 96 % ;

- limons : 3 % ;

- Argiles : 1 %.

Avec un taux presque nul de matières organiques :

$$W_{330} = 257.6 - (2 \times 96) + (3.6 \times 1)$$

$$W_{330} = 62$$

$$W_{15000} = 26 + (5 \times 1)$$

$$W_{15000} = 31$$

On déduit la RU pour un enracinement d'1 mètre :

$$RU = (62 - 31) \times 1 = 31 \text{ mm}$$

On calcule la RFU :

$$RFU = \frac{2}{3} RU$$

$$RFU = \frac{2}{3} \times 31 = 20.67 \text{ mm}$$

Pour un enracinement de 60 cm :

$$RU = (62 - 31) \times 0.6 = 18.6 \text{ mm}$$

$$RFU = \frac{2}{3} \times 18.6 = 12.4 \text{ mm}$$

III. 4. Méthode empirique :

Dans cette méthode, on a essayé d'estimer la valeur de la réserve facilement utilisable par une procédure purement empirique sans mise en jeu des formules précédemment citées. Cette méthode était basée essentiellement sur la réalisation de certaines mesures saisonnières sur le terrain pour évaluer le volume de la lame d'eau remontée dans certains forages entre la période d'octobre à janvier. Le niveau de ce volume est affecté par plusieurs facteurs dont les précipitations, l'irrigation et l'assainissement qui implique l'augmentation de ce niveau. A l'opposé, il faut noter l'existence d'autres facteurs qui le diminuent (l'évapotranspiration).

Etant donné que le bassin versant caractérisant la région d'étude est, actuellement, de surface inconnue, on n'a pas pu déterminer le volume d'eau infiltré. La réalisation de ce processus était suspendue par une pénurie sévère des informations scientifiques relatives de l'étude avec un manque aigu de méthodes et de moyens techniques.

IV. CONCLUSION :

Au cours de ce chapitre, la base est d'utiliser les données théoriques pour estimer la valeur de la réserve facilement utilisable en s'appuyant sur quatre méthodes calculées axées autour de la texture du sol sableux (Formule de Hallaire, méthodes des coefficients de texture de Jamagne et al., et de Jamagne et Bétrémieux et la formule de Rawls). D'après ces méthodes, on a obtenu des résultats plus ou moins convergés ; la valeur de la RFU pour un enracinement d'un (01) mètre oscille entre 18.71 et 20.67 mm. Ce sont les résultats obtenus par les formules de Hallaire et de Rawls. Ce sont les estimations les plus significatives de la valeur de la RFU car elles représentent mieux les paramètres de la région d'étude. Pour notre région, la valeur de réserve utile maximale oscille entre 28.067 et 31 mm. C'est la valeur maximale d'eau que le sol peut conserver et qu'on ne doit pas dépasser au cours de l'irrigation pour éviter l'infiltration et donc le gaspillage.

On a essayé de trouver une estimation plus fiable et qui concerne plus la nature hyper aride et le sol sableux de la région par la réalisation de certaines mesures de terrain. Malheureusement, la procédure était suspendue par des obstacles techniques avec l'impossibilité de réduire le protocole expérimental qui nécessite une échelle temporelle significative pour obtenir le résultat souhaité.

CONCLUSION GENERALE

La vallée d'Oued-Souf est située dans le Sahara algérien, au Nord-Est du Grand Erg Oriental. Elle est limitée au Nord par la zone des Chotts, au Sud par l'extension de l'Erg Oriental, à l'Est par la frontière tunisienne et à l'Ouest par la vallée d'Oued-Righ. Elle s'étend sur une superficie approximative de 350 000 hectares,

Dans l'étude géologique, nous avons identifié la stratigraphie régionale, la géomorphologie du sous-sol, les reliefs et la tectonique caractérisant l'aire d'étude. La région de Souf est géologiquement particulière. Une série sédimentaire avec une lithologie variée dans le temps, mais régulière et homogène dans l'espace caractérise la région à cause des conditions tectoniques et paléogéographiques.

Le climat de la région est comme le climat saharien se caractérise par une température élevée (avec une moyenne de 21.56 °C) et un faible taux de précipitations (75.78 mm), d'une évaporation importante et d'un rayonnement solaire excessif.

L'évapotranspiration potentielle calculée par la formule de Thornthwaite nous donne 1190.67 mm, pour la période (1978 - 2013), l'évapotranspiration réelle est de 73.97 mm pour la même période. Elle de 79.74 selon la méthode de Turc. Ces résultats sont loin de la réalité, car elles sont basées sur des formules empiriques inadaptées à notre région. Le déficit est de 1,052.11mm.

L'analyse lithostartigraphique montre que le système hydrogéologique de la région est composé de trois nappes aquifères, la première correspondant au continental intercalaire d'âge Albien, la deuxième est représentée par le complexe terminal d'âge Miopliocène et la dernière qui surplombe les deux premières et qui correspond à la nappe libre.

L'examen de la carte piézométrique montre que le sens d'écoulement général des eaux souterraines est Sud-Ouest vers le Nord-Est. L'interprétation des essais de pompage par paliers et à longue durée qui a été effectué au niveau de Souf nous permet de définir les différents paramètres hydrodynamiques.

Pour une estimation convenable de la réserve facilement utilisable caractéristique de la région, nous avons étudié la structure et la texture du sol sableux pour pouvoir s'appuyer sur quatre méthodes calculées. D'après les estimations les plus significatives de la RFU, les formules de Hallaire et de Rawls indiquent que sa valeur est considérée entre 18.71 et 20.67mm

pour un enracinement d'un (1) mètre. Malheureusement, la réalisation de certaines mesures empiriques était suspendue par des obstacles techniques et temporelles.

L'estimation de cette valeur est une étape assez importante au cours de la planification de la gestion des ressources en eaux. Il est essentiel d'informer les agriculteurs de ce concept et de son importance pour adapter les méthodes d'irrigation selon ces données.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

A. Bruand, O. Duval, H. Gaillard, R. Darthout et M. Jamagne, (1995), Variabilité des propriétés de rétention en eau des sols : importance de la densité apparente.

Abbassa M, (1999), Coordonnées géographiques des wilayas d'Algérie.

Abdellatif.B, Cours de base sur l'irrigation.

AGRALIS SERVICES, (2016), L'irrigation et l'humidité du sol ; La capacité au champ et le point de flétrissement.

ANRH, (1989), (Agence Nationale des Ressources Hydrauliques), Interprétation des coupes géologique.

ANRH, (1989), Interprétation des coupes hydrogéologique.

ANRH, (1993), Log stratigraphique du Forage F1 dans l'Albien.

ANRH, (2005), L'extension de la zone agricole du Souf.

Baba.SY et al., (2006), Limite de l'aquifère du Complexe Terminale et Continental Intercalaire avec le niveau piézométrique et le sens d'écoulement.

BADEAU.V et ULRICH.E, (2008), L'estimation de la réserve utile en eau du sol et le calcul des volumes d'eau drainée.

BENSEDDIK.C, AOUADI, (2014), Contribution à l'étude de la qualité des eaux et l'évolution Piézométrique de la nappe phréatique d'Oued-Souf. Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de MASTER, Université Kasdi Merbah Ouargla.

BERTHOUMIEU.I, (2016), L'humidité du sol en l'agronomie.

Bouchet R.-. J. et M. Hallaire, (1964), La réserve hydrique du sol facilement utilisable, ses variations et sa signification. Comm. Colloque franco-polonais de l'aménagement et de l'économie de l'eau.

BOULIFA.K, (2012), Synthèse hydrogéologique sur la region d'El-Oued Sahara nord oriental - Est Algérien. Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de Magister en Géologie, Université Constantine 1.

Bousalsal.B, (2007), Récapitulatif des systèmes aquifères d'El-Oued.

Bréda N, Lefèvre Y, Badeau V, (2002), Réserves en eau des sols forestiers tempérés : spécificité et difficultés d'évaluation.

CORNET. A, Méthodes de détermination de la capacité de rétention en eau du sol. Rapport de stage du diplôme d'études approfondies de biologie végétale.

CTA, (1976), (Collection Techniques rurales en Afrique), Evaluation des quantités d'eau nécessaires aux irrigations.

DAHA.T, REGUIEGUE.K, (2017), Diagnostique et évaluation du risque d'échec d'une nouvelle stratégie de gestion des ressources en eau dans la vallée d'Oued-Souf (SE algérien). Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de MASTER, Université Echahid Hamma Lakhdar El-Oued.

Doorendos et Kassam, (1980), Le rapport RFU/RU et l'évapotranspiration.

DROUICHE.A, (2014), Impact de la remontée des eaux sur la qualité des eaux de la nappe phréatique et sur l'environnement dans la vallée du souf sud-est algérien. Thèse de Doctorat en Hydrogéologie, Université Badji Mokhtar Annaba.

DSA, (2017), (Direction Des Services Agricoles), Données sur les surfaces agricoles dans Oued-Souf.

GCHP2E, (2016), (Grande Culture à Hautes Performances Economiques et Environnementales). Comment évaluer simplement la Réserve Utile d'un sol ?

ITDAS, (L'Institut Technique de Développement de l'Agronomie Saharienne), Principes et méthodes sur la réserve utile et l'eau dans le sol.

Khechana.S, (2007), Etude de la gestion intégrée des ressources en eaux dans la vallée d'Oued-Souf, Mémoire de Magister en Hydrogéologie, Université Badji Mokhtar Annaba.

Khechana.S, (2014), Perspective et méthode de la gestion intégrée des ressources en eau dans une zone hyperaride. Application sur la vallée d'Oued-Souf (Sud-Est algérien). Thèse de Doctorat en Hydrogéologie, Université Badji Mokhtar Annaba.

Köstler et al., (1968), La profondeur d'enracinement et la réserve facilement utilisable.

Labidi. A, Bouthier. A, Cousin. I, (2016), Comment évaluer simplement la Réserve Utile d'un sol ?

PEIGNE.J, ISARA Lyon, Principes sur la réserve utile du sol.

Permaculture Design, (2016), Fiche technique gratuite : Tester son sol - Version 1.1 - Juin 2016.

Poirée et Ollier, (1962), Le rapport RFU/RU et les matières organiques.

SEGER M., TETEGAN M., PASQUIER C., GIOT G., NICOULLAUD B., COUSIN I.
Estimation de la teneur en éléments grossiers des sols à l'échelle parcellaire à partir de la mesure de résistivité électrique.

T. NGUYEN-MINH, (1966), Evapotranspiration et déficit en eau du sol.

UNESCO, (1972), Coupe hydrogéologique à travers le Sahara.

UNESCO, (1972), modifiée par Guendouz et al, (2003), Hydrogéologique du Sahara Septentrional.

VAUTHIER. Q, (2011), Estimation des réserves utiles des sols de Seine-et-Marne. Rapport de stage.

YORO. G et GODO. G, (1983), Les méthodes de mesure de la densité apparente Analyse de la dispersion des résultats dans un horizon donné.