

**UNIVERSITE KASDI MERBAH – OUARGLA -  
FACULTE DES SCIENCES DE LA NATURE ET DE LA VIE ET DES SCIENCES DE  
LA TERRE ET DE L'UNIVERS**

**Département des Sciences de la Terre et de l'Univers.**



**MEMOIRE DE FIN D'ETUDE**

*En Vue De L'obtention Du Diplôme de Master en Géologie*

Option : Hydrogéologie

**THEME**

**Apports de l'analyse statistique des données et la  
géostatistique non-paramétrique à l'étude hydro-chimique  
de la nappe du complexe terminal (CT) –Hassi Messaoud,  
Sud-Est algérien.**

*Soutenu publiquement par :*

**M. DJEGHOUBBI Rabah**

*Le 30/06/2013*

**Devant le jury :**

<b>Président :</b>	Dr. HABES Sameh	M. A. A Univ. Ouargla
<b>Promoteur :</b>	M. KECHICHED Rabah	M. A. B Univ. Ouargla
<b>Examineur :</b>	Dr. NEZLI Imed Eddine	M. C. A Univ. Ouargla

**Année Universitaire : 2012/2013**

# Dédicace

En cet honorable lien, d'un simple geste tracé par  
Écrire, mais qui jaillie du profond sentiment de reconnaissance,  
permettez-moi de citer les noms comme un mémorandum pour ceux  
qui ont une place particulière.

A L'âme de mon père

A mon très cher père

A mes très chers frères et sœurs

A tous mes cousins sans exception

A toute ma famille

A tous les ami(e)s.

A la promotion de la 2<sup>ème</sup> année MASTER Hydrogéologie 2012/2013.

A tous mes ami(e)s sans exception.

A tous les enseignants du département des sciences de la Terre et de  
l'Univers / l'universitaire Kasdi Merbah-Ouargla

A tous; je dédie cet ouvrage, qui est le fruit de mes études  
supérieures, et je prie ALLAH le tout puissant à le mettre au service  
des futures promotions, et qu'il sera une lumière sur mon  
parcours professionnel.

DJEGHOUBBI Rabah

## ***REMERCIEMENTS***

*Je voudrais remercier, en premier ALLAH le tout puissant de m'avoir donné la puissance et la force nécessaire pour achever ce travail.*

*Ce travail a été dirigé par Mr. KECHICHED Rabah, mon promoteur. Qu'il trouve ici le témoignage de mes profondes gratitude pour ses conseils, ses remarques et sa disponibilité tout au long de cette étude. Nous tenons à lui exprimer notre profonde reconnaissance pour la patience et la bienveillance dont elle a fait preuve.*

*Un grand merci aux membres de jury qui ont accepté d'examiner ce travail : Dr. HABES. S qui m'a fait l'honneur de présider le jury de soutenance. Dr. NEZLI Imed Eddine d'avoir accepté d'examiner ce travail.*

*Je voudrais remercier, à travers ce mémoire, tous les enseignants du département de Géologie 2012 /2013 qui nous ont constamment été d'un immense soutien tout au long de ce travail et j'adresse une pensée particulière, Mme HABES. S, Mr. MEDJANI Fathi, Mr. BELLEKSIR Mohammed, Mr. BOUSSELSSAL B, Mr. ZERROUKI Hichem.*

*Je voudrais présenter mes sincères remerciements les plus distingués à toute personne a contribué à cette formation.*

*Je tiens à remercier la subdivision de l'Hydraulique de Hassi Messaoud - OURGLA. Particulièrement le directeur Mr. HAMROUNI et Mr. SALHI. E. Ainsi le directeur Mr. Abd El Kader tout les travailleurs de l'ADE de Hassi Messaoud Je profite de l'occasion pour remercier vivement, Mr.BEN HAMIDA. S chef service à l'ANRH d'Ouargla et Mme. MESSAOUDI. S et Mme. MESSAI. Z laborantines à l'ANRH et l'ensemble du personnel du laboratoire des analyses physico-chimiques de l'ADE d'Ouargla.*



# RÉSUMÉ

## **Apports de l'analyse statistique des données et la géostatistique non-paramétrique à l'étude hydrochimique de la nappe du Complexe Terminal (CT) – Hassi Messaoud, Sud-Est algérien.**

Cette étude propose une caractérisation statistique et géostatistique du comportement chimique des eaux de la nappe du Complexe Terminal (CT) à Hassi Messaoud. Les eaux de cette nappe sont chlorurée sodique et sulfaté sodique. Les statistiques élémentaires ont été effectuées sur les analyses physico-chimiques des eaux de 18 forage. L'ACP a permis de mettre en évidence les associations entre les éléments physico-chimiques. Une projection d'individus sur le plan factoriel (F1F2) a montré deux (2) regroupements d'individus. Le premier regroupement représente les forages dont la nappe est de lithologie Sénonien-eocène, tandis que le deuxième regroupement représente le forage dont la lithologie est de nature Mio-pliocène. La géostatistique non-paramétrique a été effectuée sur les analyses du fluore. Un codage des concentrations a été faite pour une concentration de 2 mg/l. Le Krigeage d'indicateurs a permis d'estimer les probabilités I(2 mg/l) dans la nappe en modèle de nœud (200\*200 m). La cartographie automatique a permis de visualiser la répartition de la probabilité krigée pour la concentration en fluore de 2 mg/l. Ces résultats peuvent être utilisés au choix d'implantation des nouveaux forages.

**Mots clés :** Statistique ; ACP ; Krigeage d'indicateur ; Complexe terminal ; fluore.

# **ABSTRACT**

## **Contribution of statistical analysis and non-parametric geostatistics to hydrochemical study of groundwater Complex Terminal (CT) - Hassi Messaoud, southeastern Algeria.**

This study focused on statistical and geostatistical characterization of the chemical behavior of water in the water Complex Terminal (CT) at Hassi Messaoud. The water of this aquifer are: chloride sodium and sodium sulfate. The elementary statistics have been performed on the physico-chemical analysis of water from 18 boreholes. The ACP has shown the associations between physico-chemical elements. A projection of the individual on factors (F1F2) showed two (2) grouping of individuals. The first grouping indicates Senonian-Eocene lithology of aquifer, while the second represents Mio-Pliocene wells lithology of aquifer. The non-parametric geostatistics was carried on the analysis of fluorine. Coding concentrations was made on for 2 mg/l. The indicator Kriging was used to estimate the probabilities of I (2 mg / l) in the water of aquifer using bloc model (200 x 200 m). The automatic mapping is used to visualize the distribution of the probability kriged of fluorine concentration of 2 mg/ l. These results can be used in the choice of location of new drilling borehole.

Keywords: Statistics, ACP; Indicator Kriging; Complex Terminal; Fluoride.

مساهمة التحليل الإحصائي والجيولوجي غير حدودي إلى الدراسة الهيدرولوجية للمياه الجوفية الطرفية مجمع

(CT) -

وتقترح هذه الدراسة توصيف الإحصائية والإحصاءات الجغرافية من السلوك الكيميائي للمياه مجمع المياه (CT)

في حاسي مسعود. مياه هذه الشبكة غنية إلى حد ما بكبريتات الصوديوم والصدويوم. وأجريت إحصاءات التحليل الكيميائي لمياه آبار مدينة حاسي مسعود (18 ) ACP الجمعيات بين العناصر

الفيزي كيميائية. وأظهر الإسقاط (FIF2) اثنين (2) الإحصائية. فيها

مياهاها السينونيا و الايوسان ، في حين أن المجموعة الثانية الميوليوسان (Moi-pliocène).

تم تنفيذ الجيواحصاء غير حدودي خارج على تحليل الفلور. وقدم تركيزات الترميز على تركيز قدره 2 / .

الكريجاج المؤشر لتقدير احتمالية وجود 2 / و تم نمذجته (200 × 200).

الاوتوماتيكية تم استخدامها لظهار توزيع تركيز الفلور من 2 ملغ / لتر. هذه النتائج، ويمكن استخدامها في اختيار

موقع الحفر الجديد .

: الإحصائيات، ACP الكريجاج الـ

# SOMMAIRE

Dédicace.....	i
Remerciement.....	ii
Résumé.....	iii
Abstract.....	iv
.....	v
SOMMAIRE.....	vi
Liste des Figure.....	xi
Liste des Tableaux.....	xiv
INTRODUCTION GENERALE.....	1
<b>Chapitre 1 : Cadre physique</b>	
1. 1. INTRODUCTION.....	3
1. 2. SITUATION GEOGRAPHIQUE .....	3
1.3. GEOLOGIE DE LA ZONE.....	4
1.4. METHODOLOGIE DES TRAVAUX GEOLOGIQUES.....	7
1.5. STRATIGRAPHIE.....	8
1.5. 1. Paléozoïque.....	8
1.5. 1. 1. Le socle.....	8
1.5. 1. 2. L'infra-Cambrien.....	8
1.5. 1. 3. Cambrien.....	8
1.5. 1. 4. Ordovicien.....	10
1. 5. 2. Mésozoïque.....	11
1. 5. 2. 1. Trias.....	11
1. 5. 2. 2. Roche éruptive du Trias.....	11
1.5. 2. 3. Jurassique.....	11
1.5. 2. 4. Crétacé.....	12
1.5. 3. Cénozoïque.....	13
1.5. 3. 1. Eocène.....	13
1.5. 3. 2. Moi-pliocène.....	13
1. 6. CONCLUSION.....	13

## Chapitre 2 : Climatologie

2. 1. INTRODUCTION.....	14
2. 2. Contexte climatique	
2. 2. 1. Pluviométrie.....	14
2. 2. 2. Températures.....	15
2. 2. 3. L'humidité relative.....	16
2. 2. 4. La vitesse du vent.....	16
2. 2. 5. Durée d'insolation.....	17
2. 2. 6. L'évaporation.....	18
2. 2. 7. Diagramme pluvio-thermique de GAUSSEN.....	19
2. 2. 7. 1. Indice d'Aridité de DEMARTONNE.....	20
2. 2. 8. Interprétation du bilan hydrique.....	21
2. 3. CONCLUSION.....	24

## Chapitre 3 : Hydrogéologie

3. 1. INTRODUCTION .....	25
3. 2. ASPECT HYDROGEOLOGIQUE.....	25
3. 2. 1. Définition des aquifères.....	26
3. 2. 1.1. Complexe Terminal (C.T).....	26
a) Géologie de la nappe.....	26
b) Alimentation de la nappe.....	27
c) Ecoulement et exutoire.....	28
3. 2. 1. 2. Continental Intercalaire (C.I).....	30
3. 2. 2. Caractéristiques hydrodynamiques du Complexe Terminal.....	34
3. 2. 2. 1. Transmissivité (T).....	34
3. 2. 2. 2. Coefficient d'emmagasinement (S).....	34
3. 2. 2. 3. Carte piézométrique et Interprétation.....	34
3. 3. CONCLUSION.....	37

## Chapitre 4 : Hydrochimie

4. 1. INTRODUCTION.....	38
4. 2. LES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES.....	38
4. 2. 1. La Température (T).....	38
4. 2. 2. Le potentiel d'hydrogène (pH).....	39

4. 2. 3. La conductivité électrique (CE).....	39
4. 2. 4. Les cations ( $\text{Ca}^{++}$ , $\text{Mg}^{++}$ , $\text{Na}^+$ , $\text{K}^+$ ).....	40
4. 2. 4. 1. Le calcium ( $\text{Ca}^{++}$ ).....	40
4. 2. 5. Les anions ( $\text{Cl}^-$ , $\text{HCO}_3^-$ , $\text{SO}_4^-$ , $\text{CO}_3^-$ , $\text{NO}_3^-$ ).....	42
4. 2. 5. 1. Le chlorure ( $\text{Cl}^-$ ).....	42
4. 2. 5. 2. Les bicarbonates ( $\text{HCO}_3^-$ ).....	43
4. 2. 5. 3. Les sulfates ( $\text{SO}_4^-$ ).....	43
4. 2. 5. 4. Les Nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ).....	44
4. 2. 6. La dureté totale (DHT).....	44
4. 2. 7. Le résidu sec (R.S).....	44
4. 2. 8. Fluore (F).....	45
4. 2. 9. Teneurs en ions majeurs.....	46
4. 3. CLASSIFICATION ET REPRESENTATION GRAPHIQUE DES EAUX.....	46
4.3.1. Etablissement de la formule caractéristique des eaux selon STABLER.....	46
4. 3 .2. Représentation graphique des eaux sur le diagramme de PIPER.....	48
4. 3. 3. Potabilité des eaux.....	49
4. 3. 4. Aptitude des eaux à l'irrigation.....	50
4. 4. CONCLUSION.....	53

## **Chapitre 5 : Matériel et Méthode**

5. 1. INTRODUCTION.....	54
5.2. MATERIEL ET DONNEES.....	54
5. 2. 1. Description des données utilisées.....	54
5. 2. 2. Logiciels utilisées.....	54
5. 2. 2. 1. Logiciel "EXCEL".....	55
5. 2. 2. 2. Logiciel "VARIOWIN. 2".....	56
5. 2. 2. 3. Logiciel " GEOSTATISTICAL TOOLBOX".....	56
5. 2. 2. 4. Logiciel "STATISTICA. 6".....	56
5. 2. 2. 5. Logiciel SURFER 9".....	56
5. 3. METHODES STATISTIQUES ET GEOSTATISTIQUES UTILISEES.....	56
5. 3. 1. Méthodes statistiques.....	56
5. 3. 1. 1. Analyse de données mono-variée.....	56
5. 3. 1. 2. Analyse de données bi-variée.....	57
5. 3. 1. 3. Analyse de donnée multivariée .....	58

5. 3. 2. Méthodes d'estimation géostatistiques.....	62
5. 3. 2. 1. Historique.....	62
5. 3. 2. 2. Notions de la géostatistique.....	63
5. 3. 2. 3. Variogramme.....	64
a) Propriétés du variogramme directionnel.....	65
b) Schéma théorique et ajustement des variogrammes.....	66
5. 3. 2. 4. La variance d'estimation.....	67
5. 3. 2. 5. L'estimation par la méthode géostatistique.....	68
a) Système de krigeage ordinaire.....	68
5. 4. GEOSTATISTIQUE NON PARAMETRIQUE - KRIGEAGE DES INDICATRICES	69
5. 4. 1. Définition du variable régionalisée.....	69
5. 4. 2. Krigeage disjonctif.....	70
5. 5. CONCLUSION.....	70

## **Chapitre 6 : Résultats et discussions**

6. 1. INTRODUCTION.....	71
6. 2. ANALYSE DES DONNEES STATISTIQUE.....	71
6. 2. 1. Statistique élémentaire.....	71
6. 2. 2. Traitement statistique bi-varié.....	71
6. 2. 3. Traitement statistique multi-varie - Analyse en Composantes Principale...	73
6. 2. 3. 1. Diagonalisation, calcul des facteurs de charges et tracé des cercles de corrélation.....	73
6. 2. 3. 2. Interprétation des résultats de l'ACP.....	75
6. 2. 3. 3. Projection des individus sur les facteurs de charges F1F2.....	77
6. 3. GEOSTATISTIQUE NON PARAMETRIQUE - KRIGEAGE DES INDICATRICES...	78
6. 3. 1. Codage des indicatrices relatives.....	78
6. 3. 2. Variographie d'indicatrices.....	79
6. 3. 2. 1. Variogramme de surface.....	79
6. 3. 2. 2. Variogramme horizontal.....	80
6. 3. 3. Krigeage des indicatrices relative pour de I(2).....	81
6. 3. 3. 1. Krigeage de I (2mg/l).....	81
a) Paramètre du krigeage des indicatrices.....	81
6. 3. 3. 2. Cartographie automatique des résultats obtenus.....	82
6. 4. Conclusion.....	85

CONCLUSION GENERALE.....	87
BIBLIOGRAPHIE.....	88
ANNEXE.....	91



## Liste des figures

Fig. 1: Situation géographique du champ de HASSI MESSAOUD (WEC, 2007).....	05
Fig. 2: Situation géographique du champ de HASSI MESSAOUD (WEC, 2007).....	06
Fig. 3: Colonne stratigraphique du champ de Hassi Messaoud (Sonatrach /DP, 2005).....	09
Fig. 4: Répartition annuelle des pluies à Ouargla sur la période 1990-2011(ONM).....	15
Fig. 5 : Températures moyennes mensuelles à Ouargla (Période 1990 – 2011) (ONM).....	15
Fig. 6 : Humidité moyenne en (%) (1990-2011).....	16
Fig.7 : La vitesse du vent en (m/s) à Ouargla (1990-2011).....	17
Fig. 8 : Durée moyenne mensuelle d’insolation en heures - Station d’Ouargla (1990-2011).....	18
Fig. 9 : Evaporation moyenne mensuelle en (mm) Station d’Ouargla (1990-2011) (ONM).....	19
Fig. 10 : Diagramme pluvio-thermique de GAUSSEN.....	19
Fig. 11 : Moyenne pluriannuelle des éléments climatiques.....	23
Fig. 12 : RFU, Excédent et Déficit en (mm).....	24
Fig. 13 : Aquifères du Sahara septentrional, (ANRH 2004).....	26
Fig. 14 : Carte piézométrique de référence du Complexe Terminal (OSS, 2003).....	29
Fig. 15: Carte piézométrique de référence du CI (OSS, 2003).....	31
Fig. 16 : Coupe hydrogéologique synthétique du Sahara septentrionale (UNESCO 1972).....	32
Fig.17 : Log hydrogéologique de la région de Hassi Messaoud du Complexe Terminal (ANRH, 2004)..	33
Fig. 18 : Variogramme de la piézométrie du Complexe terminal (CT) Hassi Messaoud.....	35
Fig. 19: Carte piézométrique du la nappe de CT de Hassi Messaoud.....	36
Fig. 20 : Histogramme de la variation de (pH) dans les forages de la nappe du CT- Hassi Messaoud.....	39
Fig. 21 : Histogramme de la variation de la conductivité (CE) dans les forages de la nappe du Complexe Terminal – Hassi Messaoud.....	40
Fig. 22 : Histogramme de la variation du calcium (Ca <sup>++</sup> ) dans les forages de la nappe du Complexe Terminal - Hassi Messaoud.....	40
Fig. 23 : Histogramme montre de la variation du Magnésium (Mg <sup>++</sup> ) dans les forages de la nappe du Complexe Terminal - Hassi Messaoud.....	41
Fig. 24 : Histogramme montre de la variation du Sodium (Na <sup>+</sup> ) et potassium (K <sup>+</sup> ) dans les forages de la nappe du Complexe Terminal - Hassi Messaoud.....	42

Fig. 25 : Histogramme montre la variation des chlorures (Cl <sup>-</sup> ) dans les forages de la nappe du Complexe Terminal - Hassi Messaoud.....	42
Fig. 26 : Histogramme montre la variation des bicarbonates (HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) dans les forages de la nappe du Complexe Terminal de la région de Hassi Messaoud.....	43
Fig. 27 : Histogramme montre la variation de (SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> ) dans les forages de la nappe du Complexe Terminal de la région de Hassi Messaoud.....	44
Fig. 28 : Histogramme montre les variations de (R.S) dans la nappe du Complexe Terminal de la région de Hassi Messaoud.....	45
Fig. 29 : Histogramme montre les variations de (F) dans la nappe du Complexe Terminal de la région de Hassi Messaoud.....	45
Fig. 30 : Diagramme de piper (Nappe du Complexe terminal de Hassi Messaoud 2013).....	48
Fig. 31 : Diagramme de Wilcox et Wilcox log des forages de la nappe Complexe Terminal de la région de Hassi Messaoud.....	51
Fig. 32 : Plan de forage de la nappe Complexe Terminal de la région de Hassi Messaoud.....	55
Fig. 33: Représentation géométrique des données.....	58
Fig. 34 Représentation géométrique d’inertie des points Xi (i=1 à n) par rapport au point P. ....	60
Fig. 35 : Représentation d’un nuage de points et les principaux axes d’allongement (Axes factoriels).....	60
Fig. 36 : Exemple d’une représentation des variables sur le plan des facteurs de charge d’une ACP normée.....	62
Fig. 37 : Représentation schématique des points de mesure de la variable.....	64
Fig. 38 : Estimation du variogramme.....	65
Fig. 39: Représentation graphique du variogramme.....	65
Fig. 40 : Schémas théoriques d’ajustement des variogramme In (Marcotte, 1997).....	66
Fig. 41 : Cercles de corrélation sur le plan des facteurs F1 F2 des eaux du complexe Terminal (CT) de la région de Hassi Messaoud.....	76
Fig. 42 : Cercles de corrélation sur le plan des facteurs F1 F3 des eaux du complexe Terminal (CT) de la région de Hassi Messaoud.....	76
Fig. 43 : Projection des individus (forage) dans le plan F1 F2 de la nappe du Complexe Terminal (CT) – Hassi Messaoud.....	77
Fig. 44 : Variogramme de surface de I (2 mg/l).....	79
Fig. 45 : Le variogramme horizontal moyen d’indicatrice I(2 mg/l) en F Direction :0 <sup>0</sup> ±90 <sup>0</sup> .....	80
Fig. 46 : plan de Krigeage relative de la concentration I (2).....	81

Fig. 47 : Carte des d'indicatrices (probabilités) krigées pour une concentration de fluore supérieur ou égale 2mg/l.....	83
Fig. 48 : Carte des variances de Krigeage.....	84

## Liste des Tableaux

Tableau. 1 : Précipitations moyenne mensuelle (mm), période (1990-2011).....	14
Tableau 02 : Température moyenne mensuelle (°c), période (1990-2011).....	15
Tableau 03 : Humidité moyenne mensuelle (%) (1990-2011).....	16
Tableau 04 : Vitesse du vent en (m/s) de la période (1990-2011).....	17
Tableau 05 : Durée moyenne mensuelle d'insolation en heures, de la période (1990-2011).....	18
Tableau 06 : Evaporation moyenne mensuelle en (mm) Période (1990-2011).....	18
Tableau. 07 : Classification des climats en fonction de la valeur de l'indice de DEMARTONNE.....	20
Tableau 08: Indice d'Aridité de DEMARTONE.....	20
Tableau 09 Bilan hydrique établi selon la méthode de THORNTHWAITE à la station d'Ouargla (1990-2011).....	22
Tableau 10: Données générales sur la nappe du Continental Intercalaire. (ANRH, 2004).....	30
Tableau. 11 : Variations des teneurs en éléments majeurs des eaux de la nappe du Complexe terminal de la région de Hassi Messaoud.....	46
Tableau. 12 : Pourcentage de fréquence des faciès chimiques de la nappe du Complexe terminal de la région de Hassi Messaoud.....	47
Tableau. 13 : Faciès des eaux de la nappe du Complexe Terminal de Hassi Messaoud d'après STABLER par forage.....	47
Tableau. 14 : Substances chimiques influant sur la potabilité de l'eau. Normes applicables aux normes destinées à l'alimentation humaine. (OMS, 1994).....	49
Tableau. 15 : Classification des eaux par degrés d'aptitude à l'irrigation par la méthode du S.A.R....	52
Tableau. 16: Exemple de données sur les paramètres physicochimiques de 5 forages de la nappe de Complexe Terminal de la région de Hassi Messaoud.....	58
Tableau. 17 : Exemple de facteurs de charge.....	61
Tableau. 18 : Paramètres statistiques des éléments chimiques à partir des données de la nappe de Complexe Terminal de la région de Hassi Messaoud.....	72

Tableau. 19 : Matrice de corrélation des éléments chimiques calculée sur l'ensemble des échantillons de Complexe Terminal de Hassi Messaoud.....	73
Tableau. 20 : Poids factoriel sur les paramètres physicochimiques à partir des données de forage de la nappe du complexe terminal de la région de Hassi Messaoud.....	74
Tableau. 21: Valeurs propres et variances des facteurs de charges des eaux de la nappe du Complexe Terminal Hassi Messaoud.....	74
Tableau. 22 : Cordonnées des individus (forage) sur les facteurs de charges.....	74
Tableau. 23: Codage des concentrations du fluore analysée en mai 2013.....	79
Tableau. 24. : Statistiques du krigeage d'indicatrice.....	81

# Introduction Générale

---

La région de Hassi Messaoud représente le pôle de l'économie nationale, avec l'immense rente pétrolière. Cette région industrielle a fait l'objet de plusieurs travaux géologiques qui sont axés surtout, sur l'exploration et le développement du secteur pétrolier.

Ville de Hassi Messaoud a connu un développement pro grade d'habitation qui ne cesse pas à augmenter surtout auprès les entreprises pétrolières. L'eau, facteur clé de la vie et pour le bon déroulement des activités industrielles. Cette eau devient un enjeu primordial sur le plan quantité et qualité. La zone de Hassi Messaoud s'approvisionne des puits de la nappe du complexe Terminal (CT). Ces eaux ne sont pas renouvelables d'où la nécessité de l'exploiter rationnellement et de penser aux futur générations. Cette région néanmoins l'importance économique n'a pas fait l'objet des études complètes sur la qualité des eaux.

Ce mémoire présenté en vue de l'obtention de diplôme de master, propose une étude hydro chimique des eaux du complexe terminal de cette région. L'approche de l'analyse des données statistique mono et multivariée est d'avantage utilisée pour ressortir les principales caractéristiques hydro chimique. En outre, l'utilisation de la méthode géostatistique non-paramétriques (Krigage d'indicatrices) représente une contribution à la modélisation de répartition des éléments chimiques telque le fluore. Ce dernier représente la variable régionalisée qui a été krigées et cartographiée.

Pour arriver à ces objectifs suscités, il a été nécessaire d'effectuer un ensemble de travaux géologique, de laboratoire et traitement en utilisant des logiciels de calcul statistique et géostatistique. Ces travaux s'articulent sur :

- L'étude de la géologie afin de caractériser le cadre physique de notre zone d'étude ;
- La compilation des données d'analyses physico-chimiques des forages d'eau de la région de Hassi Messaoud auprès l'ANRH et ADE.
- L'échantillonnage et l'analyse sur les éléments physico-chimiques;

- La caractérisation hydro chimique classique à l'aide des diagrammes et la précision des faciès des eaux.
- L'analyse des données statistique mono, bi variée et multivariée afin de décrire les corrélations possibles entre les éléments chimiques.
- L'élaboration d'un plan de Krigeage d'indicatrices (géostatistique - non paramétrique) sur la distribution des concentrations du fluor, une concentration indicatrice de 2 mg/l.

Ce mémoire est rédigé en 6 chapitres :

- Le premier chapitre est consacré à la géologie du secteur d'étude ;
- Le deuxième chapitre aborde la climatologie ;
- Le troisième chapitre sera clarifier pour aborder le contexte hydrogéologique ;
- Le quatrième chapitre est réservé à l'étude hydro chimique;
- Le cinquième chapitre présente l'ensemble des données et les méthodes utilisées ;
- Le sixième chapitre est consacré aux résultats et discussions à la faveur du traitement statistique et géostatistique.

La conclusion va reprendre l'ensemble des résultats obtenus.

# Cadre physique

---

## 1. 1. INTRODUCTION

Le Sahara algérien constitue, jusqu'à présent, l'objet de multiples études universitaires, d'articles scientifiques et de rapports techniques. Entre autres, des études ont porté sur la reconnaissance géologique (Bel et Dermagne, 1966 ; Busson, 1966 ; 1970 ; 1971 ; Fabre, 1976.

Nous présentons dans ce chapitre consacré au cadre physique de la zone, la situation géographique. Un aperçu la géologie du champ de Hassi Messaoud Sud-Est algérien.

## 1. 2. SITUATION GEOGRAPHIQUE

La zone d'étude est localisée à Hassi Messaoud. Elle est considérée, le pôle de l'économie nationale, avec la production des hydrocarbures. En effet, cette région renferme l'un des plus grands gisements dans le monde. Il fait partie d'un ensemble de structures formant la partie Nord de la province triasique, Il se situe à environ 850 km Sud-est d'Alger, à 350 km de la frontière tunisienne. (Fig. 1) (Abbas hadj Abbas, 2011). Sa localisation :

- En coordonnées géographiques :
  - Au nord par latitude  $32^{\circ} 15'$
  - A l'ouest par la longitude  $5^{\circ} 40'$
  - Au Sud par latitude  $31^{\circ} 30'$
  - A l'Est par la longitude  $6^{\circ} 35'$

### **1.3. GEOLOGIE DE LA ZONE D'ETUDE**

La géologie de la région de Hassi Messaoud est connue grâce à l'effort de l'exploration pétrolière mené par la compagnie nationale des hydrocarbures Sonatrach et ses partenaires.

Le dôme de Hassi Messaoud est le résultat d'une histoire paléo tectonique assez compliquée, c'est le prolongement de la dorsale d'Amguid El Biod qui a plus de 800 km de long. Sa structure fait partie d'un ensemble de structures formant la province triasique Nord orientale. Géologiquement, il est limité (Fig. 2) :

- A l'Ouest par la dépression d'Oude M' ya.
- Au Sud ce prolonge le môle d'Amguid El Biod.
- Au Nord par la structure Djamaa-Touggourt.
- A l'Est par les hauts fonds de Dahar, Rhoude El Baguel et la dépression de Berkine.



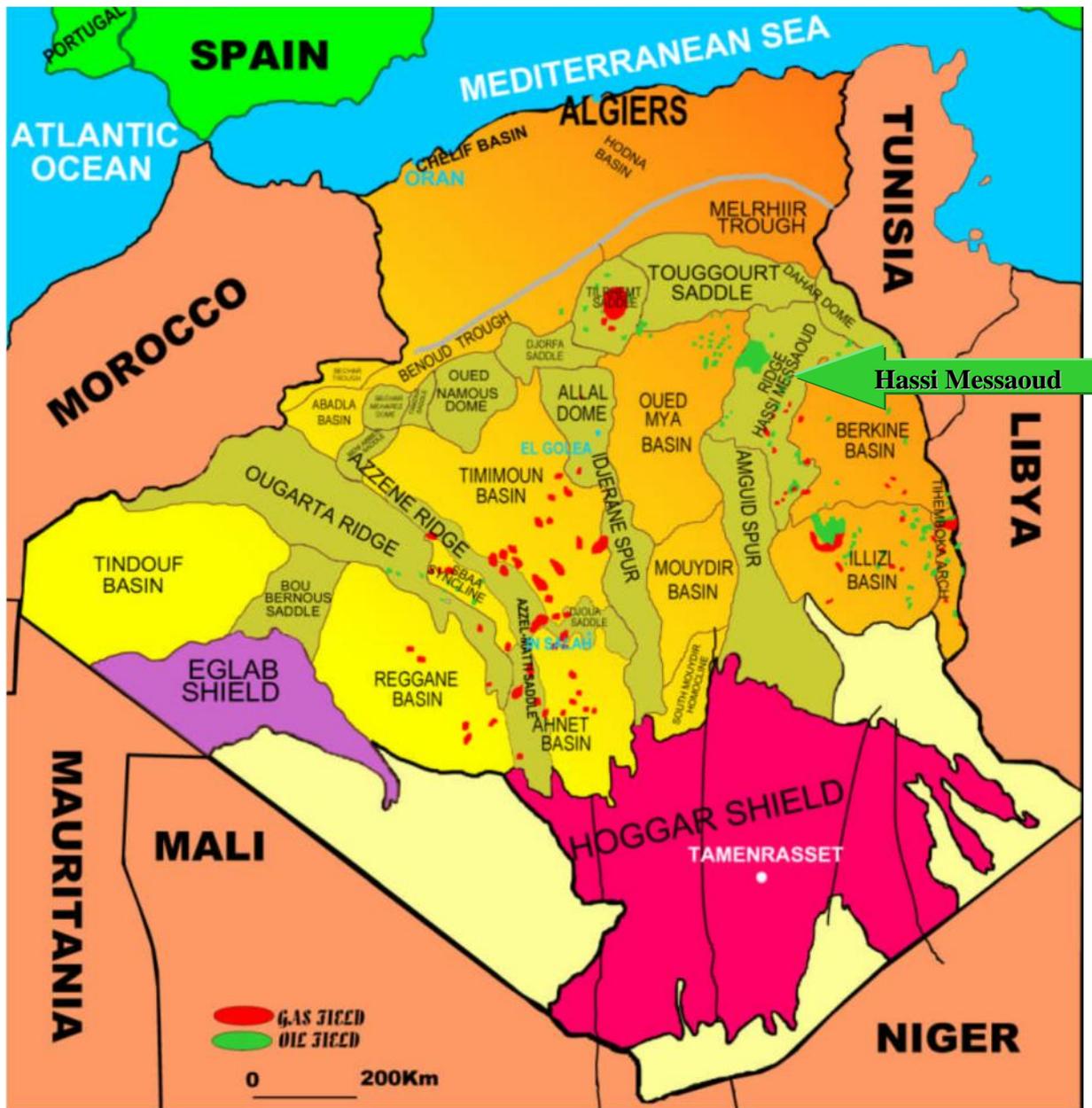


Fig. 2: Contexte géologique du champ de HASSI MESSAOU (Sonatrach, 2005)

#### 1.4. METHODOLOGIE DES TRAVAUX GEOLOGIQUES

Après la mise en évidence par la sismique réfraction de la structure de Hassi Messaoud comme étant un vaste dôme structural, la société “ SN REPAL ” implante le 16 Janvier 1956, le premier puits Md1, pas loin du puits chamelier de Hassi Messaoud. Le 15 Juin de la même année, ce forage a traversé des grés cambriens à 3338 m qui sont producteurs d’huile.

En Mai 1957, la société “ CFPA ” réalise un puits Om1 à environ 7 Km au Nord-Nord-Ouest du puits Md1, ce forage confirmait l’existence d’huile dans les grés du Cambrien. Par la suite le champ de Hassi Messaoud fut divisé en deux concessions distinctes : C.F.P.A pour le champ Nord et SN.REPAL pour le champ Sud. La mise en production avait commencé en 1958 avec 20 puits d’exploitation.

Actuellement (mars 2008), le nombre de puits foré est de 1369 puits avec :

- 184 puits horizontaux.
- 158 puits en short radius.
- 585 puits producteurs huile.
- 333 puits gaz lift producteurs d’huile.
- 112 puits injecteurs gaz.
- 48 puits injecteurs eau.
- 86 puits producteurs eau.
- 54 puits secs.
- 78 puits abandonnés.
- 43 puits inexploitable.
- 5 puits non réalisées.

## **1.5. STRATIGRAPHIE**

La série stratigraphique du champ de Hassi Messaoud repose sur le socle à environ 4393 m d'épaisseur. Cette série est incomplète, elle est marquée par l'absence du Silurien, Dévonien, Carbonifère et Permien. La discordance hercynienne se manifeste plus accentuée au centre de la structure, où les dépôts argilo-gréseux et salifères du Trias reposent directement sur le Cambrien. En allant vers la périphérie, cette discordance tronque des termes ordoviciens de plus en plus récents (Beicip. Franlab, 1979).

A partir des travaux géologiques effectués sur le champ de Hassi Messaoud, on peut présenter la série stratigraphique de Hassi Messaoud comme suit (Fig. 3).

### **1.5. 1. Paléozoïque**

Les formations paléozoïques reposent en discordance sur le socle à travers la discordance panafricaine. De la base au sommet on distingue :

#### **1.5. 1. 1. Le socle**

Les formations sédimentaires du champ de Hassi Messaoud reposent sur un socle constitué essentiellement de granite porphyroïde rose.

#### **1.5. 1. 2. L'infra-Cambrien**

L'infra-Cambrien est l'unité lithologique la plus ancienne. Cette unité a été rencontrée par les forages de la région de la partie Nord de la structure, il est constitué de grès argileux rouge.

#### **1.5. 1. 3. Cambrien**

Il est essentiellement constitué de grès hétérogènes, fins à très grossiers entrecoupés de passées de siltstones argilo-micacés.

ERE	SYST	ETAGES		Ep moy	DESCRIPTION	
CENO-ZOIQUE	NEOGENE	MIO-PLIOCENE discordance alpine		240	Sable, calcaire, marnes sableuses	
		EOCENE		120	Sable, calcaire à silex	
MESOZOIQUE	CRETACE	SENONIEN	CARBONATE	107	Calcaire, dolomie, anhydrite	
			ANHYDRITIQUE	219	Anhydrite, marnes, dolomie	
			SALIFERE	140	Sel massif et traces d'anhydrite	
		TURONIEN	90	Calcaire crayeux avec quelques niveaux argileux		
		CENOMANIEN	145	Anhydrite, marnes, dolomie		
		ALBIEN	350	Grès, sable avec intercalations d'argile silteuse		
		APTIEN	25	Dolomie cristalline avec niveau argileux, calcaire		
		BARREMIEN	280	Argile, grès, dolomie		
		NEOCOMIEN	180	Argile, marnes, dolomie, grès		
		JURASSIQUE	MALM		225	Argile, marnes, calcaire, grès et traces d'anhydrite
	DOGGER		ARGILEUX	105	Argile silteuse, marnes dolomitiques avec fines passées de grès	
			LAGUNAIRE	210	Anhydrite, marnes dolomitiques, marnes grises	
	LIAS		L.D 1	65	Dolomie, anhydrite, argile	
			L.S 1	90	Alternances sel, anhydrite et argile	
			L.D 2	55	Anhydrite et dolomie cristalline	
			L.S 2	60	Alternances sel et argile	
			L.D 3	30	Alternances de dolomie et de marnes	
	TRIASSIQUE		SALIFERE	TS 1	46	Alternances de sel, d'anhydrite et de dolomie
				TS 2	189	Sel massif à intercalations d'anhydrite et argile gypsifère
		TS 3		202	Sel massif et traces d'argile	
		ARGILEUX	113	Argile rouge dolomitique ou silteuse injectée de sel et d'anhydrite		
		GRESEUX	35	Grès, argile		
		ERUPTIF discordance hercynienne	0.92	Andésites altérées		
		PALEOZOIQUE	ORDOVICIEN	QUARTZITES D'EL HAMRA	75	Quartzites fines avec traces de tigillites
	GRES D'EL ATCHANE			25	Grès fins à ciment argileux, bitumineux	
	ARGILES D'EL GASSI			50	Argiles schisteuses, vertes ou noires, glauconieuses à graptolithes	
	ZONE DES ALTERNANCES			20	Alternance de grès et argile. Présence de tigillites	
CAMBRIEN	Ri		50	Grès isométriques, fins, silteux		
	Ra		120	Grès à grès quartzitiques anisométriques à niveaux de silts		
	R2		100	Grès moyens à grossiers à ciment argileux illitique		
	R3		300	Grès grossier à ciment argileux, argile silteuse		
INFRA-CAMBRIEN	45		Grès argileux rouges			
S O C L E					Granite porphyroïde rose	

Fig. 3: Colonne stratigraphique du champ de Hassi Messaoud (Sonatrach /DP, 2005).

Le cambrien est subdivisé classiquement en trois (3) lithozones : [R1 (Ra +Ri), R2, R3].

Du bas en haut on distingue:

- *Lithozone R3* : Son épaisseur moyenne est de 370 mètres. Elle se compose de grès, feldspathiques et micacés à grains moyens à très grossiers conglomératiques à la base, à ciment argileux abondant, ayant des passées de grès ferrugineux et d'argile silteuse.
- *Lithozone R2* : Son épaisseur moyenne est de 100 mètres. Elle se compose de grès moyens à grossiers micacés, mal classés, à ciment argileux assez abondant avec des intercalations de silts. Les stratifications sont souvent obliques.
- *Lithozone R1*: Ce lithozone est constitué de deux (2) sous lithozones, du bas en haut, on distingue :

#### 1.5. 1. 4. Ordovicien

- *Zone des alternances* : Elle a l'épaisseur moyenne de 20 mètres. Cette zone désigne ainsi la présence de nombreuses passées d'argiles indurées alternant avec des bancs de quartzites fins isométriques.

Dans l'ordovicien, trois (3) unités lithologiques sont distingués, du bas au sommet on trouve :

- *Argiles d'El Gassi*: Son épaisseur moyenne est d'environ 50 mètres. Cette formation est constituée d'argile schisteuse, indurée présentant une couleur verte à noire, rarement rouge. Cette argile peut être glauconieuse ou carbonatée présentant des graptolites. Ceci indique le milieu marin de dépôts. Cette formation est surtout rencontrée sur les zones périphériques du champ.
- *Les grès d'El Atchane*: Ils ont une épaisseur moyenne qui varie de 12 à 25 mètres cette formation est constituée de grès fin à très fin, de couleur gris-beige à gris-sombre. Ce grès peut être argileux ou glauconieux avec, généralement de nombreuses passées argileuses silteuses.
- *Les quartzites de Hamra*: Leur épaisseur moyenne varie de 12 à 75 mètres. Ce sont des grès quartzitiques fins, très compactes à rares intercalations d'argiles.

## 1. 5. 2. Mésozoïque

### 1. 5. 2. 1. Trias

Il repose en discordance sur le Cambrien, au centre et sur l'Ordovicien vers les flancs de la structure. C'est un faciès très varié résultant de la transgression. Un caractère laguno-marine caractérise ce faciès. Le trias est accompagné par des coulées éruptives. Généralement, le trias est subdivisé en trois (3) unités, du bas en haut, on trouve:

- *Trias gréseux*: Il constitue le premier remplissage du relief paléozoïque et se subdivise en plusieurs unités qui diffèrent les unes des autres par leur lithologie et leur réponse diagraphique. Il est accompagné par des coulées éruptives. Son épaisseur varie de 0 à 75 m.
- *Trias argileux* : Il est constitué d'argiles plus ou moins silteuses, brun rouge à bariolés, dolomitiques et anhydritiques avec des intercalations de banc de sel au sommet, son épaisseur moyenne est de 113 m.
- *Trias salifère* : Il est constitué de bancs de sel massif présentant au sommet des intercalations d'anhydrite et des bancs d'argile légèrement silteuse et dolomitique, son épaisseur moyenne est de 340 m.

### 1. 5. 2. 2. Roche éruptive du Trias

Il se situe approximativement entre la discordance hercynienne et le mur du trias argilo-gréseux. L'éruptif est rarement localisé dans le lithozone (Ra). Sa rencontre est difficilement prévisible dans la partie Sud-Ouest et Ouest du champ, avec des épaisseurs variables de 0 m à 90 m. Le potentiel du réservoir se trouve réduit lors de sa présence.

### 1.5. 2. 3. Jurassique

Le Jurassique est un ensemble argilo-gréseux à intercalations de calcaire au sommet (Malm) et à alternances de faciès lagunaires et marins à la base (Dogger et Lias), Son épaisseur moyenne est 844 m, du bas en haut, on rencontre :

- *Lias* : Son épaisseur moyenne est de 300 m. Le début du lias caractérisé par une zone de marne dolomitique connue sous le terme de « *l'horizon B* », qui est un

repère sismique, caractérisant le passage Trias-Lias. Le Lias est subdivisé en cinq (5) niveaux bien distincts s'intercalant entre eux sur toute l'épaisseur.

- *Dogger* : Son épaisseur moyenne est de 320 m. Le Dogger est subdivisé en deux (2) formations, le Dogger lagunaire à la base et le Dogger argileux au sommet.
- *Malm* : Son épaisseur moyenne est de 225 m. Il est caractérisé par les dépôts d'argiles et de marne avec des intercalations des bancs de calcaire et dolomie accompagnés de quelques traces d'anhydrite.

#### 1.5. 2. 4. Crétacé

Son épaisseur moyenne est de 1620 m. Il est constitué de sept étages, de la base au sommet on distingue :

- *Néocomien* : Il comprend deux niveaux, à la base un terme gréseux constitués de grès et de quelques passées d'argiles avec des passées de grès, au sommet un terme argileux représenté par des argiles avec nombreuses intercalations de calcaire et de dolomie.
- *Barrémien* : Son épaisseur moyenne est de 280 m Il est formé de grès fins à moyens carbonatés à plages d'anhydrite, alternant avec des niveaux d'argile gréseuse et dolomitique.
- *Aptien* : Son épaisseur est de 25 m. Il est représenté par deux bancs dolomitiques encadrant un niveau argileux. La limite Aptien-Barrémien coïncide avec la barre calcaro-dolomitique qui représente un bon repère sismique.
- *Albien* : Son épaisseur moyenne est de 350 m. Il est constitué de grès et sable fin, avec des intercalations d'argile silteuse. L'Albien représente une immense nappe aquifère.
- *Cénomanién* : Son épaisseur moyenne est de 145 m. Il est caractérisé par une alternance d'anhydrite et d'argile rouge-brune, de marnes grises et de dolomie. La limite Cénomanién-Albien coïncide avec le passage des séries évaporitiques aux séries plus gréseuses de l'Albien.
- *Le Turonien* : Son épaisseur moyenne varie de 70 à 120 m. C'est une alternance de calcaire argileux, calcaire dolomitique et calcaire crayeux. Au sommet

apparaissent les bancs de calcaire. Le Turonien contient une nappe d'eau salée.

- *Le Sénonien* : Son épaisseur moyenne est de 230 m. A la base, une série lagunaire est rencontrée. Elle se caractérise par la présence des bancs massifs de sel et des alternances d'anhydrite, dolomie et d'argile grise, au sommet une série carbonatée présentant des bancs de calcaire dolomitique argileux et des bancs d'anhydrite.

### **1.5. 3. Cénozoïque**

Le cénozoïque est constitué de calcaire dolomitique à l'Eocène et d'un recouvrement de type sableux au Mio-Pliocène. L'épaisseur moyenne du Cénozoïque est de 360 m (Beicip. Franlab, 1979).

#### **1.5. 3. 1. Eocène**

Représenté par des dolomies à nummulites avec la présence rognons silteux, d'une épaisseur de 120 m.

#### **1.5. 3. 2 .Moi-pliocène**

Formation essentiellement sableuse d'origine continentale, d'une épaisseur de 239 m (Abbas hadj Abbas, 2011).

## **1. 6. CONCLUSION**

La zone d'étude est localisée à Hassi Messaoud qui se situe à environ 850 km Sud-est d'Alger, se caractérise par une série stratigraphique qui repose sur le socle à environ 4393 m d'épaisseur. Cette série est incomplète, elle est marquée par l'absence du Silurien, Dévonien, Carbonifère et Permien. La discordance hercynienne se manifeste plus accentuer au centre de la structure, où les dépôts argilo-gréseux et salifères du Trias reposent directement sur le Cambrien. En allant vers la périphérie, cette discordance tronque des termes ordoviciens de plus en plus récents.

# Climatologie

## 2.1. INTRODUCTION

Le climat de la région d'Ouargla est un climat désertique particulièrement contrasté malgré la latitude relativement septentrionale. L'aridité s'exprime non seulement par des températures élevées en été et par la faiblesse des précipitations, mais surtout par l'importance de l'évaporation due à la sécheresse de l'air (Bellaoueur, 2008).

Ces paramètres hydro-climatiques ont une grande importance pour tout étude hydrogéologique car ils ont une influence sur le comportement hydraulique et surtout le bilan hydrique des aquifères.

Etant donnée la difficulté de la compliation des données hydroclimatique des stations de Hassi Messaoud et/ou le manque de certains paramètres, nous reprenos ici, les séries des données, qui sont à la base de la détermination de différents paramètres climatiques, qui sont enregistrées à la station pluviométrique d'Ouargla. Cette station n'est pas loin de Hassi Messaoud qu'à 80 km.

## 2. 2. CONTEXTE CLIMATIQUE

### 2. 2. 1. Pluviométrie

Les précipitations moyennes annuelles sont de l'ordre de 32,29 mm. Le mois de Janvier est le mois le plus pluvieux avec 7 mm. Le mois de juillet est le plus sec avec que 0,1 mm en moyenne. Le tableau. 1 présente les précipitations moyennes annuelles sur la période (1990-2011) (Tab 1 ; Fig. 4).

Tableau. 1 : Précipitations moyenne mensuelle (mm), période (1990-2011).

Mois	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mar.	Avr.	Mai.	Juin	juil	Aout
Moy	3,91	5,90	5,63	3,70	7,00	1,18	5,59	1,28	3,01	0,45	0,17	0,89

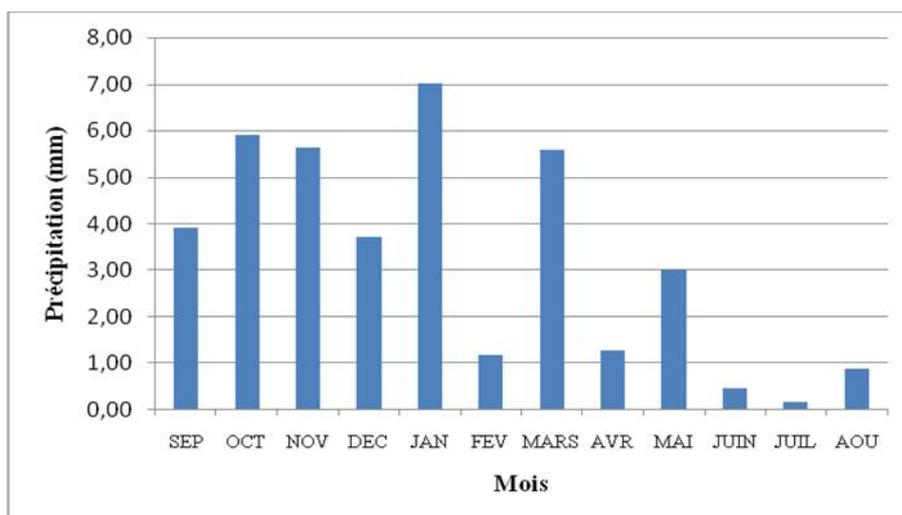


Fig. 4: Répartition annuelle des pluies, Station d'Ouargla (1990-2011)

### 2. 2. 2. Températures

Les températures à Ouargla sont caractéristiques du climat saharien avec des valeurs très élevées en été où la moyenne annuelle est de l'ordre de 24,12 °C. La moyenne mensuelle du mois le plus chaud (Juillet) dépasse 30°C et celle du mois le plus froid (Janvier) est de 12,33°C (Tableau. 2 ; Fig. 5).

Tableau 02 : Température moyenne mensuelle (°c), période (1990-2011)

Mois	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mar.	Avr.	Mai	Juin	juil	Aout
<b>Moy</b>	34,35	25,10	16,44	12,88	12,33	14,80	18,16	23,69	28,04	32,65	35,76	35,23

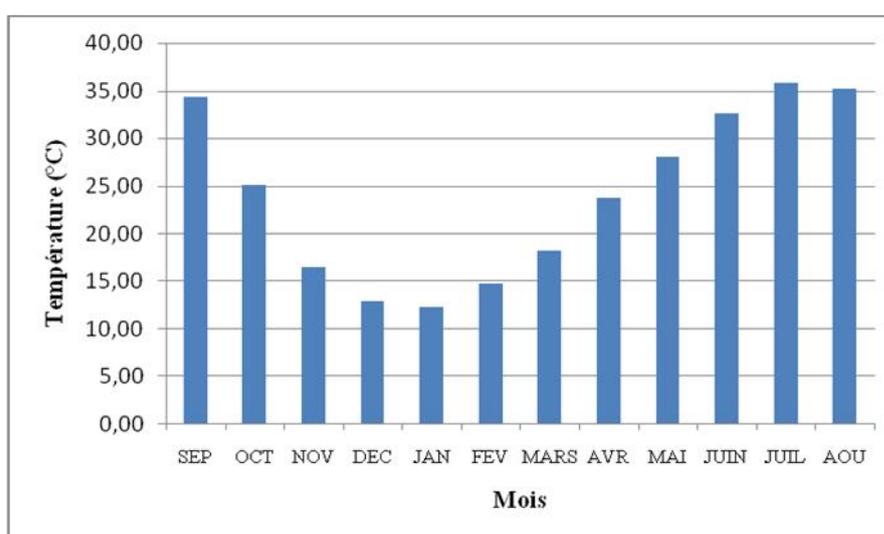


Fig. 5 : Températures moyennes mensuelles (C°), Station d'Ouargla (1990-2011)

### 2. 2. 3. L'humidité relative

L'humidité relative moyenne élevée est enregistrée au mois de Janvier avec 59.88%. Tandis que le mois de Juillet est caractérisé par une moyenne de 31.71 %. L'humidité moyenne annuelle est de 48,33 % (Tableau. 3 ; Fig. 6)

Tableau 03 : Humidité moyenne mensuelle (%) (1990-2011)

Mois	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mar.	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Aout
<b>Moy.</b>	49.14	54.31	55.64	59.00	59.88	54.02	48.95	47.62	43.31	38.48	31.71	37.90

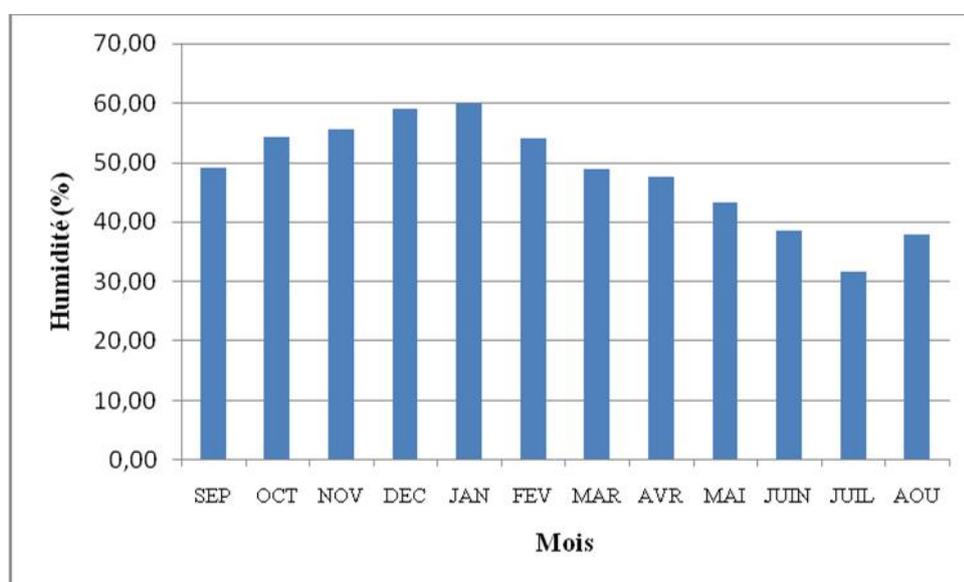


Fig. 6 : Humidité moyenne en (%), Station d'Ouargla (1990-2011)

### 2. 2. 4. La vitesse du vent

Le vent est un phénomène continu au désert où il joue un rôle considérable en provoquant une érosion éolienne intense grâce aux particules sableuses qu'il transporte. Il participe à la formation de dunes. Les vitesses de vent atteignent parfois 100 Km/H, l'air reste obscurci des journées par le vent de sable et les particules minérales peuvent être soulevées jusqu'à 1500 mètres de haut. Indépendamment de l'action mécanique que le vent exerce sur les végétaux dont il déchire les parties aériennes, il agit surtout en accentuant l'évaporation.

Tableau 04 : Vitesse du vent en (m/s) de la période (1990-2011)

Mois	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mar.	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Aout
<b>Moy</b>	19.3	15.9	13.8	14.0	14.4	16.3	16.5	20.9	20.0	16.9	18.1	16.7

Dans la région d'Ouargla les vents soufflent du Nord-est et Sud. Les vents les plus fréquents en hiver sont les vents d'Ouest tandis qu'au Printemps les vents du Nord-est et Sud-ouest.

D'après les données de l'O.N.M (2011), pour la période (1990-2011), les vitesses de vent assez importantes sur toute la période estivale (Avril) avec un maximum entre le mois d'Avril et Mai (Tab 4 ; Fig.7).

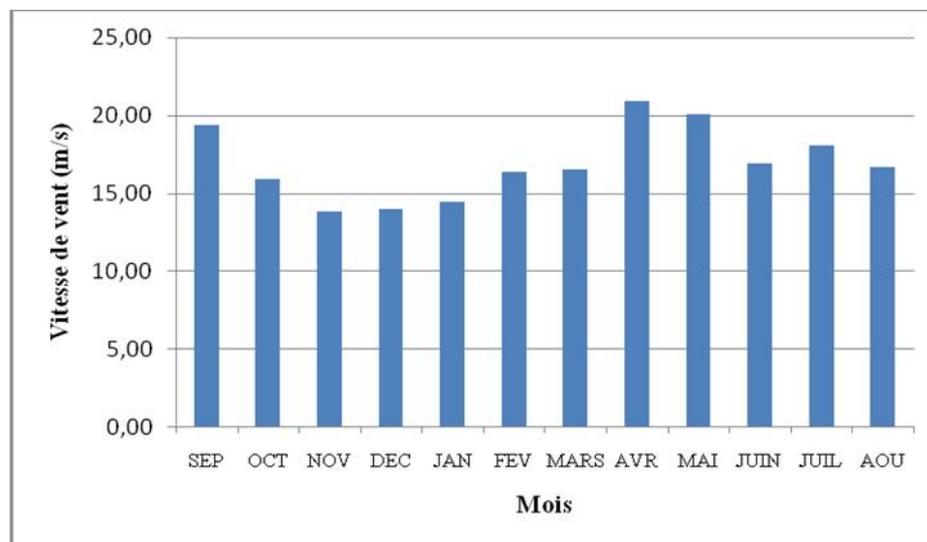


Fig.7 : La vitesse du vent en (m/s), Station d'Ouargla (1990-2011)

### 2. 2. 5. Durée d'insolation

La région d'Ouargla reçoit une quantité de lumière solaire très forte, le maximum est atteint au mois de Juillet avec une durée moyenne de 189,78 heures, et le minimum est enregistré au mois de Décembre avec une durée moyenne de 116,00 heures. (Tab 5 ; Fig. 8)

Tableau 05 : Durée moyenne mensuelle d'insolation en heures, de la période (1990-2011),

Mois	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mar.	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Aout
moy	154,1	149,4	126,7	116,0	140,9	139,1	138,6	161,6	167,1	164,4	189,7	188,4

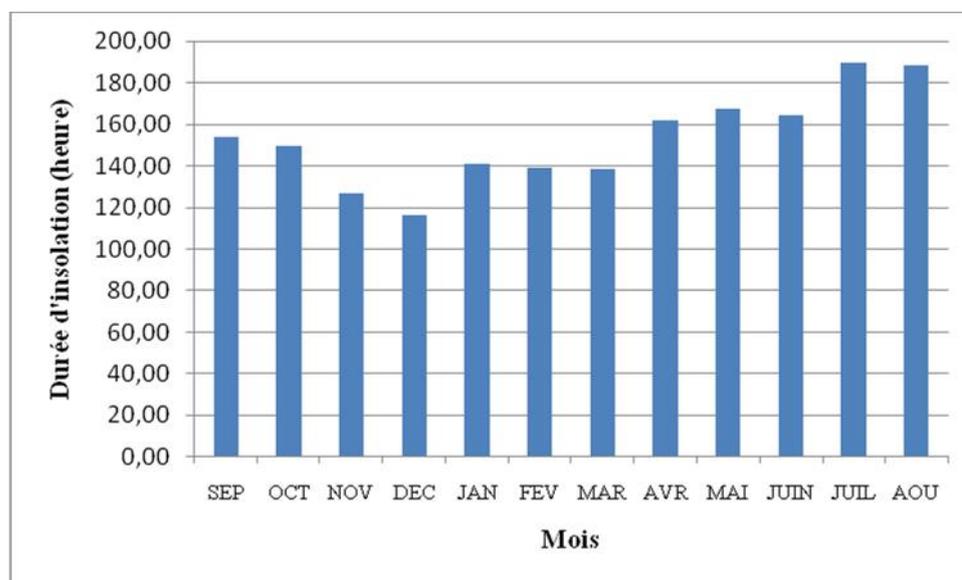


Fig. 8 : Durée moyenne mensuelle d'insolation en heures, Station d'Ouargla (1990-2011).

### 2. 2. 6. L'évaporation

Pour l'évaporation, la quantité d'eau qui repart dans l'atmosphère dépend uniquement des paramètres physiques tels que la température de l'air, de l'eau, de la vitesse du vent, du degré hygrométrique, de l'ensoleillement, ...etc.

L'évaporation est très élevée, elle est en moyenne de 417.70 mm au mois de Juillet et de 86.61 mm au mois de Janvier, soit 278.61mm moyenne annuelle, elle est très variable suivant les années, les mois et aussi les semaines. (Tab 6 ; Fig. 9)

Tableau 06 : Evaporation moyenne mensuelle en (mm) Période (1990-2011)

Mois	Sep	Oct.	Nov.	Déc.	Jan	Fév.	Mar	Avril	Mai	Juin	Juil.	Aout
moy	280,1	196,0	110,2	88,9	86,6	120,9	174,2	246,8	300,2	367,	417,6	396,7

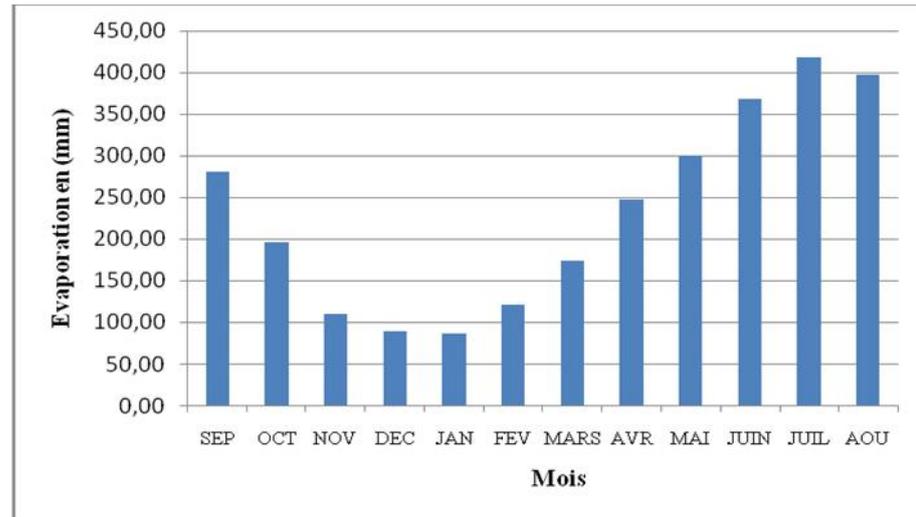


Fig. 9 : Evaporation moyenne mensuelle en (mm), Station d’Ouargla (1990-2011)

### 2. 2. 7. Diagramme pluvio-thermique de GAUSSEN

Selon la définition de Gausсен, une période sèche est une période pendant laquelle les précipitations totales du mois sont inférieures ou égales au double de la température du même mois.

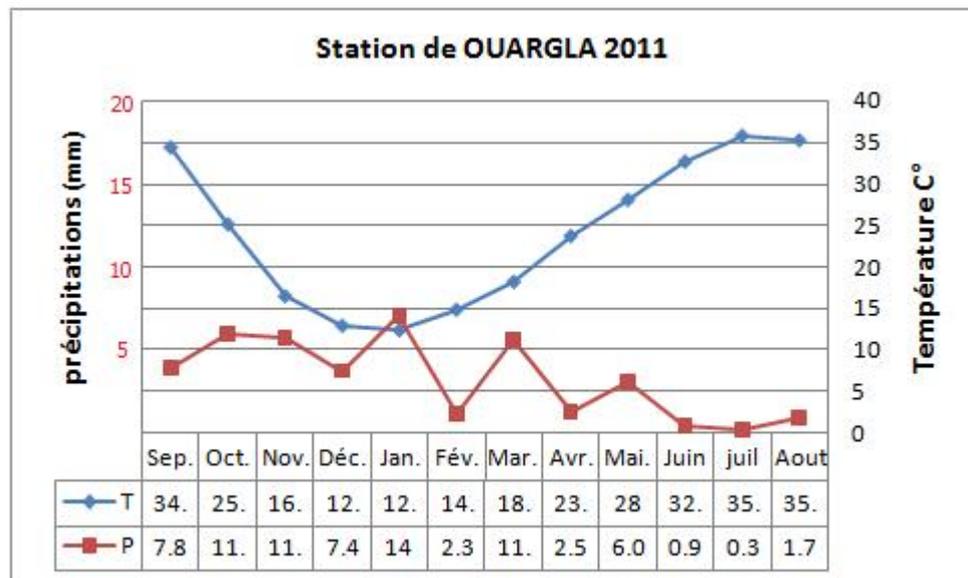


Fig. 10 : Diagramme ombrothermique de GAUSSEN, Station d’Ouargla (1990-2011)

Ce diagramme montre que pour un climat saharien (Tableau. 8), il n’y a pas de période humide, et que toute l’année est déficitaire.

### 2. 2. 7. 1. Indice d'Aridité de DEMARTONNE

D'après DEMARTONNE l'indice de l'aridité est exprimé comme suit :

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

Avec :

P : les précipitations moyennes annuelles.

T : la température moyenne annuelle.

Pour les valeurs de I comprises entre 0 et 5 se trouve le milieu est considéré comme Hyper-arid.

$$I = \frac{3.22}{24.12 + 10} = 0.09$$

Tableau. 07 : Classification des climats en fonction de la valeur de l'indice de DEMARTONNE

Valeur de l'indice	Type de climat
$0 < I < 5$	Hyper-aride
$5 < I < 10$	Aride
$10 < I < 20$	Semi-aride
$20 < I < 30$	Semi-humide
$30 < I < 55$	Humide

Donc le climat de notre région d'étude est du type Hyper-aride.

Tableau 8: Indice d'Aridité de DEMARTONE.

Mois	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Aout
P mm	3.01	0.46	0.17	0.89	3.91	5.90	5.64	3.70	7.00	1.18	5.60	1.29
T C°	28.05	32.65	35.76	35.24	34.35	25.10	16.45	12.89	12.33	14.80	18.16	23.70
I = P/T+10	0.08	0.01	0.00	0.02	0.09	0.17	0.21	0.16	0.31	0.05	0.20	0.04

### 2. 2. 8. Etablissement du bilan hydrique

Le calcul de ce bilan hydrique repose sur la détermination de la quantité d'eau rentrant dans le processus d'évapotranspiration et par conséquent, la détermination de la quantité d'eau retournant au sous-sol. Pour cet effet et corrélativement avec la situation observée aujourd'hui, surtout au niveau de la palmeraie et de la zone bâtie, nous pouvons suggérer la méthode de THORNTHWAITE qui semble la plus proche de la réalité.

Cette méthode est utilisée pour les climats sub-humide et semi-aride. Elle est basée sur la notion de réserve d'eau facilement utilisable (RFU). On admet que la hauteur d'eau stockée dans le sol qui est reprise par l'évapotranspiration est de 100 mm au maximum. Au seuil, les pluies n'assurent pas le stockage permanent de l'eau dans la réserve d'eau facilement utilisable (RFU), ce qui produit un besoin des sols agricoles à l'irrigation par les eaux des nappes profondes, pour cela ; nous introduisons dans le calcul de ce bilan la notion apport qui constitue la somme des précipitations et des apports souterrains.

Le principe de calcul est le suivant

- Si pour un mois  $\text{Apport} > \text{ETP}$  on pose que  $\text{l'ETP} = \text{ETR}$  la quantité d'eau qui reste ( $\text{Apport} - \text{ETR}$ ) va alimenter la réserve utile (RU) jusqu'à son maximum (100 mm) et si elle dépasse cette valeur il y aura un excès qui va partir soit sous forme d'infiltration efficace vers la nappe, soit sous forme du ruissellement (qui est nul dans notre cas).
- Si  $\text{Apport} < \text{ETP}$ , la valeur de  $\text{ETR} = \text{Apport} + \text{Ru}$ , jusqu'à égalisation avec ETP. Si la Ru est nulle, il va se produire un déficit agricole  $\text{Da} = \text{ETP} - \text{ETR}$  ce dernier paramètre représente alors les besoin des plantes en eau d'irrigation.
- Le même calcul pour la RFU dans le cas minimum (Bellaoueur, 2008).

Tableau 09 : Bilan hydrique établi selon la méthode de THORNTHWAITE a la station d'Ouargla (1990-2011).

	<b>Tp</b>	<b>ETP<sub>c</sub></b>	<b>P</b>	<b>BH</b>	<b>RFU</b>	<b>ETP<sub>r</sub></b>	<b>Déf</b>	<b>Exc</b>
<b>S</b>	34.35	196.1	3.91	-192.2	0.0	3.9	192.2	0.0
<b>O</b>	25.1	79.5	5.9	-73.6	0.0	5.9	73.6	0.0
<b>N</b>	16.45	22.7	5.64	-17.0	0.0	5.6	17.0	0.0
<b>D</b>	12.89	11.1	3.7	-7.4	0.0	3.7	7.4	0.0
<b>J</b>	12.33	10.6	7	-3.6	0.0	7.0	3.6	0.0
<b>F</b>	14.8	16.9	1.18	-15.7	0.0	1.2	15.7	0.0
<b>M</b>	18.16	35.4	5.6	-29.8	0.0	5.6	29.8	0.0
<b>A</b>	23.7	77.3	1.29	-76.0	0.0	1.3	76.0	0.0
<b>M</b>	28.05	133.7	3.01	-130.7	0.0	3.0	130.7	0.0
<b>J</b>	32.65	202.7	0.46	-202.2	0.0	0.5	202.2	0.0
<b>J</b>	35.76	263.0	0.17	-262.9	0.0	0.2	262.9	0.0
<b>A</b>	35.24	236.6	0.89	-235.7	0.0	0.9	235.7	0.0
<b>Annuel</b>	<b>24.1</b>	<b>1285.6</b>	<b>38.8</b>	<b>-1246.8</b>		<b>38.8</b>	<b>1246.8</b>	<b>0.0</b>

**TP** : température moyenne ; **ETP<sub>c</sub>** : évapotranspiration cumulé ; **P** : précipitation ; **BH** : bilan hydrique ; **RFU** : réserve facilement utilisable ; **ETP<sub>r</sub>** : évapotranspiration réel ; **Déf** : déficit agricole ; **Exc** : excédent.

**- Interprétation du Bilan hydrique selon la méthode de THORNTHWAITE :**

A partir du Tableau. 9 et les figures (Figs. 11 et 12) ; Le bilan hydrique établi d'après la méthode de THORNTHWAITE montre que RFU est égale à 0 avec un excédent nul. Donc le stock ne se recharge pas par la précipitation puisque d'après le diagramme de Gausse, les années sont déficitaires, ce qui conduit que les plantes s'alimentent des nappes.

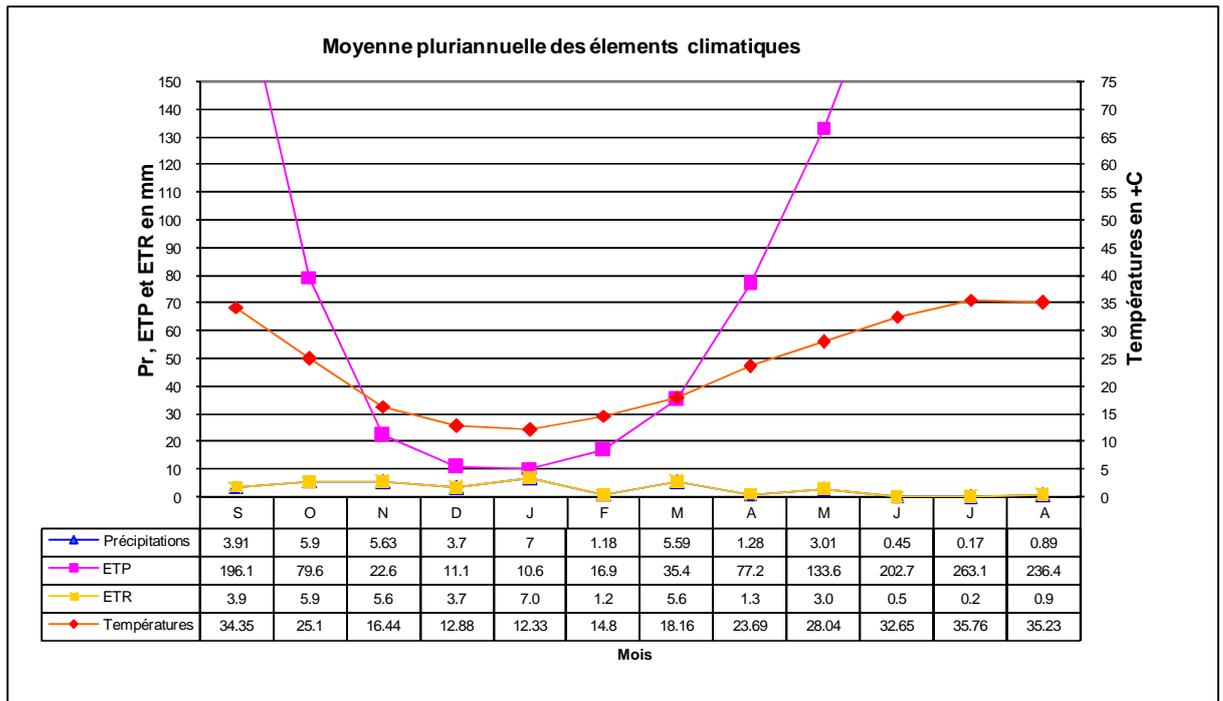


Fig. 11 : Moyenne pluriannuelle des éléments climatiques.

Pour la période (1990-2011) à la station de ONM de Ouargla et d'après le graphe des moyennes pluriannuelles des éléments climatiques (Fig. 11), l'évapotranspiration potentielle (ETP) est proportionnel à la température où elle atteint le maximum au mois de Juillet et le minimum est enregistré au mois de Janvier. Donc on remarque que le bilan hydrique de la zone étudié marque toujours un déficit ce qui caractérise les zone hyperaride.

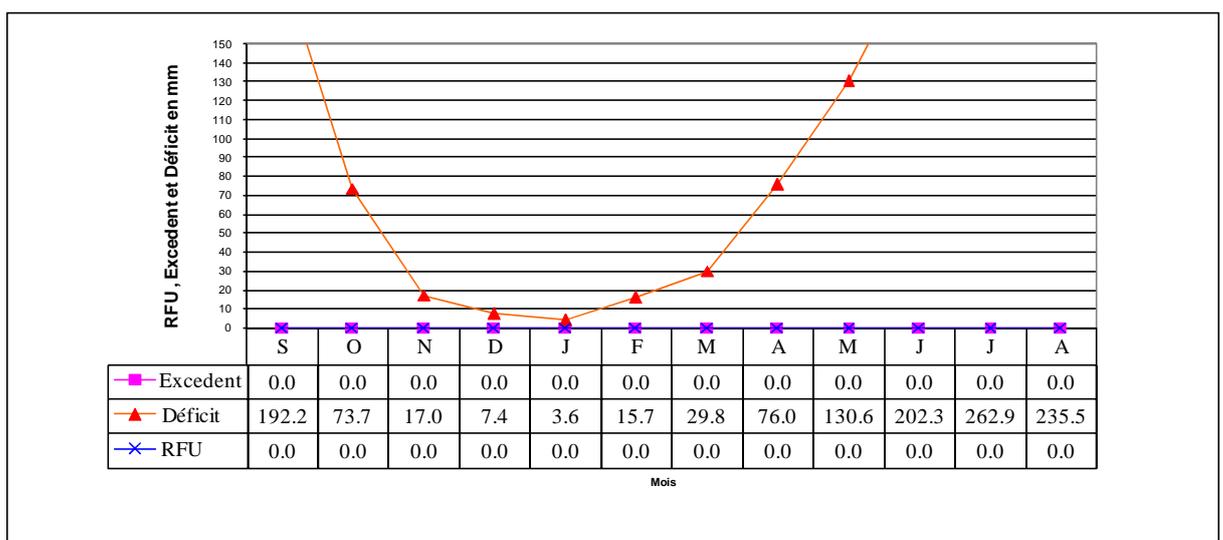


Fig. 12 : RFU, Excédent et Déficit en (mm).

Pour la période (1990-2011) à la station de ONM de Ouargla et d'après l'histogramme (Fig. 12) on remarque l'absence de stockage de volume d'eau dans les réserves d'eau facilement utilisable (RFU) car elles sont nulles sur tous les mois. Par conséquent le déficit marque le bilan hydrique et atteint son maximum au mois de Juillet avec une valeur moyenne de 202 mm, et le minimum est enregistré au mois de Janvier avec une moyenne de 2.5 mm.

### **2. 3. CONCLUSION**

La région de notre étude est caractérisé par un climat hyper – aride. Les températures élevées sont enregistrées en mois : Juin, Juillet, Aout et Septembre. Elles varient entre 32,65 à 35,76 °C et des précipitations presque nulles. Elles ne dépassent pas les 7 mm, enregistrées au mois de Janvier et Mars.

Le bilan hydrique établit d'après la méthode de THORNTHWAITE montre que RFU est égale à 0 avec un excédent nul. Donc le stock ne se recharge pas par la précipitation puisque d'après le diagramme de Gaussen, les années sont déficitaires, ce qui conduit que les plantes s'alimentent des nappes.

# Hydrogéologie

---

## 3. 1. INTRODUCTION

Les richesses souterraines de la région ne se limitent pas qu'aux hydrocarbures exploitées au niveau du Sahara algérien en particulier à Hassi Messaou, Hassi R'mel et Hassi Berkine. Cette région est aussi riche avec les ressources stratégiques en eau souterraines. Les aquifères de Hassi Messaoud font partie du grand système des aquifères du Sahara septentrional. Le système aquifère de Sahara septentrional est partagé entre l'Algérie, la Libye et la Tunisie. Il renferme des ressources d'eau considérables. Ce système recouvre une étendue de plus d'un (1) million de Km<sup>2</sup> dont 70 % se trouvent en Algérie, près de 8 % en Tunisie et 20 % en Libye (Fig. 13).

## 3. 2. ASPECT HYDROGEOLOGIQUE

Dans le Sahara algérien, les formations détritiques et carbonatées du Méso-Cénozoïque constituent les aquifères exploités pour les différents besoins en eau domestique, agricole et industrielle.

La région de Hassi Messaoud comporte deux principaux aquifères à savoir :

- La nappe du Complexe Terminal (C.T) : elle regroupe les aquifères du Mio- Pliocène, de l'Eocène et du Sénonien carbonaté ;
- La nappe du Continental Intercalaire (C.I) : elle se présente comme un aquifère multicouche de l'Albien, Barrémien et Néocomien.

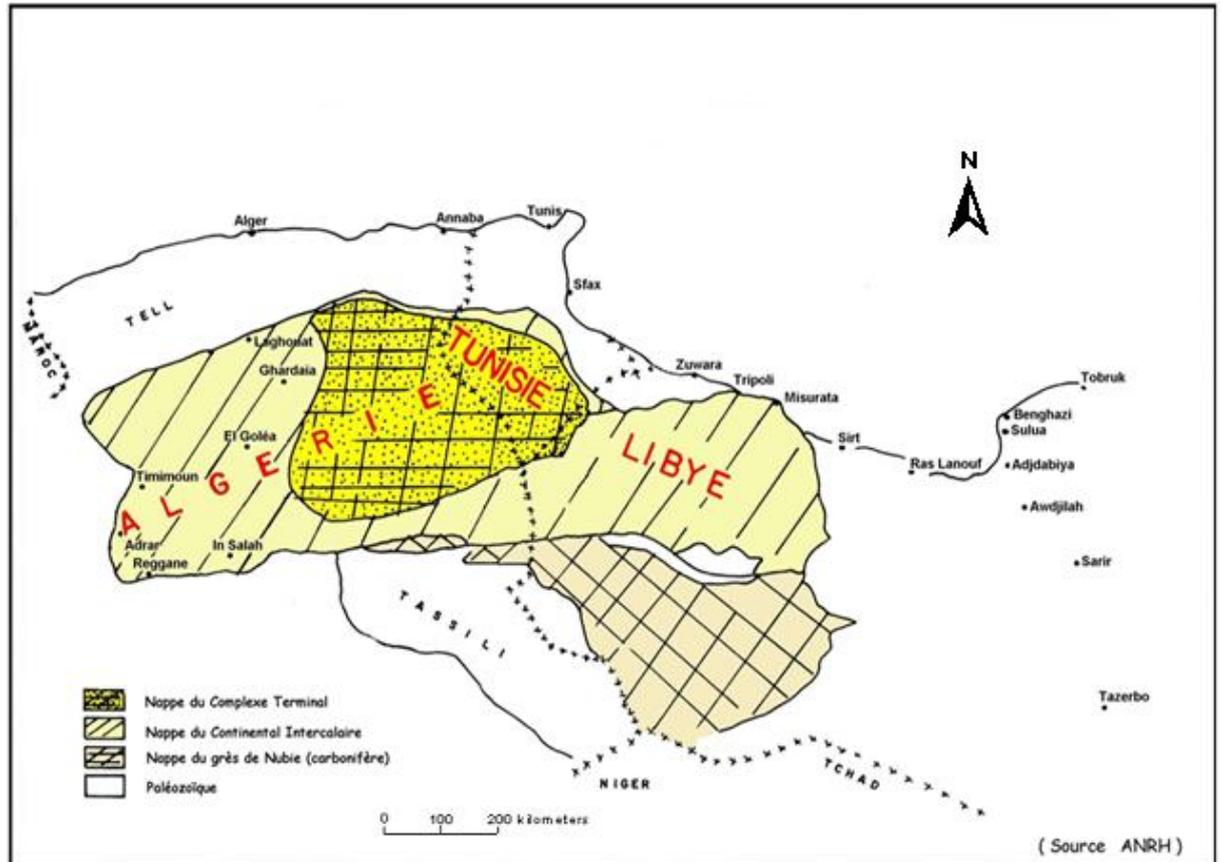


Fig. 13 : Aquifères du Sahara septentrional, (ANRH 2004) (Modifié).

### 3. 2. 1. Définition des aquifères

#### 3. 2. 1. 1. Complexe Terminal (C.T)

##### *a) Géologie de la nappe*

Le système aquifère du Complexe Terminal est moins étendu que le Continental Intercalaire. Néanmoins, il couvre la majeure partie du bassin oriental du Sahara septentrional, sur environ 350 000 km<sup>2</sup>. Sa profondeur oscille entre 100 et plus de 500 m et son épaisseur, en moyenne de 220 m. Ces formations sont les plus récentes, déposées au bas Sahara. Il se compose de deux ensembles aquifères principaux, d'âge et de lithologies différentes, l'un continental au sommet, l'autre marin à la base.

- Au sommet, le Continental Terminal, constitué par les sables de taille variable, intercalés de lentilles argileuses parfois évaporitiques d'âge Mio-Pliocène, couvrant en discordance, pratiquement la totalité de l'Erg oriental depuis la dorsale du M'Zab à l'Ouest jusqu'au Dahar tunisien à l'Est. L'épaisseur de l'aquifère des sables du Mio-Pliocène est de 200 à 230 m en moyenne. Elle est minimale dans la région de Hassi Messaoud augmente vers le Sud 400 m, et le Nord où elle peut atteindre 600 m;
- Les formations marines sont essentiellement carbonatées, déposées au cours de la transgression marine du Sénonien-Eocène, s'étendent sur l'ensemble du bassin oriental. L'Eocène inférieur ne couvre que la zone située au Nord d'une ligne Djemaa-Tozeur;
- Les calcaires et les dolomies du Turonien sont reliés hydrauliquement aux formations carbonatées précédentes par l'aquifère des sables du Mio-Pliocène.

L'épaisseur moyenne du réservoir carbonaté est de 100 à 200 m, augmentent vers le Nord où elle atteint 500 m sous le Chott Melghir et 600 m dans la fosse atlasique. Le substratum du complexe aquifère est, d'une manière générale, constitué par la formation lagunaire du Sénonien. La couverture est formée par les argiles plus ou moins sableuses du sommet du Mio-Pliocène et les marnes évaporites de l'Eocène moyen pour l'aquifère Eocène.

La nappe est captive de la région de Hassi Messaoud et libre dans sa partie sud. Sa porosité dépend de la lithologie. Elle est estimée à 30 % dans les sables du Mio-Pliocène et à 20 % dans les calcaires du Sénonien et de l'Eocène supérieur.

#### ***b) Alimentation de la nappe***

L'alimentation de cette nappe reste très faible comparée aux réserves d'eau constituées depuis les époques pluviales du Quaternaire jusqu'à l'Holocène, l'alimentation actuelle se fait par :

- Infiltration d'une partie du ruissellement sur les bordures Nord (Atlas Saharien, région de Laghouat, Chebek du M'Zab) ;
- Infiltration sur les sables du Grand Erg Oriental, qui repose par endroit directement sur les formations perméables du Mio-Pliocène, une alimentation provenant du Sud Ouest à partir du plateau du Tademaït (sans toute fois oublier de signaler qu'il a existé une alimentation

aux confins du Tindhert qui a fonctionné durant le Quaternaire et qui n'existe plus aujourd'hui) ;

- En provenance de l'aquifère du Continental Intercalaire à travers les failles d'Amguid l'Abiod (relation de drainance par le Continental Intercalaire).

L'apport annuel en eaux de pluie est inférieur à 50 mm/an, seules les pluies torrentielles participent à l'alimentation de la nappe de Mio-Pliocène par infiltration dans les sables (quaternaires).

Dans les périodes d'averses où les précipitations sont supérieures à l'évapotranspiration, il peut exister une possibilité d'alimentation directe de la nappe de Mio-Pliocène. D'autre part, la valeur du niveau statique de la nappe de Mio-Pliocène de 10 à 48 m, il peut exister une possibilité d'exhaure par l'évaporation dans les zones où le niveau statique est à faible profondeur.

### ***c) Écoulement et exutoire***

D'après les études de UNESCO, 1972 ; ils montrent que le bassin Saharien oriental est caractérisé par un écoulement dirigé Sud –Nord convergeant vers les principaux exutoires qui sont (Fig. 14):

- Chott Melghir et chott Mérouane en Algérie ;
- Évaporation dans les vallées des anciens oueds (Oued Righ) ;
- Forage d'eau.

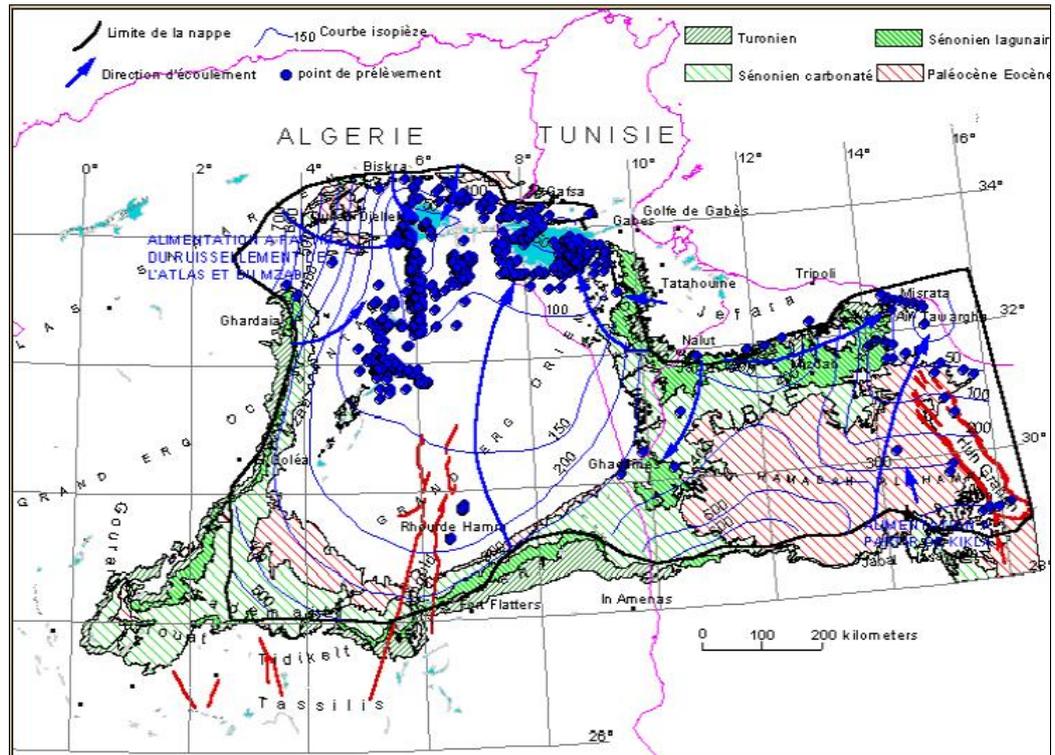


Fig. 14 : Carte piézométrique de référence du Complexe Terminal (OSS, 2003)

L'écoulement des eaux de la nappe du CT s'oriente vers les chotts du Sahara Oriental : Melhrir, en Algérie, Rharsa et Djerid en Tunisie. Alors que dans le bassin occidental les eaux de la nappe se mélangent avec celle du Continental Intercalaire (UNESCO, 1972).

Le Mio-Plio-Quaternaire, de faciès sableux et argileux avec du gypse, renferme des nappes phréatiques héritées des périodes pluvieuses du pléistocène inférieur. Il résulte de la sédimentation en milieu lacustre durant la phase d'assèchement des lagunes des chotts (BUSSON, 1970). Le sens d'écoulement de ces nappes est orienté parallèlement avec celui de la nappe du complexe terminal (CT).

### 3. 2. 1. 2. Continental Intercalaire (C.I)

C'est une nappe qui est partagée par trois pays maghrébins : l'Algérie, la Tunisie et la Libye. La partie algérienne du continental intercalaire couvre 600 000 Km<sup>2</sup>. Elle stocke un volume d'eau considérable, estimé à environ 50 000 milliards m<sup>3</sup>. Elle est située à plus de 1400 m de profondeur dans la zone de Touggourt, cette nappe est plus connue sous la dénomination d' « Albien », nom de l'étage géologique qui renferme la couche aquifère supérieure du « Continental Intercalaire », qui est la plus exploitée. Le terme de continental intercalaire, par contre, désigne l'ensemble des couches détritiques qui se sont déposées au Mésozoïque inférieur au Sahara, entre deux cycles marin (Fig.15).

Tableau 10: Données générales sur la nappe du Continental Intercalaire. (ANRH, 2004)

Etendue	600 000km <sup>2</sup>
Epaisseur totale (m)	50 à 1 000
Profondeur (m)	60 à 2 400
Profondeur au toit (m)	20 à 2 000
Epaisseur de la couche utile productrice (m)	150 à 200
Débit (l/s)	50 à 400
Niveau statique par rapport au sol (m)	artésien (25 bars)
Rabattement par rapport au N.S (m)	artésien
Transmissivité (10 <sup>-3</sup> m <sup>2</sup> /s)	10 à 30
Coefficient d'emmagasinement (10 <sup>-4</sup> )	6 à 1 200
Alimentation moyenne (Hm <sup>3</sup> /an)	270
Réserve théorique calculée (m <sup>3</sup> )	50 000 x 10 <sup>9</sup>
Température (°C)	25 à 70
Salinité des eaux	0.5 à 6 g/l*

La carte piézométrique de référence du Continental intercalaire établie, à l'état stationnaire (peu ou pas influencée par les pompages), sur la base des études antérieures (Cornet, 1964 ; UNESCO, 1972, 1972 ; Pallas, 1978), met en évidence les zones d'alimentation suivantes (Ould Baba Sy, 2005) :

- Piémont sud atlasique au Nord-Ouest ;
- Tinrhert au Sud ;
- Dahar à l'Est ;
- Jebel Nafusa au Nord-Est ;

- Jebel Hassawna au Sud, où la nappe du Cambro-Ordovicien est drainée vers le Nord ; par la nappe du Continental Intercalaire.

Les zones d'exutoire sont :

- les foggaras du Touat-Gourara et du Tidikelt ;
- l'exutoire tunisien marqué par la faille d'El-Hamma ;
- l'exutoire libyen au niveau d'AinTawargha.

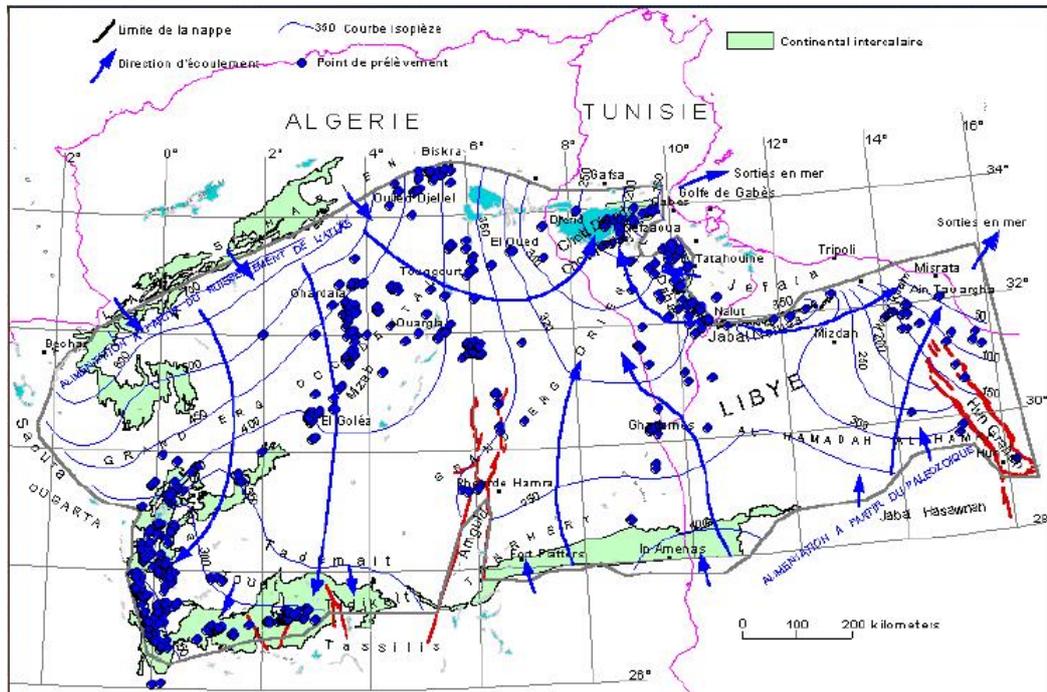


Fig. 15: Carte piézométrique de référence du CI (OSS, 2003).

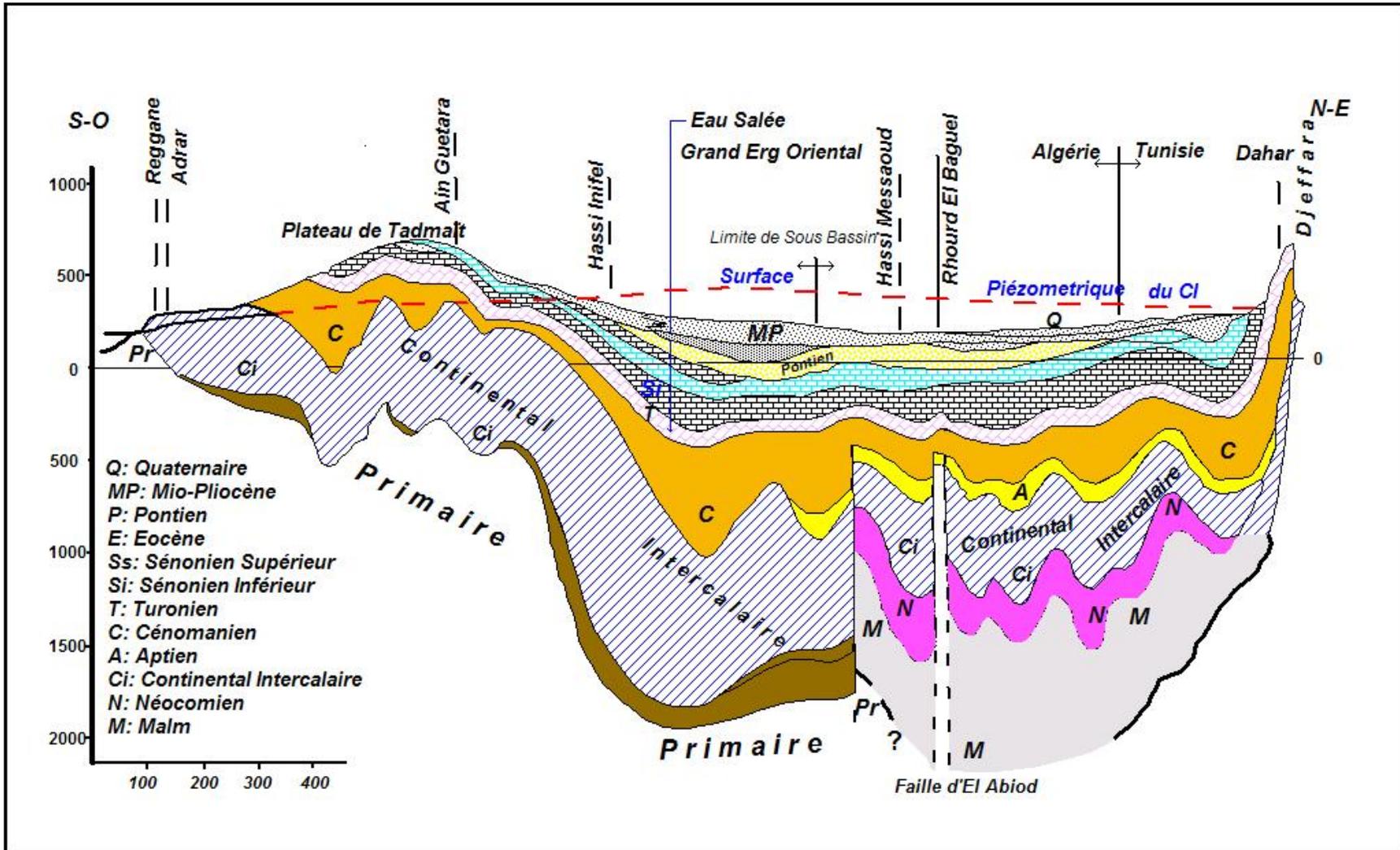


Fig. 16 : Coupe hydrogéologique synthétique du Sahara septentrionale (UNESCO 1972).

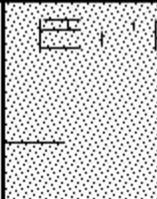
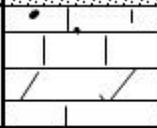
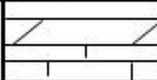
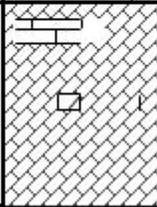
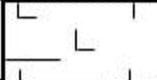
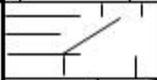
ERE	AGE	ETAGE	e(m)	Pf(m)	Log	Description lithologique	Aspect Hydrogéologique	
CENOZOIQUE	Néogène	Moi-Pliocène	230	230		Sable blanc à translucide avec présence de calcaire crayeux et argile brun rouge	Nappe du Mio-Pliocène	
	Pléocène	Eocène	120	350		Calcaire dolomitique à silex	Nappe du Sénono-Eocène	
MESOZOIQUE	CRETACE	SENONIEN	Carbonaté	100	450		calcaire dolomie	IMPERMEABLE
			Anhydritique	220	670		Anhydrite blanche massive et calcaire et dolomie	
			Salifère	130	800		Sel blanc à translucide. Passées d'argile	
		Turonien	90	890		Calcaire dolomitique présence d'argile grise	Nappe du Turonien	

Fig.17 : Log hydrogéologique de la région de Hassi Messaoud du Complexe Terminal (ANRH, 2004).

### **3. 2. 2. Caractéristiques hydrodynamiques du Complexe Terminal**

En l'absence des récents essais de pompage, nous prenons en considération ceux de l'UNESCO (1972).

#### **3. 2. 2. 1. Transmissivité (T)**

La valeur moyenne de la transmissivité est d'ordre de  $3.7.10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ .

#### **3. 2. 2. 2. Coefficient d'emménagement (S)**

Le coefficient d'emménagement est d'ordre de  $25. 10^{-3}$  au Sud est du Sahara Algérienne.

- L'aquifère du Mio-Pliocène : La transmissivité est d'ordre de  $3.7. 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$  et la perméabilité est d'ordre de  $1.3.10^{-5} \text{ m/s}$  c'est-à-dire faible à cause de la nature des formations de l'aquifère (grès et sables argileux, graviers).
- L'aquifère du Sénono-Eocène carbonaté : La transmissivité y est d'ordre de  $2.6.10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$  et le niveau piézométrique est autour de 128 m absolus.
- L'aquifère du Turonien carbonaté : Cette nappe captive peut présenter une très forte concentration.

#### **3. 2. 2. 3. Carte piézométrique et Interprétation**

La carte piézométrique de la zone d'étude a été établie à l'aide des données de piézométrie de l'année 2013 fournies par l'A.N.A.R.H et A.D.E.

La carte piézométrique est un document essentiel pour l'hydrogéologie, elle exprime la morphologie de la surface piézométrique de la nappe à une période déterminée par ses courbes isopièzes. Celle-ci fournit des informations sur le tracé des lignes de courant et le sens d'écoulement.

Dans la région de Hassi Messaoud, les eaux de la nappe de complexe terminal sont destinées essentiellement à l'activité pétrolière et de façon moindre aux différents usages domestiques (les bases de vie et cités résidentielles).

On compte de nombreux forages dans la région de Hassi Messaoud. Nous n'avons considérés, pour l'étude piézométrique ci-dessous, que les forages de la ville, qui ont d'objectifs ; la nappe du Complexe Terminal (CT).

La méthode d'interpolation (*gridding method*) choisie de la cartographie automatique est le krigeage ordinaire qui intègre une la structure de la variabilité exprimée par le variogramme omnidirectionnel. Ce variogramme a été calculé dans la direction  $0^\circ$  avec une Tolérance de  $90^\circ$ . Il a été modélisé par une un schéma de régionalisation sphérique de portée  $a= 2150$  m, un palier  $C= 108$  m<sup>2</sup> et un effet de pépité  $C_0= 24$  m<sup>2</sup>. À partir cette portée, la zone d'influence d'un forage est d'estimé à 2150, cette portée sera prise en considération pour le rayon de recherche appliquée au krigeage ordinaire.

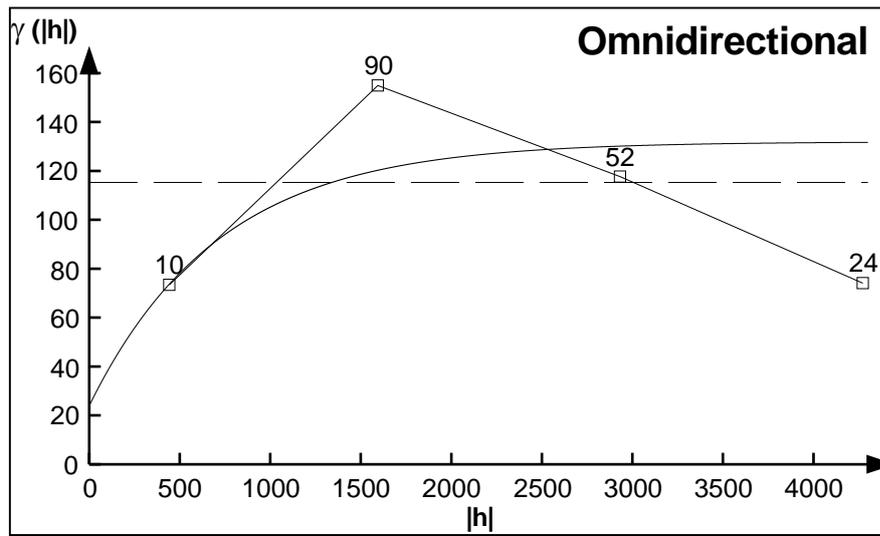


Fig. 18 : Variogramme de la piézométrie du Complexe terminal (CT) Hassi Messaoud.

La visualisation en isopièze a été faite à l'aide du logiciel Surfer. 9 du Golden software package (Fig.18).

L'examen de la carte piézométrique dressée à l'échelle de la région (Fig. 19) montre que les niveaux piézométriques varient entre 106 et 156 m. Nous constatons les remarques suivantes :

Une zone de divergence au centre de la carte marque une dome piézométrique, liée à la topographie. En effet, la zone Hassi Messaoud est caractérisée par une dome régionale. Les courbes isopièzes sont légèrement sinueuses témoigne d'un gradient hydraulique élevé. Ceci est dû à une cone de dépression liée à un excès de pompage. Un sens d'écoulement régional des eaux souterraines NE-SO.

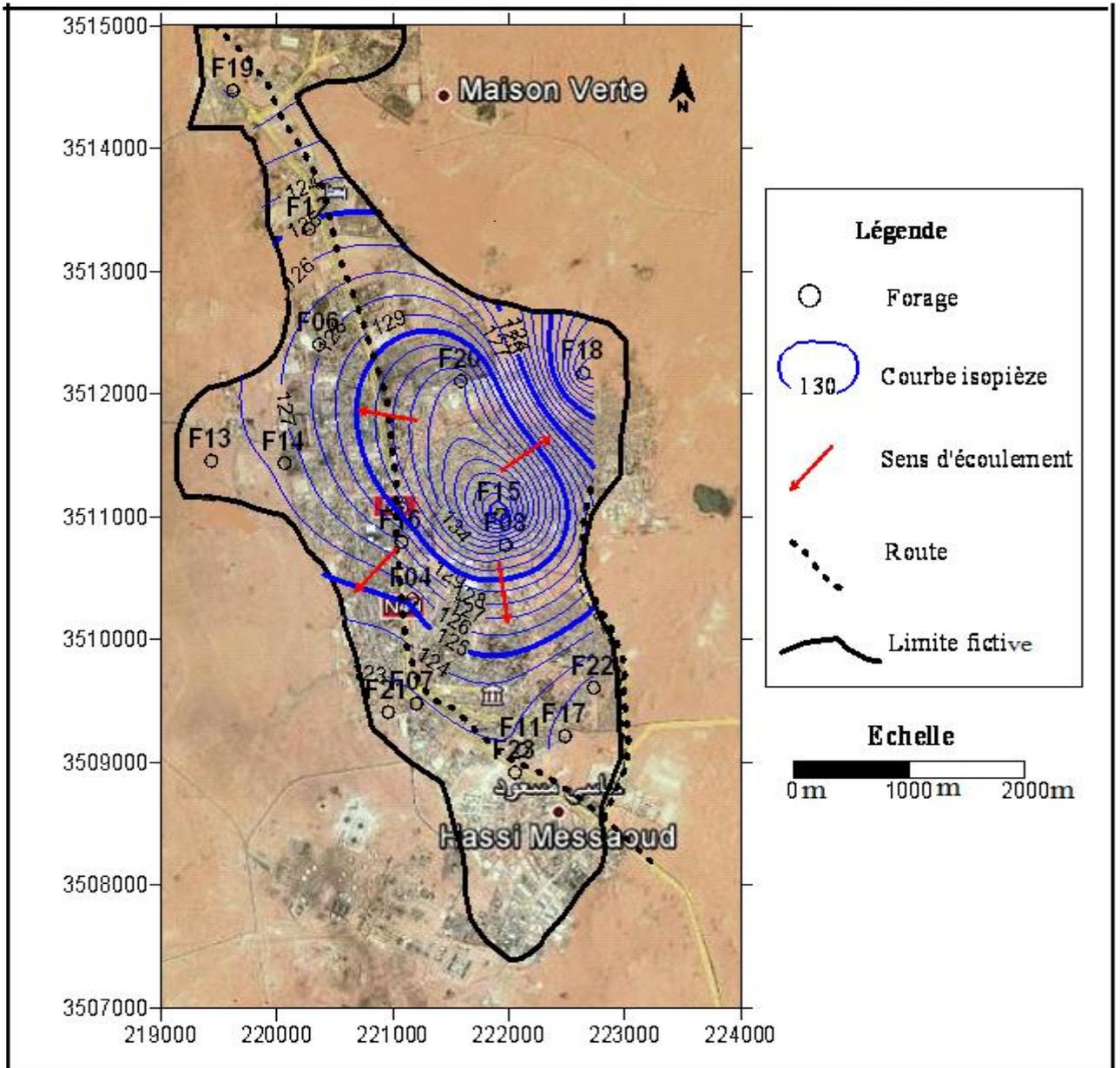


Fig. 19: Carte piézométrique de la nappe de Complexe Terminal de Hassi Messaoud.

### 3. 3. CONCLUSION

La région de Hassi Messaoud renferme d'énormes quantités des eaux souterraines qui jouent un rôle important dans le développement industriel, principalement l'activité pétrolière. Ces ressources en eaux sont assurées par deux systèmes d'aquifère à savoir :

- La nappe du Complexe Terminal (C.T) : elle regroupe les aquifères du Mio- Pliocène, de l'Eocène et du Sénonien carbonaté ;
- La nappe du Continental Intercalaire (C.I) : elle se présente comme un aquifère multicouche de l'Albien, Barrémien et Néocomien.

La nappe du Complexe Terminal de région de Hassi Messaoud se caractérise par des épaisseurs qui varient de 150 à 230 m en moyenne. La carte piézométrique montre que les courbes isopièzes sont légèrement sinueuses témoignant d'un gradient hydraulique élevé. Ceci est dû à une zone de dépression liée à un excès de pompage. Un sens d'écoulement régional des eaux souterraines NE-SO.

# Hydrochimie

---

## 4. 1. INTRODUCTION

L'étude de la chimie des eaux souterraines apporte à l'hydrogéologie non seulement une somme considérable de renseignements utiles à la compréhension des phénomènes se produisant dans les systèmes aquifères. C'est-à-dire dans les échanges possibles entre l'eau et la roche, mais elle lui permet également de préciser la répartition quantitative des différents éléments dissous et d'apprécier la qualité des eaux pour l'A.E.P et l'irrigation. Le but de cette étude hydrochimique est de :

- Déterminer et analyser les différents paramètres physico-chimiques ;
- Déterminer la répartition quantitative des différents éléments majeurs ;
- Déterminer les principaux faciès chimiques des eaux et les comparer.

Dans le cadre de cette étude on a exploité les données relatives aux analyses chimiques correspondant aux points d'eau sélectionnés (forages) effectués par le service de laboratoire de l'ANRH et ADE de Ouargla sur l'information disponible des 16 forages captant la nappe du Complexe terminal de la région de Hassi Messaoud.

## 4. 2. LES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES

Les paramètres physico-chimiques mesurés sont :

### 4. 2. 1. La Température (T)

La température des eaux des nappes aquifères dépend du gradient géothermique dont la valeur moyenne est de l'ordre de 3 °c tous les 100 m.

### 4. 2. 2. Le potentiel d'hydrogène (pH)

Le pH d'une solution varie en fonction de la concentration d'ions  $[H_3O^+]$  ou  $[H^+]$ .  
Pour calculer ce pH on utilise la formule :

$$pH = - \text{Log} [H_3O^+]$$

- Pour un pH = 7 solution neutre.
- Pour un pH >7 solution basique.
- Pour un pH <7 solution acide.

Les valeurs du pH varient légèrement de 7.8 à 6.6 mais ils suivent toujours les normes Algériennes (Fig. 20).(Voir l'annexe)

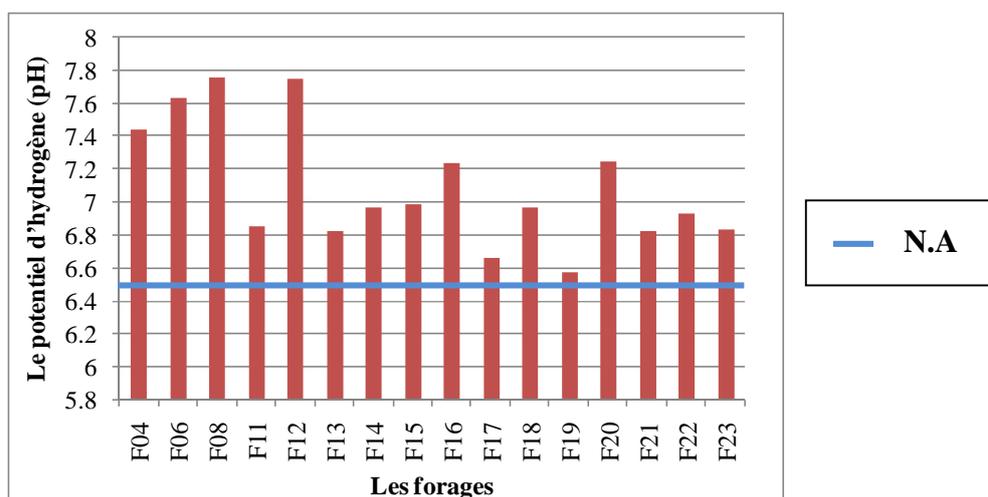


Fig. 20 : Histogramme de la variation de (pH) dans les forages de la nappe du Complexe Terminal - Hassi Messaoud.

### 4. 2. 3. La conductivité électrique (CE)

Elle permet globalement d'évaluer la teneur ou la concentration des ions présents dans l'eau. L'eau douce est évidemment résistante, par contre, l'eau salée est conductrice. C'est un paramètre qui dépend de la minéralisation qui est la totalité des sels dissous dans l'eau avec les matières organiques.

L'histogramme qui montre les variations de la conductivité (CE) montre des valeurs variant entre 1200 à 4890 ( $\mu S/cm$ ), (Fig. 21) dont la valeur maximale est observée au niveau du forage (F04). La valeur minimale est enregistrée au forage (F06).

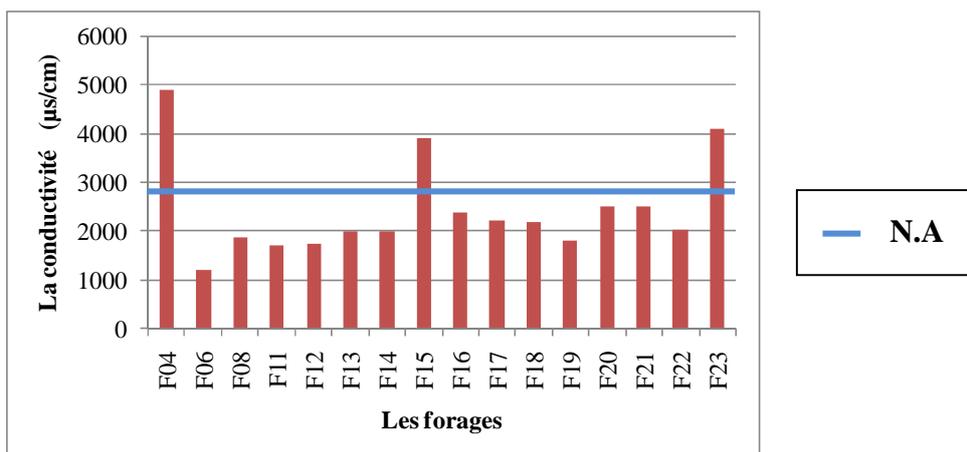


Fig. 21 : Histogramme de la variation de la conductivité (CE) dans les forages de la nappe du Complexe Terminal - Hassi Messaoud.

#### 4. 2. 4. Les cations ( $\text{Ca}^{++}$ , $\text{Mg}^{++}$ , $\text{Na}^+$ , $\text{K}^+$ )

##### 4. 2. 4. 1. Le calcium ( $\text{Ca}^{++}$ )

Le calcium est le résultat de la dissolution des roches carbonatées en présence du  $\text{CO}_2$  dans l'eau. Comme il peut provenir des formations gypseuses.

Les valeurs obtenues au niveau des forages varient entre de 132.26 à 264.52 mg/l, (Fig. 22) dont la valeur maximale est observée au forage (F21) et la valeur minimale a été enregistrée au forage (F06).

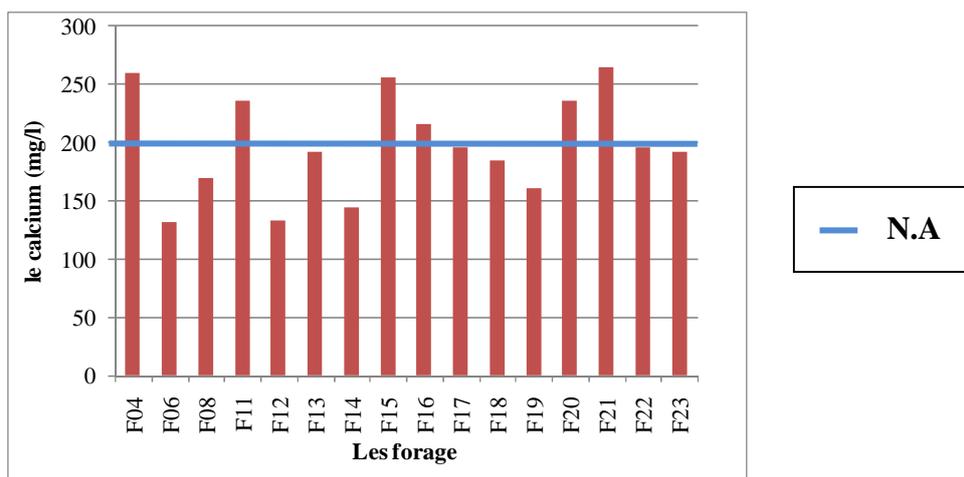


Fig. 22 : Histogramme de la variation du calcium ( $\text{Ca}^{++}$ ) dans les forages de la nappe du Complexe Terminal - Hassi Messaoud.

#### 4. 2. 4. 2. Le magnésium (Mg<sup>++</sup>)

Il peut parvenir de la dissolution des formations dolomitiques en présence du CO<sub>2</sub> ou de la dissolution des dolomies et des formations gypsifères.

Les valeurs obtenues varient entre 48 à 181,8 mg/l, (Fig. 23) dont la valeur maximale est remarquée au niveau du forage (F04) et la valeur minimale au niveau du forage (F17).

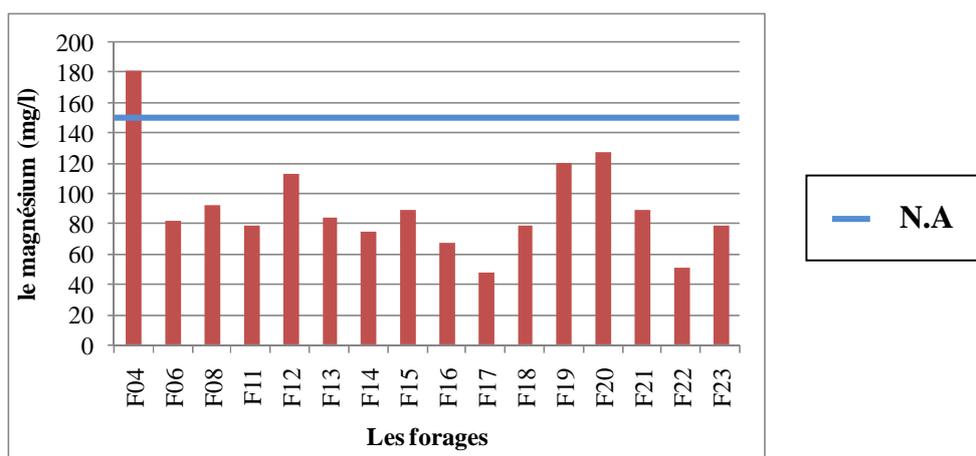


Fig. 23 : Histogramme montre de la variation du Magnésium (Mg<sup>++</sup>) dans les forages de la nappe du Complexe Terminal - Hassi Messaoud.

#### 4. 2. 4. 3. Sodium et potassium (Na<sup>+</sup> et K<sup>+</sup>)

Le sodium est présent dans les roches salines comme le sel gemme, il est facilement entraîné en solution en présence de l'eau. Le Sodium est beaucoup plus abondant que le potassium qui se trouve essentiellement sous forme de chlorure dans les évaporites.

Les valeurs obtenues varient entre de 10 à 54 mg/l pour le potassium (K<sup>+</sup>) et 100 à 780 mg/l pour le sodium (Na<sup>+</sup>) (Fig. 24). La valeur maximale du sodium et potassium ont été observée au niveau du forage (F04) et (F13) respectivement. On constate que la concentration de (Na) a largement dépassé la teneur des normes Algériennes fixées à 250 mg/l pour le (K<sup>+</sup>) et 15 mg/l pour le (Na<sup>+</sup>). (Voir l'annexe).

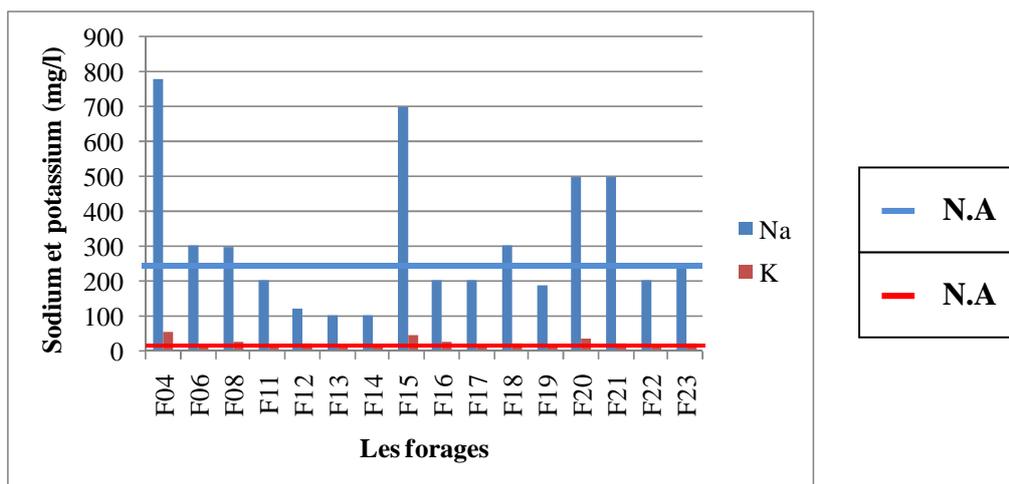


Fig. 24 : Histogramme montre de la variation du Sodium ( $\text{Na}^+$ ) et potassium ( $\text{K}^+$ ) dans les forages de la nappe du Complexe Terminal - Hassi Messaoud.

#### 4. 2. 5. Les anions ( $\text{Cl}^-$ , $\text{HCO}_3^-$ , $\text{SO}_4^{2-}$ , $\text{CO}_3^{2-}$ , $\text{NO}_3^-$ )

##### 4. 2. 5. 1. Le chlorure ( $\text{Cl}^-$ )

Les chlorures sont rencontrés en grande quantité dans les eaux souterraines et proviennent de la dissolution du sel par lessivage des terrains salifères et du rejet des eaux d'origine industrielle.

Les valeurs des chlorures varient de 140 à 1067,55 mg/l dont la valeur maximale a été enregistrée au niveau du forage (F20). La valeur minimale est localisée au le forage (F12). (Fig. 25).

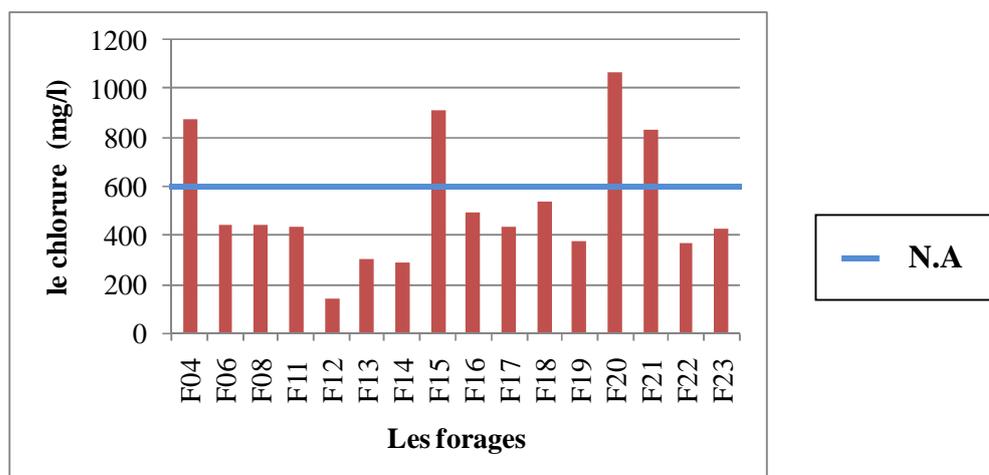


Fig. 25 : Histogramme montre la variation des chlorures ( $\text{Cl}^-$ ) dans les forages de la nappe du Complexe Terminal - Hassi Messaoud.

#### 4. 2. 5. 2. Les bicarbonates ( $\text{HCO}_3^-$ )

Les bicarbonates ( $\text{HCO}_3^-$ ) proviennent de la dissolution des roches carbonatées dans l'eau en fonction de la tension en  $\text{CO}_2$ , de la Température et le pH et de la nature lithologique des terrains traversés.

La nappe du complexe Terminal à Hassi Messaoud présente des valeurs variant entre 122 à 207,4 mg/l (Fig. 26).

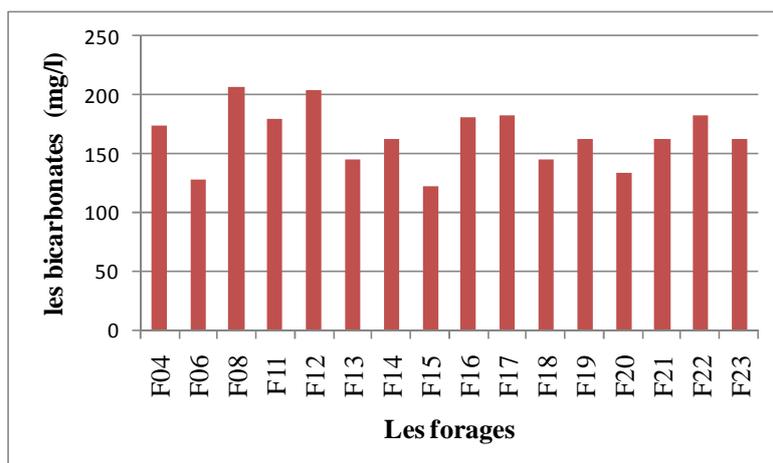


Fig. 26 : Histogramme montre la variation des bicarbonates ( $\text{HCO}_3^-$ ) dans les forages de la nappe du Complexe Terminal de la région de Hassi Messaoud.

#### 4. 2. 5. 3. Les sulfates ( $\text{SO}_4^-$ )

Ils sont toujours présents dans les eaux naturelles, leur présence dans l'eau provient soit :

- De la légère solubilité des sulfates calcium ( $\text{CaSO}_4$ ) dans les formations gypseuses ;
- Du lessivage des terrains argileux et marneux ;
- Des eaux usées contenant de l'acide sulfatique.

Les concentrations de la nappe varient entre 300 à 1688 mg/l (Fig. 27) dont la valeur maximale est observée au niveau du forage (F04) et la valeur minimale au niveau du forage (F16). On remarque que les concentrations des sulfates dans la plupart des forages dépassent les normes Algérienne. (Voir l'annexe).

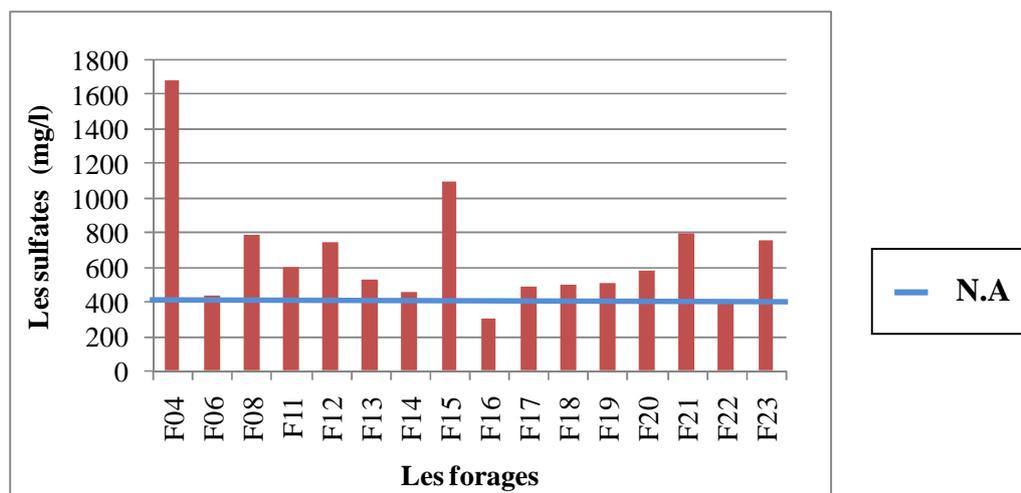


Fig. 27 : Histogramme montre la variation de  $(SO_4^{2-})$  dans les forages de la nappe du Complexe Terminal de la région de Hassi Messaoud.

#### 4. 2. 5. 4. Les Nitrates ( $NO_3^-$ )

Les nitrates sont rarement présents dans les eaux souterraines. Ils proviennent essentiellement de l'azote organique du sol (par l'intermédiaire des bactéries) des engrais chimiques, ainsi que les eaux usées. Les concentrations au niveau de Hassi Messaoud sont très faibles.

#### 4. 2. 6. La dureté totale (DHT)

Elle exprime la quantité des sels de calcium et de magnésium dissous dans l'eau :

$$DHT = (r \text{ Ca} + r \text{ Mg}) \text{ méq/l.}$$

$$DHT = (r \text{ Ca} + r \text{ Mg}) \times 5 \text{ }^\circ\text{F (degré Français).}$$

La dureté totale calculée pour les eaux de la nappe du complexe terminal varie entre 84.11 et 136.76  $^\circ\text{F}$ . Les eaux de cette nappe sont alors donc très dures.

#### 4. 2. 7. Le résidu sec (R.S)

Il exprime la totalité des sels dissous dans l'eau et des suspensions organiques et minérales obtenu par pesées (évaporation à 110 $^\circ\text{C}$  / 24 h) c'est donc la minéralisation totale de l'eau.

Les valeurs obtenues varient entre de 1000 à 4800 mg/l (Fig. 28) dont la valeur maximale est remarquée à la base ENAFOR (F13) et la valeur minimale au niveau de la zone industriel (F06). Ces valeurs sont proportionnelles aux valeurs des conductivités électriques.

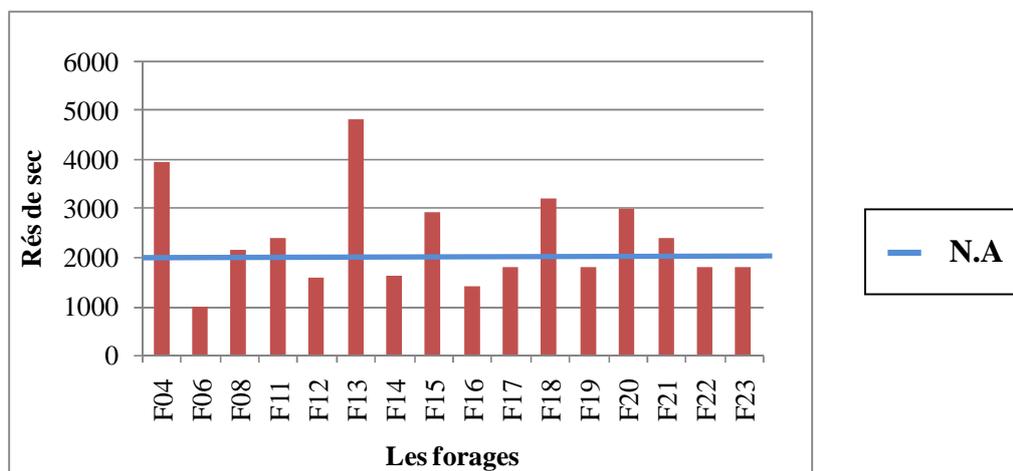


Fig. 28 : Histogramme montre les variations de (R.S) dans la nappe du Complexe Terminal de la région de Hassi Messaoud.

#### 4. 2. 8. Fluore (F)

Est un métalloïde de la famille des hologenèse. Il est le plus électronégatif de cette famille ce qui lui confère une réactivité chimique telle qu'on ne le rencontre jamais à l'état libre de la nature mais sous la forme d'ions fluorures.

Les concentrations de la nappe varient entre 1.57 à 2.93 mg/l (Fig. 29) dont la valeur maximale est observée au niveau du forage (F11) et la valeur minimale au niveau du forage (F07). On remarque que les concentrations des Fluore dans la plupart des forages dépassent les normes Algérienne. (Voir l'annexe).

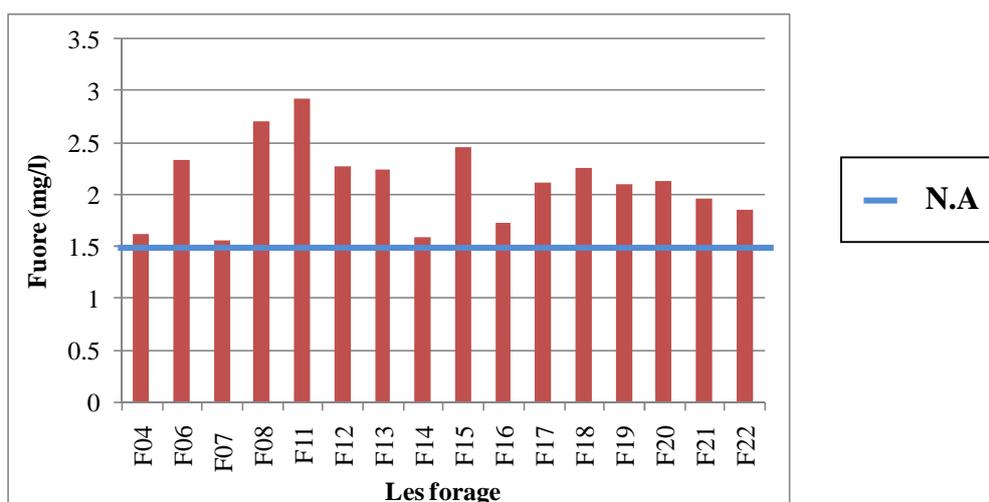


Fig. 29 : Histogramme montre les variations de (F) dans la nappe du Complexe Terminal de la région de Hassi Messaoud.

### 4. 2. 9. Teneurs en ions majeurs

L'analyse des eaux de la nappe du complexe terminal a montré les variations des teneurs en éléments majeurs comme indiqué dans le tableau ci-dessous (Tableau. 10).

Tableau. 11 : Variations des teneurs en éléments majeurs des eaux de la nappe du Complexe terminal de la région de Hassi Messaoud.

Eléments chimiques	Teneurs (mg/l)
Hco <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	122 - 207,4
Cl <sup>-</sup> (mg/l)	140 - 1067,55
So <sub>4</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	300 - 1688
Ca <sup>++</sup> (mg/l)	132,26 - 264,52
Mg <sup>++</sup> (mg/l)	48 - 181,8
Na <sup>+</sup> (mg/l)	100 - 780
K <sup>+</sup> (mg/l)	10 - 54
pH	6,57 - 7,76

## 4. 3. CLASSIFICATION ET REPRESENTATION GRAPHIQUE DES EAUX

### 4. 3. 1. Etablissement de la formule caractéristique des eaux selon STABLER

Dans cette classification les concentrations exprimées en méq/l (r) sont ramenées à une concentration ionique de 100%. Ces concentrations sont exprimées pour une formule caractéristique qui se base sur la prédominance du tel anion ou cation. Cette formule permet de faire une comparaison entre plusieurs eaux d'origine différente.

r : le poids de l'élément considéré en mg/l : équivalent chimique (e) et désigne la quantité en réaction (meq/l), avec :  $e = \frac{M}{V}$  où e : désigne l'équivalent chimique

**M** : désigne la masse atomique de l'élément

**V** : désigne la valence ionique de l'élément

$r \% = r \times 100 / C_T$  : désigne la quantité en réaction en pourcentage

**C<sub>T</sub>** : désigne la concentration totale

Pour la nappe du Complexe Terminal de Hassi Messaoud, nous ne disposons que de 16 résultats d'analyse d'échantillons prélevés à partir des forages captant cette nappe.

D'après STABLER, la détermination des formules caractéristiques montre 5 types de faciès chimiques (Tableau. 11) :

Tableau. 12 : Pourcentage de fréquence des faciès chimiques de la nappe du Complexe terminal de la région de Hassi Messaoud

faciès chimiques	Fréquence%
<b>Chloruré sodique</b>	31.25%
<b>Sulfaté sodique</b>	18.75%
<b>Sulfaté calcique</b>	18.75%
<b>Chloruré calcique</b>	18.75%
<b>Sulfaté magnésique</b>	12.5%

Les résultats détaillée de cette classification par forage sont présentés dans le Tableau. 12. Les faciès Chloruré sodique sont largement réponsus sur l'ensemble des échantillons la région.

Tableau. 13 : Faciès des eaux de la nappe du Complexe Terminal de Hassi Messaoud d'après STABLER par forage.

Nom de forage	Les anions	Las cations	Faciès chimique
F04	r% So <sub>4</sub> <sup>-2</sup> > r% Cl > r% HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	r % K+Na > r% Mg > r% Ca	<b>Sulfaté-Sodique</b>
F06	r% Cl > r% So <sub>4</sub> > r% HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	r % K+Na > r% Mg > r% Ca	<b>Chloruré- sodique</b>
F08	r% So <sub>4</sub> > r% Cl > r% HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	r % K+Na > r% Ca > r% Mg	<b>Sulfaté-sodique</b>
F11	r% So <sub>4</sub> > r% Cl > r% HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	r % Ca > r% K+Na > r% Mg	<b>Sulfaté-calcique</b>
F12	r% So <sub>4</sub> > r% Cl > r% HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	r % Mg > r% Ca > r% K+Na	<b>Sulfaté - magnisique</b>
F13	r% So <sub>4</sub> > r% Cl > r% HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	r % Ca > r% Mg > r% K+Na	<b>Sulfaté-calcique</b>
F14	r% So <sub>4</sub> > r% Cl > r% HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	r % Ca > r% Mg > r% K+Na	<b>Sulfaté-calcique</b>
F15	r% Cl > r% So <sub>4</sub> > r% HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	r % K+Na > r% Ca > r% Mg	<b>Chloruré- sodique</b>
F16	r% Cl > r% So <sub>4</sub> > r% HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	r % Ca > r% K+Na > r% Mg	<b>Chloruré- calsique</b>
F17	r% Cl > r% So <sub>4</sub> > r% HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	r % Ca > r% K+Na > r% Mg	<b>Chloruré- calsique</b>
F18	r% Cl > r% So <sub>4</sub> > r% HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	r % K+Na > r% Ca > r% Mg	<b>Chloruré- sodique</b>
F19	r% So <sub>4</sub> > r% Cl > r% HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	r % Mg > r% Ca > r% K+Na	<b>Sulfaé - magnisique</b>
F20	r% Cl > r% So <sub>4</sub> > r% HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	r % K+Na > r% Ca > r% Mg	<b>Chloruré- sodique</b>
F21	r% Cl > r% So <sub>4</sub> > r% HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	r % K+Na > r% Ca > r% Mg	<b>Chloruré- sodique</b>
F22	r% Cl > r% So <sub>4</sub> > r% HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	r % Ca > r% K+Na > r% Mg	<b>Chloruré- calsique</b>
F23	r% So <sub>4</sub> <sup>-2</sup> > r% Cl > r% HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	r % K+Na > r% Ca > r% Mg	<b>Sulfaté -sodique</b>

### 4.3.2. Représentation graphique des eaux sur le diagramme de PIPER

Ce diagramme comporte un losange et deux triangles équilatéraux dont les cotes sont subdivisées en 100 parties égales correspondant à des pourcentages par rapport à :

- un triangle destiné aux cations
- un triangle destiné aux anions

La représentation des analyses chimiques sur le diagramme de Piper permet d'avoir, une approche vraie de la composition chimique d'une eau. Les cations se trouvant à l'intérieur de sous triangle <<pas de cations dominants>>. Les anions sont proche de zone de sous triangle <<pas de anions dominants>>, avec une légère tendance vers les chlorures.

On remarque que les points projetés sur le losange, se placement pour la plupart au niveau des sous losanges (Fig 30) :

- Chloruré et sulfaté calcique et magnésienne.
- Chloruré sodique et potassique ou sulfaté sodique.

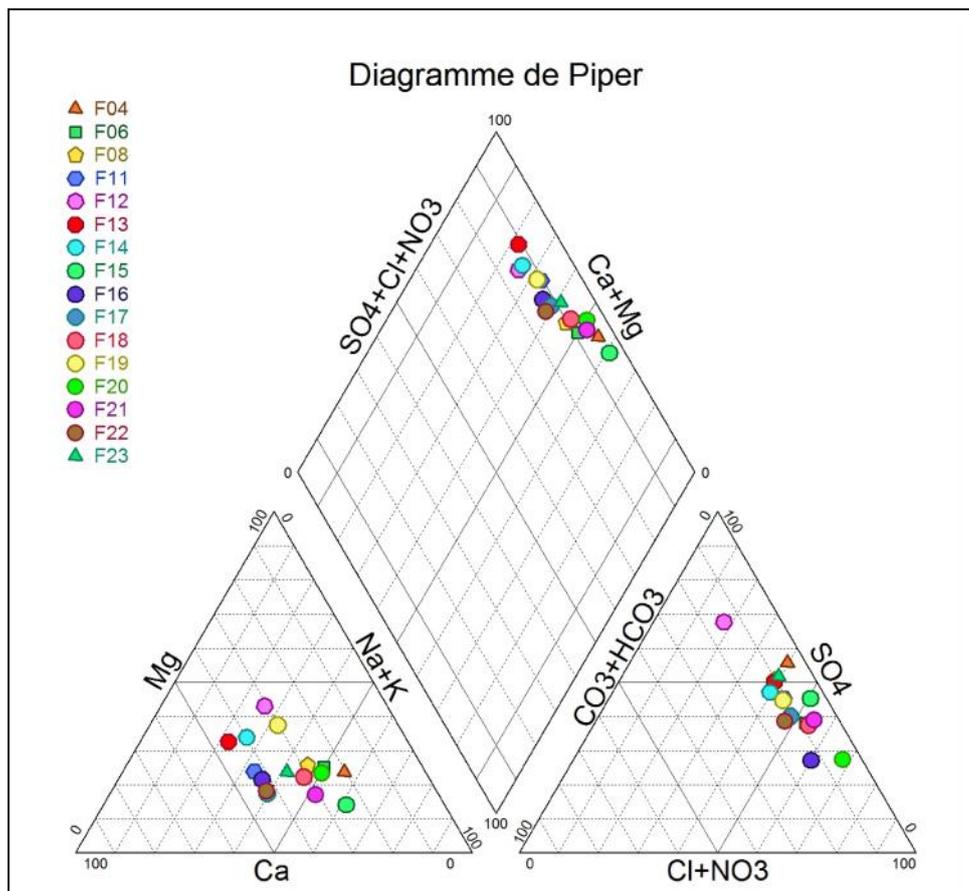


Fig. 30 : Diagramme de piper (Nappe du Complexe terminal de Hassi Messaoud 2013)

### 4. 3. 3. Potabilité des eaux

L'examen de la qualité chimique des eaux prélevées au niveau de la nappe de Complexe Terminal se fait, en comparant ces dernières à la norme internationale retenue par l'organisation mondiale de la santé (OMS) :

Tableau. 14 : Les éléments chimiques influant sur la potabilité de l'eau. Normes applicables aux normes destinées à l'alimentation humaine. (OMS, 1994)

Eléments chimiques	Concentrations maximales acceptables (mg/l)	Concentrations maximales admissibles (mg/l)
Ca <sup>++</sup>	75	200
Mg <sup>++</sup>	50	150
So <sub>4</sub> <sup>-</sup>	200	400
Cl <sup>-</sup>	200	600
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	50	100
RS	500	1500
PH	7 à 8.5	6.5 à 9.2

- **La concentration maximale** acceptable est (d'après RODIER, 1978) la limite à partir de laquelle la qualité d'une eau est diminuée et provoque chez les consommateurs une certaine réticence.

- **La concentration maximale admissible** est la quantité maximale des substances tolérées, les teneurs supérieures pouvant être dangereuses pour la santé.

- **Cas de la nappe Complexe Terminal** : les résultats des analyses chimiques révèlent que pour la majorité des échantillons, la concentration maximale admissible est dépassée. Elle l'est respectivement pour 25%, 80%, 80%, 100% des ions Ca<sup>++</sup>, Mg<sup>++</sup>, Cl<sup>-</sup> et SO<sub>4</sub><sup>-</sup>.

La totalité des échantillons montrent une concentration en résidu sec supérieure à la concentration maximale admissible.

#### 4. 3. 4. Aptitude des eaux à l'irrigation

L'aptitude des eaux à l'irrigation peut être évaluée par un certain nombre de coefficients plus ou moins fiables et parmi lesquels nous retenons le S.A.R.

Le S.A.R (coefficient d'absorption du sodium) est un indice qui mesure le danger que représente l'existence d'une teneur donnée en sodium de l'eau. Il s'obtient par la formule suivante :

$$\text{S.A.R} = \frac{r \text{ Na}^+}{(r \text{ Ca}^{++} + r \text{ Mg}^{++})^{1/2}}$$

Les valeurs du S.A.R et les conductivités exprimées en  $\mu\text{S}/\text{cm}$  à  $25^\circ\text{C}$  sont placées sur le diagramme de WILCOX. Ce diagramme de classification des eaux d'irrigation comporte les subdivisions suivantes (Fig. 32) :

- SAR<10 : eaux utilisées avec peu de danger d'alcalinisation.
- 10<SAR<18 : eaux utilisées avec un danger appréciable d'alcalinisation.
- 18<SAR<26 : eaux utilisées peu provoquer un danger d'alcalinisation.
- SAR>26 : eaux présentant un danger d'alcalinisation très fort.

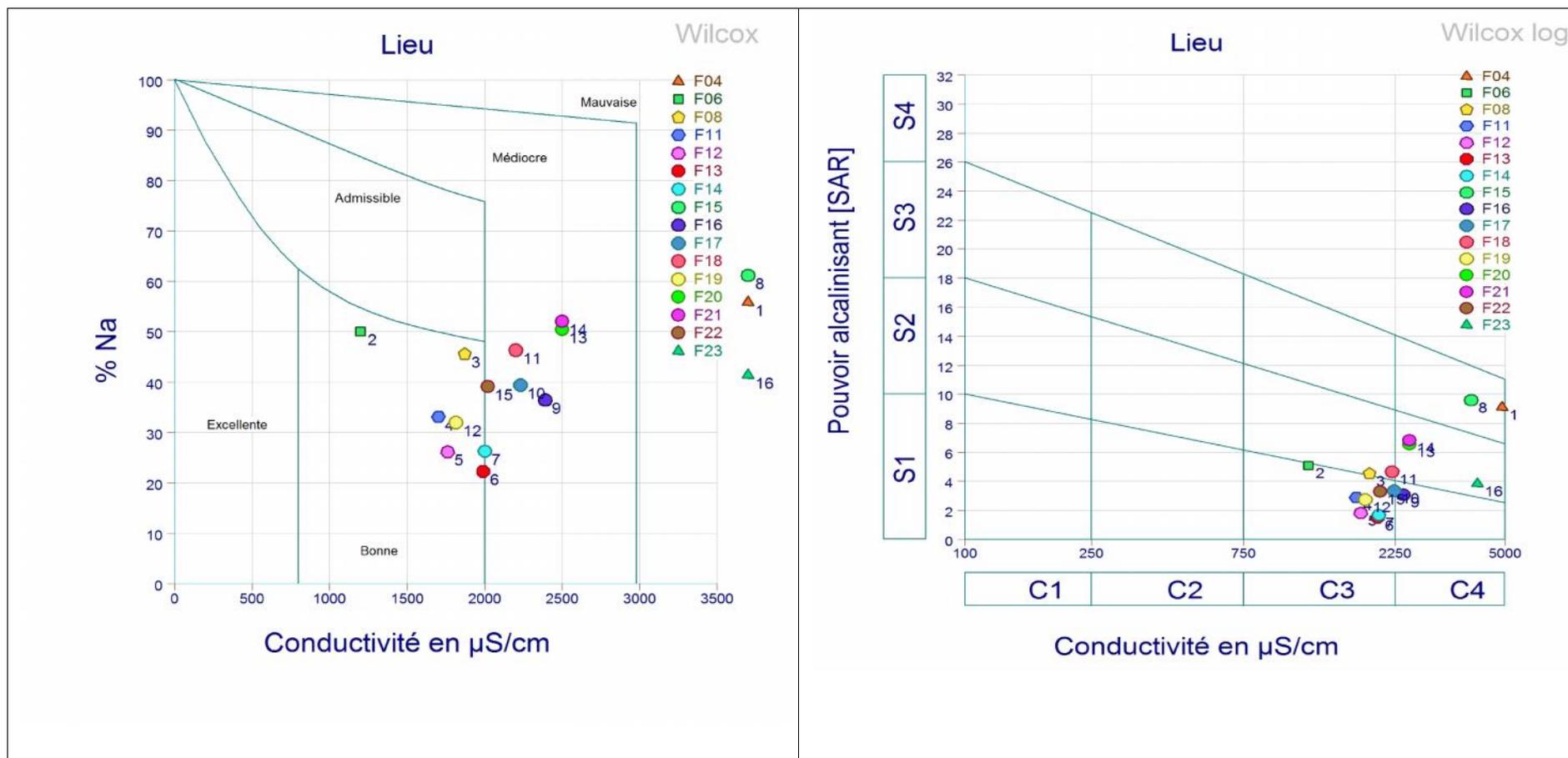


Fig. 31 : Diagramme de Wilcox et Wilcox log des forages de la nappe Complexe Terminal de la région de Hassi Messaoud

Tableau. 15 : Classification des eaux par degrés d'aptitude à l'irrigation par la méthode du S.A.R

Degré	Qualité	Classe	L'état d'utilisation
1	Excellente	C1-S2	Eau utilisable sans danger pour l'irrigation de la plupart des cultures, sur la plupart du sol.
2	Bonne	C2-S1 C2-S2	En général, eau pouvant être utilisée sans contrôle particulier pour l'irrigation de plantes moyennement tolérantes au sel sur sols ayant une bonne perméabilité
3	Admissible	C3-S1 C3-S2 C2-S3	En général, eau convenant à l'irrigation de cultures tolérantes au sel sur des sols bien drainés, l'évolution de la salinité doit cependant être contrôlée
4	Médiocre	C4-S1 C4-S2 C3-S3	En général, eau fortement minéralisée pouvant convenir à l'irrigation de certaines espèces bien tolérantes au sel et sur des sols bien drainés et lessivés
5	Mauvaise	C3-S4 C4-S3 C4-S4	Eau ne convenant généralement pas à l'irrigation mais pouvant être utilisée sous certaines conditions. Sol très perméables, bon lessivage, plantes tolérant très bien le sel.

La plupart des forages ont un S.A.R entre 10 et 18. Les eaux de forages de la nappe Complexe Terminal se situent au niveau des classes : C3-S1, C4-S2 et C4-S3.

#### 4. 4. CONCLUSION

L'étude hydro-chimique de la nappe du Complexe Terminal de la région de Hassi Messaoud, nous a permis de distinguer les types des facies chimiques suivants :

- Chloruré et sulfaté calcique et magnésienne.
- Chloruré sodique et potassique ou sulfaté sodique.

Les eaux de la nappe du Complexe Terminal de la région de Hassi Messaoud sont caractérisées par une conductivité qui varie de 1200 à 4890  $\mu\text{s}/\text{cm}$  et par des résidus secs importants oscillant entre 1000 à 4800 mg/l.

La plupart des forages ont un S.A.R entre 10 et 18. Les eaux de forages de la nappe Complexe Terminal se situent au niveau des classes : C3-S1, C4-S2 et C4-S3.

# Matériel et méthodes

---

## 5.1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre de matériel et méthodes nous présentons l'ensemble de la donnée prise en compte les logiciels et les méthodes utilisées pour l'élaboration du traitement statistique et géostatistique.

Les méthodes statistiques ont été utilisées pour l'analyse des données mono et multi variées, tandis que les méthodes de Krigeage d'indicateurs ont permis l'estimation du degré de fluoration dans la nappe du Complexe Terminal de la région de Hassi Messaoud.

## 5.2. MATERIEL ET DONNEES

### 5.2.1. Description des données utilisées

L'étude statistique a été faite sur les données des échantillons de l'eau de la nappe Complexe terminale (CT) de la région de Hassi Messaoud. Au total 16 échantillons, représentant 16 forages de l'A.E.P. Les analyses ont été effectuées au niveau du service de laboratoire de l'ANRH et ADE d'Ouargla en 2013. Les paramètres physico-chimiques ont fait l'objet de cette analyse.

La nappe de Complexe Terminal (CT) de Hassi Messaoud a été analysée sur les éléments suivants : T.H (F°) CE ( $\mu\text{S/cm}$ ), PH, Rés de sec,  $\text{SO}_4$  (mg/l), Cl (mg/l),  $\text{HCO}_3$  (mg/l),  $\text{NO}_3$  (mg/l), Na (mg/l), K (mg/l), Mg (mg/l), Ca (mg/l),  $\text{NO}_2$  (mg/l),  $\text{PO}_4$  (mg/l), F (mg/l), Fe (tot) (mg/l).

### 5.2.2. Logiciels utilisés

Le traitement de données statistique et géostatistique manuellement est difficile ou pratiquement impossible dans la plus part des cas. Ceci exige l'utilisation de l'outil informatique pour toutes les étapes de l'étude statistique et géostatistique depuis l'élaboration des fichiers jusqu'à la cartographie et la visualisation des résultats. Plusieurs logiciels ont été utilisés dans cette étude:

### 5. 2. 2. 1. Logiciel "EXCEL"

Ce logiciel qui est un tableur a été utilisé essentiellement pour la saisie et la gestion des fichiers des données. Les fichiers de données des paramètres physico-chimiques ont été faits au préalable à l'aide de ce logiciel. En générale, il a été utilisé pour certains calculs et aussi pour qu'ils soient bien adaptés à tout traitement statistique et géostatistique.

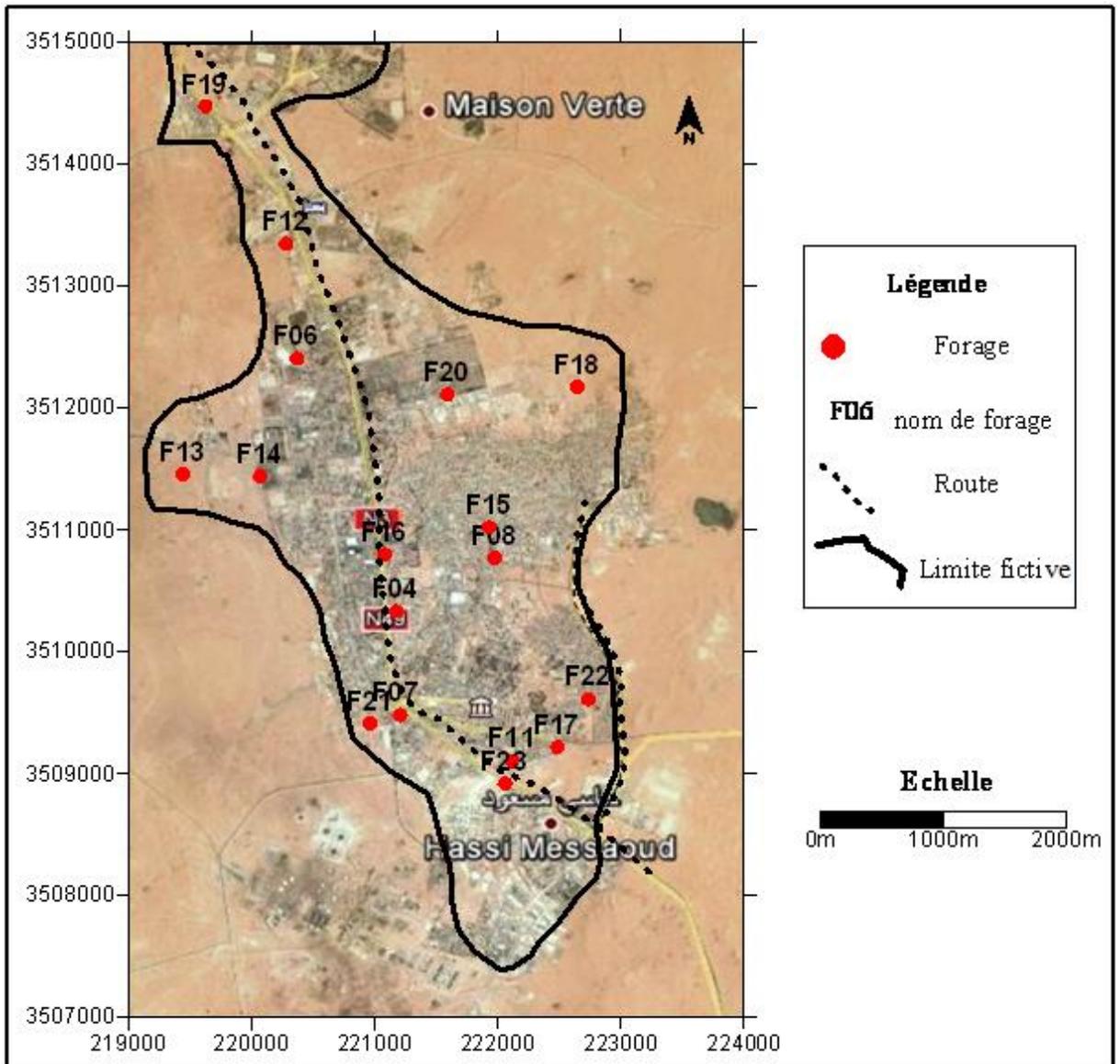


Fig. 32 : Plan de forage de la nappe Complexe Terminal de la région de Hassi Messaoud.

#### **5. 2. 2. 2. Logiciel "VARIOWIN. 2"**

Variowin 2.21 software package est un logiciel, qui a été utilisée pour la construction des variogrammes expérimentaux moyen à deux dimensions (2D). Ce logiciel à interface Windows, est adopté au calcul des couples distant de h, du calcul du variogramme et l'ajustement de celui-ci par les models de régionalisation adéquates.

#### **5. 2. 2. 3. Logiciel " GEOSTATISTICAL TOOLBOX"**

Le logiciel Geostatistical Toolbox publié par Froidevaux, R. (1990) a été utilisé dans notre travail, ce logiciel permet le traitement géostatistique. La principale tache effectuée par ce logiciel est l'élaboration du plan de krigeage d'indicatrice à deux dimensions (2D).

#### **5. 2. 2. 4. Logiciel "STATISTICA. 6"**

Ce logiciel a été utilisé pour le traitement statistique monovarié, bivarié et multivarié (calcul des matrices de corrélation, calcul des facteurs de charges, valeur propres – ACP,).

#### **5. 2. 2. 5. Logiciel SURFER 9"**

C'est un logiciel de multiples utilisation, il a été utilisé pour la réalisation des cartes d'isovaleurs, la visualisation des résultats de krigeage et de cartographie automatique des paramètres physico-chimiques de la nappe du complexe terminale.

### **5. 3. METHODES STATISTIQUES ET GEOSTATISTIQUES UTILSEES**

Toute étude géostatistique doit être précédée par une analyse de données plus poussée, afin de déterminer les paramètres statistique des variables étudiés.

#### **5. 3. 1. Méthodes statistiques**

Trois types d'approches statistiques (monovariée, bivariée et multivarié) ont été utilisés pour le traitement statistique de données.

##### **5. 3. 1. 1. Analyse de données monovariée**

Ce traitement permet de déterminer les paramètres statistiques de la distribution des variables étudiées (paramètres de position centrale et de dispersion), et de résumer graphiquement les caractéristiques essentielles de la distribution de chaque variable. Cette analyse permet déjà, d'évoquer l'homogénéité ou l'hétérogénéité des données. Le coefficient

de variation, l'allure générale de l'histogramme et/ou de la courbe des fréquences cumulées permettraient d'apprécier l'homogénéité ou l'hétérogénéité des données ainsi que la loi de distribution des variables.

### 5.3.1.2. Analyse de données bivariée

Le traitement statistique bivarié consiste à étudier deux variables aléatoires simultanément et de déterminer la relation qui existe entre eux. Il existe plusieurs paramètres quantifiant cette relation. Le coefficient de corrélation linéaire simple est le paramètre le plus utilisé. Il est calculé à l'aide de la formule suivante:

$$r = \text{COV}(x, y) / \sigma_x \sigma_y$$

Où  $r$  : coefficient de corrélation simple de la population ;  
 $x$  et  $y$  : variables ;  $\sigma_x$  et  $\sigma_y$  : écart type des variables  $x$  et  $y$  ;  
 $\text{Cov}(x, y)$  : covariance de variables  $x$  et  $y$  ;

Rappelons que  $\text{cov}(x, y) = E(xy) - E(x).E(y)$ , il est estimé par:

$$R_{x/y} = \frac{\overline{XY} - \bar{X}\bar{Y}}{S_x \cdot S_y}$$

Avec  $\bar{X}$  et  $\bar{Y}$  : teneurs moyennes des variables  $X$  et  $Y$  ;  
 $S_X$  et  $S_Y$  : écarts types de l'échantillon statistique des variables  $X$  et  $Y$ .

Les coefficients de corrélation linéaires simples peuvent être regroupés dans un tableau récapitulatif appelé "**matrice de corrélation**". Notons que la valeur d'un coefficient de corrélation varie entre -1 et +1.

La signification de ce dernier dépend du nombre d'individus utilisés pour son calcul. Une façon empirique de calculer la signification c'est de calculer la valeur de :

$$R_{signif} = \frac{2}{\sqrt{n-1}}$$

Où n est le nombre des données utilisées.

**5. 3. 1. 3. Analyse de donnée multivariée** (Analyse en Composantes Principales ACP)

L'analyse des données multivariée désigne l'ensemble des méthodes, qui permettent de collecter, d'organiser, d'analyser et de présenter les données. Ces méthodes utilisent des techniques géométriques permettant de mettre en évidence des groupes d'individus homogènes, des liens entre individus et variables, des ressemblances ou des différences entre variables et surtout de représenter les données initiales d'un Tableau R(n,p) par un nombre plus petit sans perdre l'information.

Soit un tableau (matrice) R (n, p) où n est le nombre de lignes et p le nombre de colonnes (Tableau. 16).

Tableau. 16: Exemple de données sur les paramètres physicochimiques de 5 forages de la nappe de Complexe Terminal de la région de Hassi Messaoud.

<b>Ech.</b>	<b>CE (<math>\mu\text{s}/\text{cm}</math>)</b>	<b>pH</b>	<b>RS</b>	<b>Na</b>	<b>Cl</b>
<b>F04</b>	4890	7.44	3934	780	875
<b>F06</b>	1200	7.63	1000	300	443.99
<b>F08</b>	1870	7.76	2134	295	445
<b>F11</b>	1700	6.85	2400	200	431.9
<b>F12</b>	1760	7.75	1596	119	140

- *Représentation géométrique*

Les données peuvent être représentées graphiquement en nuage de points-ligne (Représentation  $R^p$ ) et/ou en nuage de point variables (Représentation dans  $R^n$ ).

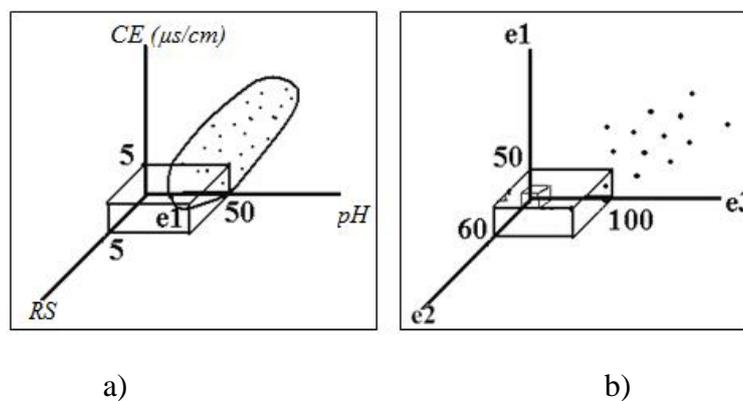


Fig. 33 : Représentation géométrique des données : a)- point-lignes  $R^p$

b)- point-variables  $R^n$

Dans  $R^n$ , chaque point est défini par n coordonnées.

Deux points- lignes apparaissent proches l'un de l'autre, si les deux lignes ont des mesures semblables des variables ou individus et éloignés l'un de l'autre si les mesures sont différentes.

En présence d'un nuage de points dans un espace à n dimensions, on cherchera à saisir et comprendre la dispersion des points c'est-à-dire la signification des différents allongements des nuages de points.

L'analyse en Composantes Principales ACP est l'une des plus anciennes méthodes de l'analyse factorielle. Elle est utilisée pour l'analyse des données qui sont représentées sous forme de tableaux de n individus et p variables. Soit R (n, p) ce tableau de données de terme générale  $r_{ij}$ .

En ACP, ce qui importe c'est la forme du nuage des points par rapport aux axes (droites) qui passent par le centre de gravité du nuage. Il s'agit donc de rechercher les droites qui respectent au mieux l'ensemble des carrés des distances entre couples : C'est celles qui passent par le centre de gravité. D'où la nécessité de procéder à un changement de repère en centrant les variables de la matrice de données initiales. Si de plus les unités des variables sont différentes alors il est préférable de les réduire pour supprimer l'effet unité c'est-à-dire l'échelle

$$x_{ij} = \frac{r_{ij} - \bar{r}_j}{\sqrt{n \cdot \dagger_j}}$$

Ainsi après cette transformation (changement), la matrice d'inertie ne serait autre que la matrice de corrélation linéaire simple:  $C=X^T X$ .

On appelle inertie du point  $N(I)$  par rapport au point  $P$  ou l'expression suivant:

$$InP(I) = \sum_{i=1}^n m_i \|X_i - P\|^2$$

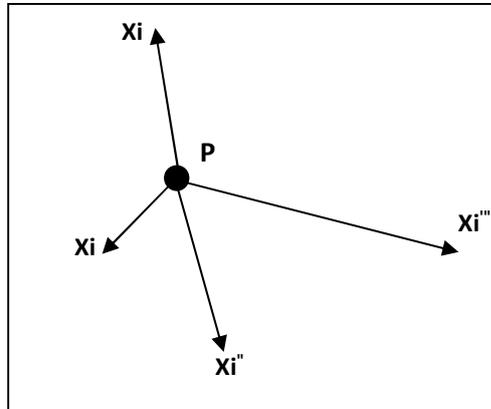


Fig. 34: Représentation géométrique d'inertie des points  $X_i$  ( $i=1$  à  $n$ ) par rapport au point  $P$ .

Après le calcul de  $C$ , il est nécessaire de calculer l'inertie du nuage de point dans les principaux axes d'allongement désignés par  $F_i$  ( $i=1$  à  $N$ ) (Fig. 35) en diagonalisant – c'est à dire en recherchant les premières valeurs propres (variances) et les vecteurs propres correspondants.

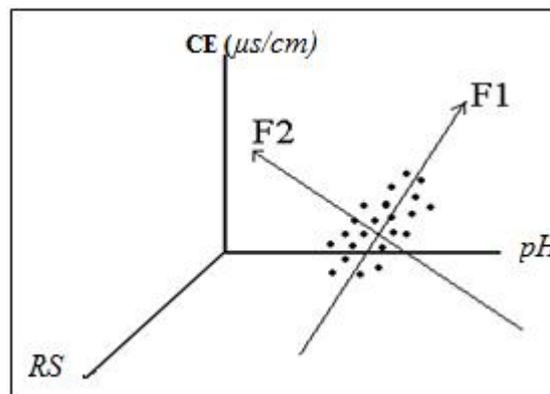


Fig. 35 : Représentation d'un nuage de points et les principaux axes d'allongement (Axes factoriels).

La diagonalisation de la matrice C (matrice d'inertie) permet d'obtenir les p vecteurs propres U et les p valeurs propres . Le vecteur U est connu par ces coordonnées dans l'espace R<sup>p</sup>. Les coordonnées des points X<sup>i</sup> sur les axes factorielles qui sont obtenus par:

$$F(i) = X^i U$$

$$F_r(i) = \sum_{j=1}^k U_{rj} X_{ij}$$

F<sub>r</sub>(i) est le facteur de rang r associé à l'individu i : F<sub>r</sub>(i) est la coordonnée de l'individu (échantillon) i sur l'axe factoriel U<sub>r</sub>. Ce dernier a autant de composantes que de variables j. Dans la pratique l'inertie expliquée par l'axe factoriel :

$$T_r = \frac{\sum_i F_r(i)^2}{\sum_{r=1}^p \sum_i F_r(i)^2}$$

Où ln(I) est l'inertie totale du nuage de points.

Généralement les résultats d'une ACP sont représentés sous forme graphique.

Tableau. 17 : Exemple de facteurs de charge

Elément	F1	F2	F3
<b>CE</b> (μs/cm)	-0.982380	-0.022792	-0.079724
<b>Ph</b>	0.082178	-0.903538	-0.086474
<b>RS</b>	-0.534813	0.333986	0.520826
<b>Na<sup>+</sup></b>	-0.940773	-0.066080	-0.072070
<b>Cl<sup>-</sup></b>	-0.910728	0.168981	-0.111970

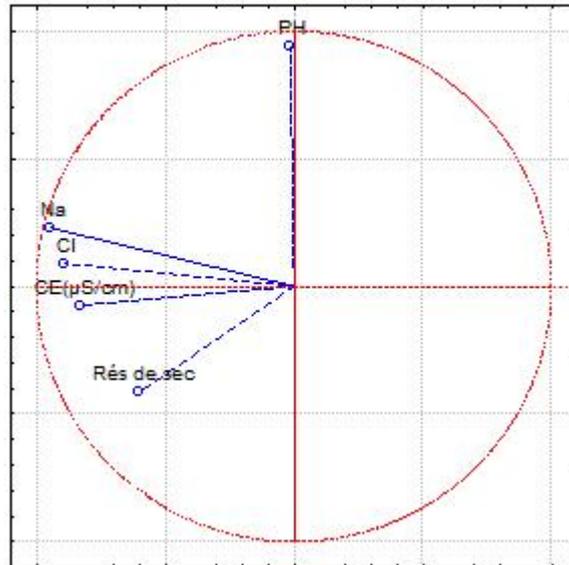


Fig. 36 : Exemple d'une représentation des variables sur le plan des facteurs de charge d'une ACP normée.

Les facteurs des individus (facteur score) sont les coordonnées des individus sur les axes factoriels représentation dans  $R^p$  – Leur calcul est effectué à l'aide de la formule suivante :  $[F_{sc}] = [X] \times [F]$  :  $F_{sc1} = a_{F1}CE + b_{F1}pH + c_{F1}Rs.....$

### 5. 3. 2. Méthodes d'estimation géostatistiques

#### 5. 3. 2. 1. Historique

Le néologisme "géostatistique" a été inventé par Georges Matheron en 1962.

Le préfixe "géo" fait référence au domaine des sciences de la terre, qui est historiquement celui où la géostatistique s'est développée. Les champs d'application actuels concernent des domaines très variés (géologie minière, hydrogéologie, climatologie, sciences sociales, ... etc.).

La désinence "statistique" se réfère à l'utilisation de méthodes probabilistes. L'originalité de la géostatistique par rapport à la statistique classique est la prise en compte de la dépendance entre les observations lorsque celles-ci sont situées dans l'espace. Toutefois, les méthodes géostatistiques ne sont pas exclusivement probabilistes : il existe une branche, connue sous le nom de "géostatistique transitive", qui ne fait pas appel au concept des processus aléatoires (Xavier Emery, 2001).

La géostatistique est connue depuis près de 40 ans dans les mines d'or du Witwatersrand où Daniel Krige proposa une correction statistique à la manière traditionnelle d'estimer la teneur d'un bloc de minerai à partir d'un nombre limité d'échantillons pris autour du bloc à exploiter. La théorie était formulée 10 ans plus tard par Georges Matheron (1971), qui introduisit un outil pour analyser la continuité spatiale des teneurs appelé " le variogramme " et une méthode d'estimation basée sur le variogramme appelée " le krigeage ".

L'avenir de la géostatistique semble brillant. Avec toutes les expériences et les développements des trente dernières années, la géostatistique est devenue une alternative possible aux méthodes géométriques traditionnelles de l'estimation des nappes. D'autres disciplines qui utilisent des données distribuées spatialement (Eau, environnement, hydrologie, hydrogéologie, océanographie) ont commencé à l'adopter.

### 5. 3. 2. 2. Notions de la géostatistique

Matheron (1971), définit la géostatistique de la façon suivante : "la géostatistique est l'application du formalisme des fonctions aléatoires à la reconnaissance et à l'estimation des phénomènes naturels". Une **fonction aléatoire** (F.A)  $Z(x)$  est un ensemble de variable aléatoire  $Z(x_i)$ , définie en chaque point  $x_i$  du gisement  $G$ :

$$Z(x) = \{Z(x_i), \forall x_i \in G\}$$

Un phénomène minéralisé peut être caractérisé par la répartition dans l'espace d'un certain nombre de grandeurs mesurables, que nous appelons " **variables régionalisées**"(V.R).

Ces variables ont une structure d'auto-corrélation qui dépend du module et de la direction du vecteur séparant deux points de mesure. Mathématiquement, une variable régionalisée est une fonction du point  $x$ . Cette fonction est généralement irrégulière et montre deux aspects complémentaires (Matheron, 1973).

- Un aspect aléatoire qui explique les irrégularités locales;
- Un aspect structuré qui reflète les tendances du phénomène à grande échelle.

Si au point  $x_i$  de l'espace, la V.R  $z(x_i)$  est considéré comme valeur unique (valeur vraie) alors la géostatistique étudiera la corrélation spatiale de la V.R et la structure de cette variable dans l'espace. C'est **la géostatistique transitive** (Chauvet, 1999).

Le choix constitutif, de la géostatistique minière consiste à interpréter chaque valeur de la variable régionalisée  $z(x)$ , comme une réalisation particulière d'une variable aléatoire  $Z(x_i)$  implanté au point  $x_i$ , donc plusieurs réalisations sont possibles. C'est la **géostatistique intrinsèque**.

Ce choix constitutif fondamental conduit à des solutions cohérentes et acceptables pour divers problèmes pratiques miniers posés, tel que le problème de l'estimation des réserves locales et récupérables.

### 5.3.2.3. Variogramme

Soit deux variables aléatoire,  $z(x)$  et  $z(x+h)$  mesurées en 2 points "x" et "x+h" (Fig. 37), la variabilité entre ces deux points (Fig. 38) se caractérise par une fonction notée  $2(x, h)$  appelée variogramme (Journel et Huijbregts, 1978).



Fig. 37 : Représentation schématique des points de mesure de la variable.

Le variogramme théorique est défini comme étant l'espérance quadratique de la variable aléatoire  $[z(x) - z(x+h)]$  soit:

$$E = \left\{ [Z(x) - Z(x+h)]^2 \right\} = 2\gamma(x, h)$$

En général, le variogramme  $\gamma(x, h)$  (ou semi-variogramme) est une fonction à la fois du point  $x$  et du vecteur  $h$  (Fig. 38) mais l'estimation de ce variogramme nécessite plusieurs réalisations, or en pratique on ne dispose que d'une seule réalisation, soit le couple  $[z(x), z(x+h)]$  de mesure effectuées aux points  $x$  et  $x+h$ , d'où l'introduction de l'hypothèse intrinsèque: le variogramme ne dépend que du vecteur  $h$  en module et en direction et non du point  $x$ . En admettant cette hypothèse, le variogramme sera estimé par la formule :

$$2\gamma(h, n) = \frac{1}{N(h, n)} \sum_{i=1}^{N(h, n)} [z_i(x) - z_i(x+h)]^2$$

Où  $N(h, n)$  est le nombre de couples  $[z(x), z(x+h)]$  séparé par une distance  $h$  suivant une direction  $n$ . Les résultats obtenus peuvent être représentés sous forme graphique (Fig. 40).

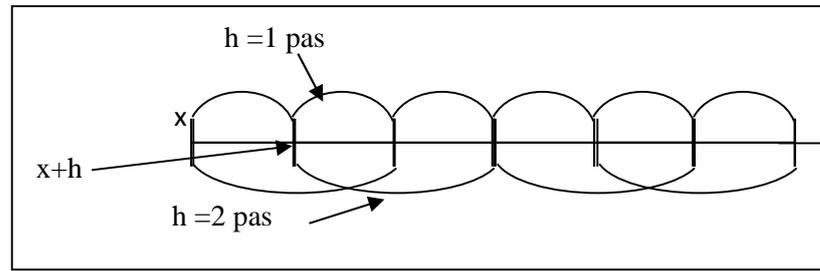


Fig. 38 : Estimation du variogramme.

**a) Propriétés du variogramme directionnel**

On fixe une direction en partant de l'origine  $h = 0$ ,  $(x, h) = 0$ , en général le variogramme croît avec le module du vecteur  $h$ . Cette croissance caractérise le degré de continuité de la variable étudiée (Fig. 39).

Généralement, la stabilisation du variogramme est marquée au delà d'une certaine valeur de  $h$  notée  $a$  appelée portée du variogramme. Ce dernier reste inchangé au-delà de  $h = a$  et ne dépend plus de l'inter-distance entre les valeurs : les mesures ne sont plus corrélées. La portée " $a$ " donne alors un sens à la notion de zone d'influence d'un échantillon ou d'un sondage. Cette portée n'est pas forcément la même dans toutes les directions de l'espace. Elle permet donc de détecter une éventuelle anisotropie ou isotropie dans la structure de la minéralisation.

Le variogramme croît jusqu'à une certaine limite appelé palier puis s'aplatit, mais il peut également croître indéfiniment (effet de dérive).

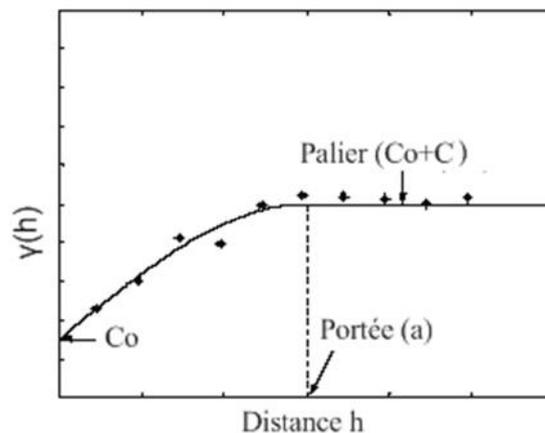


Fig. 39 : Représentation graphique du variogramme

**b) Schéma théorique et ajustement des variogrammes**

Une fois le variogramme expérimental est calculé, il faut alors déterminer un modèle mathématique qui lui correspond et qui doit être opérationnel et simple à l'emploi : C'est l'ajustement du variogramme expérimental. Les schémas théoriques d'usage courant sont classés en schémas à palier, schémas sans palier et schémas à effet de trous (Fig. 40).

- Schéma à palier, présente

➤ Un comportement linéaire à l'origine:

○ Schéma sphérique: 
$$\chi(h) = \frac{3}{2} \frac{h}{a} - \frac{1}{2} \frac{h^3}{a^3} \dots \dots \dots \forall h \in [0, a]$$
  

$$\chi(h) = 1 \dots \text{pour} \dots h \geq a$$

○ Schéma exponentiel: 
$$\chi(h) = 1 - e^{-h/a} \dots \dots \dots \forall h \geq 0$$

➤ Un comportement parabolique à l'origine:

○ Schéma gaussien: 
$$\chi(h) = 1 - e^{-h^2/a}$$

- Schéma sans palier

➤ Schéma en puissance : 
$$\chi(h) = h^\lambda \dots \dots \dots \forall h > 0, \dots 0 < \lambda < 2$$

➤ Schéma logarithmique : 
$$\chi(h) = a \cdot \log(h) \dots \dots \dots \forall h > 0, \dots a = \text{constant} > 0$$

➤ Schéma à effet de trou 
$$\chi(h) = 1 - \frac{\sin(h)}{h} \dots \dots \dots \forall h > 0, \chi(h) = \frac{h^2}{6} \dots \dots \dots h \rightarrow \infty$$

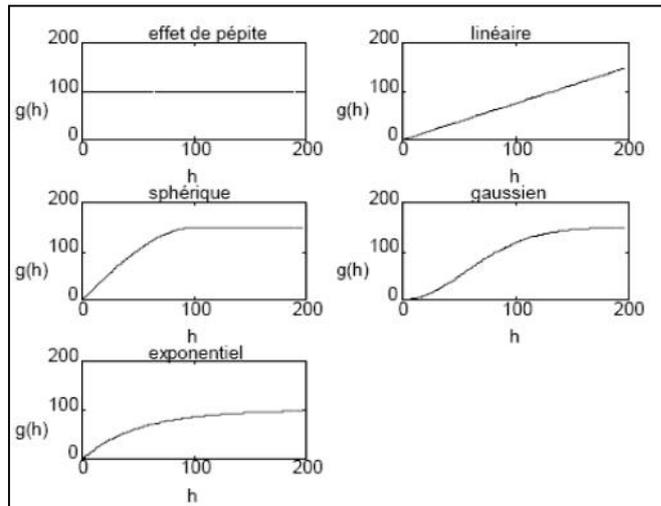


Fig. 40 : Schémas théoriques d'ajustement des variogrammes In (Marcotte, 1997).

### 5. 3. 2. 4. La variance d'estimation

Si  $Z$  est la valeur "vraie" inconnue que l'on cherche à estimer par  $Z^*$ , l'erreur commise est  $(Z - Z^*)$ . Les valeurs  $Z$ ,  $Z^*$ ,  $Z - Z^*$  sont prise comme des réalisations particulières de V.A (variable aléatoire) ou F.A (fonction aléatoire)  $Z, Z^*, Z - Z^*$ .

L'erreur aléatoire  $Z - Z^*$  est alors caractérisée par ses deux premiers moments.

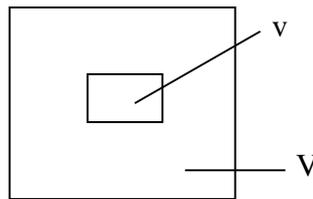
Moyenne  $b = E(Z - Z^*)$

Variance d'estimation  $2E = E(Z - Z^*)^2 - b^2$

Si  $b = 0$ , on dit que l'estimateur  $Z^*$  est sans biais, si non l'estimateur est biaisé.

Le formalisme géostatistique permet de déduire la variance d'estimation élémentaire d'une teneur moyenne  $Z_V$  par une autre teneur moyenne  $Z_v$  est

$$2E(V, v) = 2\bar{\chi}(V, v) - \bar{\chi}(V, V) - \bar{\chi}(v, v)$$



Avec :

$\bar{\chi}(V, v)$  : La valeur moyenne du variogramme entre un point appartenant au domaine  $V$  et un autre au domaine  $v$ ;

$\bar{\chi}(V, V)$  : La valeur moyenne du variogramme entre deux points appartenant au même domaine  $V$ ;

$\bar{\chi}(v, v)$  : La valeur moyenne du variogramme entre deux points appartenant au même domaine  $v$ .

La qualité d'une estimation de  $V$  par  $v$  dépend alors:

- de la géométrie du domaine à estimer : terme  $\bar{\chi}(V, V)$  ;
- de la distance entre l'estimé et l'estimant : terme  $\bar{\chi}(V, v)$  ;
- de la géométrie interne de l'estimant : terme  $\bar{\chi}(v, v)$  ;
- Du degré de régularité du phénomène étudié : utilisation de la caractéristique structurale  $\chi$  .

La formule générale précédente s'étend à la variance d'estimation de la teneur moyenne ZV d'un panneau V par une combinaison linéaire  $z_v^*$  des informations disponibles (Journel, 1978).

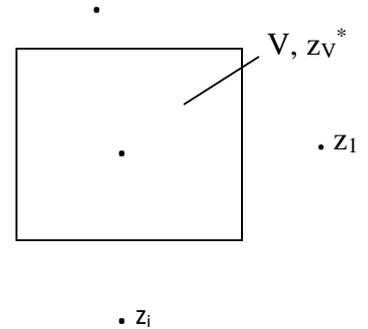
Par exemple si l'on dispose de N informations  $v_i$  de teneurs moyennes  $z(x_i)$ ,  $\lambda_i$  étant le pondérateur associé à l'information  $v_i$ . L'estimateur est:

$$z^* = \sum_{i=1}^N \lambda_i z(x_i)$$

La variance d'estimation s'écrit alors :

$$\sigma_{E(V,v)}^2 = 2 \sum_i \lambda_i \bar{K}(V, v_i) - \bar{K}(V, V) - \sum_i \sum_j \lambda_i \lambda_j \bar{K}(v_i, v_j)$$

Le krigeage consiste à déterminer les pondérateurs  $\lambda_i$ .



### 5.3.2.5. L'estimation par la méthode géostatistique

#### a) Système de krigeage ordinaire

Ce système permet donc de retrouver les N pondérateurs  $\lambda_i$ . Ces derniers, dit pondérateurs de krigeage, donnent la variance d'estimation la plus petite possible et elle est appelée variance de Krigeage. Ce système est le suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^N \lambda_i \bar{K}(v_i, v_j) + \lambda = \bar{K}(v_j, V) \\ \sum_{i=1}^N \lambda_i = 1 \end{array} \right\} \forall i = 1..N \dots et .. j = 1..à..N$$

$$\sigma_k^2 = \sum_{i=1}^N \lambda_i \bar{K}(v_i, V) + \lambda - \bar{K}(V, V)$$

#### - Propriétés et remarques à propos du krigeage ordinaire

- Le système de krigeage ordinaire est un système à N+1 équations à N+1 inconnues qui sont les N pondérateur  $\lambda_i$  et  $\lambda$  qui est le paramètre de Lagrange.
- Le krigeage ordinaire est un estimateur linéaire sans biais. C'est un interpolateur exact.
- Le système et la variance de krigeage rendent compte des 4 faits suivants :
  - de la géométrie du domaine à estimer - terme de  $\bar{K}(V, V)$ .

- de la géométrie entre estimant et estimateur - terme de  $\bar{\chi}(V, v_i)$ .
- de la géométrie interne de l'information - terme de  $\bar{\chi}(v_j, v_i)$ .
- de la structure sous jacente - terme de  $\chi(h)$ .

Ce concept permet donc de calculer la variance d'estimation d'un volume V à partir de différentes géométries et dispositifs. Nous allons donc utiliser cette propriété pour calculer les variances d'estimation de différentes configurations et avoir une idée sur la maille de prospection.

- *paramètres et plan type de krigeage*

Le plan type de krigeage ordinaire utilisé lors de l'estimation de la teneur d'un bloc d'exploitation de support V, à partir de l'ensemble des données des sondages de (échantillons) de support  $v_i$  en utilisant un variogramme expérimental ajusté, est de suivre les étapes suivantes (Journel et Huijbregts, 1978) :

- Déterminer le nombre maximal et minimal d'information nécessaire à un système de krigeage, pour mieux estimer le bloc;
- Le krigeage doit être effectué dans un voisinage restreint de forme sphérique ou ellipsoïdale définie par l'anisotropie zonale; pour mettre le krigeage à l'abri de tous risques de biais et pour faciliter le regroupement de l'information à l'intérieur du voisinage (zone d'influence).

## **5. 4. GEOSTATISTIQUE NON PARAMETRIQUE - KRIGEAGE DES INDICATRICES**

### **5. 4. 1. Définition du variable régionalisée**

L'étude géostatistique se porte sur la variable régionalisée fluore (F). Ce choix est dicté par son importance à la caractérisation des eaux de la nappe du complexe terminal. En effet, la concentration tolérée est limitée au seuil de 2 mg/l. Le Krigeage ordinaire pose des problèmes de stationarité d'une part, et la difficulté d'appliquer ce krigeage sur un modèle hydro-dispersif tel que les eaux des nappes due à l'hydrodynamique continue de la nappe. D'où la nécessité de recourir aux outils de la géostatistique non-paramétrique en particulier le krigeage d'indicatrice relative.

### 5. 4. 2. Krigeage disjonctif

Est le cokrigeage des indicatrice  $I(Y(x)=i)$  ou  $I(Y(x)\geq i)$ . Il s'obtient par résolution de simples systèmes de krigeage qui sont le krigeage absolue et relative. Vu l'inconvénient du krigeage d'indicatrice absolue qui donne des probabilités est supérieur à 1 due à la présence d'un effet de bord, d'où la nécessité d'utiliser le krigeage d'indicatrice relative.

Pour estimer  $I(2)$ ; qui la concentration tolérable du fluore en eau, servant de l'information disponible il suffit de coder les concentrations; calculer et modéliser le variogramme des indicatrices  $I(2)$  en fin effectuer le krigeage. Il s'agit de faire un krigeage des probabilités (et pas des concentrations) pour une concentration limite de 2 mg/l.

### 5. 5. CONCLUSION

La présente étude a été effectuée à l'aide de données d'analyses physico-chimiques des forages font partie du centre ville de Hassi Messaoud. Les données représentent la qualité des eaux de la nappe de complexe Terminal. Une base de données à été crée à l'aide des données échantillons d'eaux analysées sur les principaux paramètres physicochimiques (La conductivité (CE), Le potentiel d'hydrogène (PH), Les cations ( $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ), Les anions ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{--}$ ,  $\text{CO}_3^{--}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ). Au totale 16 échantillons, représentent 16 forages d'eau qui ont été analysée à l'A.E.P.

Le traitement de données statistique et géostatistique a été faite à l'aide de logiciels. Les principaux logiciels utilisés sont : Excel, Variowin. 2, Geostatistical Toolbox, Statistica. 6 et Surfer 9.

Les méthodes utilisées pour la réalisation de ce mémoire sont basés sur l'analyse de données à l'aide de méthodes statistiques monovarié, bivarié et multivarié (ACP). Ceci a pour but de ressortir les associations entre les variables.

Les méthodes géostatistiques non-paramétriques ont été utilisées pour l'estimation à 2D de la fluoration des eaux de la nappe. Ces techniques reposent sur la construction et la modélisation de la variabilité régionalisée avec des variogrammes. Ces variogrammes sont utilisés pour la procédure géostatistique de krigeage.

# Résultats et discussions

---

## 6. 1. INTRODUCTION

Nous présentons dans ce chapitre les résultats et les discussions de cette étude.

L'analyse des donnée mono-varie va montrer les caractéristique statistiques des paramètres physico chimiques de la nappe de Complexe Terminal de la région de Hassi Messaoud. L'analyse bi-varie sera élaborée à l'aide de l'établissement de la matrice de corrélation. L'analyse multivariée sera effectuée à l'aide de l'ACP.

Le Krigeage d'indicatrice sera élaboré sur les donnée du fluore est un model de sa répartition sera proposé.

## 6. 2. ANALYSE DES DONNEES STATISTIQUE

### 6. 2. 1. Statistique élémentaire

Un traitement statistique a été effectuée pour déterminer les paramètres de position centrale et des paramètres de la dispersion. Les résultats obtenus sont reportés au Tableau. 18. Les histogrammes et les graphes de probabilitées ont été effectuées (Annexe.1).

### 6. 2. 2. Traitement statistique bi-varié

Le calcul de la matrice de corrélation (Tableau.10) a été effectué sur l'ensemble des données des échantillons du Complexe Terminal de Hassi Messaoud. On constate que la conductivité (CE) est corrélée positivement à  $\text{SO}_4^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  et  $\text{Ca}^{++}$ .

Tableau. 18 : Paramètres statistiques des éléments chimiques à partir des données de la nappe de Complexe Terminal de la région de Hassi Messaoud.

	<b>N Actifs</b>	<b>Moyenne</b>	<b>Minimum</b>	<b>Maximum</b>	<b>Etendue.</b>	<b>Variance (mg/l)<sup>2</sup></b>	<b>Ecart-type mg/l</b>
<b>T.H (F°)</b>	9,0	95,47	72,70	146,30	73,60	812,1	28,50
<b>CE (µS/cm)</b>	16,0	2440,44	1200,00	4890,00	3690,00	984548,4	992,24
<b>pH</b>	16,0	7,09	6,57	7,76	1,19	0,1	0,38
<b>Rés de sec</b>	16,0	2347,00	1000,00	4800,00	3800,00	1004075,2	1002,04
<b>SO<sub>4</sub><sup>-</sup> (mg /l)</b>	16,0	665,94	300,00	1688,00	1388,00	113335,7	336,65
<b>Cl<sup>-</sup>(mg /l)</b>	16,0	522,60	140,00	1067,55	927,55	67153,8	259,14
<b>HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> (mg /l)</b>	16,0	164,75	122,00	207,40	85,40	631,61	25,132
<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (mg /l)</b>	3,0	8,23	2,00	16,00	14,00	50,8	7,12
<b>Na<sup>+</sup> (mg /l)</b>	16,0	308,25	100,00	780,00	680,00	42476,1	206,10
<b>K<sup>+</sup> (mg /l)</b>	16,0	21,64	10,00	54,00	44,00	166,9	12,92
<b>Mg<sup>++</sup> (mg /l)</b>	16,0	90,90	48,00	181,80	133,80	1051,8	32,43
<b>Ca<sup>++</sup> (mg /l)</b>	16,0	198,23	132,26	264,52	132,26	1929,8	43,93
<b>NO<sub>2</sub><sup>-</sup> (mg /l)</b>	13,0	0,38	0,00	5,00	5,00	1,9	1,39
<b>PO<sub>4</sub><sup>-</sup> (mg /l)</b>	9,0	0,02	0,00	0,16	0,16	0,0	0,05
<b>F (mg /l)</b>	16,0	2,12	1,57	2,93	1,36	0,2	0,39
<b>Fe<sup>++</sup> (tot) (mg /l)</b>	9,0	0,09	0,00	0,26	0,26	0,0	0,10

Tableau. 19 : Matrice de corrélation des éléments chimiques calculée sur l'ensemble des échantillons de Complexe Terminal de Hassi Messaoud.

	T.H (F°)	CE ( $\mu\text{S/cm}$ )	pH	RS	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>++</sup>	Ca <sup>++</sup>	F
<b>T.H (F°)</b>	1,00											
<b>CE (<math>\mu\text{S/cm}</math>)</b>	<b>0,94*</b>	1,00										
<b>Ph</b>	-0,11	-0,11	1,00									
<b>Rés de sec (mg /l)</b>	0,30	0,52	-0,44	1,00								
<b>SO<sub>4</sub><sup>-</sup> (mg /l)</b>	<b>0,75*</b>	<b>0,87*</b>	0,17	0,51	1,00							
<b>Cl<sup>-</sup> (mg /l)</b>	<b>0,89*</b>	<b>0,85*</b>	-0,11	0,34	<b>0,72*</b>	1,00						
<b>HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> (mg /l)</b>	-0,28	-0,17	0,46	-0,20	0,02	-0,40	1,00					
<b>Na<sup>+</sup> (mg /l)</b>	<b>0,89*</b>	<b>0,88*</b>	0,10	0,33	<b>0,86*</b>	<b>0,95*</b>	-0,31	1,00				
<b>K<sup>+</sup> (mg /l)</b>	<b>0,94*</b>	<b>0,97*</b>	0,04	0,43	<b>0,88*</b>	<b>0,88*</b>	-0,08	<b>0,92*</b>	1,00			
<b>Mg<sup>++</sup> (mg /l)</b>	0,52	<b>0,72*</b>	0,35	0,44	<b>0,90*</b>	0,46	0,20	0,66	<b>0,70*</b>	1,00		
<b>Ca<sup>++</sup> (mg /l)</b>	<b>0,72*</b>	<b>0,76*</b>	-0,46	0,56	<b>0,58*</b>	<b>0,80*</b>	-0,17	<b>0,68*</b>	<b>0,75*</b>	0,34	1,00	
<b>F (mg /l)</b>	-0,36	-0,40	0,02	-0,02	-0,12	-0,10	0,06	-0,11	-0,27	-0,30	0,02	1,00

**0.72\*** : Corrélations significative.

### 6. 2. 3. Traitement statistique multivarie - Analyse en Composantes Principale (ACP)

Afin de procéder à une Analyse en composantes principales (ACP), Il a été nécessaire d'effectuer les opérations suivantes :

#### 6. 2. 3. 1. Diagonalisation, calcul des facteurs de charges et tracé des cercles de corrélation

La diagonalisation de la matrice de corrélation (Tableau. 20), a permis de calculer les facteurs de charges, sur l'ensemble des de paramètres physico-chimique de la nappe du Complexe Terminal (CT) (Tableau. 21). Les cercles de corrélations ont été tracés sur le plan du facteur F1 et F2 qui représente une varaince cumulée de 77,6 % (Tableau. 21). La projection des individus sur les deux facteurs à été faite à partir du Tableau. 22.

Tableau. 20 : Poids factoriel sur les paramètres physicochimiques à partir des données de forage de la nappe du complexe terminal de la région de Hassi Messaoud.

	<b>Fact. 1</b>	<b>Fact. 2</b>	<b>Fact. 3</b>
<b>T.H (F°)</b>	-0,94	0,13	-0,13
<b>CE (µS/cm)</b>	-0,98	-0,00	-0,14
<b>pH</b>	0,04	-0,86	0,11
<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>	-0,89	-0,32	0,14
<b>Cl<sup>-</sup></b>	-0,92	0,24	0,15
<b>HCO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	0,21	-0,74	0,15
<b>Na<sup>+</sup></b>	-0,95	-0,01	0,15
<b>K<sup>+</sup></b>	-0,98	-0,09	0,01
<b>Mg<sup>++</sup></b>	-0,72	-0,57	-0,06
<b>Ca<sup>++</sup></b>	-0,78	0,37	0,24
<b>F</b>	0,27	0,11	0,95

Tableau. 21: Valeurs propres et variances des facteurs de charges des eaux de la nappe du Complexe Terminal Hassi Messaoud.

	<b>V.P</b>	<b>Var.</b>	<b>V .P cum</b>	<b>Var. cum</b>
<b>1</b>	6,60	60,00	6,60	60,0
<b>2</b>	1,94	17,62	8,54	77,6
<b>3</b>	1,09	9,93	9,63	87,6
<b>4</b>	0,78	7,14	10,42	94,7
<b>5</b>	0,41	3,76	10,83	98,4
<b>6</b>	0,12	1,11	10,95	99,6
<b>7</b>	0,03	0,29	10,98	99,8
<b>8</b>	0,02	0,16	11,00	100,0

**V.p** : valeur propre ; **Var.** : variance (%) ; **V.P cum** : valeur propre cumulé ; **Var. cum** : variance cumulé (%).

Tableau. 22 : Cordonnées des individus (forage) sur les facteurs de charges.

	<b>Fact. 1</b>	<b>Fact. 2</b>	<b>Fact. 3</b>
<b>F04</b>	-5,29	-1,39	-0,58
<b>F06</b>	1,77	0,10	0,01
<b>F08</b>	0,78	-1,58	1,29
<b>F11</b>	1,11	1,02	1,56
<b>F12</b>	1,71	-2,16	-0,02
<b>F13</b>	1,42	1,22	-0,28
<b>F14</b>	1,56	0,50	-1,71
<b>F15</b>	-3,50	1,85	0,66
<b>F16</b>	0,43	0,45	-0,93

### 6. 2. 3. 2. *Interprétation des résultats de l'ACP*

Les cercles de corrélation dans le plan des axes F1 et F2 qui représentent une variance cumulée de 77,6 % (F1 = 60,00 %, F2 = 17,62 %) montrent:

- Une association constituée de  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Cl}^-$ , T.H,  $\text{Na}^+$ , CE : cette association est corrélée négativement avec le facteur F1 et corrélée positivement avec le facteur F2 ; Elle montre les eaux influencées par une lithologie constituée des roches carbonatées (calcaire) et de l'Halite.
- Une association constituée de  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{SO}_4^-$  et  $\text{K}^+$  : cette association est corrélée négativement avec le facteur F1 et F2. Elle représente les eaux fortement influencées par une lithologie de nature évaporitique (essentiellement gypseuses) et silicatée (argileuse). Ces deux associations représentent l'axe de minéralisation.
- Une association constituée de pH et  $\text{HCO}_3^-$  : cette association est corrélée négativement avec le facteur F1 et F2. Elle représente les eaux fortement influencées par la dissolution des carbonates dans milieu tend à l'acidité.
- Le fluore est corrélé positivement avec le facteur F1 et F2 ; il se trouve en opposition avec l'axe de minéralisation et témoigne que ce fluore provient de la dissolution des roches fluo-carbonatées. Afin d'argumenter cette hypothèse, il a été nécessaire d'établir une autre projection des paramètres physico-chimiques sur le plan F1F3 qui représente une variance cumulée 69,93 % (Fig. 42). Il a été constaté que le fluore se trouve en association avec pH et  $\text{HCO}_3^-$ , ce qui suggère l'origine de la dissolution dans un milieu acide.

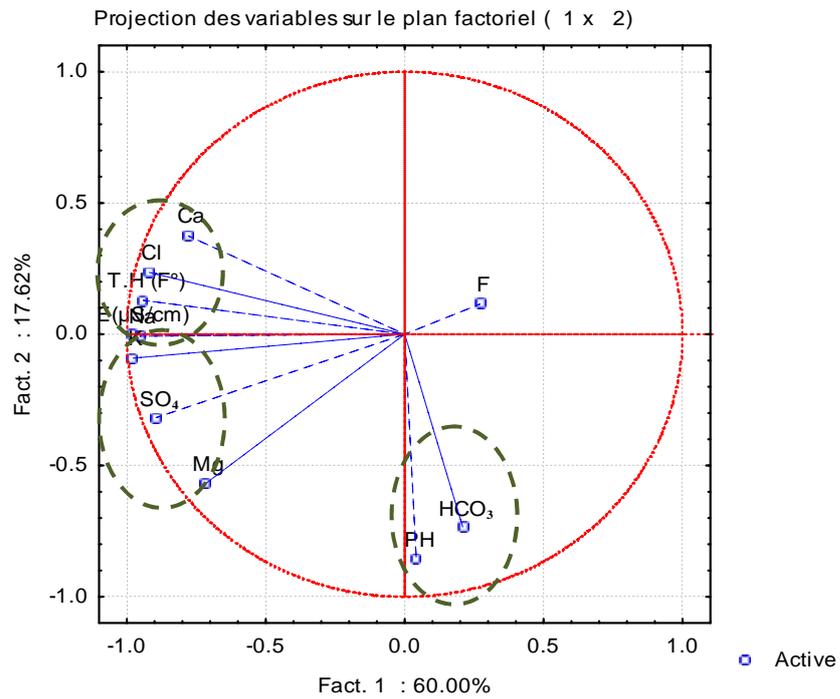


Fig. 41 : Cercles de corrélation sur le plan des facteurs F1 F2 des eaux du complexe Terminal (CT) de la région de Hassi Messaoud.

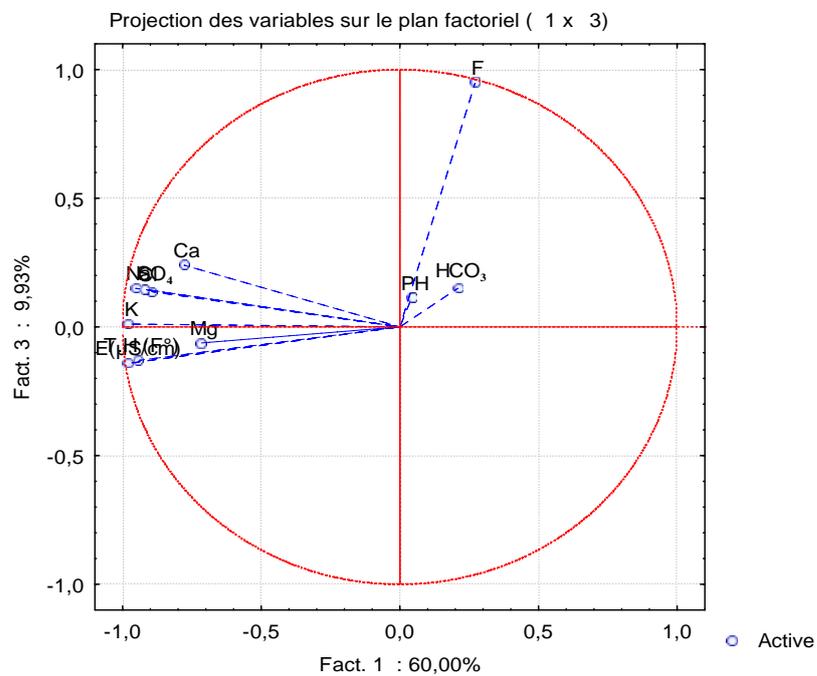


Fig. 42 : Cercles de corrélation sur le plan des facteurs F1 F3 des eaux du complexe Terminal (CT) de la région de Hassi Messaoud.

**6. 2. 3. 3. Projection des individus sur les facteurs de charges F1F2 :**

La projection des individus (forage) sur le plan de facteur F1F2 (Fig. 44) montre globalement deux (2) associations d'individus :

- La première association est constituée des individus (F06, F11, F13, F16, F08 et F12). Cette association est corrélée positivement avec le facteur F1. Elle représente les puits ayant la même réponse parmi les quels la lithologie qui est rattachée à l'étage Sénonien-Eocène
- La deuxième association est constituée des individus (F04 et F15). Cette association est corrélée négativement avec le facteur F1. Elle représente les puits dont la lithologie est rattachée à l'étage Miopliocène.

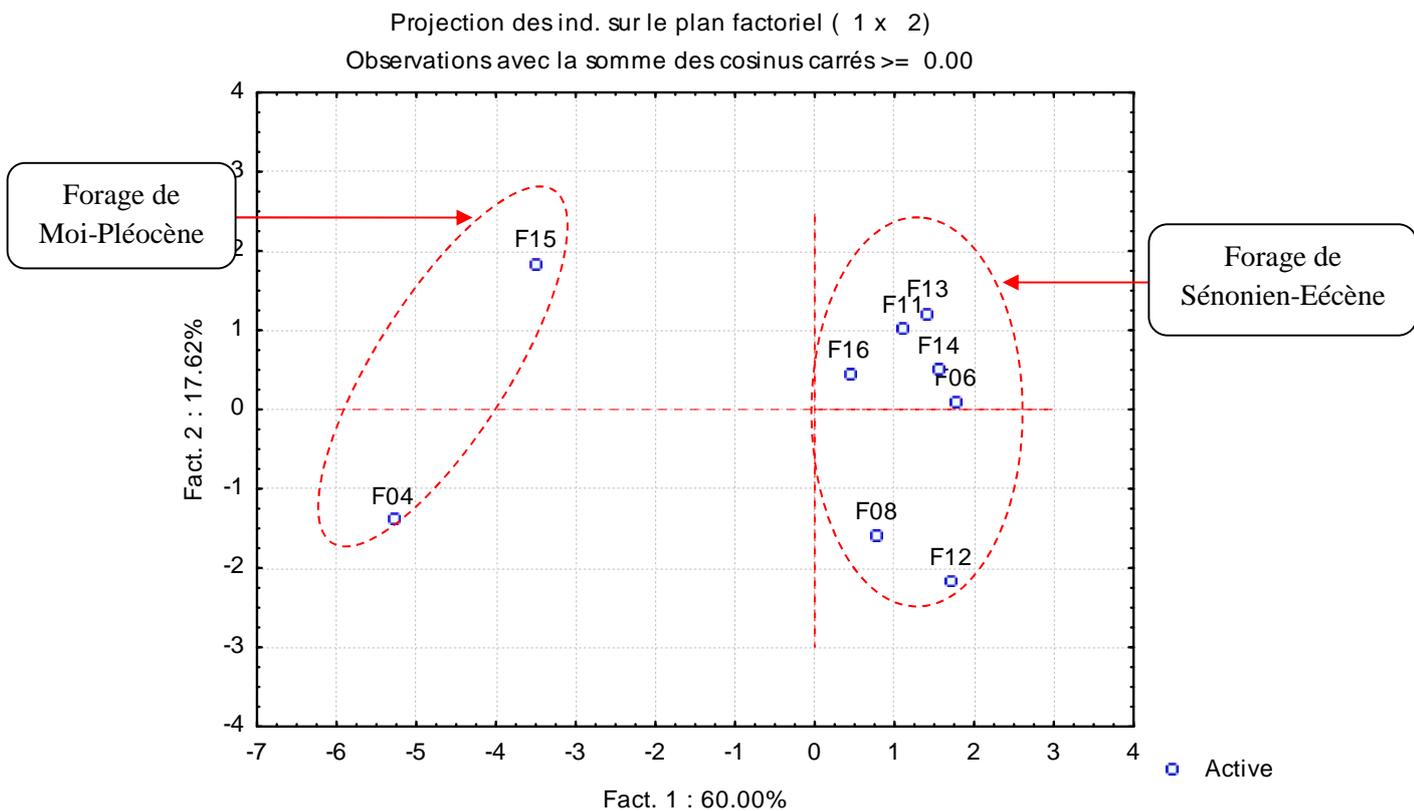


Fig. 43 : Projection des individus (forage) dans le plan F1 F2 de la nappe du Complexe Terminal (CT) – Hassi Messaoud.

### 6. 3. GEOSTATISTIQUE NON PARAMETRIQUE - KRIGEAGE DES INDICATRICES

Pour estimer  $I(2)$  ; qui la concentration tolérable du fluore en eau, servant de l'information disponible il suffit de coder les concentrations; calculer et modéliser le variogramme des indicatrices  $I(2)$  en fin effectuer le krigeage. Il s'agit de faire un krigeage des probabilités (et pas des concentrations) pour une concentration limite de 2 mg/l.

#### 6. 3. 1. Codage des indicatrices relatives

Avant de procéder au calcul des variogrammes pour la variable régionalisée de fluore (F). Les concentrations  $\geq 2$  sont codées par la probabilité un (1), les concentrations  $< 2$  mg/l sont codées par la probabilité zéro (0). Le codage de cette dernière a été fait, (Tableau. 23) suivant la concentration est 2mg/l. ensuite la variographie a été faite sur les teneurs codées.

Tableau. 23: Codage des concentrations du fluore analysée en mai 2013.

Forage	F (mg/l)	Codage I(2)
4	1,63	0
6	2,34	1
7	1,57	0
8	2,71	1
11	2,93	1
12	2,28	1
13	2,25	1
14	1,6	0
15	2,46	1
16	1,73	0
17	2,12	1
18	2,26	1
19	2,1	1
20	2,13	1
21	1,97	0
22	1,86	0

### 6. 3. 2. Variographie d'indicatrices

#### 6. 3. 2. 1. Variogramme de surface

Le Variogramme de surface a été effectuée dans le plan horizontal, il montre la direction d'isotropie (continuité) NW-SE ; C'est-à-dire que dans cette direction la variabilité du fluore est a une isotropie représentée par le grand axe. La direction de l'anisotropie est (discontinuité) est orthogonale au grand axe. Elle est orientée SW-NE (Fig. 45).

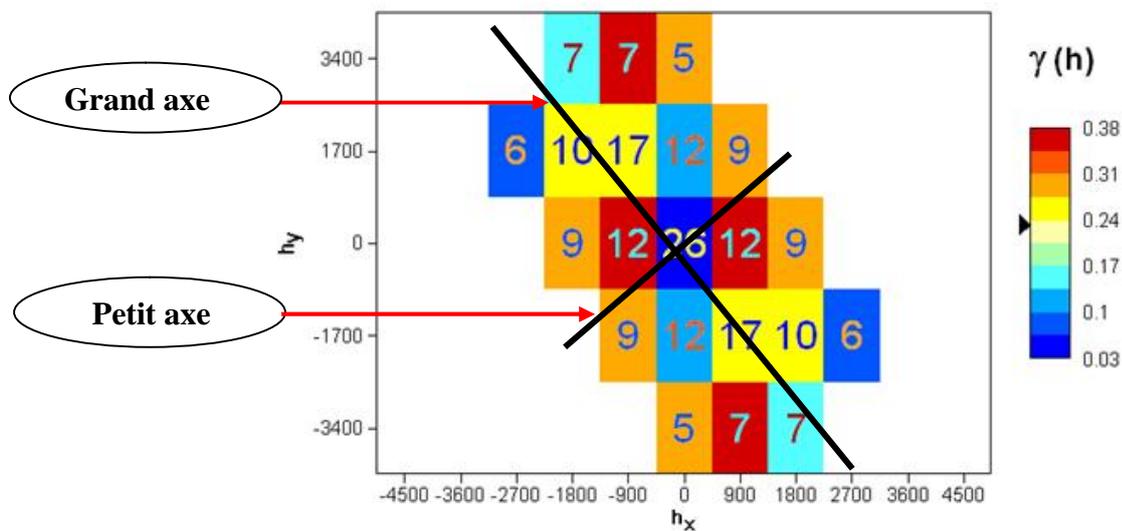


Fig. 44 : Variogramme de surface de I (2 mg/l)

#### 6. 3. 3. 2. Variogramme horizontal

Une fois le codage est fait, le variogramme d'indicatrice du fluore codé peuvent êtres calculé.

Le variogramme horizontal moyen des concentrations de fluore codée dont la limite de coupure 2 mg/l I (2 mg/l) (Fig. 45), a été construit et ajusté par un modèle de régionalisation exponentiel de portée  $a = 2592$  (m), d'un effet de pépité  $C_0 = 0.012$  (mg /l<sup>2</sup>), et d'un palier  $C = 0.261$  (mg/l<sup>2</sup>) (Fig. 46).

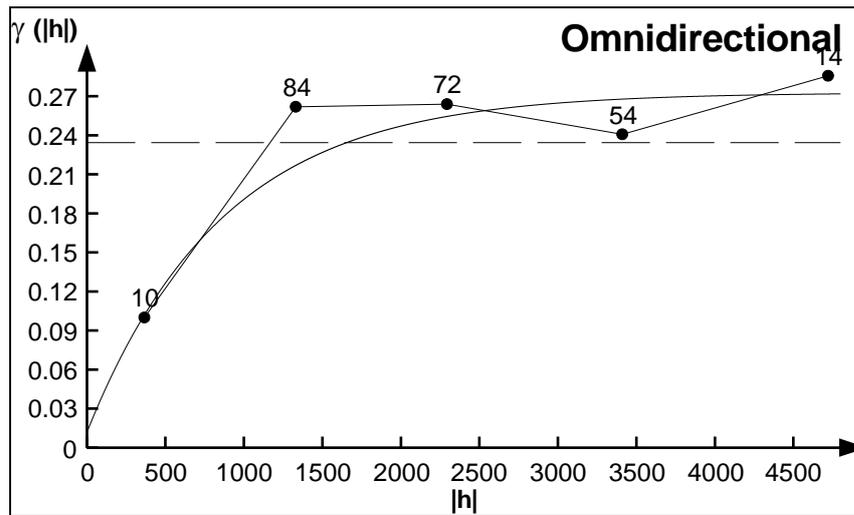


Fig. 45 : Le variogramme horizontal moyen d'indicateur I(2 mg/l) en F Direction :  $0^{\circ} \pm 90^{\circ}$ .

### 6. 3. 3. Krigeage des indicateurs relative pour de I(2)

#### 6. 3. 3. 1. Krigeage de I (2mg/l)

##### a) Paramètre du krigeage des indicateurs

Le krigeage relative a été effectué à l'aide du logiciel Geostatistical toolbox (fig. 46) Une discrétisation de la nappe a été faite. La maille élémentaire est de 200\*200 m. le rayon de recherche ne dépasse pas la portée. Les résultats moyennes du krigeage sont reportés au Tableau. 24.

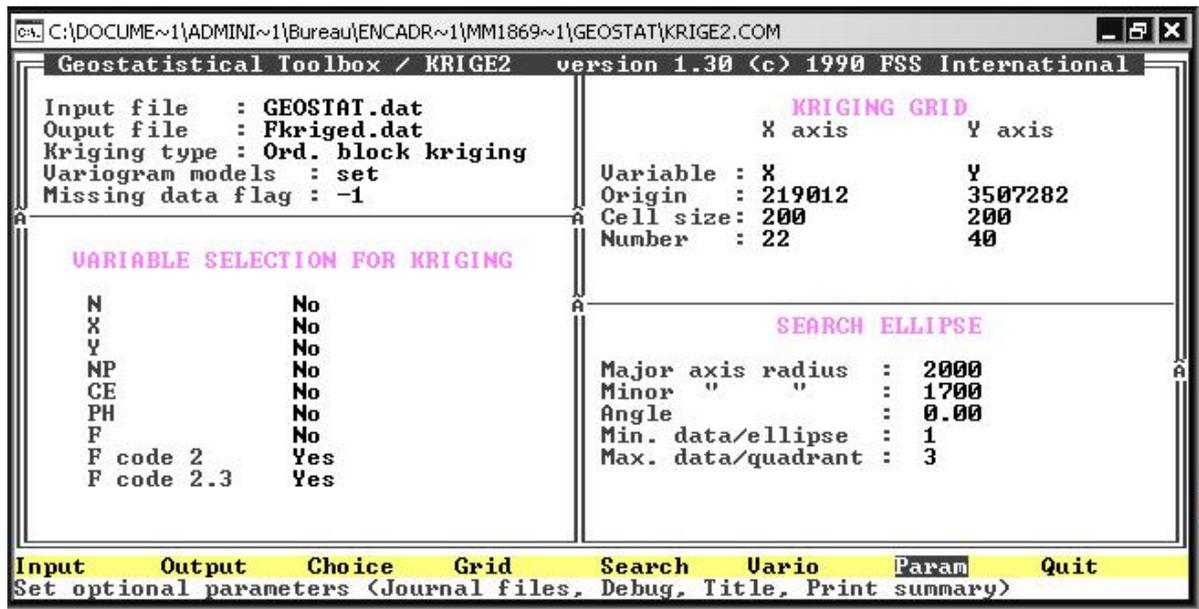


Fig. 46 : plan de krigeage relative de la concentration I (2)

Tableau. 24. : Statistiques du krigeage d'indicatrice.

Valeur d'indicatrice	$\bar{X}$ (%)	$S^2$ (%) <sup>2</sup>	$\dagger_k^2$ (%) <sup>2</sup>	N de blocs
I(2)	0.650	0.112	0.198	815

### 6. 3. 3. 2. Cartographie automatique des résultats obtenus

La cartographie des résultats de krigeage ont été faite par classe à l'aide logiciel *Surfer, 9 du golden software*. Les résultats de krigeage sont donnés pour chaque maille en deux dimensions par les coordonnées et la probabilité I(2mg/l) krigée de fluore. Cette cartographie présente un modèle numérique pour la concentration de 2 mg/l, C'est-à-dire la probabilité d'avoir cette teneur de chaque noued de maille 200\*200 m de la nappe du Complexe Terminal à Hassi Messaoud.

Qualitativement, On constate que la partie Nord de la nappe est caractérisée par une eau dont la probabilité de concentration en fluore égale ou supérieur à 2 mg/l est de 0.75 à 1, soit en pourcentage (75% à 100%). C'est la zone à forte concentration en fluore qui dépasse le seuil toléré en normes Algérienne (1.5 mg/l).(Voir l'annexe).

La partie Sud Ouest au niveau des forages F14, F04 et F21 est caractérisée par des eaux dont la probabilité d'avoir cette concentration est 0 à 0.25 (soit en pourcentage 0 à 25 %), ce sont les zones dont l'eau présente une faibles concentration de fluore (Fig. 48)

Les classes de variances de krigeages sont aussi cartographié, elle montre des variances de krigeage varient de 0 à 0.4. Cette variance est liée à l'espacement des forages intervenant au krigeage. À la proximité des forages cette valeur ne dépasse pas 0.2.

Ces cartes représentent un modèle probabiliste de la répartition du fluore dans la nappe du Complexe Terminal à Hassi Messaoud. Elles aident à la prise de décision quant à l'implantation et/ou l'exploitation des eaux en question.

Cette interprétation qualiatative et nécessite une étude géochimique afin de déterminer l'origine de la fluoration et de justifier cette répartition.

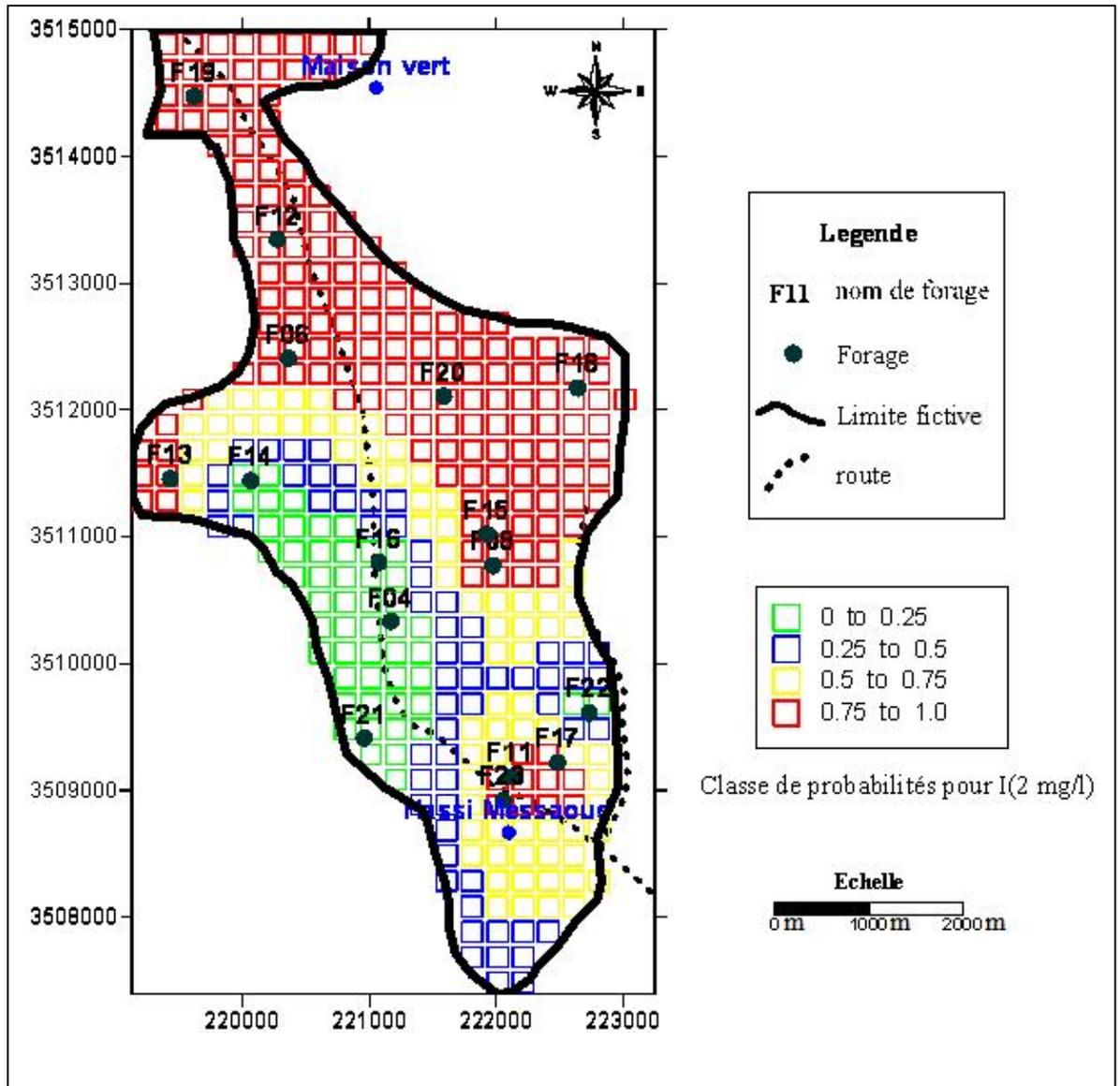


Fig. 47: Carte des d'indicatrices (probabilités) krigées pour une concentration de fluore supérieur ou égale 2mg/l

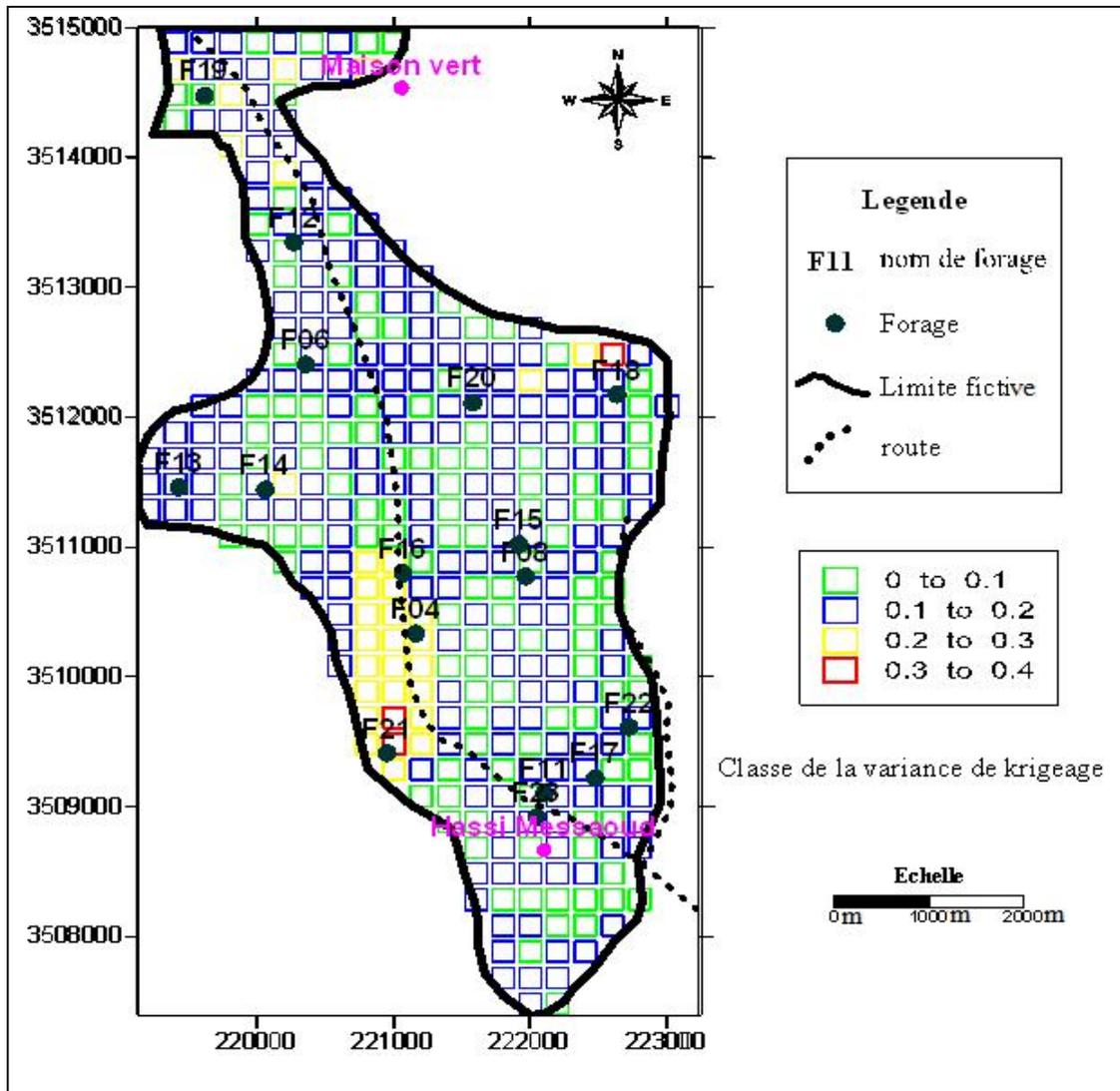


Fig. 48 : Carte des variances de krigage.

#### 6. 4. CONCLUSION

Le traitement statistique a été effectué pour déterminer les paramètres de position centrale et des paramètres de la dispersion. Le calcul de la matrice de corrélation a été effectué sur l'ensemble des données des échantillons du Complexe Terminal de Hassi Messaoud. On constate que la conductivité (CE) est corrélée positivement à  $\text{SO}_4^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  et  $\text{Ca}^{++}$ .

La diagonalisation de la matrice de corrélation, a permis de calculer les facteurs de charges, sur l'ensemble des paramètres physico-chimique de la nappe du Complexe Terminal (CT). Les cercles de corrélations ont été tracés.

L'étude géostatistique a été faite sur la variable régionalisée fluore (F). Ce choix de cet élément est dicté par son importance à la caractérisation des eaux de la nappe du Complexe Terminal. En effet, la concentration tolérée est limitée au seuil de 2 mg/l. Les concentrations  $\geq 2$  sont codées par la probabilité un (1), les concentrations  $< 2$  mg/l sont codées par la probabilité zéro (0). Ensuite la variographie a été faite sur les teneurs codées.

Le Variogramme de surface a été effectuée dans le plan horizontal, il montre la direction d'isotropie (continuité) NW-SE ; C'est-à-dire que dans cette direction la variabilité du fluore est a une isotropie représentée par le grand axe. La direction de l'anisotropie est (discontinuité) est orthogonale au grand axe. Elle est orientée SW-NE.

Le variogramme horizontal moyen des concentrations de fluore codée dont la limite de coupure 2 mg/l I (2 mg/l) a été construit et ajusté par un modèle de régionalisation exponentiel de portée  $a = 2592$  (m), d'un effet de pépite  $C_0 = 0.012$  (mg /l<sup>2</sup>), et d'un palier  $C = 0.261$  (mg/l<sup>2</sup>).

La cartographie des résultats de Krigeage ont été faite par classe à l'aide logiciel *Surfer, 9 du golden software*. Les résultats de Krigeage sont donnés pour chaque maille en deux dimensions par les coordonnées et la probabilité I (2mg/l) krigées de fluore. Cette cartographie présente un modèle numérique pour la concentration de 2 mg/l, C'est-à-dire la probabilité d'avoir cette teneur de chaque nœud de maille 200\*200 m de la nappe du Complexe Terminal à Hassi Messaoud.

Cette cartographie a montré que la partie Nord de la nappe est caractérisée par une eau dont la probabilité de concentration en fluore égale ou supérieur à 2 mg/l est de 0.75 à 1, soit en pourcentage (75% à 100%). C'est la zone à forte concentration en fluore qui dépasse le seuil toléré en normes algérienne.

La partie Sud Ouest au niveau des forages F14, F04 et F21 est caractérisée par des eaux dont la probabilité d'avoir cette concentration est 0 à 0.25 (soit en pourcentage 0 à 25 %). Ce sont les zones dont l'eau présente une faible concentration en fluore. Les variances de Krigeage ne dépassent pas le 0.2. Une cartographie des variances a été faite.

Les cartes représentent un modèle probabiliste de la répartition du fluore dans la nappe du Complexe Terminal à Hassi Messaoud. Elles aident à la prise de décision quant à l'implantation et/ou l'exploitation des eaux en question. Il est recommandé d'utiliser ce modèle avant l'implantation de nouveau forage.

# Conclusions Générales

---

À l'issue de ce mémoire, on peut conclure les conclusions suivantes :

La zone d'étude est localisée à Hassi Messaoud. Il fait partie d'un ensemble de structures formant la partie Nord de la province triasique, Il se situe à environ 850 km Sud-est d'Alger, à 350 km de la frontière tunisienne.

La série stratigraphique du champ de Hassi Messaoud repose sur le socle à environ 4393 m d'épaisseur. Cette série est incomplète, elle est marquée par l'absence du Silurien, Dévonien, Carbonifère et Permien. La discordance hercynienne se manifeste plus accentuer au centre de la structure, où les dépôts argilo-gréseux et salifères du Trias reposent directement sur le Cambrien. En allant vers la périphérie, cette discordance tronque des termes ordoviciens de plus en plus récents.

Cette région est caractérisé par un climat hyper – aride. Les températures élevées sont enregistrées en mois : Juin, Juillet, Aout et Septembre. Elles varient entre 32,65 à 35,76 °C et des précipitations presque nulles. Elles ne dépassent pas les 7 mm, enregistrées au mois de Janvier et Mars. Le bilan hydrique établit d'après les méthodes de THRANTWAITE montre que RFU est égale à 0 avec un excédent nul, le stock ne se recharge pas par la précipitation puisque d'après le diagramme de Gaussen, on a en présence d'année déficitaires, les plantes s'alimentent des nappes.

La région de Hassi Messaoud renferme d'énormes quantités des eaux souterraines qui jouent un rôle important dans le développement industriel, principalement l'activité pétrolière. Ces ressources en eaux sont assurées par deux systèmes d'aquifère à savoir :

- La nappe du Complexe Terminal (C.T) : elle regroupe les aquifères du Mio- Pliocène, de l'Eocène et du Sénonien carbonaté ;
- La nappe du Continental Intercalaire (C.I) : elle se présente comme un aquifère multicouche de l'Albien, Barrémien et Néocomien.

La nappe du Complexe Terminal de région de Hassi Messaoud se caractérise par des épaisseurs qui varient de 150 à 230 m en moyenne. La carte piézométrique montre que les courbes isopièzes sont légèrement sinueuses témoignant d'un gradient hydraulique élevé. Ceci est dû à une zone de dépression liée à un excès de pompage. Un sens d'écoulement régional des eaux souterraines NE-SO.

L'étude hydrochimique de la nappe du Complexe Terminal de la région de Hassi Messaoud, nous a permis de distinguer les types des faciès chimiques suivants :

- Chloruré et sulfaté calcique et magnésienne.
- Chloruré sodique et potassique ou sulfaté sodique.

Les eaux de la nappe du Complexe Terminal de la région de Hassi Messaoud sont caractérisées par une conductivité qui varie de 1200 à 4890  $\mu\text{s}/\text{cm}$  et par des résidus secs importants oscillant entre 1000 à 4800 mg/l.

La plupart des forages ont un S.A.R entre 10 et 18. Les eaux de forages de la nappe Complexe Terminal se situent au niveau des classes : C3-S1, C4-S2 et C4-S3.

Le traitement statistique a été effectué pour déterminer les paramètres de position centrale et des paramètres de la dispersion. Le calcul de la matrice de corrélation a été effectué sur l'ensemble des données des échantillons du Complexe Terminal de Hassi Messaoud. On constate que la conductivité (CE) est corrélée positivement à  $\text{SO}_4^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  et  $\text{Ca}^{++}$ .

La diagonalisation de la matrice de corrélation, a permis de calculer les facteurs de charges, sur l'ensemble des paramètres physico-chimique de la nappe du Complexe Terminal (CT). Les cercles de corrélations ont été tracés.

L'étude géostatistique a été faite sur la variable régionalisée fluore (F). Ce choix de cet élément est dicté par son importance à la caractérisation des eaux de la nappe du Complexe Terminal. En effet, la concentration tolérée est limitée au seuil de 2 mg/l selon les normes algériennes. Les concentrations  $\geq 2$  sont codées par la probabilité un (1), les concentrations  $< 2$  mg/l sont codées par la probabilité zéro (0). Le codage de cette dernière a été fait, suivant la concentration tolérée par l'OMS qui est 2 mg/l. ensuite la variographie a été faite sur les teneurs codées.

Le Variogramme de surface a été effectuée dans le plan horizontal, il montre la direction d'isotropie (continuité) NW-SE ; C'est-à-dire que dans cette direction la variabilité du fluore est a une isotropie représentée par le grand axe. La direction de l'anisotropie est (discontinuité) est orthogonale au grand axe. Elle est orientée SW-NE.

Le variogramme horizontal moyen des concentrations de fluore codée dont la limite de coupure 2 mg/l I (2 mg/l) a été construit et ajusté par un modèle de régionalisation exponentiel de portée  $a = 2592$  (m), d'un effet de pépite  $C_0 = 0.012$  (mg/l<sup>2</sup>), et d'un palier  $C = 0.261$  (mg/l<sup>2</sup>).

La cartographie des résultats de Krigeage d'indicatrice ont été faite par classe. Les résultats de Krigeage sont donnés pour chaque maille en deux dimensions par les coordonnées et la probabilité I (2mg/l) krigées de fluore. Cette cartographie présente un modèle numérique pour la concentration de 2 mg/l, C'est-à-dire la probabilité d'avoir cette teneur de chaque nœud de maille 200\*200 m de la nappe du Complexe Terminal à Hassi Messaoud.

Cette cartographie a montré que la partie Nord de la nappe est caractérisée par une eau dont la probabilité de concentration en fluore égale ou supérieur à 2 mg/l est de 0.75 à 1, soit en pourcentage (75% à 100%). C'est la zone à forte concentration en fluore qui dépasse le seuil toléré en normes algérienne.

La partie Sud Ouest au niveau des forages F14, F04 et F21 est caractérisée par des eaux dont la probabilité d'avoir cette concentration est 0 à 0.25 (soit en pourcentage 0 à 25 %). Ce sont les zones dont l'eau présente une faible concentration en fluore. Les variances de Krigeage ne dépassent pas le 0.2. Une cartographie des variances a été faite.

Les cartes représentent un modèle probabiliste de la répartition du fluore dans la nappe du Complexe Terminal à Hassi Messaoud. Elles aident à la prise de décision quant à l'implantation et/ou l'exploitation des eaux en question. Il est recommandé d'utiliser ce modèle avant l'implantation de nouveau forage.

D'autres modèles de Krigeage d'indicatrices sur les éléments de pollution sont recommandés.

## BIBLIOGRAPHIE

---

- **Abbas hadj Abbas, 2011** LES BOURBIERS DES FORAGES PETROLIERS ET DES UNITES DE PRODUCTION : IMPACT SUR L'ENVIRONNEMENT ET TECHNIQUE DE TRAITEMENT, Présentée pour obtenir le Diplôme de MAGISTER, université Kasdi Merbah – Ouargla, 114p
- **ANRH. (2004)**. Données sur les Logs stratigraphiques des forages de la Wilaya de Ouargla. Algérie. Agence Nationale des **R**essources **H**ydrauliques. Direction régionale Sud, Ouargla.
- **Beicip, F. (1979)** : Zone périphérique du champ de Hassi Messaoud, réservoir cambro-ordovicien. *Rapport Interne CRD Sonatrach, 21p.*
- **BELLAOUEUR ABD EL-AZIZ, (2008)**," Etude hydrogéologique des eaux souterraines de la de Ouargla soumises à la remontée des eaux de la nappe phréatique et perspectives de palliatives (Sahara Nord-est Septentrional –Algérie) ", Mémoire Magistère, Université de Batna, 50p.
- **BUSSON. G. (1970)** : Le Mésozoïque saharien. 2ème partie : Essai de synthèse des données des sondages algéro-tunisiens. Edit., Paris, « Centre Rech. Zones Arides », Géol., 11, 811p. Ed. C.N.R.S.
- **CASTANY. G. (1982)**. Hydrogéologie, principes & méthodes. , Paris, éd. Dunod, 237p.
- **Chauvet. (1999)**. Aide mémoire de géostatistique linéaire application du domaine minier. *Les presses de l'école des mines de Paris, 140 p.*
- **CONRAD. G. et OLIVE. P. (1972)** : Premières données sur les teneurs en tritium des nappes aquifères du Sahara nord-occidental et central (Algérie) ; conséquences hydrogéologiques. C.R. Acad. Sc.Paris, 274, 2019-2022.
- **CORNET. A. (1964)**. Introduction à l'hydrogéologie saharienne. Géog. Phys. et Géol.Dyn., vol. VI.fasc. 1,5-72.
- **FABRE. J. (1976)**. Introduction à la géologie du Sahara d'Algérie et des régions voisines. SNED, Alger, 421p.

- **Journel A. G. (1978)** : Cours de géostatistique, 3eme année. *Tome II, institut national polytechnique de Lorraine, France, 122p*
- **Journel A., Huijbregts, G. (1978)**: Mining geostatistics. *Academic Press, London, U. K, 600.*
- **Matheron, G. (1973)**: The Intrinsic Random Function and their application. *In Advances in Applied Probability. Dec .1973, n°3, pp439 – 468.*
- **Matheron, G. (1971)**. La théorie des variables régionalisées et ces applications. *Les cahiers de CMM5. Paris ENSMP, 212p.*
- **NEZLI Imad Eddine**, APPROCHE HYDROGEOCHIMIQUE A L'ETUDE DES AQUIFERES DE LA BASSE VALLEE DE L'OUED M'YA (OUARGLA), Présentée pour obtenir le Diplôme de **Doctorat en Sciences** en Hydraulique, Université Mohamed Kheider – Biskra 144p.
- **OMS. (1994)**. Organisation Mondiale de la Santé. Directives de qualité de l'eau de boisson. Critères d'hygiène et documentation à l'appui, Genève, 2è ed. Volume 2, pp 272-279.
- **OSS (2003)** : Système Aquifère du Sahara Septentrional. Observatoire du Sahara et du Sahel. Volume 2 : Hydrogéologie. Projet SASS. Coupes. Planches. Annexes. Tunis, Tunisie. 275p.
- **OULD BABA SY.M.(2005)** Recharge et paléorecharge du système aquifère du Sahara septentrional. Thèse de Doctorat en Géologie. Faculté des Sciences de Tunis. Tunisie. 277p.
- **PALLAS P.(1978)**. Water resources of the socialist people's Libyan Arab Jamahiriya. Secretariat of dams and water resources. S.P.L.A.J., General Water Authority. Tripoli, Libya, 55p.
- **RODIER. J. (1984)**. L'analyse de l'eau, 7ème éd, 1353p
- **Sonatrach. (2005)** : La stratigraphie du champ Hassi Messaoud. *Rapport interne, Division Exploration. 35p.*
- **Sonatrach. (2008)** : Synthèse tectonique de HMD et l'évolution intrusive intra-Cambrienne. *Rapport interne, Division Forage, 26p.*
- **UNESCO. (1972)**. Projet Reg 100. Etude des ressources en eau du Sahara septentrional. Rapport sur les résultats du projet, UNESCO, Pari.

- **WEC. (2007):** Well Evaluation Conference «WEC», *SLB document*, 539 p.
- **Xavier, E (2001) :** Géostatistiques linéaire, *Ecole des mines de Paris*, 405 p.

Tableau 25 : Normes algériennes des Paramètres physico-chimiques

Paramètres	CMA	Méthode d'analyses	Effects
<b>Chlore</b>	0.2 0.6mg/l	DPD	<0.2put efficace sur la désinfection >1, peut entraîner des effets cancérigènes
<b>PH</b>	6.5-8.5	Electrochimie	PH acide, corrosion des conduites PH basique diminue l'efficacité de la désinfection
<b>Température</b>	25°C	Electrochimie Thermomètre	Basse, diminue l'efficacité du traitement, élevée de favorise la croissance microbienne et la formation des THM
<b>Turbidité</b>	5NTU	Turbidimètre	Protège les micro-organismes contre les effets de la désinfection
<b>Nitrates</b>	50mg/l	Salicylate de sodium	Risque de méthémoglobinémie infantile
<b>Nitrites</b>	0.1mg/l	Sulfarilamide	Risque de méthémoglobinémie infantile
<b>Azote ammoniacal</b>	0.5mg/l	Indophénol	Favorise le développement de certaines bactéries génératrices de mauvais goût
<b>Résidu sec</b>	2000mg/l	Gravimètre	Goût désagréable
<b>Calcium</b>	200mg/l	Complexométrie	Entartrage des conduites,
<b>Magnésium</b>	150mg/l	Complexométrie	Combiné au SO4 génère goût
<b>Dureté total (TH)</b>	500mg/l CaCo3	Complexométrie	Enta rage des conduites consommation excessive de savon
<b>Sodium</b>	250mg/l	Photométrie de flamme	Concentration élevée gêne les hypertendus
<b>Potassium</b>	15mg/l	Photométrie de flamme	Entraîne goût
<b>Chlorures</b>	600mg/l	Argentimétrie	Saveur désagréable effet laxatif corrosion des conduites
<b>Sulfates</b>	S400mg/l	Néphélométrie	Trouble gastro-intestinales corrosions des conduites
<b>Aluminium</b>	0.2mg/l	AAS	Désordre neurologique

<b>Cuivre</b>	1mg/l	AAS	Saveur désagréable tache de linge et la plomberie domestique
<b>Fer</b>	0.3mg/l	AAS	Saveur désagréable tache de linge et la plomberie, favorise ledéveloppement de bactéries
<b>Manganèse</b>	0.5mg/l	AAS	Saveur désagréable tache de linge et la plomberie, favorise ledéveloppement de bactéries
<b>Cadmium</b>	0.05mg/l	AAS	Maladie d'ITAI-ITAI
<b>Chrome</b>	0.05mg/l	AAS	Nécrose du foie, néphrite
<b>Cyanures</b>	0.05mg/l	Electrochimie Flux continu	Peuvent être mortels à dose élevée
<b>Fluorures</b>	1.5mg/l	Electrochimie	Altération dentaire et fluorose du squelette
<b>Plomb</b>	0.05mg/l	AAS	Saturnisme
<b>Sélénium</b>	0.01mg/l	AAS / Sys hydrures	Carie dentaire
<b>Arsenic</b>	0.05mg/l	AAS / Sys	Troubles gastro-intestinaux hépatiques et rénaux Troubles du métabolisme glucido-
<b>Mercure</b>	0.01mg/l	Hydrures	Dose mortelle 0, 15-0.5 de chlore mercurique Troubles neurologiques

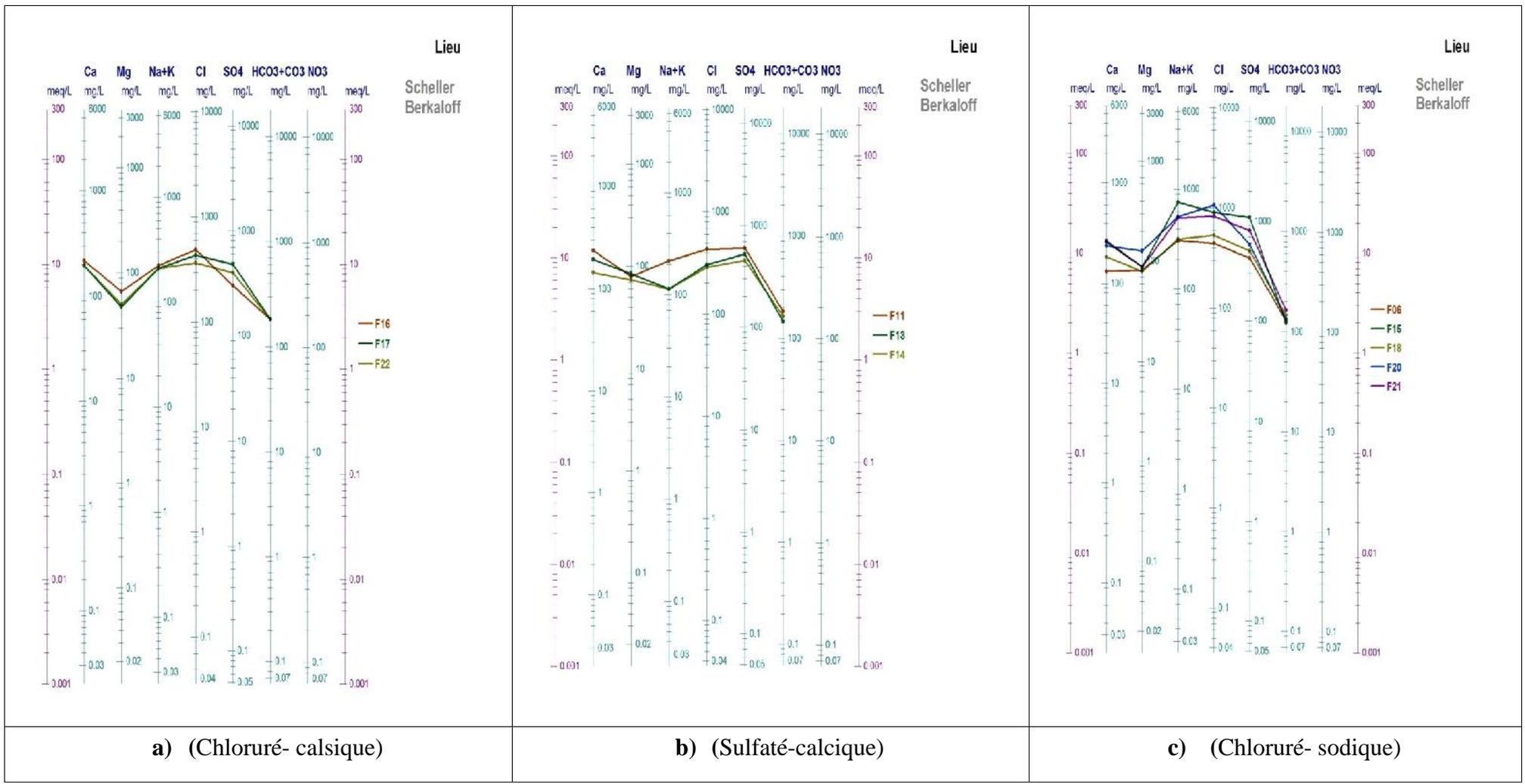


Fig. 49 : Diagrammes de SCHOLLER - BERKALOFF (Nappe du Complexe terminal de Hassi Messaoud 2013).

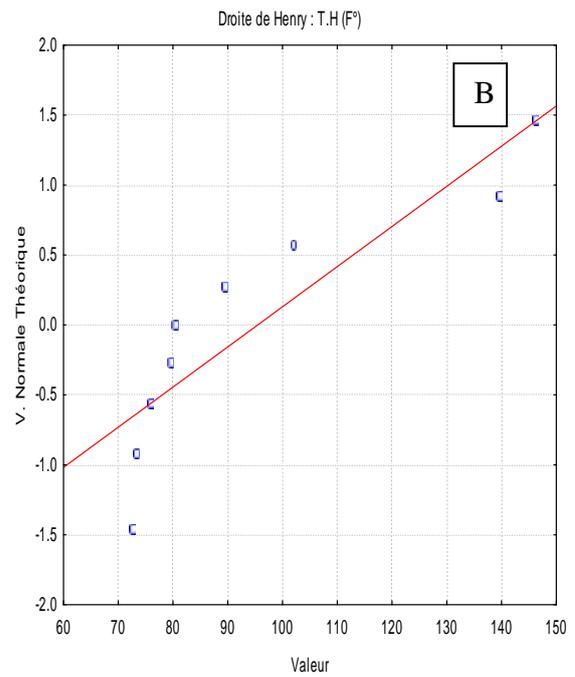
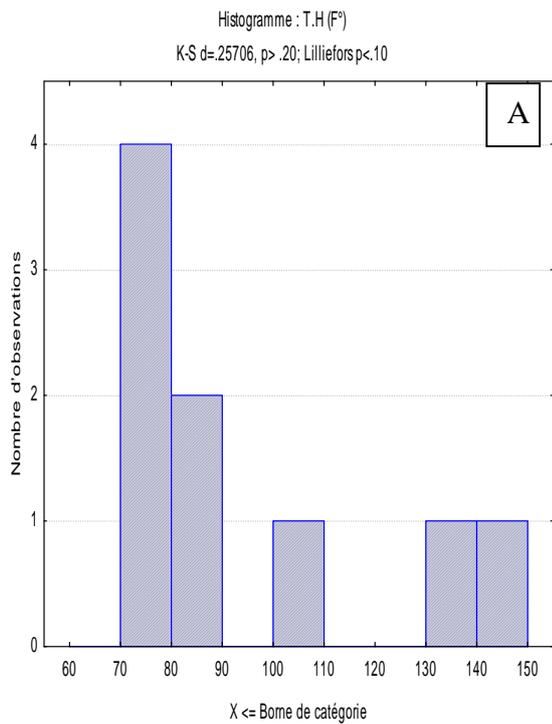


Fig. 50 : Histogramme (A) et graphe de probabilité (B) des teneurs en T.H (F°) des échantillons des eaux de la nappe Complexe Terminal de la région de Hassi Messaoud.

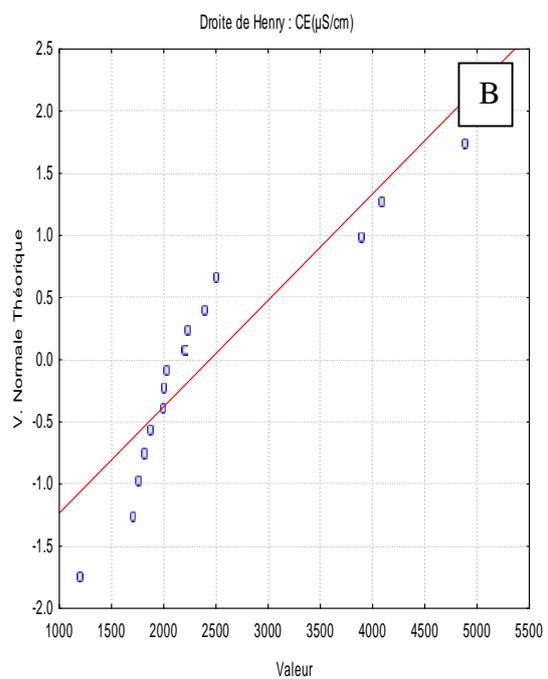
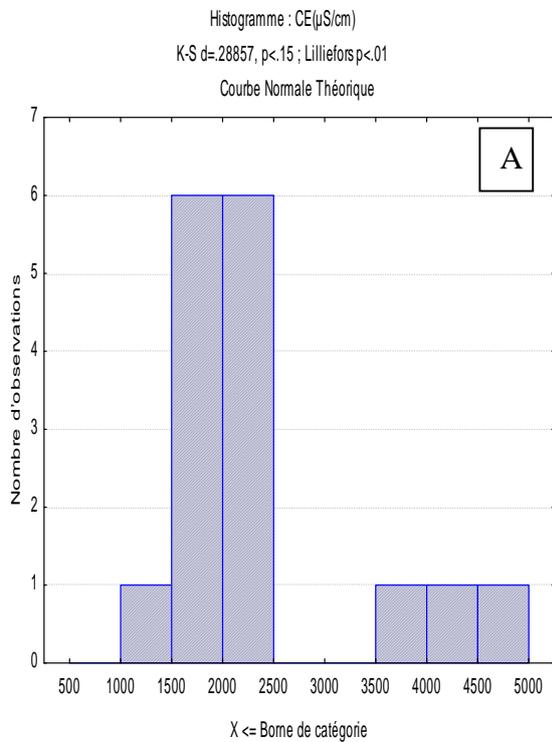


Fig. 51 : Histogramme (A) et graphe de probabilité (B) des teneurs en CE (µS/cm) des échantillons des eaux de la nappe Complexe Terminal de la région de Hassi Messaoud.

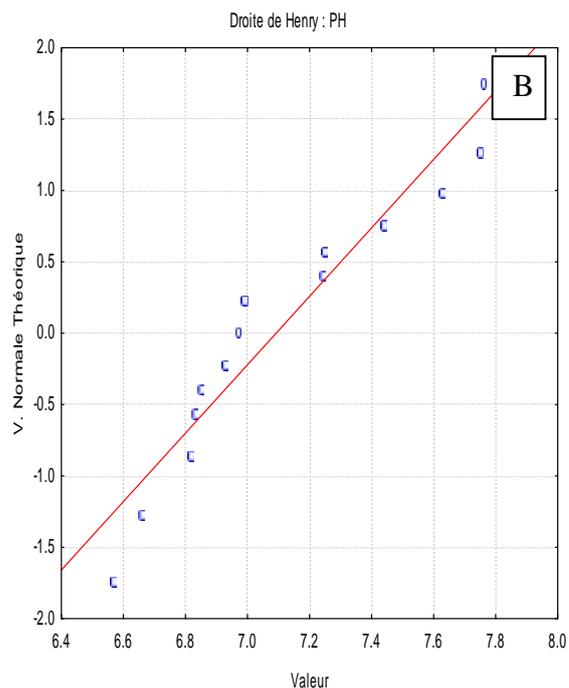
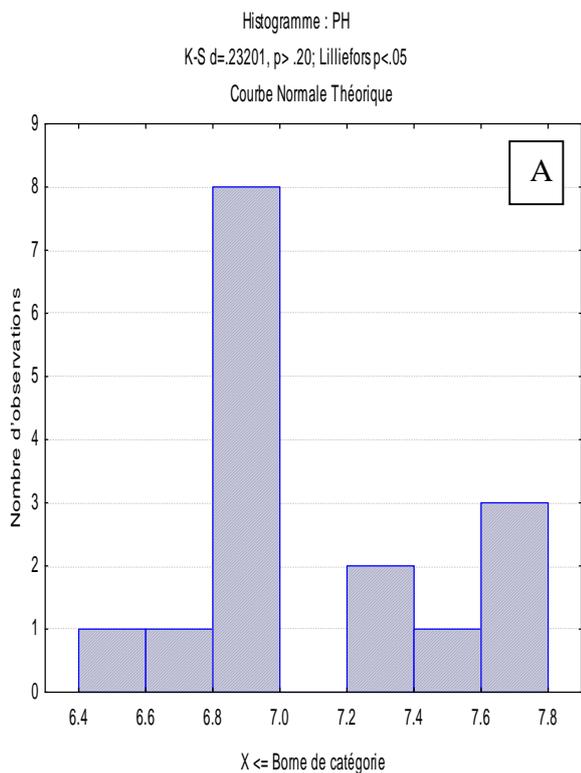


Fig. 52 : Histogramme (A) et graphe de probabilité (B) des teneurs en pH des échantillons des eaux de la nappe Complexe Terminal de la région de Hassi Messaoud.

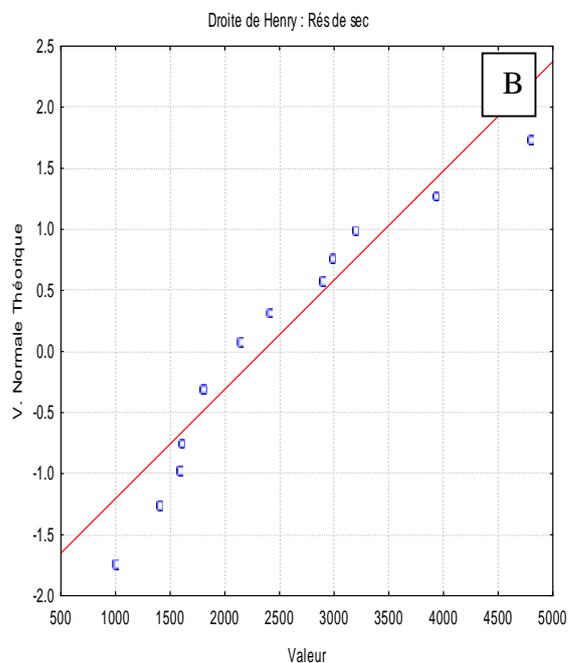
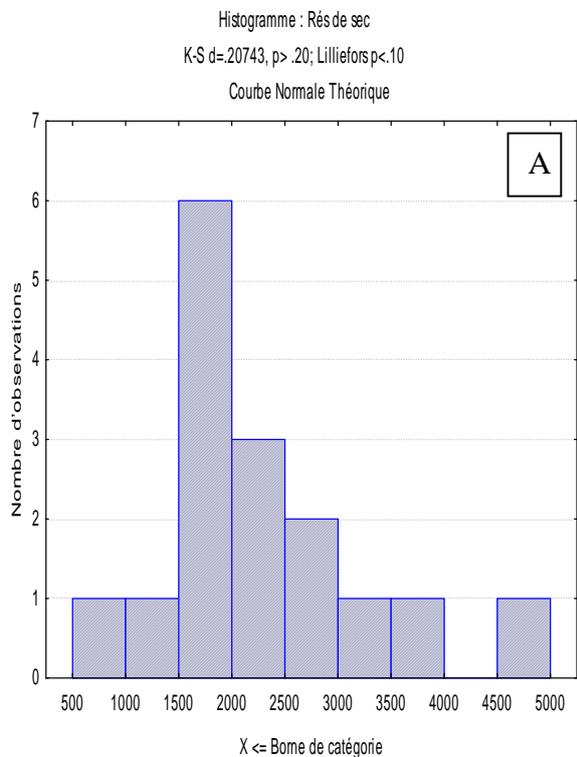


Fig. 53 : Histogramme (A) et graphe de probabilité (B) des teneurs en R.S des échantillons des eaux de la nappe Complexe Terminal de la région de Hassi Messaoud.

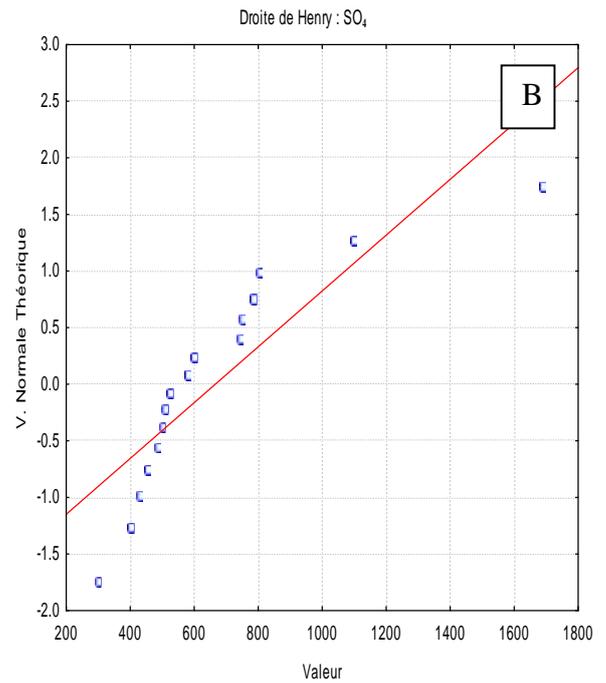
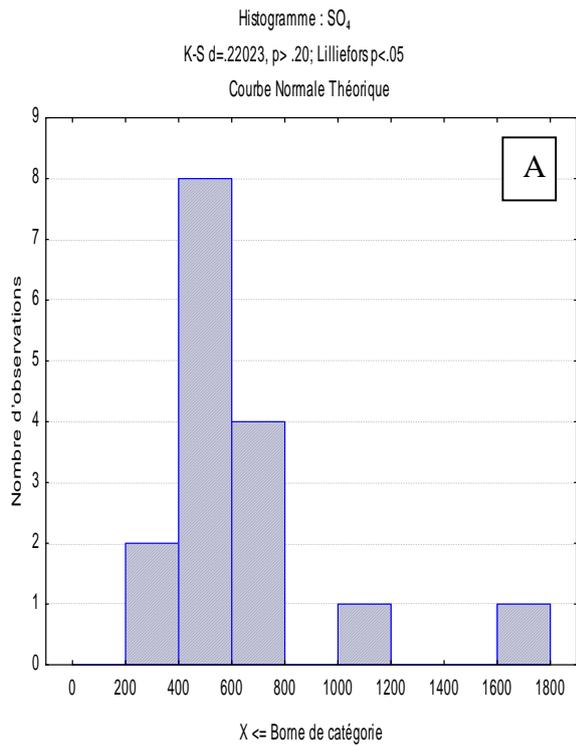


Fig. 54 : Histogramme (A) et graphe de probabilité (B) des teneurs en  $\text{SO}_4^{--}$  des échantillons des eaux de la nappe Complexe Terminal de la région de Hassi Messaoud.

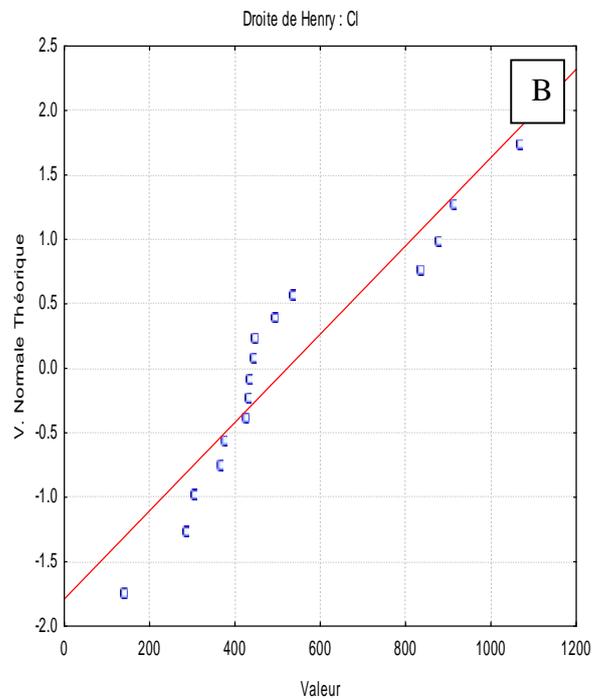
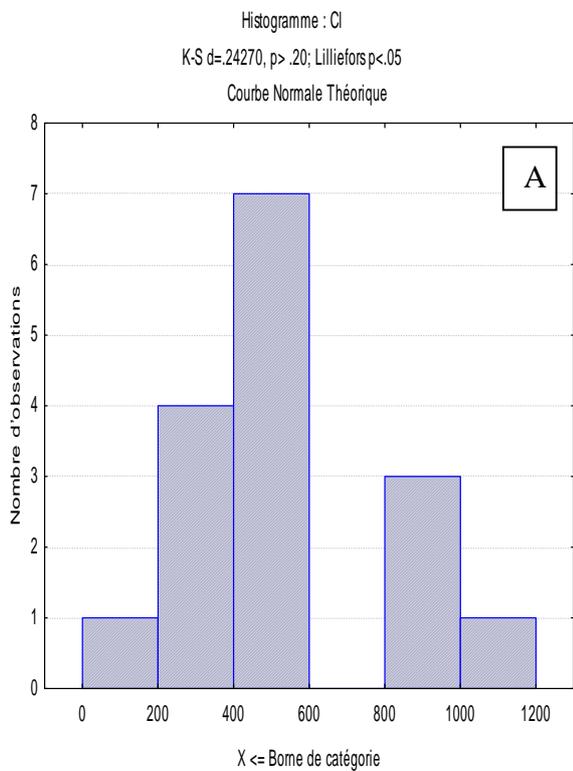


Fig. 55 : Histogramme (A) et graphe de probabilité (B) des teneurs en  $\text{Cl}^-$  des échantillons des eaux de la nappe Complexe Terminal de la région de Hassi Messaoud.

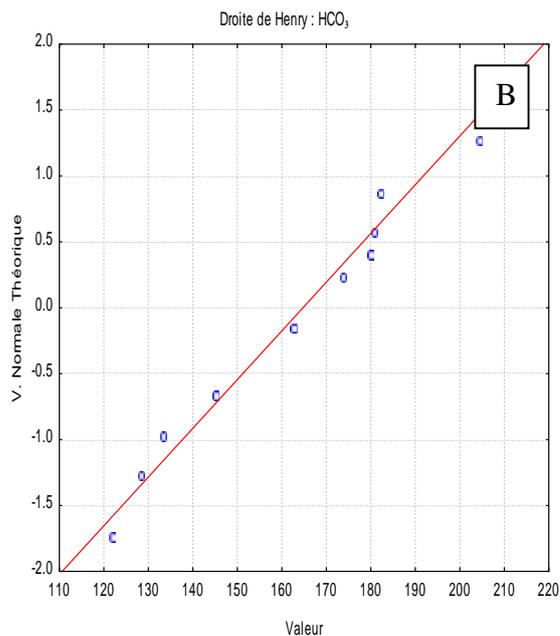
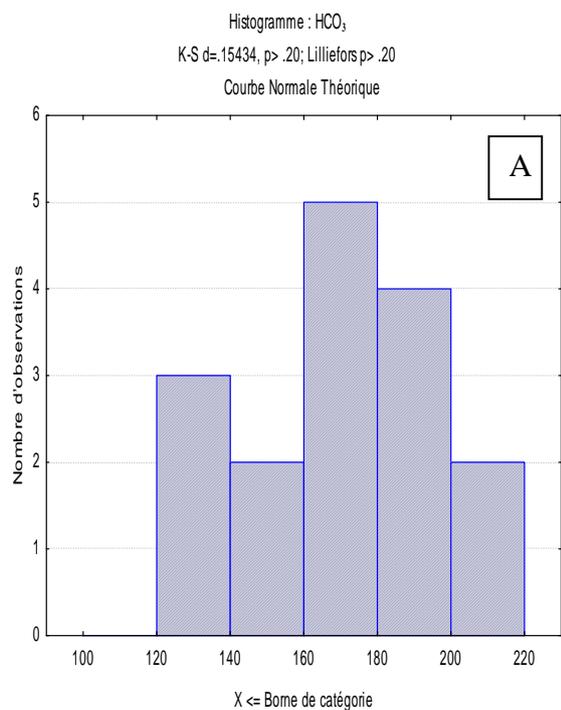


Fig. 56 : Histogramme (A) et graphe de probabilité (B) des teneurs en  $\text{HCO}_3^-$  des échantillons des eaux de la nappe Complexe Terminal de la région de Hassi Messaoud.

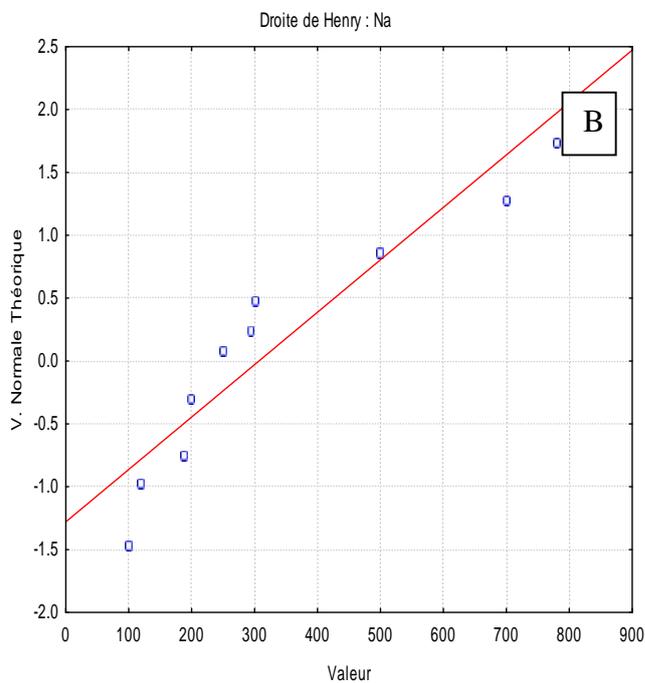
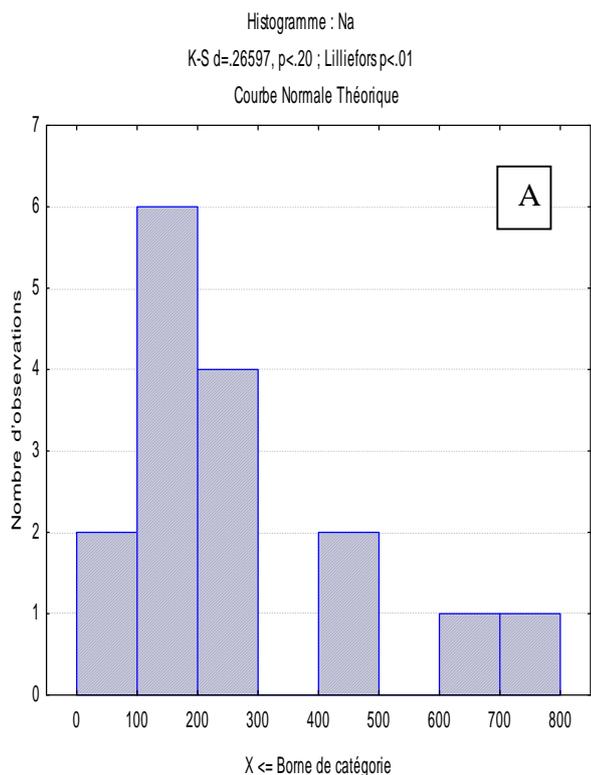


Fig. 57 : Histogramme (A) et graphe de probabilité (B) des teneurs en  $\text{Na}^+$  des échantillons des eaux de la nappe Complexe Terminal de la région de Hassi Messaoud.

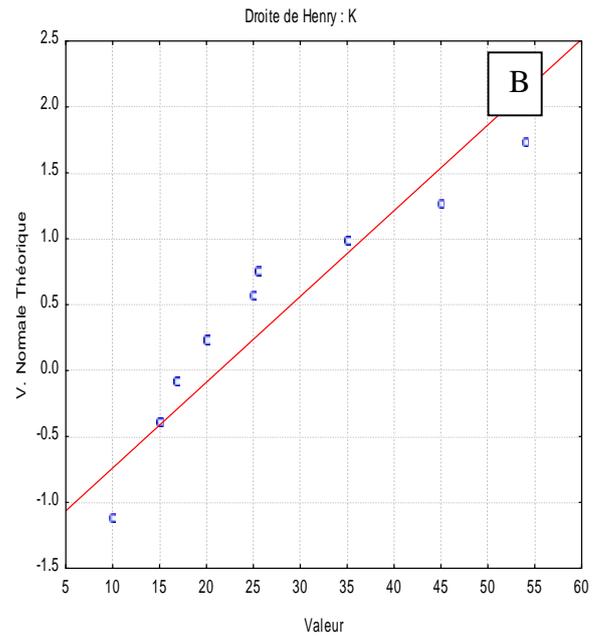
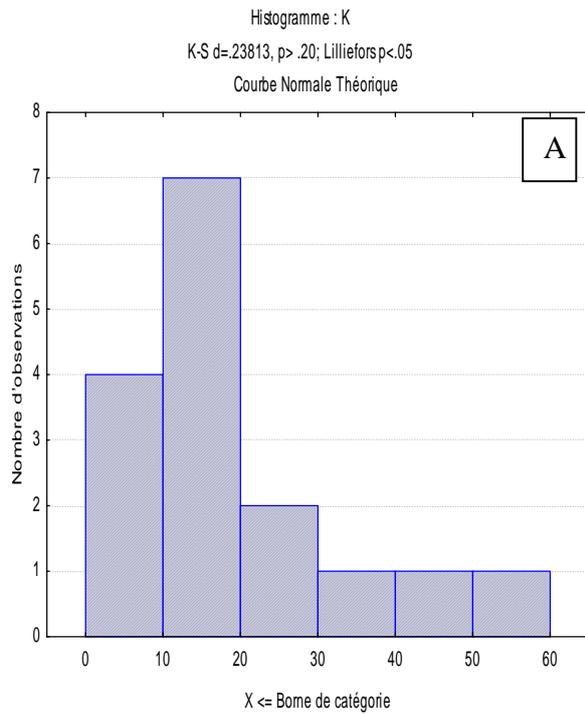


Fig. 58 : Histogramme (A) et graphe de probabilité (B) des teneurs en  $K^+$  des échantillons des eaux de la nappe Complexe Terminal de la région de Hassi Messaoud.

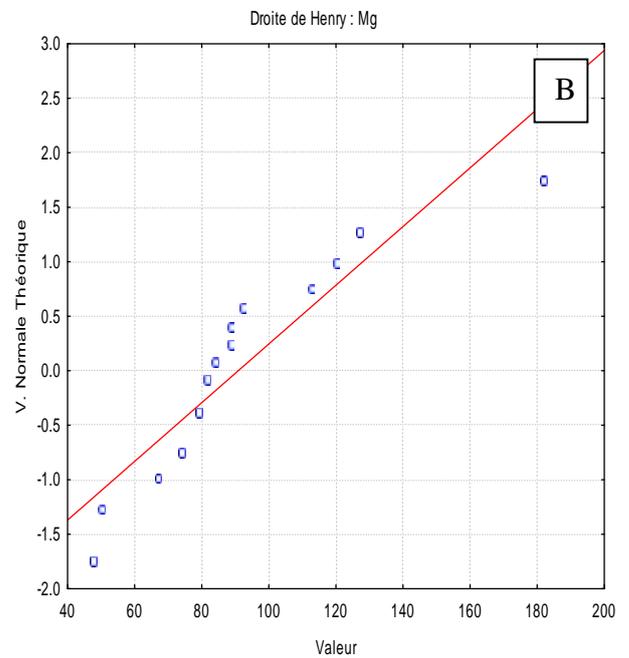
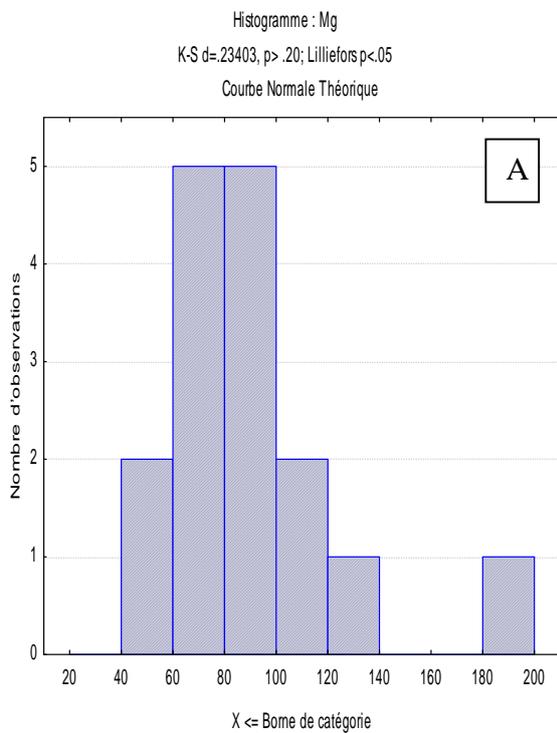


Fig. 59 : Histogramme (A) et graphe de probabilité (B) des teneurs en  $Mg^{++}$  des échantillons des eaux de la nappe Complexe Terminal de la région de Hassi Messaoud.

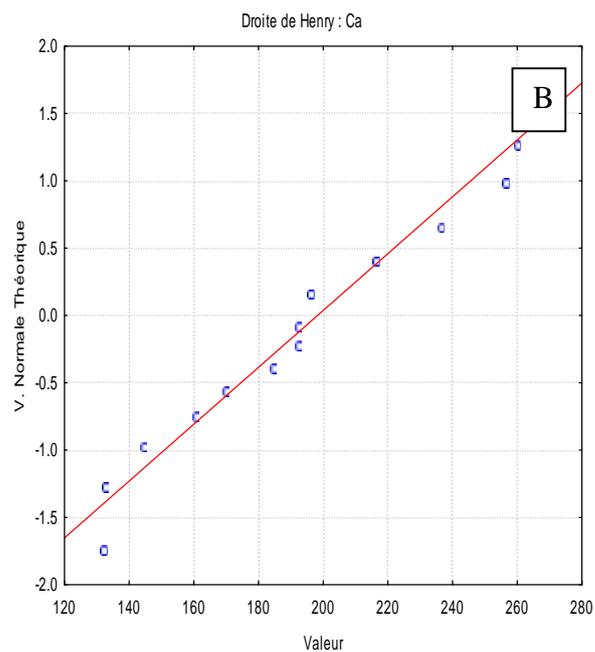
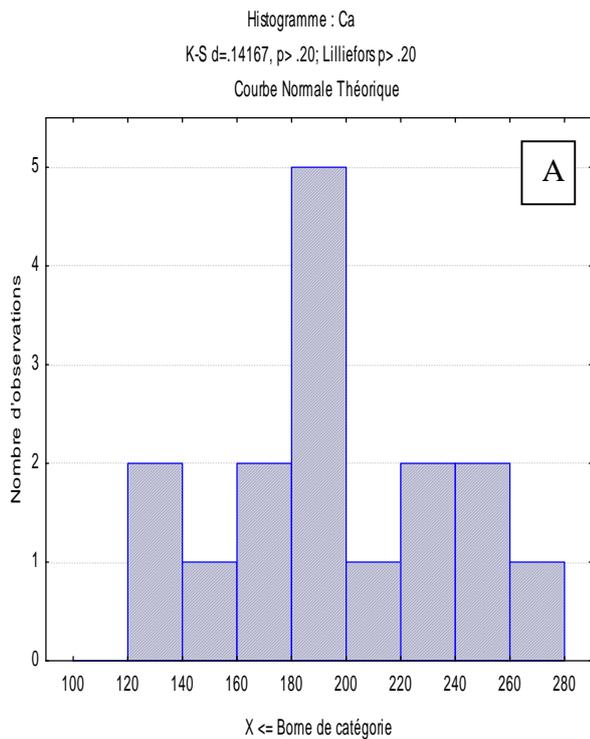


Fig. 60 : Histogramme (A) et graphe de probabilité (B) des teneurs en  $\text{Ca}^+$  des échantillons des eaux de la nappe Complexe Terminal de la région de Hassi Messaoud.

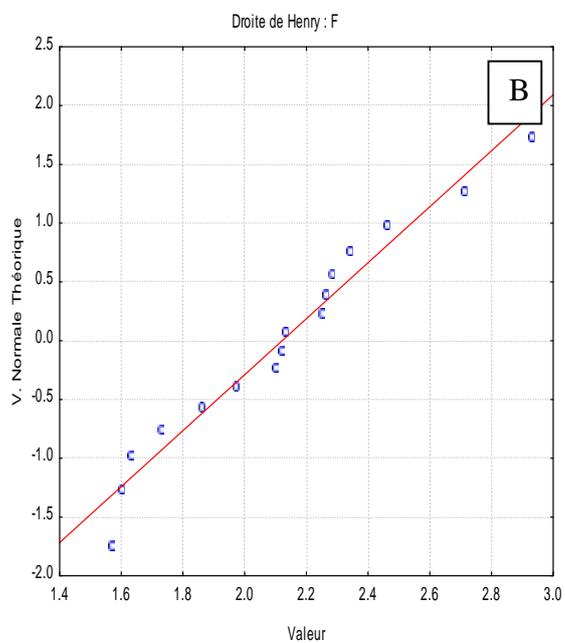
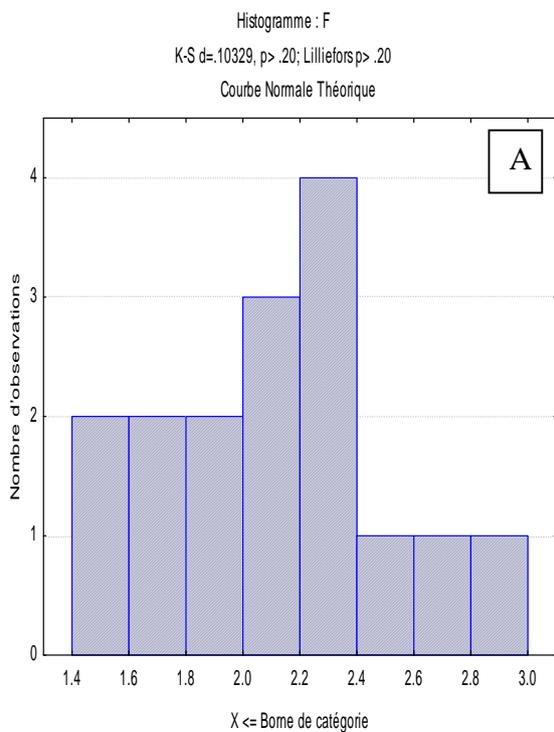


Fig. 61 : Histogramme (A) et graphe de probabilité (B) des teneurs en F des échantillons des eaux de la nappe Complexe Terminal de la région de Hassi Messaoud.