

UNIVERSITE KASDI MERBAH – OUARGLA  
FACULTÉ DES HYDROCARBURES, DES ÉNERGIES RENOUVEALABLES ET DES  
SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS  
Département des Sciences de la Terre et de l'Univers



Doctorat en Science  
Domaine : Sciences de la Terre et de l'Univers

Filière : Géologie

THEME

Hydrogéologie, qualité et gestion de la ressource en eau  
dans la région d'El Menia (Sud de l'Algérie)

*Présenté par : FENAZI BILAL*

*Soutenu publiquement le :*

**Devant le jury :**

Président: Mr. Belksier Mohamed Salah

Directeur de Thèse : Mr. Zeddouri Aziez

Examineurs: Mr. Amroune A. El Waheb

Mr. Sakaa Bachir

Mr. Bouzened Imad Eddine

Mr. Kchiched Rabah

MCA, Univ. Ouargla

Professeur, Univ. Ouargla

MCA, Univ. M'sila

Directeur, CRSTRA-Biskra

MCA, Univ. Djelfa

MCA, Univ. Ouargla

**Année Universitaire : 2021/2022**

## Résumé

La région d'El Menia est une oasis située au Sud de l'Algérie caractérisée par un climat aride où les précipitations sont presque nulles pendant toute l'année. Cette situation oblige les habitants de cette oasis d'utiliser seulement les eaux souterraines. Cette zone d'étude est bénéficiée de deux nappes souterraines l'une peu profonde caractérisée par une eau de mauvaise qualité avec des conductivités électriques qui dépassent les normes de potabilité actuellement utilisée uniquement pour l'irrigation, cette situation exige une étude de la vulnérabilité par la méthode de GOD qui révèle une tendance à la vulnérabilité moyenne à très forte. La deuxième nappe est une nappe très profonde très connue sous le nom de la nappe du Continental Intercalaire, caractérisée par une eau de très bonne qualité avec des conductivités électriques dépassent à peine les 500 mS/cm. Cette dernière représente la principale ressource utilisée pour toutes les activités humaines (AEP, AEI et EI) de ce fait, une étude quantitative avec des scénarios de court, moyen et long terme à prouver que malgré les pressions sur cette ressource l'offre est toujours supérieur à la demande vue les grandes réserves de cette nappe. L'étude pédologique des sols de cette région montre bien que ces sols présentent une salinité très élevées causée par la présence des sols sableux qui favorisent le drainage ainsi qu'une eau de nappe phréatique trop salée.

Mots clés : climat aride, qualité, vulnérabilité, scénarios, salinité.

## Abstract

The region of El Menia is an oasis located in southern Algeria characterized by an arid climate where rainfall is almost zero throughout the year. This situation forces the inhabitants of this oasis to use only groundwater. This study area benefits from two underground aquifers, one shallow characterized by poor quality water with electrical conductivities that exceed potability standards currently used only for irrigation; this situation requires a vulnerability study by the GOD method which reveals a tendency towards medium to very high vulnerability. The second aquifer is a very deep aquifer very well known as the Continental Intercalaire aquifer, characterized by very good quality water with electrical conductivities barely exceeding 500 mS/cm. The latter represents the main resource used for all human activities (DWS, IWS and IW) therefore; a quantitative study with short, medium and long term scenarios to prove that despite the pressures on this resource the supply is always higher than demand given the large reserves of this aquifer. The pedological study of the soils of this

region shows that these soils have a very high salinity caused by the presence of sandy soils which promote drainage as well as too salty groundwater.

Key words: arid climate, quality, vulnerability, scenarios, salinity.

#### الملخص:

منطقة لمنيعة هي عبارة عن واحة تقع في جنوب الجزائر تتميز بمناخها الجاف حيث نسبة التساقط تكاد تكون منعدمة طوال السنة، هذه الوضعية اجبرت السكان على الاعتماد على المياه الجوفية. تتميز المنطقة بتواجد منطقتين بهما مياه جوفية الاولى قريبة من سطح الارض تحتوي على مياه رديئة الجودة بقيم للناقلية الكهربائية تتعدى القيمة المعيارية لجودة المياه. هذه المياه تستخدم حاليا في الري فقط. هاته الوضعية تطلبت انجاز دراسة حول حساسية الطبقة المائية حسب طريقة قود بينت ان هاته الحساسية متوسطة الى عالية. الطبقة المائية الثانية عميقة جدا و معروفة تحت اسم المتداخل القاري تمتاز بمياه ذات جودة عالية حيث قيمة الناقلية الكهربائية لا تتعدى 500 مليسيمنس/سم في احسن الحالات. هاته الطبقة تعتبر حاليا المصدر الرئيسي للتزود بالمياه الصالحة للشرب و للري و للاستخدام الصناعي و لهذا السبب قمنا بدراسة كمية عن طريق سيناريوهات قصيرة، متوسطة و طويلة الامد اثبتت انه و مع وجود ضغوط حول مياه هاته الطبقة الى ان العرض يفوق بكثير الطلب و هذا راجع الى الاحتياطات المائية الكبيرة التي تتميز بها هاته الطبقة. دراسة التربة لهاته المنطقة اثبتت ان وجود قيم عالية للملوحة في هذه التربة و هذا راجع للطبيعة الرملية للتربة و قربها كذلك من طبقة المياه.

الكلمات الدالة: مناخ جاف، جودة، حساسية، سيناريو، ملوحة.

## *Remerciements*

Je tenais à remercier comme il se doit les personnes qui ont partagé avec moi l'aventure de ce travail. Ma première pensée va tout naturellement à mon directeur de thèse **Zeddouri Aziez** pour la confiance qu'il m'a témoigné en me confiant ce travail. Je tenais à remercier aussi mon co-directeur le professeur **Antonio Pulido Bosch** qui a suivi ce travail dans tous ses détails avec une rigueur scientifique exceptionnelle.

Je voudrais également remercier les membres de jury, pour avoir bien voulu lire, commenter et débattre mon travail.

Mes remerciements vont également pour l'équipe de la subdivision de l'hydraulique d'El Menia et spécialement pour Brihmat Abdelah qui m'a beaucoup aidé lors de la collecte des données.

Je remercie aussi monsieur Benhamida Sliman directeur de l'ANRH de Ouargla ainsi que monsieur Ben Brahem Ali directeur régionale de l'agence nationale des bassins hydrographiques qui ont met à ma disposition tous les documents nécessaires, constituant la base de ce travail.

Mes sincères remerciements et mes reconnaissances s'adressent aussi à mes amis Badache Mohamed et Remita Omar pour ces encouragements pour réaliser ce travail.

Enfin, ma profonde reconnaissance et mes sincères gratitude sont aussi accordées à Dobi Abd El Majid le doyen de la faculté des hydrocarbures ainsi que Khelifa Mohamed Cherif chef de département de forage et mécanique des chantiers pétroliers pour leurs soutiens et leurs aides.

# *Dédicace*

*A la mémoire de ma mère*

*A mon très cher père, qui a su m'élever,*

# *Tables des matières*

Introduction générale	01
<b><i>Chapitres 01 : Géographie et géologie</i></b>	
1. Situation géographique	04
2. Aperçu socio-économique	04
2.1. Aspect démographique	04
2.2. Aspects sociaux	05
2.3. Aspects économiques	06
2.3.1. L'emploi	06
2.3.2. Données sur l'agriculture et l'élevage	07
3. Pédologie	07
3.1. Sols d'El Menia	08
4. Topographie et géomorphologie	09
4.1. Topographie	09
4.2. Géomorphologie	10
5. Géologie	11
5.1. Tectonique et structure	11
5.2. Géologie régionale	11
5.3. Géologie locale	12
5.3.1. Série stratigraphique de la zone d'étude	14
6. Conclusion	18
<b><i>Chapitres 02 : Hydroclimatologie de la zone d'étude</i></b>	
1. Introduction	19
2. Précipitations	19
2.1. Variations interannuelles des précipitations	19
2.2. Variations moyennes mensuelles des précipitations	20
3. Températures	21
3.1. Variations moyennes mensuelles des températures	21
4. Vent	22
5. Humidité	22
6. Durée d'insolation	23
7. Évapotranspiration potentielle (ETP)	24
8. Diagramme ombrothermique de Gausson	25
9. Indice d'aridité de De Martonne	26
10. Climagramme de Louis Emberger	27
11. Bilan hydrique	28
11.1. Évapotranspiration	29
11.1.1. Évapotranspiration potentielle (ETP)	29
11.1.2. Évapotranspiration réelle (ETR)	30
11.2. Calcul du bilan hydrologique selon C.W. Thornthwaite	30
11.2.2. Interprétation du bilan hydrique	31
11.3. Ruissellement	32
11.4. Infiltration efficace $I_e$	32

12. Conclusion	33
<b>Chapitre 03 : Hydrogéologie de la zone d'étude</b>	
1. Introduction	34
2. Hydrogéologie régionale	34
3. Système aquifère du Sahara septentrional	35
3.1. Complexe Terminal (CT)	36
3.1.1. Alimentation – Ecoulement	37
3.1.2. Piézométrie du CT	37
3.2. Continental Intercalaire (CI)	38
3.2.1. Alimentation – Ecoulement	39
3.2.2. Épaisseur du réservoir	39
3.2.3. Piézométrie du CI	40
4. Hydrogéologie locale	40
4.1. Nappe superficielle (nappe phréatique)	40
4.1.1. Carte piézométrique de la nappe phréatique	41
4.2. Nappe du CI	42
4.1.2. Carte piézométrique de la nappe du CI	42
5. Etude hydrodynamique	43
5.1. Méthode d'interprétation	43
5.2. Présentation du forage	43
5.3. Méthode d'interprétation	44
6. Conclusion	45
<b>Chapitre 04 : Hydrochimie de la ressource en eau</b>	
1. Introduction	47
2. Qualité des eaux de la ressource en eau dans la région d'El Menia	47
2.1. Matériels et méthodes	47
2.2. Nappe du Continental Intercalaire	49
2.2.1. Potentiel d'Hydrogène (pH)	49
2.2.2. Conductivité électrique (CE)	49
2.2.3. TDS (Total Dissolved Sels)	50
2.2.4. Cations	51
2.2.5. Anions	53
2.2.6. Classification chimique des eaux de la nappe du CI	55
2.2.7. Aptitude des eaux de la nappe du CI à l'irrigation	56
2.2.8. Origine de la salinité des eaux du CI	58
2.2.8.1. Traitement et analyse statistique des données hydrochimiques des eaux de la nappe du CI	58
2.2.8.2. Analyse en composantes principales (ACP)	58
2.2.9. Rapports caractéristiques pour les eaux de la nappe du CI	60
2.2.10. Indice d'échange de base (i.e.b)	62
2.2.11. Indices de saturation	63
2.3. La nappe phréatique	65
2.3.1. Potentiel d'Hydrogène (pH)	65
2.3.2. Conductivité électrique (CE)	66
2.3.3. TDS (Total Dissolved Sels)	66
2.3.4. Cations	67
2.3.5. Anions	69
2.3.6. Substances indésirables	71

2.3.7 Classification chimique des eaux de la nappe phréatique	71
2.3.8. Aptitude des eaux de la nappe phréatique à l'irrigation	72
2.3.9. Origine de la salinité des eaux	73
2.3.9.1. Traitement et analyse statistique des données hydrochimiques des eaux de la nappe phréatique	73
2.3.9.2. Analyse en composantes principales (ACP)	74
2.3.10. Rapports caractéristiques pour les eaux de la nappe phréatique	76
2.3.11. Indice d'échange de base (i.e.b)	78
2.3.12. Indices de saturation	79
3. Conclusion	80
<b>Chapitre 05 : Pédologie</b>	
1. Introduction	82
2. Les différents types des sols sahariens	82
2.1. Sols minéraux bruts (sols sableux)	82
2.2. Sols peu évolués	82
2.3. Sols des dayas	83
2.4. Sols des oasis	83
2.5. Sols halomorphes (sodique)	83
2.6. Sols hydromorphes	83
2.7. Sol des palmeraies	83
3. Méthodes d'analyses au laboratoire	84
4. Propriétés physiques des sols	84
4.1. Granulométrie	84
5. Les caractéristiques chimiques des sols	86
5.1. pH	86
5.2. Carbone et la matière organique des sols	86
5.3. Calcaire total (CaCO <sub>3</sub> )	88
5.4. Conductivité électrique (CE)	89
6. Salinité et sodicité des sols	91
6.1. Classification des sols salins	91
6.2. Les sols de la région d'El Menia	92
7. Conclusion	93
<b>Chapitre 06 : Vulnérabilité à la pollution de la nappe phréatique</b>	
1. Introduction	95
2. Concept de vulnérabilité des eaux à la pollution	95
2.1. Méthodes des systèmes paramétriques	95
2.1.1. Le système matriciel	95
2.1.2. Le système de classe	95
2.1.3. Système de classes pondérées	96
2.2. Méthodes de comparaison	96
2.3. Méthodes des relations analogiques et modèles numériques	96
3. Application de la méthode GOD (Foster, 1987)	96
3.1. Présentation de la méthode	96
3.2. Détermination de cote des paramètres de la méthode de GOD pour la zone d'étude	98
3.3. Interprétation de la carte de vulnérabilité à la pollution des eaux selon la méthode de GOD	99
4. Validation des résultats de la méthode de GOD par les nitrates et les chlorures	101
5. Conclusion	104



<i>Chapitre 07 : Gestion de la ressource en eau</i>	
1. Introduction	105
2. Diagnostique quantitatif de la ressource en eau dans la région d'El Menia	105
2.1. Potentialités hydriques de la zone d'étude	105
2.2. Les puits	105
2.3. Les forages	105
2.4. Réservoirs de stockage	106
2.5. Station d'épuration	106
3. Mobilisation de la ressource en eau dans la région d'El Menia	106
4. Affectation de la ressource en eaux dans la zone d'étude	107
5. Alimentation en eau dans la zone d'étude	108
5.1. Alimentation en eau potable (AEP) dans la zone d'étude	109
5.2. Alimentation en eau pour l'agriculture (AEA)	110
5.2.1. Répartition des surfaces agricoles dans la zone d'étude	110
5.2.2. Répartition des palmiers dattiers dans la zone d'étude	111
5.3. Alimentation en eau industrielle (AEI)	111
6. Évaluation des besoins en eau des différents secteurs	111
6.1. Évaluation de la demande Socio-économique en eau (Alimentation en eau potable)	111
6.2. Évaluation des besoins en eau agricole (horizon 2017 – 2022 – 2027- 2037)	112
6.3. Évaluation des besoins en eau industrielle (horizon 2017 – 2022 – 2027 - 2037)	113
6.4. Bilan des besoins globaux	114
7. Confrontation offre-demande en eau dans l'oasis d'El Menia	115
8. Conclusion	116
Conclusion générale	117

## *Liste des figures*

<i>N° de figure</i>	<i>Titre de figure</i>	<i>Page</i>
Figure 01	Situation géographique de la zone d'étude	04
Figure 02	Carte de l'occupation du sol de la zone d'étude	09
Figure 03	Carte des pentes de la zone d'étude	10
Figure 04	Extrait de la carte géologique du SASS	12
Figure 05	Carte géologique locale d'El Menia (Busson, 1967)	14
Figure 06	Colonne lithostratigraphique de la zone d'étude	17
Figure 07	Coupe schématique des terrains de la zone d'étude	18
Figure 08	Évolution des précipitations annuelles d'El Menia	20
Figure 09	Évolution des précipitations mensuelles d'El Menia (1995-2017)	20
Figure 10	Histogramme des températures moyennes mensuelles de la zone d'étude (1995-2017)	21
Figure 11	Figure 11 Histogramme de la vitesse moyenne mensuelle de vent de la zone d'étude (2008-2017)	22
Figure 12	12 Histogramme de l'humidité moyenne mensuelle dans la zone d'étude (2008-2017)	23
Figure 13	Histogramme de la durée d'insolation moyenne mensuelle de la zone d'étude (2008-2017)	24
Figure 14	Évolution de l'évapotranspiration mensuelle d'El Menia (1995-2017)	25
Figure 15	Diagramme pluviométrique à la station d'El Menia	25
Figure 16	Abaque de l'indice d'aridité de De Martonne (1926)	27
Figure 17	Climagramme d'Emberger de la région d'El Menia	28
Figure 18	Unités hydrogéologiques du bassin saharien	34
Figure 19	Carte de la limite du système aquifère SASS	36
Figure 20	Carte piézométrique de référence du Complexe Terminal	38
Figure 21	Carte piézométrique du CI (OSS, 2003)	40
Figure 22	Carte piézométrique de la nappe superficielle (Novembre 2018)	41
Figure 23	Carte piézométrique de la nappe du CI	43
Figure 24	Essai de pompage long duré lors de la phase de la descente du forage Taghit selon la méthode de Cooper-Jacob	44
Figure 25	Essai de pompage long duré lors de la phase de la remontée du forage Taghit selon la méthode de Cooper-Jacob	45
Figure 26	Inventaires des points d'eau dans la région d'El Menia	48
Figure 27	Histogramme de variation du pH dans les forages de la nappe du CI dans la région d'El Menia	49
Figure 28	Histogramme de variation de la CE dans les forages de la nappe du CI dans la région d'El Menia	50
Figure 29	Histogramme de variation des résidus secs dans les forages de la nappe du CI dans la région d'El Menia	50
Figure 30	Histogramme de variation des teneurs en calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) dans les forages de la nappe du CI dans la région d'El Menia	51
Figure 31	Histogramme de variation des teneurs en magnésium ( $\text{Mg}^{2+}$ ) dans les forages de la nappe du CI dans la région d'El Menia	52
Figure 32	Histogramme de variation des teneurs en sodium ( $\text{Na}^+$ ) dans les forages de la nappe du CI dans la région d'El Menia	52

Figure 33	Histogramme de variation des teneurs en Potassium ( $K^+$ ) dans les forages de la nappe du CI dans la région d'El Menia	53
Figure 34	Histogramme de variation des teneurs en chlorures ( $Cl^-$ ) dans les forages de la nappe du CI dans la région d'El Menia	54
Figure 35	Histogramme de variation des teneurs en bicarbonates ( $HCO_3^-$ ) dans les forages de la nappe du CI dans la région d'El Menia	54
Figure 36	Histogramme de variation des teneurs en sulfates ( $SO_4^{2-}$ ) dans les forages de la nappe du CI dans la région d'El Menia	55
Figure 37	Représentation des analyses chimiques de la nappe du CI sur le diagramme de Piper	56
Figure 38	Diagramme de Riverside des eaux du Continental Intercalaire dans la région d'El Menia	57
Figure 39	Valeurs propres des facteurs de charges	59
Figure 40	Cercles de corrélation sur le plan des facteurs F1-F2 des eaux de la nappe du CI	60
Figure 41	Courbe de corrélation du couple $Na^+$ vs $HCO_3^-$ des eaux du CI	61
Figure 42	Courbe de corrélation du couple $Ca^{+2}$ vs $SO_4^{-2}$ des eaux du CI	61
Figure 43	Courbe de corrélation $Ca^{+2}$ vs $Cl^-$ des eaux du CI	62
Figure 44	Corrélation entre les indices de saturation	65
Figure 45	Histogramme de variation du pH dans les puits de la nappe phréatique dans la région d'El Menia	65
Figure 46	Histogramme de variation de la CE dans les puits de la nappe phréatique dans la région d'El Menia	66
Figure 47	Histogramme de variation des résidus sec dans les puits de la nappe phréatique dans la région d'El Menia	66
Figure 48	Histogramme de variation des teneurs en calcium ( $Ca^{2+}$ ) dans les puits de la nappe phréatique dans la région d'El Menia	67
Figure 49	Histogramme de variation des teneurs en sodium ( $Na^+$ ) dans les puits de la nappe phréatique dans la région d'El Menia	68
Figure 50	Histogramme de variation des teneurs en magnésium ( $Mg^{2+}$ ) dans les puits de la nappe phréatique dans la région d'El Menia	68
Figure 51	Histogramme de variation teneurs en potassium ( $K^+$ ) dans les puits de la nappe phréatique dans la région d'El Menia	69
Figure 52	Histogramme de variation des teneurs en chlorures ( $Cl^-$ ) dans les puits de la nappe phréatique dans la région d'El Menia	69
Figure 53	Histogramme de variation des teneurs en bicarbonates ( $HCO_3^-$ ) dans les puits de la nappe phréatique dans la région d'El Menia	70
Figure 54	Histogramme de variation des teneurs en sulfates ( $SO_4^{2-}$ ) dans les puits de la nappe phréatique dans la région d'El Menia	70
Figure 55	Histogramme de variation des teneurs en nitrates ( $NO_3^-$ ) dans les puits de la nappe phréatique dans la région d'El Menia	71
Figure 56	Représentation des analyses chimiques de la nappe phréatique sur le diagramme de Piper	72
Figure 57	Diagramme de Riverside des eaux de la nappe phréatique dans la région d'El Menia	73
Figure 58	Valeurs propres des facteurs de charges	75
Figure 59	Cercles de corrélation sur le plan des facteurs F1-F2 des eaux de la nappe phréatique	76
Figure 60	Courbes de corrélations entre les cations et le TDS des eaux de la nappe	76

	phréatique	
Figure 61	Courbes de corrélations entre les anions et le TDS des eaux de la nappe phréatique	77
Figure 62	Relation entre $\text{Na}^+$ et $\text{Cl}^-$ des eaux de la nappe phréatique	78
Figure 63	Relation entre $\text{Ca}^{2+}$ et $\text{SO}_4^{2-}$ des eaux de la nappe phréatique	78
Figure 64	Corrélation entre les indices de saturation	80
Figure 65	Texture des sols de la région d'El Menia	85
Figure 66	Variations du pH des solutions de sols de la région d'El Menia	86
Figure 67	L'évolution de la teneur du carbone organique des sols de la région d'El Menia	87
Figure 68	L'évolution de la teneur de la matière organique des sols de la région d'El Menia	88
Figure 69	L'évolution de la teneur en calcaire total des sols de la région d'El Menia	89
Figure 70	L'évolution de la CE des sols de la région d'El Menia	90
Figure 71	Classification des sols de la région d'El Menia selon USSS (1954)	93
Figure 72	Carte du paramètre "O" nature lithologique de l'aquifère	98
Figure 73	Carte du paramètre "D" profondeur de la nappe	99
Figure 74	Carte de la vulnérabilité de la nappe libre d'El Menia selon la méthode de GOD	101
Figure 75	Teneurs des nitrates en (mg/l) dans la zone d'étude	102
Figure 76	Carte de la distribution spatiale des nitrates dans la zone d'étude	102
Figure 77	Teneurs des chlorures dans la zone d'étude	103
Figure 78	Carte de la distribution spatiale des chlorures dans la zone d'étude	104
Figure 79	Taux de mobilisation de la ressource en eaux souterraines dans la région d'El Menia	107
Figure 80	Structure de la demande en eau à usage domestique	107
Figure 81	Structure de la demande en eau à usages Agricoles	108
Figure 82	Structure de la demande en eau à usage industriels	108
Figure 83	Affectation des ressources en eaux souterraines dans la zone d'étude	108
Figure 84	Répartition des besoins en eau potable pour différents horizons dans la zone d'étude	112
Figure 85	Répartition des besoins en eau agricole pour différents horizons dans la zone d'étude	113
Figure 86	Répartition des besoins en eau industrielle pour différents horizons dans la zone d'étude	114
Figure 87	Bilan des besoins globaux dans l'oasis d'El Menia	115

## *Liste des tableaux*

<i>N° de tableau</i>	<i>Titre de tableau</i>	<i>Page</i>
Tableau 01	Aspects sociaux de la zone d'étude	05
Tableau 02	Données sur l'aspect économique de la zone d'étude	06
Tableau 03	Coordonnées de la station météorologique dans la région	19
Tableau 04	Évolution des précipitations mensuelles d'El Menia (1995-2017)	20
Tableau 05	Températures moyennes mensuelles à la station d'El Menia (1995-2017)	21
Tableau 06	Vitesses moyenne mensuelles des vents en (m/s) à la station d'El Menia (2008-2017)	22
Tableau 07	Humidité relative moyenne mensuelle en % à la station d'El Menia (2008– 2017)	23
Tableau 08	Moyennes mensuelles de la durée d'insolation à la station d'El Menia (2008 – 2017)	23
Tableau 09	Moyennes mensuelles de l'évapotranspiration à la station d'El Menia (2008 – 2017)	24
Tableau 10	Classification climatique de l'indice de De Martonne (1926)	26
Tableau 11	Bilan hydrique à la station d'El Menia (1995/ 2017) par la méthode de Thornthwait	31
Tableau 12	Résultats du bilan hydrique	33
Tableau 13	Classification de Richards pour la qualité des eaux d'irrigation	57
Tableau 14	Statistiques élémentaires des paramètres physico-chimiques de la nappe du CI	58
Tableau 15	Matrice de corrélation des éléments chimiques calculée sur l'ensemble des échantillons de la nappe du CI de la zone d'étude	58
Tableau 16	Indices d'échange de base des eaux de la nappe du CI	63
Tableau 17	Indices de saturation des eaux du CI	63
Tableau 18	Statistiques élémentaires des paramètres physico-chimiques de la nappe phréatique	73
Tableau 19	Matrice de corrélation des éléments chimiques calculée sur l'ensemble des échantillons de la nappe phréatique dans la région d'El Menia	74
Tableau 20	Indice d'échange de base des eaux de la nappe phréatique	79
Tableau 21	Indices de saturation des eaux de la nappe phréatique	79
Tableau 22	Méthodes d'analyses physico-chimiques des sols	84
Tableau 23	Granulométrie des sols de la zone d'étude	84
Tableau 24	Variation des pH des sols de la région d'El Menia	86
Tableau 25	Le carbone et la matière organique dans les sols de la région d'El Menia	87
Tableau 26	Normes d'interprétation du taux du calcaire du sol	88
Tableau 27	Le calcaire total dans les sols de la région d'El Menia	88
Tableau 28	Variation de CE des sols (mS/cm)	89
Tableau 29	Classification des sols en fonction de la conductivité électrique	90
Tableau 30	Valeurs du sodium, Capacité d'échange cationique et le pourcentage de sodium échangeable des solutions de sols de la région d'El Menia	91
Tableau 31	Classification des sols salins selon USSL (1954)	92
Tableau 32	Côtes accordées aux paramètres de la méthode GOD	97
Tableau 33	Classes de la vulnérabilité GOD	97
Tableau 34	Côtes des paramètres de vulnérabilité de GOD de la nappe phréatique	99

	d'El Menia	
Tableau 35	Réservoirs de stockage et leurs capacités	106
Tableau 36	Situation actuelle de l'alimentation en eau potable dans la région	109
Tableau 37	État actuel de la superficie agricole à travers la zone d'étude	110
Tableau 38	Production des palmiers dans la région de El Menia	111
Tableau 39	Estimation du bilan prévisionnel des besoins (hm <sup>3</sup> /an) en A.E.P	111
Tableau 40	Besoins en eau agricole dans la zone d'étude	112
Tableau 41	Besoins en eau industriel dans la zone d'étude	114
Tableau 42	Besoins en eau totale (hm <sup>3</sup> /an) dans la zone d'étude	114

# *Introduction générale*

# *Introduction générale*

---

## **Introduction générale**

Mener à bien une bonne gestion des changements qui affectent les ressources en eau en raison de l'augmentation de l'activité humaine à partir de la Révolution Industrielle, et en particulier depuis les années 50 du siècle XX, représente un des plus grands défis que l'humanité rencontre aujourd'hui. Les ressources en eau par ses aspects quantitatif et qualitatif sont le fondement de notre bien-être et nous ne pouvons pas les laisser détériorer si nous voulons continuer à avancer (Cabello, et al. 2016).

Actuellement, Ce problème persiste à l'échelle mondiale et particulièrement dans le cas des zones arides dont les populations humaines, jusqu'à présent, ont demandé un investissement important dans la technologie et une grande consommation de ressources essentielles (eau et biodiversité) pour atteindre le développement.

A l'échelle mondiale, les zones arides occupent 41 pour cent de la surface terrestre caractérisées par la rareté des ressources en eau et une population estimée à 2 milliards d'habitants dont environ 90 pour cent se trouvent dans des pays en voie de développement (FAO, 2017), ces facteurs rendent la vie de la population presque impossible, car elle est fortement dépendante des ressources provenant des forêts et autres terres boisées, des pâturages et des arbres présents sur les terres agricoles pour subvenir à leurs besoins fondamentaux en termes d'aliments.

En Algérie où les zones arides et semi-arides occupent une partie considérable de sa surface totale (le Sahara algérien), le recours à l'utilisation des eaux souterraines dans ces zones est indispensable pour satisfaire la demande avec ses différents aspects (domestiques, irrigations et industrielles), la région d'El Menia fait partie de ces zones a une position géographique stratégique, elle situe au centre de l'Algérie, elle dispose aussi d'important réservoir d'eau souterraine (nappe phréatique, nappe du CI) et de surface (lac) ce qui montre bien l'importance de cette région dans le développement de l'agriculture.

Cette zone a connu ces dernières années de graves problèmes de qualité des eaux dû probablement à l'augmentation de la demande en eau pour les activités humaines et à la mauvaise gestion de la ressource en eau, En outre, les facteurs naturels, telle que la sécheresse ou les contraintes géologiques, ont un effet sur l'approvisionnement en eau potable et sa distribution. Parmi ces problèmes est celui de la salinisation des eaux de la nappe phréatique qui pourrais influe sur la qualité des eaux et le rendement des terres agricoles. Les mécanismes à l'origine de cette salinité sont diverses et complexes. Ainsi, le mode de



# *Introduction générale*

---

salinisation dépend du contexte géographique (côtier, continental...etc.), géologique (nature de l'aquifère, minéralogie des sédiments...etc.) et climatique. (Bourhane, 2010 et Belksier, 2016).

La salinité des eaux et du sol dans une zone aride et semi-aride a fait l'objet d'un bon nombre de travaux antérieurs (Belksier, 2009; Bouznade, 2009 et Bouchahm et al, 2013). Il est nécessaire donc de quantifier et d'analyser la quantité et la qualité des réserves en eau et de trouver le moyen de gérer cette ressource pour en assurer la durabilité.

Le présent travail basé sur les données collectées dans la région, a pour objectif de définir les aspects qualitatifs et quantitatifs avec la concentration sur la qualité de la ressource en eau pour voire l'origine de la salinité des eaux et ses impacts sur le sol en mettant ainsi l'accent sur l'évaluation de sa vulnérabilité aux influences anthropiques. La présente thèse est structurée en sept chapitres :

- Le premier chapitre concerne l'étude des caractéristiques physiques et géologique de la région (la géographie, démographie géologique et la géomorphologie) ;
- Le deuxième chapitre regroupe une étude des différents paramètres climatiques, tels que le type de climat, l'évolution des précipitations, l'évolution des températures, l'estimation de l'évaporation et le calcul du bilan hydrologique par la méthode de G.W.Thornthwaite ;
- Le troisième chapitre est consacré aux caractéristiques hydrogéologiques (piézométrie et paramètres hydrodynamiques des nappes d'eau dans cette région) ;
- Le quatrième présente l'évolution des paramètres chimiques en abordant les mécanismes de l'acquisition de la minéralisation des eaux souterraines ;
- Le cinquième chapitre présente l'étude pédologique des sols de cette oasis en mettant l'accent sur le problème de la salinisation et la sodicité de ces derniers ;
- Le sixième chapitre est consacré à l'étude de vulnérabilité à la pollution des eaux de l'aquifère libre en appliquant la méthode de GOD. Le test de validation nous permis de confirmer les résultats obtenus par cette méthode en comparant la carte de vulnérabilité avec les cartes des nitrates et des chlorures.

# *Introduction générale*

---

- Le septième chapitre vise à confronter les offres et les besoins en eau et faire des scénarios à court, à moyen et à long terme pour voir des inconvénients de l'état actuelle s'il y a lieu.

*Chapitre 01 : Géographie et  
géologie*

## 1. Situation géographique

L'oasis d'El Menia ex El Goléa est le point le plus méridional de l'Algérie. Elle appartient au bassin versant saharien occupant une surface de 49000 km<sup>2</sup>. Cette zone est située entre les latitudes 30°22'13" et 30°38'31" et les longitudes 2°51'56" et 2°56'04" ; l'altitude moyenne est 396 m. Du point de vue administratif, El Menia est devenue wilaya depuis Novembre 2019, distant à la capitale Alger d'environ 900 km, limitée au nord par la wilaya de Ghardaia (270 km), au sud par la wilaya de Aïn Salah (400 km), à l'est par la wilaya de Ouargla (410 km) et à l'ouest par la wilaya de Timimoun (360 km) et El Bayadh (Figure 1).

Cette région constitue actuellement un lieu de rencontre des voies venant du côté Ouest du Saoura (Adrar, Timimoune) et du plein sud (Tamanrasset, In Salah et Niger), et la route nationale projetée de l'est (Hassi Messaoud, Ouargla). Sa position géographique et géostratégique attire les populations voisines. Elle permet d'établir un équilibre spatial et fonctionnel pour l'ensemble de la wilaya, et lui offre un statut d'une zone militaire importante.

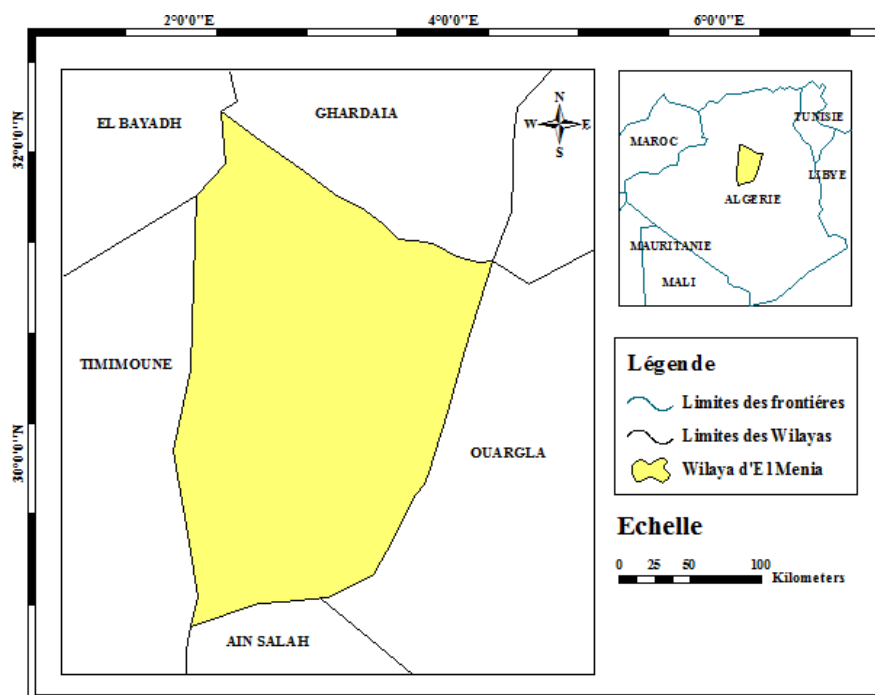


Figure 1 Situation géographique de la zone d'étude

## 2. Aperçu socio-économique

### 2.1. Aspect démographique

La démographie des états doit être considérée comme l'un des facteurs fondamentaux de la puissance (ou de l'impuissance) vue les contraintes qu'elle impose au développement économique (Joyaux, 2018). El Menia une daïra depuis la période coloniale en 1957, et puis

Wilaya depuis novembre 2019, ce nouveau découpage vise à améliorer les conditions de vie des citoyens, créer une mobilité économique dans la région et enfin limiter les difficultés dues à l'isolement dans les zones d'ombre. Actuellement, la superficie de la wilaya est de 49000 km<sup>2</sup> avec une population de 58000 habitants, soit 1.2 hab/km<sup>2</sup> et un taux de croissance de 2.33% (ABH, 2017).

## 2.2. Aspects sociaux

Ces aspects sont déterminants du niveau de développement humain et social de manière générale. Les aspects à analyser concernant l'existence et/ou la faiblesse, voir l'état dégradé et l'absence de certains équipements de base, tels que, l'habitat, l'éducation, la santé, l'AEP, l'assainissement, l'électrification et le gaz naturel. Le traitement des ces indicateurs permet de situer les besoins réels des populations locales, et de mesurer à leur juste valeur les inégalités et les disparités régionales et/ou locales.

Concernant l'habitat, la zone d'étude dispose d'un parc de 7400 logements dont 6560 habités, 128 secondaires et 672 inhabités. Rapporté à la population totale, cela donne un TOL de 5.9 personne/logement (Tableau 1).

**Tableau 01 Aspects sociaux de la zone d'étude**

<b>Paramètres</b>	<b>Indicateurs de la commune</b>
	Logements habités Immeuble : 2
	7400 dont : Maison individuelle : 1250
	Maison traditionnelle : 5674
	Autre ordinaire : 12
	Habitat précaire : 210
	Non déterminé : 84
<b>Habitat</b>	Logements secondaires : 128
	Logements inhabités : 672
	Total logements : 8032
	TOL : 5.9
	AEP : 86.3%
	Assainissement : 21.3%
<b>Raccordements aux réseaux</b>	Electricité : 96.2%
	Gaz naturel : 21.3%
	Hopital : 1
<b>Santé</b>	2 polycliniques : 2/60000 hab

	8 salles de soins
	6 pharmacies
	RN : 334 km
	CW : néant
<b>Réseau routier</b>	CC : 4.1 km
	Piste carrossable : 30 km
	Taux de revêtement : 91.85%
	Cycle primaire 18 établissements
<b>Education</b>	Cycle moyen 6 établissements
	Cycle secondaire : 2 établissements

## 2.3. Aspects économiques

### 2.3.1. L'emploi

L'approche sur l'emploi est abordée à travers la structure pour déterminer les besoins en postes de travail et la répartition des occupés par branches d'activités économiques (BAE) pour identifier les secteurs générateurs d'emplois et ceux qui le sont moins. Pour les besoins de l'analyse, nous nous baserons sur les données de la direction de la programmation et du suivi budgétaires (DPSB) de la willaya de Ghardaïa, selon une situation arrêtée en 2012 (Tableau 2).

**Tableau 02 Données sur l'aspect économique de la zone d'étude**

Caractéristiques et indicateurs	Paramètres	Commune
	Population totale	60000
	Population active	15000
	Nombre d'occupés	13800
<b>Structure (2012)</b>	STR	1400
	Taux d'activité	26.6%
	Taux d'occupation	86.4%
	Taux de chômage	13.6%
	Agriculture	5175 (37.5%)
	BTPH	1035 (7.5%)
<b>Occupés/BAE (2012)</b>	Industrie	345 (2.5%)
	Services et autre	7245 (52.5%)
	Total	13800 (100%)
		(DPSB, 2012)

## 2.3.2. Données sur l'agriculture et l'élevage

La tâche principale de l'agriculture saharienne est de rendre l'espace aride vivable pour les êtres vivants et créateur d'activité productrice (Achour, 1990). Les atouts dont dispose la zone d'étude permet de bien envisager le développement de ce secteur, dont la prise en charge, à travers le programme du renouveau agricole et rural, vise à :

- Lutter contre la dégradation des milieux physiques et l'avancée de la désertification ;
- Protéger les ressources naturelles et l'environnement ;
- Améliorer les performances de l'agriculture pour une contribution assez effective et plus large à la sécurité alimentaire de la population ;
- Reconvertir et adapter l'agriculture à l'aridité du climat et aux contraintes du milieu physique.

La zone d'étude est une oasis, dont sa surface agricole totale (SAT) est estimée à 370000 ha, dont 235750 ha considérée comme une surface agricole utile (DSA, 2014). Les principaux produits agricoles sont les dattiers, les cultures maraîchères et les arboricultures.

Concernant la production animale, et en matière de gros élevage, la région dispose d'un troupeau estimé à 72000 équivalents ovins (en terme d'équivalent ovin, 1 camelin ou 1 bovin égale 4 ovins). Pour faire face aux besoins alimentaires de ce troupeau la zone d'étude dispose seulement 34 ha de cultures fourragères, mais une importante surface destinée aux pacages et parcours (671000 ha).

Les contraintes liées aux activités agricoles se résument comme suit :

- Un climat Saharien à très forte aridité et dont la principale caractéristique consiste en un déficit permanent en eau, nécessitant donc la mobilisation des eaux pour toute mise en valeur agricole envisagée ;
- La présence des sols peu évolués xériques subdésertiques éolisés en reg et des sols peu évolués xériques subdésertiques modaux, unités pouvant faire l'objet d'une mise en valeur en irriguée moyennement des aménagements préalables obligatoires.
- Une certaine sensibilité à l'érosion surtout éolienne due au fait que la zone d'étude trop exposée aux vents et constituée de sols légers sans couvert végétal protecteur.

## 3. Pédologie

Sur les plateaux et les buttes, et par leur position assez élevée, le sol a été soumis à des phénomènes d'ablation continus, ce qui a donné lieu à des surfaces parsemées de cailloux (reg). En effet l'érosion éolien très active dans les milieux désertiques, a entraîné plus loin les éléments fins et a laissé en place les éléments grossiers. Sur les galets de raccordement de la

vallée, une action conjuguée d'entraînement hydrique et d'apport éolien a façonné la partie supérieure de la structure géomorphologique, l'érosion hydrique a laissé les couches argileuses nues. Celles-ci sont ensuite enfouies sous une faible couverture sableuse d'origine éolienne mais remaniée par le ruissellement.

Les apports sont assez homogènes et caractérisés par une granulométrie assez grossière : sable grossier, sable fin légèrement limoneux. En profondeur la variabilité est plus grande, soit des niveaux argileux dans la partie orientale de la palmeraie, Sur la partie occidentale de la palmeraie le grand erg, toit proche, alimente les formations dunaires discontinues (Capot, 1958).

### **3.1. Sols d'El Menia**

D'après une étude agronomique réalisée par Chevallier en 1934 dans cette région, généralement les sols de cette oasis sont caractérisés par des profondeurs variables d'Est en Ouest et sans différence du Nord vers le Sud, cette variabilité résulte de l'irrégularité de la roche mère. Du point de vue chimique, ces sols sont constitués de sables plus ou moins calcaire (2% à 7%) dépourvu de l'humidité conditions faisant obstacle à toute activité agricole. Ces sols comme tous les sols sahariens sont bien pourvus en  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  et autre oligo-élément essentiels, par contre ils manquent d'humus, d'azote et de phosphore assimilable (Figure 2).



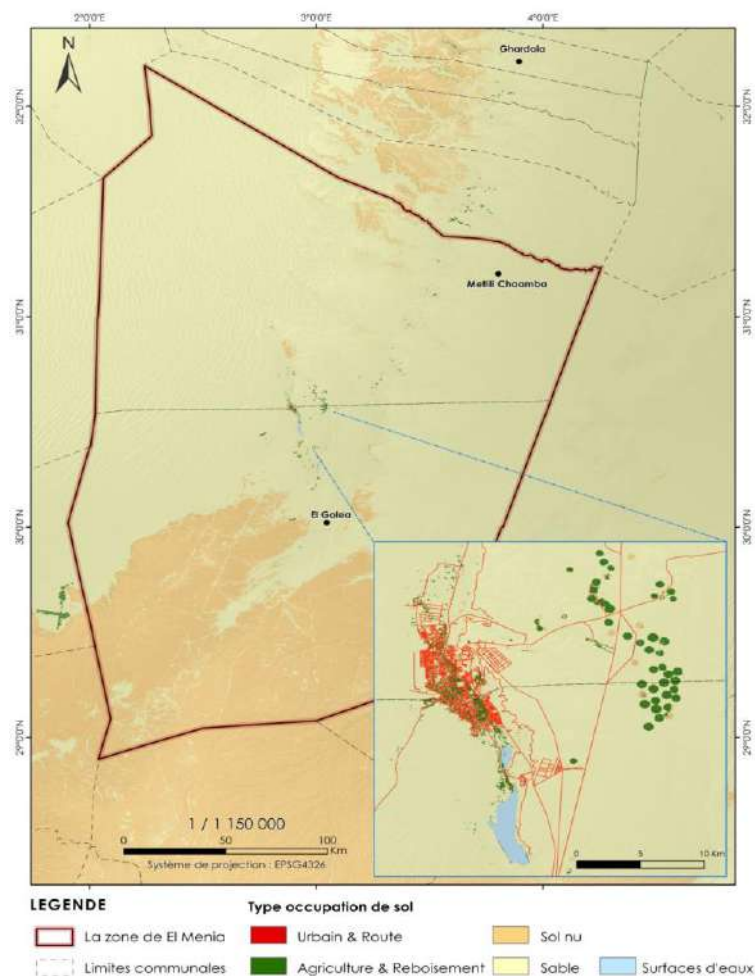


Figure 2 Carte de l'occupation du sol de la zone d'étude

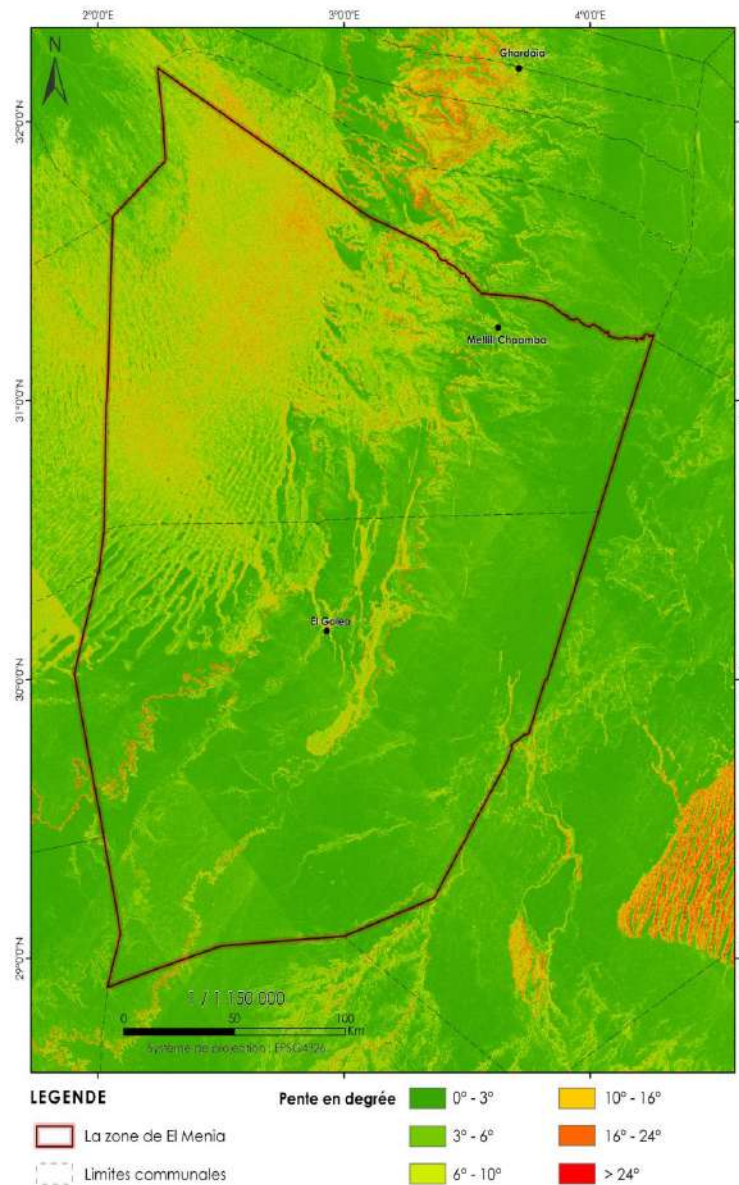
## 4. Topographie et géomorphologie

### 4.1. Topographie

L'allure générale des terrains est caractérisée par une faible pente (1 à 2%) du nord (amont) vers le sud (aval). Cette faible variation de la pente est observée dans la partie Est et la partie sud-ouest. Les altitudes oscillent autour de 390 m (DSA, 2014) (Figure 3).

La vallée de l'oasis se situe à l'amont d'une grosse gouttière de direction NNE-SSW dans laquelle les eaux issues de l'Atlas Saharien et de l'Erg Occidental s'écoulent en direction vers Gourara (DSA, 2014).

Le lac d'El Mellah est une dépression endoréique d'une superficie de 18947 ha, composé de deux bassins l'un supérieur et l'autre inférieur. Le lit du lac est formé de sol marneux, calcaires et sableux couvert d'un dépôt lacustre. Les entrées d'eau proviennent essentiellement de la remontée de la nappe phréatique (profondeur 40 cm dans le bassin supérieur et 100 cm dans le bassin inférieur), les excès d'eaux d'irrigation et les rejets d'eaux usées. La profondeur du lac varie entre 0.3 et 2 mètres.



**Figure 3 Carte des pentes de la zone d'étude**

## 4.2. Géomorphologie

La région d'El Menia est située sur un ancien niveau alluvial un peu argileux d'âge Cénomaniens. Elle se trouve dans un couloir ensermé entre les dernières dunes de grand erg occidental. La vallée de l'oasis est un lit alluvionnaire, composé des terrains agricoles très fertiles. Les cultures se déploient dans la vallée d'un oued, d'après Capot (1958) cet oued représente le prolongement d'oued Seggeur réapparaissant après la traversée de l'Erg, donc l'oasis se situe dans une zone déprimée sur des terrains alluvionnaires sableux, un peu argileuse à l'approche des buttes qui se localisent dans la partie Est, on note la présence d'un glacis simple ou double par endroit très disséqué et qui forme une surface prête pour le ruissellement (DSA, 2014).

## 5. Géologie

L'aspect géologique de l'Algérie septentrionale présente une importance capitale vu les ressources hydriques et énergétiques qu'elles possèdent. L'Algérie est subdivisée en quatre grands ensembles géologiques :

- L'Atlas Tellien, constitués par les reliefs et les plaines littorales ;
- Les Hauts Plateaux et les hautes plaines ;
- L'Atlas Saharien qui forme une longue suite de reliefs de direction NE-SW ;
- Une Plate-forme saharienne.

Notre zone d'étude fait partie de la plate-forme saharienne.

### 5.1. Tectonique et structure

Sur le plan tectonique, l'oasis d'El Menia est une zone calme où les formes des mouvements sont absentes. Il est à noter l'existence de certaine ondulation liée à des mouvements régionaux à la fin de l'ère secondaire traduit par la présence de la faille d'Amguid de direction N-S. La formation des oueds est aussi le résultat des mouvements d'extension (oued Seggeuer).

Du point de vue structurale, la zone d'étude est composée de :

- La vallée de l'oued Seggeuer, qui rassemble les oasis de : El Menia, Ksar, Bel Bachir et Taghit ;
- L'Erg occidental, qui occupe le territoire Ouest de la région ;
- Le plateau, qui occupe l'étendue Est de l'oasis.

### 5.2. Géologie régionale

Au Sahara Algérien, les études géologiques menées par Busson (1967 et 1970) et de Fabre (1976, 2005) constituent les références de base pour mieux comprendre la géologie de cette unité géographique. L'analyse de l'étude géologique de la zone d'étude menée par Fabre (2005), montre que le paléozoïque a subi des variations climatiques et tectoniques. Au début le Cambrien se dépose sur un socle précambrien métamorphique constitué par des grès, suivi par une transgression généralisée à l'Ordovicien. À la fin la région a subi une glaciation généralisée, les faciès d'âge Silurien de Sahara présente par des argiles riches en matière organique (block shales) liées à la remontée de la mer. Le Dévonien marqué par des sables arrive sur une mer qui s'étale au sud, la faune benthique s'appelle (ancien monde). Au Permian-Carbonifère s'installent un régime marin et continental, et la formation de la chaîne hercynienne. Au mésozoïque et selon le même auteur, la région du Sahara occidental et central subit trois épisodes :

# Géographie et géologie

- La finition d'une pénéplaine. Un vaste golfe peu profond et des lagunes couvrent le Bas Sahara. Des argiles, du sel, de l'anhydrite s'y dépose tandis qu'à l'Ouest s'empilent des coulées de basalte, issues de quelques grands centres volcaniques, au Maroc, à Taoudenni, à Fersiga, dans le Hodh.
- L'atlantique nord s'ouvre devant l'ouest africain. Des bombements et des fossés se créent. D'épaisses nappes de sables et d'argiles se sédimentent sur le Sahara central. C'est ce que l'on appelle le Continental Intercalaire. Il semble que sur le craton ouest africain où l'érosion dissout et déblaie les trapps basaltiques, rien ne se dépose sauf dans quelques fossés.
- Une double inondation, au début et à la fin du Crétacé supérieur, venue de la Téthys, gagne le sud du Sahara, isolant quelques grandes îles comme le Hoggar.

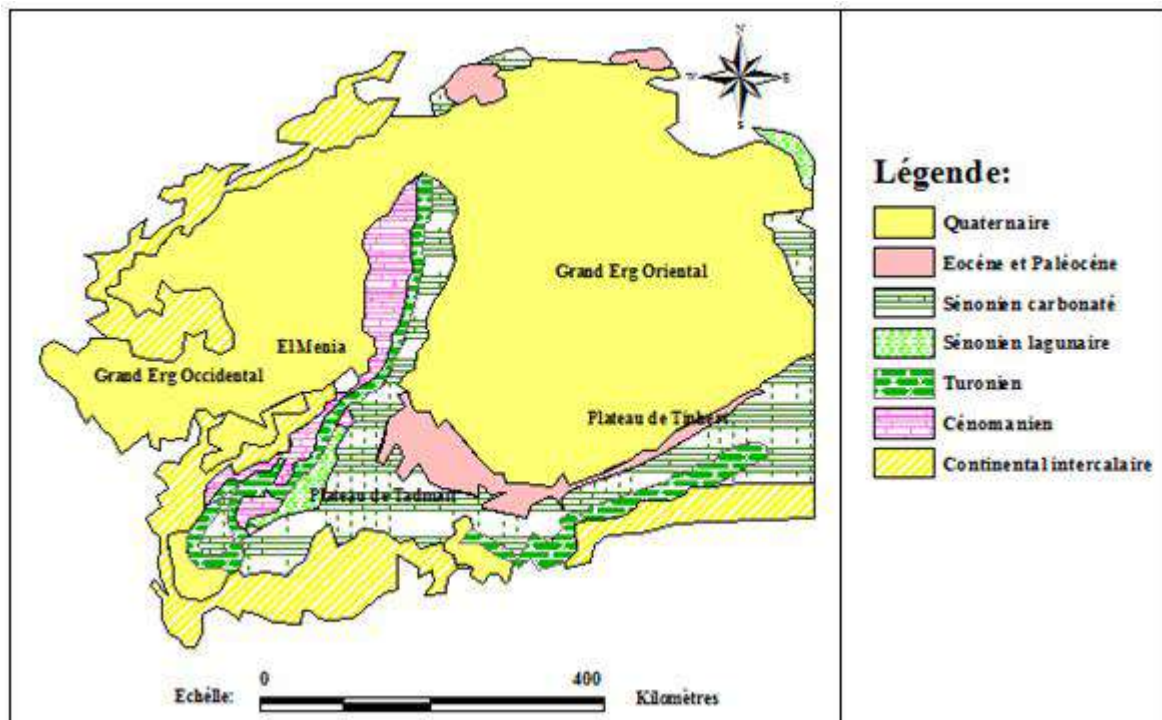


Figure 4 Extrait de la carte géologique du SASS (OSS, 2003)

## 5.3. Géologie locale

Les terrains de la région d'El Menia sont étudiés par plusieurs auteurs, et basé sur la description directe des affleurements et les analyses des sondages faits par Busson (1967). Ce dernier a établi une carte géologique (figure 5) dans laquelle les terrains sont d'âge secondaire repartie par un terrain ancien d'âge Cénomaniens inférieur à l'Ouest, de nature lithologique argileuse, détermine une phase humide masquée par le Grand Erg Occidental, les terrains de

## *Géographie et géologie*

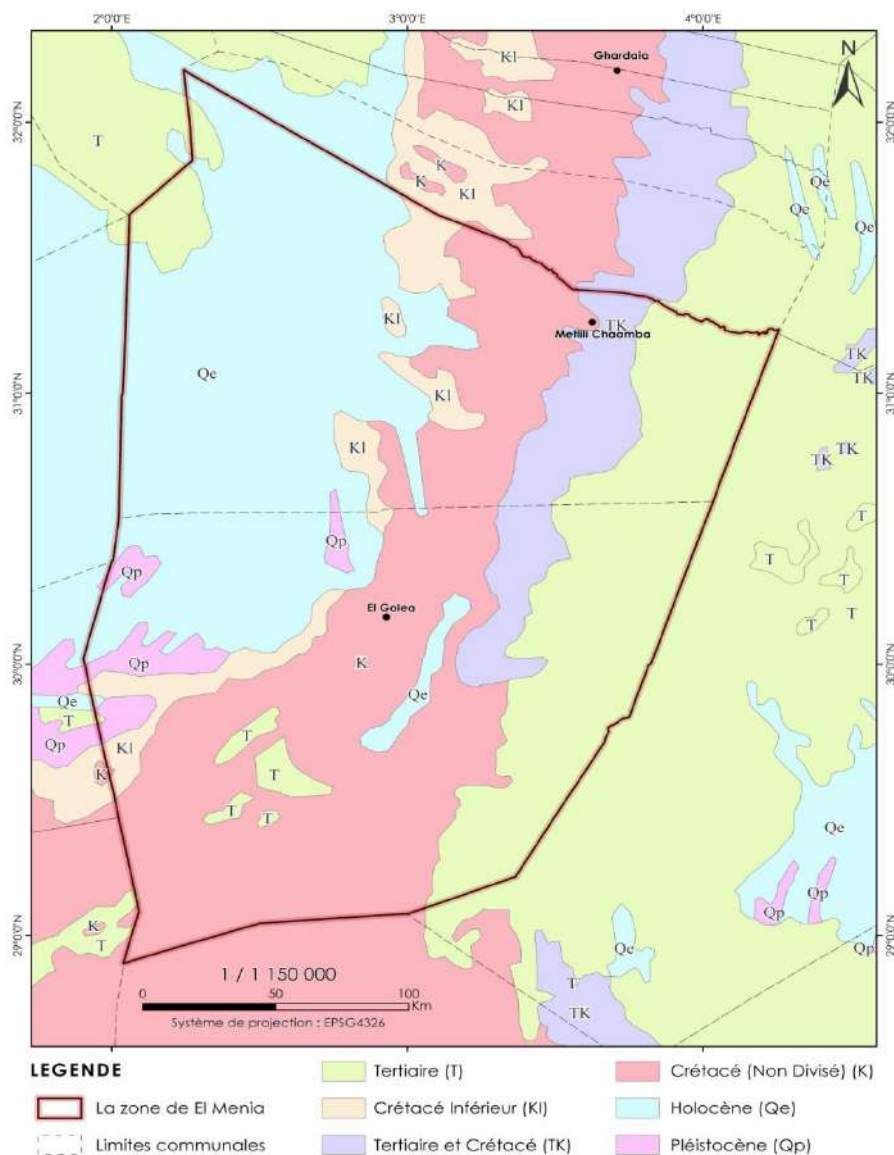
---

Cénomaniens moyen et supérieur se trouvent au tour de la zone d'étude surtout à l'Est d'un faciès calcaire, le Turonien commence l'affleurement à 19 km au sud d'El-Menia.

Selon cette carte aussi, les affleurements des couches est plus large de sud en nord, et très court de Ouest en Est, cela due à l'importance des variations de niveau topographique, qui pose le problème de l'origine de ces affleurements. L'installation de Grand Erg Occidental à l'Ouest d'El Menia, lié au régime continental qui a affecté la région durant le Quaternaire, les vents ramène les sable de sud vers le nord, les reliefs de Sabkha et mouvement alpine fait un obstacle naturel, et sont aussi les origines des eaux infiltrent dans cette immense surface dunaire, ces eaux allument les nappes phréatiques des oasis installées dans la région. Une description d'un log lithologique d'un forage d'eaux permet de dire que la formation importante est du secondaire de type calcaire à argile, et du sable vers la profondeur.

- A la base, on a une formation gréseuse de l'Albien connu dans la région sous le nom de la nappe Continental Intercalaire ;
- Au dessus se déposé les terrains argileuses d'âge Cénomaniens connu dans la région par le nom des argiles d'El-Goléa ;
- Au sommet se trouve le Turonien constitué des formations calcaire très dur, affleurent au Nord et Sud-Est d'ElMenia.





**Figure 5** Carte géologique locale d'El Menia (Busson, 1967)

### 5.3.1. Série stratigraphique de la zone d'étude

Les informations dont nous disposons sur la série stratigraphique de la région d'El Menia nous sont fournis par les forages pétroliers ; les forages hydrauliques sont généralement limités aux zones aquifères. La série stratigraphique dans notre zone d'étude se présente de bas en haut (Figure 6).

#### A. Cambrien

Il est constitué de grès quartzitiques gris vers la base, devenant rosâtre vers le haut, reposant sur un socle à élément de granite, le sommet est constitué par des quartzites blancs ou roses compacts parfois très grossier avec quelques niveaux de grès ferrugineux et d'argile rouge ou verte (épaisseur 240 mètres).

## **B. Ordovicien**

Constitué à la base par les grés et les argiles d'El Gassi. Cette série d'El Gassi est en fait formée par une alternance de quartzites fins, d'argiles grise et de niveaux de grés glauconieux.

Au dessus de la formation d'El Gassi on trouve les quartzites de Larque, ainsi qu'une alternance d'argile silteuse noire et de quartzite micacé et glauconieux à Tigilites. Ces derniers sont surmontés par la série de l'oued Saret, formée par des argiles noires et des grés plus ou moins quartzites. Le sommet de l'Ordovicien est formé par un complexe de grés quartzites avec passées de dolomies, d'argiles gréseuses, de quartzites fissurés (épaisseur 660 m).

## **C. Gothlandien**

Débuté par des argiles noires charbonneuses, légèrement dolomitiques. Au dessus de ces argiles on trouve des calcaires dolomitiques à niveaux d'argiles noires à graptolithes gris-noir du Silurien et des grés fins compacts (épaisseur 425 m).

## **D. Dévonien**

La base du Dévonien inférieur est constituée par une alternance d'argile noire micacée, très peu sableuse et de grés fins quartzites ou de grés grossiers à ciment argileux.

Le Dévonien supérieur est composé d'une argile noire compacte, pyriteuse ou silteuse, de grés et siltone.

## **E. Trias**

Il est constitué comme la majeure partie du Sahara d'anhydrite, de sel gemme et d'argile rouge, grise ou noire. C'est une sédimentation particulière des conditions paléoclimatiques qui ont régné à cette époque (épaisseur 70 m).

Les grés exploités par les forages d'eau à El Menia supportent directement et en concordance, des argiles vertes à gypse, puis des marno-calcaire contenant des fossiles marins d'âge Cénomaniens. On peut attribuer la partie supérieure des grés à l'étage Albien, mais l'épaisseur considérable de la formation gréseuse et l'absence à la base d'un substratum plus récent que le primaire amène à penser que cette accumulation d'origine continentale, comprend tout ou partie des subdivisions stratigraphiques allant du sommet des formations marines carbonifères à la base de la transgression Cénomaniens. Il ne s'agit plus alors uniquement de grés albiens, mais de l'ensemble du Continental Intercalaire.

## **F. Cénomaniens**

## *Géographie et géologie*

---

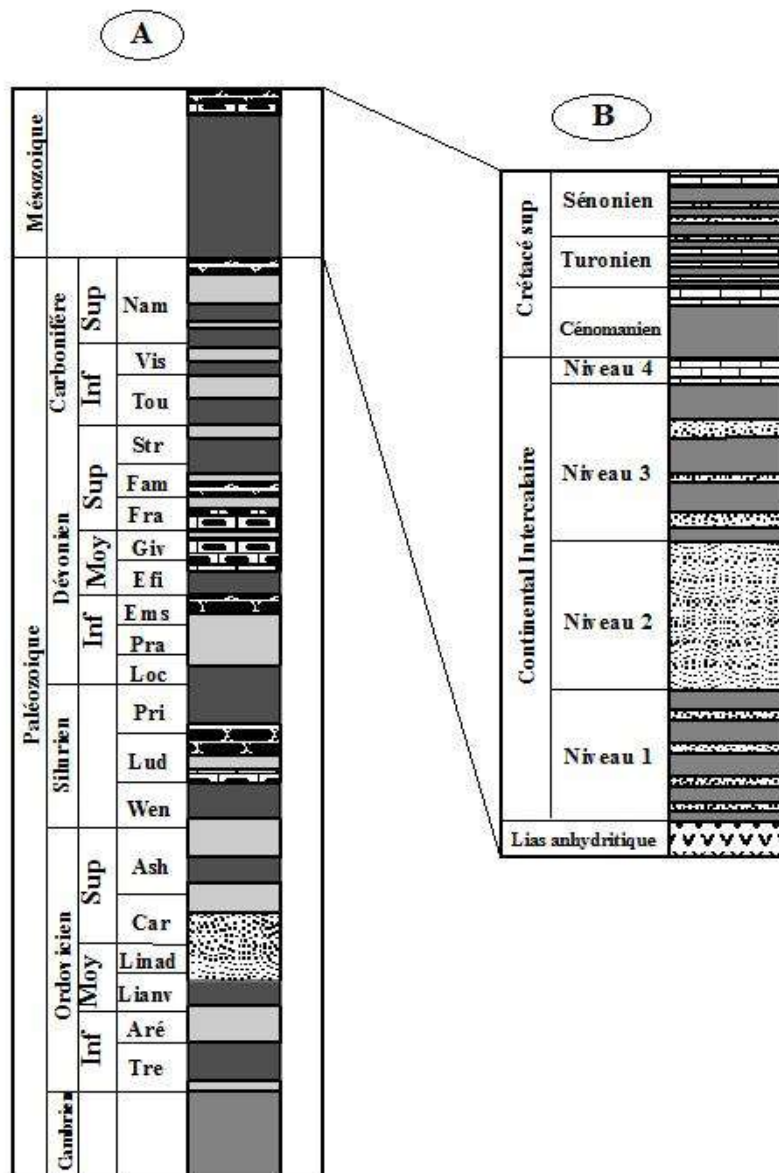
Représenté par le Cénomaniens inférieur et supérieur dont la base est composée de Vraconien argileux, avec de petits bancs de sable et de grès blancs (épaisseur 60 m) (Figure 7).

### **G. Quaternaire**

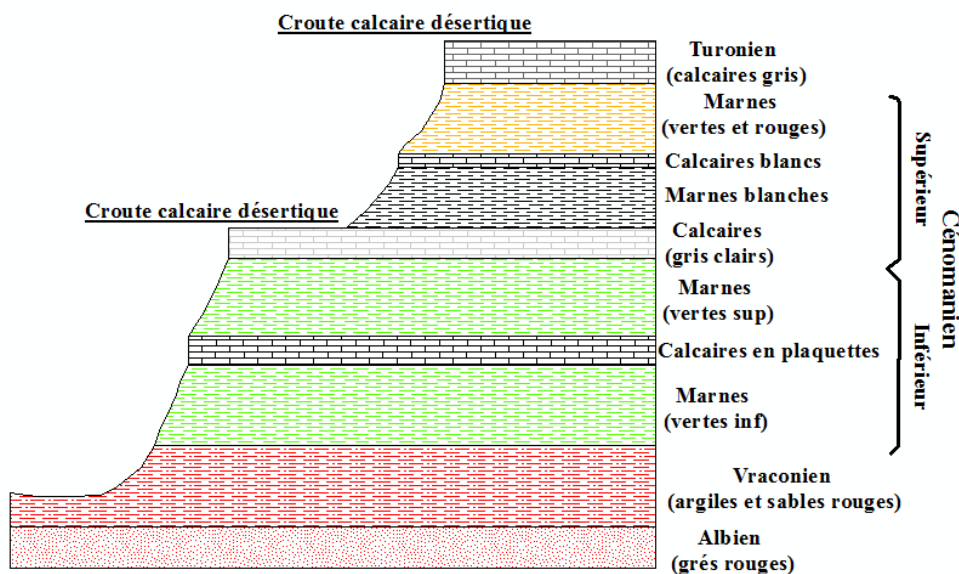
Représenté par trois types de dépôt :

- Une croute calcaire désertique qui se rencontre surtout sur les trois plateaux calcaires à El Menia ;
- Des alluvions des oueds composés presque exclusivement de sable avec des niveaux argileux intercalées et développés surtout dans la vallée de oued Seggueur ;
- Les dunes de l'Erg Occidental recouvrent totalement vers l'Ouest, sur de très grandes distances le substratum crétacé ;
- Le quaternaire renferme à El Menia, une importante nappe phréatique.





**Figure 6** Colonne lithostratigraphique de la zone d'étude (Sonatrach et Schlumberger, 2007)



**Figure 7 Coupe schématique des terrains de la zone d'étude**

## 6. Conclusion

L'oasis d'El Menia est le point le plus central de l'Algérie ; elle comporte l'ensemble d'El Menia et Hassi El Gara. La surface totale est 49000 km<sup>2</sup>, avec une densité de 1.2 hab/km<sup>2</sup>. L'activité principale dans cette oasis est l'agriculture dont les principales cultures sont les dattiers, maraîchères et arboricultures.

Les sols de cette oasis sont caractérisés par des profondeurs variables d'Est en Ouest et sans différence du Nord vers le Sud, cette variabilité résulte de l'irrégularité de la roche mère. L'allure générale des terrains est caractérisée par une faible pente (1 à 2%) du nord (amont) vers le sud (aval). L'analyse de l'étude géologique de la zone d'étude menée par Fabre (2005), montre que le paléozoïque a subi des variations climatiques et tectoniques. Le secteur d'étude est caractérisé par la présence des terrains sont d'âge secondaire répartie par un terrain ancien d'âge Cénomaniens inférieur à l'Ouest, de nature lithologique argileuse, détermine une phase humide masquée par le Grand Erg Occidental, les terrains de Cénomaniens moyen et supérieur se trouvent au tour de la zone d'étude surtout à l'Est d'un faciès calcaire, le Turonien commence l'affleurement à 19 km au sud d'El Menia. La série stratigraphique de la région fournis par les forages pétroliers montre que le Quaternaire est composé d'une croute calcaire, des alluvions et des dunes de l'Erg Occidental.

***Chapitre 02 :***  
***Hydroclimatologie***

## 1. Introduction

Pour connaître les mécanismes d'alimentation et de circulation des eaux de surface et souterraines, une étude détaillée des données climatiques (précipitations et températures) est nécessaires. L'Algérie est un pays très connu par sa diversité bio-écologique vu les régimes climatiques qu'il possède avec un climat méditerranéen au Nord, un climat semi-aride aux hauts plateaux et enfin un climat aride au grand Sahara (MADP, 2013). Dans ce chapitre, nous allons présenter le contexte climatique de cette région, par une étude basée sur une synthèse des données climatiques disponibles entre 1995 et 2017 et d'autres parts entre 2008 et 2017. Ces données ont été fournies par l'office national de la météorologie (ONM, 2015). La station de mesure des données climatiques est située à l'aéroport d'El Menia.

**Tableau 03 Coordonnées de la station météorologique dans la région**

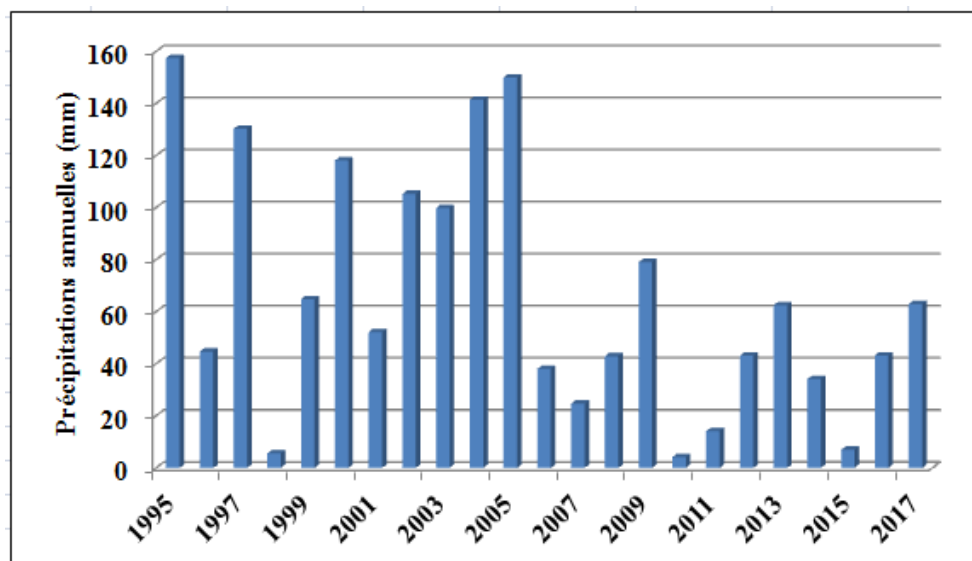
Station	Coordonnées		
	Latitude	Longitude	Altitude
El Menia	30.57°N	2.87°N	397 m

## 2. Précipitations

Pour la plus grande partie du monde, les précipitations représentent la source principale d'eau pour la production agricole (Sadaoui, 2015). L'analyse des séries pluviométriques de cette région présente un moyen efficace pour étudier le fonctionnement et la répartition des écosystèmes (Ramade, 1984) ainsi que l'impact du changement climatique sur les mécanismes de l'écoulement des eaux des nappes.

### 2.1. Variations interannuelles des précipitations

L'analyse de l'histogramme des variations annuelles des précipitations effectuée sur une période de vingt trois ans (1995-2017) montre clairement que les années 1997 et 2004 sont les plus arrosées avec une précipitation de 130.31 et 141.48 mm, les deux années 1998 et 2010 sont les plus sèches avec 5.61 et 4.2 mm. Notons que la moyenne interannuelle de précipitation est 66.34 mm (Figure 8).



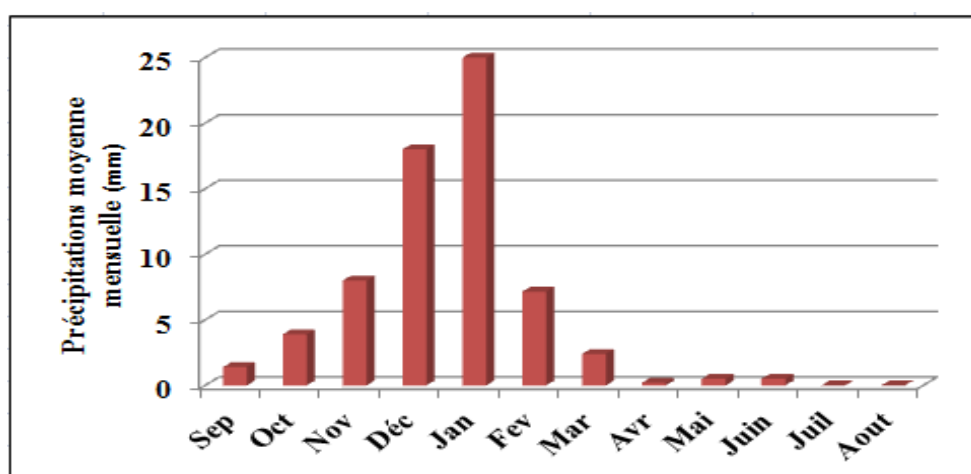
**Figure 8 Évolution des précipitations annuelles d'El Menia**

## 2.2. Variations moyennes mensuelles des précipitations

L'histogramme des variations des moyennes mensuelles des précipitations, sur une période de vingt trois ans (1995-2017) montre que le mois de Janvier est le plus pluvieux, avec une précipitation de 25 mm tandis que le mois de Juillet est le plus sec, avec 0.04 mm (Figure 9). Les observations faites sur la période 1995-2017 sont représentées sur le tableau suivant :

**Tableau 04 Précipitations moyennes mensuelles à la station d'El Menia (1995-2017)**

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
P (mm)	1.4	3.9	8	18	24.15	7.15	2.4	0.2	0.5	0.5	0.04	0.06



**Figure 9 Évolution des précipitations mensuelles d'El Menia (1995-2017)**

## 3. Températures

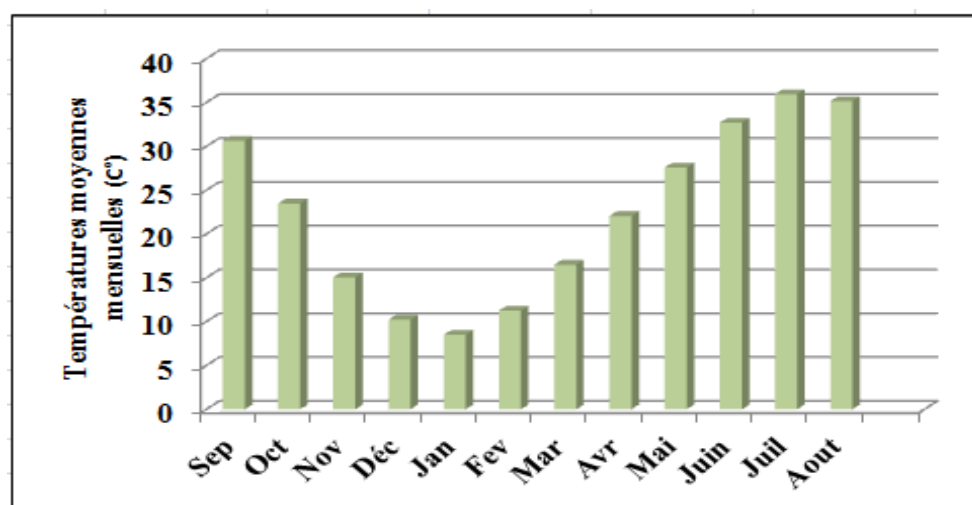
Vue son rôle prédominant dans le rayonnement et le bilan hydrique, La température représente un facteur écologique très important dans l'étude et la caractérisation des climats (Farah, 2014). Sa variation influe sur la transformation des eaux en vapeur, que ce soit à la surface ou dans le sous-sol. De ce fait, elle influe sur le degré d'évapotranspiration et par conséquent elle agit sur le taux de salinité des eaux. Toutefois, la température a un rôle important dans la variation des composantes du bilan hydrologique.

### 3.1. Variations moyennes mensuelles des températures

La région d'étude est caractérisée par un régime thermique chaud en été et doux en hiver, l'observation de l'histogramme des températures moyennes annuelles (Figure 10) montre que Les variations de température moyenne mensuelle montre une grande amplitude thermique entre l'hiver et l'été, les mois de juillet et août sont les mois les plus chauds en général avec des moyennes mensuelles de l'ordre de 35.96 et 35.17 °C et le mois le plus froid est janvier avec une moyenne de température de 8.51°C. Les observations faites sur la période 1995-2017 sont représentées sur le tableau suivant :

**Tableau 05 Températures moyennes mensuelles à la station d'El Menia (1995-2017)**

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
T (°C)	30.65	23.49	15.07	10.22	8.51	11.26	16.5	22.06	27.6	32.72	35.96	35.17



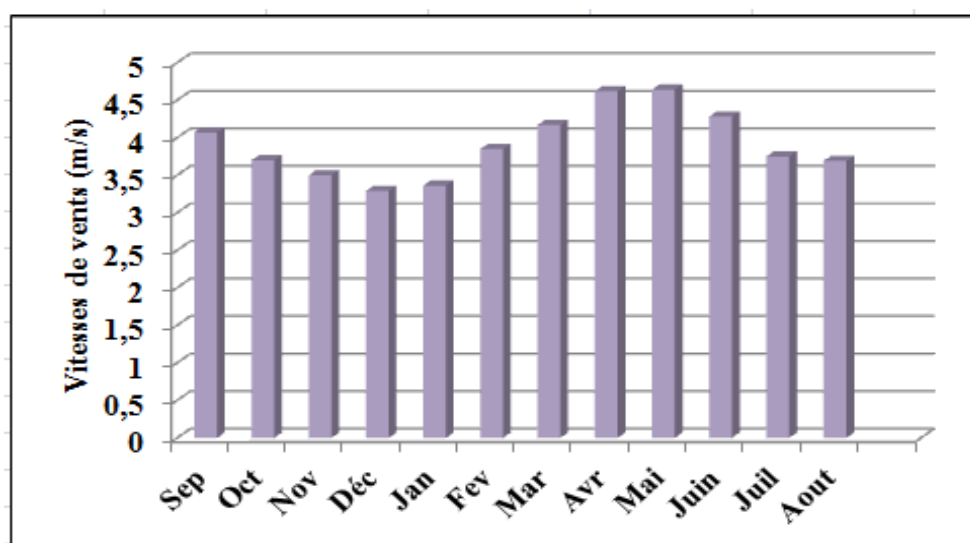
**Figure 10 Histogramme des températures moyennes mensuelles de la zone d'étude (1995-2017)**

## 4. Vent

Le vent est le facteur principal de la topographie désertique. Pendant certaines périodes de l'année, en général en mars et avril, on assiste au Sahara à des véritables tempêtes de sable. Des masses de sable se déplacent avec violence atteignant plusieurs centaines de mètres de haut. Ces phénomènes peuvent durer d'un à trois jours et plus. Généralement c'est au printemps que les vents sont les plus forts, ils sont chargés de sables éoliens donnant au ciel une teinte jaune. L'analyse de l'histogramme des moyennes mensuelles des vents (2008-2017) (Figure 11) dans la zone d'étude montre que la vitesse moyenne enregistrée est de 3.91 m/s avec un maximum de 4.64 m/s enregistré au mois de Mai.

**Tableau 06 Vitesses moyenne mensuelles des vents en (m/s) à la station d'El Menia (2008-2017)**

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
V (m/s)	4.07	3.7	3.5	3.29	3.36	3.85	4.17	4.62	4.64	4.28	3.75	3.69



**Figure 11 Histogramme de la vitesse moyenne mensuelle de vent de la zone d'étude (2008-2017)**

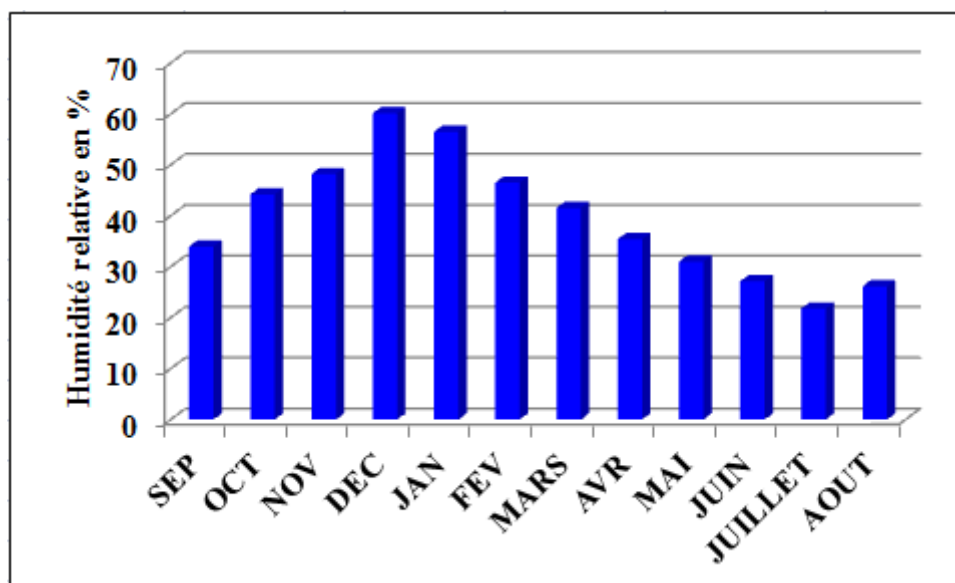
## 5. Humidité

L'humidité relative est définie comme étant le rapport entre la pression partielle de la vapeur d'eau dans l'air humide et la pression de saturation à la même température (Jannot, 2005). Elle est exprimée en pourcentage. L'histogramme de l'humidité relative (Figure 12) montre que la plus faible valeur de l'humidité dans cette région est enregistrée pendant le mois de juillet 21.8 %, alors que la valeur la plus forte est enregistrée pendant le mois de décembre avec une valeur de 60.15 % (Tableau 7) :

# Hydroclimatologie

**Tableau 07 Humidité relative moyenne mensuelle en % à la station d'El Menia (2008–2017)**

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
<b>Humidité %</b>	33.97	44.22	48.2	60.15	56.5	46.5	41.55	35.4	31	27.15	21.8	26.15



**Figure 12 Histogramme de l'humidité moyenne mensuelle dans la zone d'étude (2008-2017)**

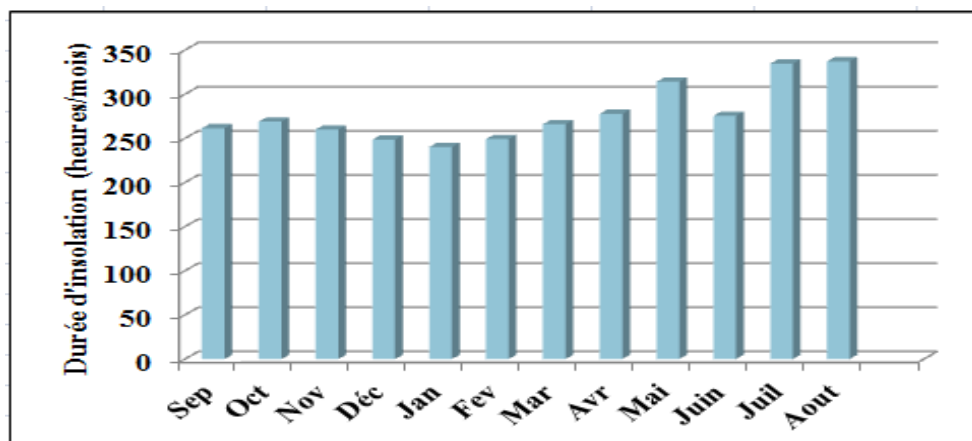
## 6. Durée d'insolation

L'insolation est la période durant laquelle le soleil brille le sol, l'augmentation de la radiation solaire provoque l'augmentation de l'évapotranspiration où une partie des radiations solaire absorbées par le sol et l'autre réfléchir, ce dernier dépend de la nature de sol et le type de la région environnante. La région d'El Menia reçoit une forte quantité de lumière solaire, le maximum est atteint au mois d'Aout avec une durée d'insolation de 337.21 heures et le minimum est enregistré au mois de Janvier avec une durée de 240.2 heures (Tableau 8 et Figure 13).

**Tableau 08 Moyennes mensuelles de la durée d'insolation à la station d'El Menia (2008 – 2017)**

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
<b>Insolation (heures/mois)</b>	261.54	268.96	260	248.53	240.2	249.3	266.1	277.9	314.2	275.5	334.75	337.21





**Figure 13** Histogramme de la durée d'insolation moyenne mensuelle de la zone d'étude (2008-2017)

## 7. Évapotranspiration potentielle (ETP)

L'évaporation est la transformation de l'eau liquide existant dans le sol en vapeur d'eau, elle dépend essentiellement de la température très élevée et des vents fréquents. D'après l'histogramme de variation de l'évapotranspiration (Figure 14) on observe que le mois de Juillet a la valeur maximale d'évaporation avec 412.9 mm, et le mois de Décembre représente la valeur minimale avec 107.72 mm (Tableau 9).

**Tableau 09** Moyennes mensuelles de l'évapotranspiration à la station d'El Menia (2008 – 2017)

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
<b>ETP (mm)</b>	317.89	235.75	151.33	107.72	119.09	152.59	227.87	288.55.	340.55	354.66	412.9.	386.06

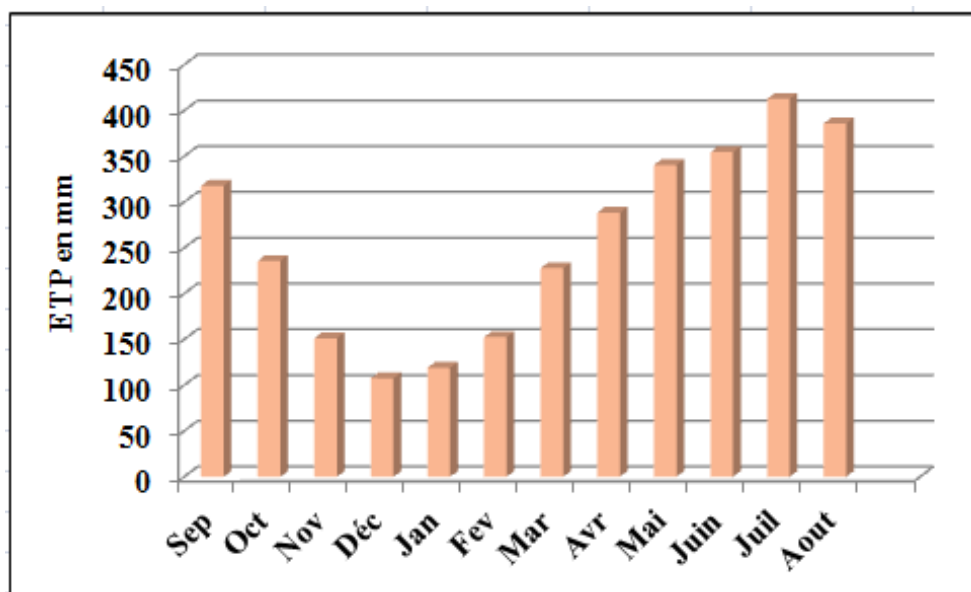


Figure 14 Évolution de l'évapotranspiration mensuelle d'El Menia (1995-2017)

## 8. Diagramme ombrothermique de Gaussen

Selon Gaussen et Bagnouls (1954), une saison sèche est marquée par une température supérieure que la précipitation ( $P < 2T$ ). Cet indice tient compte des moyennes mensuelles des précipitations ( $P$  en mm) et de la température ( $T$  en °C) et donne une expression relative à la sécheresse estivale en durée et en intensité. A partir de cette définition, on a une saison sèche aux cours de l'année sauf au mois de janvier qui présente une saison humide liée à des faibles valeurs de température, et de précipitation moyennement fortes (Figure 15).

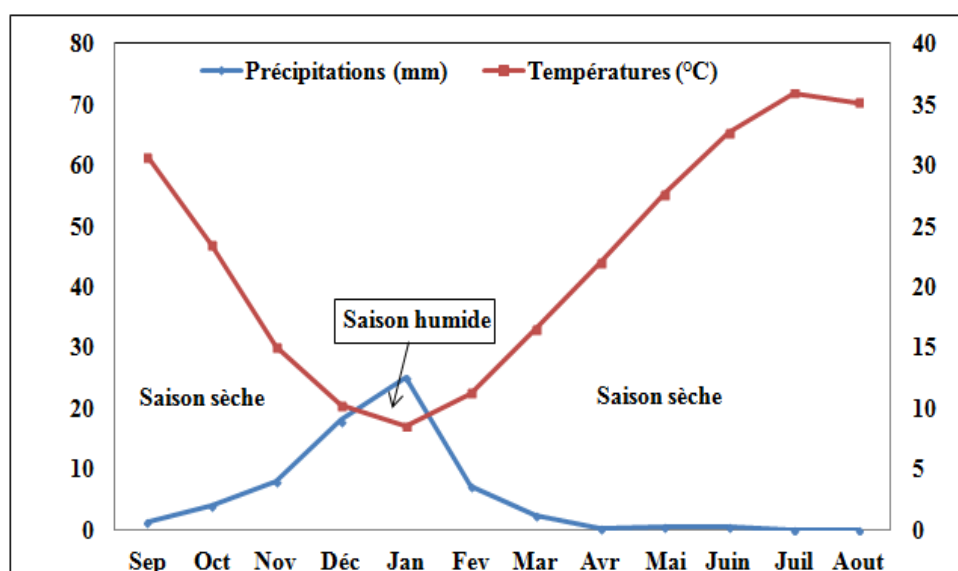


Figure 15 Diagramme pluviométrique à la station d'El Menia

## 9. Indice d'aridité de De Martonne

Cet indice est calculé en fonction des températures et des précipitations; L'aridité augmente quand la valeur de l'indice diminue. L'indice de De Martonne (1926) a défini l'aridité du climat à l'échelle annuelle par l'équation :

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

Avec :

**I** : indice de De Martonne ;

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

**T** : température moyenne annuelle en °C.

Application: P = 66.34 mm, T = 22.43 °C, I = 66.34/ (22.43+10)

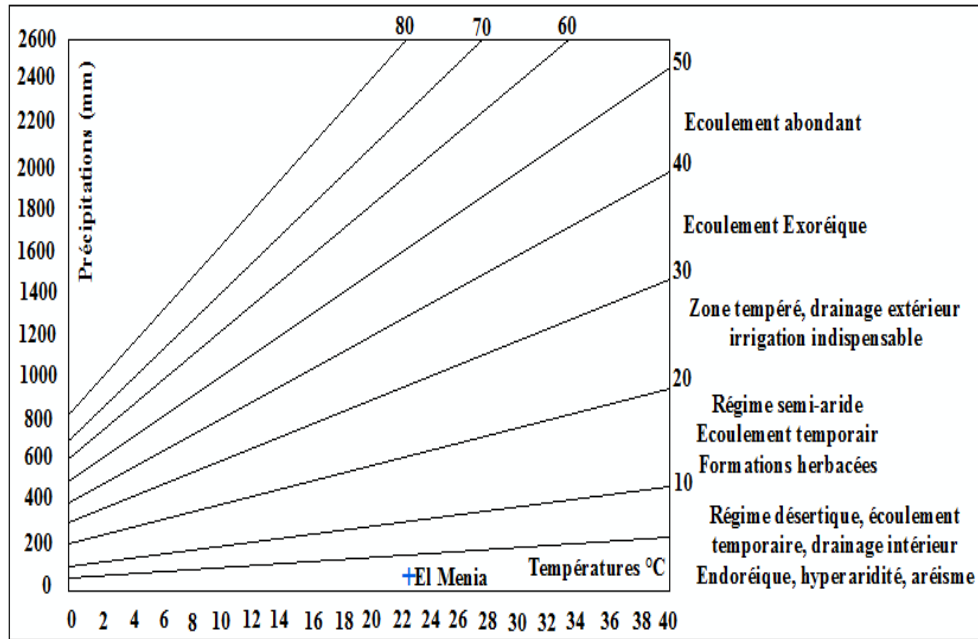
I = 2.04

Selon les valeurs de (I) l'aridité augmente quand la valeur de l'indice diminue. Au niveau mondial, De Martonne (1962) a proposé différents types de macroclimat et a établi la classification suivante :

**Tableau 10 Classification climatique de l'indice de De Martonne (1926)**

Valeur de l'indice de De Martonne	Type de climat
I < 5	Climat hyperaride
5 < I > 7.5	Climat désertique
7.5 < I > 10	Climat steppique
10 < I > 20	Climat semi-aride
20 < I > 30	Climat tempéré

Selon l'indice de De Martonne, El Menia a un climat Hyperaride (I = 2.04), cette valeur traduit le taux d'aridité qui est à l'extrême, connu au zone très sec au monde, dans le grand Sahara africain (Figure 16).



**Figure 16 Abaque de l'indice d'aridité de De Martonne (1926)**

## 10. Climagramme de Louis Emberger

Pour déterminer les types de climat de la zone méditerranéenne, Emberger (1955) a proposé la détermination d'un quotient pluviométrique Q. Ce quotient dépend de la précipitation moyenne annuelle et les moyennes des températures minima et maxima, respectivement des mois les plus froids et les plus chauds. On peut le calculé par la formule suivante :

$$Q = \frac{2000 \cdot P}{(M - m)(M + m)} \dots \dots \dots (2)$$

Avec :

Q : facteur des précipitations d'Emberger ;

P : Précipitation moyenne annuelle (mm) ;

M : moyenne des maxima du mois le plus chaud (degrés/Kelvin);

m : moyenne des minima du mois le plus froid (degrés/Kelvin).

Le calcul de facteur d'Emberger dans la zone d'étude donne les résultats suivants :

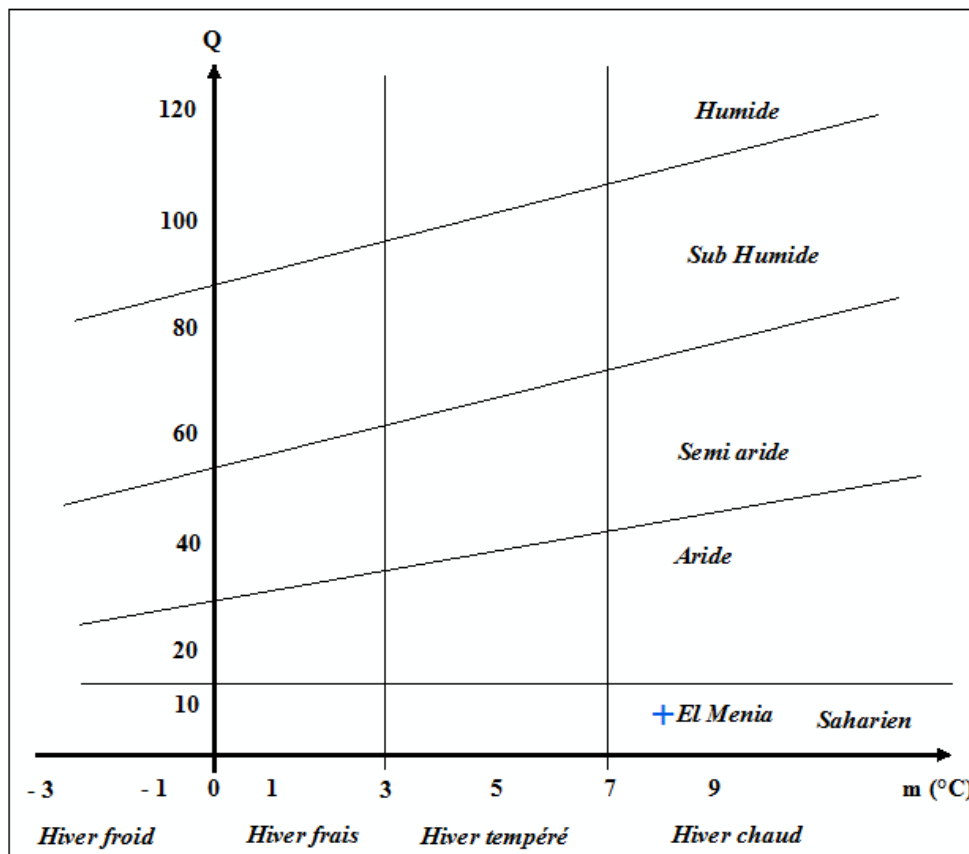
P = 66.34 mm ;

M = 308.15 °K ;

m = 281.15 °K.

Q = 8.33 mm/°K

Selon la position sur le Diagramme d'Emberger (Figure 17) la zone d'étude est caractérisée par un climat saharien avec un hiver froid.



**Figure 17 Climagramme d'Emberger de la région d'El Menia**

## 11. Bilan hydrique

Le bilan hydrique est établi pour un lieu et une période donnés par comparaison entre les apports et les pertes en eau dans ce lieu et pour cette période. Il tient aussi compte de la constitution de réserves et des prélèvements ultérieurs sur ces réserves. Les apports d'eau sont effectués par les précipitations. Les pertes sont essentiellement dues à la combinaison de l'évaporation et la transpiration des plantes, que l'on désigne sous le terme d'évapotranspiration. Les variables qui composent un bilan hydrique se présentent comme suites :

- Les pluies efficaces  $P_e$  ;
- La fraction de la réserve facilement utilisable du sol RFU ;
- Les besoins en eau maximale pour chaque culture ETM ;
- La contribution effective de l'eau du sous-sol apporté à la zone racinaire des plantes par la nappe phréatique (Dorenbos et Pruit, 1976).

Le bilan est calculé suivant la formule :

$$P = ETR + R + I + Wa \dots \dots \dots (3)$$

Avec:

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

**ETR** : Évapotranspiration réelle (mm) ;

**R** : Ruissellement (mm) ;

**I** : Infiltration (mm) ;

**Wa** : Variation des réserves (négligeables).

## 11.1. Évapotranspiration

ET est la perte totale d'une lame d'eau sous forme de vapeur, d'une culture par évaporation et transpiration pendant un laps de temps donnés. Plusieurs expressions empiriques, introduisant les paramètres climatiques, ont été établies pour l'évaluation de l'évapotranspiration réelle (ETR) et/ou potentielle (ETP).

### 11.1.1. Évapotranspiration potentielle (ETP)

L'ETP est la quantité d'eau qui peut passer dans l'atmosphère en fonction du seul état de celle-ci, en supposant que la quantité d'eau disponible ne soit pas un facteur limitant. C'est un paramètre difficile à évaluer directement car, c'est délicat de mesurer directement le flux de vapeur d'eau dans l'atmosphère. Théoriquement, on peut définir l'ETP comme étant la quantité d'eau évaporable par une surface d'eau libre.

#### 11.1.1.1. Calcul de l'ETP

L'ETP peut être calculé par plusieurs formules (Thornthwaite, Turc, Primault,... etc), dans notre cas, La formule utilisée est celle de Thornthwaite (1948) vue que les résultats obtenus sont les plus cohérents dans les zones méditerranéennes (Rkiouak, 1996) :

$$ETP = 16(10T/I)^a.K \dots\dots\dots(4)$$

Avec :

ETP : évapotranspiration potentielle en (mm) ;

T : température moyenne du mois en (°C) ;

$I = \sum i$  avec  $i = (T/5)^{1.514}$   $I = 50.11$

I : indice thermique annuelle ;

i : indice thermique mensuelle ;

a : l'exposant climatique ;  $a = (1,6 \times I / 100) + 0.5$ ,  $a = 1.3$

K : un coefficient d'ajustement mensuel.

L'évapotranspiration potentielle moyenne annuelle obtenue est de 1239.63 mm. La valeur maximale est observée au mois de juillet (269.58 mm) et la valeur minimale est enregistrée au mois de janvier (5.52 mm).

## 11.1.2. Évapotranspiration réelle (ETR)

Par définition l'ETR est la quantité d'eau évaporée effectivement par le sol et les surfaces d'eau libres ou transpirée par les végétaux. Elle est calculée à l'aide de la formule du Turc (1954).

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}} \dots \dots \dots (5)$$

Avec :

ETR : Évapotranspiration réelle en (mm) ;

L = 300 + 25 T + 0.05 T<sup>3</sup> ;

T : Température moyenne annuelle de l'air en (°C) ;

P : Précipitation moyenne annuelle en (mm).

Après application sur notre zone d'étude, ETP = 70.57 mm.

## 11.2. Calcul du bilan hydrologique selon C.W. Thornthwaite

Cette méthode est basée sur la notion de réserve en eau facilement utilisable (notée RFU). On admet que le sol est capable de stocker une certaine quantité d'eau (la RFU); cette eau peut être reprise pour l'évaporation par l'intermédiaire des plantes. On établit ainsi un bilan à l'échelle mensuelle, à partir de la pluie du mois P, de l'ETP et de la RFU.

Le calcul du bilan est basé sur deux cas :

- Premier cas : si P > ETP, alors ETR = ETP

Il reste un excédent (P - ETP) qui est affecté en premier lieu à la RFU, et si la RFU est complète, à l'écoulement Q.

- Deuxième cas : si P < ETP :

$$P_i + RFU_{i-1} > ETP \rightarrow ETR = ETP$$

$$P_i + RFU_{i-1} < ETP \rightarrow ETR = P_i + RFU_{i-1}$$

Il est courant, dans l'étude des bilans hydriques de comparer les précipitations P et l'évapotranspiration potentielle ETP, ce qui permet de distinguer des situations différentes en fonction de l'écart qui sont directement significatifs pour un lieu ou une période donnée :

- Si P < ETP, l'évapotranspiration réelle sera égale à la précipitation P ; il y aura prélèvement sur les réserves, absence d'écoulement ; la période sera dite déficitaire.

# *Hydroclimatologie*

- Si  $P > ETP$ , l'évapotranspiration réelle sera égale à l'ETP, il y aura écoulement et constitution de réserves ; la période sera dite excédentaire.

Ainsi pour le calcul de déficit agricole (Da) on utilise la formule :

$$Da = ETP_i - (P_i + RFU_i)$$

L'excédent (Ex) représente la partie de ruissellement et d'infiltration et déterminé par la relation :

$$Ex = P - ETR$$

L'application de la méthode de Thornthwaite pour le calcul du bilan a donné les résultats qui sont consignés dans le tableau 11 :

**Tableau 11 Bilan hydrique à la station d'El Menia (1995/ 2017) par la méthode de Thornthwait**

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juill	Aout	Total
<b>P</b> (mm)	1.4	3.9	8	18	24.15	7.15	2.4	0.2	0.5	0.5	0.04	0.06	66.34
<b>T</b> (°C)	30.65	23.49	15.07	10.22	8.51	11.26	16.5	22.06	27.6	32.72	35.96	35.17	
<b>ETP</b> (mm)	155.22	75.97	22.76	8.53	5.52	10.74	33.03	71.56	136.85	207.6	269.58	242.27	1239.63
<b>ETR</b> (mm)	1.4	3.9	8	8.53	5.52	16.62	2.4	0.2	0.5	0.5	0.04	0.06	47.67
<b>RFU</b> (mm)	0	0	0	9.47	28.1	0	0	0	0	0	0	0	
<b>DA</b> (mm)	153.82	72.07	14.76	0	0	0	30.63	71.36	136.35	207.1	269.1	242.21	1197.4
<b>EX</b> (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

### 11.2.2. Interprétation du bilan hydrique

La zone d'étude reçoit des précipitations moyennes annuelles égales à 66.34 mm, avec une température moyenne annuelle de 22.43 °C.

L'évapotranspiration potentielle (ETP) atteint son maximum au mois de juillet avec 269.58 mm, et son minimum au mois de Janvier (5.52 mm), le total de l'ETP est de 1239.63 mm.

L'évapotranspiration réelle (ETR) totale est de l'ordre de 47.67 mm, hors ce paramètre égale 70.57 mm par la formule de Turc, la moyenne est donc égale à 59.12 mm.



# Hydroclimatologie

---

Le déficit agricole est présent pendant neufs mois de l'année, elle atteindra son maximum au mois de juillet 269.1 mm.

L'excédent est nul pendant toute l'année alors que la réserve facilement utilisable est présente aux mois de Décembre et Janvier avec des faibles quantités.

### 11.3. Ruissellement

Le ruissellement peut être estimé par la formule Tixeront et Berkallof (1958):

$$R = \frac{P^3}{3 \cdot ETP^2} \dots \dots \dots (6)$$

Avec :

R : Ruissellement moyen annuelle en mm/an ;

P : Précipitations moyennes annuelles en mm/an ;

ETP : Évapotranspiration potentielle moyennes annuelle en mm/an.

Application numérique : P = 66.34 mm, ETP = 1239.63 mm/an, R = 0.063 mm/an soit 0.1% des précipitations moyennes annuelles

### 11.4. Infiltration efficace Ie

L'infiltration efficace est calculée à partir de la formule suivante :

$$P = ETR + R + Ie \longrightarrow Ie = P - (ETR + R) \dots \dots \dots (7)$$

Avec :

R : Ruissellement moyen annuelle en mm/an ;

P : Précipitations moyennes annuelles en mm/an ;

ETR : Évapotranspiration réelle moyennes annuelle en mm/an.

Application numérique : P = 66.34 mm/an, ETR = 59.12 mm/an, R = 0.063 mm/an

Ie = 7.15 mm/an.

L'infiltration efficace Ie est de l'ordre de 7.15 mm/an soit 10.78 % des précipitations moyennes annuelles.

## 12. Conclusion

La région d'El Menia est caractérisée par un climat saharien, avec un hiver froid, et un été chaud et sec, influencé par sa position géographique et son relief. La moyenne annuelle des précipitations est 66.34 mm, la température moyenne annuelle est égale à 22.43 °C. Le calcul du bilan hydrique nous permet de ressortir les résultats présentés dans le tableau 12 :

**Tableau 12 Résultats du bilan hydrique**

<b>Paramètres</b>	<b>Valeurs</b>
P : Précipitations moyennes annuelles	66.34 mm/an
T : Température moyenne annuelle	22.43 °C
ETP : Évapotranspiration potentielle	1239.63 mm/an
ETR : Évapotranspiration réelle	59.12 mm/an
DA : Déficit agricole	1197.4 mm/an
EXC : Excédent	0 mm/an
R : Ruissellement	0.063 mm/an
Ie : Infiltration efficace	7.15 mm/an

# ***Chapitre 03 : Hydrogéologie***

## 1. Introduction

Les conditions climatiques arides et semi-arides qui règnent dans la plus grande partie de la région de l'Afrique du Nord et du Sahel font durer le déficit hydrique du sol pendant plusieurs mois de l'année. L'Algérie fait partie de cette unité géographique caractérisée par la présence des ressources en eau souterraine considérable riche dans sa partie saharienne. La zone d'étude fait partie de ce contexte saharien caractérisée par la présence de deux nappes d'eau souterraines, l'une phréatique couvre l'ensemble de l'oasis, et l'autre captive surnommé la nappe du Continental Intercalaire (CI) d'une grande extension régionale et qui compose le système SASS avec la nappe du Complexe Terminal (CT) couvrant ainsi une surface de plus de 1 millions de km<sup>2</sup> répartie entre l'Algérie, la Tunisie et la Lybie. Dans ce chapitre, une synthèse des caractéristiques hydrogéologiques de ces nappes d'eau sera présentée.

## 2. Hydrogéologie régionale

Le Sahara algérien est subdivisée en quatre unités hydrogéologiques qui sont :

- L'unité du Chott Melrhir ;
- L'unité de Saoura-Tindouf ;
- L'unité du Sahara septentrional ;
- L'unité du Hoggar-Tassili.

La région d'étude fait partie de l'unité hydrogéologique du Sahara septentrional (Figure 18).

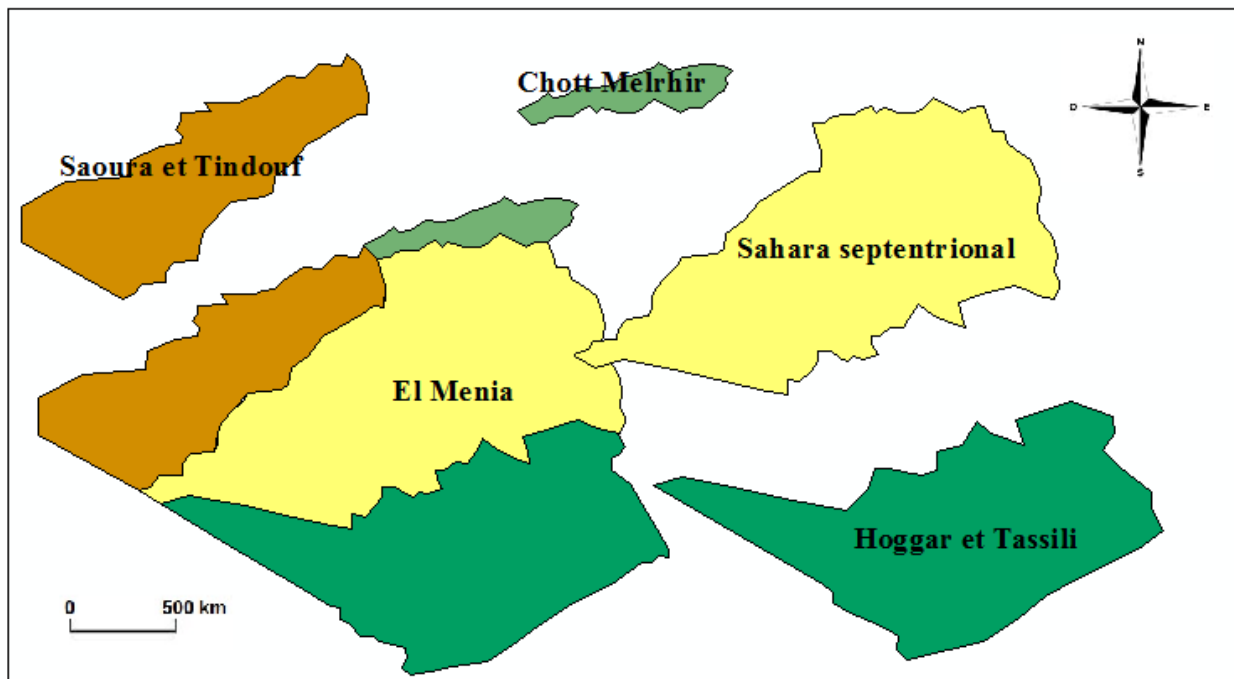


Figure 18 Unités hydrogéologiques du bassin saharien

### 3. Système aquifère du Sahara septentrional

La prospection pétrolière au XX<sup>ème</sup> siècle est à l'origine de la découverte d'un gigantesque appareil hydraulique au Sahara qui est le système aquifère du Sahara septentrional (SASS), ce système est partagé entre trois pays : l'Algérie, la Tunisie et la Libye. Il couvre une étendue de plus d'un million de km<sup>2</sup>, dont 68 % de sa surface appartient à l'Algérie, 24 % pour la Libye, et 08 % pour la Tunisie (SASS, 2003). Il est composé par des dépôts continentaux dans lesquels on distingue deux principales formations aquifères : celle du « Continental Intercalaire, ou CI » et celle du « Complexe Terminal, ou CT ». Le gisement géologique est constitué de couches datant de l'ère secondaire et tertiaire : Jurassique et Crétacé inférieur pour le Continental Intercalaire, et du Crétacé supérieur au Mio- Pliocène pour le Complexe Terminal. Il est limitée au Nord-Ouest par les piémonts du versant Sud de l'Atlas saharien, au Nord par l'accident sud atlasique au Nord des Chotts, relayé vers le golf de Gabès par la faille d'El Hamma - Médenine. A l'Ouest, la limite se situe au niveau de l'Oued Saoura-Reggane, au Sud par un alignement Est-Ouest, de plateaux (Hammadas) du Tinrhert et du Tademaït. Enfin, la limite Nord-Est se situe un peu après les reliefs du Dahart et celle du Sud-Est parcourt la région de Syrte et va jusqu'à la ville de Hun en Libye (Castany, 1982) (Figure 19). Ce bassin, constitue une importante dépression topographique, laquelle est sous-tendue par une cuvette structurale en forme de synclinal dissymétrique. La série sédimentaire est marquée, au centre de la fosse, par d'importants accidents tectoniques subverticaux. Les pendages des bancs sont en général faibles, à l'exception de la zone bordière située au nord-est du bassin (Busson, 1970 ; Fabre, 1976 ; SASS, 2003). Celui-ci comporte, à sa base, des formations paléozoïques marines surmontées en discordance par les formations continentales du Secondaire et du Tertiaire épaisses de plusieurs milliers de mètres. Le Quaternaire y succède. Il est constitué essentiellement de sables dunaires dont l'épaisseur peut atteindre quelques centaines de mètres. Seule la série supérieure présente un intérêt hydrogéologique (Bouselsal, 2016).

Le nombre de points d'eau totale qui captent ces deux nappes est de 8 800 forages dont :

- 3500 captant la nappe du CI;
- 5300 captent la nappe du CT.

Soit par pays :

- L'Algérie : 6500 forages ;
- La Tunisie : 1200 forages ;
- La Libye : 1100 forages.

# Hydrogéologie

Le volume total de ce système aquifère est évalué à 60.000 milliards de m<sup>3</sup>, Il correspond à un débit fictif de 100 m<sup>3</sup>/s pendant 2000 ans. Ceci peut alimenter une population de 44 millions durant 2000 ans avec un débit de 200 l/j/h.

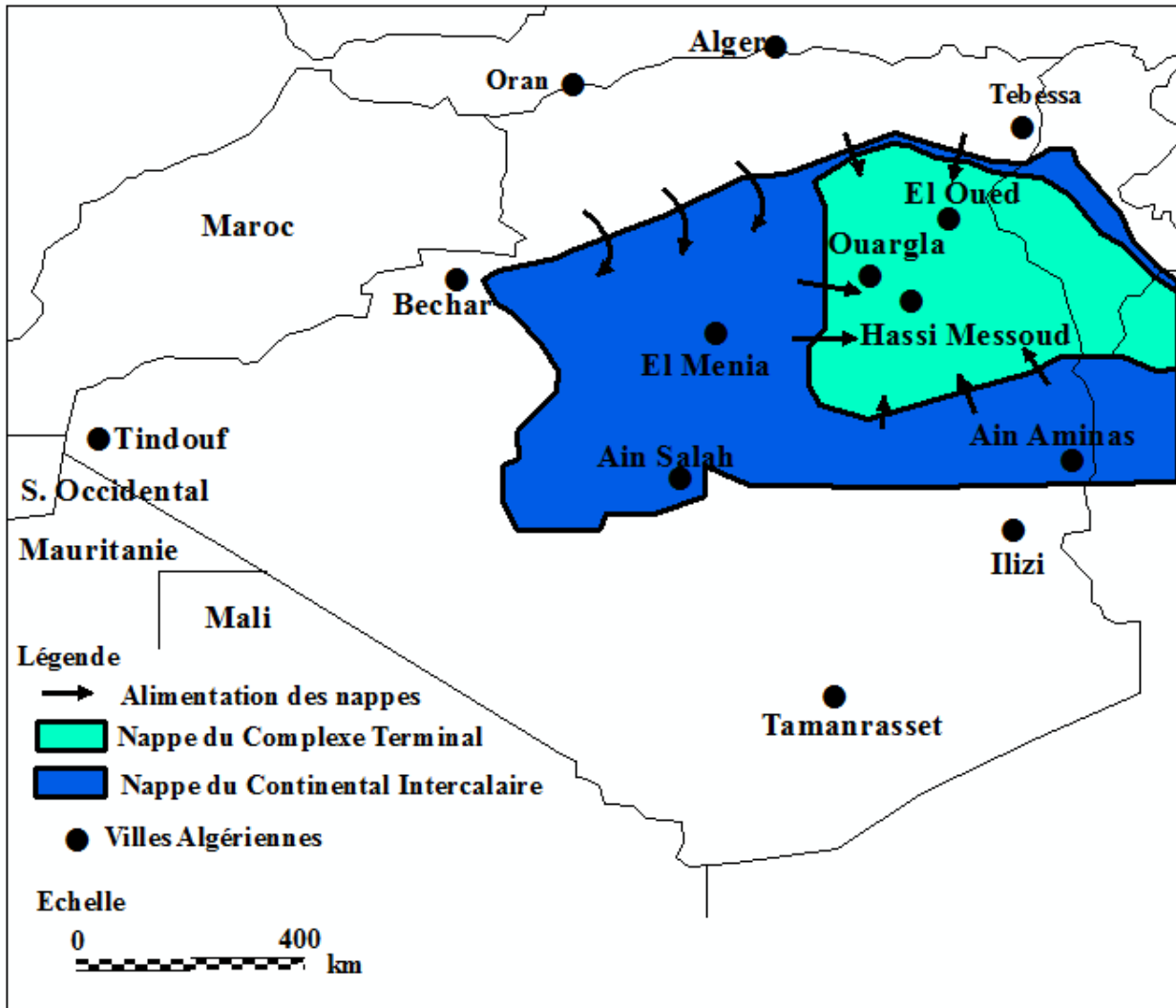


Figure 19 Carte de la limite du système aquifère SASS (UNESCO/ERSS, 1972)

## 3.1. Complexe Terminal (CT)

Le système aquifère du CT s'étend en Algérie sur un vaste territoire allant de la dorsale du M'Zab à l'Ouest jusqu'à la hamada du Tihert au Sud, couvrant une surface égale à 350.000 km<sup>2</sup> avec une épaisseur moyenne de 220 m. Le CT est formé par un ensemble de couches carbonatées sableuses. Il est essentiellement constitué par le Sénonien supérieur carbonaté (surtout le Maestrichtien), l'Eocène inférieur carbonaté et le Mio-Pliocène sableux. Dans le bassin occidental, la nappe du CT est en relation sous une grande partie de l'Erg Occidental avec celle du CI. Dans le bassin oriental par contre, les deux systèmes aquifères sont séparés.

## **3.1.1. Alimentation – Écoulement**

D'une manière générale l'écoulement des eaux est orienté du Sud vers le Nord (dans le bassin oriental) et converge vers les chotts Merouane et Melghir ainsi que vers l'exutoire souterraine du Golf de Gabes.

Dans le bassin occidental, une partie importante de l'écoulement rejoint les séries sous-jacentes du CI et contribue à l'infero-flux de l'oued Saoura. L'alimentation de la nappe du CT se fait sur les affleurements perméables, par infiltration des eaux de ruissellement apportées par les oueds qui descendent les reliefs des bordures. Un apport non négligeable se fait par l'impluvium propre du Grand Erg Oriental (Guettiche et Benabdasadok, 2005). L'écoulement des eaux souterraines de ces aquifères est dirigé du Sud vers le Nord. Le niveau piézométrique passe de 80 m à El Goug à une quarantaine de mètres en bordure des chotts. Dans la partie nord du bassin la différence de niveau peut atteindre une quarantaine de mètres (Guettiche et Benabdasadok 2005). En 1970, le CT fournissait 6 m<sup>3</sup>/s (UNISCO, 1972) dont les deux tiers proviennent d'eau jaillissante, le reste étant pompé. L'essentiel de l'artésianisme est concentré dans la partie Nord du bassin entre Tinedla et El Meraier, alors que le pompage domine plus au Sud, de Touggourt à Blidet Amor. Cependant à El Goug, la plus méridionale des palmeraies, est encore totalement alimentée par des eaux artésiennes. Le CT a une profondeur qui se situe entre 100 et 500 m (Belksier, 2017).

## **3.1.2. Piézométrie du CT**

Depuis Cornet (1964), plusieurs cartes ont été établies et réactualisées, La plus récente (OSS, 2003), (Figure 20) montre, comme pour la nappe du CI, un écoulement qui se fait vers l'exutoire tunisien, situé dans la région de Tozeur. Dans la partie Nord du Bas Sahara le sens d'écoulement est de l'Ouest (avec un niveau piézométrique d'environ 700 m au niveau de Laghouat) vers l'Est (où le niveau piézométrique atteint les 50 m au niveau de Tozeur). Un autre sens d'écoulement se fait du Sud vers le Nord.

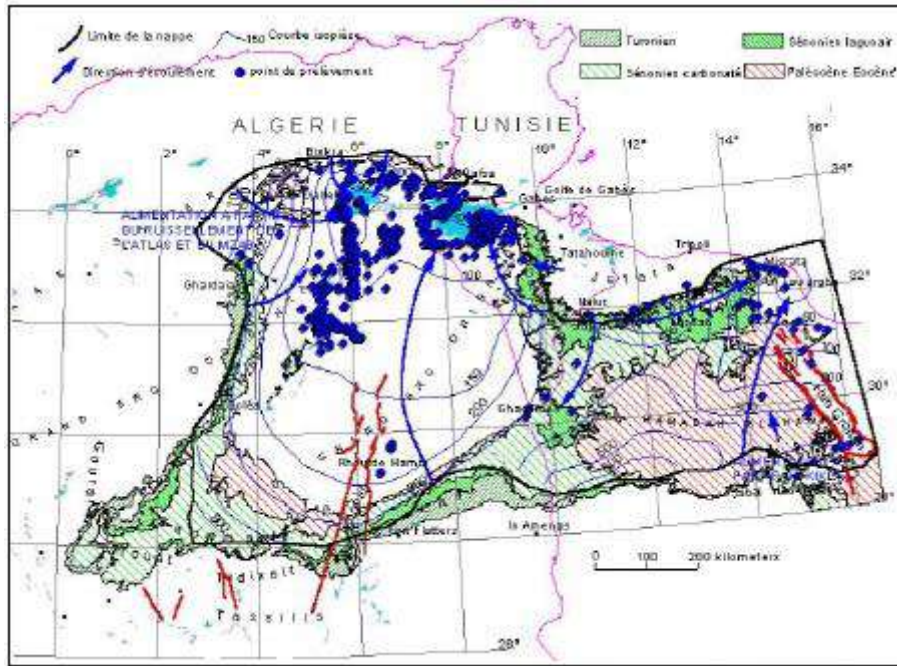


Figure 20 Carte piézométrique de référence du Complexe Terminal (OSS, 2003)

### 3.2. Continental Intercalaire (CI)

En géologie, le Continental Intercalaire désigne les formations continentales qui se sont déposées entre le cycle marin du Paléozoïque clôt par l'orogénèse hercynienne et la transgression marine du Cénomanién. Elle couvre une large période du Trias à l'Albien.

En hydrogéologie la nappe du CI, plus souvent dite nappe Albienne correspond à un niveau plus réduit. Elle est définie par les formations continentales du Crétacé inférieur comprises entre le Néocomien et le Cénomanién qui sont constituées de sables, de grès avec des intercalations d'argiles. La base est constituée de terrains primaires du Paléozoïque, très accidentée par l'orogénèse hercynienne. Le toit est formé le plus souvent par les dépôts du Crétacé supérieur à savoir le Cénomanién argileux et le Turonien et parfois par les terrains tertiaires ou quaternaires. Cette nappe est limitée au Nord par l'Atlas Saharien, à l'Ouest par l'axe Béchar-Regane et au Sud par l'axe Reggan-Ain Amenas; à l'Est elle se prolonge au-delà des frontières Algéro-Libyenne et Algéro-Tunisienne. Il est partagé par la dorsale du M'Zab en deux bassins :

- Le bassin Occidental Oriental.
- Le bassin Oriental qui englobe le Bas Sahara.

Cette nappe est ainsi captive, à l'exception des bordures, son alimentation est faite en grande partie durant les périodes pluvieuses du Quaternaire. L'épaisseur utile de ce réservoir a été déterminée à partir de plusieurs centaines des forages pétroliers et de nombreuses



compagnes de géophysiques qui ont traversé la totalité des terrains Secondaires. Cette épaisseur correspond à la somme des couches perméables (grés et sables argileux) dont la fraction sableuse est supérieure à 50%. Les plus fortes épaisseurs sont localisées à l'Est d'El Menia, où elles sont comprises entre 750 m et 1000 m. La vallée de l'Oued Righ est un peu moins bien lotie avec des valeurs inférieures à 350 m.

### **3.2.1. Alimentation – Ecoulement**

La nappe du CI est une nappe fossile c'est-à-dire qu'elle est faiblement alimentée par rapport à son volume. Sur la base des études antérieures (Cornet, 1964 ; UNESCO, 1972 ; Pallas, 1978), l'alimentation de la nappe s'est faite en grande partie durant les périodes pluvieuses du Quaternaire (les zones d'affleurement du réservoir et dans le grand Erg occidental). Les conditions d'alimentation restent toujours mal connues vu son extension importante et l'accès difficile dans certaines régions. Actuellement, son taux de recharge reste faible et s'effectue principalement par infiltration des eaux de ruissellement des oueds qui descendent des massifs montagneux de l'Atlas saharien au Nord, des monts du Dahar à l'Est de la Tunisie et des Oueds de l'extrémité occidentale du Tademaït. La quantité d'eau qui tombe annuellement sur les affleurements du Crétacé inférieur continental est estimée à 2,5 milliards m<sup>3</sup>/an. Les conditions climatiques caractérisées par une hauteur de pluie faible et une évaporation intense rendent difficile l'estimation du coefficient d'infiltration.

Le volume d'eau emmagasiné dans le CI, évalué à  $3,5 \cdot 10^9$  Milliards m<sup>3</sup>, représente un débit continu de 1000 m<sup>3</sup>/s pendant 1000 ans. Les exutoires sont représentées par :

- Les foggaras longues galeries de drainage des eaux, utilisant la topographie locale avec une pente faible pour permettre l'écoulement libre de l'eau vers des points bas (cas du bassin occidental) ;
- Les puits artésiens (bassin oriental) ;
- Les sebkhas vastes étendues humides et salines, surfaces évaporantes dont le débit total n'est pas négligeable (lac d'El Menia).

### **3.2.2. Épaisseur du réservoir**

L'épaisseur utile, souvent déterminée à partir des diagraphies, correspond à la somme des épaisseurs des horizons perméables gréseux et des couches calcaires dolomitiques de l'Aptien, immergées au sein de cette série gréseux-sableuse. Les plus fortes épaisseurs sont localisées à l'Est d'El Menia où elles sont comprises entre 750 m et 1000 m. Cependant dans la vallée de l'Oued Righ et des Zibans, l'épaisseur est moins importante et sa valeur est inférieure à 350 m.

### 3.2.3. Piézométrie du CI

La carte piézométrique de la nappe du CI a été établie par plusieurs auteurs (Cornet 1964, et OSS 2003), l'examen de cette carte (OSS, 2003) (Figure 21) montre bien l'existence de deux grands bassins sahariens séparés par la dorsale du Mzab, l'écoulement est d'Ouest en Est au bas Sahara, du Nord au Sud et au Sud Ouest dans le grand Erg Occidental, le Touat Gourara et le Tidikelt (Belksier, 2017).

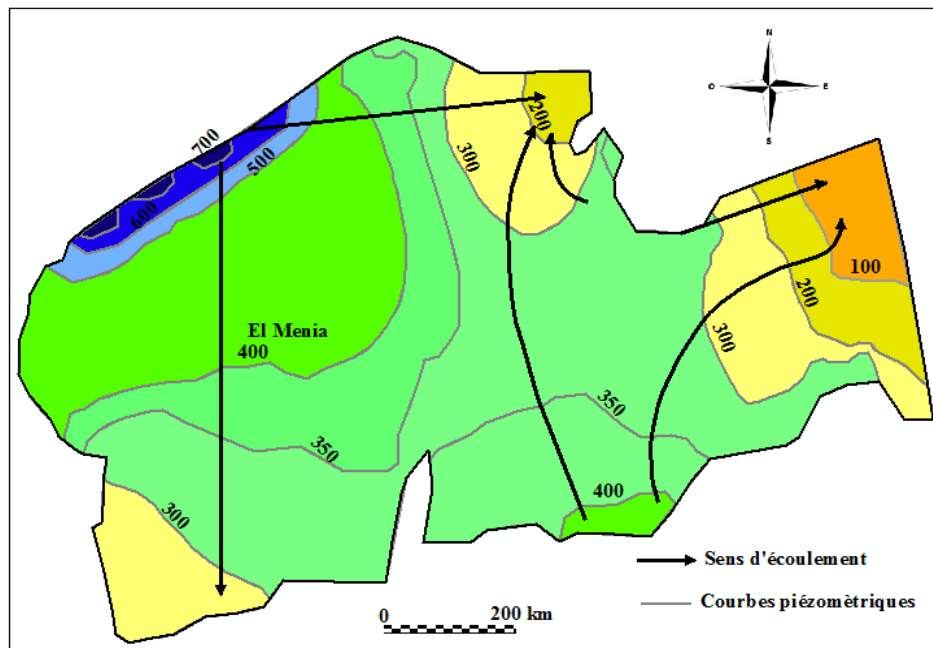


Figure 21 Carte piézométrique du CI (OSS, 2003)

## 4. Hydrogéologie locale

Cette zone est caractérisée par un climat aride, qui rend la vie des gens très difficile. Malgré cet obstacle, cette zone d'étude continue à s'établir durablement vu l'abondance de la ressource en eau. Du point de vue hydrogéologique, deux nappes souterraines sont présentes, l'une phréatique très proche de la surface, et l'autre profonde et captive (nappe du CI).

### 4.1. Nappe superficielle (nappe phréatique)

La nappe phréatique très proche de la surface, se trouve à quelques centimètres de profondeur, en provoquant de sérieux problèmes dues à la remontés des eaux, cette nappe affleure au niveau du lac d'El Menia.

Cette nappe se trouve dans les formations du quaternaire, elle bénéficie selon Capot (1958) des eaux collectées par oued Seggueur à partir des calcaires cénonanien et turonien et localement à partir des sables Vraconiens.

# Hydrogéologie

L'alimentation de cette nappe se fait soit à partir des eaux de la nappe artésienne par drainance ascendante où la présence des barres calcaire que contient le toit de la nappe du CI souvent fissurées et perméables, soit par les eaux de pluies ruisselant sur le glacis et se rassemblent dans la cuvette d'El Menia après des gros averses, soit par l'excès des eaux d'irrigation et les pertes des tubages des forages.

## 4.1.1. Carte piézométrique de la nappe phréatique

L'établissement de la carte piézométrique est la base de toute étude hydrodynamique, c'est dans ce but qu'une campagne de mesure du niveau d'eau dans les différents puits.

La mesure des niveaux piézométriques des points d'eau se fait à partir de la relation suivante :

$$NP = Z - (NS - M) \dots \dots \dots (8)$$

Avec :

NP : niveau piézométrique (m) ;

Z : cote topographique de point d'eau par rapport à la mer (m) ;

NS : cote de plans d'eau par rapport à la margelle (m) ;

M : la margelle de point d'eau mesurée par rapport au sol (m).

Pour tracer la carte piézométrique, au total 20 puits d'eau sont utilisés et qui couvrent la majeure partie de l'oasis. Le niveau statique des puits est généralement peu profond et qui ne dépasse pas les deux mètres dans la plupart des puits (Figure 22).

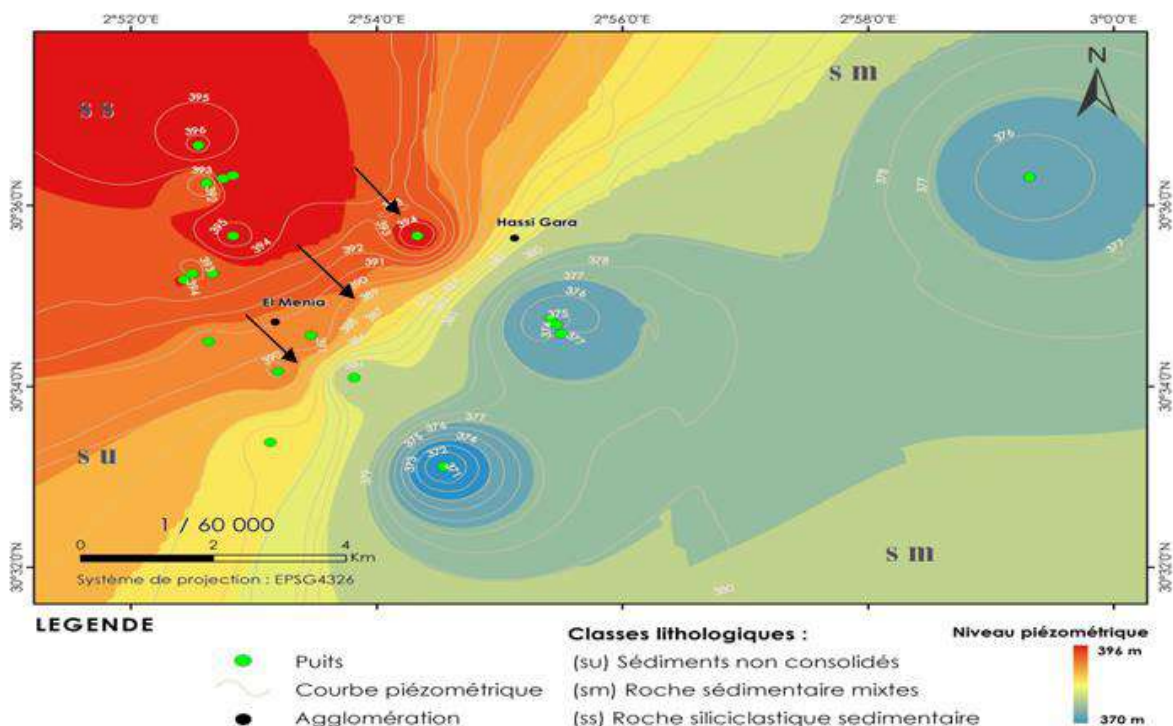


Figure 22 Carte piézométrique de la nappe superficielle (Novembre 2018)

D'une façon générale, l'axe principal de l'écoulement est du Nord vers le Sud (vers le lac d'El Menia). On observe aussi des courbes isopièzes espacés et constant dans la partie Nord-Est, ce qu'indique un faible gradient hydraulique et donc une perméabilité élevée. Au centre et au Sud les courbes isopièzes sont trop serrées indiquant un gradient hydraulique fort et une faible perméabilité.

## 4.2. Nappe du CI

Les sables et grés appartenant à l'Albien se trouvent au-dessous des couches argilo-calcaire d'une épaisseur de 20 à 30 m qui renferment une nappe aquifère en charge qui représente la principale ressource de la région. L'épaisseur de l'Albien est de l'ordre de 600 m. Les profondeurs de l'aquifère varient entre 65 à 250 m en allant vers le Nord.

En dirigeant vers le Sud, le phénomène de l'artésianisme commence à apparaître. Le très léger relèvement des bords de la cuvette à dimension considérables du Tademaït détermine cette artésianisme (nappe aquifère sous pression) ou nappe captive du fait de l'imperméabilité des marnes cénomaniennes.

L'étage Albien présent selon Capot (1958) des variations latérales de perméabilité dans les grés d'où l'impression que l'on se trouve en présence de plusieurs nappes dans la région d'El Menia, ces nappes peuvent être regroupées en cinq :

- 1er nappe à 30 m de profondeur : nappe ascendante ;
- 2ème nappe de 40 à 50 m de profondeur : nappe ascendante ;
- 3ème nappe de 65 à 75 m de profondeur : nappe ascendante ;
- 4ème nappe de 85 à 95 m de profondeur : nappe jaillissante ;
- 5ème nappe de 110 m ou plus de profondeur : nappe jaillissante.

### 4.1.2. Carte piézométrique de la nappe du CI

L'allure générale de la carte piézométrique de la nappe du CI (Figure 23) dans la région d'El Menia est presque la même que celle de la carte piézométrique de la nappe phréatique. Les courbes isopièzes sont espacés au Nord-Est indiquant une forte perméabilité, au centre de la zone d'étude et au Sud, les courbes sont trop serrées montrant ainsi un gradient hydraulique fort et par conséquence une perméabilité faible. On note aussi que les eaux souterraines convergent vers l'axe de dépression provoquée par le pompage.

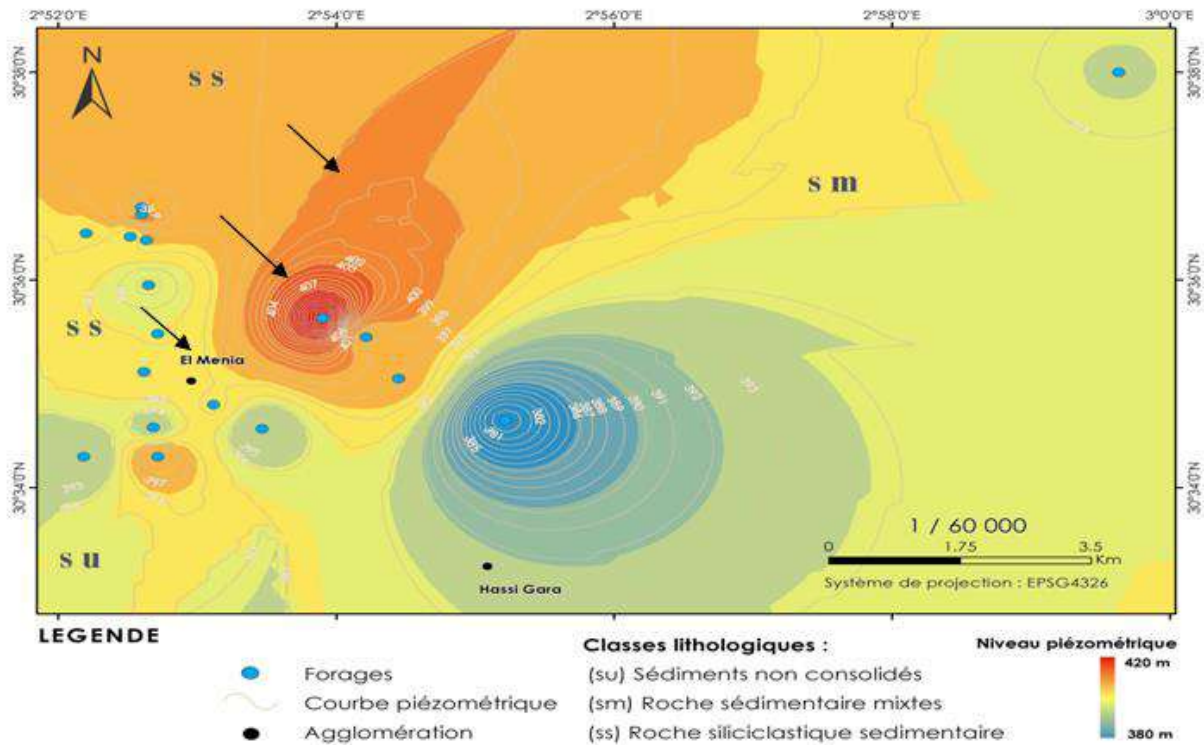


Figure 23 Carte piézométrique de la nappe du CI

## 5. Etude hydrodynamique

La connaissance des caractéristiques hydrodynamiques ( $k$  et  $T$ ) de la nappe du CI par l'interprétation des essais par pompage est indispensable pour une meilleure gestion de la ressource en eau souterraine dans cette région. À noter que, l'absence totale des données hydrodynamique concernant la nappe phréatique, nous empêche de déterminer leurs paramètres hydrodynamiques.

### 5.1. Méthode d'interprétation

L'étude hydrodynamique est basée sur un essai de pompage réalisé sur le forage de Taghit. Cet essai de pompage se compose de la descente de la nappe due au pompage qui dure 24 heures, et sa remontée à l'arrêt du pompage qui dure 20 heures.

### 5.2. Présentation du forage

Le forage de Taghit est destiné à l'irrigation des palmeraies de la zone de Taghit. Il a été exécuté en 1984. Ce forage est situé dans la région de Taghit au Nord-Est d'El-Goléa au point de coordonnées :  $X=486,88$  km et  $Y=3380,71$ km.

Le forage est creusé à une profondeur de 135 m. Le programme du forage a été comme suit :

- 0 à 10 m de forage en diamètre de 26" ;
- 10 à 120,63 m de forage en diamètre de 17" ;
- 120,63 à 145 m de forage en diamètre de 12".

Quant au tubage et crépine, ils sont composés de :

- 0 à 10 m tubes guide en diamètre 18 5/8" ;
- Cimentation de la colonne de protection de 0 à 120.63 m ;
- Colonne de captage de 8 pouces tube Johnson posé de 108 à 145m ;
- Tube plein de réserve de 108 à 112 m (L=4 m) ;
- Crépine Inox de 112 à 140 m (L=28 m) ;
- Tube de cotation de 140 à 145 m (L=5 m) ;
- L'espace entre la colonne de captage et les parois du forage est remplie par 3 m<sup>3</sup> de gravier calibré à 3 mm.

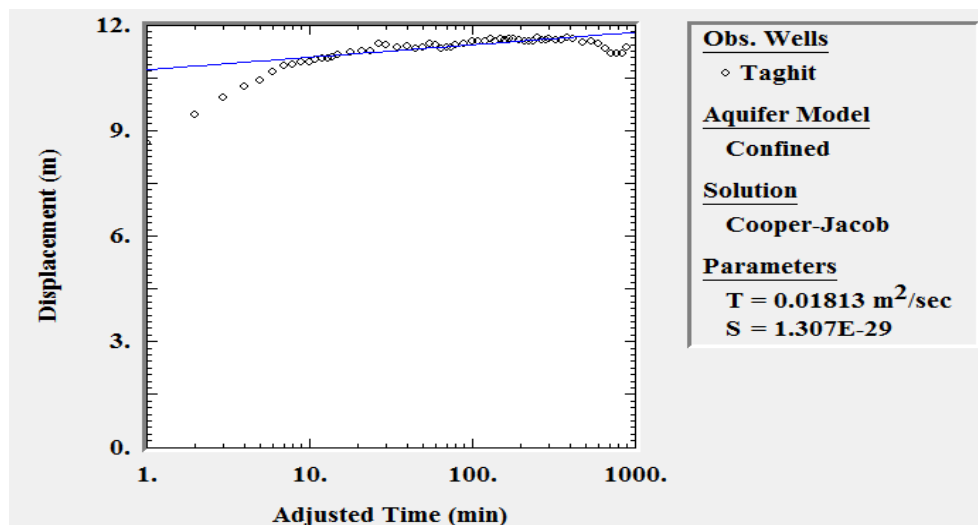
### 5.3. Méthode d'interprétation

L'interprétation des données du pompage a été réalisée grâce à l'utilisation d'un logiciel informatique «AQTESOLV Université de Virginie-Occidentale 4.0», selon la méthode de pseudo-équilibre de Cooper et Jacob (1946) (Figure 24).

L'essai a été réalisé à l'aide d'une pompe immergée placée à une profondeur de 48m, Le pompage a commencé le 05-04-1986 à 14<sup>h</sup>00 et s'est terminé le 06-04-1986 à 14<sup>h</sup>00, donc une durée de 24 heures, et 20 heures pour la remontée qui s'est terminée à 10<sup>h</sup>00 de 07-04-1986.

- Niveau statique 6.40 m ;
- Niveau dynamique 17.61 m ;
- Rabattement 11.21 m ;
- Débit 35 l/s ;
- Puissance de la nappe  $b = 600$  m.

### Courbe de la descente

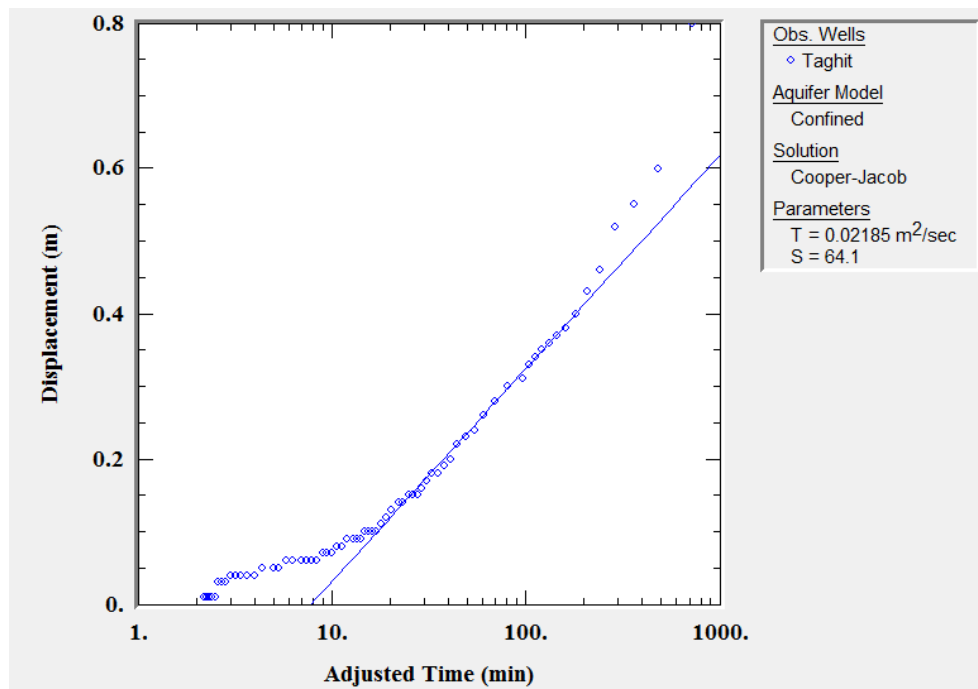


**Figure 24 Essai de pompage long duré lors de la phase de la descente du forage Taghit selon la méthode de Cooper-Jacob**

L'interprétation numérique de la courbe de descente par la méthode de Cooper-Jacob donne la valeur des paramètres suivants :

$$T = 1.81 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{sec}, K = 3 \cdot 10^{-5} \text{ m/sec}$$

## Courbe de la remontée



**Figure 25 Essai de pompage long duré lors de la phase de la remontée du forage Taghit selon la méthode de Cooper-Jacob.**

L'interprétation numérique de la courbe de descente par la méthode de Cooper-Jacob donne la valeur des paramètres suivants :

$$T = 2.18 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{sec}, K = 3.64 \cdot 10^{-5} \text{ m/sec}$$

## 6. Conclusion

La région d'El Menia bénéficie de deux nappes :

- Une nappe superficielle (phréatique) sur laquelle les puits sont implantés, elle est très proche de la surface du sol (2.5 m au maximum).
- Une nappe captive artésienne (CI) sur laquelle les forages sont implantés ; elle est plus profonde.

L'écoulement dans la nappe superficielle est Nord-Sud par contre dans la nappe du CI se fait de Nord-Est vers le Sud-Ouest. La valeur moyenne du coefficient de perméabilité est de

## *Hydrogéologie*

---

$K = 3.32 \cdot 10^{-5}$  m/sec. La valeur moyenne de la transmissivité est de l'ordre de  $2 \cdot 10^{-2}$  m<sup>2</sup>/s qui renseigne sur la possibilité d'exploitation du CI dans cette région.



# ***Chapitre 04 : Hydrochimie***

# *Hydrochimie*

---

## **1. Introduction**

Pour les physiciens et les chimistes, l'eau est une molécule très particulière dont la structure et les propriétés sont beaucoup plus complexes que sa formule chimique ( $\text{H}_2\text{O}$ ) si simple et si connue ne le laisserait présager (Grosclaude, 1999). Le chimisme naturel des eaux dépend essentiellement de la composition géologique des milieux traversés et du temps de séjour, et à moindre degré par les facteurs climatiques, et anthropiques (Coté et al, 2006). Ce chimisme est principalement régi par les équilibres calco-carboniques ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ) auxquels viennent se greffer des éléments en provenance de l'environnement alluvial ( $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ) et des éléments d'origine biologique ( $\text{NO}_3^-$ ). Dans la région d'El Menia, le chimisme des eaux est souvent influencé par l'effet de la dissolution des formations géologiques, l'intensité de l'évaporation, et l'activité agricole.

Le présent chapitre a été mené afin de connaître le régime, l'origine, le mécanisme du chimisme, l'évolution des éléments chimiques décrits et de caractériser la qualité des eaux souterraines. L'interprétation des analyses hydrochimiques est basée sur les données collectées depuis 2014 pour la nappe phréatique et la nappe du Continental Intercalaire CI.

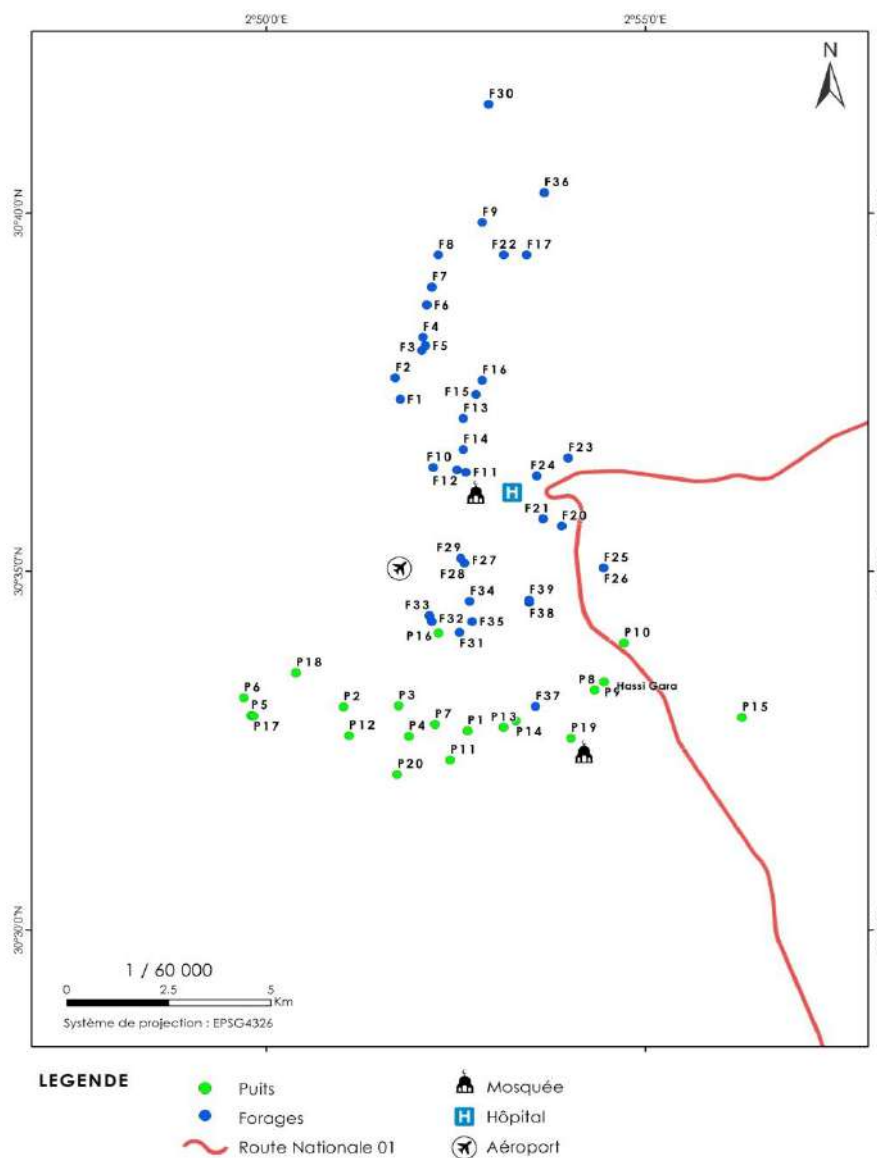
## **2. Qualité des eaux de la ressource en eau dans la région d'El Menia**

### **2.1. Matériels et méthodes**

Pour la réalisation de cette étude hydrochimique, nous avons effectué plusieurs campagnes de prélèvement et de mesures hydrochimiques dans les puits et les forages de la nappe phréatique et la nappe du CI. La majorité d'entre eux sont des puits destinés à l'irrigation. Au total, 67 échantillons ont été prélevés dans la zone d'étude (Figure 26). Les échantillons sont répartis comme suit:

28 échantillons ont été prélevés dans les puits de la nappe phréatique et 39 échantillons dans les forages exploitant la nappe du CI.

# Hydrochimie



**Figure 26 Inventaires des points d'eau dans la région d'El Menia**

Les paramètres analysés sont la conductivité électrique (CE), le pH, le résidu sec (RS) et les éléments majeurs ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  et  $\text{HCO}_3^-$ ). Les mesures in situ de la conductivité électrique et celles du pH ont été réalisées avec un conductimètre et un pH mètre WTW 330i. Pour les éléments majeurs, les principaux éléments ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , et  $\text{NO}_3^-$ ) ont été analysés par chromatographie en phase liquide ionique à haute performance (HPLC) combinée à l'IC / Pak TM CM / D pour les cations, en utilisant de l'EDTA et de l'acide nitrique comme éluant, et sur un chromatographe Metrohm équipé de colonnes CI SUPER-SEP pour les anions, en utilisant de l'acide phtalique et de l'Acétonitrile comme éluant.

# Hydrochimie

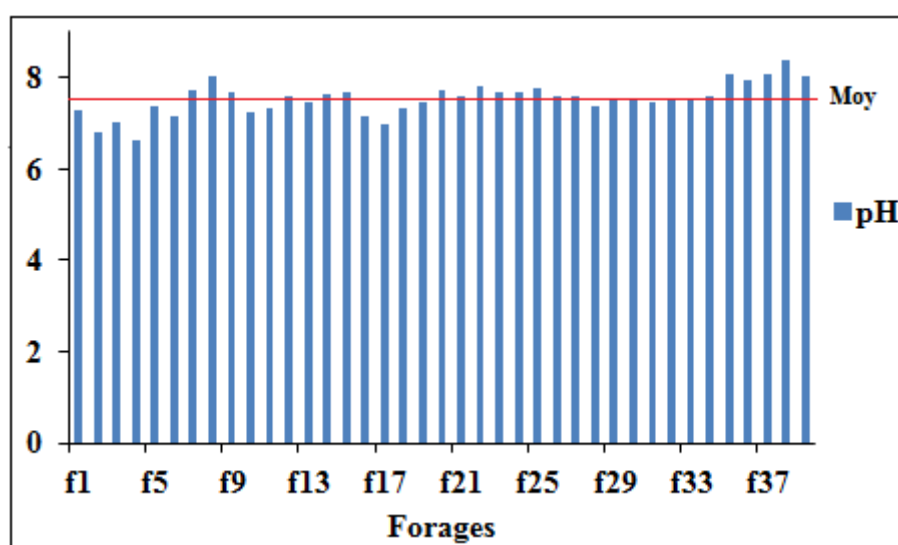
La limite de détection globale pour les ions était de 0,04 mg/l. Les concentrations de  $\text{HCO}_3^-$  ont été analysées en laboratoire par titrage avec HCl 0,1N. La balance ionique pour tous les échantillons est inférieure à 5%.

## 2.2. Nappe du Continental Intercalaire

### 2.2.1. Potentiel d'Hydrogène (pH)

C'est un paramètre physique qui détermine l'acidité ou l'alcalinité d'une solution aqueuse. Dans les eaux naturelles, ce paramètre varie entre 6 et 8.5 (Chapman et al. 1996).

Dans l'ensemble des eaux échantillonnées, les pH mesurés sont : homogènes, se trouvent dans l'intervalle de norme de potabilité et se situent autour de la neutralité. Ils varient entre 6.61 et 8.38 avec une moyenne de 7.54 (normes OMS entre 6.5/9.5)(Figure 27).



**Figure 27 Histogramme de variation du pH dans les forages de la nappe du CI dans la région d'El Menia**

### 2.2.2. Conductivité électrique (CE)

La conductivité mesure la capacité de l'eau à conduire le courant entre deux électrodes métalliques de 1 cm<sup>2</sup> de surface, et séparé l'une de l'autre de 1 cm, exprimés en  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . La conductivité électrique est un excellent indicateur de la minéralisation qui reflète la concentration de l'ensemble des minéraux dissous. L'examen de l'historgramme (Figure 28) montre des valeurs faibles à moyennes de la conductivité électrique pour les eaux de la nappe albienne et qui ne dépassent pas la norme mondiale proposée par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) (1500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), elles varient entre 271 et 593  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , avec une moyenne de 419.59  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

# Hydrochimie

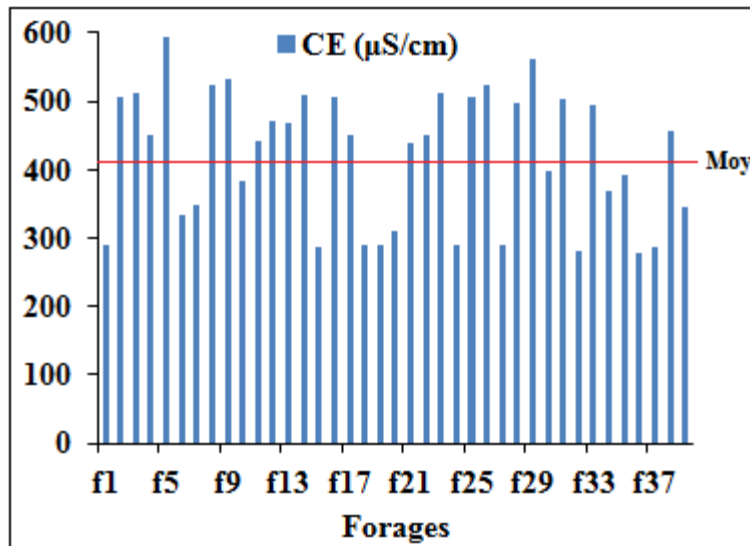


Figure 28 Histogramme de variation de la CE dans les forages de la nappe du CI dans la région d'El Menia

### 2.2.3. TDS (Total Dissolved Sels)

Le TDS (Total Dissolved Sels) représente la partie solide qui reste après évaporation complète de l'eau à 110 °C. Elle donne une idée sur la minéralisation globale de l'eau. En principe, ce résidu est constitué des minéraux qui se trouvent dans l'eau. Dans cette zone, les valeurs des résidus secs oscillent entre 130 et 464.42 mg/l (Figure 29), avec une moyenne de 312.82 mg/l (OMS ≤ 1000 mg/l).

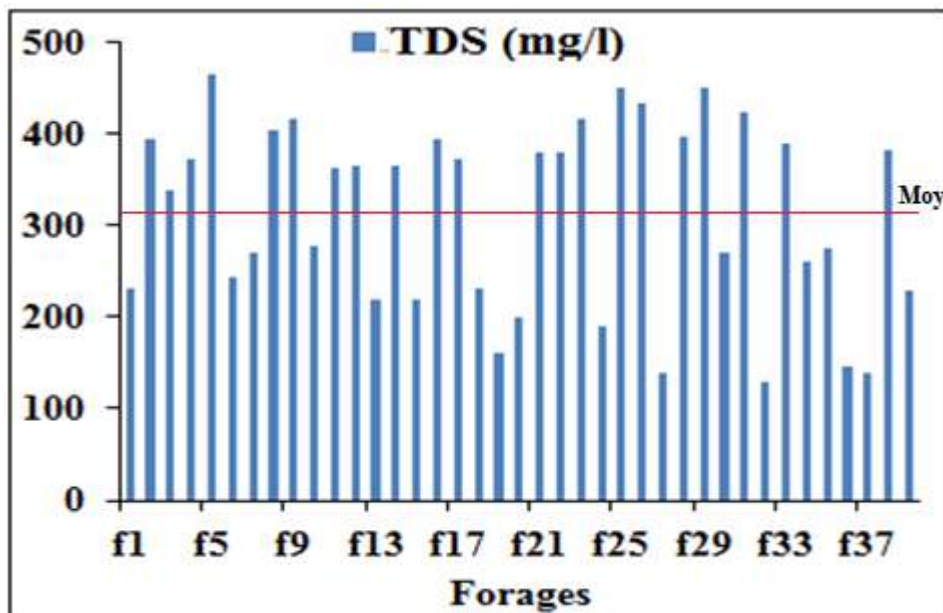
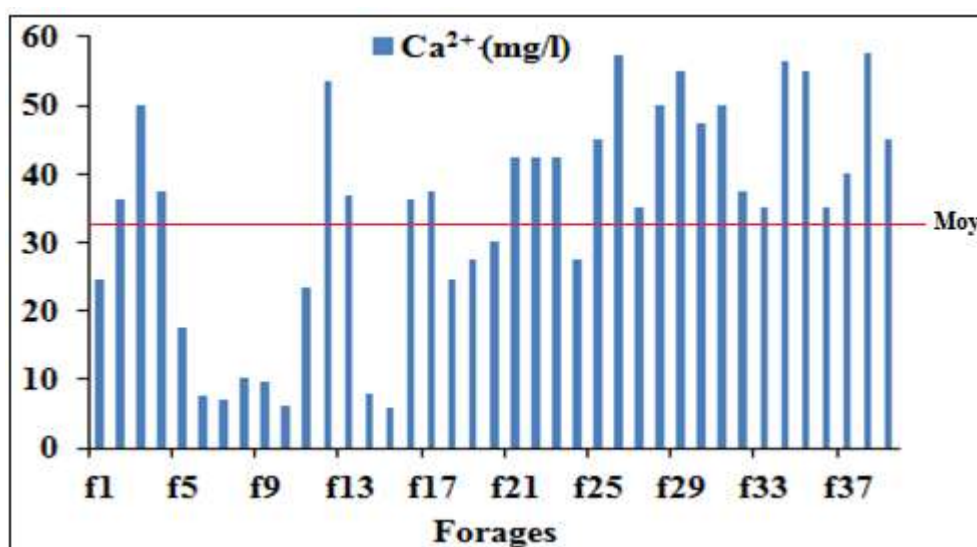


Figure 29 Histogramme de variation des résidus secs dans les forages de la nappe du CI dans la région d'El Menia

## 2.2.4. Cations

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

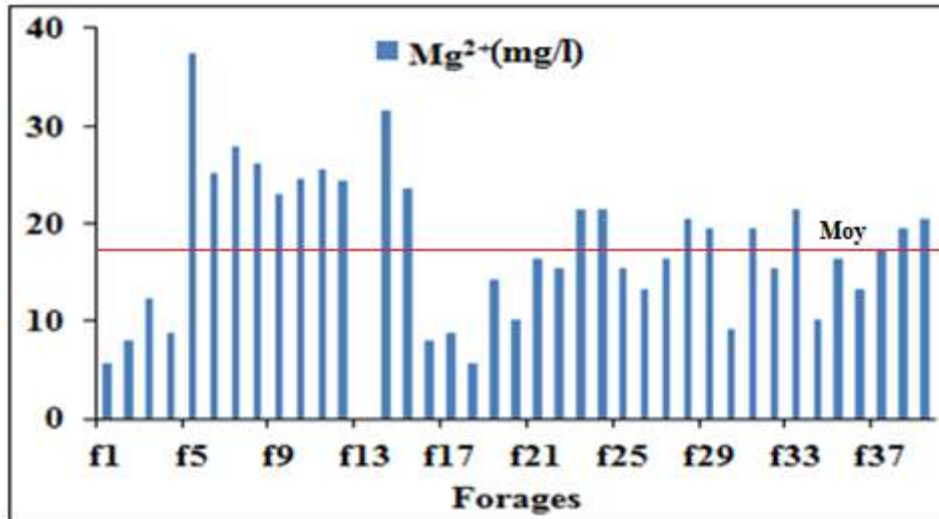
Le calcium est un élément alcalino-terreux, qui peut provenir des formations gypsifères ( $\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$ ) et la dissolution de calcaire ( $\text{CaCO}_3$ ). La teneur en calcium dans les eaux de la nappe du CI (Figure 30) répond à la norme mondiale de potabilité des eaux (norme  $\text{OMS} \leq 75 \text{ mg/l}$ ), elle varie entre 6.2 mg/l et 57.5 mg/l, avec une moyenne de 32.18 mg/l.



**Figure 30** Histogramme de variation des teneurs en calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) dans les forages de la nappe du CI dans la région d'El Menia

### b. Magnésium ( $\text{Mg}^{2+}$ )

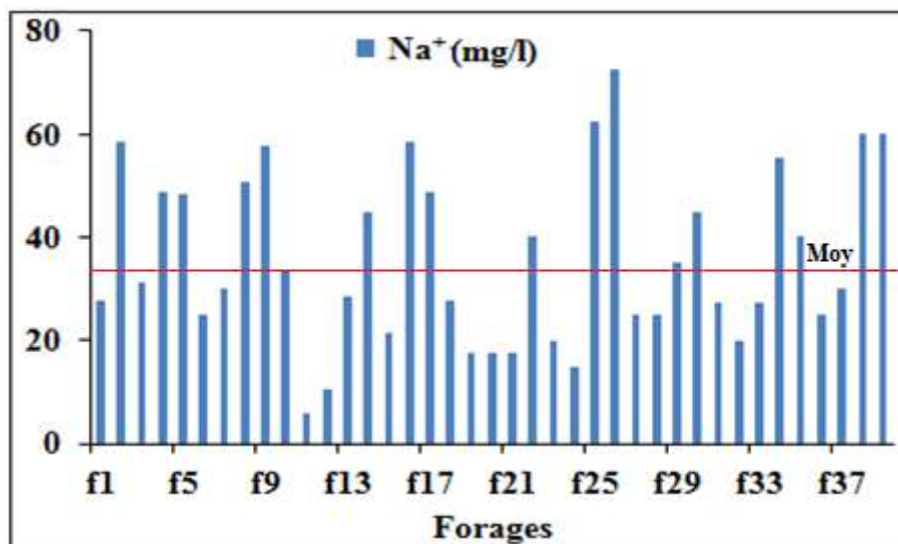
Le magnésium est un élément très abondant, Il est souvent présent dans les roches évaporitiques (sel de Mg), la carnallite ( $\text{KMgCl}_3, 6\text{H}_2\text{O}$ ), la kiesérite ( $\text{MgSO}_4, \text{H}_2\text{O}$ ), et carbonatés, la dolomie [ $(\text{Ca}, \text{Mg}) \text{CO}_3$ ]. Les eaux de la nappe du CI (Figure 31) contiennent des concentrations faibles de  $\text{Mg}^{2+}$  et qui respectent la norme mondiale de l'eau potable (norme  $\text{OMS} \leq 50 \text{ mg/l}$ ); la teneur maximale est de l'ordre de 37.47 mg/l alors que la valeur minimale est de 5.67 mg/l, la moyenne est de 17.89 mg/l.



**Figure 31** Histogramme de variation des teneurs en magnésium ( $Mg^{2+}$ ) dans les forages de la nappe du CI dans la région d'El Menia

### c. Sodium ( $Na^+$ )

Le sodium est le sixième élément le plus abondant dans la croûte terrestre, il représente 2.83% sous toutes ses formes. L'origine de cet élément est liée principalement à la dissolution des formations salifères très solubles telles que l'halite ( $NaCl$ ), Thenardite ( $NaSO_4$ ) et Mirabilite ( $NaSO_4 \cdot 10H_2O$ ). Les valeurs du  $Na^+$  dans les eaux de la nappe albienne (Figure 32) sont faibles à moyennes et qui respecte la norme mondiale recommandée par l'OMS (200 mg/l); la teneur maximale est de l'ordre de 72.5 mg/l, alors que la valeur minimale égale 15 mg/l, la moyenne est de 37.65 mg/l.

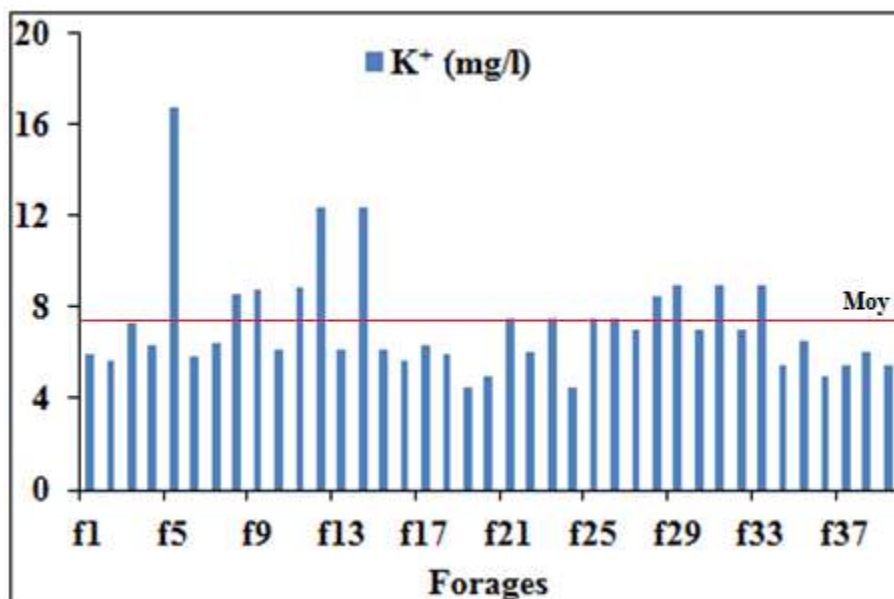


**Figure 32** Histogramme de variation des teneurs en sodium ( $Na^+$ ) dans les forages de la nappe du CI dans la région d'El Menia

# Hydrochimie

## d. Potassium ( $K^+$ )

Le potassium est un élément chimique caractérisé par sa forte réaction avec l'eau. Son apparition est du probablement à la présence des évaporites comme le Sylvite et les produits chimiques utilisés en agriculture (le sulfate de potassium). Les concentrations du  $K^+$  dans les eaux de la nappe du CI sont faibles et qui respectent les normes de potabilité (OMS  $\leq 12$  mg/l) (Figure 33), la valeur maximale enregistrée est de 16.78 mg/l, la valeur minimale est de 4.5 mg/l. La moyenne égale à 7.23 mg/l.



**Figure 33 Histogramme de variation des teneurs en Potassium ( $K^+$ ) dans les forages de la nappe du CI dans la région d'El Menia**

## 2.2.5 Anions

### a. Chlorures ( $Cl^-$ )

Très répandus dans l'eau naturelle en proportions très variables, leur présence dans l'eau souterraine résulte de la dissolution des formations salifères, la sylvite ( $KCl$ ) et l'halite ( $NaCl$ ) ou bien par le lessivage des amendements agricoles riches en chlorures tels que les chlorures de potassium. Les eaux de la nappe albienne dans notre zone d'étude (Figure 34) présentent des concentrations faibles en chlorures (OMS  $\leq 250$  mg/l), la valeur maximale enregistrée est de 67.73 mg/l, la faible valeur est égale à 4.1 mg/l, la moyenne égale à 29.18 mg/l.



# Hydrochimie

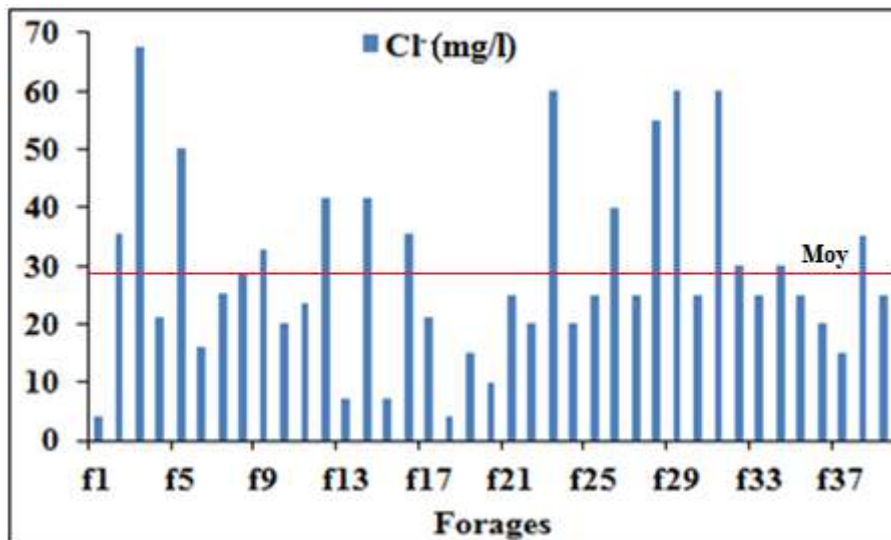


Figure 34 Histogramme de variation des teneurs en chlorures (Cl<sup>-</sup>) dans les forages de la nappe du CI dans la région d'El Menia

## b. Bicarbonates (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>)

Le bicarbonate, aussi appelé hydrogénocarbonate, est un ion de formule chimique HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>. On parle de bicarbonates quand il s'agit de sel de l'ion bicarbonate, lorsqu'ils sont en contact d'acide (H<sup>+</sup>), les bicarbonates se transforment en dioxyde de carbone gazeux (CO<sub>2</sub>). Leur origine est due à la dissolution des formations carbonatées telles que les calcaires et les dolomies.

Les eaux de la nappe du CI présentent des concentrations en bicarbonates très élevées et qui dépassent la norme mondiale (120 mg/l) (Figure 35). La valeur maximale est de l'ordre de 308.05 mg/l, alors que la valeur minimale est de 85.4 mg/l. La moyenne égale à 170.34 mg/l.

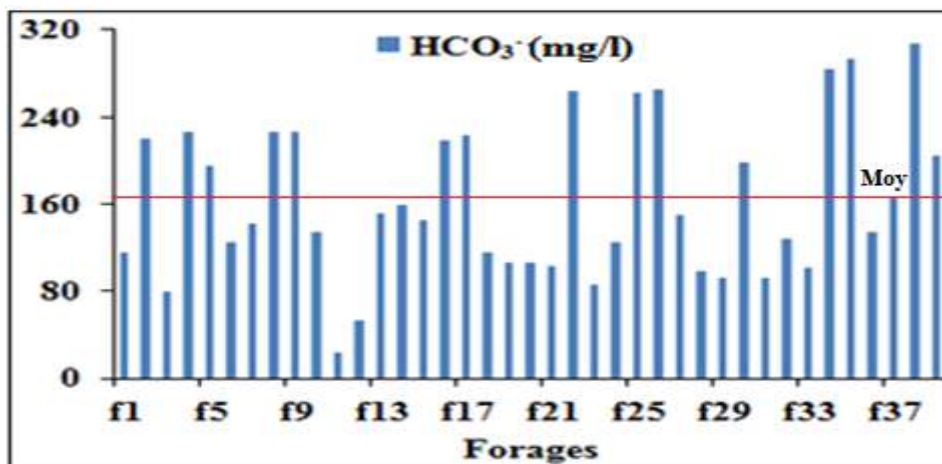


Figure 35 Histogramme de variation des teneurs en bicarbonates (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) dans les forages de la nappe du CI dans la région d'El Menia

# Hydrochimie

## c. Sulfates ( $\text{SO}_4^{2-}$ )

Généralement la concentration en ion sulfates des eaux naturelles est très variable liée au lessivage des formations évaporitiques, tel que le gypse ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$ ) et l'anhydrite ( $\text{CaSO}_4$ ). La concentration en sulfates des eaux naturelles des terrains à faibles teneurs en minéraux sulfatés est généralement inférieure à 50 mg/l (Rodier1980).

Dans les eaux de la nappe du CI (Figure 36), les valeurs des concentrations en sulfates sont faibles à moyennes ( $\text{OMS} \leq 250$  mg/l), la plus grande valeur est égale à 117.5 mg/l, la valeur minimale est de 21.65 mg/l, avec une moyenne égale à 52.84 mg/l.

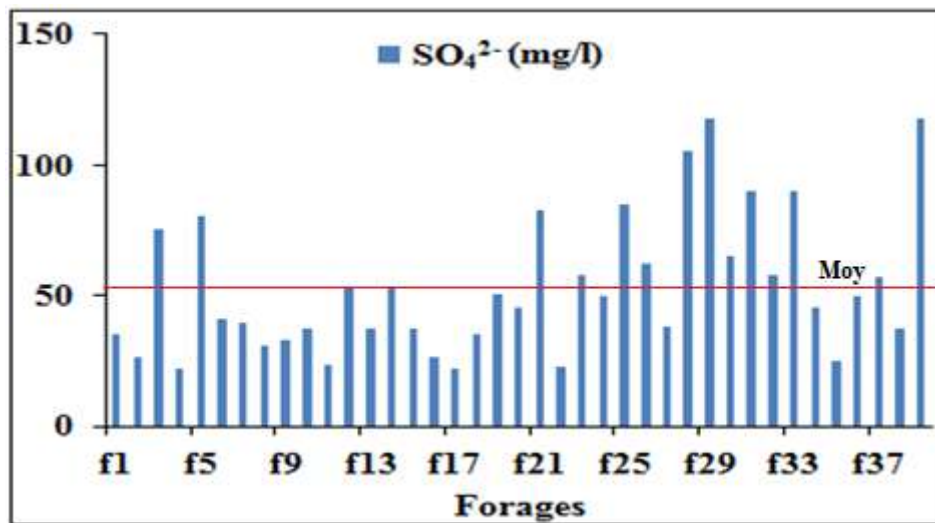


Figure 36 Histogramme de variation des teneurs en sulfates ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) dans les forages de la nappe du CI dans la région d'El Menia

### 2.2.6. Classification chimique des eaux de la nappe du CI

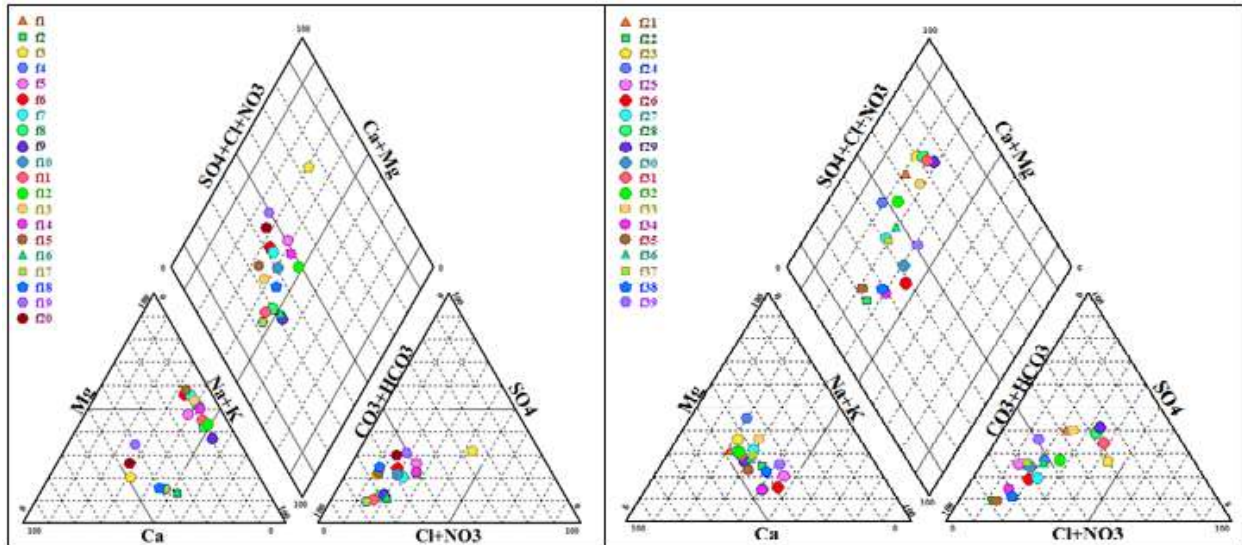
#### a. Représentation graphique des eaux sur le diagramme de Piper

Le diagramme de Piper est une représentation graphique de la chimie d'un ou plusieurs échantillons d'eau (Piper, 1944). Les anions et les cations sont représentés dans deux diagrammes ternaires distincts. Ce diagramme de Piper permet également de représenter les compositions de cations et d'anions d'un grand nombre d'échantillons sur un seul graphique dans lequel les grands groupes ou les tendances dans les données peuvent être discernés visuellement. Il est aussi utilisé pour évaluer les faciès hydrogéochimiques.

La projection sur le diagramme de Piper des cations et des anions des eaux souterraines des forages du Continental Intercalaire (CI) montre l'existence de plusieurs faciès chimiques dominés par le faciès bicarbonaté sodique (35.9%), le faciès bicarbonaté calcique (25.64%), le faciès bicarbonaté magnésien (20.51%), le faciès sulfaté calcique (12.82%), enfin un faciès chloruré calcique (5.13%), la présence de ces faciès indique une dissolution des roches

# Hydrochimie

carbonaté pour les faciès bicarbonatés calcique et bicarbonaté magnésien et une origine évaporitique riche en sel et en gypse pour le reste des faciès chimique (Figure 37).



**Figure 37 Représentation des analyses chimiques de la nappe du CI sur le diagramme de Piper**

## 2.2.7. Aptitude des eaux de la nappe du CI à l'irrigation

Dans les zones arides et hyperarides, l'approvisionnement en eau d'irrigation constitue l'un des facteurs déterminants dans la production agricole. Le développement de l'agriculture dans ces zones rencontre actuellement, en dehors de la rareté des ressources hydriques, de nouveaux problèmes tels que le risque de salinisation des sols causé par l'accumulation des sels minéraux contenus dans l'eau. Une étude d'aptitude des eaux à l'irrigation s'avère nécessaire car cette région se caractérise par une faible pluviométrie et une forte évaporation

### 0. Méthode de Richards

L'aptitude des eaux à l'irrigation est évaluée par le SAR (Taux d'Adsorption du Sodium) qui représente la teneur du sodium par rapport à celles du calcium ( $Ca^{2+}$ ) et du magnésium ( $Mg^{2+}$ ) des eaux. Il est calculé selon la formule suivante :

$$SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{2}}} \dots \dots \dots (9)$$

Avec :

- SAR : Sodium Adsorption Ratio ;
- $Na^+$ ,  $Ca^{2+}$ , et  $Mg^{2+}$  représentent les concentrations en mg/l.

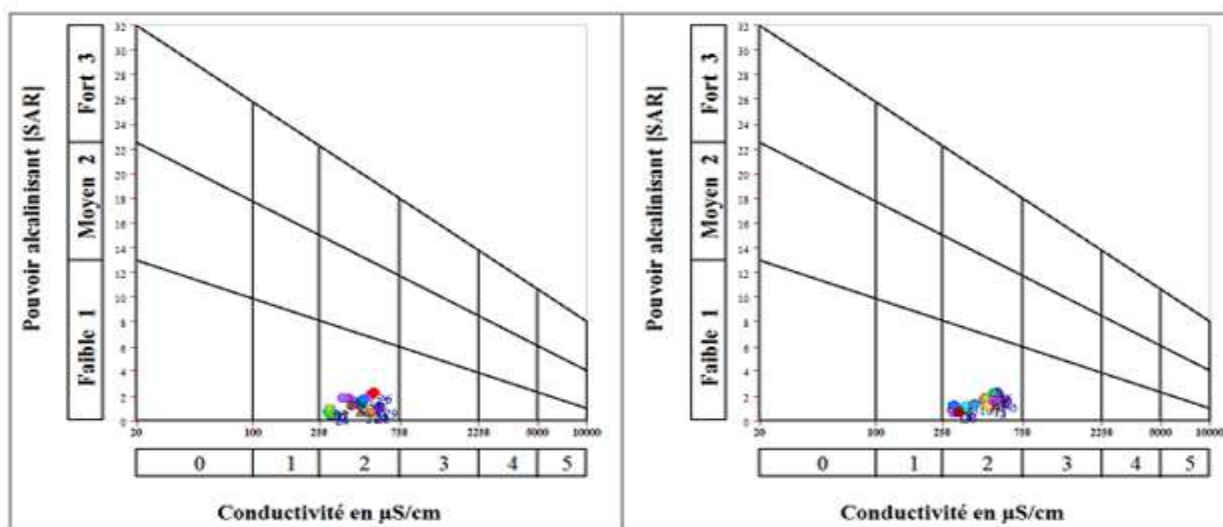
# Hydrochimie

La méthode de Richards (1954) est basée sur la combinaison des deux paramètres à savoir le SAR et la conductivité électrique. Cette méthode consiste à classer les eaux sous forme d'un diagramme qui définit cinq classes d'eau :

**Tableau 13 Classification de Richards pour la qualité des eaux d'irrigation**

Degré	Qualité	Classe	État d'utilisation
1	Excellente	C1-S1	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

Les résultats de la classification de la qualité chimique des eaux de la nappe du CI d'après le diagramme de Richards (Figure 38), montrent que tous les échantillons des eaux de cette nappe appartiennent à la classe C2-S1 caractérisée par une qualité bonne où on peut utiliser ces eaux sans contrôle particulier (Tableau 13).



**Figure 38 Diagramme de Riverside des eaux du Continental Intercalaire dans la région d'El Menia**

# Hydrochimie

## 2.2.8. Origine de la salinité des eaux du CI

### 2.2.8.1. Traitement et analyse statistique des données hydrochimiques des eaux de la nappe du CI

Dans le domaine de la géochimie des eaux, et pour classer les eaux et voir leur origine, l'utilisation de l'approche statistique comme l'analyse en composante principale (ACP) est indispensable, elle permet de caractériser la typologie hydrochimique des eaux. Le logiciel utilisé pour traiter les données hydrochimiques est XLStat sous Excel (<https://www.xlstat.com/en/>). La préparation des données se fait en présentant les variables en colonnes et les individus en lignes. Le tableau statistique est établi sur la base des données issues des analyses physico-chimiques des eaux du Continental Intercalaire (CI) :

**Tableau 14** Statistiques élémentaires des paramètres physico-chimiques de la nappe du CI

Élément (mg/l)	Nb. D'observations	Min	Max	Moy	Ecarte-type
CE ( $\mu\text{S/cm}$ )	39	279	593	419.59	96.22
TDS	39	130	464.42	312.82	102.14
$\text{HCO}_3^-$	39	79.30	308.05	170.34	65.37
$\text{Cl}^-$	39	4.11	67.73	29.18	16.01
$\text{SO}_4^{2-}$	39	20	117.5	52.81	26.34
$\text{Na}^+$	39	15	72.5	37.66	15.48
$\text{K}^+$	39	4.5	16.78	7.23	2.39
$\text{Ca}^{2+}$	39	5.97	57.5	32.18	17.26
$\text{Mg}^{2+}$	39	5.67	37.47	17.9	7.32

### 2.2.8.2. Analyse en composantes principales (ACP)

#### a. Matrice de corrélation

La matrice de corrélation (Figure 15) a été calculée pour les éléments physico-chimiques de la nappe du Continental Intercalaire de la zone d'étude. Cette ACP a été effectué sur l'ensemble des données pour assurer l'obtention des coefficients de corrélation significatifs. Au total, 39 échantillons ont été utilisés. La matrice de corrélation montre que la conductivité (CE) est corrélée positivement avec tous les éléments chimiques à l'exception des bicarbonates où  $r_{\text{CE}/\text{HCO}_3^-}$  est de 0.22 (très faible corrélation négative).

**Tableau 15** Matrice de corrélation des éléments chimiques calculée sur l'ensemble des échantillons de la nappe du CI de la zone d'étude

# Hydrochimie

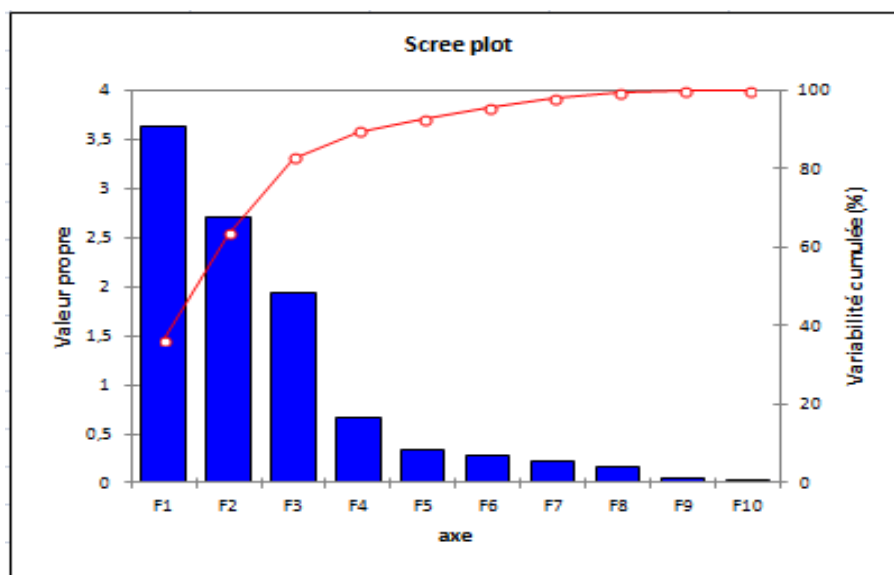
Variables	CE ( $\mu\text{s/cm}$ )	TDS	$\text{HCO}_3^-$	$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$
CE ( $\mu\text{S/cm}$ )	1								
TDS	<b>0.93</b>	1							
$\text{HCO}_3^-$	0.22	0.27	1						
$\text{Cl}^-$	<b>0.71</b>	<b>0.63</b>	-0.11	1					
$\text{SO}_4^{2-}$	0.26	0.22	-0.39	<b>0.49</b>	1				
$\text{Na}^+$	0.53	0.54	<b>0.82</b>	0.21	-0.08	1			
$\text{K}^+$	0.63	<b>0.57</b>	-0.03	<b>0.53</b>	<b>0.32</b>	0.2	1		
$\text{Ca}^{2+}$	0.14	0.17	0.21	<b>0.39</b>	<b>0.4</b>	0.2	-0.23	1	
$\text{Mg}^{2+}$	0.29	0.21	-0.1	0.23	0.21	-0.06	<b>0.63</b>	<b>-0.54</b>	1

pvalue : 0.05

Tous les éléments chimiques sont en mg/l sauf la CE en ( $\mu\text{S/cm}$ ).

## b. Diagonalisation de la matrice de corrélation

La diagonalisation de la matrice de corrélation a permis de calculer les facteurs de charges, les deux premiers axes, pris en considération pour décrire la corrélation des variables, détiennent à eux seuls 63.43 % de l'information totale avec, respectivement 36.37 % pour l'axe F1 et 27.06 % pour l'axe F2 (Figure 39) (pvalue : 0.05).



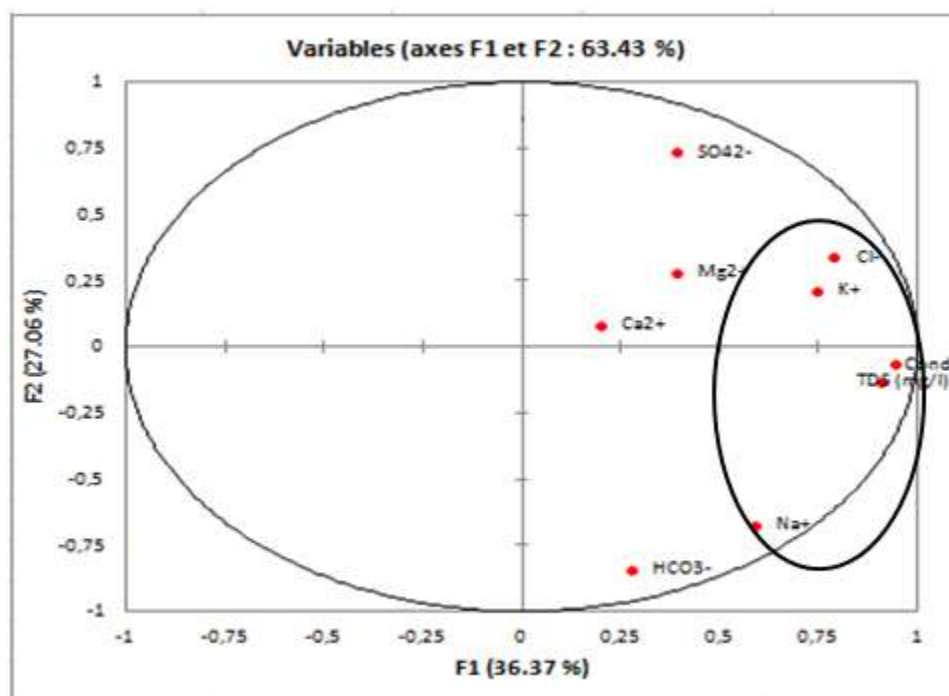
**Figure 39 Valeurs propres des facteurs de charges**

## c. Cercle des corrélations et projection des individus

Cette analyse a été faite sur deux facteurs où 63.43 % de la variance ont pu être exprimés. Le cercle de corrélation a été tracé sur le plan des facteurs F1-F2 (Figure 40)

# Hydrochimie

montre l'existence d'une association corrélée positivement avec le facteur F1. Elle regroupe les paramètres suivants : CE, Chlorures ( $\text{Cl}^-$ ), Potassium ( $\text{K}^+$ ), Sodium ( $\text{Na}^+$ ) et Résidu sec et à moindre degré avec le Magnésium ( $\text{Mg}^{2+}$ ), le Calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ), les Bicarbonates ( $\text{HCO}_3^-$ ) et enfin les sulfates ( $\text{SO}_4^{2-}$ ). Ces éléments représentent l'axe de la minéralisation liés aux évaporites ( $\text{CaSO}_4$ ,  $\text{NaCl}$ ,  $\text{KCl}$ , et  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{CaCO}_3$ ) et les roches carbonatées. Pour l'axe F2, on observe une corrélation positive avec les sulfates qui contribue aussi à la salinité des eaux de cette nappe.



**Figure 40 Cercles de corrélation sur le plan des facteurs F1-F2 des eaux de la nappe du CI**

## 2.2.9. Rapports caractéristiques pour les eaux de la nappe du CI

Afin de comprendre le processus de minéralisation des eaux de la nappe du CI de la région d'El Menia, et apprécier les relations entre les différents éléments chimiques et déterminer leurs origines, nous utilisons les résultats d'analyses, en se basant sur les meilleures corrélations qui existent entre les différents paramètres, ainsi que sur les faciès chimiques prédominants.

### a. Le couple $\text{Na}^+$ - $\text{HCO}_3^-$

L'évolution du sodium ( $\text{Na}^+$ ) est étudiée en fonction des teneurs en bicarbonates. La figure 41 montre un alignement des points sur la droite de dissolution du bicarbonate de sodium  $\text{NaHCO}_3$  (minérale présent dans les roches évaporitiques). La dominance du faciès bicarbonaté sodique confirme cette forte corrélation ( $R = 0.82$ ).



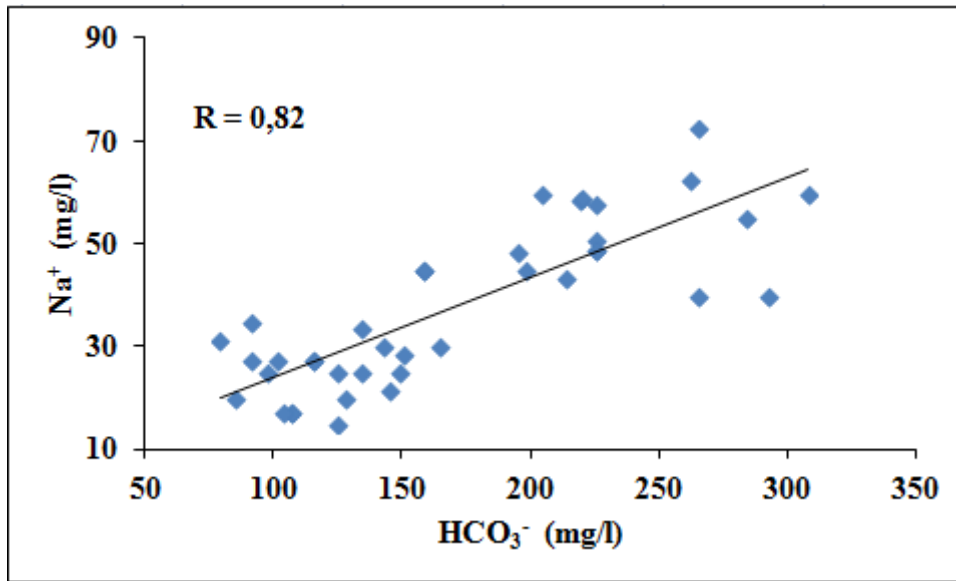


Figure 41 Courbe de corrélation du couple Na<sup>+</sup> vs HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> des eaux du CI

## b. Le couple Ca<sup>+2</sup> – SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>

L'examen de la Figure 42 des teneurs en calcium (Ca<sup>+2</sup>) en fonction des teneurs en sulfates (SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>) montre clairement la dominance de l'origine évaporitiques de cet élément. En effet, on observe pour la majorité des points un excès du calcium par rapport aux sulfates ce qui indique une origine évaporitiques, on observe aussi l'alignement de quelques points sur la droite de régression qui peut expliquer par une origine carbonatée du calcium.

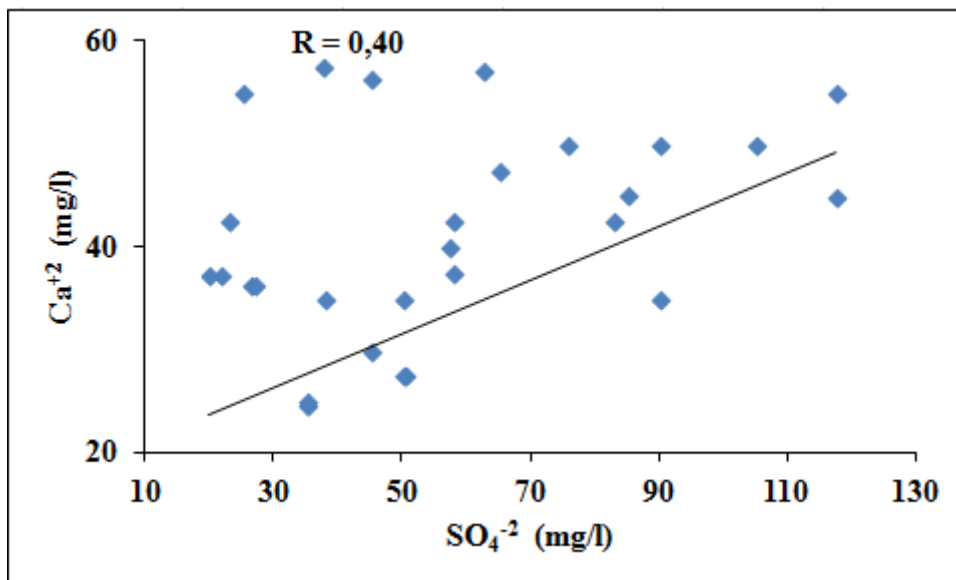


Figure 42 Courbe de corrélation du couple Ca<sup>+2</sup> vs SO<sub>4</sub><sup>-2</sup> des eaux du CI

## c. Le couple Ca<sup>+2</sup> – Cl<sup>-</sup>

La représentation graphique de l'évolution des teneurs en calcium en fonction des teneurs en chlorure (Figure 43) montre une faible augmentation de la concentration en calcium avec celle



# Hydrochimie

des teneurs en chlorures, ceci est traduit par un coefficient de corrélation faible égale à 0.39.

A noter que le faciès chloruré calcique est présent dans deux points d'eau.

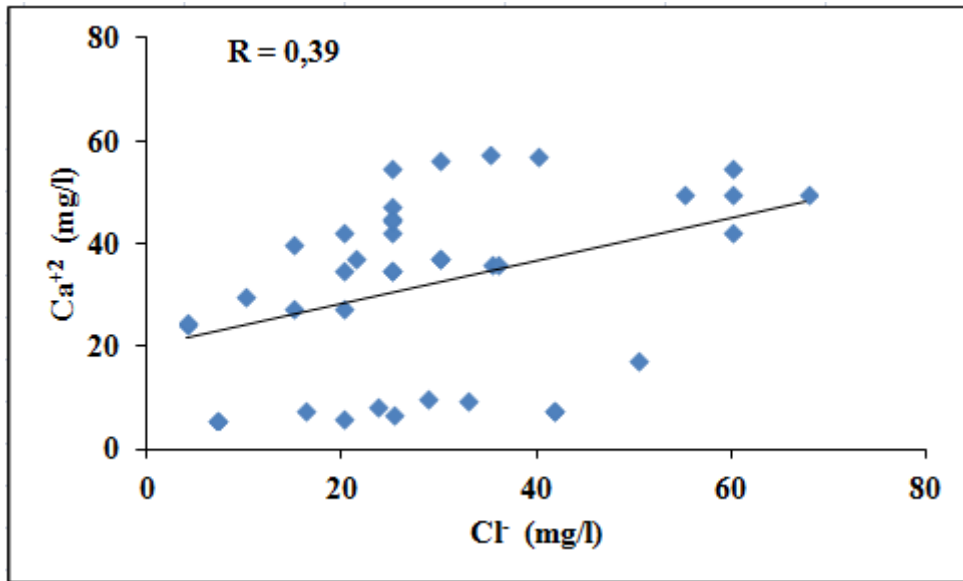


Figure 43 Courbe de corrélation  $\text{Ca}^{+2}$  vs  $\text{Cl}^-$  des eaux du CI

## 2.2.10. Indice d'échange de base (i.e.b)

L'indice d'échange de base (Schoeller, 1964) est le rapport entre les ions échangés et les ions de même nature primitivement existant dans l'eau. Les échanges se font entre les ions de l'eau et ceux des terrains traversés dans la zone saturée, ces interactions eau/roche peuvent produire une modification dans la nature de l'eau. L'indice d'échange de base (i.e.b) ou indice de déséquilibre chloro-alcalin (I.D.C) est obtenu par la formule suivante:

$$\text{i. e. b} = \frac{r\text{Cl}^- - r(\text{Na}^+ + \text{K}^+)}{r\text{Cl}^-} \dots \dots \dots (10)$$

- Si  $\text{i.e.b} < 0$  : Les ions  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$  de l'eau sont échangés contre les ions  $\text{Na}^+$  et  $\text{K}^+$  des formations encaissantes ;
- Si  $\text{i.e.b} = 0$  : Pas d'échange ionique ;
- Si  $\text{i.e.b} > 0$  : Les ions de  $\text{Na}^+$  et  $\text{K}^+$  de l'eau sont remplacés par les ions  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$  des formations encaissantes.

L'examen des données du Tableau 16 de l'i.e.b, montre que les valeurs oscillent entre -10.64 et 0,37. On constate qu'au niveau des points (F3, F23, et F31), les valeurs de l'i.e.b sont positives ceci indique le remplacement des ions de  $\text{Na}^+$  et  $\text{K}^+$  de l'eau par les ions  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$  des formations encaissantes, alors que le reste des points présentent des valeurs de i.e.b négatives à 0 indiquant ainsi qu'il y a un échange de base entre le calcium et le magnésium

# *Hydrochimie*

de l'eau de la nappe contre le sodium et le potassium des minéraux argileux des terrains traversés.

**Tableau 16 Indices d'échange de base des eaux de la nappe du CI**

<b>Forages</b>	<b>F1</b>	<b>F2</b>	<b>F3</b>	<b>F4</b>	<b>F5</b>	<b>F6</b>	<b>F7</b>	<b>F8</b>	<b>F9</b>
<b>i.e.b</b>	-10.64	-1.7	0.19	-2.8	-0.78	-1.71	-1.08	-1.99	-1.95
<b>F10</b>	<b>F11</b>	<b>F12</b>	<b>F13</b>	<b>F14</b>	<b>F15</b>	<b>F16</b>	<b>F17</b>	<b>F18</b>	<b>F19</b>
-1.85	-2.18	-0.93	-5.94	-0.93	-4.44	-1.7	-2.8	-10.7	-1.1
<b>F20</b>	<b>F21</b>	<b>F22</b>	<b>F23</b>	<b>F24</b>	<b>F25</b>	<b>F26</b>	<b>F27</b>	<b>F28</b>	<b>F29</b>
-2.15	-0.35	-2.35	0.37	-0.36	-3.12	-1.96	-0.8	-0.16	-0.036
<b>F30</b>	<b>F31</b>	<b>F32</b>	<b>F33</b>	<b>F34</b>	<b>F35</b>	<b>F36</b>	<b>F37</b>	<b>F38</b>	<b>F39</b>
-2	0.15	-0.24	-1	-2	-1.7	-1.15	-2.41	-1.8	-3

### 2.2.11. Indices de saturation

L'état thermodynamique du milieu aquifère par rapport à certains minéraux peut être déterminé par l'étude de leurs indices de saturation et d'équilibre. L'état de saturation (I.S) est défini par le logarithme du rapport des produits d'activité ionique (PAI) sur K la constante d'équilibre relative à la dissolution du minéral :

$$IS = \log \frac{P.A.I}{K} \dots\dots\dots (11)$$

Trois cas sont possibles :

- I.S = 0 : l'eau est saturée vis-à-vis de la calcite ;
- I.S > 0 : l'eau est sursaturée par rapport à la calcite ;
- I.S < 0 : il montre que l'eau est sous-saturée vis-à-vis de la calcite.

Les résultats figurés dans le tableau 17 montre que la moitié des échantillons d'eau analysées sont saturé à sursaturées vis-à-vis de la calcite, de la dolomite ce qui veut dire que la charge saline n'est pas influencée par l'interaction eau-minéraux carbonatés, alors les autres échantillons présentent des indices de saturation négatives ce qui indique une sous-saturation et par la suite une contribution à la charge saline par les minéraux carbonatés. Pour l'anhydrite et le gypse, les indices de saturation sont négatives ce qui indique que la charge saline est influencée par l'interaction des minéraux sulfatés (gypse et anhydrite), dont la dissolution contribue à l'acquisition des solutés et contrôle la minéralisation. Les résultats de calcul des différents indices de saturation sont obtenus en utilisant le programme Diagrammes V6.5, ils sont représentés dans le tableau 17 :

**Tableau 17 Indices de saturation des eaux du CI**

# *Hydrochimie*

<b>Forages</b>	<b>Calcite</b>	<b>Dolomite</b>	<b>Anhydrite</b>	<b>Gypse</b>
<b>F1</b>	0.18	0.28	-1.77	-1.55
<b>F2</b>	-0.04	-0.1	-2.39	-2.17
<b>F3</b>	-0.07	-0.01	-2.55	-2.33
<b>F4</b>	-0.41	-1	-2.14	-1.92
<b>F5</b>	0	-0.23	-2	-1.85
<b>F6</b>	0	-0.12	-2.42	-2.19
<b>F7</b>	-0.23	-0.62	-2.55	-2.33
<b>F8</b>	-0.2	-0.45	-2.19	-1.97
<b>F9</b>	-0.07	-0.32	-2.12	-1.97
<b>F10</b>	-0.016	-0.52	-2.56	-2.34
<b>F11</b>	0.06	0.41	-2.46	-2.24
<b>F12</b>	0.93	1.85	-1.72	-1.5
<b>F13</b>	-0.13	-0.38	-2.34	-2.12
<b>F14</b>	0.17	0.31	-2.48	-2.26
<b>F15</b>	-0.23	-0.44	-2.36	-2.14
<b>F16</b>	0.06	0.31	-2.33	-2.11
<b>F17</b>	-0.14	-0.27	-2.27	-2
<b>F18</b>	0.39	0.68	-2.63	-2.41
<b>F19</b>	0	0	-2.34	-2.12
<b>F20</b>	-0.37	-0.71	-2.41	-2.19
<b>F21</b>	0.18	0.54	-2.29	-2.1
<b>F22</b>	0	0.13	-2.5	-2.28
<b>F23</b>	-0.04	0.08	-2.36	-2.14
<b>F24</b>	-0.3	-0.42	-2.34	-2.12
<b>F25</b>	-0.2	-0.13	-2.36	-2.14
<b>F26</b>	-0.18	-0.34	-2.66	-2.44
<b>F27</b>	-0.25	-0.27	-2.37	-2.15
<b>F28</b>	-0.09	-0.1	-2.3	-2
<b>F29</b>	-0.14	-0.04	-2.34	-2.12
<b>F30</b>	0.15	0.28	-2.32	-2.1
<b>F31</b>	0.8	1.44	-2.52	-2.3
<b>F32</b>	0.19	0.57	-2.41	-2.19
<b>F33</b>	0.44	0.94	-2.31	-2.1
<b>F34</b>	0.81	1.76	-2.36	-2.14
<b>F35</b>	0.34	0.88	-2.27	-2.05
<b>F36</b>	-0.21	-0.3	-2.39	-2.17
<b>F37</b>	-0.46	-0.81	-1.86	-1.64
<b>F38</b>	-0.44	-0.95	-2.51	-2.29
<b>F39</b>	0.05	0.02	-2.46	-2.24

## **a. Corrélations des indices de saturation**

# Hydrochimie

Nous allons nous intéresser à la variation des indices de saturation l'un par rapport à l'autre. Nous remarquons au niveau des deux graphes (Figure 44) que, les indices s'alignent suivant une droite avec des coefficients de corrélation très élevés, ce qui démontre que les formations carbonatées, sont attaquées par les eaux (dissolution), donnant ainsi les deux minéraux provoquant la salinité observée.

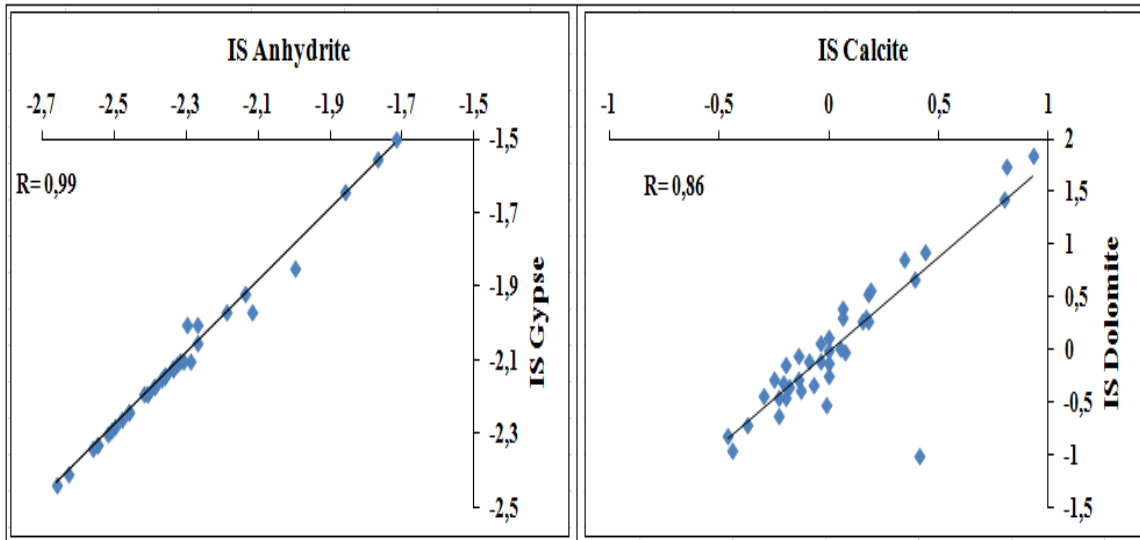


Figure 44 Corrélation entre les indices de saturation

## 2.3. La nappe phréatique

### 2.3.1. Potentiel d'Hydrogène (pH)

L'histogramme de la variation du pH des eaux de la nappe phréatique (Figure 45) montre des valeurs du pH qui oscillent entre 6.97 et 8.58. La moyenne des valeurs égale à 7.96.

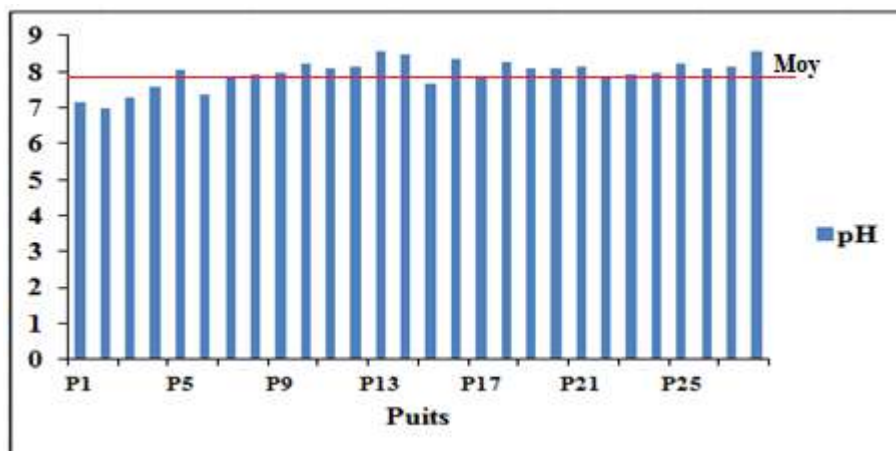
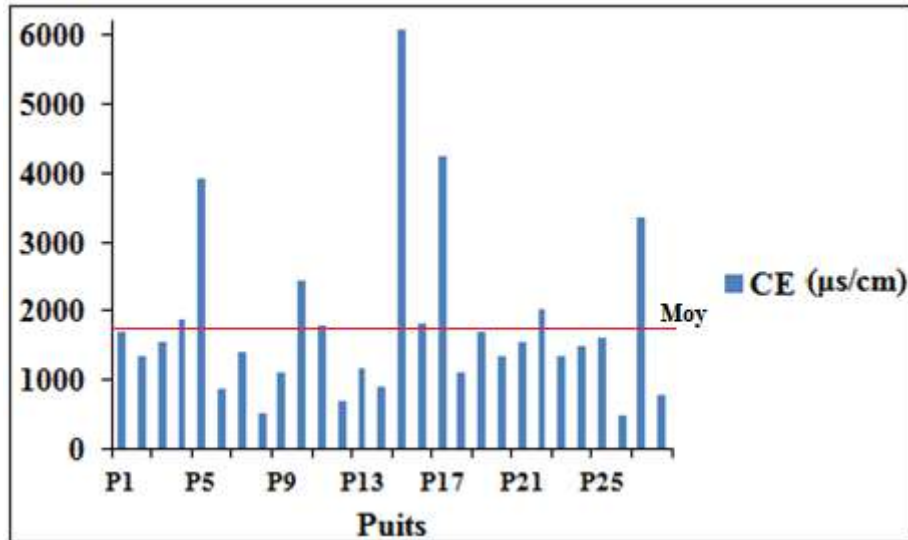


Figure 45 Histogramme de variation du pH dans les puits de la nappe phréatique dans la région d'El Menia

# Hydrochimie

## 2.3.2. Conductivité électrique (CE)

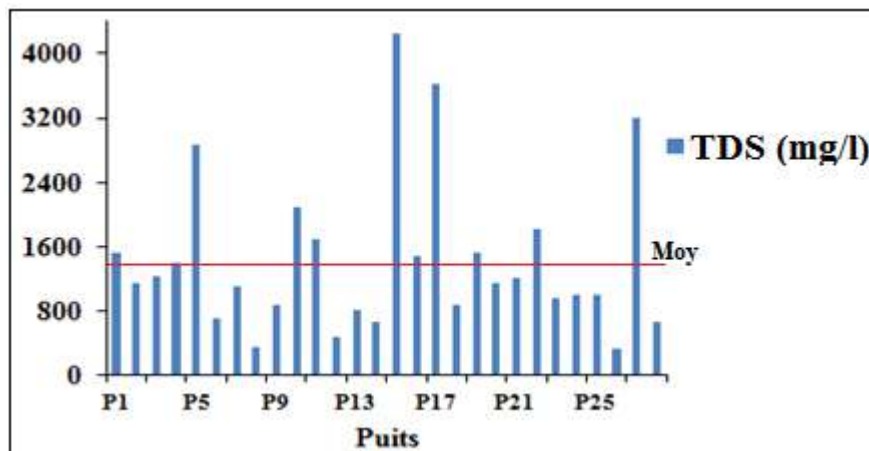
Dans leur majorité, Les eaux de la nappe phréatique (Figure 46) présentent des valeurs de la CE assez forte, elle dépasse la valeur recommandée par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) (1500  $\mu\text{s}/\text{cm}$ ), elle varie entre 483 et 6070 $\mu\text{s}/\text{cm}$ , avec une moyenne de 1793 $\mu\text{s}/\text{cm}$



**Figure 46** Histogramme de variation de la CE dans les puits de la nappe phréatique dans la région d'El Menia

## 2.3.3. TDS (Total Dissolved Sels)

L'historgramme de variation des TDS dans les eaux de la nappe phréatique (Figure 47) montre contrairement aux eaux de la nappe du CI, des valeurs dépassent la norme recommandée par l'OMS (1000 mg/l), la plus faible valeur égale à 339 mg/l, la valeur la plus forte est de 4250 mg/l. La moyenne égale à 1430.23 mg/l.



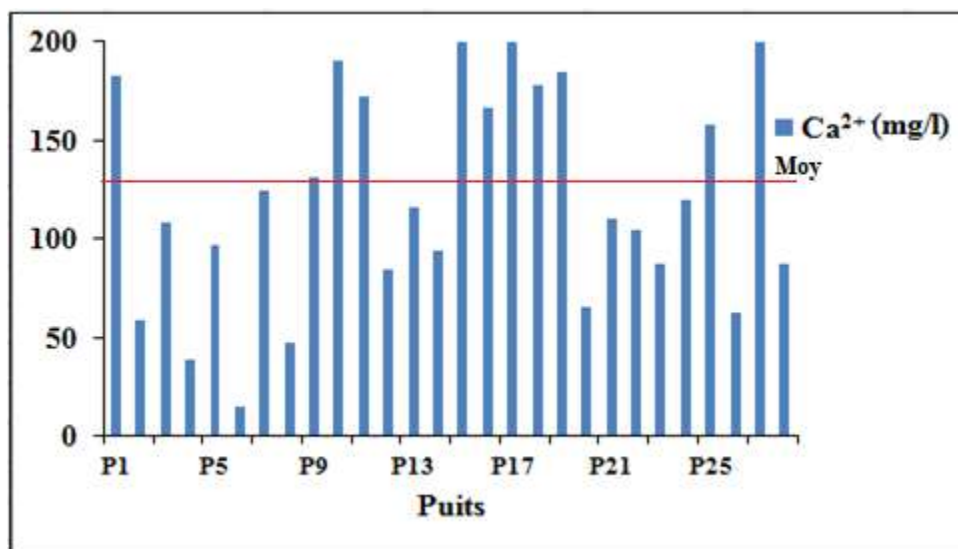
**Figure 47** Histogramme de variation des résidus sec dans les puits de la nappe phréatique dans la région d'El Menia

# Hydrochimie

## 2.3.4. Cations

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

L'ensemble des échantillons des eaux de la nappe phréatique dans la région d'El Menia (Figure 48) présentent des valeurs de calcium qui dépassent largement la valeur recommandée par l'OMS (75 mg/l), les valeurs varient entre 14.83 et 271.3 mg/l, avec une moyenne égale à 126.46 mg/l.



**Figure 48 Histogramme de variation des teneurs en calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) dans les puits de la nappe phréatique dans la région d'El Menia**

### b. Sodium ( $\text{Na}^+$ )

Dans les eaux de la nappe phréatique, la moitié des valeurs du sodium ( $\text{Na}^+$ ) dépasse la valeur guide recommandée par l'OMS (200 mg/l), elles sont comprises entre 41.3 et 722.5 mg/l avec une moyenne de 244.94 mg/l (Figure 49).

# Hydrochimie

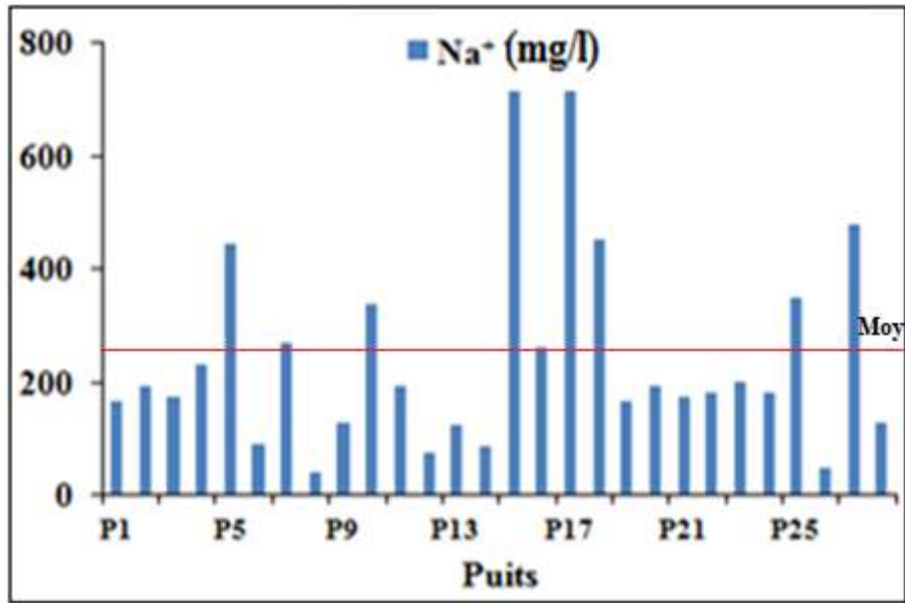


Figure 49 Histogramme de variation des teneurs en sodium ( $\text{Na}^+$ ) dans les puits de la nappe phréatique dans la région d'El Menia

## c. Magnésium ( $\text{Mg}^{2+}$ )

L'histogramme de la variation des teneurs du magnésium dans les eaux de la nappe phréatique (Figure 50) montre des valeurs variant entre 25.6 et 275.66 mg/l, à noter que la moitié des valeurs dépasse la valeur guide de l'OMS (50 mg/l). La moyenne est égale à 75.35 mg/l.

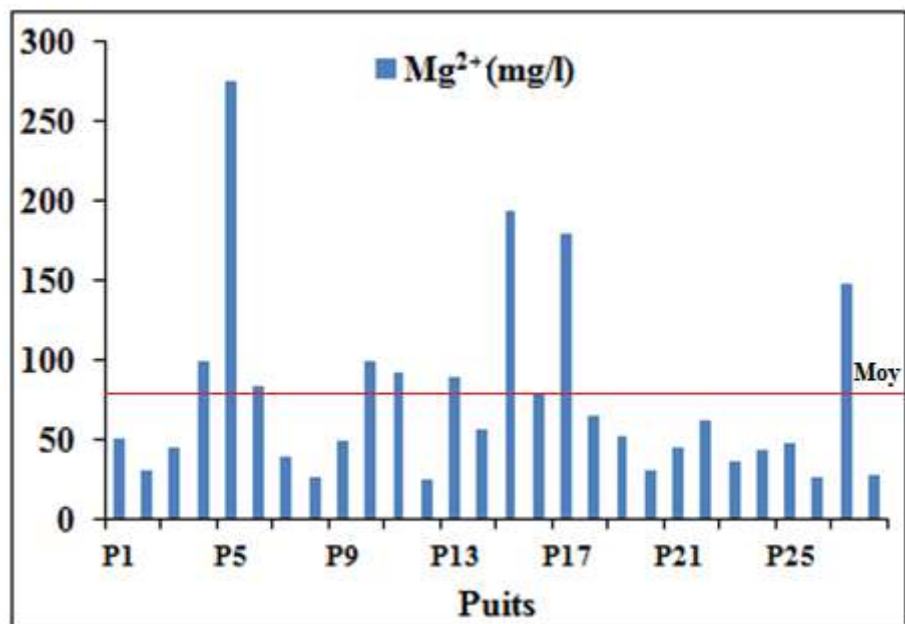


Figure 50 Histogramme de variation des teneurs en magnésium ( $\text{Mg}^{2+}$ ) dans les puits de la nappe phréatique dans la région d'El Menia

# Hydrochimie

## d. Potassium ( $K^+$ )

Les teneurs du Potassium dans les eaux de la nappe phréatique sont moyennes à élevées et qui dépassent la norme internationale (12 mg/l) dans quelques puits (Figure 51), elles varient entre 9.3 et 104.5 mg/l avec une moyenne égale à 30.47 mg/l.

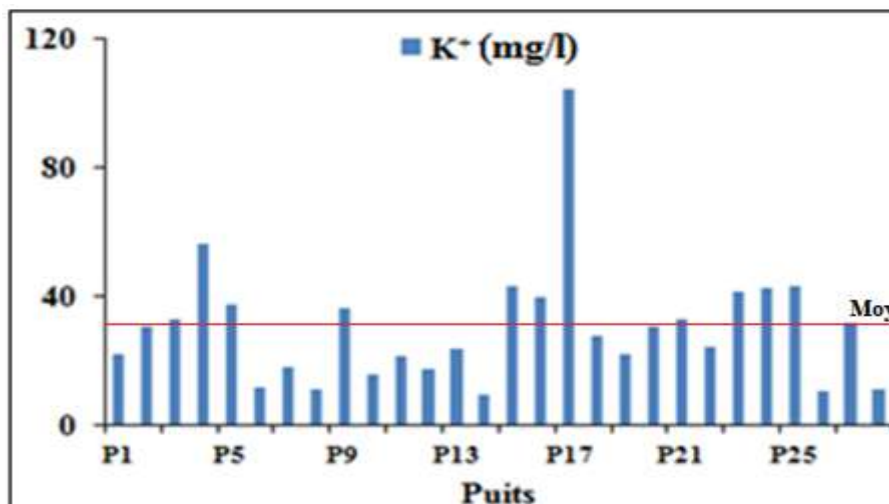


Figure 51 Histogramme de variation teneurs en potassium ( $K^+$ ) dans les puits de la nappe phréatique dans la région d'El Menia

## 2.3.5. Anions

### a. Chlorures ( $Cl^-$ )

En général, les teneurs des chlorures dans les eaux de la nappe phréatique (Figure 52) présentent des valeurs qui respectent la valeur guide recommandée par l'OMS (250 mg/l) sauf dans quelques puits, la plus faible valeur est de 25 mg/l et la plus grande valeur est égale à 725 mg/l. La moyenne égale à 201.98 mg/l.

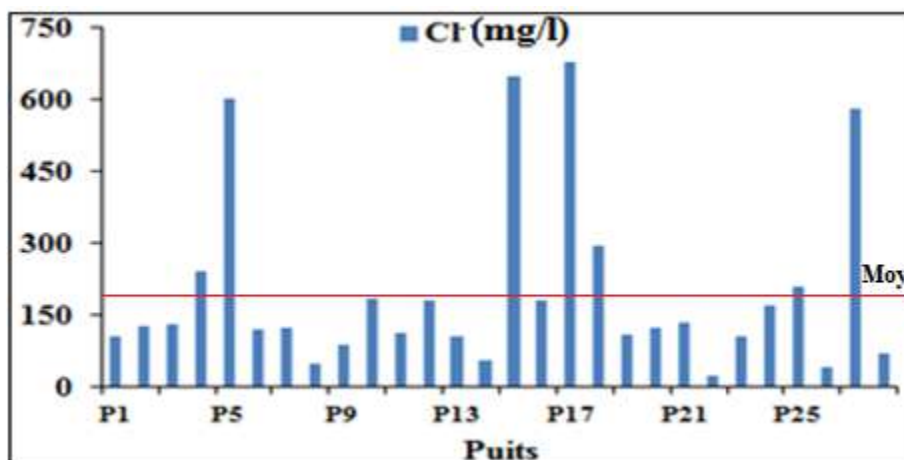


Figure 52 Histogramme de variation des teneurs en chlorures ( $Cl^-$ ) dans les puits de la nappe phréatique dans la région d'El Menia



# Hydrochimie

## b. Les Bicarbonates ( $\text{HCO}_3^-$ )

L'histogramme des variations des teneurs des bicarbonates dans les eaux de la nappe phréatique (Figure 53) montre des valeurs qui dépassent largement la valeur guide recommandée par l'OMS (120 mg/l), elles sont comprises entre 201.3 et 1271.85 mg/l avec une moyenne de 499.22 mg/l.

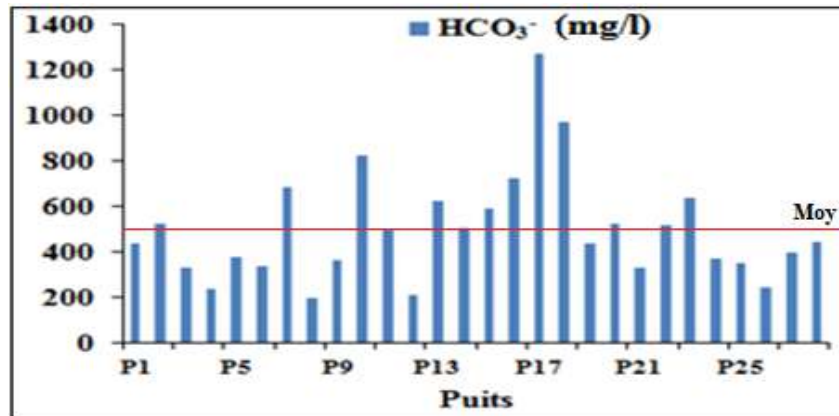


Figure 53 Histogramme de variation des teneurs en bicarbonates ( $\text{HCO}_3^-$ ) dans les puits de la nappe phréatique dans la région d'El Menia

## c. Sulfates ( $\text{SO}_4^{2-}$ )

Les concentrations des sulfates ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) de la nappe phréatique varient entre 70 et 1675 mg/l (Figure 54). La valeur maximale est observée au niveau du puits P12, alors que la valeur minimale est enregistrée au niveau du puits P15, la majorité des puits présentent des valeurs supérieures à la valeur guide recommandée par l'OMS (250 mg/l). La moyenne est de 469.88 mg/l.

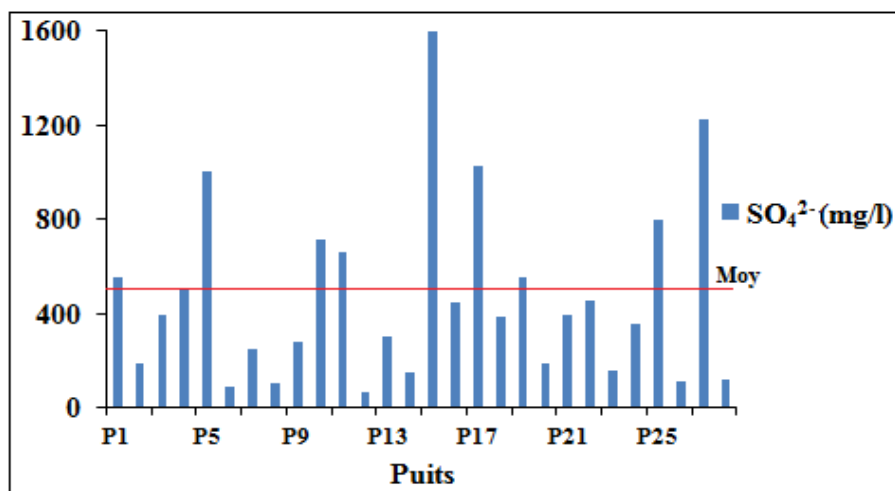
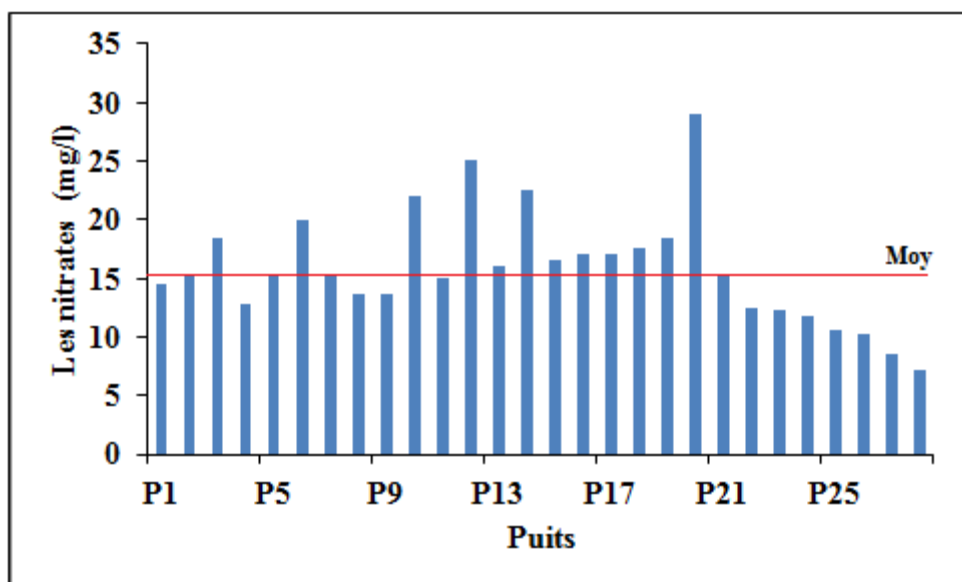


Figure 54 Histogramme de variation des teneurs en sulfates ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) dans les puits de la nappe phréatique dans la région d'El Menia

## 2.3.6. Substances indésirables

### A. Nitrates ( $\text{NO}_3^-$ )

L'ion nitrate est la forme oxydée de l'azote, les sources naturelles de nitrate sont principalement la pluie et les interactions avec le sol et la végétation, l'origine artificielle des nitrates sont les contaminations par des engrais et les rejets domestiques. Ils peuvent être utilisés comme indicateurs de pollution chimique des eaux. Plusieurs auteurs (Antonakos et Lambrakis, 2000) relient la présence des nitrates dans les eaux en plus du cycle normal de l'azote, à différentes sources à savoir : les engrais chimiques organiques et inorganiques, les pesticides et les herbicides, les installations d'élevages des animaux, les effluents domestiques et industriels (eaux usées). Dans les eaux de la nappe phréatique, les teneurs en nitrates sont faibles avec des valeurs nulles dans plusieurs puits, elles varient entre 5.88 et 29 mg/l avec une moyenne de 15.31 mg/l (Figure 55).



**Figure 55** Histogramme de variation des teneurs en nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ) dans les puits de la nappe phréatique dans la région d'El Menia

## 2.3.7 Classification chimique des eaux de la nappe phréatique

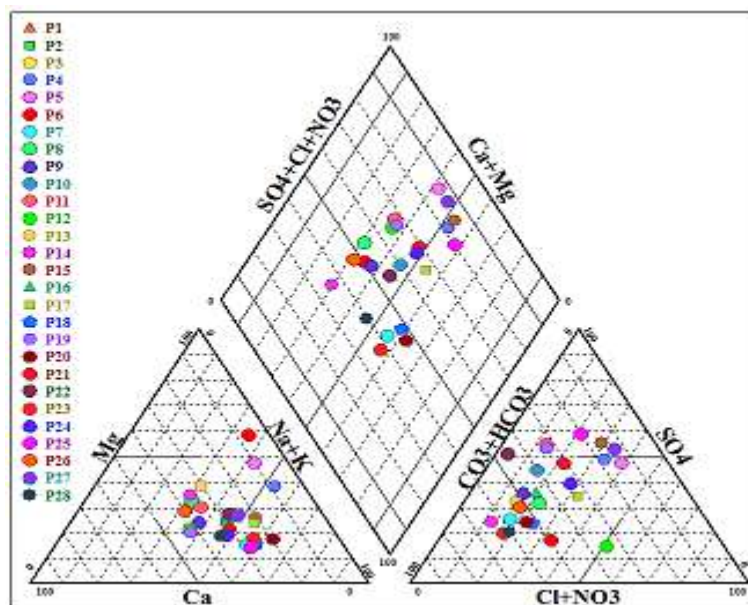
### a. Représentation graphique des eaux sur le diagramme de Piper

Après plusieurs visites de terrain, on a pu choisir 28 puits couvrant la totalité de la région et en se concentrant sur les zones les plus vulnérables à la salinisation des eaux. Ces puits sont destinés principalement à des fins domestiques et agricoles. Les résultats d'analyses des éléments majeurs ont été représentés sur le diagramme de Piper (Piper, 1944) (Figure 56). Ces faciès hydrochimiques indiquent une origine lithologique caractérisée par la dissolution des roches évaporitiques riches en gypse ( $\text{CaSO}_4$ ) et halite ( $\text{NaCl}$ ) et carbonatées (calcaire et

# Hydrochimie

dolomie)(Fedrigoni et al., 2001; Belksier et al., 2016). Selon la classification de Piper, les eaux de la nappe phréatique d'El Menia sont classées en 4 faciès hydrochimiques:

- Eau de type Cl-SO<sub>4</sub>-Ca(Mg) présent dans 14 puits, soit 50% des échantillons ;
- Eau de type Cl-Na(K) présent dans 4 puits, soit 14.28% des échantillons ;
- Eau de type HCO<sub>3</sub>-Ca-(Mg) présent dans 5 puits, soit 17.85% des échantillons ;
- Eau de type HCO<sub>3</sub>-Na(K) présent dans 5 puits soit 17.85% des échantillons.



**Figure 56 Représentation des analyses chimiques de la nappe phréatique sur le diagramme de Piper**

## 2.3.8. Aptitude des eaux de la nappe phréatique à l'irrigation

Après avoir reportés tous les points d'eau sur le diagramme de Richards (Figure 57), on peut dire que plus 80% de ces points d'eau ont une qualité admissible avec deux points d'eau qui ont une bonne qualité et cinq points qui ont une qualité mauvaise voir même très mauvaise pour l'irrigation. Ces points d'eau s'arrangent selon les classes suivantes:

- C2-S1: Les eaux de cette classe sont des eaux de bonne qualité, son utilisation est autorisée sans aucun contrôle. Cette classe est représentée par trois points d'eau;
- C3-S1, C3-S2: Ces deux classes présentent une eau de qualité admissible, convenant à l'irrigation. Cependant un contrôle de l'évolution de la salinité est recommandé. Vingt points d'eau issue à cette classe soit 71.42% du total;
- C4-S2 : Cette classe est caractérisée par une qualité d'eau médiocre et fortement minéralisée, pouvant convenir à l'irrigation de certaines espèces, trois points d'eau ont issue à cette classe;

# Hydrochimie

- C4-S3, C5-S3: Ces deux classes présentent une eau de mauvaise qualité et ne convient pas à l'irrigation sauf sous certaines conditions. Ces deux classes sont représentées par deux puits, un puits pour chaque classe.

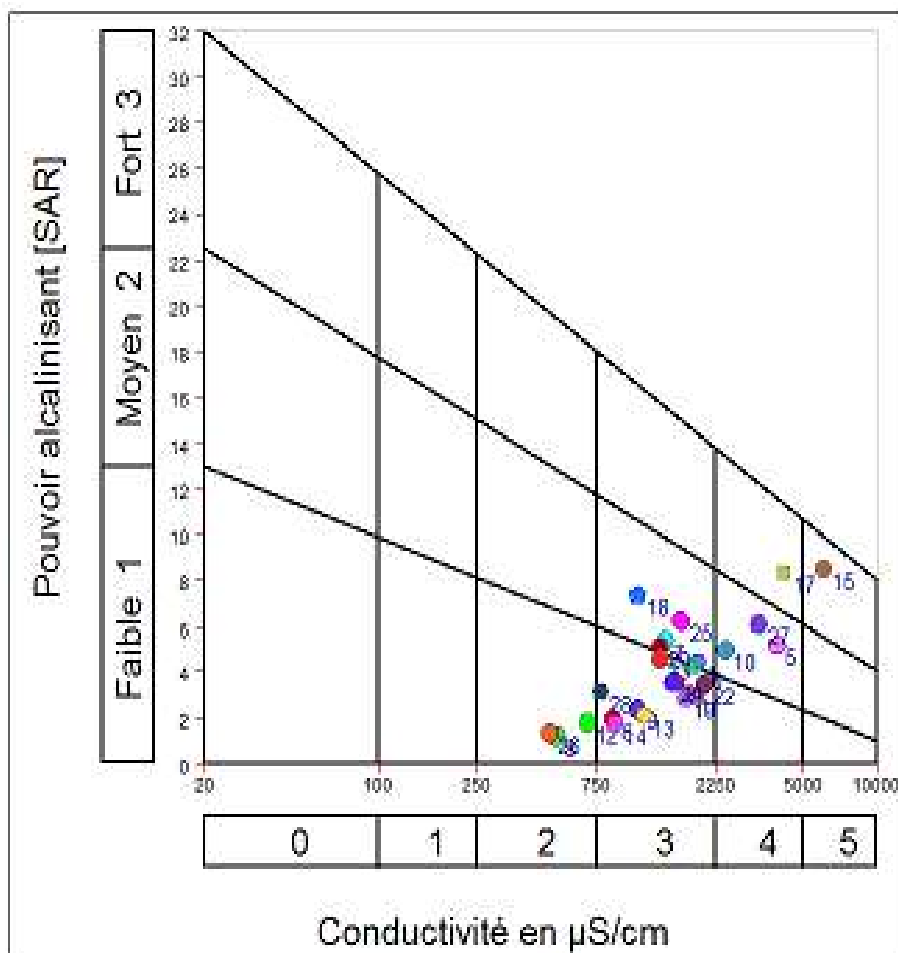


Figure 57 Diagramme de Riverside des eaux de la nappe phréatique dans la région d'El Menia

## 2.3.9. Origine de la salinité des eaux

### 2.3.9.1. Traitement et analyse statistique des données hydrochimiques des eaux de la nappe phréatique

Comme le cas de la nappe du CI, on a utilisé le logiciel XLStat sous Excel (<https://www.xlstat.com/en/>) pour traiter les données hydrochimiques et la préparation des données se fait en présentant les variables en colonnes et les individus en lignes.

Le tableau statistique (Tableau 18) est établi sur la base des données issues des analyses physico-chimiques des eaux de la nappe phréatique.

Tableau 18 Statistiques élémentaires des paramètres physico-chimiques de la nappe phréatique

# *Hydrochimie*

Elément (mg/l)	Nb. d'observations	Min	Max	Moy	Ecarte-type
CE ( $\mu\text{s/cm}$ )	28	483	6070	1793.07	1236.94
TDS	28	339	4250	1430.23	972.55
$\text{HCO}_3^-$	28	201.3	1271.85	499.22	238.44
$\text{Cl}^-$	28	25	725	201.98	192.61
$\text{NO}_3^-$	28	5.88	29	15.31	6.34
$\text{SO}_4^{2-}$	28	70	1675	469.87	386.66
$\text{Na}^+$	28	41.3	745.5	244.94	180.15
$\text{K}^+$	28	9.3	104.5	30.47	18.95
$\text{Ca}^{2+}$	28	14.84	271.3	126.46	65.57
$\text{Mg}^{2+}$	28	25.6	275.66	75.34	59.11

## 2.3.9.2. Analyse en composantes principales (ACP)

### A. Matrice de corrélation

La corrélation est une méthode statistique bivariée appliquée pour décrire la relation entre les éléments hydrochimiques; un coefficient de corrélation élevé (proche de  $\pm 1$ ) signifie une bonne relation entre deux variables. Des valeurs proches de 0 signifient qu'il n'y a pas de relation entre elles. Au total 28 échantillons d'eau de la nappe phréatique de la région d'El Menia ont été examinés. La matrice de corrélation (Tableau 19) montre une très forte corrélation entre la CE et la majorité des éléments chimiques sauf les nitrates et les bicarbonates où l'on observe une faible corrélation positive avec les bicarbonates et une faible corrélation négative avec les nitrates.

**Tableau 19 Matrice de corrélation des éléments chimiques calculée sur l'ensemble des échantillons de la nappe phréatique dans la région d'El Menia**

Variables	CE ( $\mu\text{s/cm}$ )	TDS	$\text{HCO}_3^-$	$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{NO}_3^-$	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$
CE ( $\mu\text{s/cm}$ )	1									
TDS	<b>0.98</b>	1								
$\text{HCO}_3^-$	0.37	<b>0.42</b>	1							
$\text{Cl}^-$	<b>0.88</b>	<b>0.87</b>	<b>0.4</b>	1						
$\text{SO}_4^{2-}$	<b>0.94</b>	<b>0.93</b>	0.28	<b>0.84</b>	1					
$\text{NO}_3^-$	-0.37	<b>-0.41</b>	-0.31	-0.26	-0.37	1				
$\text{Na}^+$	<b>0.89</b>	<b>0.88</b>	<b>0.62</b>	<b>0.91</b>	<b>0.87</b>	-0.33	1			
$\text{K}^+$	<b>0.57</b>	<b>0.57</b>	<b>0.49</b>	<b>0.66</b>	<b>0.49</b>	-0.23	<b>0.67</b>	1		
$\text{Ca}^{2+}$	<b>0.69</b>	<b>0.74</b>	<b>0.59</b>	<b>0.62</b>	<b>0.78</b>	<b>-0.4</b>	<b>0.77</b>	<b>0.44</b>	1	
$\text{Mg}^{2+}$	<b>0.85</b>	<b>0.83</b>	0.29	<b>0.86</b>	<b>0.80</b>	-0.28	<b>0.75</b>	<b>0.46</b>	<b>0.47</b>	1

pvalue = 0.05

### b. Diagonalisation de la matrice de corrélation

La diagonalisation de la matrice de corrélation a permis de calculer les facteurs de charges, les deux premiers axes, pris en considération pour décrire la corrélation des

# Hydrochimie

variables, détiennent à eux seuls 63.43 % de l'information totale avec, respectivement 67.57 % pour l'axe F1 et 10.92 % pour l'axe F2 (Figure 58).

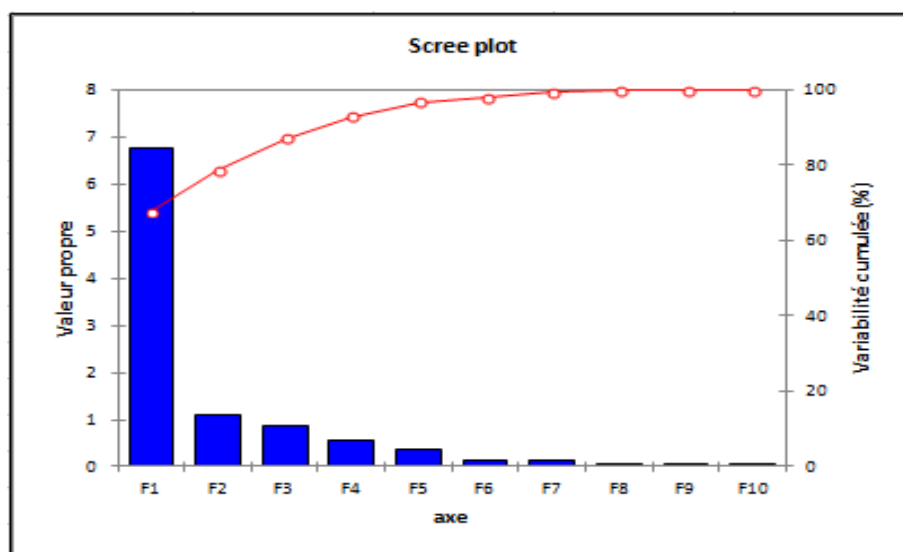


Figure 58 Valeurs propres des facteurs de charges

## c. Cercle des corrélations et projection des variables

L'examen du cercle de corrélation tracé sur le plan des axes factoriels F1 et F2, montre une bonne répartition des paramètres étudiés. En effet, les deux premiers axes F1 et F2 expriment respectivement 67.57% et 10.92% de la variance totale. L'axe principale F1, est représenté par les éléments suivants : CE,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ , et TDS dans son pôle positif, et par le nitrate dans son pôle négatif. Cela signifie que l'association des éléments cités ci-dessus représente l'axe de la minéralisation, alors que les nitrates ont une origine anthropique due à l'utilisation des engrais dans l'agriculture qui représente la principale activité de la population. Le deuxième axe F2 est défini par les bicarbonates dans son pôle positif (Figure 59).

# Hydrochimie

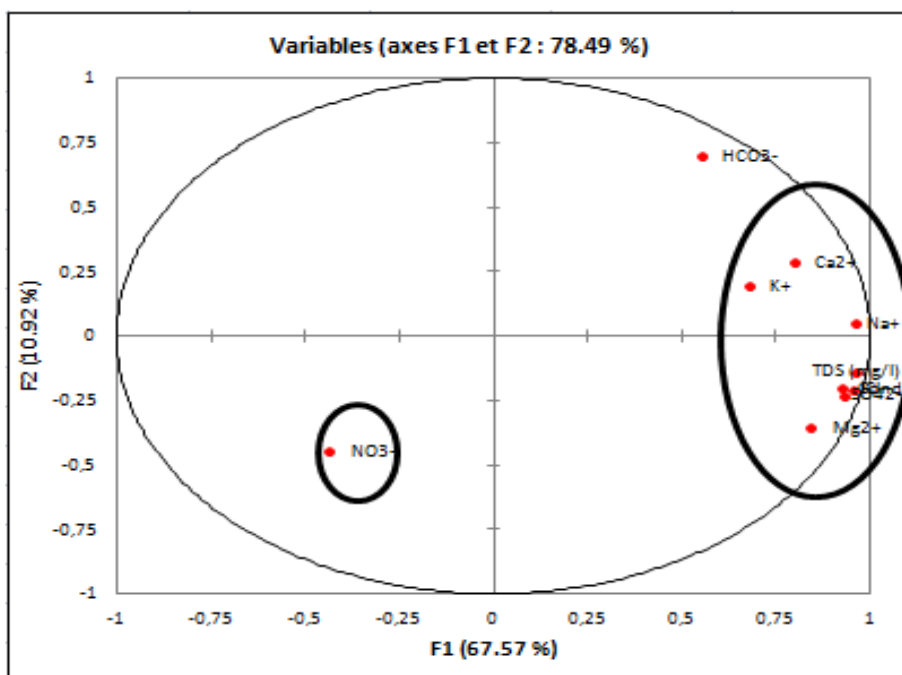


Figure 59 Cercles de corrélation sur le plan des facteurs F1-F2 des eaux de la nappe phréatique

## 2.3.10. Rapports caractéristiques pour les eaux de la nappe phréatique

### a. Relations entre TDS et les cations

L'examen de la figure 60 montre bien la forte corrélation entre le TDS et les cations avec des coefficients de corrélation variant entre 0.56 pour le potassium et 0.88 pour le sodium, cette forte corrélation pourrait confirmer la contribution de ces cations dans la minéralisation des eaux de la nappe phréatique.

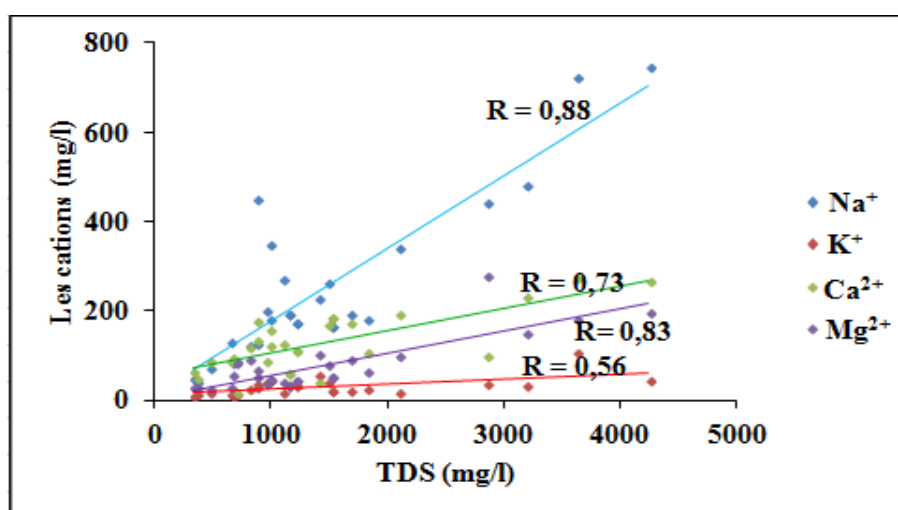


Figure 60 Courbes de corrélations entre les cations et le TDS des eaux de la nappe phréatique

## b. Relations entre TDS et les anions

D'après la représentation graphique de l'évolution des anions en fonctions de TDS (Figure 61), on peut constater que ces anions ont aussi une contribution à la minéralisation des eaux de la nappe phréatique vus les forts coefficients de corrélation qui varient entre 0.43 pour les bicarbonates et 0.93 pour les sulfates. Le faible coefficient entre les bicarbonates et le TDS peut être expliqué par la formation de ces bicarbonates à partir du gaz carbonique.

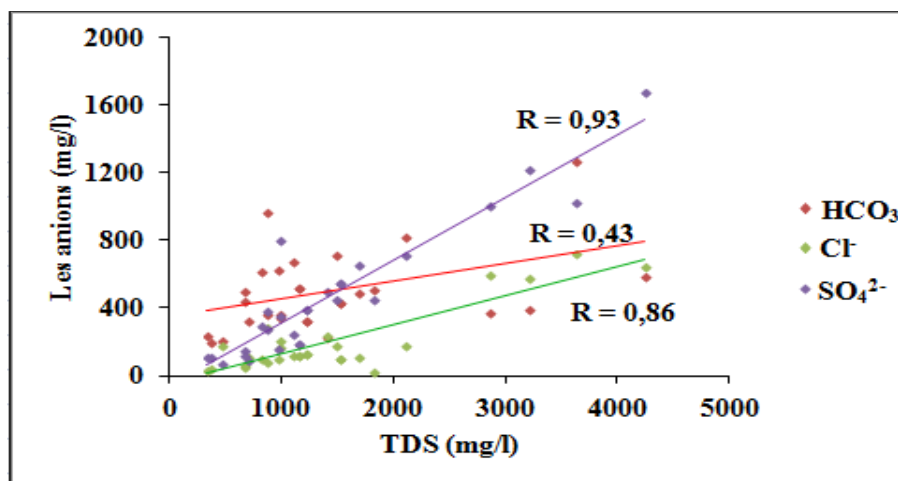


Figure 61 Courbes de corrélations entre les anions et le TDS des eaux de la nappe phréatique

## c. Le couple Na<sup>+</sup> - Cl<sup>-</sup>

Ces deux ions sont souvent liés à la dissolution de l'halite (NaCl). La représentation graphique de l'évolution des teneurs en sodium en fonction des concentrations en chlorures (Figure 62), montre une répartition fortement linéaire des données avec un coefficient de corrélation très élevé de l'ordre de 0.91 indiquant l'origine chlorurée-sodique commune (halite) de ces deux éléments chimiques (Zahi, 2014). L'existence du faciès chloruré sodique confirme cette hypothèse



# Hydrochimie

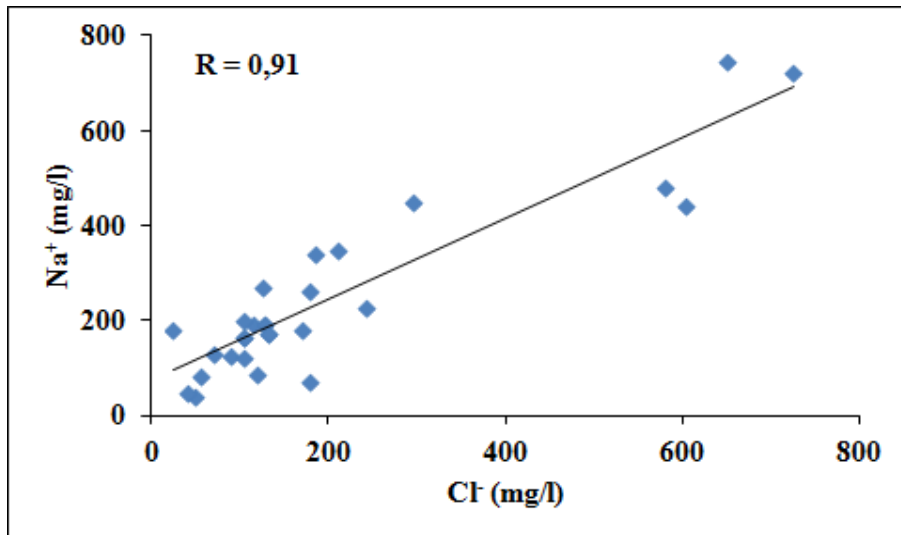


Figure 62 Relation entre Na<sup>+</sup> et Cl<sup>-</sup> des eaux de la nappe phréatique

## d. Le couple Ca<sup>2+</sup> - SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>

Dans cette figure qui représente l'évolution des calciums en fonction des sulfates, on observe l'alignement de la majorité des points sur la droite de régression indiquant ainsi l'origine évaporitiques du calcium par la dissolution des gypses et anhydrites présents en abondance dans cette oasis.

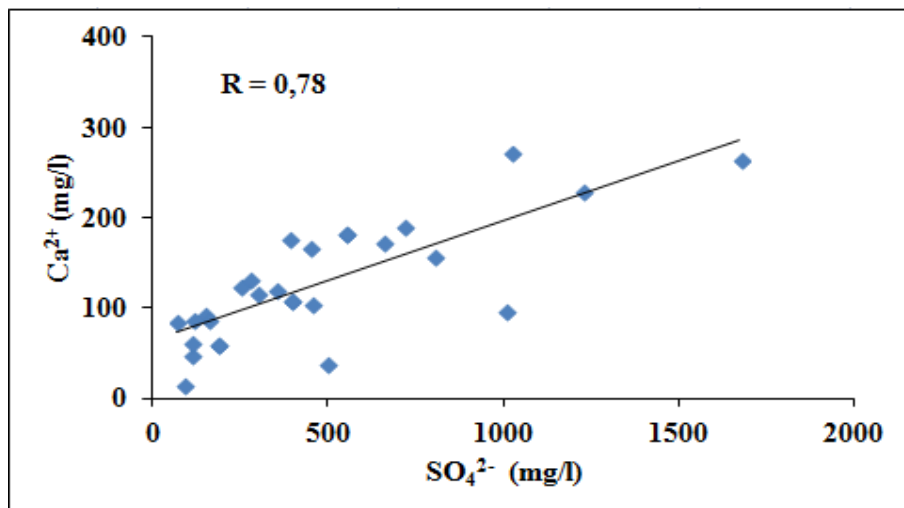


Figure 63 Relation entre Ca<sup>2+</sup> et SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> des eaux de la nappe phréatique

## 2.3.11. Indice d'échange de base (i.e.b)

L'examen des données du Tableau 20 de l'i.e.b des eaux de la nappe phréatique, montrent que les valeurs oscillent entre -11,14 et 0,28. On constate qu'au niveau du puits P12, la valeur de l'i.e.b est positive ceci indique le remplacement des ions de Na<sup>+</sup> et K<sup>+</sup> de l'eau par les ions Ca<sup>2+</sup> et Mg<sup>2+</sup> des formations encaissantes, alors que le reste des points présentent

# *Hydrochimie*

des valeurs de i.e.b négatives à 0 indiquant ainsi qu'il y a un échange de base entre le calcium et le magnésium de l'eau de la nappe contre le sodium et le potassium des minéraux argileux des terrains traversés.

**Tableau 20 Indice d'échange de base des eaux de la nappe phréatique**

<b>Puits</b>	<b>P1</b>	<b>P2</b>	<b>P3</b>	<b>P4</b>	<b>P5</b>	<b>P6</b>	<b>P7</b>	<b>P8</b>	<b>P9</b>
<b>i.e.b</b>	-1.65	-1.55	-1.27	-0.67	-0.19	-0.23	-2.48	-0.48	-1.55
<b>P10</b>	<b>P11</b>	<b>P12</b>	<b>P13</b>	<b>P14</b>	<b>P15</b>	<b>P16</b>	<b>P17</b>	<b>P18</b>	<b>P19</b>
-1.91	-1.76	0.28	-1.04	-1.57	-0.83	-1.45	-0.67	-1.45	-1.65
<b>P20</b>	<b>P21</b>	<b>P22</b>	<b>P23</b>	<b>P24</b>	<b>P25</b>	<b>P26</b>	<b>P27</b>	<b>P28</b>	
-1.55	-1.27	-11.14	-2.32	-0.88	-1.76	-1.16	-0.33	-2	

### 2.3.12. Indices de saturation

L'examen du tableau 21 montre que la calcite et la dolomite ont des indices de saturation positifs dans la plupart des puits, ce qui indique une sursaturation vis-à-vis ces deux minéraux et une tendance à se précipiter. La cause principale de cette précipitation peut être expliquée par l'aridité qui caractérise la zone d'étude, une intense évaporation allant jusqu'à 3283 mm/an, et une faible précipitation annuelle de 20 mm. Pour le gypse et l'anhydrite, l'ensemble des valeurs de l'indice de saturation sont négatives indiquant ainsi une sous-saturation vis-à-vis ces deux minéraux. En effet, l'acquisition de la minéralisation des eaux de cette nappe phréatique peut être due à la dissolution de ces minéraux.

**Tableau 21 Indices de saturation des eaux de la nappe phréatique**

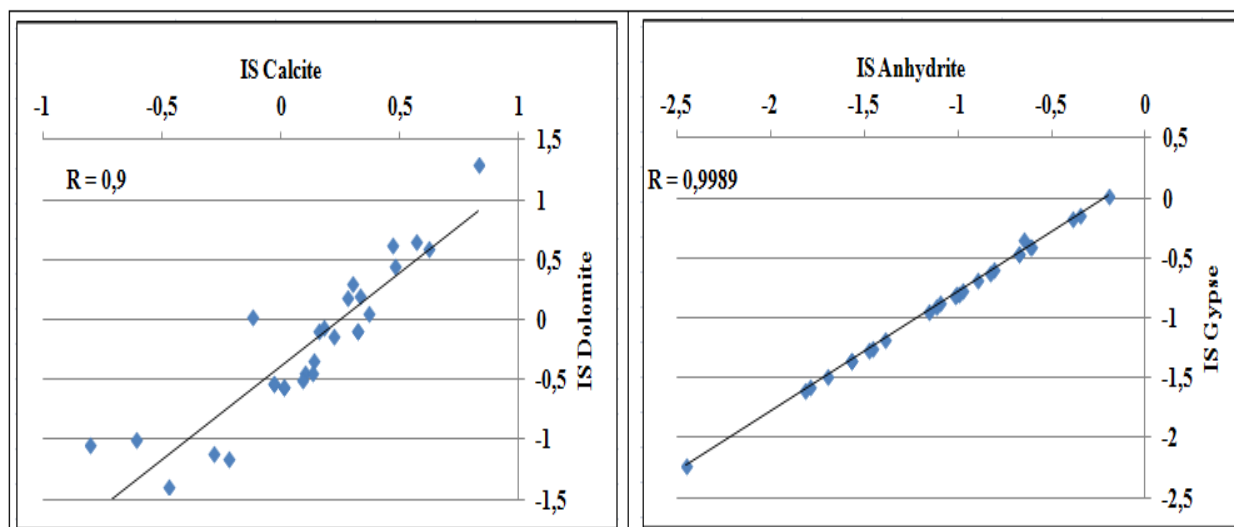
<b>Puits</b>	<b>IS Calcite</b>	<b>IS Gypse</b>	<b>IS Dolomite</b>	<b>IS Anhydrite</b>
<b>P1</b>	0.32	-0.46	-0.09	-0.68
<b>P2</b>	-0.03	-1.35	-0.53	-1.57
<b>P3</b>	0.01	-0.79	-0.56	-1
<b>P4</b>	-0.61	-1.17	-1	-1.39
<b>P5</b>	-0.12	-0.59	0.03	-0.81
<b>P6</b>	-0.8	-2.23	-1.04	-2.45
<b>P7</b>	0.37	-0.94	0.06	-1.16
<b>P8</b>	-0.47	-1.59	-1.39	-1.82
<b>P9</b>	0.14	-0.86	-0.34	-1.1
<b>P10</b>	0.57	-0.39	0.66	-0.61
<b>P11</b>	0.33	-0.43	0.2	-0.65
<b>P12</b>	-0.22	-1.57	-1.16	-1.79
<b>P13</b>	0.3	-0.9	0.3	-1.12
<b>P14</b>	0.16	-1.24	-0.09	-1.46
<b>P15</b>	0.47	0.02	0.62	-0.2

# *Hydrochimie*

<b>P16</b>	0.48	-0.61	0.45	-0.83
<b>P17</b>	0.83	-0.17	1.29	-0.39
<b>P18</b>	0.62	-0.68	0.6	-0.9
<b>P19</b>	0.32	-0.46	-0.09	-0.68
<b>P20</b>	-0.03	-1.35	-0.53	-1.57
<b>P21</b>	0.01	-0.79	-0.56	-1.01
<b>P22</b>	0.18	-0.76	-0.06	-0.98
<b>P23</b>	0.22	-1.26	-0.13	-1.48
<b>P24</b>	0.1	-0.8	-0.45	-1.02
<b>P25</b>	0.13	-0.4	-0.44	-0.62
<b>P26</b>	-0.28	-1.48	-1.12	-1.7
<b>P27</b>	0.28	-0.13	0.18	-0.35
<b>P28</b>	0.09	-1.35	-0.5	-1.57

## a. Corrélations des indices de saturation

Comme le cas de la nappe du CI, nous remarquons au niveau des deux graphes (Figure 64) que, les indices s'alignent suivant une droite avec des coefficients de corrélation très élevés, ce qui prouve que les formations évaporitiques (gypse et anhydrite), sont attaquées par les eaux (dissolution), donnant ainsi les deux minéraux provoquant la salinité observée.



**Figure 64** Corrélation entre les indices de saturation

## 3. Conclusion

D'après cette étude hydrochimique, on conclue que les eaux de la nappe phréatique ont une forte concentration des anions et des cations par rapport à celle des eaux du Continental Intercalaire (CI) dans cette oasis. Les eaux du CI sont dominées par le faciès bicarbonaté sodiques, calciques et magnésiens, pour la nappe phréatique, les faciès dominants

## *Hydrochimie*

---

sont le chloruré calcique et sodique et à moindre degré par les faciès bicarbonatés calcique et sodique. Pour la qualité des eaux à usage agricole et selon la classification de Riverside, on constate que les eaux de la nappe du CI ont une bonne qualité contrairement aux eaux de la nappe phréatique qui présentent généralement une qualité médiocre avec la présence de quelques puits qui présentent une bonne qualité.

L'application de l'analyse statistique des données monovariées et multivariées avec l'ACP sur les paramètres physico-chimiques des eaux de la nappe du CI montre que ces eaux ont une faible minéralisation représentée par : CE, Chlorures ( $\text{Cl}^-$ ), Potassium ( $\text{K}^+$ ), Sodium ( $\text{Na}^+$ ) et TDS, pour les eaux de la nappe phréatique, la minéralisation est beaucoup plus forte que celle des eaux de la nappe du CI, elle est représentée par CE,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , et TDS.

L'examen des indices de saturation pour les eaux des deux nappes (CI + phréatique) prouve que la dissolution des roches carbonates est le responsable de la salinité des eaux du CI, alors que la dissolution des évaporites est à l'origine de la forte de minéralisée observée dans les eaux de la nappe phréatique.

# ***Chapitre 05 : Pédologie***

## **1. Introduction**

La présence des sels hydrosolubles dans le sol est conditionnée par l'apparition d'un ensemble de facteurs tels que : une inefficacité du réseau de drainage, la présence d'une nappe phréatique et la qualité des eaux d'irrigation et enfin la nature de la roche mère (Zahi, 2014). L'accumulation de ces sels dans les milieux poreux ainsi que la présence du phénomène d'échange de base provoque une certaine dégradation des propriétés physico-chimiques de sols et par conséquent une diminution du rendement agricole s'apparaître (Ourdi, 2005).

Parmi les paramètres qui contrôlent la qualité des sols pour une utilisation donnée, on peut citer : les propriétés intrinsèques du sol, son environnement géochimique et climatique et enfin les cultures exercées dans ces sols (Badraoui, 1998). De ce fait, l'objectif principal de cette étude est d'évaluer les propriétés des sols de l'oasis d'El Menia qui sont exposé au phénomène de la salinisation et d'analyser leur relation avec la qualité des eaux de cette oasis.

## **2. Les différents types des sols sahariens**

### **2.1. Sols minéraux bruts (sols sableux)**

Dans les vingt premiers centimètres de ces sols, la matière organique est présente à l'état de traces avec un taux inférieur à 1.5%, dans les trois premiers centimètres l'altération chimique des minéraux est faible ou absente, contrairement à la désagrégation mécanique qui est plus ou moins poussée, les sels pouvant être solubilisés et redistribués dans le profil. Ces sols ne présentent pas d'évolution pédologique à cause de l'aridité du climat qui ne permet pas l'altération chimique des minéraux, de l'érosion récente et d'un apport récent de matériaux n'ayant pas le temps d'évoluer.

### **2.2. Sols peu évolués**

Le taux de matière organique dans les trois premiers centimètres de ces sols est supérieur à 1.5%. Une partie de cette matière organique peut être bien humifiée le matériau original présente une fragmentation et une désagrégation. Ces sols se caractérisent par un faible degré d'altération, le profil peut être le siège d'une distribution des sels. Ces sols se rencontrent dans les régions où l'altération est limitée soit par le climat, soit par l'érosion, soit par le temps (âge de matériau). Ils sont caractérisés par une faible capacité d'échange, ils sont profonds en plaines alluviales et peuvent présenter des manifestations d'hydromorphie ou de redistribution des sels. Les meilleurs terres agricoles, particulièrement recherchées par les agronomes sont des sols peu évolués des dépressions alluviales non salées (Dubost, 1991).

## **2.3. Sols des dayas**

Leur épaisseur est variable en fonction de l'importance du ruissellement, donc de la masse de sédiments charriés, le profil se présente comme succession de strates à texture fine ou grossière. Ces couches sont déposées en alternance par sédimentation dans l'eau stagnante plus ou moins longtemps dans la daya.

## **2.4. Sols des oasis**

Ce sont des sols sableux, très pauvres en matière organique 0.4%. Le pH basique (8.8), le rapport C/N égal à 12.1 correspond à une matière organique bien décomposée. Le carbonate de calcium n'est pas présent dans tout le profil et sa teneur est variable, la capacité d'échange cationique (CEC) est également faible, le calcium et le magnésium prédominent le complexe absorbant.

## **2.5. Sols halomorphes (sodique)**

Les sols salés présentent une évolution dominée par la présence de fortes quantités de sels solubles ou par richesse de leur complexe absorbant en ions provenant de ces sels, et susceptibles à dégrader leur structure, ces sols présentent des caractéristiques défavorable à la croissance des végétaux.

## **2.6. Sols hydromorphes**

Les sols hydromorphes se rencontrent en tout climat et constituent avec les associations spécialisées qui les caractérisent des « climats stationnels » liés à des conditions particulières de matériau ou de mauvais drainage. Ces sols sont caractérisés par la présence de nappes phréatiques.

## **2.7. Sol des palmeraies**

Les sols des palmeraies sont le plus souvent cultivés, leur matière minérale n'a pas subi d'altération sensible. Par contre elle a pu se désagréger et se fragmenter par des phénomènes physiques ; les sels minéraux y compris les carbonatés et les sulfates ainsi que les cations peuvent avoir des redistributions et des migrations. Ces sols présentent une faible teneur en matière organique et en éléments fertilisant : le pH est voisin de la neutralité à légèrement alcalin.

Du point de vue classification pédologique les sols des palmerais se regroupent généralement dans les classes des sols peu évolués, halomorphe, l'apport est le plus souvent éolien ou anthropique.

### 3. Méthodes d'analyses au laboratoire

Les analyses de sols réalisées concernent la granulométrie, le carbone et la matière organique, le pH, la conductivité électrique et le calcaire total et actif en (%). Ces caractéristiques sont obtenues avec les méthodes d'analyse courantes en pédologie (Tableau 22)

**Tableau 22 Méthodes d'analyses physico-chimiques des sols**

Paramètres	symboles	Unités	Méthodes
<b>pH</b>	pH	/	pH mètre
<b>Conductivité électrique</b>	CE	$\mu\text{s.cm}^{-1}$	conductivimètre
<b>Carbone organique</b>	CO	%	Anne modifiée
<b>Calcaire total</b>	$\text{CaCO}_3$	%	Calcimètre de Bernard
<b>Matières organiques</b>	MO	%	$\text{MO} = \% \text{ C} * 1.72$

### 4. Propriétés physiques des sols

#### 4.1. Granulométrie

Le mélange de particules élémentaires de différentes dimensions est à l'origine de la différence des propriétés physiques des sols naturels (Zahi, 2016). D'une manière générale, les propriétés physiques d'un sol dépendront de la distribution de la taille des particules (aussi appelée composition granulométrique).

L'analyse granulométrique a pour but de déterminer quantitativement la distribution des particules de sol par classes de diamètres (la texture). Le nombre et la grandeur des classes de diamètres dépendront de l'objectif pour suivi et, éventuellement, de l'importance de l'échantillon dont on dispose. On classe les sols d'après les ratios de ces différentes particules. Par exemple, les sols classés comme "sableux" sont constitués de plus de 50 à 55 % de sable, alors que les sols "argileux" ont un contenu d'argile de 45 % ou plus. Les résultats des analyses granulométriques sont présentés dans le tableau suivant (Tableau 23).

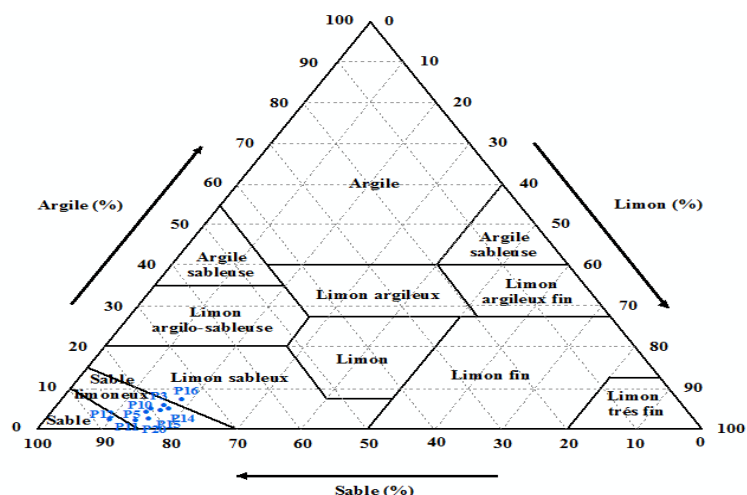
**Tableau 23 Granulométrie des sols de la zone d'étude**

N° de profil	P5		P14		P15		P16		P20		P3	P10	P11	P12	
Horizons	H1	H2	H1	H2	H1	H2	H1	H2	H1	H2	H1	H1	H1	H1	
<b>Granulométrie (%)</b>	<b>A</b>	4,5	7,8	7,8	9,5	5,1	3,1	7,6	8,7	4,3	7,1	6,1	4,8	3,1	2,6
	<b>LF</b>	6,3	7,9	7,3	10,7	7,3	5,4	8,4	8,5	6,1	7,8	7	6,3	5	4,5
	<b>LG</b>	8	9,2	9,5	12,4	8,7	6,4	10	10,7	7,9	9,4	9,3	8,2	7,6	5,7
	<b>SF</b>	69,1	62,6	66,1	57,3	68,2	71,8	60,1	58,3	69,8	65,9	64,4	65,3	71,4	74,5
	<b>SG</b>	12,1	12,5	9,3	10,1	10,7	13,3	13,9	13,8	11,9	9,8	13,2	15,4	12,9	12,7

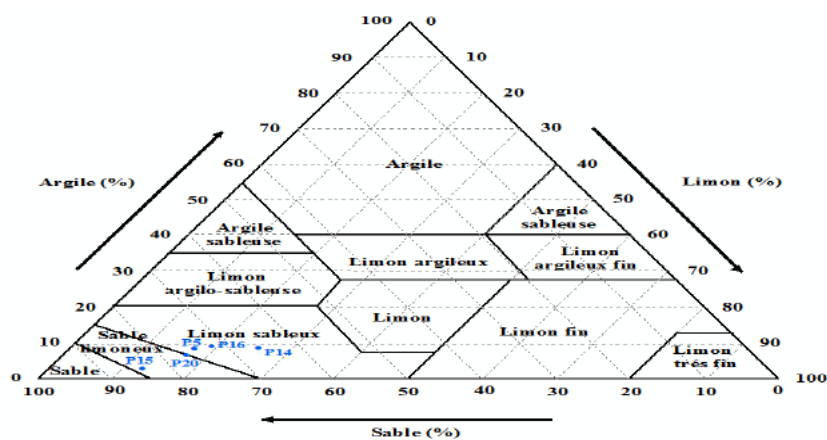


NB : H1 = (0-25) cm, H2 = (25-50) cm. A : argile, LF : Limon Faible, LG : Limon Grossier, SF : Sable Fin, SG : Sable Grossier.

La représentation des résultats des analyses granulométriques sur les triangles des textures (Figure 65) montre la dominance de la fraction sableuse dans la majorité des échantillons avec des valeurs moyennes de 80% pour la première couche (0 – 25 cm) et 75 % pour la deuxième (25 – 50 cm), cet excès de sable et l'insuffisance d'argile accompagnée de mauvaises propriétés physiques de sols rendent ces derniers très filtrants,. La fraction limoneuse moyenne est d'ordre de 14.77% et 17.6% successivement pour la première et la deuxième couche, alors que la fraction argileuse se présente avec des faibles valeurs, soit une moyenne de 5% pour la première couche et 7.3% pour la seconde, ce caractère de granulométrie confère à ces sols un très faible pouvoir de rétention en eau et en élément fertilisant.



**A- Première couche (0 – 25 cm)**



**B- Deuxième couche (25 – 50 cm)**

**Figure 65 Texture des sols de la région d'El Menia**

## 5. Les caractéristiques chimiques des sols

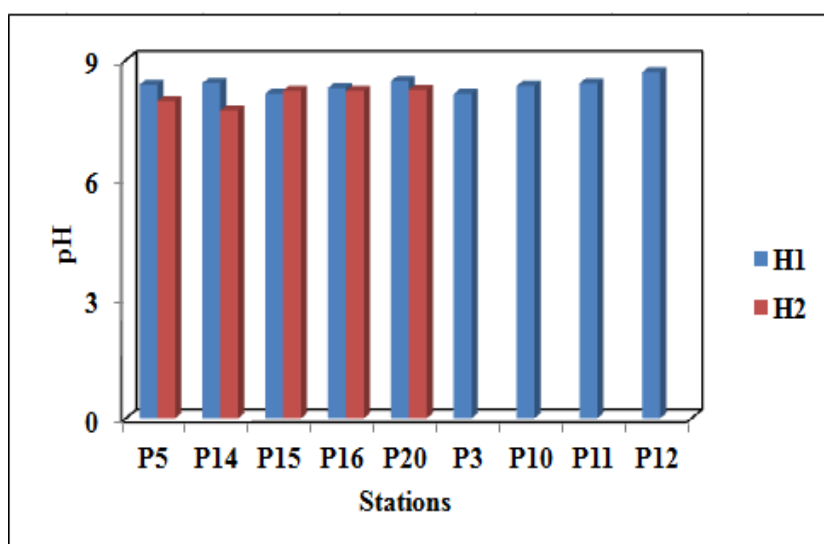
### 5.1. pH

Mesurés par la méthode électromotrice à l'aide d'un pH-mètre à l'électrode de verre (pH 209), le pH d'un sol est conditionné par la présence des sels acides (l'humus) et des sels basiques (calcaire) (Zahi, 2016). Les résultats obtenus sont reportés dans le tableau 24 :

**Tableau 24 Variation des pH des sols de la région d'El Menia**

Stations	pH	
	H1	H2
<b>P5</b>	8.38	7.97
<b>P14</b>	8.42	7.73
<b>P15</b>	8.15	8.23
<b>P16</b>	8.3	8.22
<b>P20</b>	8.47	8.25
<b>P3</b>	8.15	Roche mère calcaire
<b>P10</b>	8.35	Roche mère calcaire
<b>P11</b>	8.41	Roche mère calcaire
<b>P12</b>	8.69	Roche mère calcaire

Les valeurs du pH des sols de cette région varient entre 8.15 et 8.69 pour la couche supérieure H1 (0 - 25 cm) avec une moyenne de 8.36. Pour H2 (25 – 50 cm), elles comprises entre 7.73 et 8.25 avec une moyenne de 8.1 (Figure 66).



**Figure 66 Variations du pH des solutions de sols de la région d'El Menia**

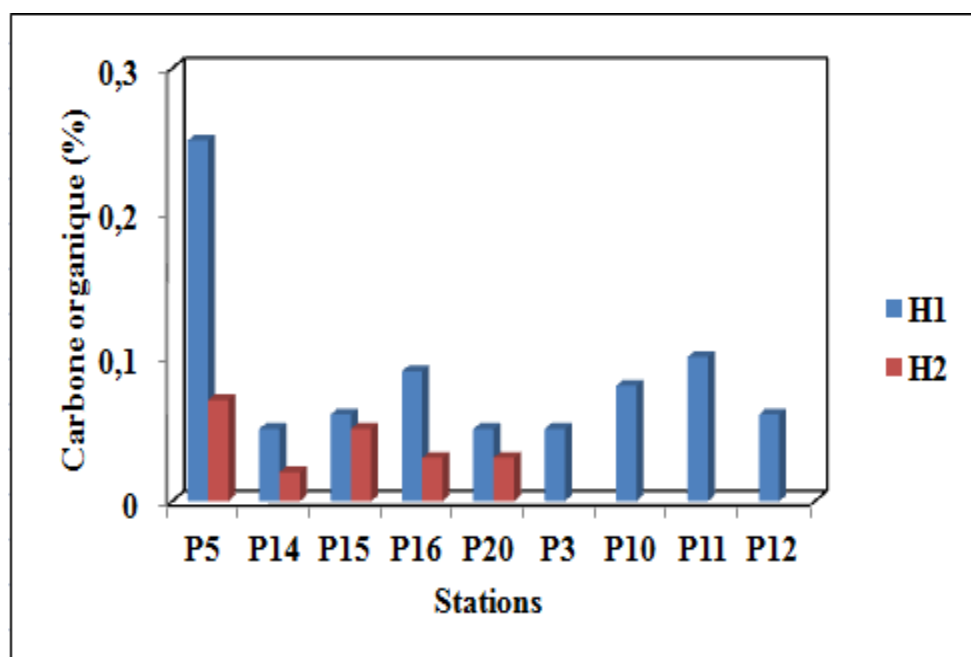
### 5.2. Carbone et la matière organique des sols

Les résultats d'analyses pour le carbone et la matière organique sont exposés dans le tableau ci-après :

**Tableau 25 Le carbone et la matière organique dans les sols de la région d'El Menia**

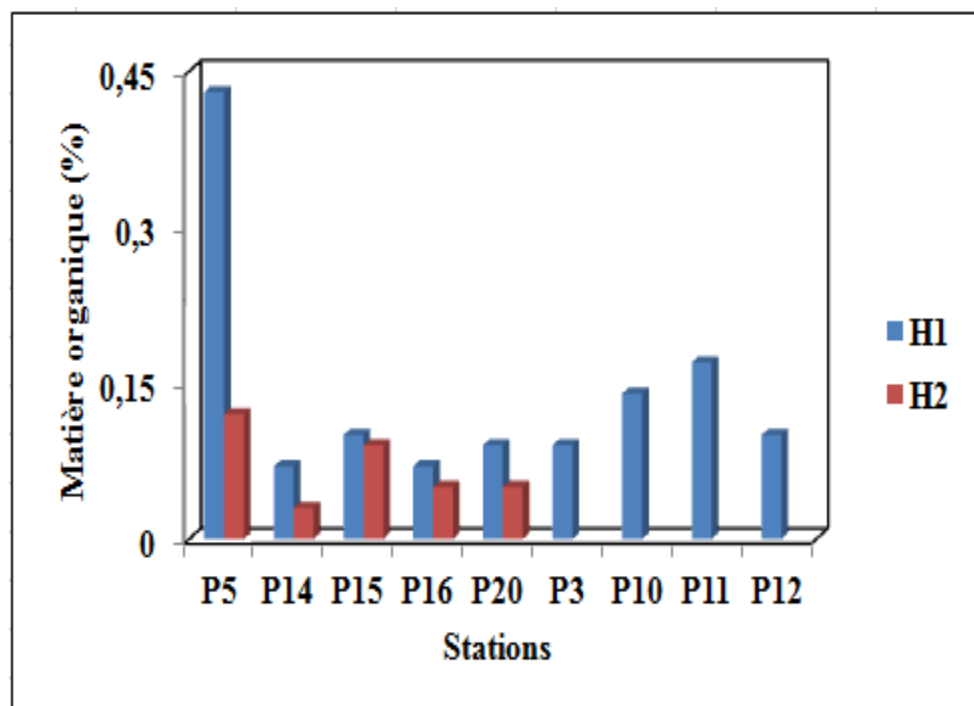
Stations	Carbone organique (%)		Matière organique (%)	
	H1	H2	H1	H2
<b>P5</b>	0.25	0.07	0.43	0.12
<b>P14</b>	0.05	0.02	0.07	0.03
<b>P15</b>	0.06	0.05	0.1	0.09
<b>P16</b>	0.09	0.03	0.07	0.05
<b>P20</b>	0.05	0.03	0.09	0.05
<b>P3</b>	0.05	Roche mère calcaire	0.09	Roche mère calcaire
<b>P10</b>	0.08	Roche mère calcaire	0.14	Roche mère calcaire
<b>P11</b>	0.1	Roche mère calcaire	0.17	Roche mère calcaire
<b>P12</b>	0.06	Roche mère calcaire	0.1	Roche mère calcaire

D'après le tableau 25 et la figure 67, les valeurs du carbone organique pour la première couche (H1) varient entre 0.05 et 0.25%, elles oscillent entre 0.02 et 0.07% pour la deuxième couche (H2).



**Figure 67 L'évolution de la teneur du carbone organique des sols de la région d'El Menia**

Pour la matière organique, les valeurs varient entre 0.07 et 0.43% dans la première couche (H1) et varient entre 0.03 et 0.12 % pour la deuxième couche (Figure 68) (Tableau 25).



**Figure 68 L'évolution de la teneur de la matière organique des sols de la région d'El Menia**

### 5.3. Calcaire total (CaCO<sub>3</sub>)

Par définition, le calcaire total est l'ensemble du calcaire de sol représenté sous toutes dimensions (tailles). Sa quantité dans le sol peut être déterminée après sa dissolution par un acide moyennement concentré (Zahi, 2016). L'interprétation des résultats d'analyses nécessitent l'utilisation de l'échelle d'appréciation (Tableau 26).

**Tableau 26 Normes d'interprétation du taux du calcaire du sol (Baize, 1988)**

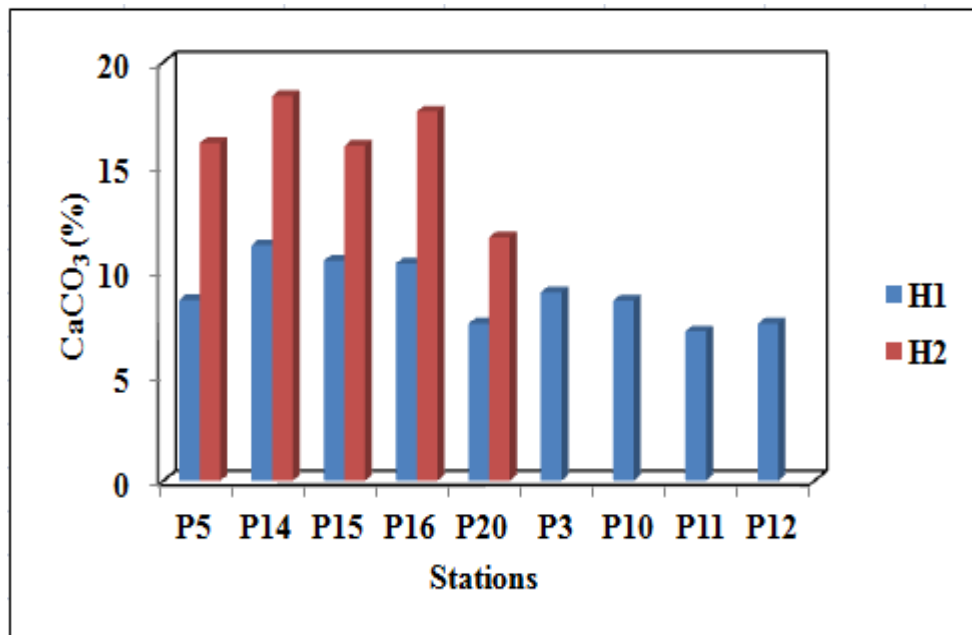
Taux du calcaire	< 1 %	1 à 5 %	5 à 25 %	25 à 50 %	50 à 80 %	> 80 %
Appréciation	Non calcaire	Peu calcaire	Modérément calcaire	Fortement calcaire	Très fortement calcaire	Excessivement Calcaire

Les résultats de mesure du calcaire total dans les sols de la région d'El Menia sont classés dans le tableau suivant :

**Tableau 27 Le calcaire total dans les sols de la région d'El Menia**

Stations	pH	
	H1	H2
P5	8.63	16.13
P14	11.25	18.38
P15	10.5	16

<b>P16</b>	10.38	17.63
<b>P20</b>	7.5	11.63
<b>P3</b>	9	Roche mère calcaire
<b>P10</b>	8.6	Roche mère calcaire
<b>P11</b>	7.13	Roche mère calcaire
<b>P12</b>	7.5	Roche mère calcaire



**Figure 69 L'évolution de la teneur en calcaire total des sols de la région d'El Menia**

D'après la figure 69, les valeurs du pourcentage du calcaire total oscillent entre 7.13 et 11.25% pour la première couche et entre 16 et 18.38% pour la deuxième couche. En se basant sur l'échelle d'appréciation (Tableau 26) établie par Baize (1988), on conclut que les sols de la région d'El Menia sont classés comme des sols modérément calcaires.

#### 5.4. Conductivité électrique (CE)

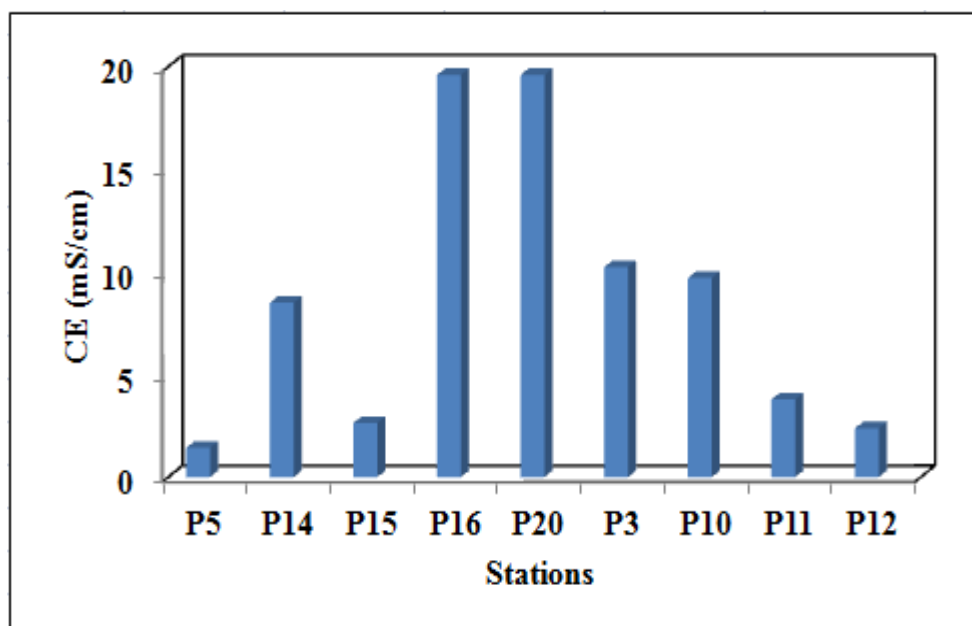
Mesurée à l'aide d'un conductimètre (EC 215). Les mesures ont été effectuées sur les solutions de sols de l'extrait de la pâte saturée, elle est exprimée en (mS/cm à 25 °C). La conductivité électrique est un élément indispensable pour avoir une idée générale sur la salinité d'un sol. Les résultats de la conductivité électrique mesurée sont récapitulés dans le tableau suivant :

**Tableau 28 Variation de CE des sols (mS/cm)**

Stations	CE (mS/cm)
<b>P5</b>	1.43
<b>P14</b>	8.5
<b>P15</b>	2.64

<b>P16</b>	19.6
<b>P20</b>	19.6
<b>P3</b>	10.23
<b>P10</b>	9.7
<b>P11</b>	3.78
<b>P12</b>	2.38

D'après le tableau 28 et la figure 70, les résultats de la conductivité électrique des sols de la région d'El Menia varie entre 1.43 et 19.6 mS/cm avec une moyenne de 8.65 mS/cm.



**Figure 70 L'évolution de la CE des sols de la région d'El Menia**

L'US Salinity Laboratory (1954) a proposé une classification des sols selon la valeur de la conductivité électrique mesurée pour chaque sol (tableau 29). Cette classification permet de classer les sols en cinq classes de salinité. L'application de cette méthode sur les sols de la région d'El Menia montre bien l'impact de la salinité sur l'ensemble des sols analysés, en effet 55.55% des échantillons présentent des salinités fortes, alors que 33.33% des échantillons présentent une salinité faible et enfin un seul échantillon ne présente aucune salinité remarquable.

**Tableau 29 Classification des sols en fonction de la conductivité électrique (USSSL, 1954)**

CE (mS/cm)	0 – 25 cm	Appréciation
$CE \leq 2$	P5	Les sols ne sont pas salés
$2 < CE \leq 4$	P15, P11, P12	Les sols sont faiblement salés
$4 < CE \leq 8$	/	Les sols sont moyennement salés
$8 < CE \leq 16$	P14, P3, P10	Les sols sont salés
$CE > 16$	P16, P20	Les sols sont très salés

## 6. Salinité et sodicité des sols

La teneur en sels solubles (salinité et sodicité) dans les sols présente un obstacle majeur pour le développement des activités agricoles et contribue à détériorer la qualité physico-chimique des sols (Ouardi, 2005 ; Zahi, 2016).

La salinisation est une augmentation progressive de la concentration des sels dans les sols. Quand cette salinisation affecte des milieux naturels sans l'intervention directe de l'homme, on dit que la salinisation est une salinisation primaire. Elle est secondaire dans le cas où l'homme est intervenu par les pratiques agricoles et l'irrigation sur des sols cultivés (Zahi, 2016).

On peut définir le phénomène de la sodisation comme un échange de sodium sur un complexe absorbant des argiles. La sodisation est mesurée par le rapport de la capacité d'échange cationique (CEC) à la valeur du sodium exprimé en pourcentage. Ce pourcentage est nommé le pourcentage de sodium échangeable (ESP), il est donné par la formule suivante :

$$ESP = \frac{Na^+}{CEC} .100 \dots \dots \dots (12)$$

ESP : Pourcentage de sodium échangeable (%) ;

Na<sup>+</sup> : Valeur du sodium exprimé en meq/100g ;

CEC : Capacité d'échange cationique exprimé en meq/100g.

Le tableau ci-dessous (Tableau 30) montre les valeurs du sodium, CEC et ESP dans les sols de la région d'El Menia.

**Tableau 30 Valeurs du sodium, Capacité d'échange cationique et le pourcentage de sodium échangeable des solutions de sols de la région d'El Menia**

stations	Na <sup>+</sup> (meq/100g)	CEC (meq/100g)	ESP (%)
P5	0.41	3	14
P14	4.58	4.78	95.81
P15	1.13	3.06	36
P16	3.14	4.81	64.45
P20	1.97	2.88	66
P3	1.92	3.89	49.35
P10	1.14	3.1	36.77
P11	1.18	2.15	54.88
P12	0.87	1.84	48.91

### 6.1. Classification des sols salins

Il existe différentes méthodes de classification des sols salins, américaine, française et russe. Parmi ces classifications et la plus utilisée est la classification de l'USSL (1954) (Tableau 31), parce qu'elle est basée sur des paramètres faciles à obtenir comme la conductivité électrique et le pourcentage du sodium échangeable (ESP).

**Tableau 31 Classification des sols salins selon USSL (1954)**

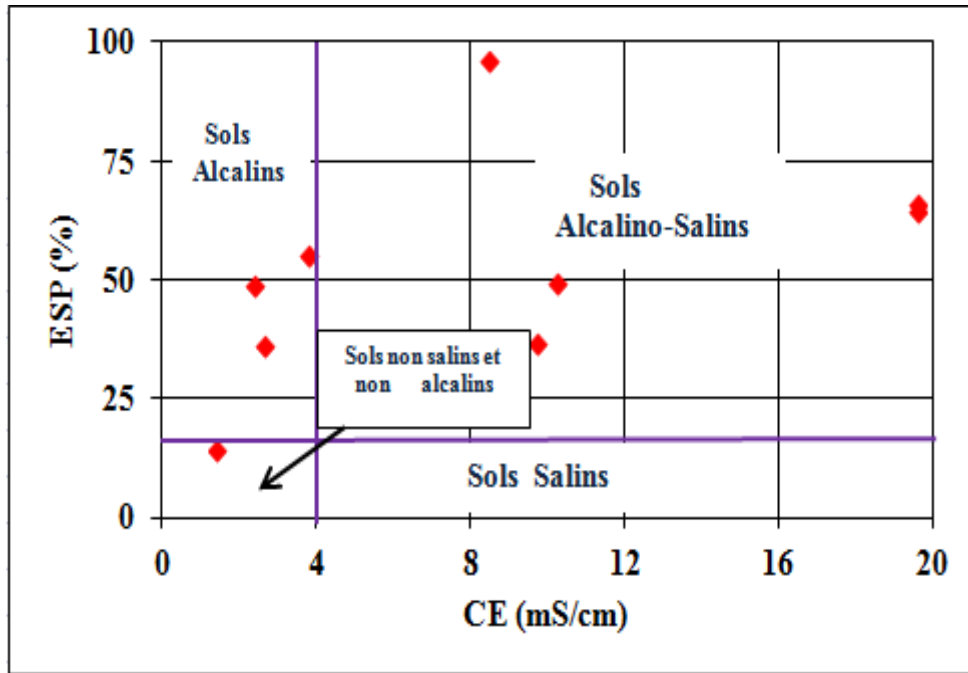
Paramètres	$CE \leq 4 \text{ mS/cm}$	$CE > 4 \text{ mS/cm}$
<b>ESP <math>\leq 15</math> %</b>	sols non salins et non alcalins	Sols salins
<b>ESP <math>&gt; 15</math> %</b>	sols alcalins	sols alcalino-salins

- **Sols salins** : sols caractérisés par une teneur élevée en sels (Aubert, 1983 ; Ouardi, 2005). Ils sont généralement floculés, ce qui contribue à maintenir une bonne structure du sol et une bonne circulation de l'eau et de l'air (Ouardi, 2005). Ces sols sont caractérisés par une conductivité électrique de l'extrait de saturation supérieur à 4 mS/cm, un pH inférieur à 8.5 et un pourcentage de sodium échangeable inférieur à 15 %.
- **Sols salins à alcalins** : caractérisés par une conductivité électrique de l'extrait de saturation supérieur à 4 mS/cm et pH supérieur à 8.5. Par définition, ce sont des sols qui contiennent suffisamment de sels solubles et de sodium échangeable supérieur à 15 %.
- **Sols alcalins** : sols présentant un taux de sodium échangeable suffisamment élevé, mais ils ne contiennent pas des quantités excessives de sels solubles (Aubert, 1983 ; Ouardi, 2005). Ces sols sont caractérisés par une conductivité électrique de l'extrait de saturation inférieur à 4 mS/cm, un pH compris entre 8.5 et 10 et un pourcentage de sodium échangeable supérieur à 15 %.

## **6.2. Les sols de la région d'El Menia**

D'après la représentation graphique de la variation du pourcentage du sodium échangeable (ESP) en fonction de la conductivité électrique mesurée sur l'extrait de pâte saturée, et d'après la classification proposée par USSL (1954), nous constatons que la moitié des sols étudiés de cette oasis (environ 55.55 %) sont classés parmi les sols alcalino-salins ( $ESP > 15$  %,  $CE > 4$  mS/cm) (Figure 71), un tiers des échantillons sont classés comme des sols alcalins ( $ESP > 15$  %,  $CE \leq 4$  mS/cm), à noter que seulement un échantillon est classé comme sol non salin et non alcalin.





**Figure 71 Classification des sols de la région d'El Menia selon USSL (1954)**

Les phénomènes de la salinité et la sodicité des sols présentent un risque majeur sur les sols et par conséquent sur la production agricole dans cette région. On peut résumer les causes de ces deux phénomènes comme suit :

- Le drainage : la tolérance est beaucoup plus grande par le drainage efficace ;
- Le sol : les sols sableux tolèrent plus que les sols argileux ;
- La plante : culture maraîchère tolère plus que l'arboriculture.

Et pour essayer à affaiblir l'intensité de ces phénomènes :

- Un contrôle périodique de la qualité chimique (salinité et teneur en sodium) de l'eau d'irrigation est indispensable ;
- Une gestion optimale de l'irrigation de façon à éviter la percolation hors périodes de lessivage ;
- Une limitation des pertes d'eau dans les canaux et les apports externes.

## 7. Conclusion

Les sols de cette région sont des sols de palmerais peu évolués caractérisés par une teneur faible en matière organique et en éléments fertilisants avec un pH voisin de la neutralité à légèrement alcalin. L'étude pédologique des sols de cette région montre bien que ces sols présentent une salinité et une sodicité très élevées causées par la présence des sols sableux qui favorisent le drainage ainsi qu'une eau de nappe phréatique trop salée. Pour minimiser ces

## *Pédologie*

---

deux contraintes un contrôle périodique de la qualité chimique des eaux ainsi que une gestion rationnelle de l'irrigation est souhaitable.

***Chapitre 06 : Vulnérabilité à  
la pollution de la nappe  
phréatique***

# *Vulnérabilité à la pollution de la nappe phréatique*

---

## **1. Introduction**

Dans les zones arides et semi-arides, les eaux souterraines représentent une importante ressource exploitée pour la consommation humaine et pour l'utilisation dans les domaines agricoles et industriels. Cette eau à son origine infiltre dans le sol et subit un certain nombre de changement physiques, chimiques ou biologiques, qui affectent sa composition. Ces changements sont fonction de la nature des terrains traversés, de la durée du transit mais aussi de la composition initiale de l'eau, particulièrement lorsque cette eau est polluée. Les polluants peuvent faire leur migration vers le bas dans la nappe phréatique. Le mouvement de l'eau et de la dispersion dans l'aquifère propage les polluants sur une zone plus large. Une migration verticale (zone saturée) vers la nappe puis une migration horizontale suivant le sens d'écoulement. La faible granulométrie et la grande épaisseur de la zone non saturée jouent un rôle important dans la filtration et la rétention de certaines substances.

## **2. Concept de vulnérabilité des eaux à la pollution**

Pour identifier les zones de forte vulnérabilité et permettre de prévenir les parties les plus vulnérables à la contamination, plusieurs méthodes de caractérisation de la vulnérabilité des nappes à la pollution sont citées dans la littérature internationale (Martinez-Bastida et al 2010, Vrba and Zaporozec 1994). Commenant d'abord par le français J.Margat en 1968 qui est le premier qui a introduit le concept de vulnérabilité des eaux souterraines. Actuellement nombreuses méthodes pour l'estimation et la cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines ont été développées, les plus répandus sont DRASTIC (Aller et al, 1987) SINTACS (Citivà, 1995 et 1997), EPIK (Doerfliger et al, 2009), et GOD (Foster, 1987). Les caractéristiques à prendre en compte pour l'évaluation de la vulnérabilité sont de deux sortes : données principales et données secondaires. Plusieurs méthodes ont été développées pour évaluer cette vulnérabilité. Ces méthodes peuvent être classées en trois groupes :

### **2.1. Méthodes des systèmes paramétriques**

Composées de trois sous systèmes qui sont :

#### **2.1.1. Le système matriciel**

Ce système qui est adapté pour une utilisation locale, se base sur un nombre limité de paramètres, judicieusement choisis. On procède à une combinaison de classes pour définir de façon descriptive le degré de vulnérabilité des aquifères.

#### **2.1.2. Le système de classe**

# ***Vulnérabilité à la pollution de la nappe phréatique***

---

pour ce groupe on définit un intervalle pour chaque paramètre jugé nécessaire pour l'évaluation de la vulnérabilité, ensuite on subdivise chacun des intervalles retenus en fonction de la variabilité du paramètre en question. Le score final qui résulte de la sommation (ou multiplication) de chaque note, attribuée pour les différents paramètres, devrait être subdivisé par le nombre de classes retenues.

## **2.1.3. Système de classes pondérées**

Ce groupe de méthodes est basé sur l'affectation de notes aux paramètres qui sont retenus, jugés nécessaires pour l'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines, en définissant des intervalles comme c'est le cas pour les autres méthodes citées précédemment. Par la suite une pondération est attribuée pour chaque paramètre selon son importance dans l'évaluation de la vulnérabilité.

## **2.2. Méthodes de comparaison**

Utilisées essentiellement pour des aires d'étude très étendues et prend en considération 2 à 3 paramètres.

## **2.3. Méthodes des relations analogiques et modèles numériques**

Basées sur des lois mathématiques simples ou complexes. Conseillées pour l'évaluation de la vulnérabilité des sites radioactifs.

## **3. Application de la méthode GOD (Foster, 1987)**

### **3.1. Présentation de la méthode**

Développée par Foster en 1987, la méthode de GOD présente la vulnérabilité de l'aquifère face à la percolation verticale de polluants à travers la zone non saturée et ne traite pas de la migration latérale des polluants dans la zone saturée.

L'approche empirique utilisée par cette méthode définit la vulnérabilité des aquifères en fonction de l'inaccessibilité de la zone saturée, au sens de la pénétration du polluant, et de la capacité d'atténuation que la couche sus-jacente présente à la zone saturée. Cette méthode est basée sur l'identification de trois critères :

- Le premier critère correspond à l'identification du type d'aquifère en fonction de son degré de confinement ( $C_a$ ) (Groundwater occurrence) ;
- Le deuxième critère attaché à la profondeur de la nappe ( $C_d$ ) (Depth to groundwater table);
- Le dernier critère est défini par la lithologie de l'aquifère ( $C_i$ ) (Overall aquifer class) (Murat, 2000).

## Vulnérabilité à la pollution de la nappe phréatique

Cette méthode a pour but de réaliser une estimation rapide de la vulnérabilité d'un aquifère en calculant l'indice GOD (IG) obtenu par la multiplication des trois paramètres cités précédemment.

L'équation de calcul de l'indice de vulnérabilité est la suivante :

$$IG = C_a \times C_i \times C_d \dots \dots \dots (13)$$

Avec  $C_a$  : Type d'aquifère ;  $C_i$  : Lithologie de l'aquifère ;  $C_d$  : Profondeur de la nappe.

**Tableau 32 Cotes accordées aux paramètres de la méthode GOD (Foster, 1987)**

Paramètre	Classe	côte
<b>G</b> Type de nappe	Aucune	0
	Captive artésienne	0.1
	Captive	0.2
	Semi captive	0.4
	Semi libre	0.4 à 0.6
	Libre	0.7 à 1.0
<b>O</b> Facteurs géologiques	Argile	0.3
	Sol résiduel	0.4
	Silts alluvions	0.5
	Sable éolien tuf	0.6
	Sable et graviers	0.7
	Graviers	0.8
	Calcaire	0.9
	Calcaire fracturé	1
<b>D</b> Profondeur de la nappe	Supérieure à 100 m	0.4
	50 à 100 m	0.5
	20 à 50 m	0.6
	10 à 20 m	0.7
	5 à 10 m	0.8
	2 à 5 m	0.9
	Inférieure à 2 m	1.0

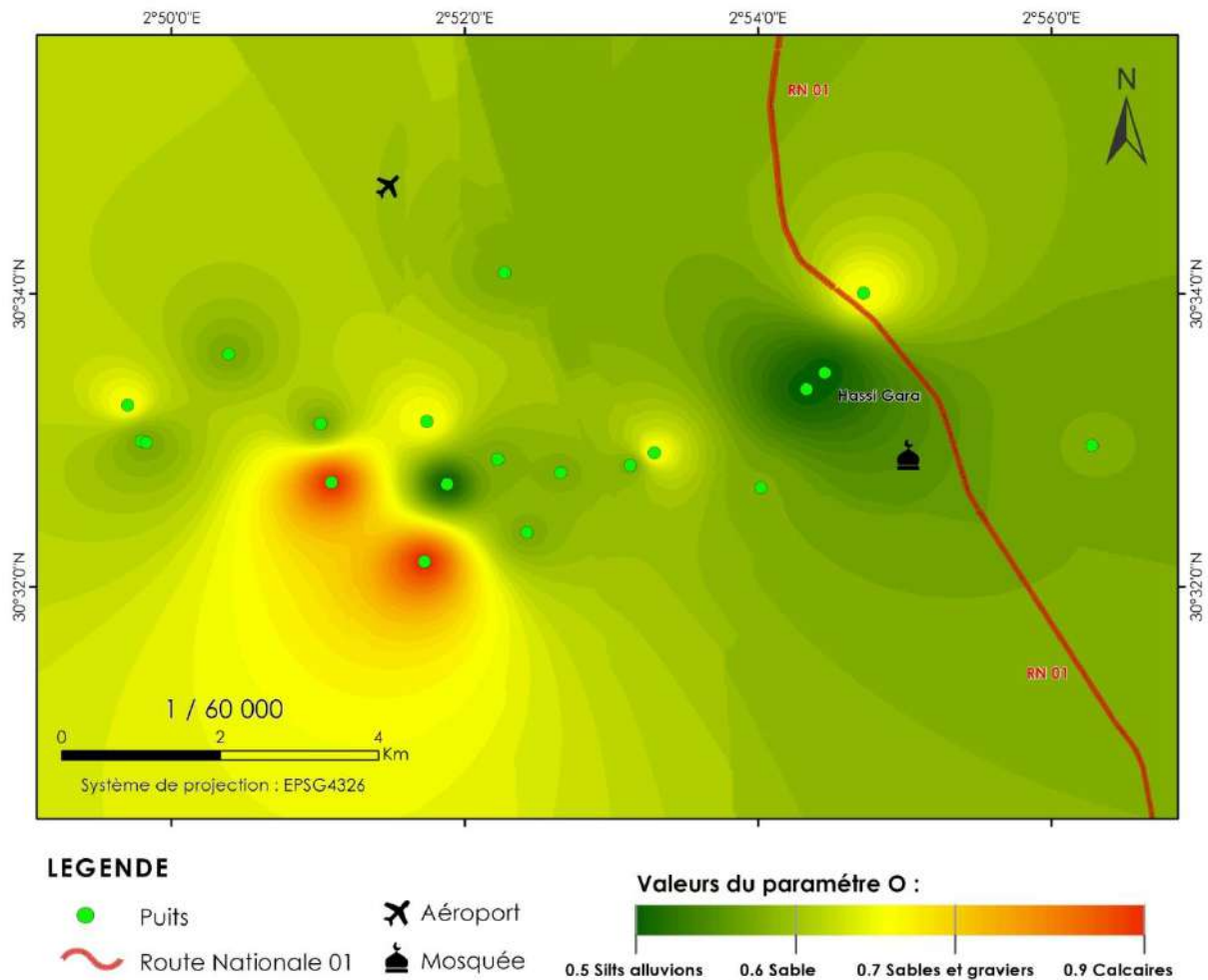
**Tableau 33 Classes de la vulnérabilité GOD (Foster, 1987)**

Classe	Intervalle
Nulle	0
Négligeable	0 à 0.1
Faible	0.1 à 0.3
Modérée	0.3 à 0.5
Forte	0.5 à 0.7
Très forte	0.7 à 1

# Vulnérabilité à la pollution de la nappe phréatique

## 3.2. Détermination de cote des paramètres de la méthode de GOD pour la zone d'étude

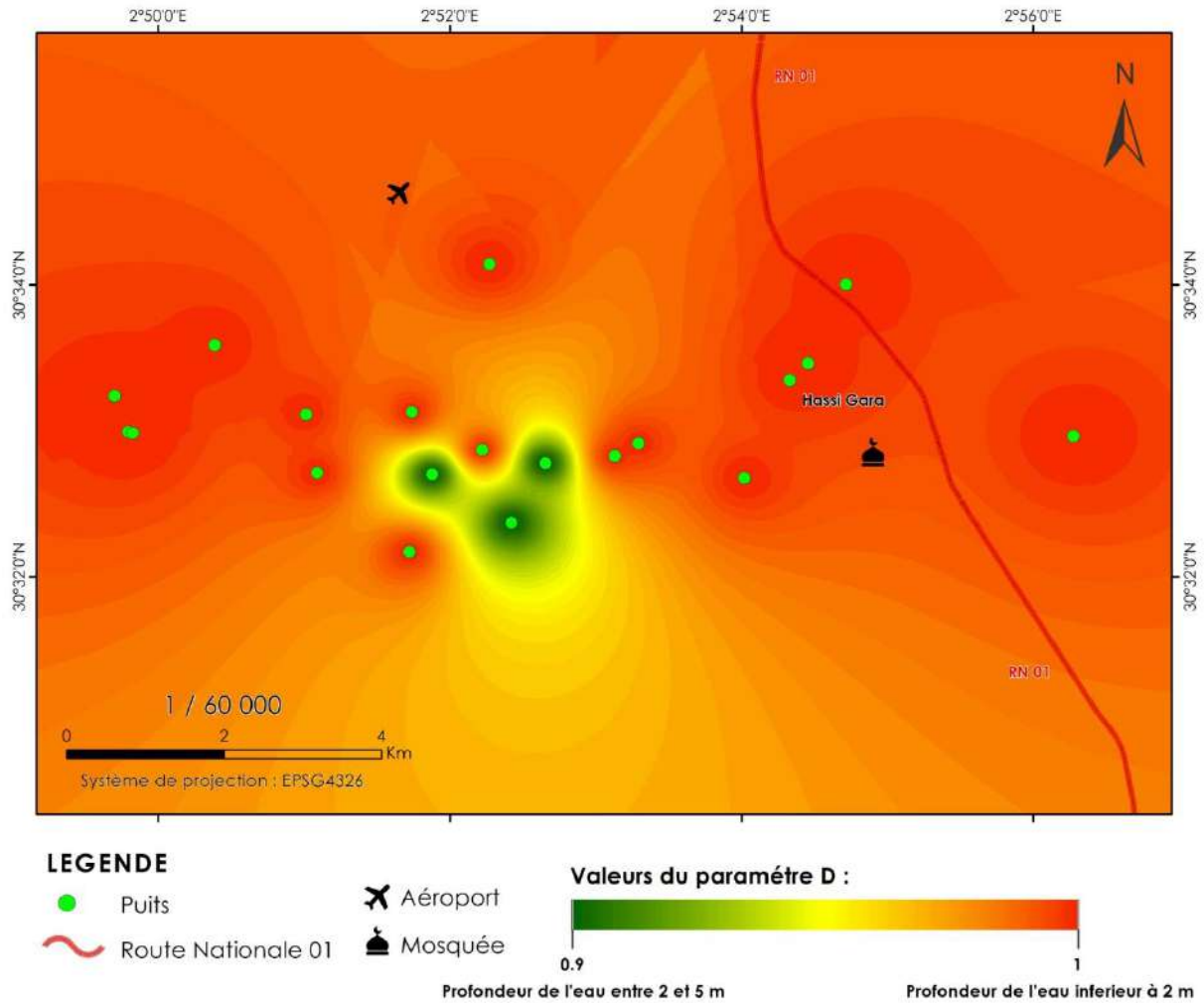
Pour le cas de notre zone d'étude, nous avons attribué la côte 1 pour le type de l'aquifère qui correspond à un aquifère libre, en ce qui concerne le facteur géologique et selon les logs de forage disponibles, les cotes varient entre 0.5 et 0.9 (Figure 72) indiquant la présence de plusieurs roches réservoirs comme les silts alluvionnaires, les sables, les graviers et enfin les calcaires.



**Figure 72 Carte du paramètre "O" nature lithologique de l'aquifère**

Les côtes de profondeur de la surface de la nappe d'El Menia sont dans la majorité inférieures à 2 m sauf pour trois puits où les côtes de profondeurs sont comprises entre 2 et 5 m (Figure 73).

# Vulnérabilité à la pollution de la nappe phréatique



**Figure 73** Carte du paramètre "D" profondeur de la nappe

Le tableau 34, résume les résultats tirés de l'étude des paramètres de vulnérabilité GOD.

**Tableau 34** Côtes des paramètres de vulnérabilité de GOD de la nappe phréatique d'El

## Menia

Paramètre	Classe	côte
<b>G</b>	Libre	1
<b>Type de nappe</b>		
<b>O</b>	Silts alluvions	0.5
<b>Facteurs géologiques</b>	Sable éolien tuf	0.6
	Sable et graviers	0.7
	Calcaires	0.9
<b>D</b>	2 à 5 m	0.9
<b>Profondeur de la nappe</b>	Inférieure à 2 m	1.0

### 3.3. Interprétation de la carte de vulnérabilité à la pollution des eaux selon la méthode de GOD



## ***Vulnérabilité à la pollution de la nappe phréatique***

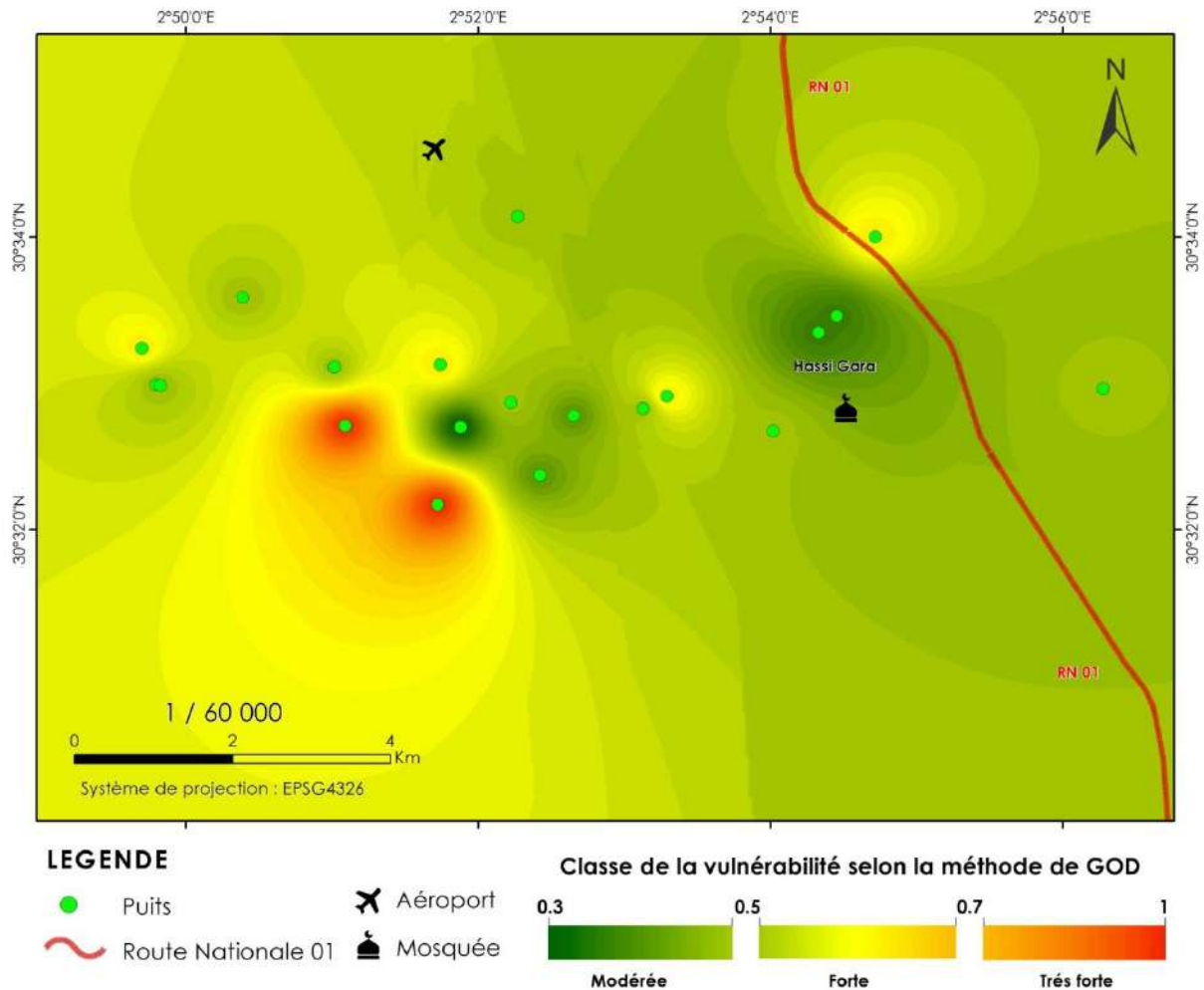
---

Après la superposition des trois cartes qui résume les paramètres de GOD nous avons élaboré la carte de vulnérabilité (Figure 74), les calculs des indices globaux de vulnérabilité, montrent que les valeurs des indices obtenus oscillent entre 0.45 et 0.9.

La carte de vulnérabilité des eaux de l'aquifère libre à la pollution montre l'existence de trois zones de vulnérabilité, la première une vulnérabilité modérée où l'indice globale est comprise entre de 0.3 et 0.5 représente 15% de la superficie totale, une deuxième zone à vulnérabilité forte avec un indice de vulnérabilité oscille entre 0.5 et 0.7 représente 75% de la superficie totale et enfin une zone à vulnérabilité très forte qui a des indices de vulnérabilité comprise entre 0.7 et 1 représente 10% de la surface totale

On peut expliquer la présence de cette forte vulnérabilité à la pollution qui caractérise notre zone d'étude par les phénomènes de migration ou/et l'infiltration des polluants dans les eaux du khendeg (un canal coupe les rues de l'oasis). Les zones agricoles et les zones urbaines, peuvent présenter des sources de pollution et augmenter les risques de pollution de la nappe. A noter que le phénomène de la remontée des eaux dans cette zone apparait dans ces dernières années peut le considérer comme un probable agent qui contribue à la pollution de cette nappe phréatique.

# Vulnérabilité à la pollution de la nappe phréatique



**Figure 74** Carte de la vulnérabilité de la nappe libre d’El Menia selon la méthode de GOD

## 4. Validation des résultats de la méthode de GOD par les nitrates et les chlorures

Toute carte de vulnérabilité élaborée doit être testée et validée par des mesures et l’analyse de données chimiques des eaux souterraines. En effet, plusieurs auteurs Hamza et al. (2007) ; Gabriel Etienne et al (2009); Attoui (2014) ; Bouselsal (2016) ; Belksier (2017) ; Boulabeiz (2017) ; ont vérifié la validité des méthodes d’évaluation de la vulnérabilité à la pollution en se basant sur des données chimiques des eaux souterraines.

Dans le cas de notre étude, la validité de l’évaluation de la vulnérabilité à la pollution par la méthode de GOD, a été testée par le taux des nitrates et des chlorures dans les eaux souterraines en établissant une comparaison entre la répartition spatiale de ces deux éléments chimiques dans les eaux souterraines et la distribution des classes de vulnérabilité.

Au cours de cette étude les nitrates et les chlorures sont dosés dans vingt huit échantillons d’eaux souterraines distribuées sur l’étendue de l’oasis. Les résultats obtenus

# Vulnérabilité à la pollution de la nappe phréatique

montrent que l'eau souterraine de cette nappe présente des concentrations en nitrate faible à moyenne qui oscillent entre 7.1 mg/l et 29 mg/l (Figure 75 et 76).

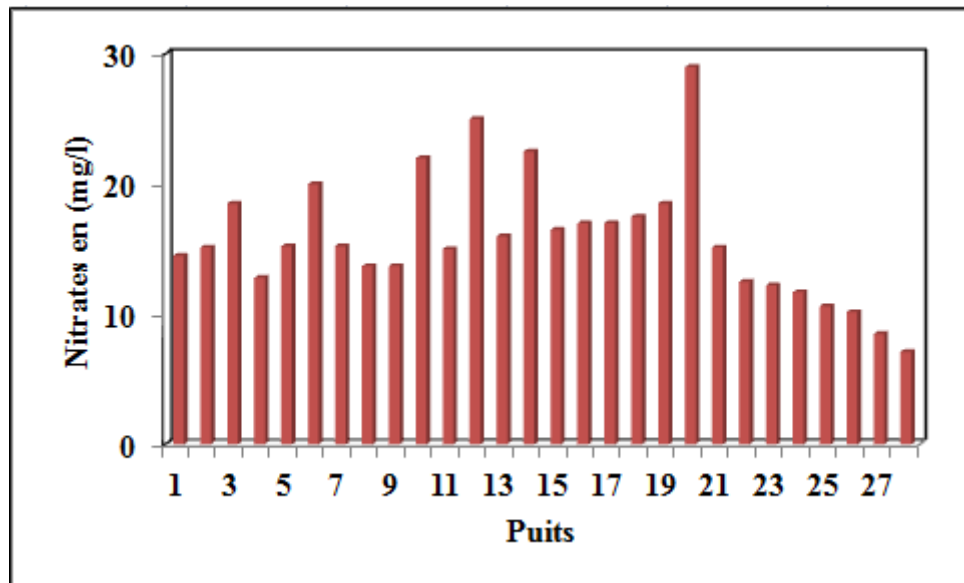


Figure 75 Teneurs des nitrates en (mg/l) dans la zone d'étude

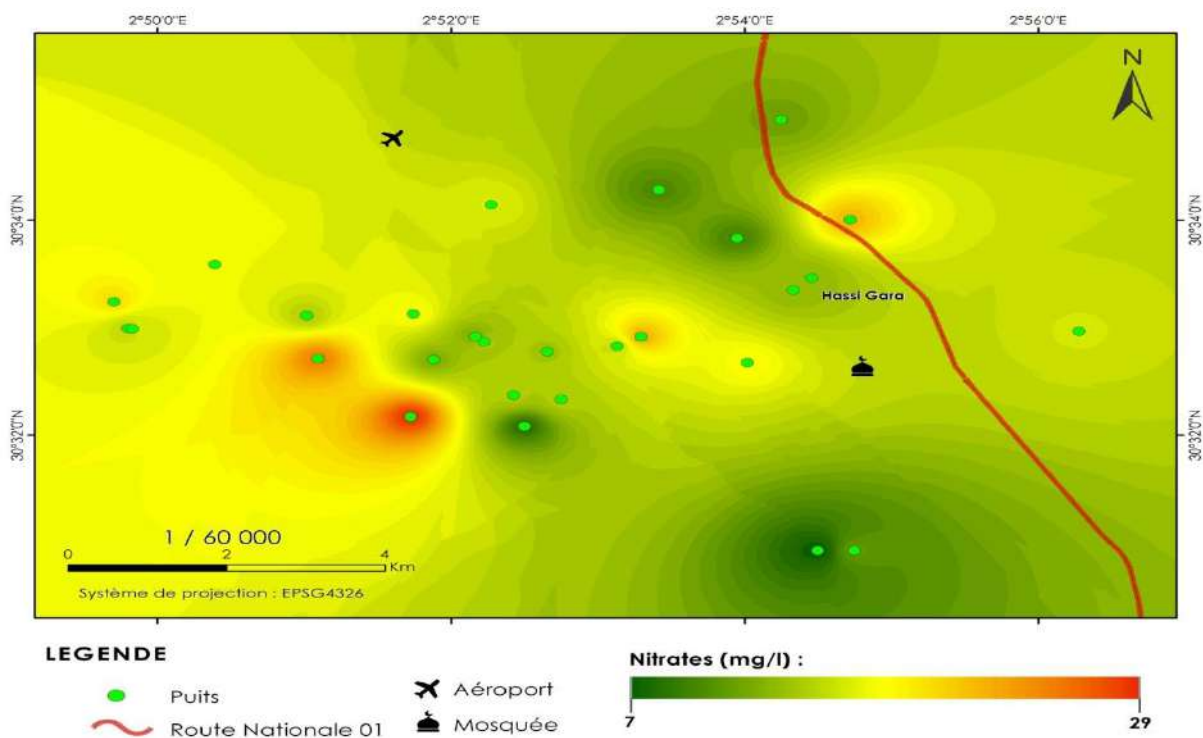
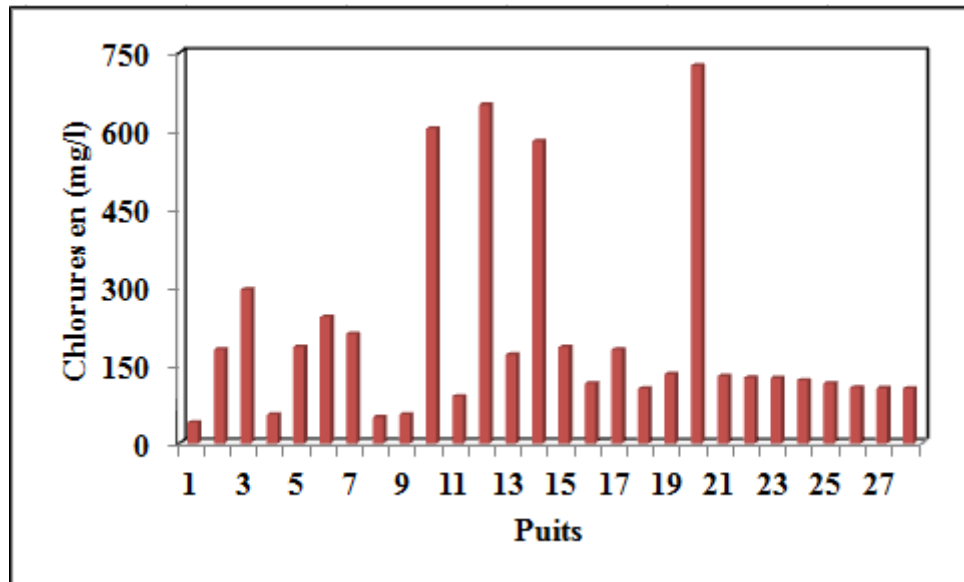


Figure 76 Carte de la distribution spatiale des nitrates dans la zone d'étude

La distribution spatiale des nitrates montre des valeurs assez fortes dans la partie Sud-ouest et Nord-est de la nappe et des valeurs faibles à moyennes au centre et au Sud de la zone d'étude. La carte obtenue concorde bien avec le modèle de la méthode de GOD ou on voit bien un indice de vulnérabilité fort dans la partie Sud-ouest (Figure 76).

## *Vulnérabilité à la pollution de la nappe phréatique*

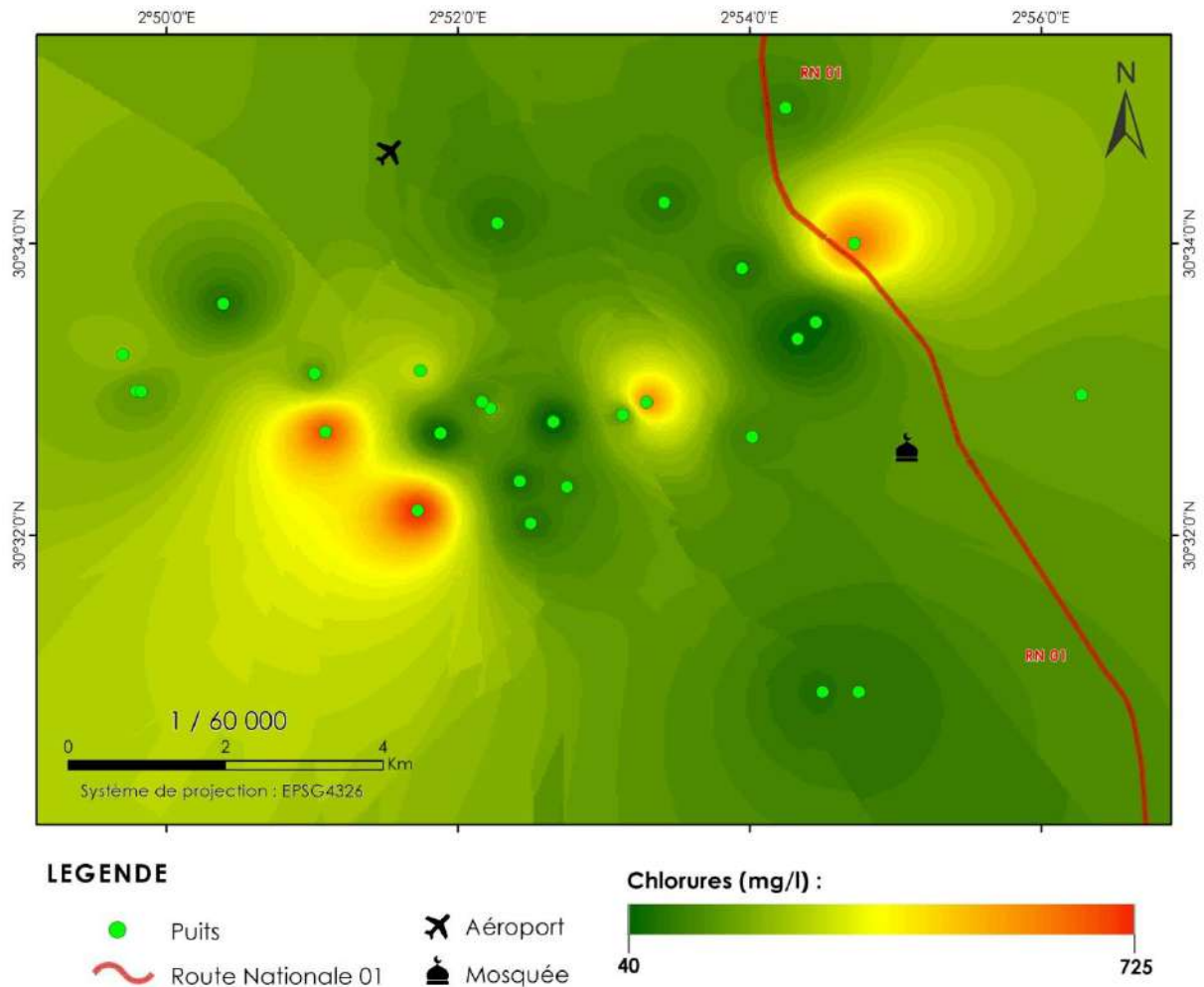
Pour les teneurs en chlorures, on observe des valeurs fortes qui dépassent la limite proposée par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) (500mg/l), dans cette zone d'étude, les concentrations en chlorure présentent des valeurs faibles à fortes qui comprises entre 40 et 725 mg/l (Figure 77).



**Figure 77 Teneurs des chlorures dans la zone d'étude**

Comme celle de la carte de la distribution spatiale des nitrates, la carte de la distribution spatiale des chlorures montre des valeurs très fortes dans la partie Sud-ouest et Nord-est de la nappe qui dépassent la valeur admissible proposée par l'OMS, au centre et au Sud de la nappe, les valeurs sont faibles à moyennes. La carte obtenue concorde bien avec le modèle de la méthode de GOD où on voit bien un indice de vulnérabilité fort dans la partie Sud-Ouest et Nord-Est (Figure 78).

# Vulnérabilité à la pollution de la nappe phréatique



**Figure 78 Carte de la distribution spatiale des chlorures dans la zone d'étude**

## 5. Conclusion

Dans cette étude, nous avons essayé d'évaluer la vulnérabilité à la pollution à partir de la méthode de GOD.

La vulnérabilité à la pollution de la nappe phréatique d'El Menia déterminée par la méthode de GOD révèle une tendance à la vulnérabilité moyenne à très forte, dont 10% de la surface totale a une vulnérabilité très forte, 75% de la superficie totale a une vulnérabilité forte et enfin 15% de la surface totale a une vulnérabilité modérée.

La validité de l'application de la méthode de GOD à l'étude de la pollution de cette nappe phréatique a été examinée par une compagnie de mesure de nitrates et des chlorures, les cartes de la distribution spatiale des concentrations en nitrates et en chlorures dans cette nappe présentent une certaine coïncidence avec la carte de la distribution spatiale de l'indice de vulnérabilité établi selon la méthode citées en avant.

***Chapitre 07 : Gestion de la  
ressource en eau***

## **1. Introduction**

L'eau est une matière naturelle très précieuse, elle est indispensable à la vie humaine (domestique, irrigation et industriel). Pour bien gérer la problématique de l'eau, la connaissance de la disponibilité de la ressource en eau est primordiale, cette problématique ne se pose pas uniquement en terme de qualité mais plutôt de quantité pour satisfaire les besoins nécessaires des citoyens surtout en zone aride et semi-arides caractérisées par la rareté des précipitations et dont appartient notre zone d'étude.

Après avoir présenté dans les chapitres précédents les caractéristiques hydrogéologiques et hydrochimiques de la ressource en eau qu'existent dans cette zone d'étude et faire un diagnostic qualitatif de cette dernière, nous allons évaluer dans ce chapitre celles mobilisables et leurs attributions pour chaque secteurs d'utilisation en abordant aussi les différents scénarios qu'on peut les rencontrés pendant un court, moyen ou à long terme pour chaque secteur d'utilisations.

## **2. Diagnostic quantitatif de la ressource en eau dans la région d'El Menia**

### **2.1. Potentialités hydriques de la zone d'étude**

Cette zone est située dans un contexte naturel caractérisé par un climat hyper aride (saharien) ce qui rend l'écosystème vulnérable et difficile à gérer. Cette situation implique le recours à l'exploitation des eaux souterraines la seule ressource hydrique qu'existe dans cette région. Les ouvrages de captage des ses eaux souterraines sont essentiellement des forages qui captent la nappe du Continental intercalaire (CI) et des puits qui captent la nappe phréatique.

### **2.2. Les puits**

Historiquement, la nappe phréatique était la plus utilisée vue son niveau proche du sol, actuellement il existe une dizaine de puits traditionnels utilisés pour l'irrigation dont le débit d'exploitations sont peu signifiants.

### **2.3. Les forages**

La majorité du potentiel hydrique souterrain de l'oasis d'El Menia est représenté par des forages exploitent la nappe du Continental intercalaire, D'après le bilan actuel de l'ABH de Ouargla, on a dénombré près de 460 forages répartis à travers la zone d'étude, dont 45 forages sont abandonnés pour des raisons différentes (colmatage ou du rendement très faible). Les forages en service mobilisent annuellement un volume de 283.74 hm<sup>3</sup>, ils sont destinés

# *Gestion de la ressource en eau*

---

essentiellement à l'irrigation, et un faible débit pour l'alimentation en eau potable et l'industrie.

## **2.4. Réservoirs de stockage**

Les infrastructures hydrauliques comme les réservoirs de stockage jouent un rôle important dans la sécurité hydrique et alimentaire de la région d'El Menia et présentent de précieux services au secteur socioéconomique. La zone d'étude compte 7 réservoirs de stockage de tailles diverses avec une capacité de stockage totale égale à 5300 m<sup>3</sup> (Tableau 35).

**Tableau 35 Réservoirs de stockage et leurs capacités**

<b>Commune</b>	<b>Nombre de réservoirs</b>	<b>Capacité (m<sup>3</sup>)</b>
<b>El Menia</b>	5	3800
<b>Hassi El Gara</b>	2	1500

## **2.5. Station d'épuration**

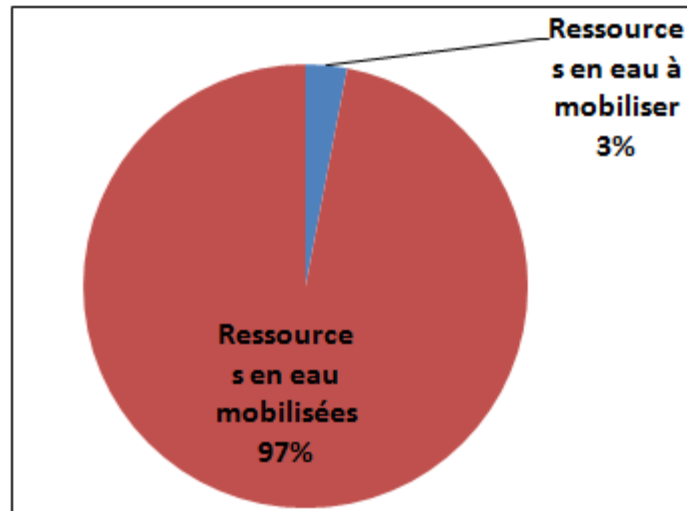
La seule station d'épuration des eaux usées dans la région d'étude est située dans la commune de Hassi El Gara, daïra d'El Menia. Elle a été mise en service en 2017, Les eaux traitées par ce lagunage sont de nature domestique et cette filière présente l'avantage d'être parfaitement adaptée aux réseaux d'assainissement de type unitaire et collectant des eaux diluées.

La station d'épuration est de type lagunage naturel d'une capacité de 33519 m<sup>3</sup>/j, Débit d'entrée de la station 15000 m<sup>3</sup> /j et le débit de sortie de la station à 14000 m<sup>3</sup> /j. Actuellement, les eaux usées de la station d'épuration de la ville de d'El Menia sont traitées rejetées dans le lac de el Menia à partir de système d'égouts.

## **3. Mobilisation de la ressource en eau dans la région d'El Menia**

La zone d'étude dispose d'un potentiel hydrique souterrain important destiné pour les différents secteurs d'utilisateurs (AEP, AEA et AEI), Le débit des eaux souterraines mobilisable est estimé à 283.74 hm<sup>3</sup>/an, dont 275.23 hm<sup>3</sup>/an sont des ressources mobilisées soit un taux plus de 97% des eaux souterraines mobilisables, et 3% de la ressource reste encore à mobiliser (Figure 79).

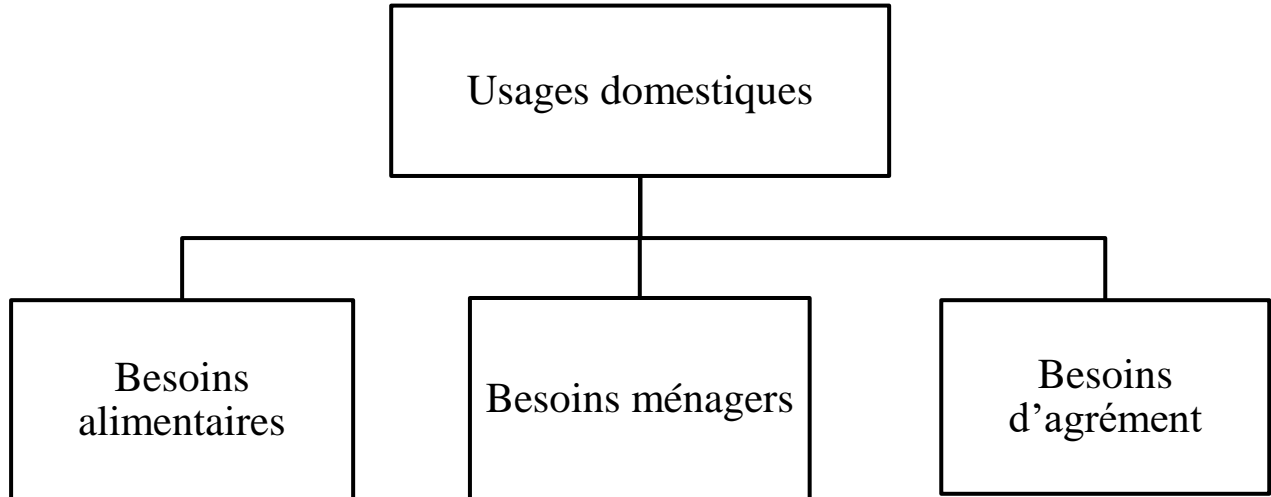




**Figure 79 Taux de mobilisation de la ressource en eaux souterraines dans la région d'El Menia**

#### 4. Affectation de la ressource en eaux dans la zone d'étude

On peut classer l'utilisation de la ressource en eaux pour les besoins de consommation en trois classes à savoir : la consommation domestique, production agricole et utilisation industrielle (Bouznad Imad Eddine, 2017 ; Kahal, 2019) (Figure 80, 81 et 82).



**Figure 80 Structure de la demande en eau à usage domestique**

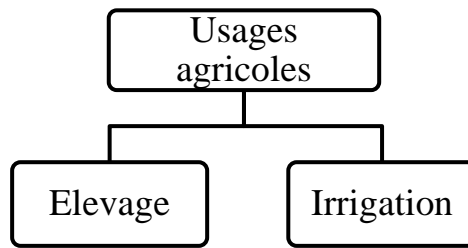


Figure 81 Structure de la demande en eau à usages Agricoles

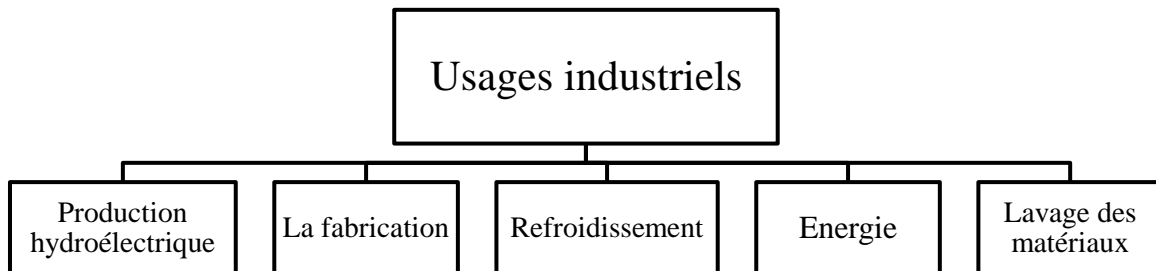


Figure 82 Structure de la demande en eau à usage industriels

Dans cette zone, la ressource en eau est destinée essentiellement à l'irrigation avec un volume annuel égale à  $257.83 \text{ hm}^3$  soit 96% de la ressource en eau mobilisable, quand à l'alimentation en eau potable (AEP), le volume annuel ne dépasse pas  $12.93 \text{ hm}^3$  avec un taux égale à 3% de la ressource mobilisable et enfin pour l'alimentation en eau industrielle, le volume annuel est de  $4.47 \text{ hm}^3$  soit un taux égal à 1% (Figure 83).

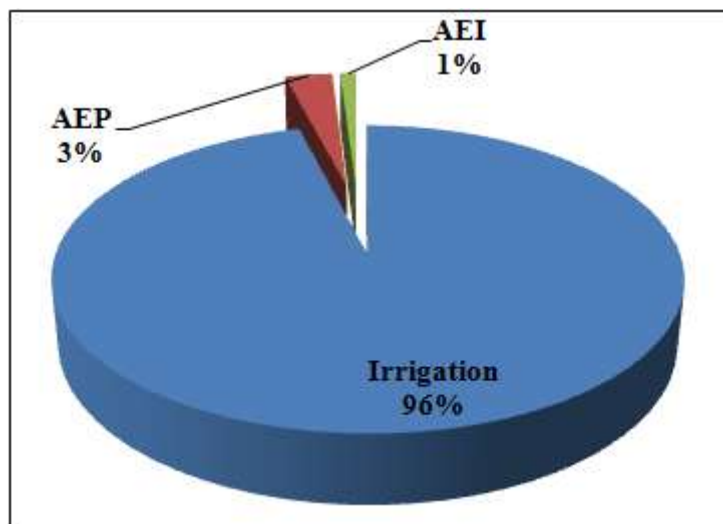


Figure 83 Affectation des ressources en eaux souterraines dans la zone d'étude

## 5. Alimentation en eau dans la zone d'étude

# *Gestion de la ressource en eau*

Dans les prochaines années, la demande en eau va croître considérablement à cause de la faible précipitation (changement climatique), des raisons économiques vu le fort développement en domaine de l'agriculture (la principale activité) dans cette région et enfin le facteur démographique (accroissement de la population). L'Organisation des Nations Unies dans une étude rappelle que près de 1,1 milliards de personnes manquent d'eau potable, et que 2,9 milliards de personnes ne disposent pas de services d'assainissement, et estime que les problèmes d'approvisionnement en eau potable dans les pays en voie de développement se verront aggravés par le taux élevé de croissance de population et la concentration graduelle de la population dans les grandes villes.

## **5.1. Alimentation en eau potable (AEP) dans la zone d'étude**

Dans cette zone d'étude, l'alimentation en eau potable pour les deux communes (El Menia et Hassi El Gara) est assurée par 20 forages captés dans la nappe du CI dont seuls 8 forages disposent d'un compteur en fonction.

Le débit globale fournit par ces forages est égale à 400.33 l/s, soit une dotation journalière théorique égale à 483 l/j/hab pour une population de 71535 habitants selon les données de 2017. La dotation journalière réelle est de l'ordre de 150 l/j/hab, vu la dotation journalière théorique on peut dire que la valeur de la dotation journalière réelle est très faible par rapport à la dotation nationale (180 l/j/hab) et par rapport à la quantité d'eau produite par jour. 330 l/j/hab vont se perdre soit 68.75 % du volume produit par jour alors que 31.25 % du volume produit par jour arrive aux citoyens. Cette situation montre bien le taux considérable des pertes par réseau.

Pour le niveau de service dans cette zone d'étude, 23% de la population sont alimentées 24 heures/24 heures alors que 77% de la population sont alimentées au quotidien, le taux de raccordement moyen est de l'ordre de 92.5% (AEP) pour l'ensemble des deux communes (El Menia et Hassi El Gara), alors que pour l'assainissement le taux de raccordement est de 70%. Cette même zone dispose d'un linéaire de réseau égal à 400 km (Tableau 36).

**Tableau 36 Situation actuelle de l'alimentation en eau potable dans la région**

Commune	Population (2017)	Volume produit par jour (m <sup>3</sup> )	Volume distribué par jour (m <sup>3</sup> )	Taux de raccordement (%)		Dotation (l/j/hab)
				AEP	Assainissement	
El Menia	49 579	22 925	7 437	92	65	150
Hassi El Gara	21 956	11 664	3 293	93	74	149.98

## **5.2. Alimentation en eau pour l'agriculture (AEA)**

L'irrigation dans cette zone d'étude est indispensable pour assurer une production agricole régulière et en quantité suffisante car le climat de cette dernière est un climat saharien (aride) marquée surtout par une faible pluviométrie et irrégularité dans le temps et dans l'espace. A noter que l'agriculture est la principale activité des gens dans cette zone.

Pour mieux gérer la ressource en eau dans le domaine agriculture, l'état Algérie à procéder à crier plusieurs organismes comme l'AGID des maîtrises d'œuvre et d'ouvrage des projets de développement des grands périmètres irrigués, de l'assistance, du suivi et de l'évaluation de l'activité des offices des périmètres d'irrigation. La DHW (direction de l'hydraulique), la DSA (direction des services agricoles) et le CDARS (Commissariat au développement des régions sahariennes) pour suivre les programmes de petite et moyenne hydraulique et les projets de mise en valeur des régions sahariennes.

La création de l'ONID chargé pour la gestion et de l'exploitation des ressources en eau et des infrastructures hydrauliques dans les périmètres d'irrigation, actuellement elle a une tâche pour notamment la commercialisation de l'eau d'irrigation. Actuellement la zone d'étude compte plus de 268 forages pour l'alimentation en eau d'irrigation avec un débit globale égale à 12805 l/s.

### **5.2.1. Répartition des surfaces agricoles dans la zone d'étude**

La fonction de l'agriculture dans les régions Sahariennes c'est bien la viabilisation de l'espace aride pour le rendre à la fois vivable pour les êtres vivants et créateur d'activité productive, donc le paysage oasien dépend essentiellement à l'aménagement de la ressource en eau, qui par la suite nécessite l'extension des terres cultivées de la surface agricole utilisée (SAU) (Tableau 37).

La culture du palmier dattier avec toutes variétés est le pilier de cette viabilisation, elle constitue la base de l'agriculture dans la région. Elle participe aussi à la création d'un micro climat agréable et à l'équilibre du système écologique général de la ville.

**Tableau 37 État actuel de la superficie agricole à travers la zone d'étude**

<b>Commune</b>	<b>SAT (ha)</b>	<b>SAU (ha)</b>	<b>S.Attribuée (ha)</b>	<b>S.Irriguée (ha)</b>	<b>Nbre Forages</b>	<b>Débit Totale (l/s)</b>
<b>El Menia</b>	220 000	85 750	50 989	4 789	182	<b>9731.8</b>
<b>H.Gara</b>	150 000	150 000	24 651	2 541	86	<b>3073.2</b>
<b>Total</b>	<b>370 000</b>	<b>235 750</b>	<b>75 740</b>	<b>7 330</b>	<b>268</b>	<b>12805</b>
<b>Daira</b>						

(Source DSA, 2014)

# *Gestion de la ressource en eau*

---

## 5.2.2. Répartition des palmiers dattiers dans la zone d'étude

D'une façon générale, le nombre total des palmiers est de 223242 dont 177460 palmiers productifs qui produisent plus de 89 694,25 qx de dattes, la densité totale des palmiers est de 57 palmiers par hectare et celle des palmiers productifs est de 45 palmiers par hectare (Tableau 38).

**Tableau 38 Production des palmiers dans la région de El Menia**

Commune	Surface occupée (ha)	Nombre de palmiers productifs	Densité des palmiers productifs par ha	Production (qx)
El Menia	2450	108 075	44	45061
Hassi El Gara	1400	69 385	50	29390

(Source DSA, 2014)

## 5.3. Alimentation en eau industrielle (AEI)

L'alimentation en eau industrielle dans notre d'étude est extrêmement variable et dépend du type d'industries ; le taux de la ressource en eau mobilisable à des fins industrielles représentent 1 % (150.32 l/s) du total des ressources mobilisables de la région (absence d'industries consommatrices d'eau).

## 6. Évaluation des besoins en eau des différents secteurs

L'évaluation de la demande de la ressource en eau a pour objectif de suivre l'évolution des besoins en eau à court, moyen et long terme des différents secteurs usagers (AEP, AEA et AEI). Cela nous permettra d'estimer les écarts prévisibles entre l'offre et la demande en fonction du temps on confrontant cette demande avec le potentiel hydrique actuellement disponible. Les objectifs recherchés est de satisfaire à 100 % les besoins en eau aux échéances de l'étude (court, moyen et long terme).

### 6.1. Évaluation de la demande Socio-économique en eau (Alimentation en eau potable)

L'évaluation des besoins en eau potable (court, moyen et long terme) est basée sur le taux satisfaction des besoins en eau potable et en relation avec le modèle de développement du réseau urbain. Les besoins en eau potable en (hm<sup>3</sup>/an) sont résumés dans le tableau 39:

**Tableau 39 Estimation du bilan prévisionnel des besoins (hm<sup>3</sup>/an) en A.E.P**

Situation	Population	Besoin en eau potable hm <sup>3</sup> /an	Volume produit hm <sup>3</sup> /an
Situation de 2017	71535	3.91	12.62
Situation de 2022	78030	4.26	33
Situation de 2027	84525	4.61	66
Situation de 2037	97515	5.31	132

# Gestion de la ressource en eau

D'après les résultats de ce tableau, on peut constater que l'offre est légèrement supérieure à la demande, le volume produit est passé de 12.62 hm<sup>3</sup>/an en 2017 à 132 hm<sup>3</sup>/an en 2037, alors que les besoins en eau à destination domestiques doivent passer de 3.91 hm<sup>3</sup>/an à seulement 5.31 hm<sup>3</sup>/an à l'horizon de 2037, il reste à signaler que le problème de la ressource n'est pas posé dans notre zone d'étude par contre le problème des pertes des eaux dans les réseaux de distributions persiste et donc les efforts des autorités locales doivent se focaliser sur ce phénomène (Figure 84).

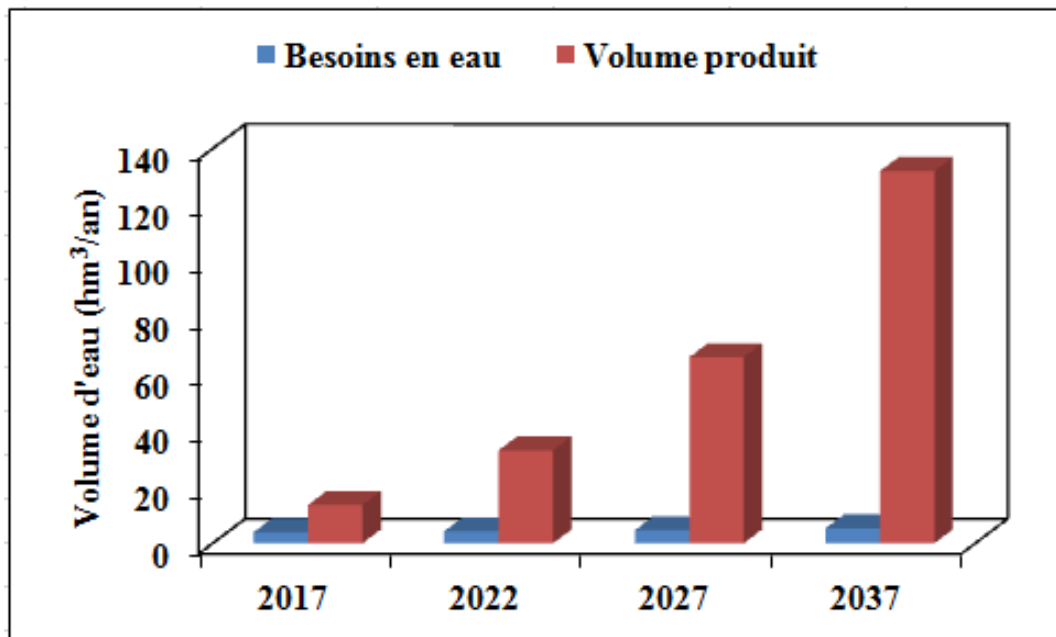


Figure 84 Répartition des besoins en eau potable pour différents horizons dans la zone d'étude

## 6.2. Évaluation des besoins en eau agricole (horizon 2017 – 2022 – 2027- 2037)

Sur le plan agricole et en se basant sur le développement économique qui caractérise cette zone d'étude depuis l'an 2000, la superficie des terres irriguées a augmenté de presque de 10 fois depuis 1984 où la surface était égale à 826 ha alors qu'en 2017 la superficie irriguée est de l'ordre de 7330 ha, cette donnée nous amène à penser à la ressource hydrique nécessaire pour satisfaire l'irrigation de ces terres à moyen et à long terme vu que l'évaporation est très intense pendant toute l'année. Le tableau suivant résume l'évolution des terres irriguées à court, moyen et long terme avec les besoins en eau nécessaires pour satisfaire cette demande (Tableau 40).

Tableau 40 Besoins en eau agricole dans la zone d'étude

Horizon	2017	2022	2027	2037
---------	------	------	------	------

# Gestion de la ressource en eau

<b>Superficie irriguée (ha/an)</b>	7330	10106.2	12089.2	16055.2
<b>Besoins en eau (hm<sup>3</sup>/an)</b>	146.6	202.12	241.78	321.10
<b>Volume produit (hm<sup>3</sup>/an)</b>	257.83	355.49	425.24	564.73

D'après les données fournies par le tableau 40, on peut constater que la ressource en eau dans cette région est destinée essentiellement pour satisfaire la demande en eau pour l'irrigation, elle passait de 146.6 hm<sup>3</sup> en 2017 pour aller à un volume égale à 321.1 hm<sup>3</sup> à l'horizon de 2037 ce qui présente le double de la ressource utilisée en 2017. Le volume produit égale à 257.83 hm<sup>3</sup> en 2017 et aller jusqu'à 564.73 hm<sup>3</sup> en 2037, ce volume montre bien que l'offre est largement supérieur à la demande ce qui nous permet d'irriguer d'autres superficie sans problème de pression sur les ressources en eau. Il est à noter que la réflexion doit se focalise sur le changement des méthodes d'irrigation irrationnelle et traditionnelle pour éviter les problèmes de salinisation des sols dans la région (Figure 85).

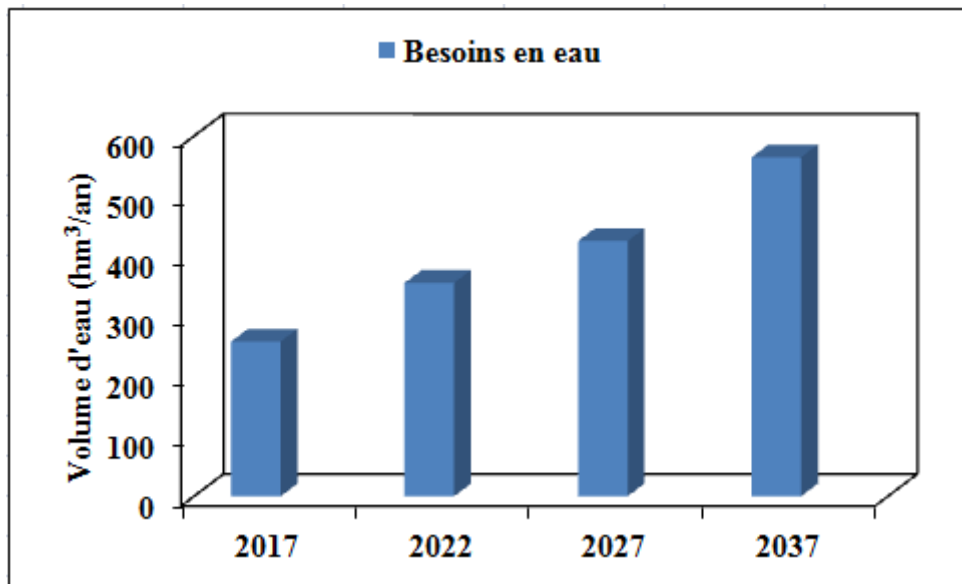


Figure 85 Répartition des besoins en eau agricole pour différents horizons dans la zone d'étude

### 6.3. Évaluation des besoins en eau industrielle (horizon 2017 – 2022 – 2027 - 2037)

Généralement dans les zone sahariennes, les besoins en eau à des fins industriels sont extrêmement variable et elle dépend évidemment du type d'industrie, et vu l'absence des industries à forte intensité d'eau (tel que l'industrie chimique, la sidérurgie et la pâte à papier). Pour zone d'étude est à cause de l'absence d'une zone industrielle en activité, les besoins en eau selon les données fournies par l'agence des bassins hydrographiques sont estimés à 0.3

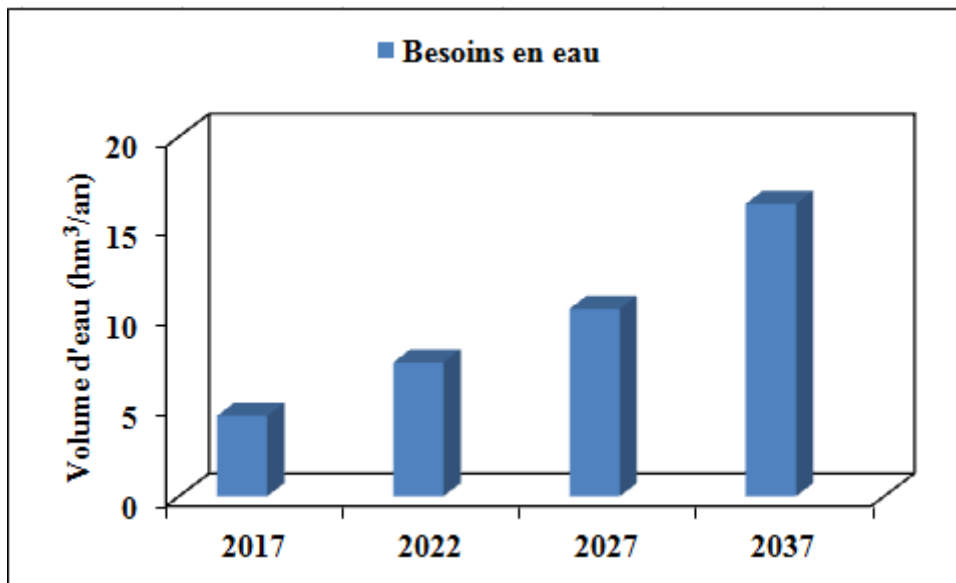
# *Gestion de la ressource en eau*

hm<sup>3</sup> en 2010 avec deux forages, ces besoins s'élèvent à 4.47 hm<sup>3</sup> en 2017. Le tableau 41 montre l'évolution des besoins en eau industriels à court, moyen et long terme.

**Tableau 41 Besoins en eau industriel dans la zone d'étude**

Horizon	2017	2022	2027	2037
Besoins en eau (hm <sup>3</sup> /an)	4.47	7.44	10.42	16.27

L'évolution des besoins en eau industriels à court, moyens et à long terme dans notre zone d'étude présente des valeurs faibles vu que l'activité principale des citoyens est celui de l'agriculture (Figure 86).



**Figure 86 Répartition des besoins en eau industrielle pour différents horizons dans la zone d'étude**

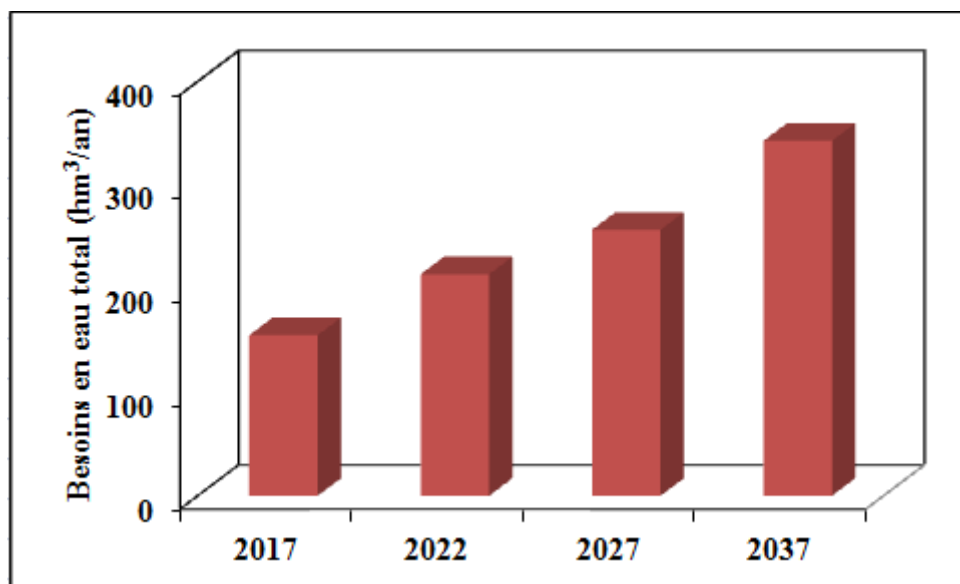
## 6.4. Bilan des besoins globaux

Selon les résultats présentés ci-dessous (Figure 87), Les besoins globaux en eau actuelle dans l'oasis d'El Menia sont de l'ordre de 154.98 hm<sup>3</sup>/an en 2017, ces besoins s'élèvent à 213.82 hm<sup>3</sup>/an à l'horizon 2022 pour atteindre 342.68 hm<sup>3</sup>/an à l'horizon 2037. Le tableau 42 résume les résultats obtenus :

**Tableau 42 Besoins en eau totale (hm<sup>3</sup>/an) dans la zone d'étude**

Horizon	2017	2022	2027	2037
AEP	3.91	4.26	4.61	5.31
AEA	146.6	202.12	241.78	321.1
AEI	4.47	7.44	10.42	16.27
Total	154.98	213.82	256.81	342.68





**Figure 87 Bilan des besoins globaux dans l'oasis d'El Menia**

### **7. Confrontation offre-demande en eau dans l'oasis d'El Menia**

En principe la confrontation entre l'offre et la demande de la ressource en eau dans notre zone d'étude sert à constater l'adéquation des ressources ou à déterminer les problèmes posés par une éventuelle pénurie d'eau plus ou moins long terme. Elle a le sens d'une comparaison des données actuelles ou projetées.

D'après les résultats obtenus précédemment pour la période 2017-2037, et compte tenu de l'évolution des besoins des différents usagers de l'eau dans cette zone d'étude (ménages, services collectifs, industrie et les périmètres irrigués) et de leur croissance, on peut constater que l'agriculture est considérée comme le grand futur consommateur d'eau dans l'oasis. On peut aussi constater que l'offre est toujours supérieur à la demande malgré la pression exercée par les activités agricoles (l'activité principale de la population dans cette région).

Compte tenu du caractère aride de la zone d'étude ce qui implique une irrigation durant toute l'année, Les résultats des effets d'augmentation des superficies irriguées montre clairement une pression sur la ressource en eau dans cette zone.

Enfin, la ressource en eau dans cette zone et malgré son abondance (le continental intercalaire), il est nécessaire d'imposer les nouvelles méthodes d'irrigation pour minimiser la quantité d'eau exploitable d'un coté et pour conserver la qualité du sol qui souffre du phénomène de la salinisation de l'autre coté.

## **8. Conclusion**

La zone d'étude est située dans un contexte naturel caractérisé par un climat hyper aride, cette situation implique le recours à l'exploitation des eaux souterraines la seule ressource hydrique qu'existe dans cette région. La majorité du potentiel hydrique souterrain de l'oasis d'El Menia est représenté par des forages exploitent la nappe du Continental intercalaire, et quelques puits qui captent la nappe phréatique. D'après le bilan actuel de l'ABH de Ouargla, on a dénombré près de 460 forages répartis à travers la zone d'étude qui mobilise un volume de 283.74 hm<sup>3</sup> destinés essentiellement à l'irrigation, et un faible débit pour l'alimentation en eau potable et l'industrie. L'évaluation de la demande de la ressource en eau a pour objectif de suivre l'évolution des besoins en eau à court, moyen et long terme des différents secteurs usagers (AEP, AEA et AEI).

D'après les résultats obtenus précédemment pour la période 2017-2037, et compte tenu de l'évolution des besoins des différents usagers de l'eau dans cette zone d'étude (ménages, services collectifs, industrie et les périmètres irrigués) et de leur croissance, on peut constater que l'agriculture est considérée comme le grand futur consommateur d'eau dans l'oasis. On peut aussi constater que l'offre est toujours supérieur à la demande malgré la pression exercée par les activités agricoles (l'activité principale de la population dans cette région).

## *Conclusion générale*

# *Conclusion générale*

---

## **Conclusion générale**

L'oasis d'El Menia est le point le plus central de l'Algérie ; elle comporte l'ensemble d'El Menia et Hassi El Gara et d'une superficie égale 49000 km<sup>2</sup> caractérisé par la présence des terrains sont d'âge secondaire repartit par un terrain ancien d'âge Cénomaniens inférieur à l'Ouest, de nature lithologique argileuse. La série stratigraphique de la région fournis par les forages pétroliers montre que le Quaternaire est composé d'une croûte calcaire, des alluvions et des dunes de l'Erg Occidental.

Le climat de la région est un climat saharien de type hyper aride, avec un hiver froid, et un été chaud et sec, influencé par sa position géographique et son relief. La moyenne annuelle des précipitations est 66.34 mm, la température moyenne annuelle est égale à 22.43 °C.

La région d'El Menia bénéficie de deux nappes l'une superficielle peu profonde et la deuxième profonde artésienne très connue par sa grande surface et ses réserves gigantesques (la nappe du Continental Intercalaire). L'écoulement dans la nappe superficielle est Nord-Sud par contre dans la nappe du CI se fait de Nord-Est vers le Sud-Ouest. L'étude hydrodynamique de la nappe du Continental Intercalaire permet de déterminer un coefficient de perméabilité égale à  $3.32 \cdot 10^{-5}$  m/sec et transmissivité est de l'ordre de  $2 \cdot 10^{-2}$  m<sup>2</sup>/s qui renseigne sur la possibilité d'exploitation du CI dans cette région.

D'après cette étude hydrochimique, on conclue que les eaux du CI sont dominées par le faciès bicarbonaté sodiques, calciques et magnésiens, pour la nappe phréatique, les faciès dominants sont le chloruré calcique et sodique et à moindre degré par les faciès bicarbonatés calcique et sodique. L'application de l'analyse statistique des données monovariées et multivariées avec l'ACP sur les paramètres physico-chimiques des eaux de la nappe du CI montre que les éléments chimiques responsables de la minéralisation représentée par : Chlorures (Cl<sup>-</sup>), Potassium (K<sup>+</sup>), Sodium (Na<sup>+</sup>) et TDS, pour les eaux de la nappe phréatique, la minéralisation est beaucoup plus forte que celle des eaux de la nappe du CI, elle est représentée par HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Cl<sup>-</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, et TDS. L'examen des indices de saturation pour les eaux des deux nappes (CI + phréatique) prouve que la dissolution des roches carbonates est le responsable de la salinité des eaux du CI, alors que la dissolution des évaporites est à l'origine de la forte de minéralisée observée dans les eaux de la nappe phréatique.

Les sols de cette région sont des sols de palmerais peu évolués. L'étude pédologique des sols de cette région montre bien que ces sols présentent une salinité et une sodicité très élevées causée par la présence des sols sableux qui favorisent le drainage ainsi que une eau de

## *Conclusion générale*

---

nappe phréatique trop salée. Pour minimiser ces deux contraintes un contrôle périodique de la qualité chimique des eaux ainsi que une gestion rationnelle de l'irrigation est souhaitable.

La vulnérabilité à la pollution de la nappe phréatique d'El Menia déterminée par la méthode de GOD révèle une tendance à la vulnérabilité moyenne à très forte, dont 10% de la surface totale a une vulnérabilité très forte, 75% de la superficie totale a une vulnérabilité forte et enfin 15% de la surface totale a une vulnérabilité modérée.

L'évaluation de la demande de la ressource en eau a pour objectif de suivre l'évolution des besoins en eau à court, moyen et long terme des différents secteurs usagers (AEP, AEA et AEI). D'après les résultats obtenus pour la période 2017-2037, et compte tenu de l'évolution des besoins des différents usagers de l'eau dans cette zone d'étude (ménages, services collectifs, industrie et les périmètres irrigués) et de leur croissance, on peut constater que l'agriculture est considérée comme le grand futur consommateur d'eau dans l'oasis. On peut aussi constater que l'offre est toujours supérieur à la demande malgré la pression exercée par les activités agricoles (l'activité principale de la population dans cette région).

# *Bibliographie*

## *Références bibliographiques*

ABH (Agence des Bassins Hydrographiques). (2017) Rapport statistiques de la ressource en eau dans la willaya de Ghardaïa.

Achour, S. (1990) La qualité des eaux du Sahara Septentrional en Algérie. Étude de l'excès en fluor. Tribune de l'eau, Cebedeau, 42 (542), 53-57.

Ake, G-E., Kouassi Dongo, K., Boyossoro H-K., Dibi, B., Saley, M-B et Biemi, J. (2009) Contribution des Méthodes de Vulnérabilité Intrinsèque DRASTIC et GOD à L'Etude de la Pollution par les Nitrates dans la Région de Bonoua (Sud-Est de la Côte d'Ivoire), European Journal of Scientific Research ISSN 1450-216X Vol.31 No.1 (2009), pp. 157-171.

Aller, L. T., Bennet, J. H., Lehr, R. J., Petty, and G. Hackett. (1987) DRASTIC: A standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings, EPA/600/2-87-036, U.S. Environmental Protection Agency, Ada, Washington, D.C.

Attoui, B. (2014) Etat de la vulnérabilité à la pollution des eaux des grands réservoirs d'eaux souterraines de la région de Annaba- El-Tarf et identification des sites d'enfouissement de déchets. Thèse de doctorat. Université Badji Mokhtar de Annaba.

Aubert, G. (1983) Observations sur les caractéristiques, la dénomination et la classification des sols salés ou salsodique. Cahier ORSTOM, série Pédologique, Vol. XX, N°1, pp 73-78.

Badraoui, M., Souidi S & Farhat A. (1998) Variation de la qualité des sols : une base pour évaluer la durabilité de la mise en valeur agricole sous irrigation par pivot au Maroc. Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, Rabat, Maroc, pp 227-233.

Bagnouls F & Gaussen H. (1953) Saison sèche et indice xéothermique. Bulletin de la Société d'Histoire Naturelle de Toulouse, 88, pp 193-240.

Baize, D. (1988) Guide des analyses courantes en pédologie : choix, expression, présentation et interprétation. INRA, Paris, 172 p.

Belksier, M-S. (2009) Hydrogéologie et hydrochimie de la nappe superficielle dans la région de l'Oued Righ et l'évolution de sa vulnérabilité. Mémoire de magister, Université Badji Mokhtar-Annaba- 87-90 p.

Belksier, M-S. (2017) Caractéristiques hydrogéologiques de la nappe superficielle dans la région de l'Oued Righ et évaluation de l'impact de la pollution et de la salinité sur la qualité de ses eaux. Thèse de doctorat. Université Badji Mokhtar Annaba.

Berkaloff, E., et Tixeront, J. (1958) Notice sur la carte du ruissellement annuel moyen en Tunisie. Etudes d'hydraulique et d'hydrologie, BIRH 1958, Secretariat d'Etat à l'Agriculture à Tunis.

Bouchahm, N., Chaib, W., Drouiche, A., Zahi, F., Hamzaoui, W., Salemkour, N., ... & Djabri, L. (2013) Caractérisation et cartographie des sites de remontée dans la région de l'Oued Righ (bas Sahara Algérien). J Algérien des Régions arides, 76-88.

Boulabeiz, M. (2017) Evaluation de la pollution dans la plaine de Collo, interaction nappe-rivière. Thèse de doctorat. Université Badji Mokhtar Annaba.

Bourhan, A. (2010) Discrimination de l'origine de la salinité des masses d'eau souterraine: contexte hydrogéologique et méthodes d'étude, Géosciences Réunion, BRGM, Univ. Avignon; 108 p.

Bouselsal, B. (2016) Etude hydrogéologique et hydrochimique de l'aquifère libre d'El Oued souf (SE Algérie). Thèse de doctorat. Université Badji Mokhtar Annaba.

Bouzned I-E. (2009) Ressources en eau et Essai de la gestion intégrée dans la vallée Sud d'Oued Righ (W. Ouargla) (Sahara septentrional algérien), Thèse de magistère, option hydrogéologie, Université Badji Mokhtar Annaba ; 128p.

Bouznad, I-E. (2016) Ressources en eau et gestion intégrée dans la vallée de Oued Righ (Sahara septentrional algérienne). Thèse de doctorat. Université Badji Mokhtar Annaba.

Busson, G. (1967) Le Mésozoïque saharien. 1ère partie : L'Extrême Sud-tunisien. Edit., Paris, « Centre Rech. Zones Arides », Géol., 8, 194 p. Ed. C.N.R.S.

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.

Cabello, Javier & Salinas, María & Torres-Garcia, Maria & Castro, Hermelindo. (2016) Manuel pour le suivi du changement global: une proposition pour les zones arides et semi-arides.

Capot, R-G. (1958) L'eau et le sol à El-Goléa. Travaux de L'IRST Tome XVII.

Castany, G. (1982) Principes et méthodes de l'Hydrogéologie. Dunod Edit. Paris, 334 p.

Chapman D. & V. Kimstach, (1996) Selection of water quality variables. Water quality assessments: a guide to the use of biota, sediments and water in environment monitoring, Chapman edition, 2nd ed. E & FN Spon, London, pp. 59-126.

Civita, M., De Regibus, C. (1995) Sperimentazione di alcunemetdologie per la valutazione del la vulnerabilita degli aquifer. Q Geol Appl Pitagora Bologna 3:63-71

Civita, M., and DE Maio. (1997) SINTACS. Un Sistema Parametrico per la Valutazione e la Cartografia della vulnerabilita Degli Acquiferi All'inquinamento. Metodologia & Automatizzazione. Pitagora EditriceBologna. pp 191.

Cooper, H-H. & Jacob, C-E. (1946) A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well field history, Am. Geophys. Union Trans., vol. 27, pp. 526-534.

Cornet, A. (1964) Introduction à l'hydrogéologie saharienne. Géographie Physique et Géologie Dynamique. Vol.VI. 1964. fascl,pp.5-72.

Côté, M.-J., Y. Lachance., C, Lamontagne, M., Nastev, R. Plamondon et N. Roy. (2006) Atlas du bassin versant de la rivière Châteauguay. Collaboration étroite avec la Commission géologique du Canada et l'Institut national de la recherche scientifique – Eau, Terre et Environnement. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, 64 p.



De Martonne, E.(1926) L'indice d'aridité. In: Bulletin de l'Association de géographes français, N°9, 3e année, pp. 3-5.

Doerfliger, N., Plagnes, V., Kavouri, K. et Gouin, J. (2009) Cartographie de la vulnérabilité intrinsèque des aquifères karstiques. Guide méthodologique de la méthode PaPRIKa. Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM). Orléans, France. 105.

DPSB (Direction de la Programmation et du Suivi Budgétaires), (2012) Rapport sur l'aspect économique de la daïra d'El Menia.

DSA (Direction des Services Agricoles de la wilaya de Ghardaia), (2014) Rapport statistique des données agricoles d'El Menia.

Dubost, D. (1991) Ecologie, aménagement et développement agricole des oasis algériennes (Doctoral dissertation, Tours).

Emberger, L. (1955) Projet d'une classification géographique des climats. L'année de biologie, 3<sup>ème</sup> série, T, 31 : 249 – 255.

ERESS, (1972) Etude des Ressources en Eau de Sahara Septentrional. UNESCO, Paris. (7 Vols. and Annexes).

Fabre, J. (1976) Introduction à la géologie du Sahara d'Algérie et des régions voisines. SNED, Alger.

Fabre, J. (2005) Géologie du Sahara Occidental et Central Tervuren africain géoscience collection vol 108. 572 p.

FAO, F. (2017) The future of food and agriculture—Trends and challenges. Annual Report, 296, 1-180 p.

Farah, A-K. (2014) Changement climatique ou variabilité climatique dans l'Est algérien. Thèse de magistère, Pathologie des écosystèmes forestiers, Université Constantine 1, 108 p.

Foster, S-D. (1987) Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy, Atti Int. Conf. Vulnerab. of Soil and Groundw. to Pollutants, RIVM Proc. and Inf. 38, pp. 69–86.

Grosclaude, G. (1999) L'eau: Usages et polluants (tome II). Livre. INRA éditions, Paris, France. 209 p.

Guettiche. S & Benabdsadok, D. (2006) Contribution à l'étude de la possibilité d'utilisation des eaux de la nappe phréatique pour l'irrigation dans la région d'Oued Righ. Mémoire d'ingénieur. Université de Constantine. (135 p).

Hamza, M-H., Added.A., Frances. A. & Rodriguez. R. (2007) Validity of the vulnerability methods DRASTIC, SINTACS and SI applied to the study of nitrate pollution in the phreatic aquifer of Metline-Ras Jebel-Raf Raf . CR Geoscince 339:493–505, 2007.

Jannot, Y. (2005) L'air humide. <https://www.thermique55.com>.

Joyaux, F. (2018) Croissance démographique, développement économique et politique extérieure : Le cas de la Chine populaire. Revue de l'Est, vol. 4, 1973, n°4. Economie, planification et organisation. pp. 37-58.

Kahal, A. (2019) Hydrogéologie de l'aquifère dans la plaine de F'Kirina (Oum El-Bouaghi, Nord-Est Algérien) et Evaluation des ressources en eaux mobilisables. Thèse de doctorat. Université Badji Mokhtar-Annaba.

MADP (Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural), 2013. Rapports national sur l'état de la biodiversité pour l'alimentation et l'agriculture en Algérie. 2013.

Margat J. (1968) Vulnérabilité des nappes d'eau souterraine a la pollution [Groundwater vulnerability to contamination]. Bases de la cartographie, (Doc.) 68 SGC 198 HYD, BRGM, Orleans, France.

Martinez-Bastida, J.J., Arauzp, M., Valladolid, M. (2010) Intrinsic and specific vulnerability of groundwater in central Spain: the risk of nitrate pollution. Hydrogeology Journal; 18: 681-698.

Murat, V. (2000) Etude comparative des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque des aquifères à la pollution, application aux aquifères de piémont Laurentien. Mémoire de maîtrise université de Québec INRS – Géo ressources, Québec 127 p.

ONM (Office Nationale de la Météologie), (2015) Bulletin d'information climatique et agronomique. Ed. Office nati. météo. Cent. clim. nati, El Menia.

OSS (Observatoire Sahara et Sahel). (2003) Système aquifère du Sahara septentrional: gestion commune d'un bassin transfrontière. Rapport de synthèse. OSS, Tunisie.

Ouardi J. (2005) Dégradation des sols et de la nappe des périmètres irrigués du Tadla marocain par salinisation et sodisation. Thèse de Doctorat, option Géosciences de l'Environnement, Université Cadi Ayyad Marrakech, Maroc, 154 p.

Pallas, P. (1978) Water resources of the socialist people's Libyan Arab Jamahiriya.

Piper, A-M. (1944) A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses. Transactions. American Geophysical Union, 25, 914-923.

Ramde, F. (1984) Eléments d'écologie - Ecologie fondamentale. Ed. Mc. Graw-161 Hill, Paris, 397 p.

Richard L-A. (1954) Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. Agricultural handbook 60. Washington, DC: USDA, 160 p.

Rkiouak, S., Pulido-Bosch, A., & Gaiz, A. (1997) Potentialités hydrogéologiques d'une plaine littorale marocaine (Oued Laou, Tétouan-Chefchaouen). Hydrological sciences journal, 42(1), 101-117.

Saadaoui, Y-S. (2015) Etude écologique, dynamique et biosystématique de l'avifaune du lac d'El Goléa et du marais de Reghaia et comparaison faunistiques entre les deux zones.

SASS, (2003) Système Aquifère du Sahara Septentrional. Rapport interne. Annexes. Tunis, Tunisie, 229 p.

Schoeller, H. (1964) La classification géochimique des eaux. IASH publication, 64, 16-24.

Sonatrach DP, (2007) Data Base.

Thornthwaite C-W. (1948) An approach toward a Rational Classification of Climate. Geographical Review, Vol. 38, No. 1. pp. 55-94.

Turc, L. (1954) Calcul du bilan de l'eau évaluation en fonction des précipitations et des températures. IAHS Publ, 37, 88-200.

U.S. Salinity Laboratory. (1954) Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. USDA. Handbook, N° 60, Washington, 160 p.

UNESCO. (1972) Etude des Ressources en Eau de Sahara Septentrional. (7 vols. et annexes). UNESCO, Paris, France.

Vrba, J., Zaporozec, A. (1994) Guidebook on mapping groundwater vulnerability. Int. Association of Hydrogeologists. Int. Contributions to Hydrogeology; 16. Verlag Heinz Heise, Hannover.

Zahi, F. (2014) Contribution à l'étude hydrochimique du sous bassin versant du lac Fetzara (Nord-Est Algérien). Approche géochimique et fonctionnement des sols et des eaux. Thèse de doctorat. Université Badji Mokhtar Annaba.

Zahi, F., Drouiche, A., Mahdid, S., & Debieche, T. H. (2016) Water resources assessment in the Wadi Nil catchment (region of Jijel, Algerian East). In International Conference on Applied Geology & Environment.

