

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

UNIVERSITÉ KASDI MERBAH – OUARGLA

FACULTÉ DES HYDROCARBURES, ÉNERGIES

RENOUVELABLE ET SCIENCE DE LA TERRE

DÉPARTEMENT DES SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS



Thèse

En vue de l'obtention du diplôme de Doctorat 3^{ème} Cycle en Géologie

Spécialité : Hydrogéologie

Présenté Par :

Mr. Touahri Mahmoud

THEME

**La qualité et la gestion des eaux souterraines de la
région Hassi Messaoud
(Sud-Est Sahara algérien)**

Soutenu publiquement le : 22 / 02 /2024

Devant le jury :

Président : Nazli Imad Eddine	Professeur	Univ. Ouargla
Directeur de thèse: BOUSELSAL Boualem	Professeur	Univ. Ouargla
Examineur: Bouznad Imad Eddine	MCA	Univ. Guelma
Examineur: Majani Fath	MCA	Univ. Ouargla
Examineur : Belksir Mohamed Salh	MCA	Univ. Ouargla

Année universitaire : 2023/2024

DEDICACE

C'est avec toute mon affection que j'ai dédié ce modeste travail

à :

Mes parents

Ma filles Elina et Inesse

Mes frères et sœurs avec tous ma famille Touahri.

Tous les collègues et les amies.

Tous les enseignants les étudiants de la géologie.

Mahmoud Touahri

REMERCIEMENT

Je commence par exprimer ma gratitude à "Allah", le Tout-Puissant, le Tout-Miséricordieux, pour m'avoir accordé la patience, le courage et la capacité nécessaires pour accomplir ce modeste travail.

Je souhaite exprimer ma profonde gratitude envers notre cher enseignant et encadrant, le Pr. Bouselsal Boualem, pour son soutien constant, ses conseils avisés et son assistance qui m'ont permis de progresser dans ce travail et m'ont soutenu lors de sa soutenance.

J'aimerais également exprimer nos sincères remerciements à tous les enseignants pour leur encouragement et leurs conseils tout au long de nos études : le Dr. Belksier Mohamed Salah, le Pr. Zeddouri Aziez, le Dr. Imad Eddine Bouznad, ainsi que tous les autres enseignants et étudiants du département des Sciences de la Terre et de l'Univers. Enfin, je tiens à remercier chaleureusement toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.

المخلص :

تركز الدراسة على منطقة حاسي مسعود، المشهورة بإنتاجها للبترول والمساهمة الكبيرة في الاقتصاد الوطني. وهي تهدف إلى تقييم جودة وتسيير المياه الجوفية.

حيث تكشف التحليلات الهيدروجيولوجية عن وجود حوضين مائيين رئيسيين، الحوض القاري والحوض النهائي، كل منها له خصائص مميزة من حيث العمق والتكوين الصخري. يظهر التحليل الهيدروكيميائية أن جودة المياه تكاد تكون غير مناسبة للاستهلاك البشري والري بسبب ملوحتها العالية وتركيزات العناصر الرئيسية التي تتجاوز المعايير الموصى بها. تسيير هذه الموارد المائية الجوفية تتطلب المعالجة الأولية قبل توزيعها. بالإضافة إلى ذلك، تظهر المياه الجوفية اتجاهًا نحو الأكسدة، مما يستدعي المعالجة الكاتودية للتطبيقات الصناعية. يعود التمعدين في المياه أساسًا إلى انحلال المحاليل المتبخرة، والكربونات، والتعديل السليكاتي، وتبادل الكاتيونات.

التسيير المتكامل لموارد المياه أمر بالغ الأهمية لتلبية احتياجات المياه مع الحفاظ على الموارد المحدودة في المنطقة. لذلك يتم اقتراح سيناريوهات للاستهلاك العقلاني والأمثل لتقليل الطلب على المياه وتقليل الخسائر في التوزيع، مما يقدم فرصًا مواتية للمستقبل.

الكلمات المفتاحية : حاسي مسعود، الحوض القاري (CI)، الحوض النهائي (CT)، جودة المياه، التسيير المتكامل لموارد المياه.

Résumé :

L'étude se concentre sur la région de Hassi Messaoud, reconnue pour sa production d'hydrocarbures et sa contribution à l'économie nationale.

L'objectif est d'évaluer la qualité et la gestion des eaux souterraines dans cette région. L'analyse hydrogéologique révèle la présence de deux principaux aquifères, le Continental Intercalaire (CI) et le Complexe Terminal (CT), chacun ayant ses caractéristiques distinctes en termes de profondeur et de composition lithologique. L'analyse hydrochimique montre une qualité d'eau moutonnée à la consommation humaine et à l'irrigation en raison de sa salinité élevée et de ses concentrations en éléments majeurs dépassant les normes recommandées. La gestion de ces eaux souterraines nécessite un traitement préalable avant leur distribution.

De plus, les eaux souterraines présentent une tendance à la corrosion, nécessitant un traitement cathodique pour les applications industrielles. La minéralisation des eaux est principalement due à la dissolution des évaporites, des carbonates, à l'altération des silicates et à l'échange de cations. La gestion intégrée des ressources en eau est cruciale pour répondre aux besoins en eau tout en préservant les ressources limitées de la région. Des scénarios de consommation rationnelle et optimale sont proposés pour réduire la demande en eau et minimiser les pertes de distribution, offrant ainsi des perspectives favorables pour l'avenir.

Mots clés : Hassi Messaoud, CI, CT, Qualité de l'eau, Gestion des ressources en eaux.

Abstract :

The study focuses on the Hassi Messaoud region, renowned for its hydrocarbon production and significant contribution to the national economy.

The objective is to assess the quality and management of groundwater in this area. Hydrogeological analysis reveals the presence of two main aquifers, the Continental Intercalaire (CI) and the Terminal Complex (CT), each with distinct characteristics in terms of depth and lithological composition.

Hydrochemical analysis shows water quality very poor for human consumption and irrigation due to its high salinity and concentrations of major elements exceeding recommended standards. Managing these groundwater resources requires pre-treatment before distribution.

Additionally, groundwater exhibits a tendency toward corrosion, necessitating cathodic treatment for industrial applications. Water mineralization is primarily due to the dissolution of evaporites, carbonates, silicate alteration, and cation exchange.

Integrated water resource management is crucial to meet water needs while preserving the region's limited resources. Scenarios for rational and optimal consumption are proposed to reduce water demand and minimize distribution losses, offering favorable prospects for the future.

Keywords : Hassi Messaoud, CI, CT, water quality, water resource management.

Liste des Figures

Figure 1: Situation géographique de la zone d'étude.	3
Figure 2: carte d'occupation du sol de la zone d'étude.	6
Figure 3: Modèle numérique de terrain du Bas Sahara.	10
Figure 4 : Réseau hydrographique du Grand Erg Oriental.....	11
Figure 5: Bassin hydrographique théorique du Bas Sahara (chott Melghir).	12
Figure 6: courbe de précipitations annuelles (1996-2018).	16
Figure 7: la moyenne mensuelle de précipitation (1996-2018).	17
Figure 8: la température moyenne annuelle (1996-2018).	18
Figure 9 : La température mensuelle (1996-2018).	19
Figure 10: Diagramme ombrothermique de la région Hassi Messaoud.	20
Figure 11: Abaque de Martonne dans la région Hassi Messaoud 22	22
Figure 12: Climagramme d'Emberger de la région Hassi Messaoud.	24
Figure 13: la force maximum annuelle des vents (1996-2018).	25
Figure 14: la force maximal mensuelle des vents (1996-2018).	26
Figure 15: l'humidité moyenne mensuelle (1996-2018).	27
Figure 16: l'ensoleillement mensuelle (2007-2018).	28
Figure 17: Evaporation mensuelle (1996-2018).	29
Figure 18: le bilan hydrologique selon Thornthwaite.	33
Figure 19: carte des bassins sédimentaires de la plateforme saharienne.	38
Figure 20: Coupe transversal de la structure hercynienne de Hassi Messaoud.	40
Figure 21: Coupe stratigraphique régional.	41
Figure 22: Carte géologique régionale de Hassi Messaoud.	43
Figure 23: carte géologique (SASS/OSS 2003).	45
Figure 24: Coupe hydrogéologique transversal Ouest-Est (SASS/OSS 2003).	47
Figure 25: Carte piezométrique référence du (CI) (SASS/OSS 2003).	49
Figure 26: Carte piezométrique référence du (CT) (SASS/OSS 2003) 53	53
Figure 27: Coupe hydrogéologique de la région Hassi Messaoud.	55
Figure 28: Coupe hydrogéologique transversal de Hassi Messaoud (AA').	56
Figure 29 : Coupe hydrogéologique transversal de Hassi Messaoud (BB').	57
Figure 30: Courbe descente essai de pompage (Tassili 2017).	59
Figure 31: Courbe descente essai de pompage (Tassili 2017) 59	59
Figure 32 : carte d'emplacement d'échantillonnage.	63

Figure 33: le Potential d'hydrogène des eaux souterraines (CI) et (CT).	66
Figure 34: la conductivité électrique (CE) des eaux souterraines (CI) et (CT).	67
Figure 35: la durté total (TH) des eaux souterraines (CI) et (CT).	68
Figure 36 : la répartition spatiale TDS des eaux souterraines (CI) et (CT).	70
Figure 37 : Diagramme de Piper et chadha montre les eaux souterraines (CI) et (CT).	76
Figure 38: Diagramme de Scheller Berkaloff des eaux souterraines (CI) et (CT).	79
Figure 39: les echontillons des eaux souterraines (CI) et (CT) dépasser la limite admissible.	81
Figure 40 : les catégories de potabilité des eaux souterraines (CI) et (CT).	82
Figure 41: Diagramme de Wilcox illustre le pourcentage de Sodium (%Na) des eaux souterraines (CI) et (CT).	89
Figure 42: Diagramme de Riverside illustre le rapport de sodium adsorption (SAR) des eaux souterraines (CI) et (CT).	89
Figure 43 L'indice de Perméabilité (IP) des eaux souterraines (CI) et (CT).	91
Figure 44: Rapport massique chlorure-sulfate (CSMR) des eau souterraines (CI) et (CT).	95
Figure 45: Indice de Revelle (RI) des eaux souterraines (CI) et (CT).	96
Figure 46: Indice de Larson-Skold (LSI) des eaux souterraines (CI) et (CT).	97
Figure 47: Indice de Langelier (LI) des eaux souterraines (CI) et (CT).	101
Figure 48 : Indice stabilité de Ryznar (RSI) des eaux souterraines (CI) et (CT).	102
Figure 49: Indice agressivité (AI) des eaux souterraines (CI) et (CT).	103
Figure 50: Indice Puckorius (IP) des eaux souterraines (CI) et (CT).	105
Figure 51: les indices de saturations évaporitique et carboniques.	109
Figure 52 : Corrélation des cations/ Σ cations des eaux souterraines.	111
Figure 53: Corrélation des anions/ Σ anions des eaux souterraines.	112
Figure 54: Corrélation Na/Cl et IS/Na+Cl des eaux souterraines.	113
Figure 55 : Corrélation Ca/SO ₄ et IS (gypse et Anhydrite)/Ca+SO ₄ .	114
Figure 56:Corrélation Mg/SO ₄ des eaux souterraines.	115
Figure 57: Diagramme de Gibbs des eaux souterraines.	116
Figure 58: Les rapports Ca/Na versus HCO ₃ /Na, versus Mg/Na et Ca/Mg.	117
Figure 59: Diagramme illustre l'échange de base des eaux souterraines.	118
Figure 60: Les grands bassins hydrographiques de l'Algérie.	128
Figure 61: Information about l'enregistrement du logiciel WEAP.	131
Figure 62: Plan de base des données.	132
Figure 63: les étapes de modélisation.	133
Figure 64: le modèle conceptuel (WEAP).	134

Figure 65: illustre la création de Scénario (WEAP).....	140
Figure 66: la projection démographique (cap).	141
Figure 67: la demande en eau domestique en Mm ³ /an.....	141
Figure 68: Demande non satisfaite en eau domestique en Mm ³ /an.	142
Figure 69: la projection des superficies irriguées en hectare.	143
Figure 70 : Demande en eau d'irrigation en Mm ³ /an.....	144
Figure 71: La distribution en eau d'irrigation en Mm ³ /an.....	145
Figure 72: Demande en eau d'irrigation non satisfaite en Mm ³ /an.....	145
Figure 73: Demande en eau domestique (ACL et AS) en Mm ³ /an.....	148
Figure 74: Distribuée en eau domestique (ACL et AS) en Mm ³ /an.....	148
Figure 75: Demande non satisfaite en eau domestique (ACL et AS) en Mm ³ /an.	148
Figure 76: Demande en eau d'irrigation.	150
Figure 77: Distribution en eau d'irrigation (AEA AS).	150
Figure 78: Demande non satisfaite en eau d'irrigation.	151

Liste des Tableaux

Tableau 1: Densité de population à Hassi Messaoud en 2023.	7
Tableau 2: la répartition des points d'eau à multi usage.	8
Tableau 3: La température mensuelle (1996-2018).	19
Tableau 4: Evapotranspiration potentielle selon (Thornthwaite 1965)	30
Tableau 5: le bilan hydrologique selon Thornthwaite.....	32
Tableau 6: Les données chimiques des eaux souterraines dans la zone d'étude.....	72
Tableau 7: les poids relatifs et respectifs des parametres physico-chimique.	81
Tableau 8 : La classification de potabilité des eaux souterraines (CI) et (CT).	82
Tableau 9: les parametres détermine l'eau d'irrigation de la zone d'étude	88
Tableau 10: La classification des échantillons par les parametres d'irrigation.	92
Tableau 11: Les factorur de pH saturation (pHs).	99
Tableau 12: Potentiel de corrosivité et d'entartrage et leurs indices de qualité des eaux souterraines dans l'aquifère étudié.....	105
Tableau 13: Demande et Distribution en eau Domestique en Mm3/an.	149
Tableau 14: Demande et Distribution en eau d'irrigation en Mm3/an.....	152

Table des matières

<u>المخلص</u>	III
<u>Résumé</u> :	III
<u>Abstract</u> :	IV
Liste des Figures	V
Liste des Tableaux	VIII
Table des matières	IX
Table des sigles	XIV
Introduction générale	1
I. Contexte générale de la zone d'étude	3
I.1 Localisation géographique :	3
I.2 Contexte Socio-économique :	4
I.2.1 Économie :	4
I.2.2 Urbanisation :	5
I.2.2.1 Population :	7
I.3 Ressources en eau :	7
I.4 Géomorphologie :	8
I.5 Hydrologie :	9
I.6 Paléo-climatologie :	13
I.7 Climat du Sahara :	13
I.8 Paramètres climatologiques :	14
I.8.1 Précipitation :	15
I.8.1.1 Précipitations annuelles :	15

I.1.1.1 Précipitation mensuelles :.....	16
I.8.2 Température :.....	17
I.8.3 Diagramme ombro-thermique de Gaussen :	20
I.8.4 Indice de Continentalité Thermique :	21
I.8.5 Indice d'aridité de Martonne :	21
I.8.6 Indice pluviométrique de Moral (IA) :	22
I.8.7 Indice de Stewart :.....	23
I.8.8 Climagramme d'emberger :	23
I.8.9 Quotient pluvio-thermique d'Emberger (Q2) :	23
I.8.10 Le vent :	24
I.8.11 L'humidité :.....	26
I.8.12 Ensoleillement :.....	27
I.8.13 L'évaporation :.....	28
I.8.13.1 L'évapotranspiration (ETP, ETR) :.....	29
I.9 Bilan hydrologique :.....	33
I.9.1 Ruissellement superficiel :	34
I.9.2 Infiltration :.....	34
I.10 Conclusion :	35

II. Géologie et Hydrogéologie 37

II.1 Introduction :.....	37
II.2 Géologie.....	37
II.2.1 Géologie régional :	37
II.2.1.1 Stratigraphie régional :.....	39
II.2.2 Géologie locale :	42
II.2.3 Tectonique :.....	42
II.3 Hydrogéologie	44
II.3.1 Hydrogéologie régional :	44
II.3.1.1 Système Aquifere Sahara Septentrional (SASS):	44
II.3.1.2 Problèmes du SASS :.....	46
II.3.1.3 Continental Intercalaire (CI) :	46

II.3.1.4 Le Complexe Terminal (CT) :	50
II.3.2 Hydrogéologie local :.....	54
II.3.3 Effet de la structure géologique sur les aquifères CI et CT :.....	58
II.3.4 Les paramètres hydrodynamique :	58
II.3.4.1 La nappe Albien (CI) :	58
II.3.4.2 La nappe du Sénonien (CTS) :.....	59
II.4 Conclusion :	60
III. Hydrochimie.....	62
III.5 Introduction :.....	62
III.6 Echantillonnage et mode d'analyse :	62
III.7 Chimie des eaux.....	64
III.7.1 Paramètres physico-chimiques :	64
III.1.1.1 La Température	64
III.1.1.2 Le Potential hydrogène (pH) :	65
III.1.1.3 La conductivité électrique (CE).....	66
III.1.1.4 La dureté totale (TH) :	67
III.1.1.5 Le TDS :.....	68
III.8 Les éléments majeurs :	71
III.9 Facies chimique	73
III.9.1 Diagramme de Piper :.....	73
III.1.1.6 La nappe Continentale Intercalaire (CI) :	73
III.1.1.7 6 La nappe Complexe Terminal Mio-Pliocène (CTM) :.....	74
III.1.1.8 La nappe Complexe Terminal Sénonien (CTS) :.....	74
III.9.2 Graph de Chadha.....	74
III.9.3 Diagramme de Schoeller-Berkaloff	77
III.1.1.9 La nappe Continentale Intercalaire (CI) :	77
III.1.1.10 La nappe Complexe Terminal Sénonien (CTS) :.....	78
III.1.1.11 La nappe Complexe Terminal Mio-Pliocène (CTM) :.....	78
III.10 la potabilité.....	80

III.10.1 Les critères de potabilité de l'eau comprennent généralement :	80
III.11 L'irrigation :	83
III.11.1 Conductivité électrique (EC) :	83
III.11.2 Pourcentage de sodium (Na%) :	84
III.11.3 Rapport de sodium adsorption (SAR) :	85
III.11.4 Rapport de Kelly (KR) :	86
III.11.5 Rapport risque de magnésium (MR) :	87
III.11.6 Indice de perméabilité (PI) :	90
III.12 L'industrie :	93
III.12.1 Rapport massique chlorure-sulfate (CSMR) :	94
III.12.2 Indice de Revelle (RI):	95
III.12.3 Indice de Larson-Skold (LSI) :	96
III.12.4 L'indice de Langelier (LI):	98
III.12.5 Indice Stabilité de Ryznar (RSI):	101
III.12.6 Indice Agressivité (AI):	103
III.12.7 Indice de Puckorius (IP):	104
III.13 Processus primaire de la minéralisation :	107
III.13.1 Notion d'activité ionique :	107
III.13.2 Indice de saturation (IS) :	108
III.13.3 Saturation des minéraux carbonatés :	108
III.13.4 Saturation des minéraux évaporitiques :	109
III.13.5 Corrélations anions/ Σ anions et cations/ Σ cations :	110
III.13.6 Corrélation des éléments majeurs	110
III.1.1.12 Na/Cl	113
III.1.1.13 Ca/SO ₄ :	114
III.1.1.14 Mg/ SO ₄ :	115
III.1.1.15 Diagramme de Gibbs	115
III.1.1.16 Rapports caractéristiques :	116
III.14 Processus secondaires de la minéralisation :	117
III.14.1 Echanges de base :	117
III.14.2 Processus anthropique :	118

III.15 Conclusion	119
IV. Gestion des eaux souterraines	123
IV.16 Introduction	123
IV.17 La gestion intégrée des ressources en eau (GIRE) :	123
IV.18 La législation en matière de régulation des services de l'eau :	125
IV.19 Principes généraux sur l'eau en Algérie :	126
IV.19.1 La politique de l'eau en Algérie :	126
IV.1.1.1 Modes de gestion:.....	127
IV.1.1.2 La structures du secteur de l'eau :	128
IV.20 la gestion des ressources en eau souterraines (CI) et (CT) :	129
IV.21 Application du modèle (WEAP) dans la région d'étude :	130
IV.21.1 Logiciel (WEAP) :	130
IV.21.2 Fonctionnement du logiciel :	130
IV.21.3 Méthodologie du travail :	131
IV.21.4 Création la zone d'étude:.....	133
IV.1.1.3 Analyse et traitement des données :	135
IV.1.1.4 Compte actuel:.....	136
IV.21.5 Création et analyse des scénarios :	139
IV.1.1.5 Scénario de référence (2023-2050) :	140
IV.1.1.6 Scénarios d'enquête 2023-2050 :	146
IV.1.1.7 Scénarios consommation rationnelle 2023-2050 :	146
IV.1.1.8 Scénarios consommation optimale 2023-2050 :	146
IV.1.1.9 Comparaison les scénarios 2023-2050 :	146
IV.22 Conclusion :	153
Conclusion générale	155
BIBLIOGRAPHIE	CLVIII

Table des sigles

(ABH-S)	
Agence de Bassin Hydrographique Sahara.....	130
(ACL)	
Agglomération principale Chef-Lieu.....	124
(ADE)	
Entreprise Nationale Algérienne des Eaux.....	130
(AEA)	
Alimentation en Eau Agricole.....	137
(AEP)	
Alimentation en Eau Potable.....	8
(AGIR)	
Agence Nationale de Gestion Intégrée des Ressources en Eau.....	130
(AI)	
Indice d'agressivité.....	95
(AS)	
Agglomération Secondaire.....	124
(cap)	
Personne.....	142
(CE)	
Conductivité électrique.....	67
(CI)	
la nappe Continental Intercalaire.....	44
(CSMR)	
rapport massique chlorure-sulfate.....	94
(CT)	
la nappe Complexe Terminal.....	44
(CTM)	
La nappe Complexe Terminal du Mio-Pliocène.....	51
(CTS)	
La nappe Complexe Terminal du Sénonien.....	51
(CTT)	

La nappe Complexe Terminal du Turonien	51
(DA)	
Le déficit agricole	32
(DSS)	
système de support à la décision	124
(ETP)	
L'évapotranspiration potentielle	29
(ETPc)	
Evapotranspiration potential calculer	33
(ETR)	
L'évapotranspiration réelle	30
(GH)	
Grandes ouvrages hydrauliques	127
(GIR)	
gestion intégrée des ressources en eau	124
(IA)	
indice pluviométrique	23
(IS)	
Indice de saturation	109
(KR)	
Ratio de Kelly	87
(LI)	
Indice de Langelier	95
(LSI)	
Indice de Larson-Skold	95
(MR)	
Risque de magnésium	88
(Na%)	
Pourcentage de sodium	85
(OMS)	
Organisation mondiale de la santé	83
(ONA)	
Office National d'Assainissement	130

(ONM)	
l'Organisation Nationale Météorologique	14
(OSS)	
Observatoire Sahara et Sahal	14
(PDAU)	
Plan Directeur d'Aménagement et d'Urbanisme	134
(pH réel)	
pH de l'eau.....	102
(pH)	
Potential hydrogène.....	66
(pHs)	
potentiel en Hydrogène de saturation de la calcite (CaCO ₃)	99
(PI)	
Indice de perméabilité	91
(PMH)	
Travaux hydrauliques de taille moyenne et petite	127
(PNB)	
Produit National Brut	1
(PSI)	
Indice d'échelle de Puckorius	95
(qi)	
qualité respective	82
(RFU)	
réserve d'eau facilement utilisable	31
(RI)	
Indice de Revelle	94
(RSI)	
Indice de stabilité de Ryznar	95
(SAR)	
Sodium Adsorption Ratio	86
(SASS)	
Système Aquifere Sahara Septentrional	44
(SB)	

diagramme de Schoeller-Berkaloff.....	78
(SCHLUMBERGER)	
« Société international de prospection électrique ».....	39
(SEI)	
Institut de l'Environnement de Stockholm	131
(SHDP)	
Société Sonatrach Division Production	139
(SI)	
indice respectif	82
(SONATRACH)	
« Société nationale pour la recherche, la production, le transport, la transformation, et la commercialisation des hydrocarbures »	39
(TDS)	
Solides Dissous Totaux	69
(TH)	
Dureté totale ou Titre Hydrométrique.....	68
(UNESCO)	
Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture.	37
(WEAP)	
Évaluation et planification de l'eau/Water Evaluation And Planning.....	131
(wi)	
poids respectif	82
(Wi)	
poids relatif.....	81
(WQI)	
l'indice global de qualité de l'eau "Water Quality Index"	82

INTRODUCTION
GÉNÉRALE

Introduction générale

La région du Hassi Messaoud, située au cœur du Sahara algérien, est le théâtre d'enjeux majeurs liés à la gestion de ses ressources en eau souterraine. Cette zone, riche en hydrocarbures, joue un rôle essentiel dans l'économie nationale de l'Algérie, avec une production pétrolière considérable. Cependant, le climat hyperaride de la région et la surexploitation des aquifères posent des défis importants en matière de disponibilité et de qualité de l'eau. Cette thèse, intitulée "Identification et caractérisation hydrogéologique et hydrochimique des aquifères de la région du Hassi Messaoud (Sahara algérien)", vise à apporter des réponses cruciales à ces défis.

La région de Hassi Messaoud connaît une croissance économique significative, contribuant de manière substantielle au Produit National Brut (PNB) de l'Algérie. Cependant, cette croissance s'accompagne d'une demande croissante en eau, que ce soit pour l'alimentation en eau potable, l'irrigation agricole, l'industrie ou l'injection dans les puits pétroliers. Cette exploitation intensive des ressources en eau souterraine entraîne des signes préoccupants de surexploitation, tels que la baisse de pression dans les puits, la dégradation de la qualité de l'eau et des menaces sur la pérennité de ces précieuses ressources (Bouselsal 2017).

Dans ce contexte, la structure de cette thèse est divisée en quatre parties principales. La première partie offre un aperçu du contexte général de la région de Hassi Messaoud, de son économie basée sur le pétrole, de ses défis liés à l'eau et du contexte climatique particulièrement hyperaride. La deuxième partie se concentre sur l'étude hydrogéologique, en analysant la géologie de la région, les caractéristiques des aquifères et les mécanismes hydrodynamiques. La troisième partie explore l'hydrochimie des eaux souterraines, en évaluant la qualité physique et chimique de ces eaux et en examinant les processus géochimiques à l'œuvre. Enfin, la quatrième partie se penche sur la gestion des eaux souterraines dans la région du Hassi Messaoud, en mettant en évidence les enjeux socio-économiques et environnementaux, et en proposant l'utilisation d'un logiciel de modélisation pour une gestion intégrée et durable.

Cette thèse aspire ainsi à apporter des contributions significatives à la compréhension et à la préservation des ressources en eau souterraine dans cette région cruciale du Sahara algérien. Elle s'adresse tant aux chercheurs qu'aux décideurs, offrant des connaissances essentielles pour garantir un avenir durable pour la région de Hassi Messaoud et pour répondre aux défis mondiaux liés à la gestion de l'eau.

CHAPITRE I
CONTEXTE
GÉNÉRALE DE LA
ZONE D'ÉTUDE

I. Contexte générale de la zone d'étude

I.1 Localisation géographique :

La zone d'étude fait partie de la région du Hassi Messaoud se situe au Sud-Est de l'Algérie, à environ 850 km de la capitale Alger et à 350 km de la frontière tunisienne (Bouselsal 2017). Elle s'étend entre les coordonnées géographiques de longitude (5°50'E à 6°16'E) et de latitude (31°35'N à 32°2'N), couvrant une superficie d'environ 1848,6 km² (Figure.01). Cet emplacement joue un rôle central dans l'économie nationale grâce à sa production d'hydrocarbures, ce qui en fait l'un des principaux gisements mondiaux de ces ressources énergétiques.

Grâce à sa production d'hydrocarbures, la région de Hassi Messaoud occupe une place cruciale dans l'économie du pays. Cependant, cela implique également des responsabilités en matière de gestion des ressources naturelles et la nécessité de développer des solutions durables pour relever les défis environnementaux et sociaux qui accompagnent cette activité économique majeure.

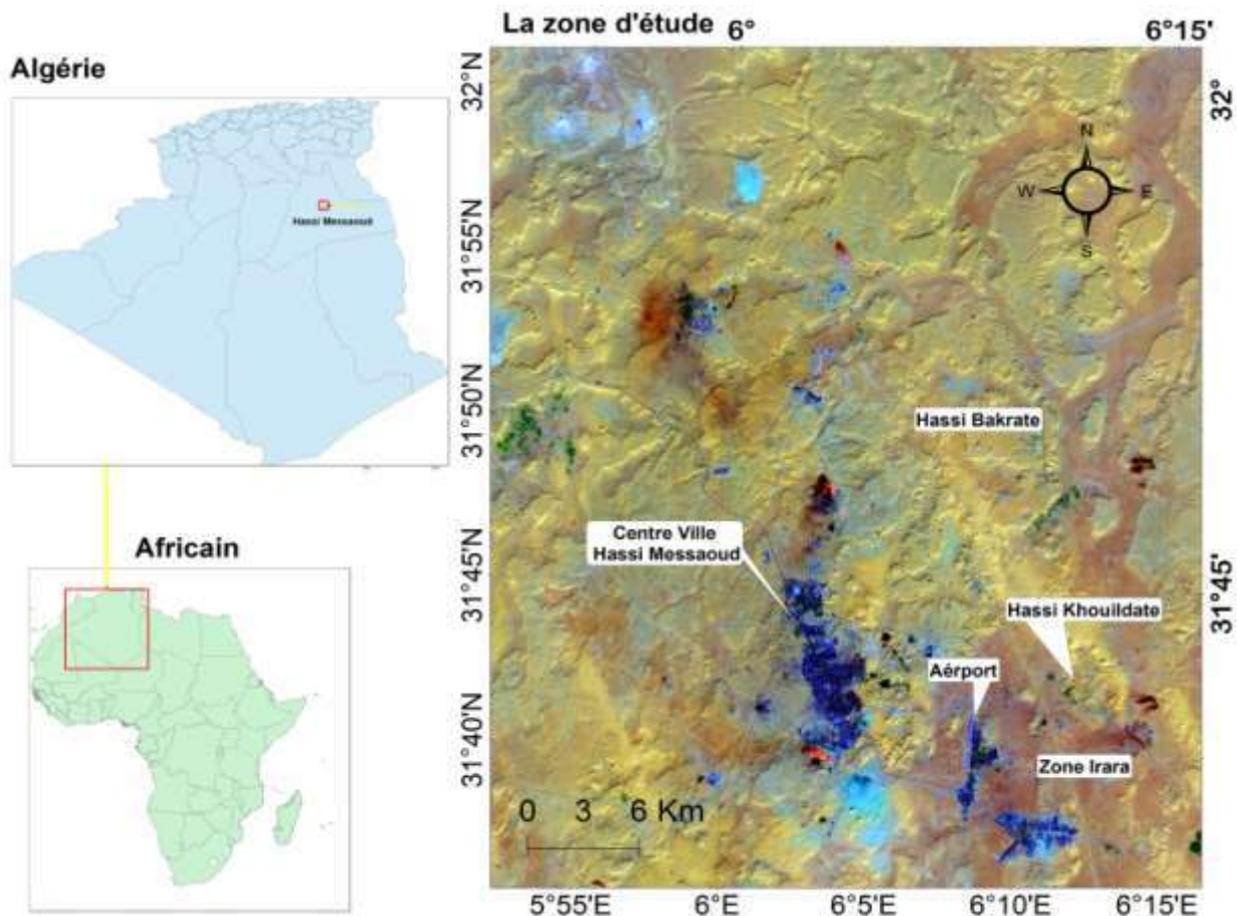


Figure 1: Situation géographique de la zone d'étude.

I.2 Contexte Socio-économique :

La région de Hassi Messaoud possède une histoire relativement récente, n'ayant pas plus d'un siècle d'existence. Son nom, issu de la langue locale "Al-Hassi" signifiant "le puits" en arabe, reflète sa nature moderne, alliant des aspects de village et de grande ville. Les habitants, venant de diverses régions du pays, se distinguent par leur simplicité et leur résilience face aux défis du désert, qui se reflète dans leurs visages.

Au cours de sa brève histoire, Hassi Messaoud a été témoin de trois événements historiques majeurs. Le premier remonte à 1956, lorsqu'on découvrit le premier puits de pétrole alors que la ville était sous domination coloniale. Le deuxième événement significatif se déroula le 24 février 1971, lorsque Hassi Messaoud annonça la nationalisation des hydrocarbures, mettant fin à l'épuisement des richesses souterraines.

Suite à ces événements, la région a connu une rapide et surprenante renaissance, avec l'émergence de 900 puits de pétrole, constituant le bassin de Hassi Messaoud. Le nombre de travailleurs augmentant également, il fut nécessaire de transformer le site en quartier général municipal régional.

Le troisième événement marquant dans l'histoire de la ville survint en 1984, lorsque Hassi Messaoud fut reclassée en région communale selon la division administrative du pays à l'époque. Cette transformation entraîna la mise en place d'une nouvelle infrastructure, comprenant diverses installations sociales, culturelles et économiques, pour répondre aux besoins grandissants des citoyens. Plusieurs projets furent achevés, notamment la construction de 4500 maisons familiales dans de nouveaux quartiers résidentiels (PDAU 2018).

I.2.1 Économie :

L'économie de la région repose principalement sur l'exploitation de ses vastes gisements de pétrole, qui sont classés parmi les dix plus grands champs pétroliers mondiaux. Avec une production actuelle de 400 000 barils par jour, cette ressource contribue significativement, à hauteur de 10%, au Produit National Brut (PNB). Cependant, la région connaît également une montée en puissance du secteur agricole. Les travaux dans ce domaine sont en augmentation constante, apportant un nouvel élan économique à la région. Outre son importance dans le secteur pétrolier et agricole, la région occupe une position stratégique essentielle au sein de la wilaya et de l'État. Elle est dotée d'infrastructures clés, telles qu'un aéroport, des routes et des chemins de fer, qui favorisent la mobilité et renforcent son rôle fonctionnel et économique. Ainsi, la région joue un rôle crucial dans l'économie nationale, grâce à ses activités pétrolières prospères, à son émergence dans le secteur agricole et à sa situation géographique stratégique,

soutenue par des infrastructures de transport modernes. Ces éléments combinés font de cette région un moteur essentiel du développement économique à l'échelle locale et nationale.

I.2.2 Urbanisation :

L'agglomération de Hassi Messaoud est située au cœur du plus vaste gisement pétrolier du pays, où les industries chimiques liées au pétrole prospèrent et où les réseaux de pipelines pour le transport de carburant et de gaz s'étendent sur de vastes étendues.

La présence de la ville de Hassi Messaoud est étroitement liée à la richesse pétrolière de la région, ce qui en fait un lieu à haut risque en raison des activités industrielles qui y sont menées (figure 2). Par conséquent, les autorités ont classé cette zone comme étant à risque majeur en 2005.

Bien que principalement un centre industriel, la région présente une interconnexion entre les secteurs industriel et urbain, ce qui entraîne divers problèmes liés aux risques industriels. Ces risques sont souvent associés à l'exploitation pétrolière, étant donné que la municipalité est entourée par plusieurs pôles pétroliers tels que le bassin de Hamra, Gassi al-Tawil, Erara Hassi Berkine, etc.

On y trouve une présence généralisée de gazoducs et de puits de pétrole dans les zones urbaines et rurales. De plus, plusieurs usines industrielles, telles que le complexe de raffinage de pétrole, l'usine de gaz, ainsi que les centrales électriques et les lignes à haute tension, sont situées à proximité des zones urbaines. Certaines de ces industries sont classées comme polluantes ou dangereuses.

Le facteur humain joue un rôle crucial dans cette région, car toute l'activité économique repose sur la main-d'œuvre humaine. La position privilégiée de Hassi Messaoud en tant que principal bassin pétrolier en fait un acteur clé de l'économie algérienne. Cette réalité se traduit par des flux de population en constante évolution et des migrations, et elle contribue au fait que la ville est classée comme une zone à haut risque. Elle attire également trois types de populations :

- 1) Les résidents permanents,
- 2) Les travailleurs résidents qui sont temporairement affectés à la ville et qui vivent dans des logements fonctionnels pendant la durée de leur emploi.
- 3) Les travailleurs résidents dans les bases de vie, qui vivent indépendamment de la vie citoyenne.

Il est évident que Hassi Messaoud représente un défi majeur en matière de gestion des risques industriels en raison de la concentration d'activités pétrolières et industrielles, ainsi que de la population importante qui y réside temporairement ou en permanence. Une planification

méticuleuse et une prise de conscience de ces enjeux sont essentielles pour garantir la sécurité et le bien-être de toutes les parties prenantes dans cette région stratégique (PDAU 2018).

Carte d'occupation du sol de la zone d'étude

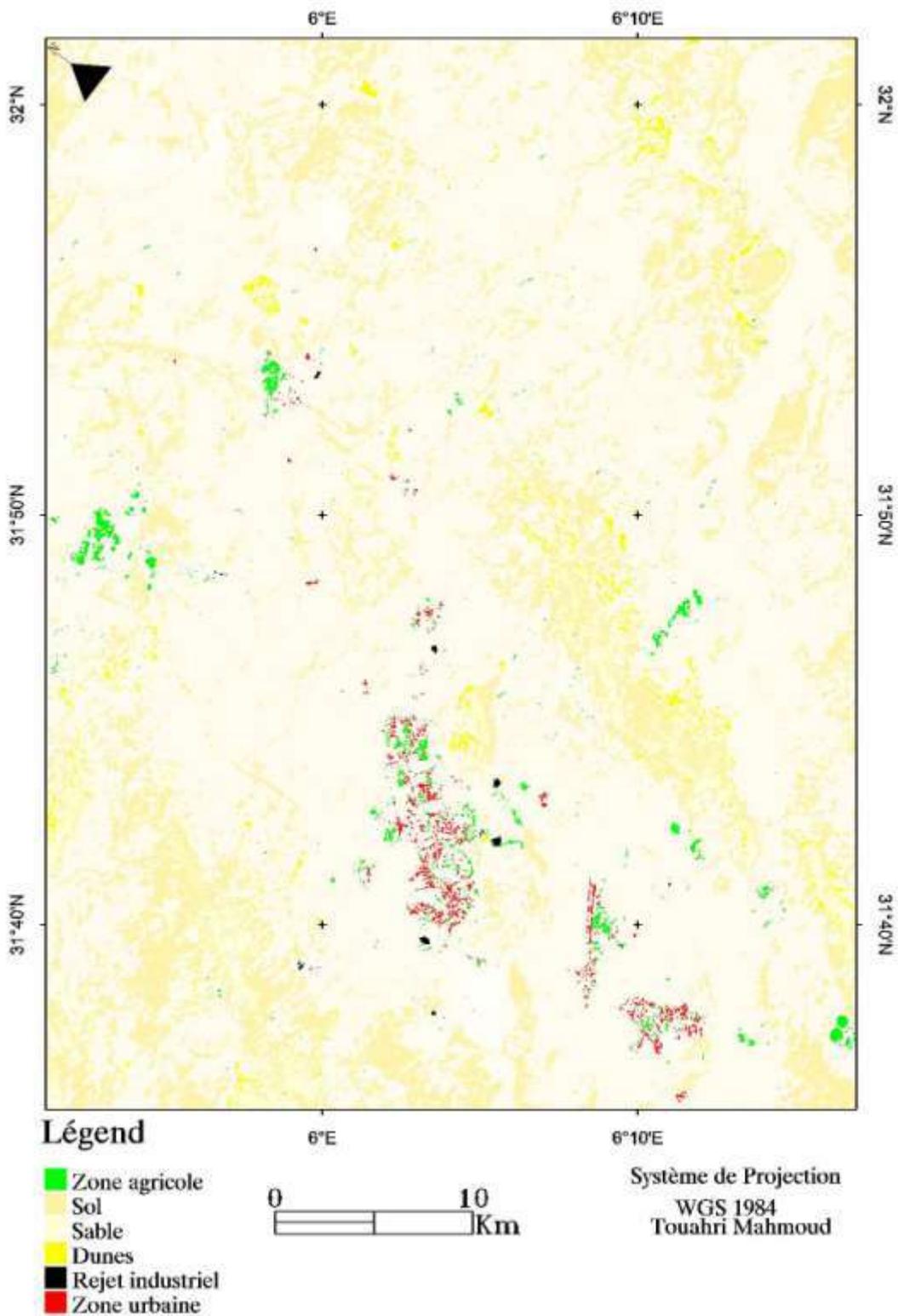


Figure 2: carte d'occupation du sol de la zone d'étude.

I.2.2.1 Population :

Le tableau 1 ci-dessous met en évidence la faible densité de population dans la zone d'étude. Cette situation peut être attribuée à divers facteurs, notamment l'expansion non planifiée des zones résidentielles et la présence d'espaces routiers et interstitiels considérables au sein du tissu urbain. Cette croissance urbaine désorganisée semble être liée à une mise en œuvre insuffisamment efficace des politiques de construction par les autorités compétentes. Il convient de souligner que cette faible densité de population peut avoir des répercussions sur plusieurs aspects du développement urbain. Tout d'abord, une expansion urbaine non planifiée peut conduire à une utilisation inefficace des terrains disponibles, favorisant ainsi une urbanisation déséquilibrée et la détérioration des espaces naturels. De plus, cela peut entraîner une dispersion excessive des services publics et des infrastructures, ce qui rend leur prestation moins économique et moins accessible pour les résidents.

Tableau 1: Densité de population à Hassi Messaoud en 2023.

Population 2022	Superficie km ²	Densité brut hab/ km ²
52 255	1848,6	28,27

Source : (PDAU 2018)

Pour remédier à cette situation, il est impératif que les autorités locales, en collaboration avec la Direction de la Construction et de l'Urbanisme d'Ouargla, élaborent des plans d'urbanisme et des politiques de construction cohérentes et réfléchies. Ces mesures devraient viser à promouvoir une urbanisation plus durable et à accroître la densité de population dans la région. Cela pourrait inclure la revitalisation des zones urbaines existantes, la promotion de projets de densification résidentielle, ainsi que la préservation et l'utilisation judicieuse des espaces libres. En adoptant une approche plus intégrée et proactive de la planification urbaine, il serait possible de créer un environnement urbain plus équilibré, offrant des opportunités économiques et sociales plus équitables pour les habitants, tout en préservant les ressources naturelles et en améliorant la qualité de vie de la communauté locale.

I.3 Ressources en eau :

La région de Hassi Messaoud repose principalement sur les ressources en eau souterraine pour répondre aux besoins de sa population. Actuellement, l'approvisionnement en eau potable (AEP) provient de 22 points d'eau en exploitation, comprenant 209 puits et 2 forages destinés à l'irrigation (IRR). Pour les usages industriels, touristiques et les services (ITS), la région compte sur 85 points d'eau en exploitation. En tant que centre pétrolier majeur, Hassi Messaoud dispose de pas moins de 56 puits d'eau en exploitation dans le champ pétrolier du

Hassi Messaoud. Chaque année, les prélèvements en eau souterraine continuent d'augmenter. En 2022, le volume total prélevé a été estimé à 51 Hm³. Parmi ces prélèvements, environ 11,52 Hm³ étaient destinés à l'alimentation en eau potable (AEP), 13 Hm³ à l'irrigation, et 1,28 Hm³ à l'industrie et aux services. En ce qui concerne l'activité pétrolière, elle a utilisé environ 25 Hm³ d'eau pour l'injection et les travaux de forage (AGIRE (ABH-Sahara) 2018)

Il est impératif de surveiller attentivement ces prélèvements en eau souterraine afin de prévenir toute surexploitation des ressources en eau et d'assurer une utilisation durable et équilibrée de ces ressources pour tous les usages. Une gestion responsable de l'eau est nécessaire pour garantir la durabilité de l'écosystème et répondre aux besoins croissants de la population, de l'agriculture, de l'industrie et de l'activité pétrolière dans la région de Hassi Messaoud. Des mesures de conservation et d'utilisation efficace de l'eau doivent être mises en place pour préserver cette ressource vitale pour les générations futures.

Tableau 2: la répartition des points d'eau à multi usage.

Populations 2022	52 255	Les points d'eau			
		AEP	IRR	ITS	Pétrolier
		24	02 forages et 209 puits	85	56
Dotation (m ³ /j)		31994	35288	3500	69120

Source : (AGIRE (ABH-Sahara) 2018) , ADE et DRE 2023.

I.4 Géomorphologie :

La géomorphologie du Sahara, l'un des déserts les plus vastes du monde, se caractérise par une aridité extrême, ce qui en fait l'une des zones désertiques les plus inhospitalières (Toutain 1979; Ozenda 1991). S'étendant sur environ 8 millions de km², du littoral atlantique à la mer Rouge, il occupe le tiers nord du continent africain (Houérou 1990).

Le Sahara se subdivise en plusieurs régions distinctes, notamment le Sahara septentrional, central, méridional, occidental et oriental (J. Dubief 1952). Le Sahara septentrional joue un rôle de transition entre les steppes méditerranéennes de l'Afrique du Nord et le Sahara central, couvrant une superficie d'environ 1 million de km² (Houérou 1990).

En Algérie, le Sahara abrite une biodiversité spontanée et son économie repose principalement sur l'exploitation des ressources naturelles (Chehma 2013) .

Selon (Lelubre 1952), le Sahara se distingue par la netteté et la visibilité de ses formes de relief. Les processus morphogénétiques, tels que l'action du vent et de l'eau, contribuent à

façonner les paysages caractéristiques du Sahara. Néanmoins, les principales catégories de paysages que l'on trouve dans le Sahara comprennent :

- 1) **Les Hamadas** : Il s'agit de plateaux rocheux présentant une topographie monotone, souvent plate à perte de vue (Monod 1992)
- 2) **Les Regs** : Ce sont des plaines constituées de graviers et de fragments rocheux, occupant de vastes étendues au Sahara (Monod 1992)
- 3) **Les accumulations sableuses** : Le sable est un élément essentiel du paysage saharien, mais les dunes ne couvrent pas l'ensemble du désert. Elles se trouvent principalement dans de vastes régions ensablées appelées les ergs (Lelubre 1952). selon (Gardi 1973) Les dunes peuvent prendre différentes formes en fonction de la direction dominante du vent.
- 4) **Les dépressions** :
 - **Les dayas** : Ce sont de petites dépressions circulaires résultant de la dissolution locale des dalles calcaires ou siliceuses constituant les Hamadas (Ozenda 1991).
 - **Les Sebkhia et les Chott** : Lorsque les eaux s'évaporent sous l'effet de la chaleur, des plaques de sels divers se déposent en surface, formant les chotts et les sebkhas en fonction de l'origine de leurs eaux phréatiques ou superficielles (Monod 1992).
 - **Les lits d'Oueds** : Il s'agit de l'espace pouvant être occupé par les eaux d'un cours d'eau, contenant des matériaux provenant des roches en place ou transportés par le cours (Derruau 1967)

La région d'étude fait partie du bassin Bas Sahara, une vaste cuvette délimitée par l'Atlas saharien au nord, la dorsale du M'zab à l'ouest, les plateaux du Tademaït et du Tinrhert au sud, et le revers du Dahar tuniso-libyen à l'est (Ballais et Heddouche, 1997).

Cette zone correspond à des accumulations sableuses éoliennes, formant un massif dunaire situé dans le grand Erg oriental, où les dunes peuvent avoir des orientations Nord-Sud à Nord-ouest-Sud-est. Elle constitue la partie méridionale du bassin Bas Sahara, qui englobe presque tout le bassin versant théorique du chott Melrhir, soit environ 700 000 km².

I.5 Hydrologie :

La toponymie du Bas Sahara algérien témoigne d'une préoccupation marquée pour la présence d'eau de surface, notamment avec des noms de cours d'eau tels que l'Oued Mya, l'Oued Rhir et l'Oued Souf. Cette fascination pour l'eau vitale a été largement étudiée par les chercheurs (Coté 2005).

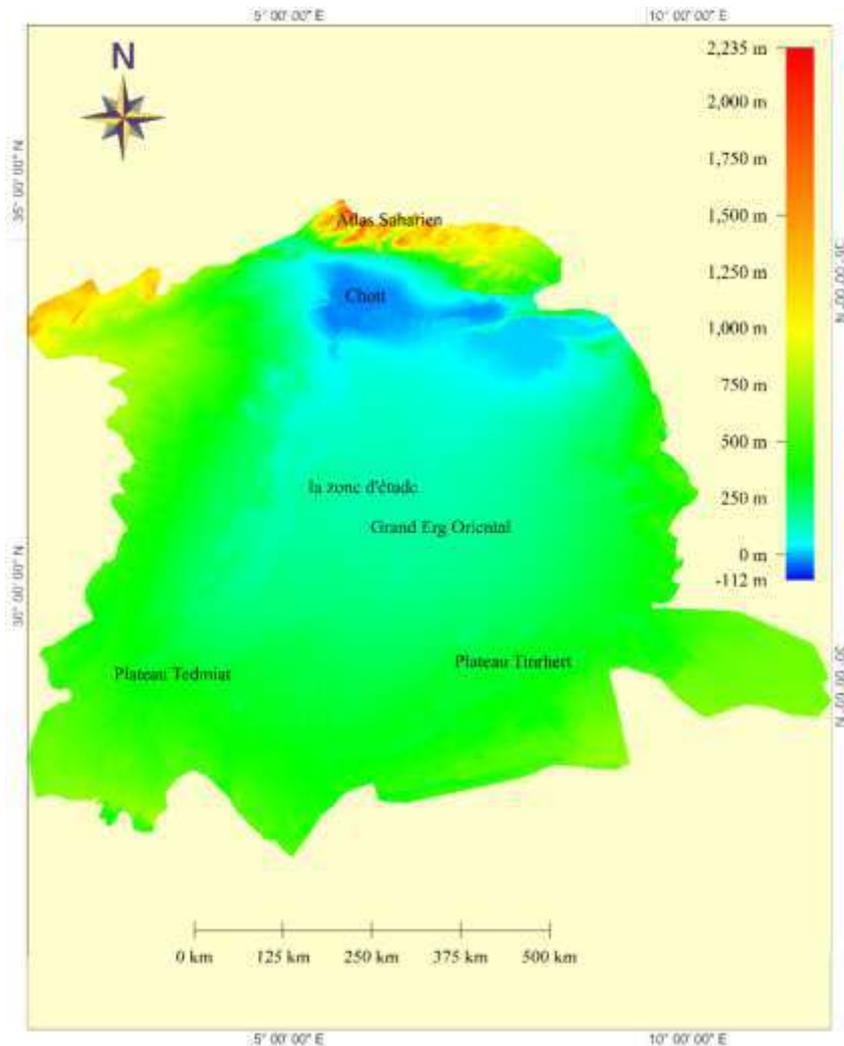


Figure 3: Modèle numérique de terrain du Bas Sahara.

Cependant, il a été démontré que des oueds mythiques, tels qu'Igharghar au sud du Grand Erg Oriental, Mya au niveau de Ouargla et Oued Rhir, n'ont en réalité jamais existé (Jean-Louis Ballais 2010). De plus, les précipitations dans le Sahara sont non seulement rares, mais également très irrégulières, ce qui donne lieu à des conditions d'écoulement particulières, telles que l'absence d'un écoulement permanent dans les talwegs, la désorganisation du réseau hydrographique, et la dispersion de l'eau en "mares", "gueltas" ou "redirs" (Capot,Reyr 1952; Estienne et Godard 1970).

En général, les Oueds sahariens ne suivent pas un régime de crues régulier, mais plutôt un caractère accidentel : ils déversent de l'eau seulement lorsque des pluies surviennent, généralement pendant quelques jours, voire jusqu'à trois fois par an aux confins nord du Sahara, et beaucoup plus rarement au centre (Gardi 1973; Chehma 2013).

Dans notre hypothèse, le sous-bassin versant d'Oued Mya fait partie de l'ancien système hydrographique du bassin versant du chott Melrhir. La région de Hassi Messaoud est incluse

dans le sous-bassin versant de Messaïed, lui-même considéré comme un sous-bassin de l'Oued Mya (Figure 4).

Le bassin versant de l'Oued Mya se présente comme une vaste gouttière fortement relevée au sud-ouest de la région, avec une altitude dépassant 800 m, inclinée vers la région d'Ouargla. Il est divisé en trois bassins-versants par des crêtes de direction sub-méridienne. Ces bassins comprennent, d'ouest en est, le bassin du Mya proprement dit, le bassin de l'In Sokki et le bassin du Mseïed ou du Grand Erg Oriental. Les deux premiers bassins se caractérisent par des vallées larges et dissymétriques, avec des cours d'eau principaux occupant les parties sud-ouest de la zone d'étude (Figure.5). Quant au bassin du Mseïed, il est difficilement reconnaissable en raison de son ensablement (Ould Baba Sy 2005; Abderrezak Boudjema 2008).

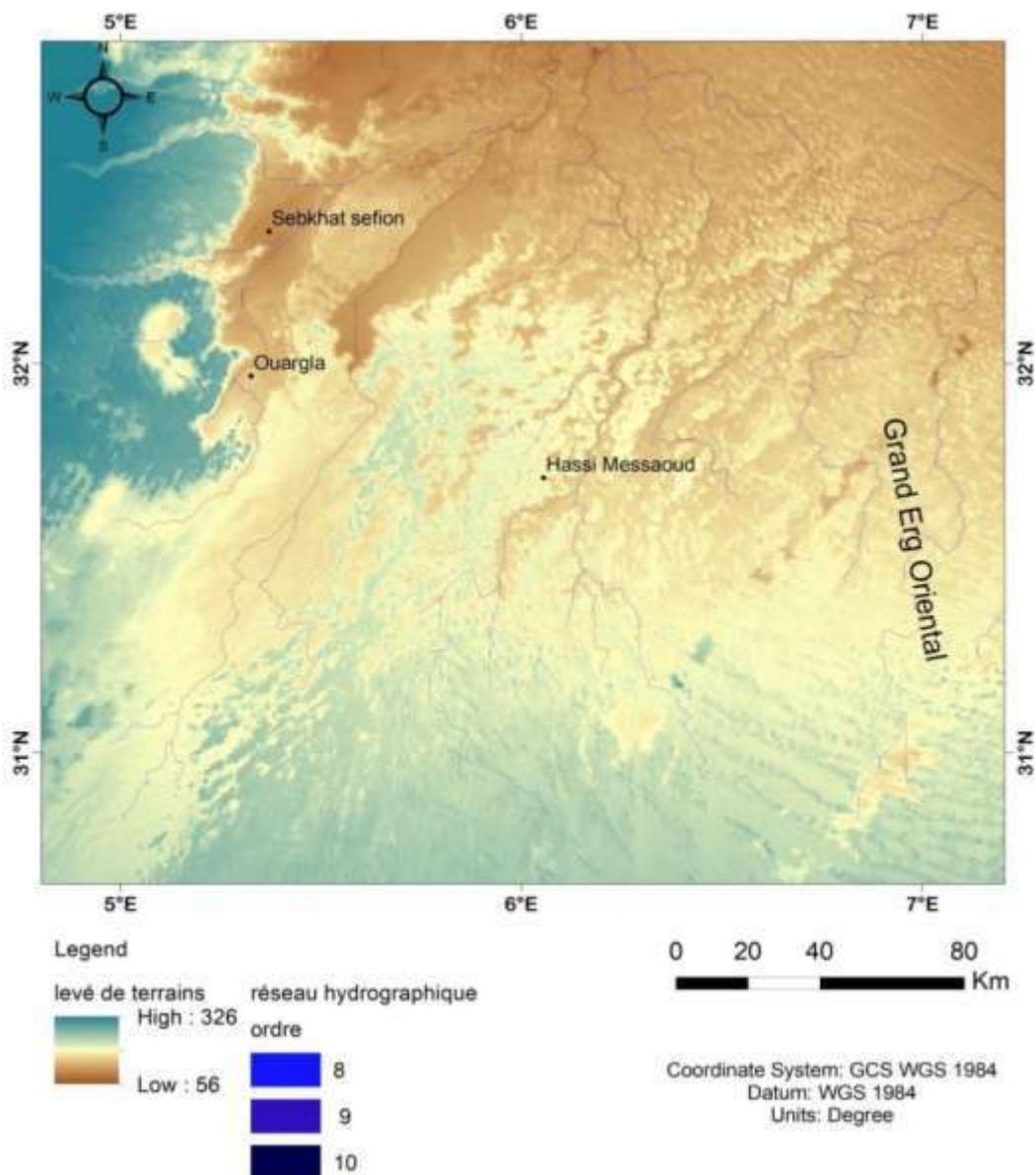


Figure 4 : Réseau hydrographique du Grand Erg Oriental.

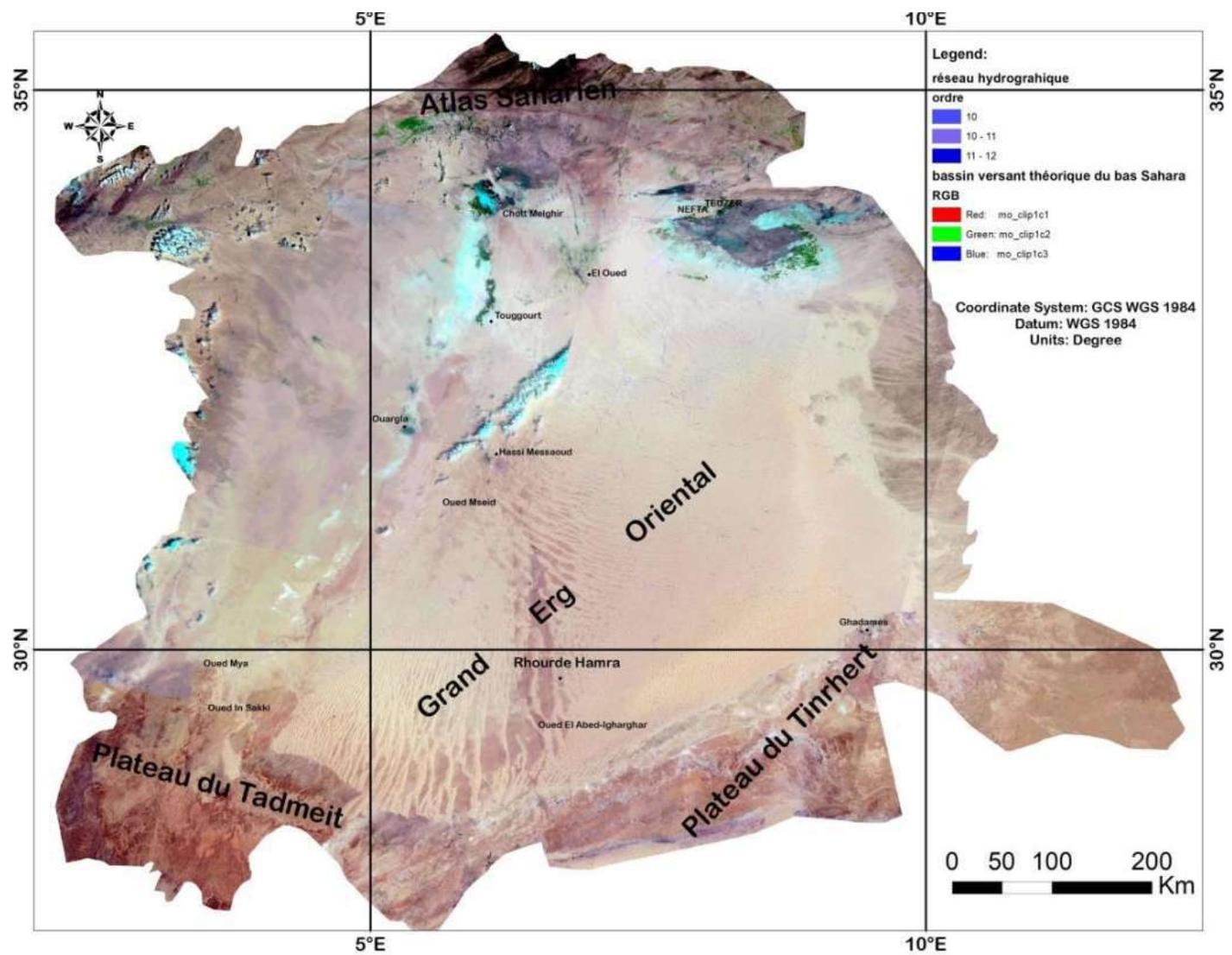


Figure 5: Bassin hydrographique théorique du Bas Sahara (chott Melghir).

I.6 Paléo-climatologie :

Les variations climatiques du Plio-Quaternaire dans le bas Sahara ont permis de distinguer deux principales périodes. La première correspond aux périodes humides, également appelées phases pluviales (würmiennes), caractérisées par une recharge importante des aquifères actuellement exploités. Pendant ces périodes, les précipitations étaient abondantes, ce qui a entraîné une augmentation significative des réserves d'eau souterraine (Petit-Maire et al. 1991).

La deuxième période est marquée par la sécheresse, pendant laquelle plusieurs phénomènes spécifiques se sont produits. Cela comprend l'assèchement des oueds, une forte activité éolienne et une diminution de l'alimentation en eau des aquifères sahariens. Les précipitations étaient rares, voire inexistantes pendant ces périodes sèches, ce qui a entraîné une baisse des niveaux d'eau souterraine et des conditions environnementales plus arides.

Ces variations climatiques ont joué un rôle essentiel dans la configuration du paysage et des ressources en eau du Sahara au fil du temps. Les périodes humides ont été cruciales pour la recharge des réservoirs d'eau souterraine, permettant ainsi l'exploitation des aquifères et soutenant potentiellement une plus grande diversité d'écosystèmes. En revanche, les périodes sèches ont eu des effets néfastes, mettant à l'épreuve les ressources hydriques disponibles et impactant la biodiversité ainsi que les activités humaines dépendantes de l'eau (Monod 1992).

La compréhension de ces variations climatiques passées revêt une importance cruciale pour évaluer l'impact des changements climatiques actuels dans la région et pour développer des stratégies de gestion durable des ressources en eau pour l'avenir. En analysant ces schémas climatiques du passé, les chercheurs peuvent mieux appréhender les défis potentiels et formuler des solutions adaptées aux enjeux environnementaux actuels (Petit-Maire et al. 1991).

I.7 Climat du Sahara :

Le Sahara, un vaste désert chaud et hyperaride, doit son climat persistant à la présence en altitude d'une zone de hautes pressions subtropicales qui agit comme un centre de divergence des courants atmosphériques. Le climat du Sahara septentrional suit un cycle d'échanges entre la zone des basses pressions tropicales et des hautes pressions subtropicales créées par les alizés soufflant à basse altitude du Nord et Nord-est vers l'équateur, ainsi que les courants d'altitude venant de l'ouest, également connus sous le nom de "Jet Stream" (Jean Dubief 1963). Cependant, ce schéma de circulation n'est pas constant tout au long de l'année. En été, les vents soufflent de l'ouest vers le nord et le nord-est. En hiver, l'anticyclone subtropical des

Açores s'étend sur l'Afrique du Nord et le Sahara en l'absence de relief à l'ouest de la bordure atlantique.

De plus, les vents étésiens, relativement frais et humides le long de la côte méditerranéenne, atteignent le Sahara en été, se réchauffent et se dessèchent en s'éloignant de leur point de saturation, augmentant ainsi leur effet de dessiccation. Ces vents soufflent du nord sur le Sahara oriental, tournent vers l'est et le sud-est sur le Sahara occidental, puis atteignent le sud de l'Atlas saharien (Guendouz 1985).

Cependant, actuellement, le continent africain est de plus en plus affecté par les effets du changement climatique, avec une recrudescence des événements climatiques extrêmes tels que les sécheresses et les inondations. Les zones arides ou semi-arides en Afrique du Nord, de l'Ouest et de l'Est deviennent plus sèches, et l'on estime que les températures pourraient augmenter de 4°C au cours des 100 prochaines années (Mike Shanahan et al. 2014).

Le secteur de l'eau et de l'agriculture figure parmi les plus vulnérables face à ce changement climatique. Dans cette région, le climat désertique se caractérise par une sécheresse extrême, des températures très élevées et d'importantes amplitudes thermiques. Toutefois, ces conditions sont exacerbées par les effets du changement climatique, notamment par l'influence de fronts froids provoquant des changements soudains dans les masses d'air. Les prévisions concernant les précipitations indiquent une diminution des quantités de pluie en Afrique du Nord, avec une estimation de 10 à 25 % de chute pendant les mois de juin, juillet et août, et de 10 à 60 % pendant les mois de mars, avril et mai au cours des 50 prochaines années.

Le changement climatique risque d'aggraver la pauvreté et la surexploitation des terres agricoles en intensifiant la désertification. La combinaison d'un climat durci par ces effets, de la rareté de l'eau et de la pauvreté des terres fertiles entraîne l'absence des conditions élémentaires pour une vie sociale saine (OSS 2016).

I.8 Paramètres climatologiques :

Les données météorologiques pour la période allant de 1996 à 2018 ont été saisies et enregistrées au sein de l'Organisation Nationale Météorologique (ONM 2018) à Hassi Messaoud. Après avoir obtenu ces données, nous avons procédé à leur analyse et à leur représentation graphique à l'aide du programme Microsoft Office Excel 2007. L'objectif de cette analyse était de mieux comprendre les tendances météorologiques sur cette période de 22 ans. Pour ce faire, nous avons utilisé des histogrammes et des courbes pour visualiser les différentes variables météorologiques étudiées. Les histogrammes nous ont permis de

représenter la distribution des données, en montrant la fréquence d'occurrence des valeurs pour chaque variable. Cela nous a aidés à identifier les plages de valeurs les plus courantes et à détecter d'éventuels comportements atypiques. Quant aux courbes, elles ont été utilisées pour mettre en évidence les variations temporelles des différentes données météorologiques. Grâce à ces graphiques, nous avons pu observer les évolutions saisonnières, les fluctuations annuelles et éventuellement détecter des tendances à long terme.

L'utilisation d'Excel a été d'une grande aide pour gérer, analyser et représenter ces vastes ensembles de données météorologiques de manière claire et précise. Les outils graphiques du logiciel nous ont permis de présenter visuellement les résultats de manière compréhensible pour faciliter l'interprétation des informations météorologiques. Par conséquent, grâce à cette analyse et à la représentation graphique des données météorologiques sur une période de 22 ans, nous avons pu obtenir des informations essentielles sur les schémas climatiques régionaux à Hassi Messaoud. Ces résultats sont précieux pour la planification et la prise de décision dans de nombreux secteurs qui sont sensibles aux conditions météorologiques, tels que l'agriculture, le transport, et la gestion des ressources naturelles.

I.8.1 Précipitation :

Les précipitations constituent une phase fascinante du cycle de l'eau. Elles regroupent toutes les formes d'eau météorique qui tombent sur la surface de la terre, que ce soit sous forme liquide, telles que la pluie, ou sous forme solide, comme la neige. Dans notre région, tout comme dans les zones sahariennes en général, nous sommes confrontés à une pluviosité réduite et sporadique, caractérisée par un rythme saisonnier peu marqué, avec des pluies d'hiver de type méditerranéen (Monod 1992).

Cependant, malgré cette rareté, les précipitations jouent un rôle crucial dans le maintien de l'équilibre naturel de notre écosystème et dans la recharge des réserves en eau. Grâce à leur répartition variable, elles ont un impact significatif sur la biodiversité locale et sur les activités humaines, notamment l'agriculture et l'approvisionnement en eau potable. Par conséquent, il est essentiel de comprendre et de surveiller attentivement ces événements météorologiques afin d'adapter au mieux nos pratiques et de préserver notre environnement de manière durable.

I.8.1.1 Précipitations annuelles :

Au cours des années de 1996 à 2018, les précipitations, comme illustré par la figure 06, ont été très faibles dans la région étudiée. En général, les valeurs de précipitations se situent entre 1 et 80 mm. Ces quantités de pluie se sont avérées être très irrégulières, parfois même insignifiantes, avec certains cas remarquables. En 2001, par exemple, seulement 1 mm de précipitations a été enregistré pour toute l'année. Cela indique une année exceptionnellement

sèche avec des conditions de sécheresse marquées. De même, en 2008, le total annuel de précipitations n'a atteint que 3 mm, ce qui confirme une autre année de sécheresse sévère. Cependant, malgré ces fluctuations extrêmes et les années de sécheresse, la moyenne annuelle de précipitations sur cette période étudiée est d'environ 34 mm. Cette moyenne relativement basse souligne la caractéristique générale de la région en tant que zone aride avec une pluviométrie limitée.

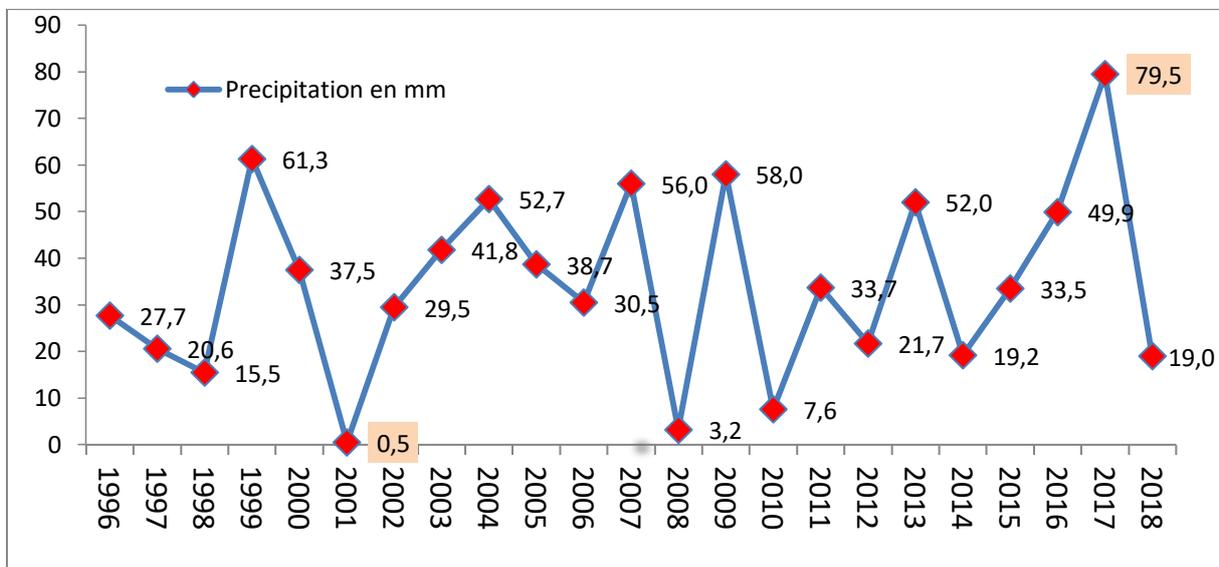


Figure 6: courbe de précipitations annuelles (1996-2018).

I.1.1.1 Précipitation mensuelles :

La figure 07 illustre les moyennes mensuelles interannuelles de précipitations durant la période d'étude. Globalement, ces moyennes sont généralement faibles voire inexistantes. Cela signifie que la région connaît des conditions de sécheresse avec peu de précipitations tout au long de l'année. Cependant, malgré cette faiblesse générale des précipitations, il est important de noter que lorsque des pluies se produisent, elles peuvent être intenses, se manifestant sous forme d'orages accompagnés de vents violents. Durant l'été, les précipitations sont presque inexistantes ou négligeables, avec des valeurs très basses allant de 0 à 0,7 mm. Cela indique que l'été est la saison la plus sèche de l'année, avec très peu de précipitations. Pendant les autres saisons, les précipitations restent très faibles, oscillant entre 2,9 et 5 mm. Cela montre que même en dehors de l'été, les pluies sont toujours limitées, et les quantités de précipitations restent très modestes. Cette situation de faible pluviométrie globale contribue à créer un environnement sec et aride dans cette région.

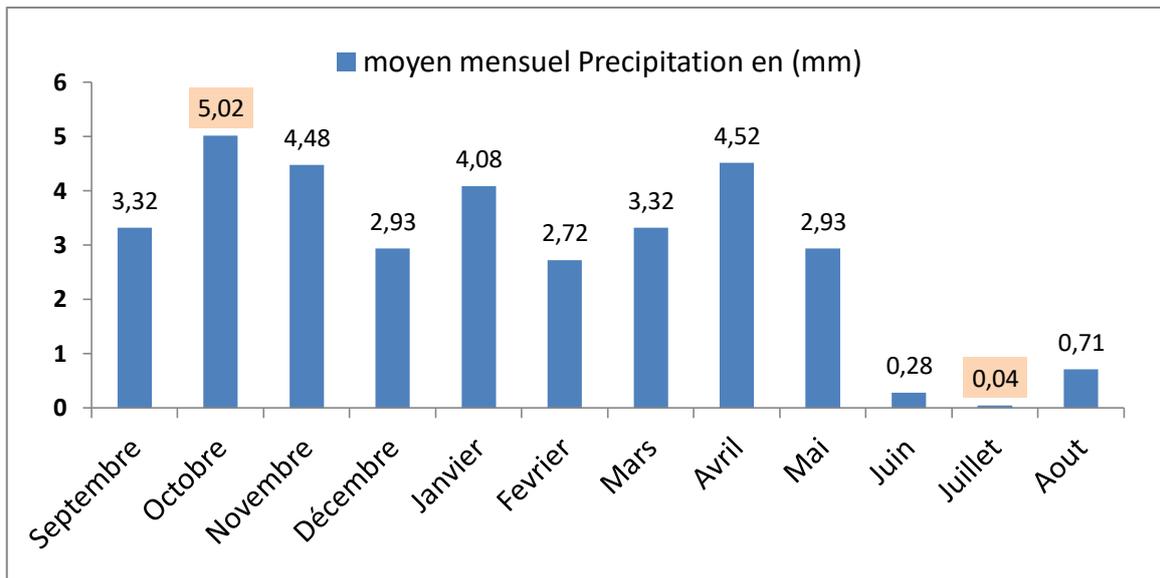


Figure 7: la moyenne mensuelle de précipitation (1996-2018).

I.8.2 Température :

Dans ce climat désertique, la température joue un rôle essentiel et constitue un paramètre fondamental. Les valeurs de température sont particulièrement élevées, en particulier pendant la saison estivale. Cette caractéristique est attribuable à plusieurs facteurs, notamment la variation de la durée d'ensoleillement tout au long de l'année et l'influence des masses d'air et des vents, qui évoluent en fonction des saisons.

La figure 08 met en évidence une remarquable stabilité de la température annuelle dans cette région. Au cours de la période étudiée, la moyenne de température reste constante, oscillant autour de 23 ou 24 °C. Cette stabilité témoigne de la prédominance des conditions chaudes et arides dans ce climat désertique.

L'ensoleillement joue un rôle majeur dans le réchauffement de l'air, contribuant ainsi aux valeurs élevées de température enregistrées dans cette région. De plus, les masses d'air et les vents exercent une influence significative sur le climat, entraînant des variations de température d'une saison à l'autre.

Il est essentiel de souligner que dans un climat désertique, la variation diurne de la température peut également être considérable, avec des écarts importants entre les températures diurnes et nocturnes. Les journées peuvent être très chaudes tandis que les nuits peuvent être fraîches, contribuant à l'aridité et aux conditions climatiques spécifiques de cette région.

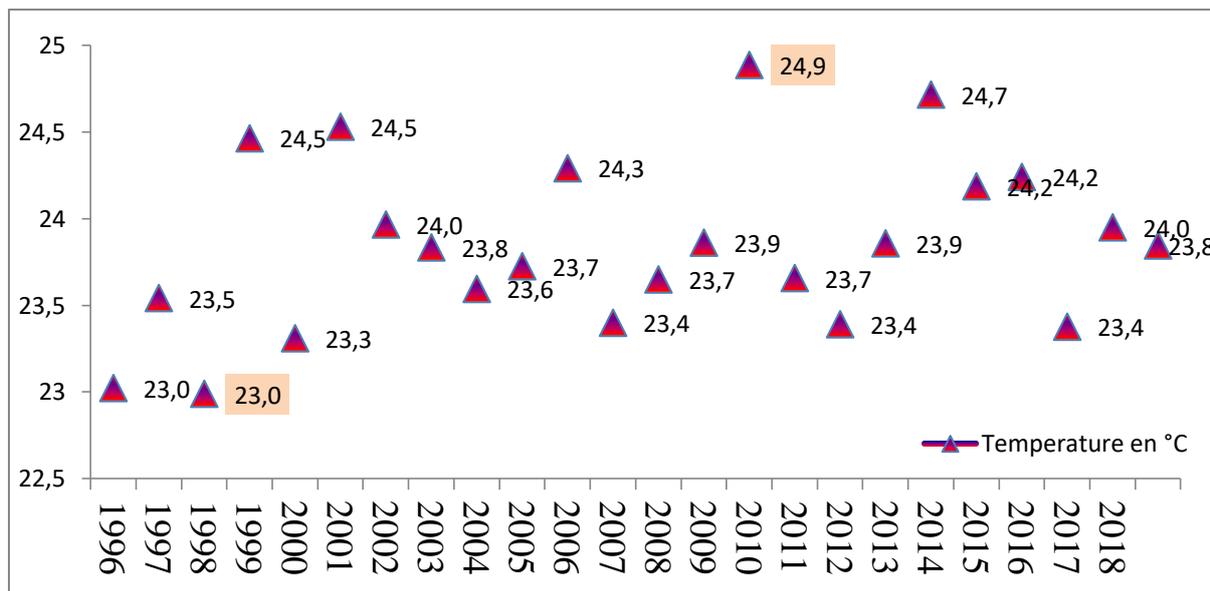


Figure 8: la température moyenne annuelle (1996-2018).

Effectivement, dans ce climat désertique, les variations saisonnières de température sont extrêmement marquées. L'été est caractérisé par des températures très élevées, avec des pics atteignant jusqu'à 46°C en juillet. En revanche, l'hiver est froid, avec des températures avoisinant les 3°C en janvier. Cette amplitude annuelle de température est exceptionnellement prononcée, avec un écart considérable de 43°C entre les mois les plus chauds et les plus froids, comme indiqué dans le Tableau 03 et illustré par la figure 09.

Ce climat aride connaît donc des conditions météorologiques extrêmes, avec des étés torrides et des hivers glaciaux. Ces variations saisonnières intenses sont typiques des régions désertiques, où la différence de température entre le jour et la nuit peut également être remarquable.

L'été, avec ses températures très élevées, est la saison la plus chaude de l'année, et les températures peuvent être accablantes pendant cette période. En contraste, l'hiver est marqué par des températures froides, ce qui peut être une surprise pour ceux qui considèrent généralement les déserts comme toujours chauds. Les écarts de température entre le jour et la nuit peuvent également être significatifs, avec des journées brûlantes suivies de nuits beaucoup plus fraîches.

Ces conditions météorologiques extrêmes sont dues en partie à l'influence de l'ensoleillement intense pendant l'été, qui réchauffe rapidement l'air, et à la faible capacité des sols désertiques à retenir la chaleur, entraînant des variations de température rapides entre le jour et la nuit.

Tableau 3: La température mensuelle (1996-2018).

Mois	TN en (°C)	TM en (°C)	TX en (°C)	Ecart en (°C)
Septembre	22	31	41	19
Octobre	16	25	35	19
Novembre	8	17	27	19
Décembre	4	12	21	18
Janvier	3	12	21	18
Février	5	14	23	19
Mars	8	19	29	21
Avril	13	24	34	21
Mai	18	29	39	21
Juin	22	33	43	21
Juillet	26	36	46	19
Aout	25	35	43	18
moyenne annuelles	14	24	33	19

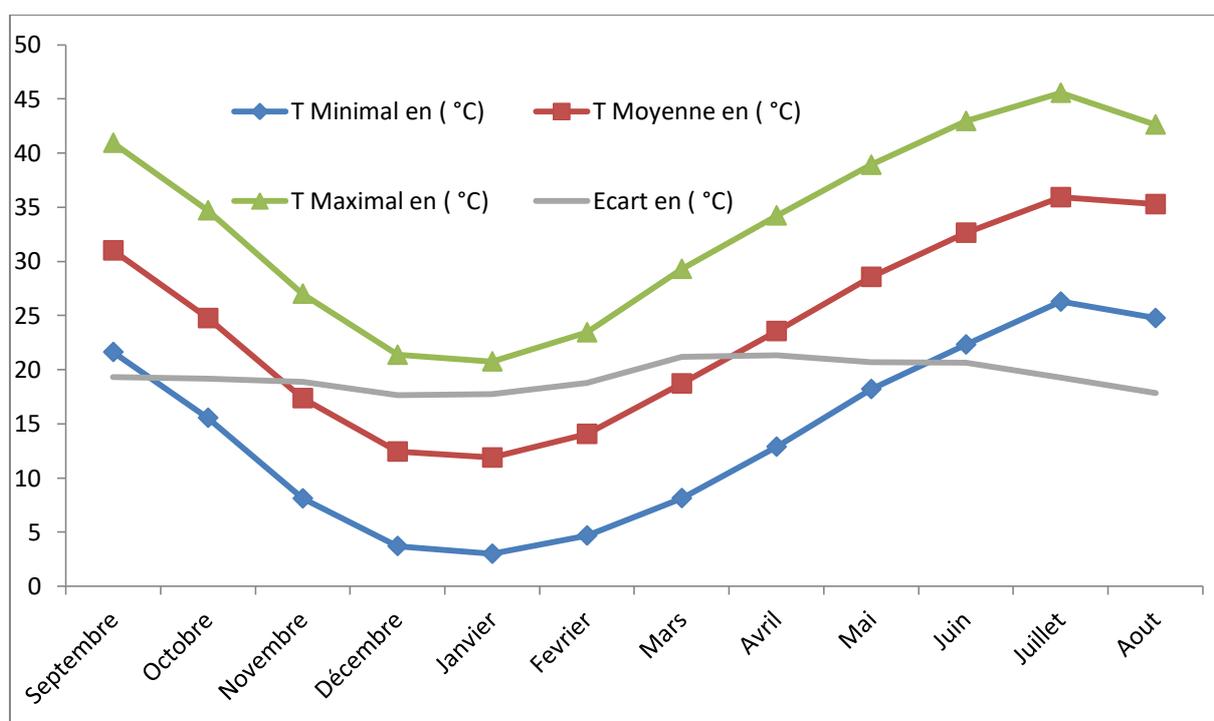


Figure 9 : La température mensuelle (1996-2018).

I.8.3 Diagramme ombro-thermique de Gausсен :

Les indices bioclimatiques, permettent de caractériser le niveau de sécheresse ou d'aridité d'un lieu ou d'un climat. La méthode le plus couramment utilisée est le diagramme ombre-thermique.

Cette méthode décrite dans cette étude prend en compte les moyennes mensuelles des précipitations (P en mm) et des températures (T en °C) pour évaluer la sécheresse estivale en termes de durée et d'intensité (Bagnouls et Gausсен 1952). Cette approche considère qu'un mois est qualifié de "sec" lorsque les précipitations (P) sont inférieures à deux fois la température ($2Tc^{\circ}$), indiquant que les pertes en eau dues à des températures élevées sont plus importantes que les apports en eau dus aux précipitations.

Le diagramme établi représente les températures à l'échelle double des précipitations. Il met en évidence les périodes sèches selon Gausсен et Bagnouls. Un mois est considéré comme sec lorsque la totalité des précipitations est inférieure ou égale au double de la température moyenne de ce mois ($P \text{ mm} \leq 2Tc^{\circ}$). La période déficitaire en eau, ou sèche, correspond à la zone où la courbe des températures est au-dessus de la courbe des précipitations. En revanche, la période humide correspond à la zone où la courbe des températures est en dessous de la courbe des précipitations.

Dans la région étudiée, ce diagramme montre que pour un climat saharien, une période déficitaire en eau s'étale toute l'année. Cela signifie que les précipitations sont insuffisantes pour compenser les pertes en eau causées par des températures élevées, entraînant ainsi des conditions arides tout au long de l'année.

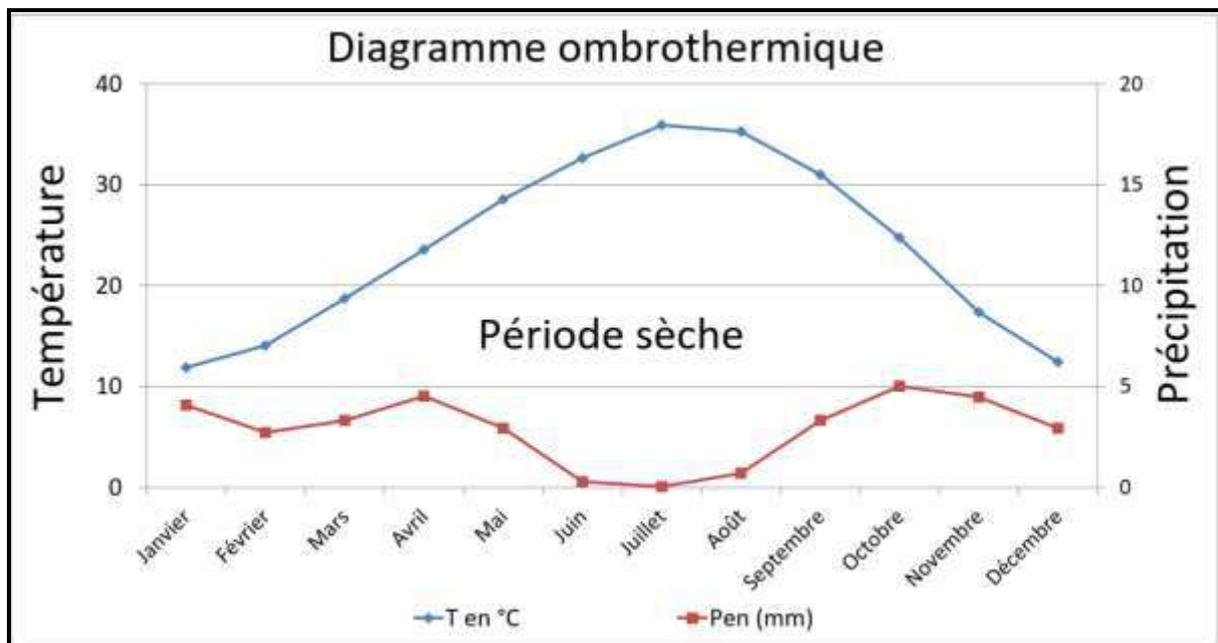


Figure 10: Diagramme ombrothermique de la région Hassi Messaoud.

I.8.4 Indice de Continentalité Thermique :

L'Indice de Continentalité Thermique est un paramètre utilisé pour différencier les climats en fonction de leur proximité ou éloignement par rapport à l'océan, et il est généralement associé à une diminution des précipitations. L'une des formules empiriques couramment employées pour calculer cet indice est celle de (Kerner 1905) :

$$K = (T_o - T_\alpha).100/A$$

Avec :

- ✓ K : représente l'indice de continentalité thermique en pourcentage.
- ✓ T_o : correspond à la température moyenne annuelle du mois d'octobre en degrés Celsius.
- ✓ T_α : représente la température moyenne annuelle du mois d'avril en degrés Celsius.
- ✓ A : est l'amplitude thermique annuelle en degrés Celsius, c'est-à-dire l'écart entre la température moyenne du mois le plus chaud et celle du mois le plus froid.

Dans la région de Hassi Messaoud, les valeurs spécifiques sont les suivantes : $T_o=25^\circ\text{C}$, $T_\alpha=24^\circ\text{C}$ et $A=24^\circ\text{C}$, ce qui donne un indice de continentalité thermique K de 4,17 %. Ce faible indice de continentalité thermique observé dans la station météorologique de Hassi Messaoud indique que cette région est éloignée de la mer, confirmant ainsi son caractère aride avec des conditions climatiques peu propices à des précipitations abondantes. En d'autres termes, la faible proximité de la région avec l'océan suggère un climat sec et continental, avec des variations de température importantes entre l'hiver et l'été. Cette situation rend peu probable l'occurrence de précipitations importantes dans cette région.

I.8.5 Indice d'aridité de Martonne :

L'indice d'aridité (A), développé par (Martonne 1926), est un indicateur qui prend en compte à la fois les précipitations et les températures pour évaluer le degré d'aridité d'une région. Sa formule est la suivante :

$$A = \frac{P}{T + 10}$$

Avec :

- ✓ P : Représente la précipitation moyenne annuelle en millimètres (mm). Dans le cas de la zone d'étude, P est égal à 34 mm.
- ✓ T : Correspond à la température moyenne annuelle en degrés Celsius ($^\circ\text{C}$). Pour cette région, la valeur de T est de 23,85 $^\circ\text{C}$.

Selon la classification de Martonne, l'indice d'aridité (A) permet de classer la région dans différentes catégories climatiques en fonction de ses valeurs :

- ✚ A < 5 : Climat hyperaride.

- ✚ 5 < A < 7,5 : Climat désertique
- ✚ 7,5 < A < 10 : Climat steppique
- ✚ 10 < A < 20 : Climat semi-aride
- ✚ 20 < A < 30 : Climat tempéré

D'après l'abaque de Martonne, l'indice d'aridité pour la zone d'étude est classé comme étant de l'ordre de 1, ce qui correspond à un milieu désertique en régime hyper-aride, caractérisé par l'absence de réseau hydrographique permanent, également appelé aréisme.

En résumé, l'indice d'aridité de Martonne permet de caractériser le climat de la région d'étude comme étant hyper-aride, avec des précipitations très faibles et des températures élevées, ce qui entraîne un environnement désertique avec très peu de ressources en eau.

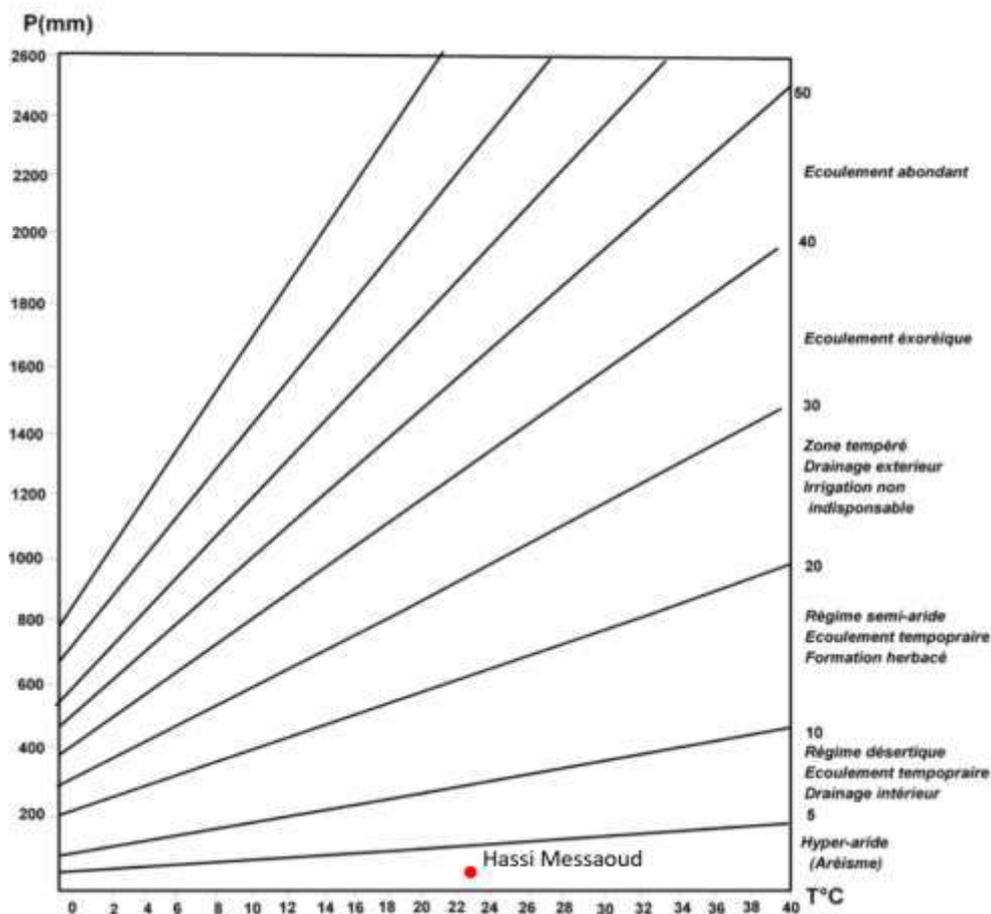


Figure 11: Abaque de Martonne dans la région Hassi Messaoud

I.8.6 Indice pluviométrique de Moral (IA) :

L'indice pluviométrique de (Moral 1964) sert à distinguer les climats secs des climats humides. La formule permettant de calculer cet indice est la suivante :

$$IA = P / (T^2 - 10T + 200)$$

Avec :

- ✓ IA : représente l'indice pluviométrique annuel.

- ✓ P : correspond à la moyenne des précipitations annuelles en millimètres (mm).
- ✓ T : représente la moyenne de la température annuelle en degrés Celsius (°C).

Selon la classification de Moral, une région est considérée comme ayant un climat sec lorsque son IA est inférieur à 1, et un climat humide lorsque son IA dépasse 1. En ce qui concerne la région de Hassi Messaoud, son indice pluviométrique (IA) est de 0,064, ce qui indique un climat sec en raison de sa faible valeur. Cela signifie que la région reçoit des précipitations relativement limitées par rapport à ses températures, contribuant ainsi à un environnement sec.

I.8.7 Indice de Stewart :

Cet indice tient compte des précipitations moyennes annuelles ainsi que des températures moyennes des minima du mois le plus froid et maxima du mois le plus chaud.

$$Q2 = 3.43P/M + m$$

Avec :

- ✓ Q2 : Quotient pluvio-thermique de Stewart.
- ✓ P : précipitations moyennes annuelles en mm.
- ✓ M : moyenne des maxima du mois le plus chaud en (°C).
- ✓ m: moyenne des minima du mois le plus froid en (°C).
- ✚ Si $10 < Q2 < 50$: climat semi-aride.
- ✚ Si $Q2 < 2$: climat désertique.

Dans le cas spécifique de la région de Hassi Messaoud, avec un indice Q2 de 2,4, cela indique que cette région est caractérisée par un climat désertique en raison de précipitations faibles par rapport à l'amplitude annuelle de température.

I.8.8 Climagramme d'emberger :

Emberger en 1955 dans son travail a remarqué que le seul Quotient pluvio-thermique (Q2) n'était pas suffisant pour rendre compte pleinement de l'influence des températures sur le climat d'une région. Ainsi, il a proposé de combiner le Q2 avec la moyenne des températures minimales du mois le plus froid (m) dans un diagramme appelé Climagramme. Dans ce diagramme, les valeurs de m sont représentées sur l'axe des abscisses, tandis que les valeurs de Q2 sont représentées sur l'axe des ordonnées. Ce climagramme est un outil qui permet d'identifier les étages bioclimatiques et de visualiser les variations thermiques d'une région donnée.

IL a également proposé une formule pour calculer l'indice d'aridité annuel, qui est défini par le

I.8.9 Quotient pluvio-thermique d'Emberger (Q2) :

$$Q2 = 2000P / (M2 - m2)$$

Avec :

- ✓ Q2 : Représente le Quotient pluvio-thermique d'Emberger.
- ✓ P : Désigne la précipitation moyenne annuelle en millimètres (mm).
- ✓ M : la température maximale du mois le plus chaud, exprimée en degrés Kelvin (K°).
- ✓ m : Représente la température minimale du mois le plus froid, exprimée en degrés Kelvin (K).

Par conséquent, selon le climagramme et la formule d'Emberger pour la région d'étude, le Quotient pluvio-thermique (Q2) est égal à 2,66. Cette valeur est représentée sur le climagramme et indique que la région est caractérisée par un climat de type saharien, avec des hivers relativement frais et des étés très chauds. Ces informations sont essentielles pour comprendre les caractéristiques bioclimatiques et les variations thermiques spécifiques de cette région.

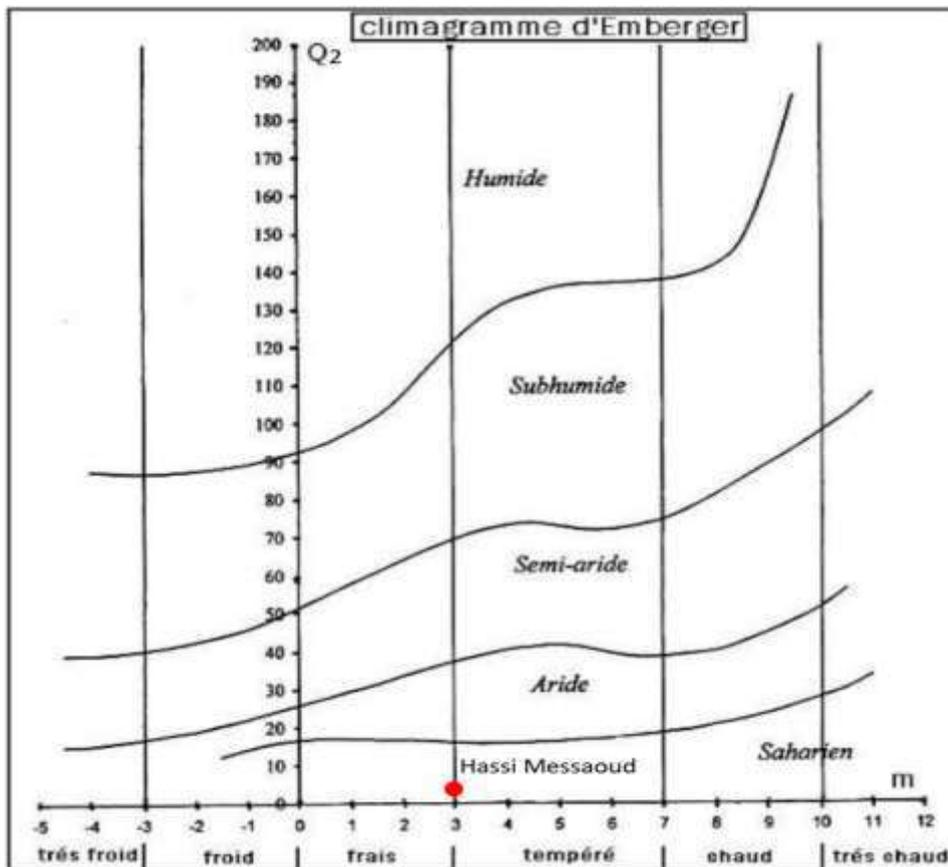


Figure 12: Climagramme d'Emberger de la région Hassi Messaoud.

I.8.10 Le vent :

Le vent est un élément fondamental dans ce climat, notamment au Sahara, où il souffle de manière presque constante et sans entrave (Monod 1992).

Durant la période d'étude, la vitesse moyenne maximale annuelle du vent atteint environ 43 km/h. En analysant la courbe de force des vents Figure 13, nous pouvons constater que l'intervalle de vitesse moyenne maximale annuelle varie entre 18 et 57 km/h.

Ces observations mettent en évidence le caractère persistant du vent dans la région étudiée, avec des vitesses atteignant leur point culminant pendant certaines périodes de l'année. Ces résultats soulignent l'importance de prendre en compte la force et la direction du vent lors de l'étude des conditions climatiques dans cette zone

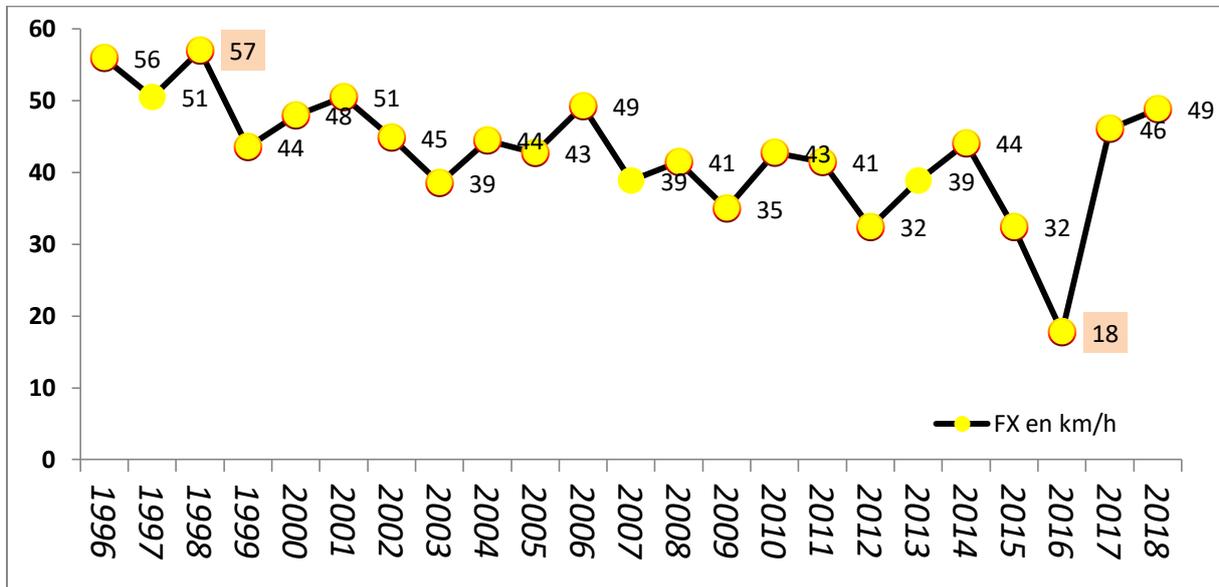


Figure 13: la force maximum annuelle des vents (1996-2018).

Dans ce climat, les vents dominants suivent des trajectoires distinctes en fonction des saisons. Au printemps et en automne, les vents prédominants proviennent tantôt du Sud-est et se dirigent vers le Nord-ouest, tantôt de l'Est vers l'Ouest, ce que l'on appelle en arabe "El-bahri" car ils proviennent de la mer. En été, cependant, les vents du sirocco ou "Chihli" en arabe soufflent du Sud et du Sud-ouest vers le Nord et le Nord-est.

Les variations saisonnières des vitesses du vent illustre par la figure 14 sont également remarquables. Pendant le printemps et l'automne, les vents atteignent leur force maximale, avec des vitesses estimées à environ 40 à 55 km/h. Pendant l'hiver et l'été, les vents restent forts mais sont légèrement moins intenses, avec des vitesses allant de 40 à 50 km/h. Il est essentiel de noter que ces variations saisonnières des vents jouent un rôle crucial dans la régulation du climat de cette région aride. Les vents plus forts au printemps et en automne peuvent contribuer à atténuer les températures élevées, tandis que les vents du sirocco en été peuvent apporter de la chaleur supplémentaire et influencer les conditions météorologiques locales. Une meilleure compréhension de ces modèles de vent est vitale pour la gestion durable des ressources dans ce climat désertique.

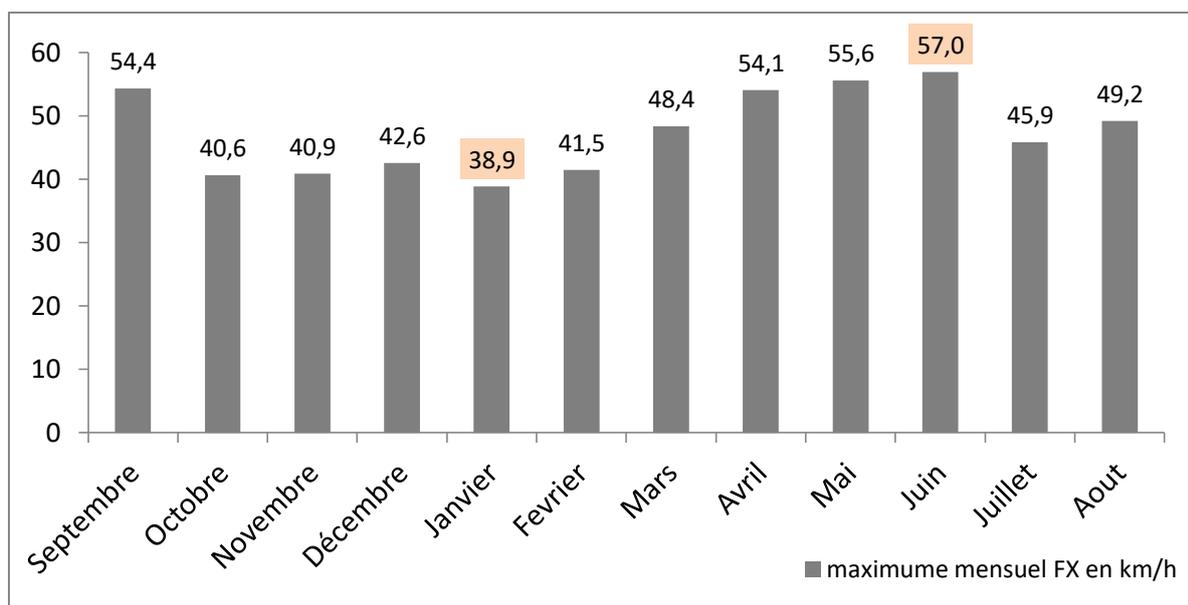


Figure 14: la force maximal mensuelle des vents (1996-2018).

I.8.11 L'humidité :

L'humidité de l'air est un élément essentiel du cycle hydrologique, reflétant le niveau de saturation de l'atmosphère en vapeur d'eau. Les données de la figure 15 indiquent que l'humidité atmosphérique atteint son apogée pendant la période hivernale, principalement en décembre et janvier, atteignant un taux de 57%. À l'inverse, la saison estivale, en particulier le mois de juillet, est caractérisée par une sécheresse relative, avec un niveau d'humidité de seulement 29%.

Ces variations saisonnières d'humidité sont cruciales pour de nombreux processus naturels, tels que la formation de nuages, les précipitations, et les conditions météorologiques générales. La période hivernale, avec son niveau d'humidité plus élevé, favorise la formation de précipitations, notamment de neige dans certaines régions. En revanche, la saison estivale plus sèche peut entraîner des défis liés à la sécheresse, l'irrigation des cultures et la disponibilité de l'eau douce pour divers usages.

Ces données sont d'une importance capitale pour les scientifiques, les météorologues et les experts en hydrologie, car elles contribuent à une meilleure compréhension des fluctuations climatiques et à l'élaboration de stratégies d'adaptation aux conditions changeantes. Il est également essentiel de suivre ces tendances au fil du temps pour évaluer les impacts potentiels du changement climatique sur l'humidité de l'air et ses conséquences sur l'environnement et la vie quotidienne des populations.

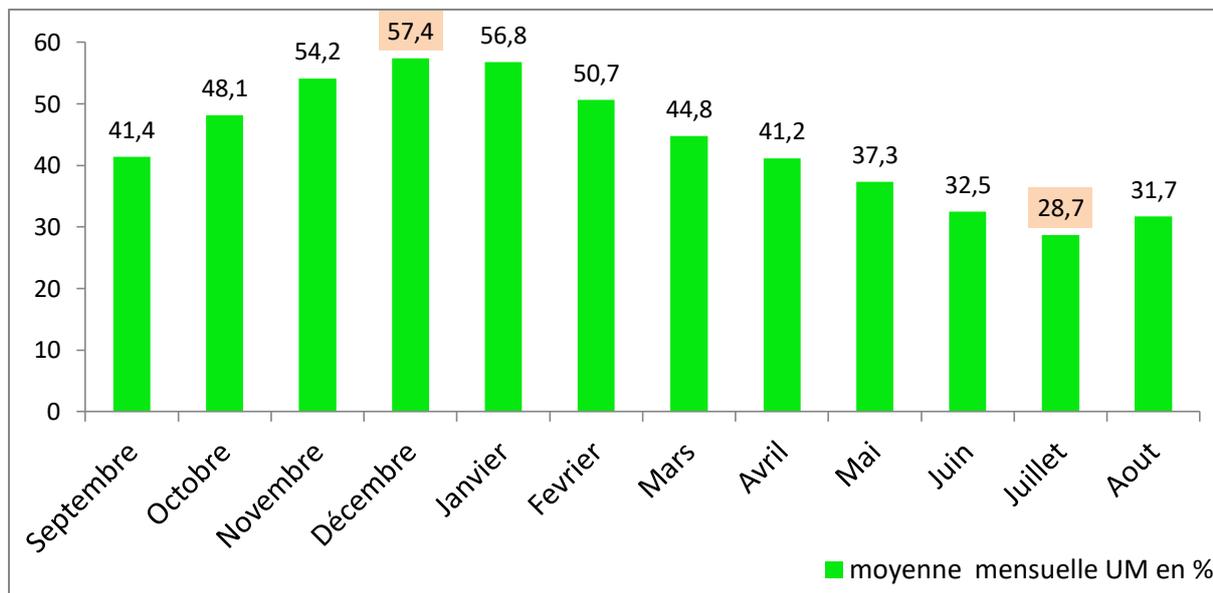


Figure 15: l'humidité moyenne mensuelle (1996-2018).

I.8.12 Ensoleillement :

Le Sahara, avec ses impressionnantes 3000 à 3500 heures d'ensoleillement par an, détient le record mondial incontesté de lumière solaire, éclipsant largement les 1600 heures enregistrées à Paris. Pendant la saison sèche, le ciel se pare d'une clarté éblouissante, à condition que le vent ne vienne pas troubler cette tranquillité, ce qui est rarement le cas. Cependant, durant la saison des pluies, le ciel adopte un aspect plombé et les nuages peuvent se rassembler pour former une étendue continue, offrant un spectacle impressionnant qui est d'autant plus remarquable dans ces vastes horizons sahariens (**Ould Baba Sy 2005**).

Notre région, quant à elle, se distingue par une moyenne exceptionnelle de 3480 heures d'ensoleillement par an au cours de la période de 2007 à 2018. Cette abondance de soleil confirme sans conteste le caractère aride et sec de notre climat saharien. Les données de la figure 16 montrent clairement que la luminosité saisonnière est marquée par une intensité solaire particulièrement élevée, atteignant environ 316 heures par mois pendant la période chaude allant de mars à septembre. En revanche, durant la période froide, qui s'étend d'octobre à février, l'ensoleillement moyen diminue à 256 heures par mois.

Ces chiffres éloquentes témoignent de la nature unique de notre environnement saharien, où le soleil brille avec une force inégalée, façonnant ainsi nos conditions climatiques particulières tout au long de l'année

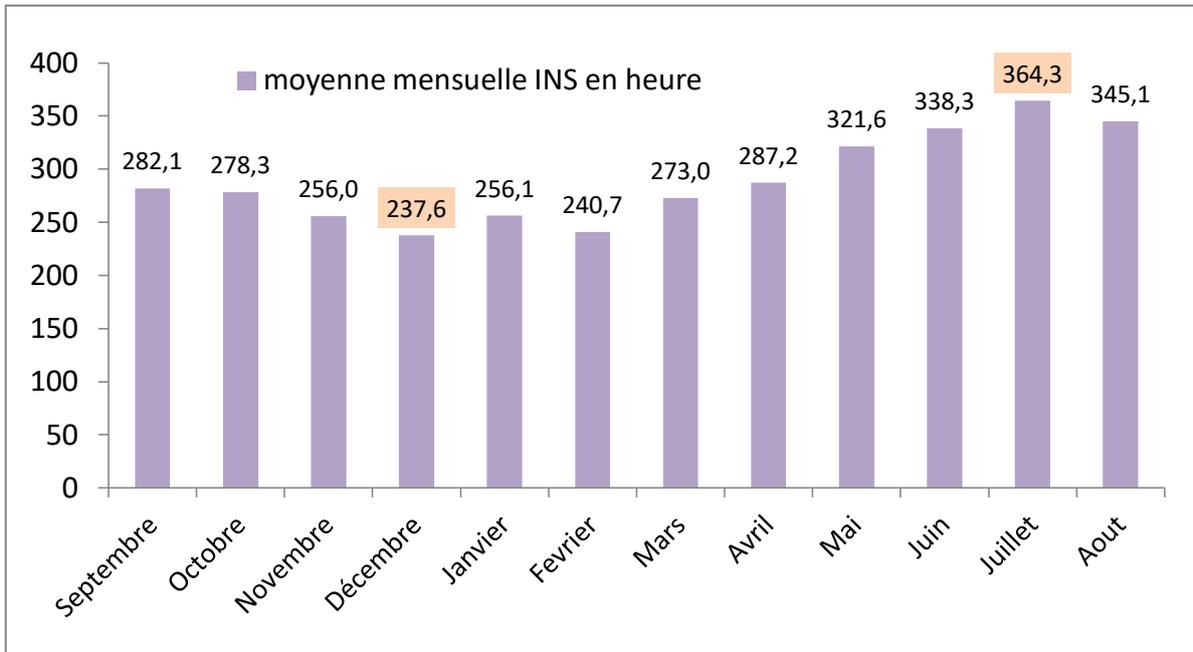


Figure 16: l'ensoleillement mensuelle (2007-2018).

I.8.13 L'évaporation :

Dans les régions arides, les pertes en eau sont principalement causées par l'évaporation et l'évapotranspiration. Dans les bassins arides fermés, ces processus représentent les seuls mécanismes de perte d'eau (Ullman 1985).

La région que nous étudions connaît des taux d'évaporation considérables, avec une hauteur moyenne d'eau évaporée annuellement de 3 à 4 m sur la période allant de 1996 à 2018. Les variations mensuelles d'évaporation sont présentées dans la figure 17. On observe que la valeur minimale est enregistrée en décembre, pendant la période humide, atteignant environ 96 mm. En revanche, la valeur maximale est de 458 mm et est obtenue en juillet, pendant la période sèche. Ces chiffres mettent en évidence l'impact significatif des saisons sur les taux d'évaporation dans la région. Pendant la période humide, les pertes en eau sont relativement faibles, probablement en raison de la présence d'une plus grande quantité d'humidité atmosphérique qui limite le processus d'évaporation. En revanche, pendant la période sèche, lorsque les conditions sont plus chaudes et que l'humidité atmosphérique diminue, l'évaporation atteint son pic, entraînant des pertes d'eau plus importantes.

Ces données soulignent l'importance de comprendre et de surveiller les taux d'évaporation dans les zones arides, car ils ont un impact direct sur la disponibilité des ressources en eau, l'équilibre des écosystèmes locaux et les activités humaines telles que l'agriculture et l'approvisionnement en eau potable. Des mesures d'adaptation et de gestion de l'eau doivent être mises en place pour faire face à ces défis, en utilisant les connaissances sur les schémas

d'évaporation saisonniers pour une utilisation optimale et durable des ressources en eau dans cette région aride.

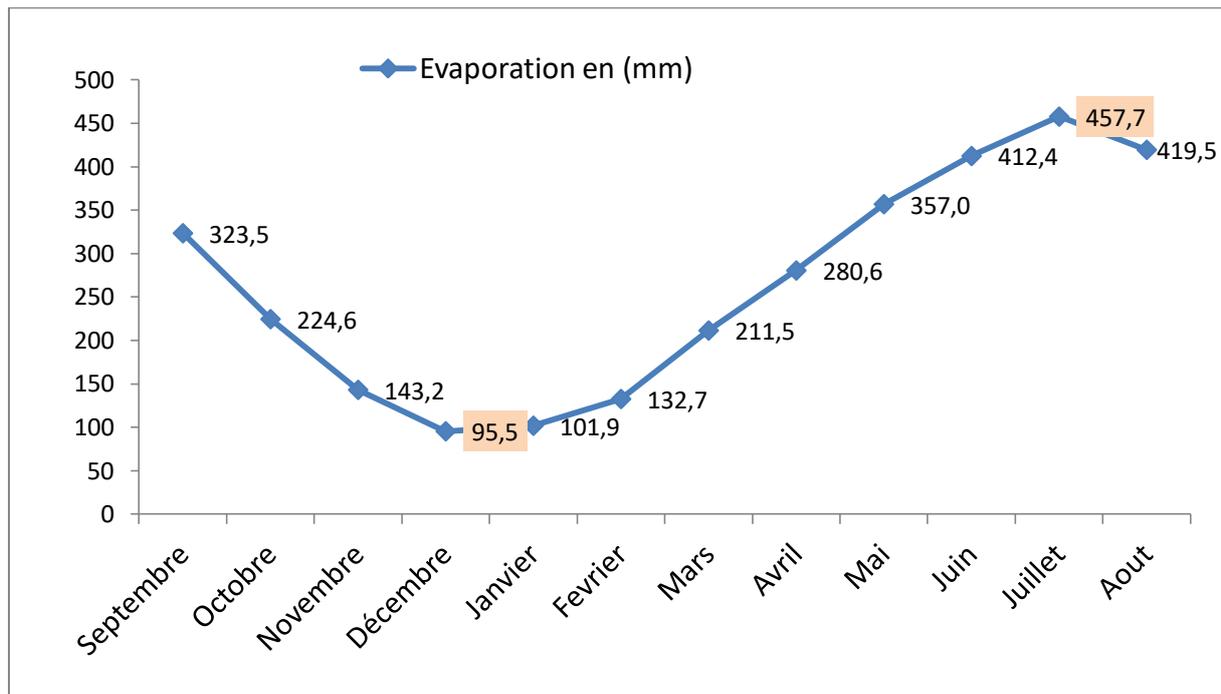


Figure 17: Evaporation mensuelle (1996-2018).

I.8.13.1 L'évapotranspiration (ETP, ETR) :

L'évapotranspiration est déterminée par l'ensemble des processus d'évaporation (phénomène physique) et de transpiration (phénomène biologique). Elle est donc un élément très important pour l'établissement du bilan hydrique et dépend des plusieurs paramètres ; la température, les précipitations, l'humidité de l'air et le couvert végétal. On distingue :

A. L'évapotranspiration potentielle (ETP) :

Correspond à la quantité d'eau qui pourrait être évaporée et transpirée. Si le sol contient de l'eau en permanence, le phénomène est tributaire de nombreux facteurs climatiques (pluies, ensoleillement, vent), elle est donc supérieure ou égale à l'évapotranspiration réelle ($ETP \geq ETR$).

➤ Formule de Thornthwaite :

C'est une formule est très employée en hydrologie car sa résolution nécessite uniquement la connaissance de la température moyenne mensuelle et ont utilisée pour le calcul des déficits.

$$ETP = \left(10 \frac{T}{I}\right)^a \cdot 1,6$$

$$\text{Avec } I = \sum_{n=1}^{12} in \quad i = \left(\frac{T}{5}\right)^{1,514} \quad a = 657 \cdot 10^{-9} \cdot I^{-3} + 771 \cdot 10^{-7} \cdot I^{-2} + 1792 \cdot 10^{-5} \cdot I +$$

0,4239

$a = 5,84$

ETP : Évapotranspiration potentielle.

I : indice thermique annual ($\sum 12i$). I=134

i : indice thermique mensuel.

T : température moyenne mensuelle du mois considéré en °C.

Les valeurs ETP calculées par cette formule doivent être corrigées à l'aide d'un facteur correctif K, qui dépend du temps et du lieu de la station intéressée: ETP corrigée = ETP.K

ETPc = 2129 mm, soit 6,26 % des précipitations.

Tableau 4: Evapotranspiration potentielle selon (Thornthwaite 1965) .

Mois	T Moyenne en (°C)	i	ETP NON Corrigée	k	ETP Corrigée
Septembre	31	16	214,5	1,03	220,42
Octobre	25	11	57	0,97	55,29
Novembre	17	7	6,4	0,88	5,65
Décembre	12	4	0,8	0,86	0,72
Janvier	12	4	0,8	0,88	0,74
Février	14	5	2,1	0,86	1,78
Mars	19	7	12,3	1,03	12,66
Avril	24	10	48,1	1,19	57,25
Mai	29	14	145,3	1,2	174,35
Juin	33	17	309	1,22	376,97
Juillet	36	20	513	1,33	683
Aout	35	19	435,7	1,24	540,265
Moyenne/somme	24	134	1749,7	/	2129

B. L'évapotranspiration réelle (ETR) :

L'évapotranspiration réelle, notée ETR, Correspond à la quantité d'eau effectivement évaporée et transpirée. peut être calculée selon plusieurs formules dans laquelle sont :

➤ Formule de Turc :

une équation valable pour tous les climats. Cette formule est donnée par :

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

Dans cette formule :

- ✓ L : représente le pouvoir évaporant, défini comme $L = 300 + 25T + 0.05T^3$. En utilisant la température moyenne annuelle $T = 23.85$ °C, nous pouvons calculer L comme suit : $L = 300 + 25 \cdot (23.85) + 0.05 \cdot (23.85)^3 = 1\,574.571$.
- ✓ P : correspond à la précipitation moyenne annuelle en mm, égale à 34mm.
- ✓ T : désigne la température moyenne annuelle en °C, avec $T = 23.85$ °C.

En appliquant les valeurs spécifiées dans la formule de TURC, nous pouvons déterminer que l'évapotranspiration réelle annuelle (ETR) ou bien le déficit d'écoulement moyen annuel (D) à la station météorologique de Hassi Messaoud est de l'ordre de 35.83mm.

➤ **Formule de Thornthwaite :**

La méthode utilise deux paramètres essentiels : l'évapotranspiration potentielle et la pluviométrie, en se basant sur le concept de réserve d'eau facilement utilisable (RFU). L'estimation de ce dernier paramètre a été réalisée en appliquant la formule de Hallaire de 1960 (référéncée par J. Ricard en 1979).

$$RFU = (C - F/100) * h * D + 30 \text{ mm}$$

Avec :

- ✓ RFU : Réserve facilement utilisable en (mm).
- ✓ C : Capacité de rétention aux champs.
- ✓ F : Capacité au point de flétrissement des plantes
- ✓ h : profondeur de la couche traversée par les racines
- ✓ D : Densité apparente du sol se entre 1,4-1,6,

on supposee que : $D = 130$ mm : ils correspondent au déracinement capillaire. Hallaire propose :

$C - F = 05$ % : un sol sableux

$C - F = 10\% - 15\%$: un sol limoneux

$C - F = 20$ % : un sol argilo – limoneux

La majeure partie du sol de la région d'étude est sol sableux, on prend $C-F = 05$ % avec profondeur de $h = 650$ mm. Ce qui indique que le réserve facilement utilisable est comme suivant :

$$RFU = (5 / 100) * 650 * 1 + 30 \text{ mm} \rightarrow RFU = 63,5 \text{ mm.}$$

Dans cette méthodes ,on se base sur le principe suivant :

- ✓ **Le premier cas :**
 - Lorsque $P \geq ETP \rightarrow ETP = ETR$, alors $RFU = P - ETP$
- ✓ **Le deuxième cas :**
 - Lorsque $P < ETP$

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

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

$$c- Si: RFU_{i-1} = 0 \rightarrow ETR = 0$$

Le déficit agricole : $DA = ETP - (P + RFU_{i-1})$.

D'après l'application de la formule de Thornthwaite, l'évapotranspiration réelle ou le déficit d'écoulement annuel, à partir du tableau 05, est estimé à environ 36,78 mm. Ce résultat est proche de celui obtenu en utilisant la formule de Turc, qui donne un résultat de 35,83 mm. La similitude entre ces deux valeurs suggère une fiabilité dans les estimations obtenues par les deux méthodes de calcul. Cependant, la valeur d'évaporation dépasse la précipitation annuelle mesurée à la même station, indiquant ainsi un déficit important d'écoulement (ETR ou $D > P$) et la présence d'une période de sécheresse actuelle.

Il est crucial de noter que l'excès d'évaporation par rapport à la précipitation peut avoir des conséquences importantes sur le bilan hydrique local, notamment en aggravant les conditions de sécheresse et en impactant les ressources en eau disponibles pour les activités humaines et la végétation.

Tableau 5: le bilan hydrologique selon Thornthwaite.

Mois	D	J	F	M	A	Mai	Ju	Jut	At	S	O	N	Annuel
P (mm)	3,3	5	4,5	2,9	4,1	2,7	3,3	4,5	2,9	0,3	0	0,7	34,2
T (C°)	12	12	14	19	24	29	33	36	35	31	25	17	
ETPc (mm)	0,72	0,74	1,78	12,66	57,25	174,4	377	683	540,3	220,4	55,3	5,65	2129,1
Variation de la réserve (mm)	2,58	4,26	2,72	-9,76	-53,2	-172	-374	-679	-537	-220	-55	-4,95	
RFU (mm)	2,58	6,84	9,56	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
ETR (mm)	3,3	0,74	1,78	12,46	4,1	2,7	3,3	4,5	2,9	0,3	0	0,7	36,78
DA (mm)	-2,58	0	-9,56	0,2	53,15	171,7	373,7	678,5	537,4	220,1	55,3	4,95	2082,8
P-ETPc (mm)	2,58	4,26	2,72	-9,76	-53,2	-172	-374	-679	-537	-220	-55	-4,95	
Coef. Mensuel d'humidité	0,79	5,76	1,53	-0,78	-13	-63,6	-113	-151	-185	-734	0	-7,07	
Excédent(mm)	0												0

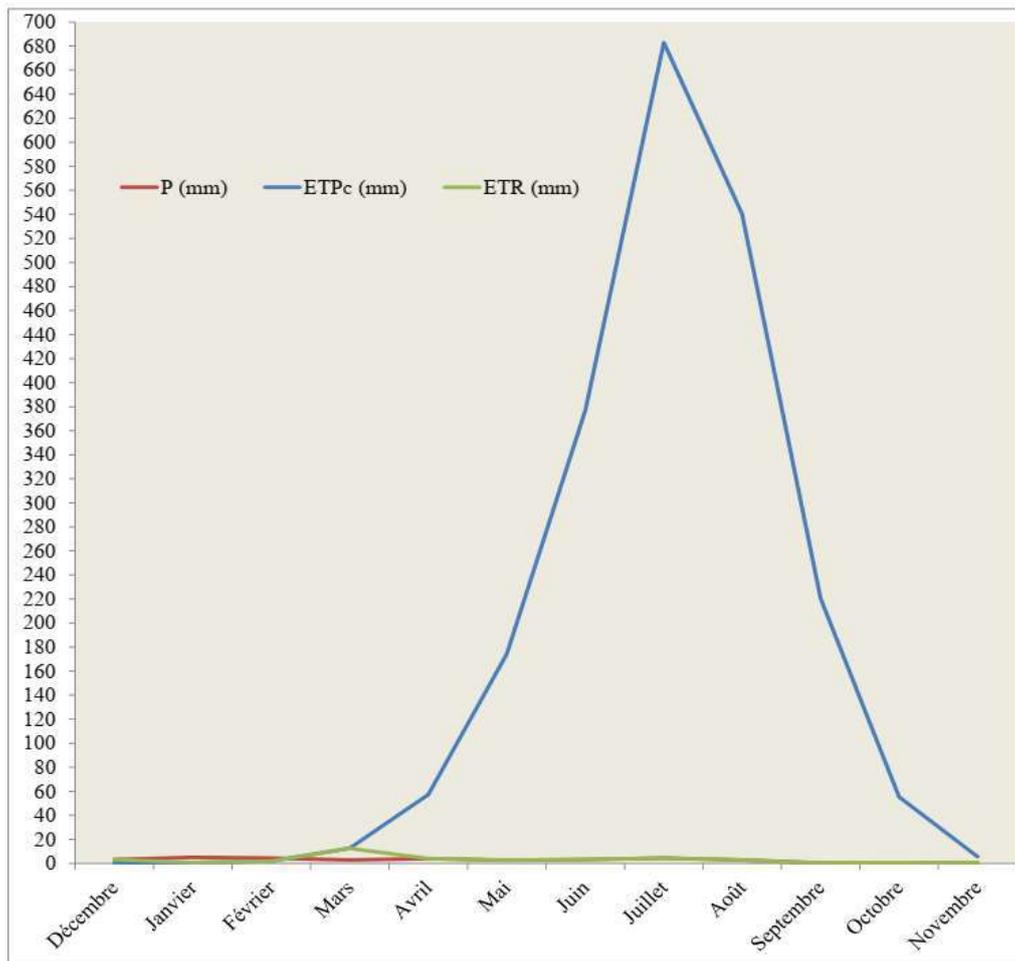


Figure 18: le bilan hydrologique selon Thornthwaite.

L'observation du bilan hydrologique à partir de la figure 18 et du tableau 05 nous permet de constater que l'évapotranspiration potentielle (ETP) est élevée du mois de mars jusqu'au mois d'octobre, avec des valeurs atteignant les 683 mm au mois de juillet. À partir du mois de mai, on assiste à une reconstitution du stock d'eau, accompagnée d'une augmentation de la réserve d'eau facilement utilisable (RFU), qui atteint son maximum entre juin et août. Au-delà de cette période, on observe une baisse de la RFU, traduisant un épuisement du stock d'eau.

L'évolution de l'ETPc à l'échelle mensuelle montre l'existence de deux périodes bien distinctes ; l'une pendant laquelle les précipitations sont supérieures à l'ETP (décembre - février), et la seconde pendant laquelle c'est l'inverse (mars - novembre).

I.9 Bilan hydrologique :

Le système hydrologique de notre région présente une vaste étendue de sols sableux et de massifs dunaires. Pour décrire ce bilan, nous utilisons une équation de base qui permet de répartir les précipitations comme suit : Variation de stock = entrées - sorties.

Les entrées peuvent être constituées de précipitations, d'infiltration dans le sol, de percolation ou d'apports artificiels tels que le stockage souterrain d'eau.

Les sorties incluent des processus tels que l'évaporation, la transpiration, le ruissellement de surface, les émergences d'eau et le pompage.

Le calcul du bilan hydrologique dépend de plusieurs facteurs du système hydrologique tels que les précipitations, le ruissellement, l'infiltration et l'évapotranspiration. Cette relation peut être exprimée par la formule :

$$P = E + R + I$$

Avec :

- ✓ P : Pluviométrie moyenne annuelle en mm.
- ✓ E : Evapotranspiration réelle moyenne annuelle en mm.
- ✓ R : Ruissellement moyen annuel en mm.
- ✓ I : Infiltration moyenne annuelle en mm.

Cette formule permet de quantifier les différentes composantes du bilan hydrologique, en prenant en compte les entrées (précipitations, infiltration, apports artificiels) et les sorties (évaporation, transpiration, ruissellement de surface, émergences et pompage). Elle joue un rôle essentiel pour comprendre le cycle de l'eau dans la région et évaluer les disponibilités en eau.

I.9.1 Ruissellement superficiel :

Selon la méthode de Tixeront-Berkaloff, nous pouvons estimer le ruissellement dans notre cas à l'aide de la formule suivante :

$$R = P^3 / 3(ETPc)^2$$

En utilisant les valeurs données : $P = 34$ mm (précipitations) et $ETPc = 2129,1$ mm (évapotranspiration potentielle corrigée), nous trouvons que le ruissellement estimé dans la région de Hassi Messaoud est d'environ 0,003 mm.

I.9.2 Infiltration :

Selon l'équation du bilan hydrologique, l'estimation de l'infiltration (I) dans la région de Hassi Messaoud est donnée par :

$$I = P - (ETR + R)$$

En utilisant l'équation du bilan hydrologique, nous avons estimé que l'infiltration (I) dans la région de Hassi Messaoud est d'environ -2,783 mm. Cette valeur négative indique que le sol ne peut pas retenir toute l'eau provenant des précipitations (P) et de l'évapotranspiration réelle (ETR), et qu'il y a un excès d'eau qui s'écoule ailleurs, potentiellement sous forme de ruissellement ou de saturation du sol.

Cependant, il est important de noter que cette estimation de l'infiltration négative ne signifie pas nécessairement que le bilan hydrologique de la région est négative. Le bilan hydrologique

prend en compte l'ensemble des flux d'eau entrants et sortants d'une zone donnée sur une période spécifique, et il peut varier en fonction de divers facteurs environnementaux.

La région de Hassi Messaoud étant sujette à une sécheresse et à un réchauffement climatique intense, il est probable que les conditions locales jouent un rôle significatif dans le bilan hydrologique. Des conditions arides et une évaporation élevée peuvent contribuer à une infiltration limitée dans le sol, entraînant ainsi une estimation négative.

I.10 Conclusion :

la zone d'étude, située à environ 850 km de la capitale Alger, fait partie de la région de Hassi Messaoud, elle couvre une superficie d'environ 1848,6 km² qui joue un rôle crucial dans l'économie nationale en raison de sa production d'hydrocarbures, faisant elle l'un des principaux gisements mondiaux de ces ressources énergétiques.

La présence de la ville de Hassi Messaoud est étroitement liée à la richesse pétrolière de la région, ce qui la rend sujette à des risques élevés en termes d'activités industrielles. En revanche, les agglomérations de populations secondaires sont liées aux activités agricoles. La région compte environ 50255 habitants avec une consommation en eau potable de 31994 m³/j. Les ressources en eau souterraines sont essentielles pour répondre aux besoins en eau, mais les prélèvements continuent d'augmenter chaque année, avec un volume total prélevé estimé à 50 Hm³ en 2022. Une partie importante de l'eau est utilisée pour l'alimentation en eau potable, l'irrigation et l'industrie, y compris l'activité pétrolière.

La région de Hassi Messaoud se trouve dans le Bas Sahara, caractérisée par des accumulations sableuses éoliennes. Le climat est désertique, marqué par une sécheresse extrême avec des températures très élevées en été et très faibles en hiver, entraînant une grande amplitude annuelle de température. Les précipitations moyennes annuelles sont de 34 mm et très irrégulières, tandis que les vents sont très forts au Printemps et à l'Automne. L'énergie solaire est intense avec une évaporation très élevée pendant les périodes sèches.

Le bilan hydrologique dans la zone est négatif, confirmant la sécheresse et l'intensité du réchauffement climatique. Il est essentiel de continuer à surveiller attentivement les conditions hydrologiques et climatiques de la région pour mieux comprendre les variations et les tendances au fil du temps. Cela permettra de prendre des décisions éclairées en matière de gestion des ressources en eau et d'adapter les stratégies aux changements climatiques. La préservation et l'utilisation responsable de l'eau deviennent des enjeux critiques pour assurer la durabilité de la région et de ses activités économiques et sociales.

CHAPITRE II
GÉOLOGIE ET
HYDRGÉOLOGIE

II. Géologie et Hydrogéologie

II.1 Introduction :

La région d'étude est située dans le Bas Sahara, caractérisée par un climat désertique hyper-aride, avec des conditions de sécheresse extrême et des températures très élevées en été et très basses en hiver. Elle s'étend dans le grand Erg Oriental, une formation de dunes qui crée des cuvettes à écoulement endoréique se transformant en dépressions fermées telles que les "sebkhas" et les "chotts".

Du point de vue géologique, la région d'étude fait partie de la plateforme saharienne, appartenant au Craton Nord-africain, qui formant la province triasique centrale. Elle est réputée pour ses réserves de pétrole, principalement dans le réservoir cambrien, ainsi que pour ses réserves en eaux souterraines très important.

Pour cette étude, une synthèse géologique a été réalisée en se basant sur des études antérieures menées par (Busson 1970) et des ouvrages comme ; (UNESCO 1972), (PNUD 1983) (SASS/OSS 2003). Cette analyse des synthèses a permis de bien définir les caractéristiques géologiques et hydrogéologiques de la région, en particulier en ce qui concerne les deux systèmes aquifères profonds : la formation du Continental Intercalaire (CI) et celle du Complexe Terminal (CT). Ces systèmes couvrent une vaste étendue du Sahara septentrional de plus d'un million de km². Des coupes géologiques ont également été ajoutées pour schématiser la structure de la région à partir des données des forages utilisés à différentes fins telles que l'approvisionnement en eau, l'exploitation pétrolière et l'irrigation. Cette synthèse géologique approfondie permet de mieux comprendre la géologie, l'hydrogéologie et l'hydrodynamique de la région, ce qui est essentiel pour une gestion efficace et durable des ressources en eau et des activités économiques qui en dépendent.

II.2 Géologie

II.2.1 Géologie régional :

La zone d'étude est située dans le Sahara oriental algérien, plus précisément dans le bassin hydrographique du bas Sahara. Ce bassin est inclus dans la plateforme saharienne, une composante du Craton Nord-africain. Contrairement à d'autres entités structurelles de l'Algérie, comme l'Atlas saharien, les hauts plateaux et les hautes plaines, la plateforme saharienne présente une stabilité structurelle.

La géologie de la plateforme saharienne a été éclairée par des études antérieures menées par (Fabre 1976) sur les affleurements géologiques des périphériques, ainsi que par des forages profonds effectués pour l'exploration pétrolière et hydraulique par (Busson 1970).

Le socle de la plateforme saharienne est constitué de roches précambriennes sous-jacentes, sur lesquelles se sont déposées en discordance d'épaisses séries sédimentaires. Ces dépôts ont principalement eu lieu pendant le Paléozoïque, au cours de diverses transgressions marines successives, formant ainsi plusieurs bassins sédimentaires distincts.

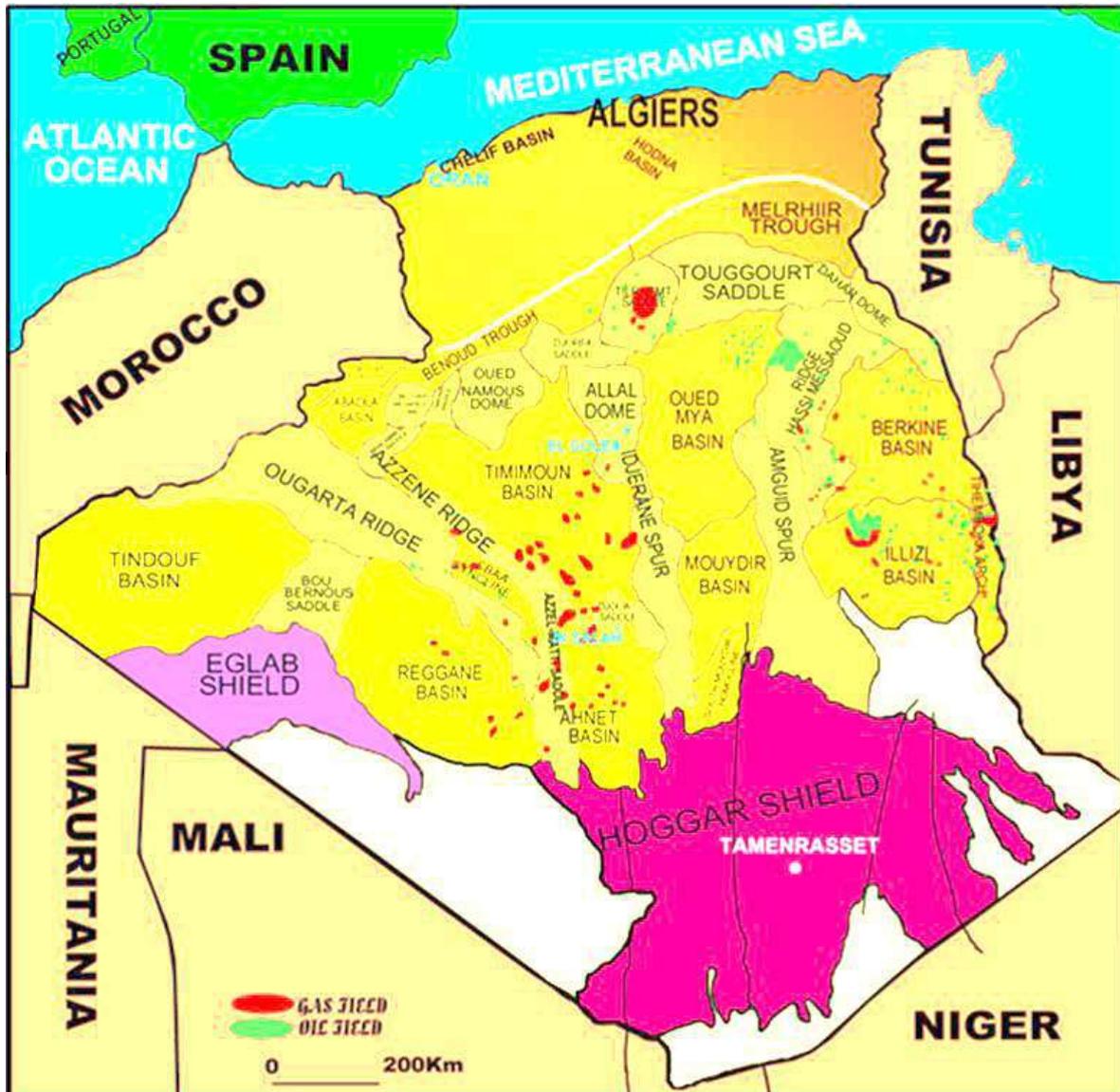


Figure 19: carte des bassins sédimentaires de la plateforme saharienne.

Ces bassins sont séparés les uns des autres par divers éléments tectoniques, ce qui a engendré une variabilité dans la lithostratigraphie. Les trois provinces géologiques principales de la plateforme saharienne sont la province occidentale, la province orientale et la province triasique ou central.

Le socle rocheux sous-jacent de la plateforme saharienne est composé de roches éruptives et métamorphiques, affleurant dans des régions telles que le Sahara Central Massif du Hoggar et le Sahara Occidental Massif de l'Eglab.

En plus, ce substrat rocheux est recouvert par une couverture sédimentaire datant du Paléozoïque, du Mésozoïque et du Cénozoïque. Les dépôts paléozoïques ont subi divers plissements, tandis que les dépôts mésozoïques et cénozoïques affichent une disposition subhorizontale. L'épaisseur totale de cette couverture sédimentaire varie, allant de 400 m dans les parties sud et ouest de la dépression Maya à 6000 m dans la partie nord zone des chotts (SCHLUMBERGER et SONATRACH 2007).

II.2.1.1 Stratigraphie régional :

La coupe lithostratigraphique de la zone d'étude, comme illustrée dans la figure 20, présente les caractéristiques géologiques suivantes :

- ✓ La série stratigraphique n'est pas complète et montre des absences de termes du Paléozoïque tels que le Silurien, le Dévonien, le Carbonifère et le Permien.
- ✓ Les dépôts du Paléozoïque reposent en discordance sur un socle granitique, connu sous le nom de discordance panafricaine.
- ✓ Le Trias se présente comme une formation transgressive reposant en discordance hercynienne sur le Paléozoïque.
- ✓ Le Cénozoïque est caractérisé par une série détritique Mio-Pliocène.
- ✓ La description de cette coupe peut être divisée de bas en haut comme suit :
- ✓ Protérozoïque :
- ✓ Le socle est principalement constitué de granites porphyroïdes roses, avec une profondeur d'environ 4000 m.

A. Paléozoïque :

Le Paléozoïque comprend plusieurs périodes géologiques avec des unités lithologiques distinctes. L'Infracambrien est caractérisé par des grès argileux rouges d'environ 45 m d'épaisseur. Le Cambrien comprend plusieurs unités de grès feldspathiques et micacés, grès moyens à grossiers, grès quartzitiques, et grès de couleur grise beige, avec des épaisseurs allant de 42 à 300 m et profondeur d'ordre 3500 m. L'Ordovicien se compose de diverses unités, y compris des alternances d'argiles et de quartzites, une argile schisteuse verte à noire, des grès fins à très fins, et des quartzites compacts avec des épaisseurs variables allant jusqu'à 80 m.

B. Mésozoïque :

Le Mésozoïque est constitué de couches sédimentaires épaisses et complètes, d'une moyenne de 3000 m et situées à environ 360 m de profondeur. Il se divise en plusieurs unités lithologiques distinctes. Le Trias est composé de couches salifères, argileuses et gréseuses. Le Trias argilo-gréseux inférieur a une épaisseur d'environ 140 m, tandis que le Trias salifère

ERE	SYST	ETAGES		Ep moy	DESCRIPTION
CENO-ZOIQUE	NEOGENE	MIO-PLIOCENE <i>discordance alpine</i>		240	Sable, calcaire, marne sableuse
		EOCENE		120	Sable, calcaire à silex
MESOZOIQUE	CRETACE	SENONIEN	CARBONATE	107	Calcaire, dolomie, anhydrite
			ANHYDRITIQUE	219	Anhydrite, marne, dolomie
			SALIFERE	140	Sel massif et traces d'anhydrite
		TURONIEN		90	Calcaire crayeux avec quelques niveaux argileux
		CENOMANIEN		145	Anhydrite, marne, dolomie
		ALBIEN		350	Grés, sable avec intercalations d'argile silteuse
		APTIEN		25	Dolomie cristalline avec niveau argileux, calcaire
		BARREMIEN		280	Argile, grés, dolomie
		NEOCOMIEN		180	Argile, marne, dolomie, grés
	JURASSIQUE	MALM		225	Argile, marne, calcaire, grés et traces d'anhydrite
		DOGGER	ARGILEUX	105	Argile silteuse, marne dolomitique avec fines passées de grés
			LAGUNAIRE	210	Anhydrite, marne dolomitique, marne grise
		LIAS	L.D 1	65	Dolomie, anhydrite, argile
			L.S 1	90	Alternances sel, anhydrite et argile
			L.D 2	55	Anhydrite et dolomie cristalline
			L.S 2	60	Alternances sel et argile
			L.D 3	30	Alternances de dolomie et de marne
		TRIAS	SALIFERE	TS 1	46
	TS 2			189	Sel massif à intercalations d'anhydrite et argile gypsifère
	TS 3			202	Sel massif et traces d'argile
	ARGILEUX		113	Argile rouge dolomitique ou silteuse injectée de sel et d'anhydrite	
	GRESEUX		35	Grés, argile	
	ERUPTIF <i>discordance hercynienne</i>		0-92	Andésites altérées	
PALEOZOIQUE	ORDOVICIEN		QUARTZITES D'EL HAMRA		75
		GRES D'EL ATCHANE		25	Grés fins à ciment argileux, bitumineux
		ARGILES D'EL GASSI		50	Argiles schisteuses, vertes ou noires, glauconieuses à graptolithes
		ZONE DES ALTERNANCES		20	Alternance de grés et argile. Présence de tigillites
	CAMBRIEN	R1		50	Grés isométriques, fins, silteux
		Ra		120	Grés à grés quartzitiques anisométriques à niveaux de silts
		R2		100	Grés moyens à grossiers à ciment argileux illitique
		R3		300	Grés grossier à ciment argileux, argile silteuse
	INFRA-CAMBRIEN		45	Grés argileux rouges	
	S O C L E				

Figure 21: Coupe stratigraphique régional.

II.2.2 Géologie locale :

Selon la carte géologique du Sahara Algéro-Tunisien montrée par la figure 22, la région présente principalement des dépôts détritiques Plio-Quaternaire et Méocène. La géologie de la zone de Hassi Messaoud a été établie en grande partie grâce aux données des forages pétroliers et hydrauliques. Cette zone pétrolière occupe la province triasique, caractérisée par des séries épaisses du Trias. Elle s'étend sur près de 2200 Km² de superficie. Cette région revêt une grande importance en raison de la présence d'un gisement pétrolier datant du Cambrien. De plus, elle abrite d'importantes nappes d'eau, s'étendant de la base du Trias jusqu'au sommet du Tertiaire continental. La région de Hassi Messaoud est donc d'un intérêt particulier en raison de ses ressources pétrolières ainsi que de ses importantes réserves en eau souterraine.

II.2.3 Tectonique :

Pendant l'ère du Paléozoïque, la configuration géologique de la zone d'étude se présente comme un large dôme anticlinal aplati, comme indiqué dans la figure 20. Ce dôme est principalement orienté du Sud-ouest au Nord-est et bordé au Nord-ouest et au Sud-est par des dépressions. Cette disposition a entraîné une interruption significative dans la séquence stratigraphique en raison d'une discordance hercynienne. Elle constate une lacune témoin d'une histoire géologique pendant 200 millions d'années.

Dans le Bassin du Grand Erg Oriental, la dorsale d'Amguid, s'étendant du Sud au Nord, traverse le massif précambrien du Hoggar et plonge en profondeur vers le Nord jusqu'à la zone Rhourde El Baguel (figure 23 et 24). Ce réseau de failles d'Amguid impacte les couches sédimentaires primaires et secondaires de la région de Hassi Messaoud. Les déplacements verticaux provoqués par ces failles atteignent environ 300 à 400 m. L'épaisseur du Crétacé inférieur semble être altérée par l'activité de ces failles, en particulier la partie détritique des séries continentales est diminuée. De la même manière, les séries du Crétacé supérieur et les calcaires sénoniens voient leur épaisseur réduite. Ces failles résultent d'accidents tectoniques anciens qui ont continué à influencer la région jusqu'à des périodes récentes.

Leur activité tardive est confirmée par la subsidence observée pendant la sédimentation plio-quaternaire au nord de la zone étudiée, c'est-à-dire la gouttière Oued Maya-Oued Rhir. Il est probable que ces failles jouent un rôle dans les écoulements souterrains en favorisant les échanges verticaux entre le Continental Intercalaire et les formations du Crétacé supérieur (SASS/OSS 2003).

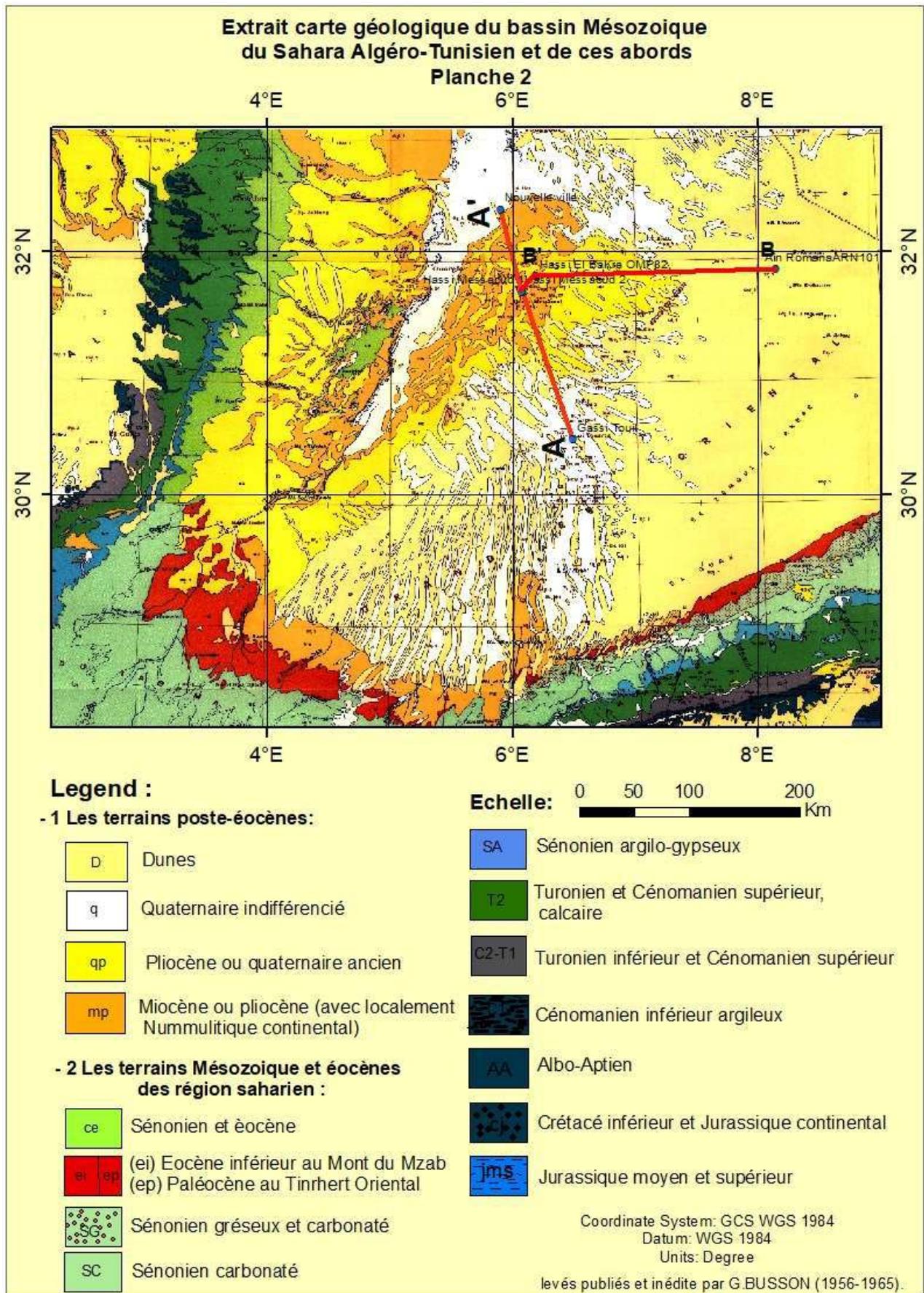


Figure 22: Carte géologique régionale de Hassi Messaoud.

II.3 Hydrogéologie

II.3.1 Hydrogéologie régional :

II.3.1.1 Système Aquifère Sahara Septentrional (SASS):

Le Système Aquifère du Sahara Septentrional (SASS) est une étendue géologique située au nord de l'Afrique (Satouh et al. 2021). La région de Hassi Messaoud est occupée la partie centrale de ce système. Le SASS s'étend sur plus d'un million de km², répartis principalement sur 700 000 km² en Algérie, 80 000 km² en Tunisie et 250 000 km² en Libye. Il est constitué de dépôts continentaux sur la plateforme saharienne et comprend deux importantes nappes d'eau douce, le Continental Intercalaire (CI) et le Complexe Terminal (CT).

La limite du SASS est déterminée par l'étendue de la nappe d'eau douce la plus vaste dans le bassin, connue sous le nom de Continental Intercalaire (CI). Cette limite est établie en se basant sur des éléments géologiques apparents ainsi que sur des données provenant de forages pétroliers et hydrauliques. Elle prend également en compte la qualité de l'eau douce. Cette limite est définie comme suit :

- ✓ Au nord : elle suit le contact Albien-Cénomaniens depuis le versant sud de l'Atlas au nord-ouest jusqu'à la flexure sud de l'Atlas au nord, englobant la zone des Chotts jusqu'au golfe de Gabès au nord-nord-est. Elle s'étend également depuis l'affleurement du Continental Intercalaire (CI) sur le Dahar et le Djebel Nefussa à l'est.
- ✓ Au sud : elle englobe les cours d'eau Zousfana et Saoura au sud-ouest jusqu'à la ceinture d'affleurement du Continental Intercalaire (CI), s'étendant en continuité de la ville d'Adrar jusqu'à la ville de Hun au sud-est.
- ✓ À l'ouest : elle est définie par la limite des affleurements paléozoïques de l'Ougarta.
- ✓ À l'est : la limite suit le méridien 16° est, marquant la transition latérale de la nappe d'eau douce vers une qualité saumâtre.

Les réserves d'eau dans ce système se sont constituées principalement pendant l'ère Secondaire, bien que l'emmagasinage ait eu lieu pendant les périodes humides du Quaternaire. Bien que ces réserves naturelles d'eau soient peu renouvelables, elles sont estimées à environ 60 000 milliards de m³/an. Cependant, la recharge annuelle théorique est seulement d'environ un milliard de m³/an. Les prélèvements d'eau s'élèvent à environ 2,2 milliards m³/an pour la période allant de 1970 à 2000.

Ces réserves d'eau sont utilisées à des fins agricoles (irrigation), domestiques (eau potable et ménage), industrielles, exploitation pétrolière, tourisme et service (SASS/OSS 2003).



Carte géologique du système aquifère sahara septentrional (SASS)

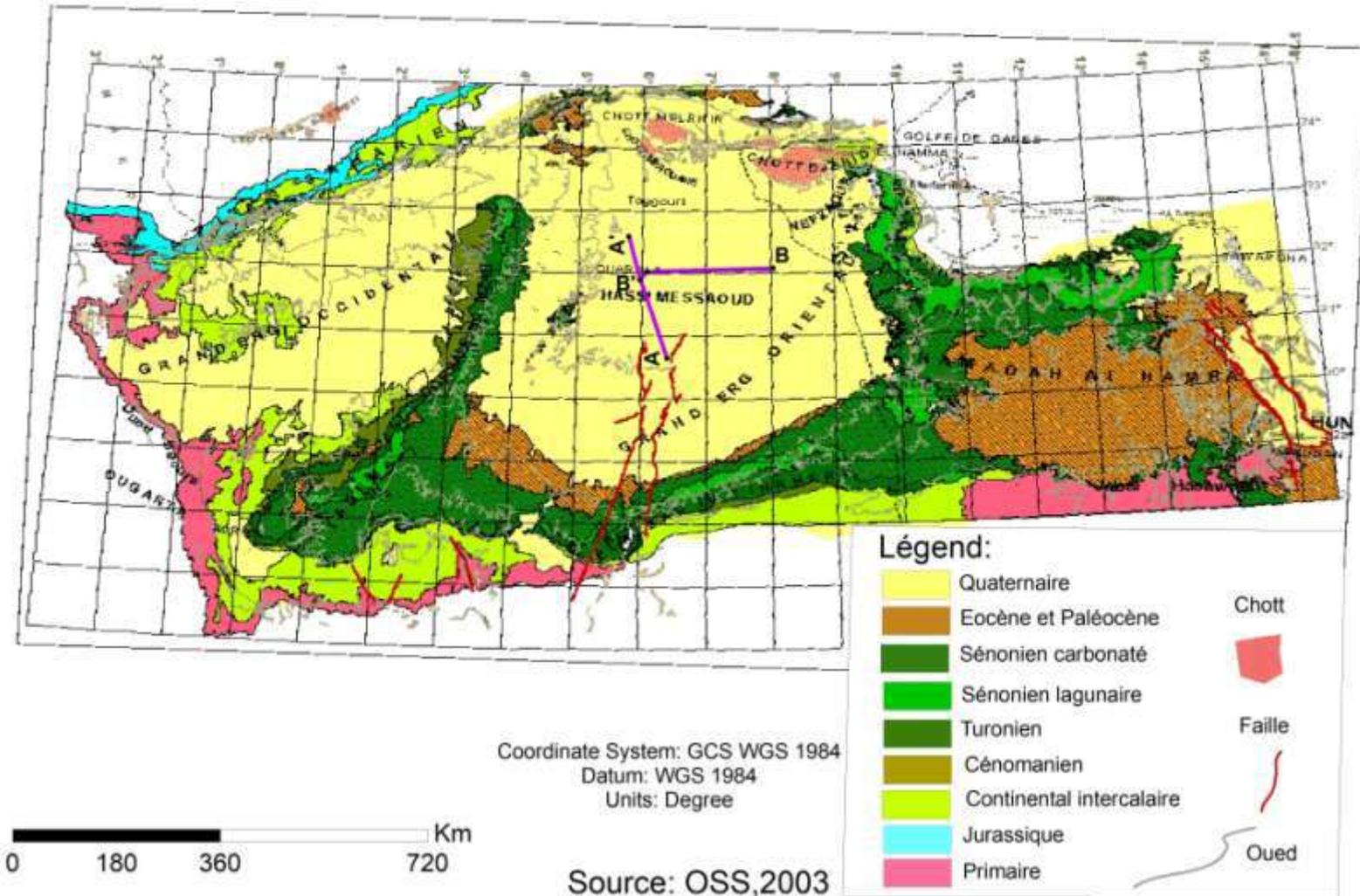


Figure 23: carte géologique (SASS/OSS 2003).

II.3.1.2 Problèmes du SASS :

Le système aquifère du Sahara septentrional (SASS) présente diverses problématiques ; une surexploitation des réserves entraîne une baisse du niveau d'eau et une hausse des coûts de pompage, des interférences et des échanges d'écoulement entre les réserves, des conséquences néfastes du pompage excessif sur l'équilibre des autres réserves, le risque de salinisation des sols dû aux méthodes traditionnelles d'irrigation, la dégradation de la qualité de l'eau, des difficultés locales liées au drainage des eaux usées et des excès, ainsi que l'impact de la nappe phréatique oasienne sur la nappe profonde. En outre, la gestion durable et l'exploitation économique de cette ressource en eau posent des défis à court, moyen et long terme pour ce système (SASS/OSS 2003; Bouselsal et al. 2015a).

II.3.1.3 Continental Intercalaire (CI) :

Le Continental Intercalaire désigne l'ensemble continental qui s'étend entre les plissements hercyniens, ayant repoussé la mer de la plate-forme saharienne, et l'incursion marine du Crétacé supérieur. Cet ensemble est principalement constitué des formations continentales grés-argileuses du Crétacé inférieur. L'analyse des carottes de forage a permis d'identifier des sédiments marins ou lagunaires, datant de l'ère post-paléozoïque et intercalés les dépôts continentaux avant le Cénomaniens. Ce réservoir s'étend jusqu'aux limites qui définissent le Système Aquifère du Sahara Septentrional (SASS) (Cornet André 1964; Bel et Demargne 1966).

A. L'extension de continental Intercalaire CI :

L'extension horizontale et verticale de Continental Intercalaire (CI) se manifeste de différentes manières. À l'ouest, l'aquifère s'étend sur l'ensemble du bassin du Grand Erg occidental, où la nappe du CI est en grande partie non confinée. Dans cette région, la géologie illustre une transition depuis l'Atlas saharien au nord jusqu'à la vallée de la Saoura au sud. Ce changement est accompagné par l'enfouissement des formations du Complexe Terminal sous la dalle hamadienne, qui est elle-même parfois recouverte par les dunes de l'Erg occidental. Cette dalle peut être directement reliée aux sables du Continental Intercalaire.

En revanche, dans la cuvette du Grand Erg Oriental, la transition du sud au nord, depuis les affleurements du CI jusqu'à la flexure sud-atlasique, résulte en un enfoncement en profondeur de toutes les couches crétacées en raison des dépôts tertiaires et quaternaires plus épais. Cet enfoncement atteint son point culminant juste au sud de l'accident sud-atlasique. Par ailleurs, le rôle de la dorsale d'Amguid est mis en évidence par l'amincissement des couches et leur rapprochement de la surface du sol, accompagnés de discontinuités latérales le long des principales failles.

Corrélation ouest- EST du Bassin Occidental à Tawargha [sources : UNESCO 1972, et Base de Données SASS]

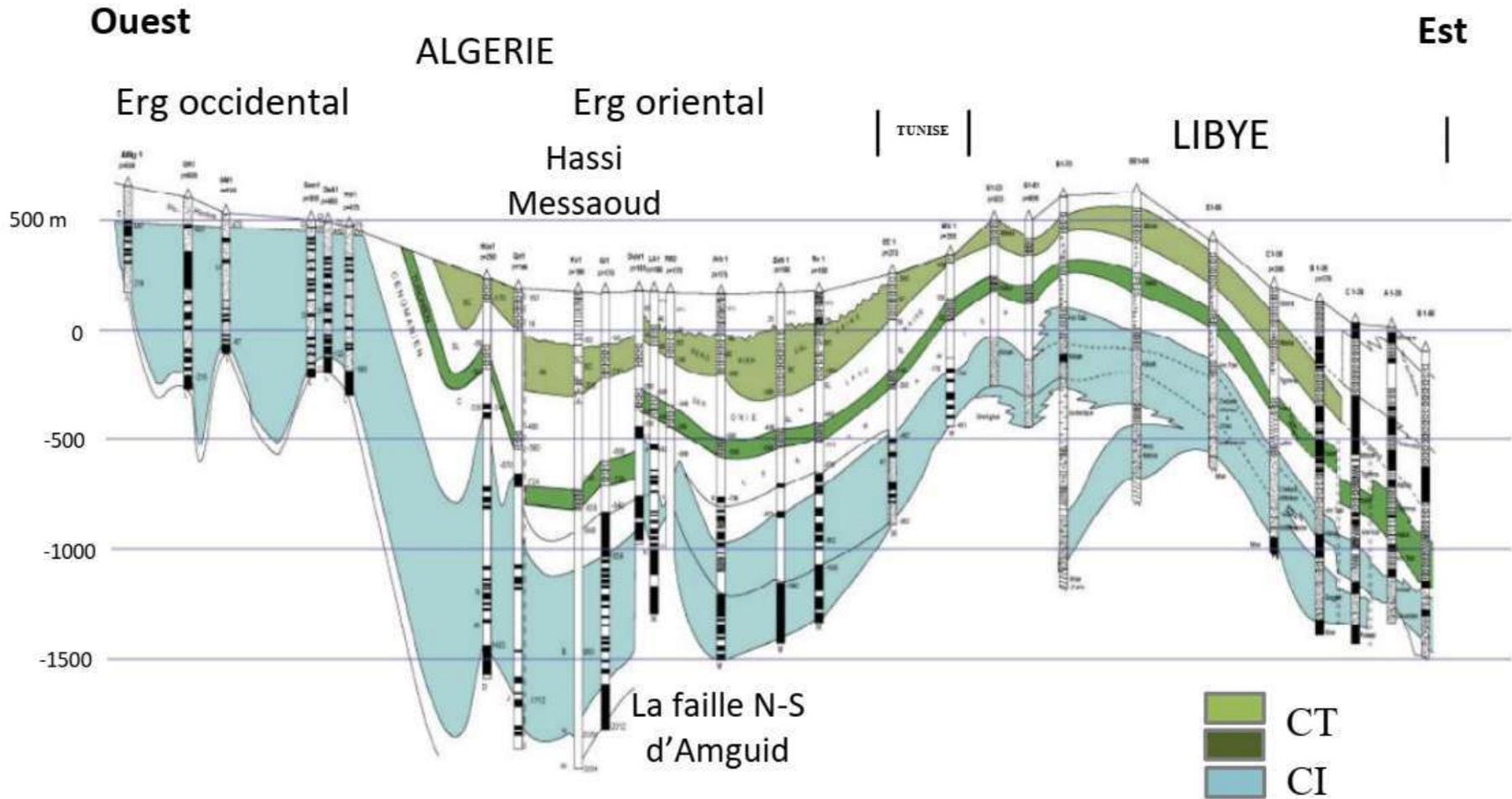


Figure 24: Coupe hydrogéologique transversal Ouest-Est (SASS/OSS 2003).

En direction de la partie libyenne à l'est et au sud-est, la zone située au nord du môle paléozoïque du Gargaf (Jabal Fazzan, Jabal Hassawnah) a persisté depuis le Trias jusqu'à la fin du Crétacé inférieur. Cette région se caractérise par une prédominance de sédiments détritiques d'origine continentale. Plus au nord, des épisodes marins ou lagunaires, favorisés par la subsidence du bassin, se sont alternés avec des périodes émergées et une sédimentation continentale ou marine peu profonde (SASS/OSS 2003).

B. Géométrie de Continental Intercalaire (CI):

Le toit du Continental Intercalaire (CI) présente des variations selon la localisation dans le bassin Sahara septentrional. On observe une transition depuis la dolomie de l'Aptien jusqu'aux argiles et marnes du Vraconien. D'autre part, dans le bassin du Grand Erg Oriental, le toit s'enfonce du sud vers le nord. Cependant, il est important de noter que la position de ce toit est intrinsèquement liée à l'épaisseur des formations géologiques ainsi qu'à l'évolution des types de roches depuis ceux de la plate-forme jusqu'aux formations du sillon fluvio-lacustre des Chotts.

Le substratum du Continental Intercalaire (CI) dans le bassin Saharien septentrional est constitué d'une variété de couches géologiques, incluant des éléments du Primaire, du Trias et du Jurassique (Lias, Dogger et Malm). Dans l'ensemble, ces couches illustrent le cycle continental qui s'est déposé sur des formations géologiques différentes, souvent sculptées par l'érosion et présentant des discordances. Les principales couches aquifères détritiques varient en position et s'étendent du Néocomien à l'Albien. Dans le bassin du Grand Erg Oriental, le substratum est composé de formations de plus en plus récentes, passant d'argiles sableuses à argileuses ou carbonatées, en allant du sud vers le nord.

Par conséquent, l'épaisseur du Continental Intercalaire (CI) qui est pertinente en tant que réservoir, se compose de l'accumulation des horizons perméables constitués de grès (grès et sables argileux avec une teneur en argile inférieure à 50 %) ainsi que des couches calcaires et dolomitiques de l'Aptien immergées au sein de cette série grésosableuse. Les plus grandes épaisseurs sont localisées à l'est d'El Goléa, variant entre 750 m et 1000 m. En revanche, la vallée de l'Oued Rhir et les Ziban affichent des valeurs un peu plus modestes, inférieures à 350 m (BRL ingénierie, Bneder, et Ecole des mines de Paris 1999b).

C. Carte piézométrique de référence du Continental Intercalaire (CI) :

La carte piézométrique de référence du nappe (CI) figure 25 a été établie par le modèle SASS que référer par l'année 1950 montre que, ce bassin diviser par plusieurs provinces hydrogéologiques qui sont; (le Bas-Sahara, le Tinrheret et le Grand Erg Oriental, le Grand Erg Occidental, le Touat-Gourara et le Tidkelt, le Dahar et le J. Nafusa, J.Hassawna),

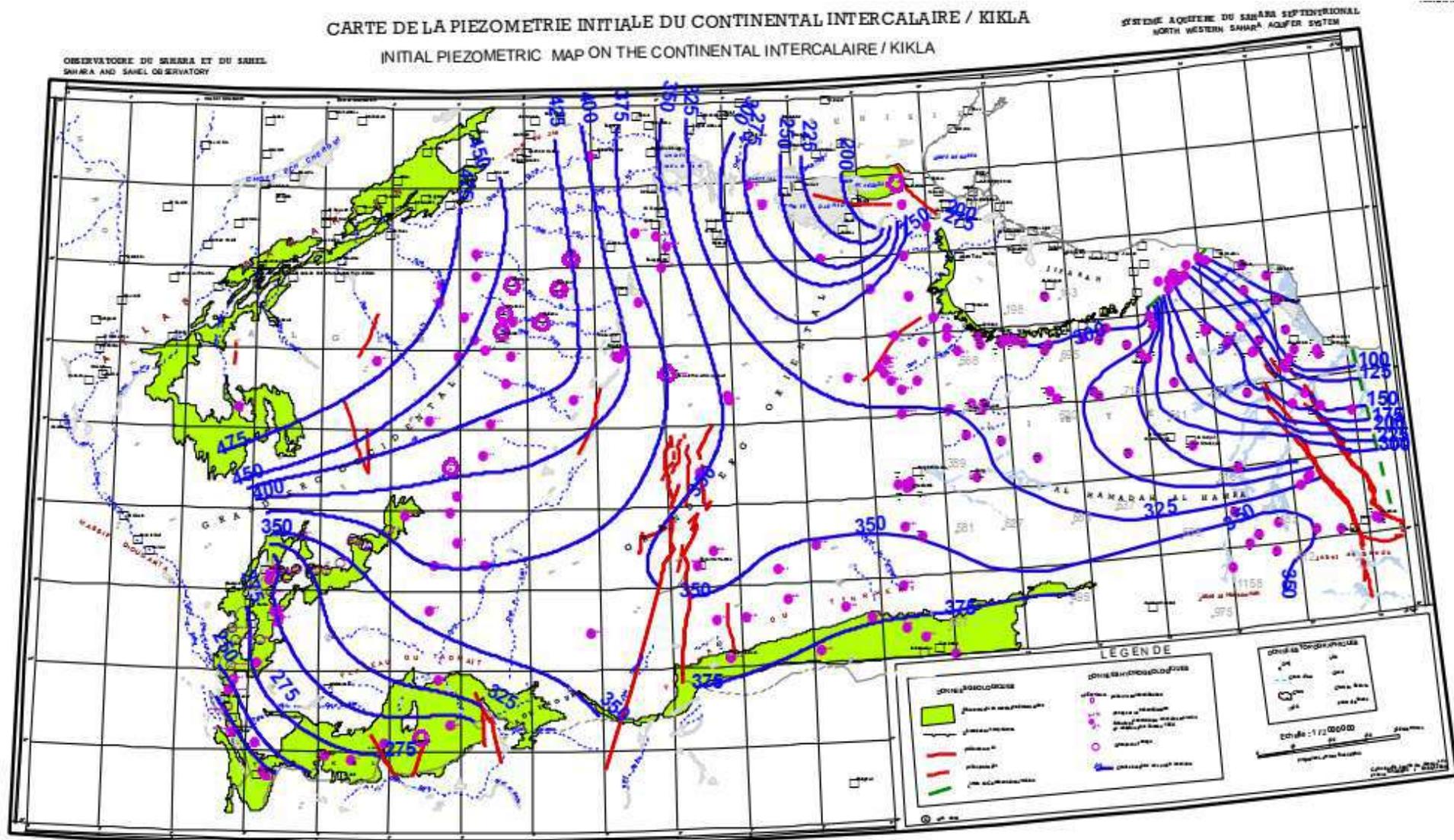


Figure 25: Carte piezometrique référence du (CI) (SASS/OSS 2003).

cependant ce piézométrie constitué par des zones d'alimentation désignées par le sens d'écoulement sont; le piémont sud atlasique du Nord-Ouest, le Tinrhert, le Dahar (Tunisie) et J. Nafusa (Libye), J. Hassawnah. Ainsi que, les zones exutoires, suggérées par les points d'aboutissement des lignes de courant dessinées par la carte piézométrique, qui sont :

- ✓ le Touat-Gourara et le Tidkelt,
- ✓ l'exutoire tunisien marqué par la faille d'El Hamma,
- ✓ l'exutoire libyen au niveau de Ain Tawargha.

En 1950, l'alimentation de la nappe équilibrait les prélèvements opérés essentiellement en Algérie. à partir de 1970. on constate que les réserves ont été entamées. L'examen de l'évolution des prélèvements montre une stabilité de l'exploitation, jusqu'au début des années 1950. Les prélèvements ont ensuite augmenté, en continu, avec le développement des forages profonds dans le bas Sahara. En plus la mobilisation s'effectue par des forages et des foggaras cependant, l'écoulement dirigé de l'ouest vers le centre puis le sud-ouest c'est-à-dire les zones évaporatoires qui jalonnent les régions du Touat, du Gourara et du Tidikelt et au Nord– Est, vers la zone côtière tunisienne par l'intermédiaire des failles géologiques d'El Hamma et de médénine ainsi que le sud-est l'écoulement converge vers la source de Ain Tawargha.

bien que faible vis-à-vis des réserves géologiques exploitables, l'alimentation de la nappe est évaluée à 268 Mm³/an elle se fait à partir des épandages des oueds, descendant de l'atlas saharien et de l'infiltration des pluies, d'années très humides, sur le grand erg occidental. Dans le bassin du grand erg oriental Cette nappe est caractérisée par un artésianisme fort surtout au centre du bassin zone de Oued Rhir.

II.3.1.4 Le Complexe Terminal (CT) :

Le terme de complexe terminal est désigné la première fois par (Bel et Cuche 1969; Bouselsal 2017), il constitué plusieurs nappes situées dans des formations géologiques différentes et plus récentes déposées au bas Sahara, qui se caractérisées par leur hétérogénéité lithologique contrepartie a été retenu car ces nappes font bien partie d'un même ensemble hydraulique. Cet ensemble du complexe terminal (CT) est moins étendu que la nappe (CI). Néanmoins, il couvre une grande partie du bassin oriental du Sahara septentrional, sur environ 350 000 km². Sa profondeur oscille entre 100 et plus de 500 m et son épaisseur, en moyen de 220 m.

Ces différentes nappes sont en liaison hydrodynamique, plus ou moins étroite, suivant les zones, il a été étudiées comme un réservoir unique. Il se compose de trois nappes principaux, d'âge et de lithologie différents, séparés par des formations semi-perméables ou imperméables. Ce sont :

- 1) **La nappe du sable (CTM) :** c'est la nappe du sable de Mio-Pliocène, couvrant en discordance, pratiquement la totalité de l'Erg oriental depuis la dorsale du M'zab à l'Ouest jusqu'au Dahar tunisien à l'Est. L'épaisseur de l'aquifère des sables du Mio-Pliocène est de 50 à 150 m en moyen. Elle est minimale dans la région de Hassi-Messaoud de 30 m et augmente vers le Sud Gassi Touil 300 m, et au Nord de la fosse sud atlasique où elle peut atteindre 600 m.
- 2) **La nappe du calcaire (CTS) :** C'est les formations carbonatées du Sénonien supérieur, ou au sens strict l'ensemble Sénono-Eocène s'étendent sur le bassin du grand erg oriental. L'Eocène inférieur ne couvre qu'au Nord d'une ligne Djamaa-Tozeur.
- 3) **La nappe calcaire et dolomies du Turonien (CTT) :** ce sont reliés hydrauliquement aux formations des sables du Mio-Pliocène par l'aquifère carbonatées précédentes. ces formations constitue une barre carbonatées d'épaisseur de 90 m, se caractérisée par une nappe d'eau salées peu exploiter.

A. L'extension de complexe terminal (CT) :

Les formations géologiques du complexe terminal du Sahara algérien se caractérisent par une disposition quasi horizontale ou des courbures à grand rayon, témoignant de l'absence de déformations majeures dues à la tectonique. La région peut être divisée en deux zones distinctes : le bassin occidental et le bassin oriental, séparés par l'anticlinal du M'zab. Dans le bassin occidental, la nappe du complexe terminal est située entre le M'zab, la vallée de la Saoura et la flexure atlasique. Elle est en lien étroit avec la nappe sous-jacente du continental intercalaire. Dans la majeure partie de ce bassin occidental, à l'exception d'une zone au sud de la flexure saharienne, il y a un manque de formations intermédiaires entre les sables du Mio-Pliocène et ceux du Continental Intercalaire. En revanche, dans le bassin oriental, la nappe du complexe terminal s'étend vers l'est en Tunisie et en Libye et est délimitée à l'ouest par le M'zab et au sud par les plateaux du Tademaït et du Tinrhert. Son comportement hydrodynamique est différent de celui de la nappe dans le bassin occidental.

Selon l'étude (BRL ingénierie, BNEDER, et Ecole des mines de Paris 2000), il est suggéré qu'il pourrait y avoir une continuité hydraulique entre le bassin occidental et le bassin oriental, spécifiquement dans la zone d'ennoiement de la dorsale du M'zab, de Ghardaïa à Laghouat. Cependant, cette continuité hydraulique ne signifie pas nécessairement que les formations géologiques du Mio-Pliocène sont spatialement continues. Les échanges d'eau pourraient potentiellement se produire à travers des fissures et des fractures dans les couches sous-jacentes au Mio-Pliocène.

B. Géométrie de Complexe Terminal (CT) :

Le substratum du complexe terminal (CT) correspond à la phase de montée des eaux marines du céno-manien, qui a recouvert la totalité du bassin saharien. Cette couche étanche est constituée d'une série d'argiles et de marnes, parfois accompagnée de zones riches en minéraux évaporitiques, pouvant atteindre des épaisseurs considérables, notamment dans le bassin du Grand Erg Oriental. Son épaisseur diminue à mesure que l'on progresse vers l'est en Libye, où elle ne mesure que quelques dizaines de mètres dans les régions de Buwayrat al Hasun et Tawurgha.

Le sommet du complexe terminal (CT) est formé de séries argileuses à faible perméabilité. Dans le bassin du Grand Erg occidental, ces séries du Mio-Pliocène constituent le sommet du complexe terminal, se trouvant directement au-dessus des formations du Crétacé inférieur. En revanche, dans le bassin oriental, les séries du Mio-Pliocène servent de toit au-dessus des nappes sous-jacentes du complexe terminal. Ceci s'applique aussi bien dans le sens strict (Mio-Pliocène et Sénono-Eocène) que dans une perspective plus large (Mio-Pliocène, Sénono-Eocène et Turonien).

De plus, vers l'est en Libye, plus précisément dans la région de Misratah, ce sont les argiles et les marnes du Miocène moyen et supérieur qui agissent comme la couche supérieure recouvrant les aquifères de sable situés en-dessous.

C. Carte piézométrique de référence Complexe Terminal (CT) :

La carte piézométrique de référence du complexe terminal (CT) figure 26 a été élaborée à l'aide du modèle SASS (OSS 2003), en se basant sur les mesures effectuées entre 1950 et 1956 pour la partie tunisio-algérienne et durant les années 1950-1970 pour la partie libyenne. Cette carte présente la répartition des niveaux piézométriques dans la région saharienne et permet de distinguer deux principaux sous-bassins hydrogéologiques :

- ✓ **Le Grand Erg Oriental** : Ce secteur joue un rôle essentiel en tant que bassin hydrographique du "Bas Sahara". Il agit à la fois comme une zone de déversement pour la nappe et comme une zone de captage grâce aux sources et aux forages.
- ✓ **La Hamada el Hamra** : Cette région agit comme une zone d'alimentation pour un vaste réservoir souterrain qui n'est actuellement pas approvisionné en eau de manière significative. Sa vidange lente permet un écoulement continu hors de la zone.

La nappe du complexe terminal, tout comme le Continental Intercalaire, présente un écoulement allant du Sud vers le Nord. Cet écoulement converge vers les zones d'alimentation des chotts Merouane et Melghrir, ainsi que vers la sortie souterraine du golfe de Gabes. L'alimentation en eau est relativement modeste par rapport aux réserves géologiques

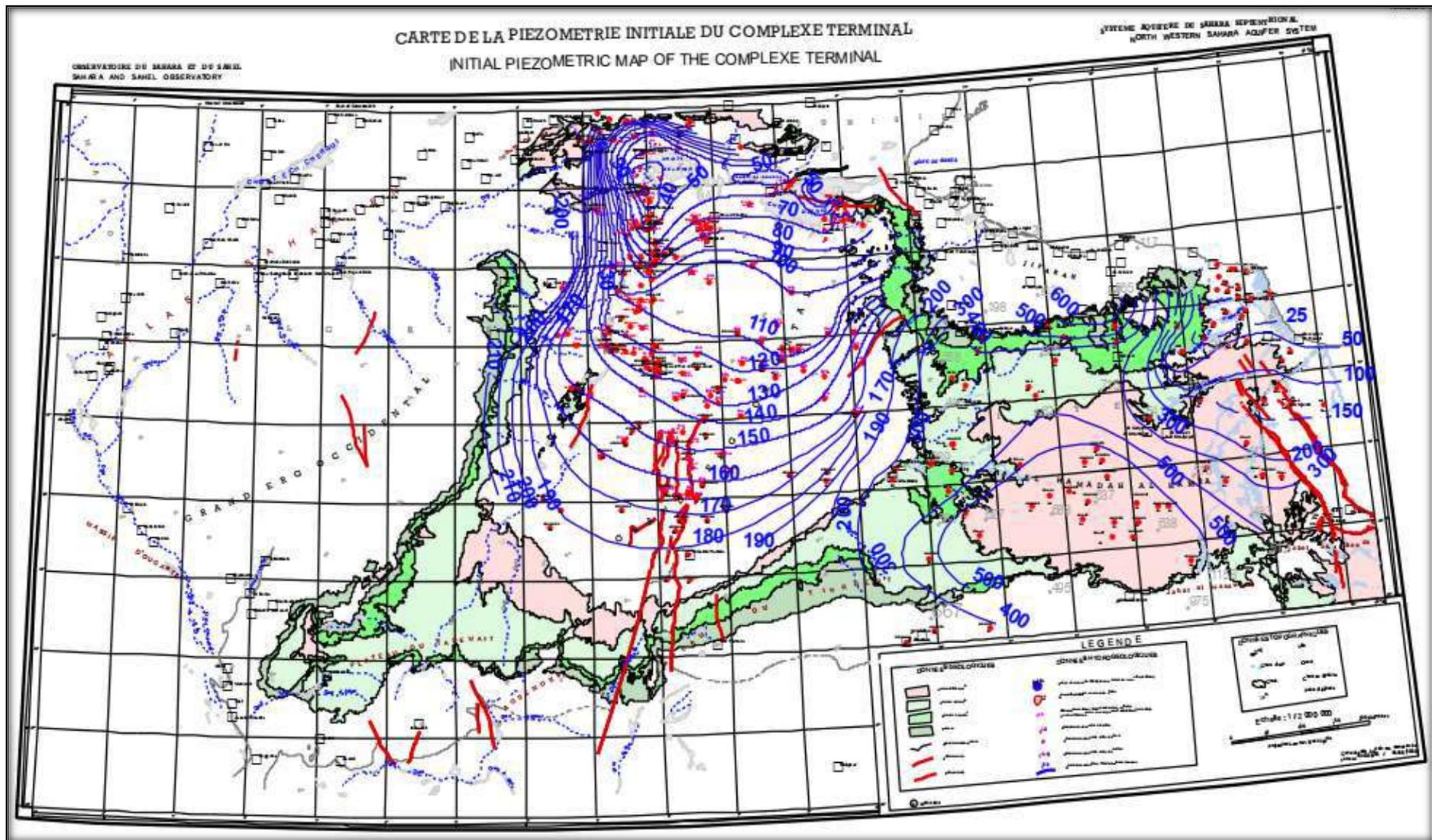


Figure 26: Carte piezometrique référence du (CT) (SASS/OSS 2003)

exploitables, s'élevant à environ 575,4 Mm³/an. Cette alimentation provient des zones perméables en surface, par infiltration des eaux de ruissellement apportées par les oueds qui descendent des reliefs de l'Atlas Saharien et de la Dorsale du M'zab. De plus, une contribution significative provient de l'infiltration directe des précipitations exceptionnelles dans le Grand Erg Oriental, qui repose directement sur les terrains perméables du complexe terminal.

II.3.2 Hydrogéologie local :

Dans la région étudiée, le Continental Intercalaire englobe les trois horizons lithostratigraphiques du Barrémien, de l'Aptien et de l'Albien avec épaisseur plus de 400 m. Cependant, pour les hydrogéologues, la définition précise du réservoir du Continental Intercalaire se restreint aux formations authentiquement continentales, c'est-à-dire aux horizons de sable et d'argile gréseuse du Crétacé inférieur (Cornet André 1964). Ainsi, dans cette zone, ce qui est désigné comme la nappe albienne correspond en réalité au Continental Intercalaire.

Le toit de cette nappe est formé par le Cénomaniens, une formation imperméable composée d'anhydrite, de marne et de dolomie, ayant une épaisseur moyenne de 140 m. La profondeur augmente du Sud vers le Nord, allant de Gassi Touil à Nouvelle ville Hassi Messaoud, atteignant 800-1100 m, et vers l'Est au niveau de Ain Romana, elle est d'environ 550 m. Cependant, le substratum est constitué par le Malm, avec une profondeur de 1600-1800 m, et cette nappe se caractérise par une épaisseur moyenne utile de 375 m.

La carte piézométrique de référence à l'échelle locale figure 25 montre que cette partie correspond à la zone de transition entre le paiement sud atlasique Nord Ouest avec la ligne de courant divergente vers le sud-est, et la zone d'exutoire des chotts au nord-est, avec des courbes isohypses convergentes.

Par ailleurs, dans la zone d'étude, la nappe du complexe terminal est libre en fonction de l'épaisseur de la formation Plio-Quaternaire. La porosité dépend de la lithologie, étant estimée à 30 % dans les sables du Mio-Pliocène et à 20 % dans les calcaires du Sénonien et de l'Eocène supérieur.

Le Sénonien, l'Eocène et le Mio-Pliocène, ainsi que le Quaternaire, représentent les formations les plus récentes déposées au Sahara. Leur hétérogénéité lithologique et leur caractéristique spécifique les ont regroupées sous le terme de "Complexe", en opposition à l'ensemble du Crétacé inférieur appelé le "Continental Intercalaire". Il est important de noter que localement, le Turonien est inclus dans l'ensemble "Terminal".

Les coupes hydrogéologiques illustrées figure 27 et 28 montrent que l'aquifère du Complexe Terminal, dans la région de Hassi Messaoud, est constitué de trois formations distinctes :

- 1) **La nappe du Mio-Pliocène** : principalement constituée de sable mais contenant également des proportions de calcaire et d'argile, présente une épaisseur moyenne de 230 m au cœur de la région. En se déplaçant vers le nord, près de la nouvelle ville de Hassi Messaoud, cette épaisseur s'accroît à 250 m, tandis que vers le sud, dans la zone de Gassi Touil, elle atteint plus de 300 m.
- 2) **La nappe du Sénono-Eocène carbonaté** : constituée de calcaire dolomitique d'une épaisseur moyenne de 220 m au centre de la zone d'étude, descendant à 150 m dans la zone de Gassi Touil vers le sud, puis augmentant vers le nord, atteignant près 450 m de la nouvelle ville de Hassi Messaoud. Cette nappe dans cette partie dernière est divisée en deux horizons, l'Éocène supérieur et le Sénonien supérieur, séparés par un écran semi-perméable d'éocène moyen de calcaire marneux.
- 3) **La nappe du Turonien carbonaté dolomitique** : ayant une épaisseur moyenne de 90 m et une profondeur de 890 m au centre de la zone d'étude. Cette profondeur diminue vers les périphéries, atteignant environ 690 m au sud de Gassi Touil et environ 500 m vers l'est au niveau de Ain Romana. Cette nappe est captive et séparée deux nappes sous-jacentes par la formation lagunaire du Sénonien, agissant comme une barrière imperméable entre elle et les deux nappes supérieures. Celles-ci semblent toutefois être en continuité hydraulique.

ERE	AGE	ETAGE	e(m)	Pf(m)	Log	Description lithologique	Aspect Hydrogéologique	
CENOZOIQUE	Néogène	Mio-Pliocène	230	230		Sable blanc à translucide avec présence de calcaire crayeux et argile brun rouge	Nappe du Mio-Pliocène	
	Pléocène	Eocène	120	350		Calcaire dolomitique à silex	Nappe du Sénono-Eocène	
MESOZOIQUE	CRETACE	Sénonien	Carbonaté	100	450		calcaire dolomie	Imperméable
			Anhydritique	220	670		Anhydrite blanche massive et calcaire et dolomie	
			Salifère	130	800		Sel blanche à translucide. Passées	
			Turonien	90	890		Calcaire dolomitique présence d'argile	Nappe du Turonien
			Cénomanién	140	1030		Anhydrite marne et dolomie	Imperméable
			Albien	350	1380		Grès argile silteuse	Nappe Albien
			Aptien	25	1405		Dolomie cristalline	Nappe Aptien
			Barémien	280	1685		Argile grès et dolomie	Nappe Barémien

Figure 27: Coupe hydrogéologique de la région Hassi Messaoud.

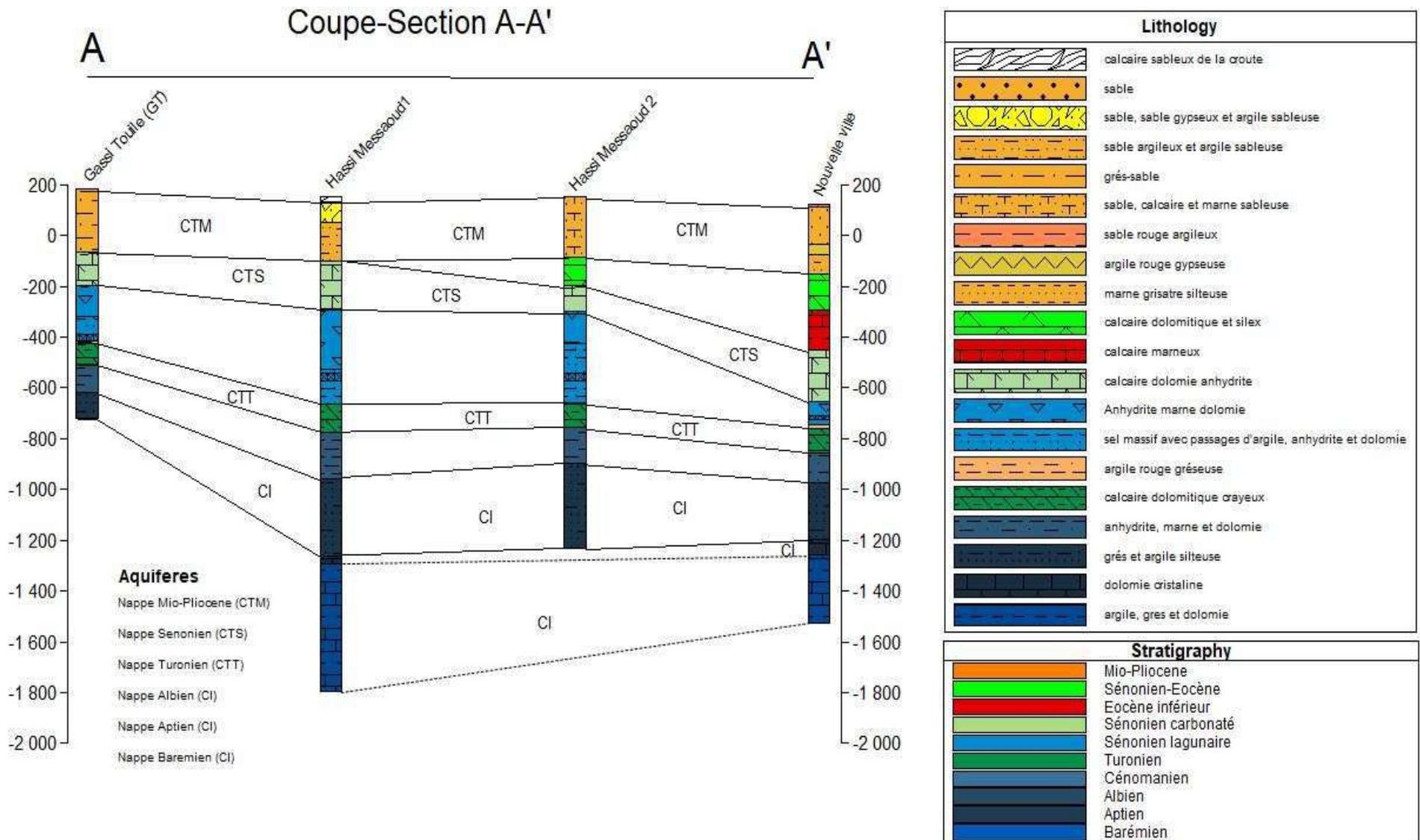


Figure 28: Coupe hydrogéologique transversal de Hassi Messaoud (AA').

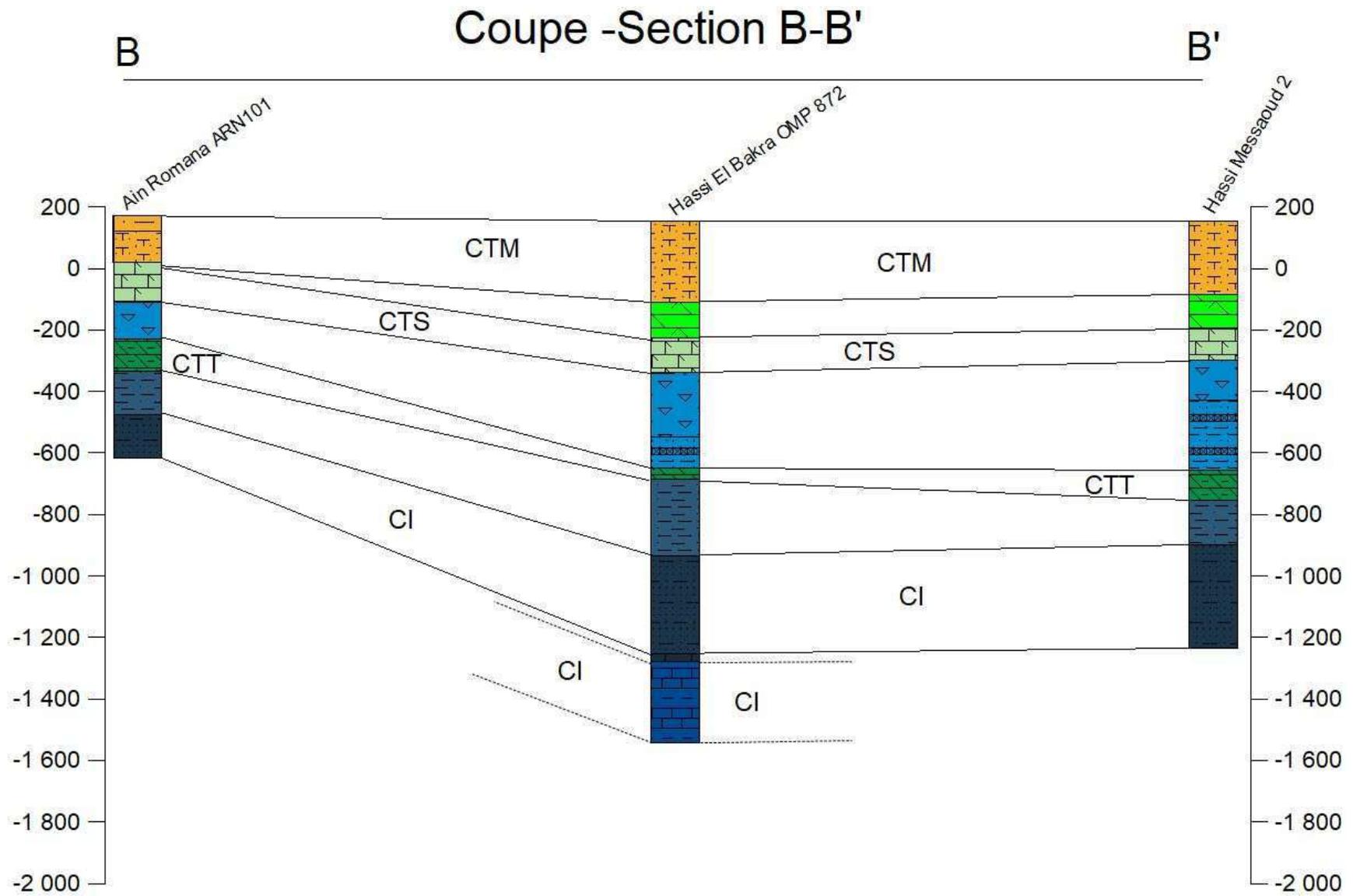


Figure 29 : Coupe hydrogéologique transversal de Hassi Messaoud (BB').

II.3.3 Effet de la structure géologique sur les aquifères CI et CT :

Au nord de la zone d'étude la subsidence qui a accompagné la sédimentation plio-quaternaire dans la gouttière Oued Maya-Oued Rhir. Ces accidents jouent un rôle dans les écoulements souterrains, en facilitant les échanges verticaux entre le Continental Intercalaire et les formations du Crétacé supérieur. Ainsi que, Au sud de Cette zone le prolongement vers le Nord des accidents méridiens de la dorsale d'Amguid-El Biod qui se prolongent jusqu'à Rhourde El Baguel. Ces accidents à forts rejets découpent et compartimentent peut être localement le réservoir dans la direction est-ouest, mais il reste de toute façon connecté au réservoir principal vers le nord. Il est sûr que ces failles sont à l'origine de fuites verticales vers la nappe du Continental Terminal et le Turonien (SASS/OSS 2003).

II.3.4 Les paramètres hydrodynamique :

Dans la zone d'étude l'ensemble du systèmes aquifères (CI) est captif par contre le (CT) est libre, ainsi que la configuration structurale fait que l'hydrodynamique est largement commandée à moyen et long termes, par l'impact des échanges verticaux (continuité hydrodynamique), que ce soit quantitatif (vitesse de circulation de l'eau) et qualitatif (échange chimique) entre les différents niveaux aquifères. Pour déterminer les paramètres hydrodynamique d'abord, ont été effectuer les essais de pompages à courte durrer ou bien l'essais de puits premiere fois pour déterminer le debits spécifique ensuite on calculer les parametre hydrodynamique la transmisvite (T) en m^2/s et le coefficient d'emagisenement (S) en m^3 . Dans cette étude ont été trouver 02 forages dans le cite Nouvelle ville de Hassi Messaoud pour déffirent niveau de nappe Senonien (CTS) et la nappe plus profonde Albien (CI).

II.3.4.1 La nappe Albien (CI) :

Dans le forage F04 Albien au niveau de Nouvelle ville de Hassi Messaoud en 2020, ils ont été réalisés un essai d'une durée de 03 heurs a été effectué pour déterminer les caractéristiques hydrauliques du forage, suivi d'une observation de remontée de quatre 04 heures. Les mésure obtenu sont comme suite :

La profondeur finale de forage est de 1412 m.

La pression statique est de l'ordre de 12 bars, équivaut à un niveau d'eau de plus 122 m au-dessus du sol.

Le débit de forage $Q = 127$ l/s. donc le forage est caracterise par le jahaissante en cas d'artésien.

La transmisivité selon la formule de Theis $T = 0,189xQ\log(t)/s$ $T = 0,82*10^{-2} m^2/s$

Par opposition, on retrouve l'historique en anné de base 2050 des études antérieurs (UNESCO 1972; OSS 2003) la transmissivité moyenne à l'échelle local est environ $2 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$.

II.3.4.2 La nappe du Sénonien (CTS) :

Dans le forage F04-MP Senonien au niveau de Nouvelle ville de Hassi Messaoud en 2020, ils ont été réalisés l'essai de pompage définitif a duré 72 heures avec un débit constant d'ordre 43 l/s, et en fin suivi l'observation de la remontée du niveau dynamique de la nappe aquifère pendant 24 heures.

l'interprétation des résultats des essais de pompage, on a utilisé la méthode d'approximatif Jacob. $s = (0,183 Q / T) \cdot \text{Log} [(2,25 Tt)/sX^2]$

1) Courbe de la Descente:

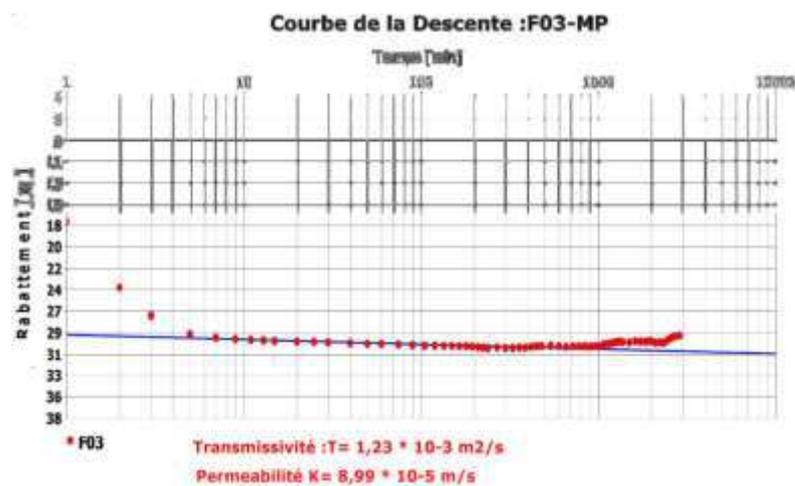


Figure 30: Courbe descente essai de pompage (Tassili 2017).

2) Courbe de la Remontée:

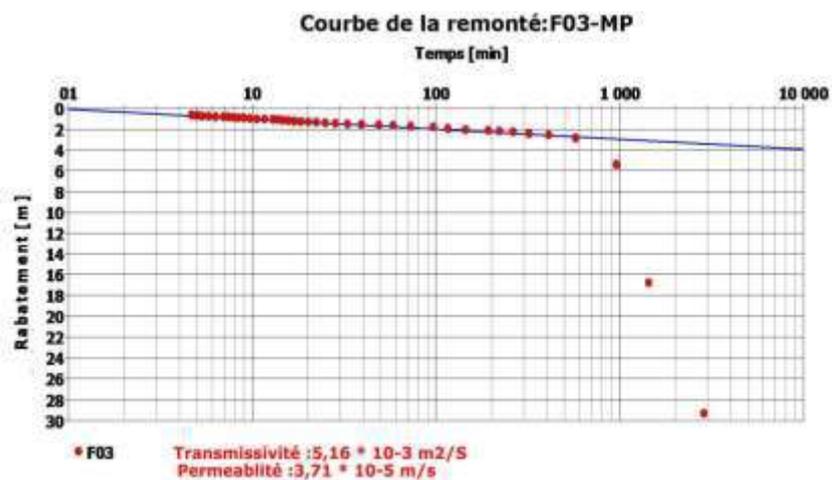


Figure 31: Courbe descente essai de pompage (Tassili 2017)

3) Rayon d'influence :

Pour un temps de pompage de 24 heures et avec un débit de 43 l/s, le rayon d'influence sera égale à $R = 1,5 \sqrt{(Tt / S)} \rightarrow R = 1238 \text{ m}$.

II.4 Conclusion :

La zone d'étude est géologiquement bien explorée grâce aux affleurements rocheux en périphérie et à des forages en profondeur à des fins d'exploration pétrolière et hydraulique. Sa pertinence est soulignée par la présence d'un important gisement pétrolier du Cambrien, atteignant 3500 m de profondeur. Cette zone s'étend sur environ 2200 km² et occupe la province triasique, caractérisée par des couches épaisses du Trias. Son intérêt pétrolier découle d'une structure géologique marquante, un vaste dôme anticlinal s'étirant du Sud-ouest au Nord-est, ayant maintenu une séparation stratigraphique pendant plus de 200 millions d'années. Située dans le Sahara septentrional au sein du vaste Erg Oriental, cette zone détient d'importantes réserves d'eau s'étendant du Trias au sommet du tertiaire continental. Ce système hydrique résulte des dépôts continentaux sur la plateforme saharienne, avec une distinction entre deux nappes d'eau douce significatives : le Continental Intercalaire (CI) et le Complexe Terminal (CT). La limite du Système Aquifère Saharien Septentrional (SASS) est établie en fonction de l'extension de la nappe d'eau douce la plus étendue dans le bassin, connue sous le nom de Continental Intercalaire (CI). Cette délimitation repose sur les affleurements géologiques ainsi que sur les données issues des forages pétroliers et hydrauliques, tout en tenant compte de la qualité de l'eau douce. Cependant, ces réserves d'eau douce sont confrontées à des problèmes bien identifiés tels que la surexploitation, la dégradation de la qualité et une gestion inadéquate. Dans la zone d'étude, la nappe du Continental Intercalaire (CI) se trouve piégée à une profondeur moyenne de 1000 m avec une épaisseur utile de 375 m. En revanche, la nappe du Complexe Terminal (CT) est libre en fonction de la couverture Plio-Quaternaire et se divise en trois horizons distincts : le sable du Mio-Pliocène (CTM), le carbonate du Sénonien (CTS) et la dolomie du Turonien (CTT). Les deux premières nappes présentent une épaisseur moyenne de 350 m et une bonne connectivité hydrodynamique. La dernière nappe est piégée à une profondeur moyenne de 890 m avec une épaisseur de 90 m, séparée des deux nappes sous-jacentes par une formation lagunaire imperméable du Sénonien. Cependant, il semble y avoir une continuité hydraulique entre ces différentes nappes. L'impact qualitatif des eaux souterraines dans cette zone est influencé par la subsidence Plio-Quaternaire dans la dépression Oued Maya-Oued Rhir au nord, ainsi que par les activités tectoniques à forte déformation d'Amguid-El Biod au sud. Ainsi, afin de mieux comprendre la composition chimique des eaux souterraines, une analyse des caractéristiques géochimiques est nécessaire.

CHAPITRE III
HYDROCHIMIE

III. Hydrochimie

III.5 Introduction :

L'hydrochimie des eaux souterraines est une approche hydrogéologique qui vise à analyser la composition chimique des différentes strates aquifères. Cette composition chimique des eaux souterraines est principalement influencée par les caractéristiques géologiques des formations environnantes, les mouvements des nappes phréatiques, ainsi que les méthodes d'exploitation. De plus, les conditions climatiques jouent un rôle significatif, en particulier dans le cas des nappes peu profondes telles que la nappe souterraine de faible profondeur (CTM), qui est intimement liée hydrauliquement à la nappe phréatique, elle-même sensible aux variations météorologiques. Cette étude se focalise sur l'évaluation de la qualité physique et chimique des eaux souterraines, ainsi que sur les processus géochimiques qui les affectent, au sein des systèmes CT (CTM, CTS) et CI. Son objectif principal est de fournir des informations pertinentes aux décideurs afin de permettre une gestion plus optimale de ces précieuses ressources.

III.6 Echantillonnage et mode d'analyse :

Les points d'eau souterraine choisis dans la région de Hassi Messaoud ont été sélectionnés de manière à assurer une répartition aussi homogène que possible. Cependant, dans certaines zones, il n'a pas été possible d'effectuer des prélèvements, soit en raison de l'absence de puits captant les aquifères étudiés, soit en raison de la difficulté d'accès à certains forages.

Dans le cadre de cette étude, un total de 38 échantillons a été collecté pour l'analyse des différents aquifères (CI) et (CT). La répartition de ces échantillons est clairement représentée sur la figure 32 de la carte d'échantillonnage. Le nombre de forages sélectionnés est réparti comme suit : 14 forages pour l'aquifère CT provenant de la nappe Sénonien (CTS), 12 forages pour l'aquifère (CT) issu de la nappe Mio-Pliocène (CTM), et 12 forages pour l'aquifère CI.

Les mesures des paramètres physico-chimiques tels que la température, le pH et la conductivité ont été effectuées sur place à l'aide d'un appareil de mesure multiparamètre portable. Les échantillons ont été prélevés à l'aide de flacons en polyéthylène, puis filtrés et acidifiés avant d'être soumis à des analyses en laboratoire. Les analyses ont révélé que les taux de calcium, de magnésium et de chlore ont été déterminés par titrimétrie, tandis que le sulfate a été mesuré par photolorimétrie. De plus, le sodium et le potassium ont été quantifiés par spectrométrie d'absorption atomique à flamme. Les résultats des analyses physico-chimiques indiquent une balance ionique équilibrée, avec une marge d'erreur de $\pm 5\%$.

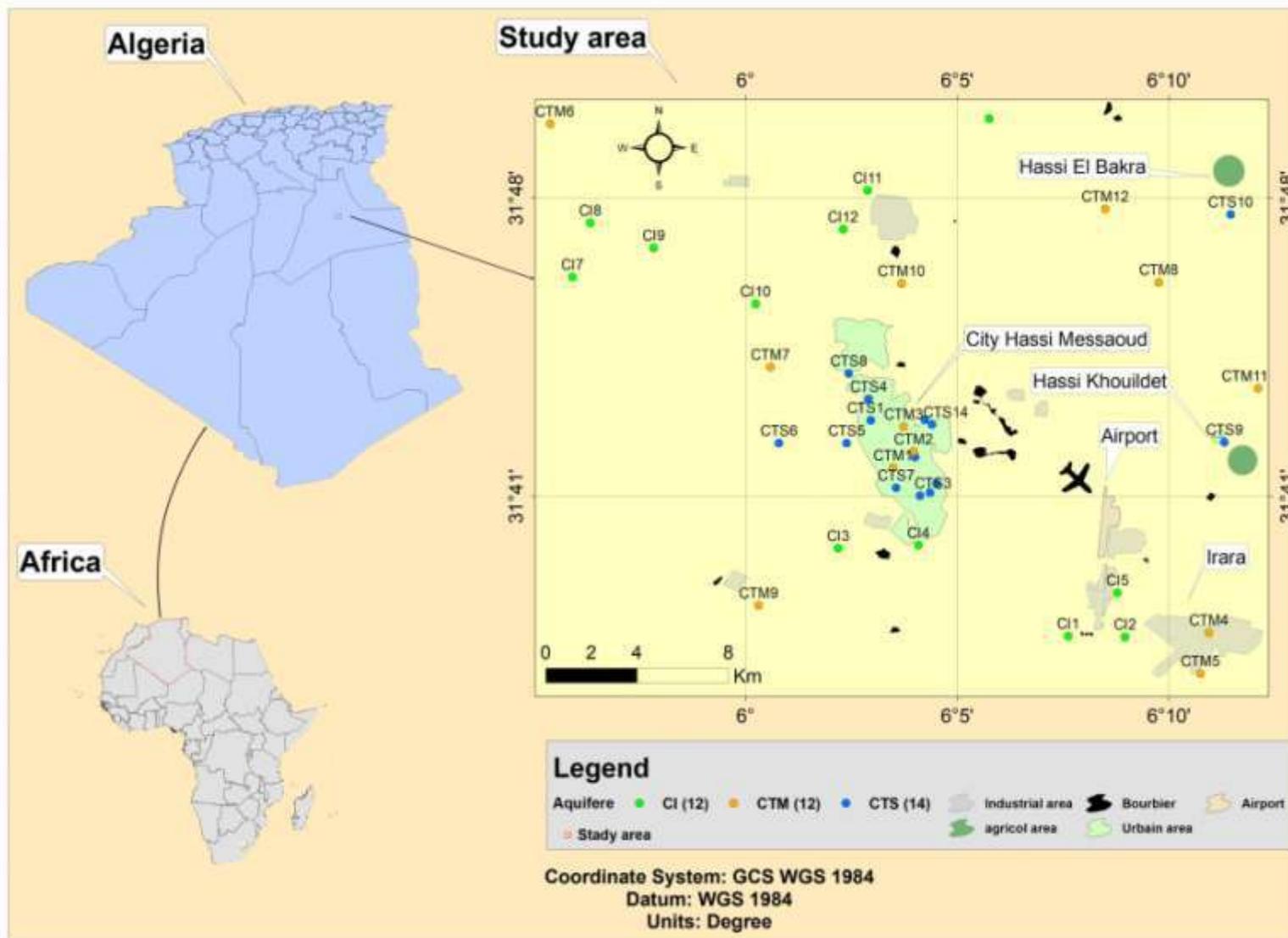


Figure 32 : carte d'emplacement d'echontillonge.

III.7 Chimie des eaux

III.7.1 Paramètres physico-chimiques :

Les paramètres physico-chimiques, qui ont été méticuleusement évalués au cours de cette étude hydrochimique, revêtent une importance cruciale dans la compréhension approfondie des caractéristiques fondamentales des eaux souterraines. Ces paramètres jouent un rôle essentiel en permettant une identification précise des zones privilégiées d'alimentation en eau, de risques potentiels de contamination, et offrent également des indications sur les variations liées à la nature géologique des formations aquifères.

III.1.1.1 La Température

La température symbolise la quantité de chaleur contenue dans un liquide, en ce cas précis, dans les eaux souterraines. Elle est mesurée en degrés Celsius (°C) et constitue une indication directe de l'agitation thermique des molécules au sein de l'eau. Dans le contexte des eaux souterraines, la température revêt une importance primordiale en fournissant des indications précieuses sur les conditions environnementales en cours ainsi que sur les processus hydrogéologiques qui s'y déroulent. Elle peut influencer la solubilité des minéraux, la cadence des réactions chimiques, la diversité biologique aquatique et les échanges thermiques avec les formations géologiques environnantes.

La source de la température dans les eaux souterraines est multifactorielle, dépendant de paramètres tels que la température ambiante, la profondeur de l'aquifère, la géothermie locale et les interactions avec les eaux de surface. Les eaux souterraines ont tendance à refléter en partie les variations saisonnières de la température extérieure. Les valeurs de température des eaux souterraines peuvent varier considérablement en fonction des caractéristiques géographiques et environnementales. Généralement, dans les aquifères peu profonds, les températures des eaux souterraines oscillent entre quelques degrés Celsius et environ 25-30 °C. Cependant, à mesure que la profondeur augmente, ces températures peuvent grimper, atteignant parfois des seuils de l'ordre de 50 °C, voire davantage, dans les régions géothermiquement actives. Les valeurs extrêmes sont souvent liées au gradient géothermique (Bouselsal et al. 2014).

Il est important de noter que les valeurs limites spécifiques peuvent fluctuer selon la région et les caractéristiques géologiques locales, ainsi que sous l'influence des activités humaines et des facteurs environnementaux. Les fluctuations de température dans les eaux souterraines peuvent avoir des répercussions significatives sur la qualité de l'eau, la biodiversité et la gestion durable des ressources en eau souterraine.

Dans la région de Hassi Messaoud, les valeurs de température des eaux souterraines oscillent entre 25 et 30 °C pour les eaux provenant des aquifères peu profonds (CTS et CTM). En revanche, les eaux provenant de l'aquifère profond (CI) affichent des températures plus élevées, variant entre 50 et 55 °C. La surveillance de l'évolution de la température des eaux souterraines dépend étroitement de la profondeur.

III.1.1.2 Le Potential hydrogène (pH) :

Le pH se réfère à la mesure de l'acidité ou de la basicité d'une solution, dans ce cas précis, des eaux souterraines. Cette échelle logarithmique s'étend de 0 à 14, où 7 est considéré comme neutre. Une valeur inférieure à 7 indique une solution acide, tandis qu'une valeur supérieure à 7 indique une solution basique. Dans le contexte des eaux souterraines, le pH est un indicateur de premier ordre de l'équilibre chimique et de la qualité de l'eau. Il exerce une influence sur la solubilité des minéraux, les réactions chimiques, la disponibilité des nutriments pour les organismes aquatiques et la toxicité potentielle de certaines substances. Un pH inadéquat peut perturber l'écosystème aquatique et affecter la sécurité sanitaire de l'eau.

Les variations de pH dans les eaux souterraines découlent principalement des interactions avec les roches et les minéraux du sous-sol. Les eaux ayant été en contact avec des formations rocheuses acides présentent généralement un pH plus bas, tandis que celles en interaction avec des matériaux basiques afficheront un pH plus élevé. Les activités humaines, notamment l'agriculture, l'industrie et le rejet de produits chimiques, peuvent aussi avoir une incidence sur le pH des eaux souterraines. Concernant les limites des valeurs de pH dans la nature, les eaux souterraines tendent à présenter des pH généralement compris entre 6 et 8. Néanmoins, il est possible que ces valeurs sortent de cette fourchette en fonction des caractéristiques géologiques locales et des interactions chimiques spécifiques. Des valeurs extrêmes hors de cet intervalle peuvent signaler des conditions inhabituelles, telles que la présence de sources acides ou alcalines, ce qui peut nécessiter une attention spéciale pour la gestion et la protection des ressources en eau souterraine.

En analysant spécifiquement les eaux de la région de Hassi Messaoud figure 33, les valeurs de pH varient entre 7,6 et 7,85 pour les eaux provenant des aquifères peu profonds (CTS), tandis que les eaux des aquifères superficiels (CTM) ont des valeurs de pH se situant entre 7 et 7,8. De plus, les eaux de l'aquifère profond (CI) affichent des pH compris entre 7 et 7,8. Globalement, ces valeurs indiquent que les eaux CI et CT sont légèrement alcalines.

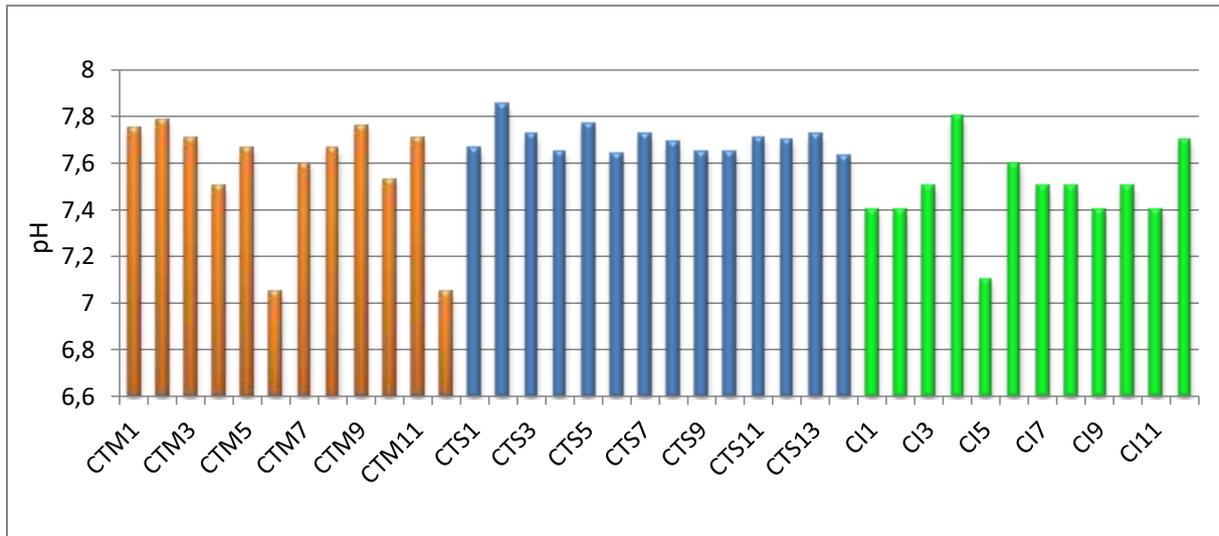


Figure 33: le Potential d'hydrogène des eaux souterraines (CI) et (CT).

III.1.1.3 La conductivité électrique (CE)

La conductivité électrique, souvent notée CE, est une mesure de la capacité d'une solution à conduire l'électricité. Son niveau est principalement influencé par la présence d'ions dissous dans l'eau, comprenant notamment des ions minéraux et des électrolytes. La conductivité électrique est généralement exprimée en microsiemens par centimètre ($\mu\text{S}/\text{cm}$) ou en millisiemens par centimètre (mS/cm). Évaluer la conductivité électrique des eaux souterraines est d'une importance primordiale pour quantifier la concentration totale d'ions dissous dans l'eau. Cela permet d'obtenir des indications sur la salinité, la minéralisation et la qualité globale de l'eau. Les fluctuations de la conductivité peuvent révéler des changements hydrogéologiques, comme l'influence de l'eau de mer, la présence de polluants ou les processus de dissolution minérale.

La conductivité électrique des eaux souterraines dépend en grande partie de la quantité et du type d'ions dissous présents dans l'eau. Ces ions proviennent de plusieurs sources, incluant la dissolution des minéraux dans les formations géologiques traversées par l'eau souterraine, les interactions avec les roches et les sols, ainsi que les apports issus d'activités humaines telles que l'agriculture, l'industrie et les déversements de substances chimiques.

En ce qui concerne les bornes de valeurs dans la nature, la conductivité électrique des eaux souterraines peut présenter une variabilité significative en fonction des conditions géologiques, de la salinité locale et des sources d'ions dissous. Les valeurs habituelles de conductivité électrique pour les eaux souterraines s'étendent de quelques dizaines de $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour des eaux peu minéralisées, à plusieurs milliers de mS/cm pour des eaux fortement minéralisées. Des valeurs exceptionnellement élevées peuvent signaler la présence d'eau de mer ou de sources géothermiques riches en minéraux. Inversement, des valeurs anormalement

faibles peuvent être liées à des zones où les ions dissous ont été fortement réduits par des mécanismes tels que l'adsorption sur des minéraux ou la filtration naturelle.

Dans le contexte spécifique des eaux de la région de Hassi Messaoud figure 34, les valeurs de conductivité électrique (CE) oscillent entre 2022 et 3711 mS/cm pour les eaux provenant des aquifères peu profonds (CTS), alors qu'elles varient de 2248 à 5969 mS/cm pour les eaux des aquifères superficiels (CTM). Pour les eaux de l'aquifère profond (CI), la gamme est de 2893 à 5528 mS/cm. Ces données indiquent une forte salinité pour les eaux CI et CT.

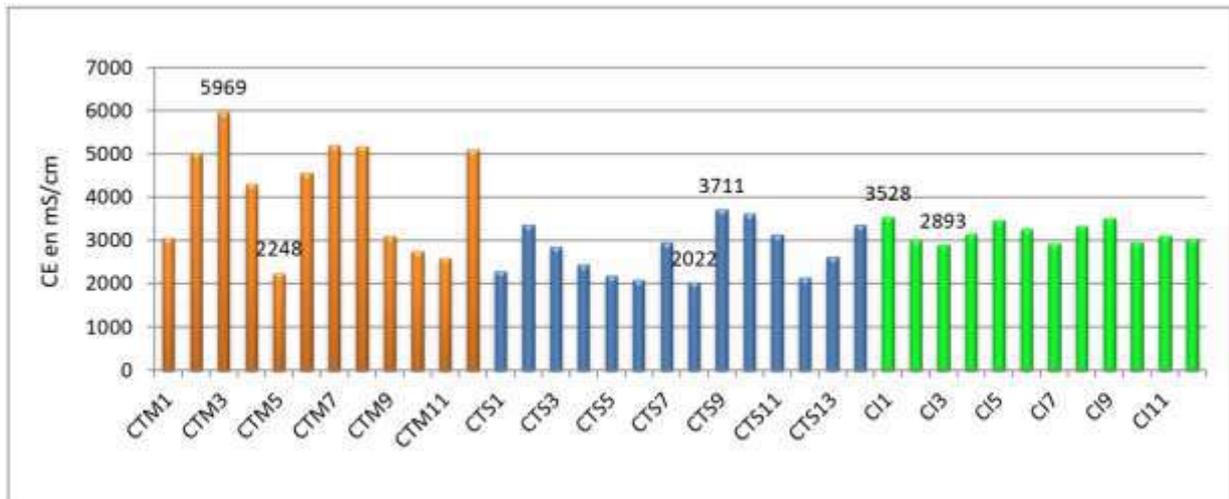


Figure 34: la conductivité électrique (CE) des eaux souterraines (CI) et (CT).

III.1.1.4 La dureté totale (TH) :

La dureté totale, également désignée sous le terme de titre hydrométrique (TH), constitue une mesure de la concentration globale des ions de calcium (Ca^{2+}) et de magnésium (Mg^{2+}) dissous dans les eaux souterraines. Cette grandeur est généralement exprimée en milligrammes équivalents de carbonate de calcium par litre (mg eq/L) ou en degrés français ($^{\circ}\text{F}$). La dureté totale fournit un indice quant à la propension de l'eau à générer des dépôts calcaires et peut engendrer des répercussions sur la qualité de l'eau potable ainsi que sur les procédés industriels. L'importance de la dureté totale réside dans sa capacité à signaler la tendance de l'eau à engendrer des problèmes de dépôts de calcaire dans les réseaux de distribution d'eau et les équipements industriels (Bouselsal et Johnbosco 2024). Un niveau élevé de dureté peut donner lieu à la formation de tartre, diminuer l'efficacité d'appareils tels que les chauffe-eau et les chaudières, et même influencer sur la qualité gustative de l'eau potable ainsi que sur la formation de mousse dans les produits de lavage.

Les ions calcium et magnésium proviennent de la dissolution de minéraux comme la calcite (CaCO_3) et la dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) présents dans les strates géologiques traversées par les eaux souterraines. La composition géologique des aquifères et les interactions avec les

formations rocheuses et les sols jouent un rôle déterminant dans la mesure de la dureté totale de l'eau. Quant aux limites observées dans la nature, les valeurs de dureté totale varient en fonction des caractéristiques géologiques locales. De manière générale, les eaux souterraines affichent une dureté totale s'étalant de quelques degrés français (°F) à plusieurs dizaines, voire centaines, de degrés français, selon le degré de minéralisation. Les normes de qualité de l'eau potable établissent fréquemment des seuils pour la dureté totale, garantissant une eau adéquate à la consommation humaine et aux usages industriels.

Pour ce qui concerne spécifiquement les eaux de la région de Hassi Messaoud figure 35, les valeurs de dureté totale (TH) sont particulièrement élevées pour les eaux provenant des aquifères superficiels (CTM), oscillant entre 530 et 2010 °F, dépassant celles des eaux de l'aquifère profond (CI) et des eaux de l'aquifère peu profond (CTS). De manière générale, tant les eaux CI que CT présentent une dureté substantielle.

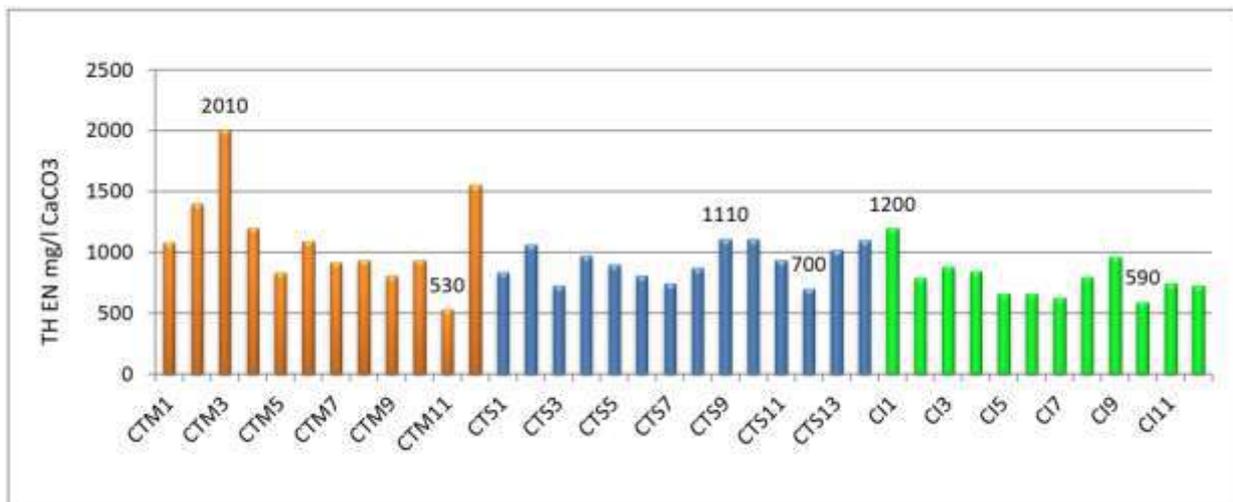


Figure 35: la dureté totale (TH) des eaux souterraines (CI) et (CT).

III.1.1.5 Le TDS :

Les solides dissous totaux (TDS) correspondent à la concentration globale des substances solides qui sont en solution, dans ce cas précis, dans les eaux souterraines. Ces substances incluent divers composés tels que des sels minéraux, des métaux, des ions, des nutriments et autres éléments dissous. La mesure des TDS est généralement exprimée en milligrammes par litre (mg/L) ou en parties par million (ppm). Cette mesure revêt une importance cruciale pour évaluer le degré de minéralisation des eaux souterraines. Elle permet d'appréhender la quantité de substances dissoutes dans l'eau, ce qui peut avoir des conséquences sur la qualité de l'eau potable, la santé des écosystèmes aquatiques, ainsi que sur les usages industriels et agricoles. Les niveaux élevés de TDS peuvent impacter le goût de l'eau, la formation de dépôts et la capacité de l'eau à conduire l'électricité.

Origines dans les eaux : Les TDS résultent principalement de la dissolution des minéraux présents dans les formations géologiques traversées par les eaux souterraines. Ces sources incluent également les apports en provenance de l'interaction avec les roches, les sols, les sédiments et les eaux de surface, ainsi que les contributions d'origine humaine provenant des activités industrielles et agricoles.

Limites trouvées dans la nature : Les niveaux de TDS varient considérablement en fonction des caractéristiques géologiques locales et des sources potentielles de contamination. Les eaux souterraines peu minéralisées peuvent présenter des TDS de quelques dizaines de mg/L, tandis que les eaux fortement minéralisées, telles que les eaux salines ou géothermiques, peuvent afficher des TDS de plusieurs milliers de mg/L, voire davantage. Les seuils acceptables de TDS dépendent de l'usage prévu de l'eau, des normes de qualité pour l'eau potable et des exigences environnementales.

En examinant spécifiquement les eaux de la région de Hassi Messaoud, les valeurs de TDS sont particulièrement élevées pour les eaux provenant des aquifères superficiels (CTM), variant entre 1531 et 4326 mg/L. Ces valeurs dépassent celles des eaux de l'aquifère peu profond (CTS) avec une fourchette de 1314 à 2586 mg/L, ainsi que les eaux de l'aquifère profond (CI), oscillant entre 1947 et 2486 mg/L. Ces résultats montrent une variation substantielle, indiquant une forte minéralisation des eaux CI et CT.

L'étude de la répartition spatiale des salinités (TDS) pour les eaux provenant des aquifères peu profonds (CTS) révèle une augmentation de l'est à l'ouest de la région, à l'exception de certains points comme CTS2 et CTS14, qui présentent des valeurs particulièrement élevées. Cette tendance est également visible pour les eaux de l'aquifère superficiel (CTM), avec des valeurs hétérogènes dans toute la région. En ce qui concerne les eaux de l'aquifère profond (CI), on observe des valeurs TDS plus faibles à modérées dans les parties est et ouest de la ville de Hassi Messaoud, tandis que les parties nord-nord-est et sud-sud-est présentent des teneurs plus élevées.

En général, la salinité des eaux souterraines (CI) et (CT) est élevée dans toute la région, avec un (TDS) dépassant 1200 mg/l. L'hétérogénéité observée dans la nappe (CTM) par rapport aux nappes plus profondes (CTS) et (CI) reflète l'impact naturelle et parfois anthropique de la quantité et qualité des eaux de cette nappe.

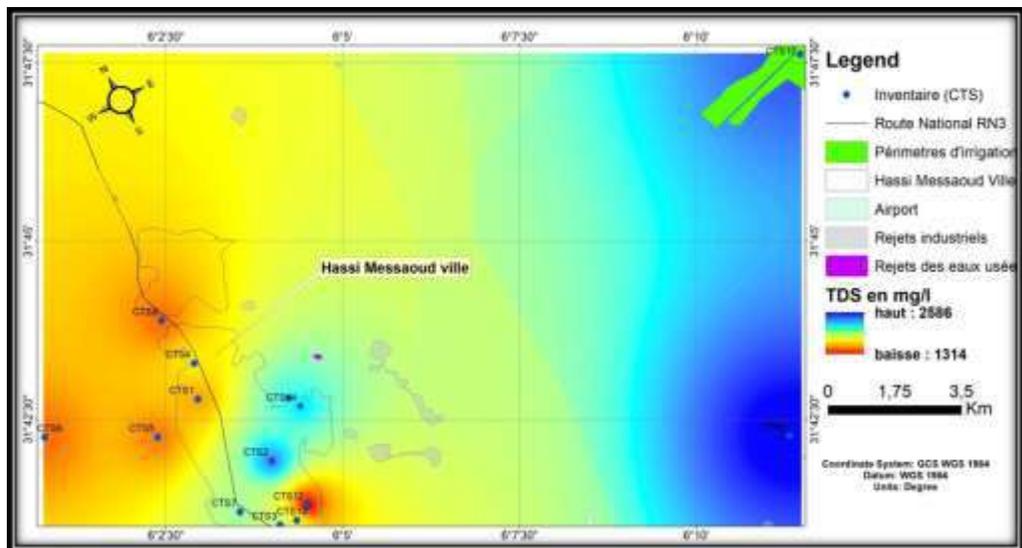
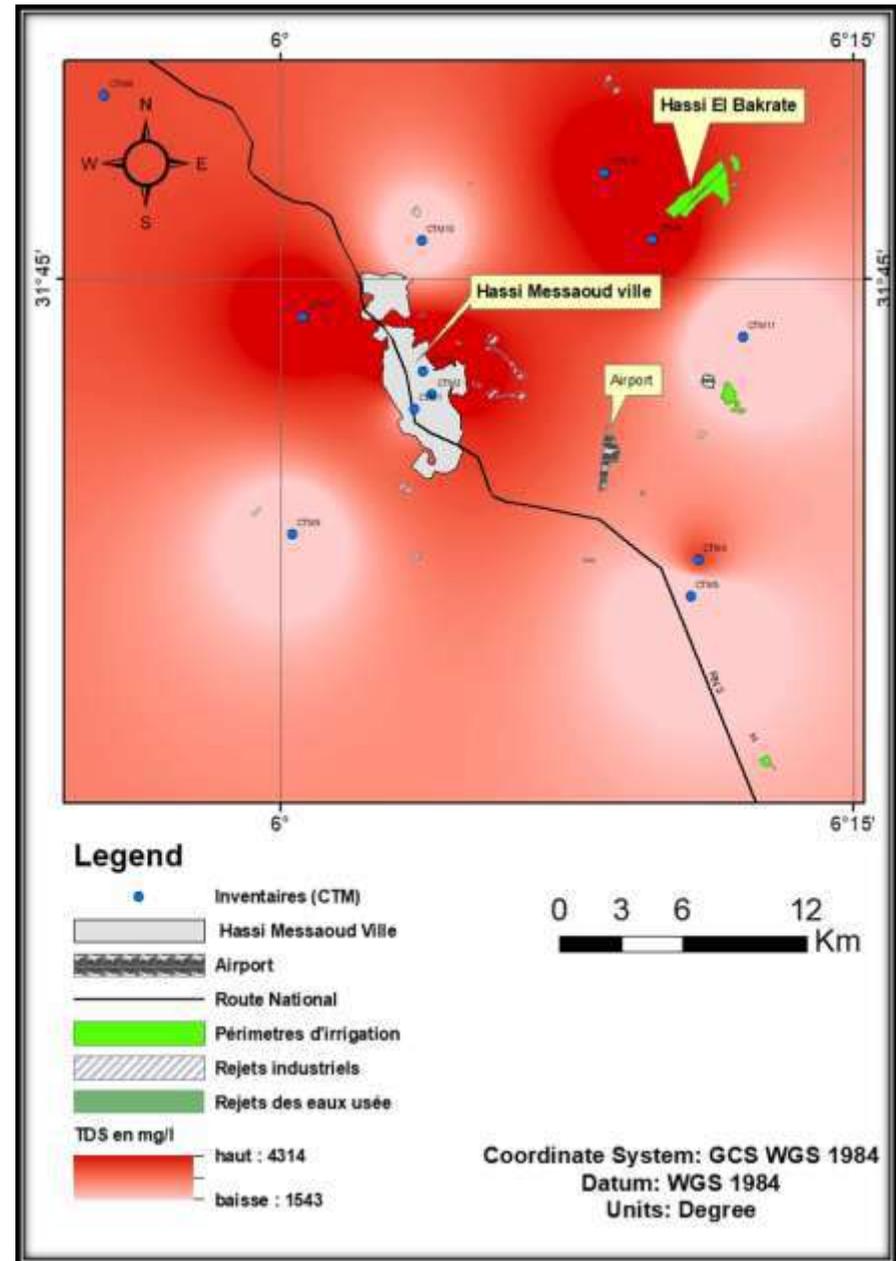
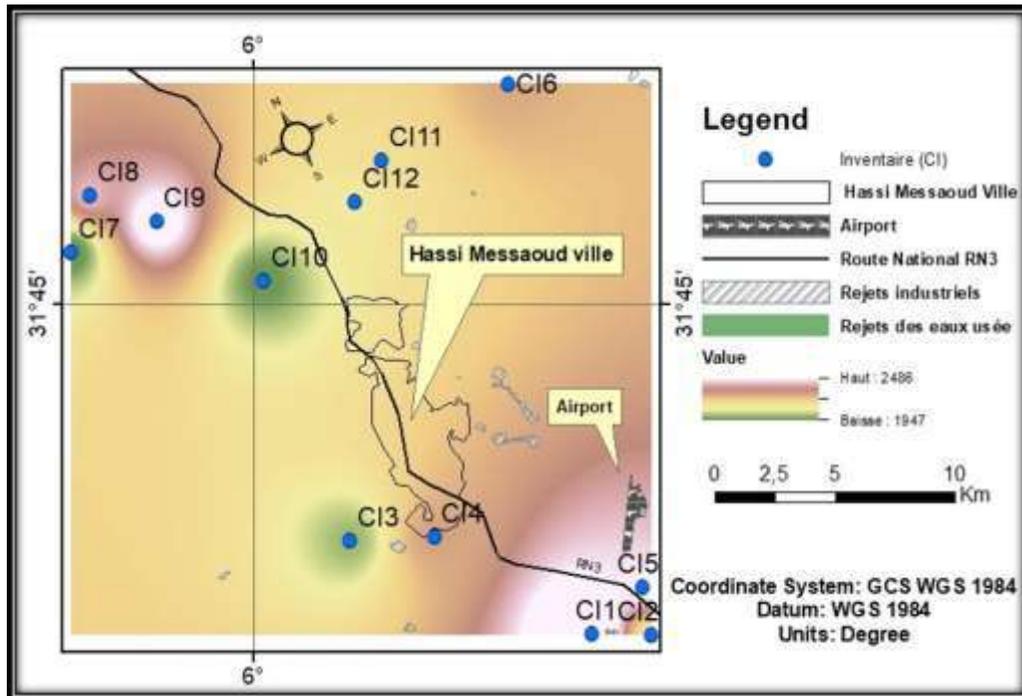


Figure 36 : la répartition spatiale TDS des eaux souterraines (CI) et (CT).

III.8 Les éléments majeurs :

La concentration de calcium (Ca) dans les eaux souterraines des aquifères varie comme suit : de 120 à 466 mg/l pour l'aquifère du Complexe Terminal (CTM), de 124 à 267 mg/l pour l'aquifère du Calcaire (CTS), et de 149 à 366 mg/l pour l'aquifère du Continental Intercalaire (CI). Le calcium (Ca) est un élément chimique essentiel, dont la concentration dans ces aquifères présente une gamme de variations significatives.

En ce qui concerne le magnésium (Mg), les niveaux varient de 22 à 366 mg/l dans l'aquifère CTM, de 85 à 150 mg/l dans l'aquifère CTS, et de 52 à 78 mg/l dans l'aquifère CI. Le magnésium (Mg) est un autre élément majeur qui contribue à la composition chimique de ces eaux souterraines, et ses concentrations présentent des différences marquées selon les aquifères.

Le potassium (K) dans les eaux souterraines de Hassi Messaoud présente une plage de variation allant de 11 à 90 mg/l. Le potassium (K^+) est un élément important qui peut affecter la qualité des eaux souterraines.

La concentration de chlorure (Cl) varie de 290 à 1337 mg/l dans l'aquifère CTM, de 155 à 678 mg/l dans l'aquifère CTS, et de 482 à 659 mg/l dans l'aquifère CI. Le chlorure (Cl) est un anion qui contribue à la salinité de ces eaux souterraines, et ses niveaux diffèrent considérablement entre les aquifères.

En ce qui concerne le sulfate (SO_4), ses concentrations varient de 400 à 1813 mg/l dans l'aquifère CTM, de 328 à 825 mg/l dans l'aquifère CTS, et de 611 à 887 mg/l dans l'aquifère CI. Le sulfate (SO_4) est un autre constituant chimique majeur, et sa présence dans ces eaux souterraines est liée à la dissolution des gypse (Ouairekh et al. 2023).

Les teneurs en bicarbonate (HCO_3^-) mesurées dans les eaux souterraines des aquifères étudiés s'étendent de 106 à 323 mg/l. Les bicarbonates (HCO_3^-) proviennent principalement de la dissolution de calcaire et de dolomie présents dans les formations aquifères. Ils contribuent à la composition chimique de ces eaux souterraines.

La concentration moyenne en nitrate (NO_3^-) dans les aquifères CTM, CTS et CI varie respectivement à 32, 12 et 8 mg/l. Les valeurs élevées mesurées dans l'aquifère mio-pliocène témoignent de l'influence de facteurs anthropiques sur la chimie de cet aquifère (Bouselsal et al. 2015b ; Bouselsal et al. 2021 ; Kharroubi et al. 2024). Ces valeurs élevées sont principalement attribuables à l'infiltration d'eau domestique sous les zones urbaines et au retour de l'eau d'irrigation sous les terres agricoles, indiquant une contamination potentielle de l'aquifère mio-pliocène.

Tableau 6: Les données chimiques des eaux souterraines dans la zone d'étude.

Parametres	CTM			Nombre d'échantillons dépasse la norme en %	CTS			Nombre d'échantillons dépasse la norme en %	CI			Nombre d'échantillons dépasse la norme en %	Norme Alg-2011	WHO 2017
	Min	Max	Moy		Min	Max	Moy		Min	Max	Moy			
pH	7,05	7,83	7,6	0	7,63	7,85	7,70	6.5-8.5	7,1	7,8	7,5	0	6,5-8,5	6.5-8.5
CE	2248	5969	4062	100	2022	3711	2765	500-1500	2893	3528	3176	100	500-1500	500-1500
TH	530	2010	1071	100	700	1110	919	100-500	590	1200	788	100	100-500	100-500
TDS	1531	4326	2752	100	1314	2586	1883	500-1000	1947	2486	2168	100	1000-	500-1000
Ca	120	466	248	75	124	267	193	75-200	149	360	213	58	100-200	75-200
Mg	22	366	110	17	85	150	106	50-150	52	78	63	0	50-150	50-150
Na	183	765	494	92	120	405	258	200	216	440	339	100	200	200
K	10	48	26	92	11	44	17	12	28	90	53	100	12	12
SO4	400	1813	917	100	328	825	656	250-400	611	887	719	100	250-400	250-400
Cl	290	1337	776	75	155	678	444	250-500	482	659	552	25	250-500	250-500
HCO ₃	106	251	149	17	124	293	198	300-500	180	323	219	25	-	300-500
NO ₃	10	50	32	50	5	16	12	45	4	15	8	0	50	45

III.9 Facies chimique

III.9.1 Diagramme de Piper :

Le diagramme de Piper, également connu sous le nom de tracé de Piper, représente un outil graphique fondamental en hydrochimie pour illustrer la composition chimique des eaux souterraines. Cet outil a été conçu par R. L. Piper en 1944 et est largement employé pour analyser et interpréter les données hydrochimiques.

L'élaboration du diagramme de Piper repose sur l'analyse des concentrations des ions majeurs présents dans l'eau souterraine, tels que le bicarbonate (HCO_3^-), le sulfate (SO_4^{2-}), le calcium (Ca^{2+}), le magnésium (Mg^{2+}), le sodium (Na^+), le potassium (K^+), le chlorure (Cl^-), et bien d'autres. Habituellement, ces données sont obtenues grâce à des analyses de laboratoire des échantillons d'eau souterraine collectés sur le terrain.

Le diagramme de Piper se compose de deux losanges superposés. Le losange supérieur reflète la concentration relative des ions cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+), tandis que le losange inférieur représente la concentration relative des ions anions (HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^-). Chacun de ces losanges est subdivisé en trois parties pour tenir compte des trois principaux ions de chaque catégorie.

L'emplacement de l'intersection des losanges indique la composition chimique globale de l'eau souterraine. En fonction de cet emplacement, il est possible de classifier l'eau souterraine en différentes catégories hydrochimiques, telles que les eaux bicarbonatées, sulfatées, chlorurées, etc. Cette classification permet de mieux appréhender les processus géochimiques qui influent sur la composition des eaux souterraines.

Le diagramme de Piper se révèle être un outil puissant pour identifier les sources d'eau, détecter la présence d'eaux de mer ou saumâtres, et évaluer la qualité de l'eau. Il s'avère particulièrement précieux dans la gestion des ressources en eau et la prévention de la contamination des aquifères.

L'analyse de la composition chimique des ions majeurs et leur positionnement dans le diagramme de Piper montre sur la figure 37 permet de caractériser les principaux faciès chimiques des eaux souterraines des différents aquifères CI et CT (CTS, CTM) de la région de Hassi Messaoud. Ces données indiquent une prédominance générale des chlorures et du sodium, en particulier dans les eaux de la nappe Mio-Pliocène (CTM) peu profonde.

III.1.1.6 La nappe Continentale Intercalaire (CI) :

Lorsque nous observons le diagramme de Piper, il est clair que la majorité des échantillons provenant de la nappe Continentale Intercalaire (CI) sont regroupés dans le losange du

diagramme correspondant au faciès chimique chlorure sodique et potassique, ainsi que sulfate sodique. Cette classification est principalement due à la prédominance du sodium par rapport au calcium dans le triangle des cations. De plus, le triangle des anions indique une tendance marquée vers les chlorures et les sulfates.

III.1.1.7 6 La nappe Complexe Terminal Mio-Pliocène (CTM) :

En examinant le diagramme de Piper, il est évident que la plupart des échantillons provenant de la nappe Complexe Terminal Mio-Pliocène (CTM) sont regroupés dans le losange du diagramme correspondant au faciès chimique chlorure sodique et potassique, ainsi que sulfate sodique. Cette classification découle principalement de la tendance à avoir des proportions égales entre le sodium et le calcium dans le triangle des cations pour les échantillons de (CTM). En revanche, le triangle des anions montre une prédominance du chlorure par rapport au sulfate.

III.1.1.8 La nappe Complexe Terminal Sénonien (CTS) :

Lorsque l'on observe le diagramme de Piper, on constate que la plupart des échantillons provenant de la nappe Complexe Terminal Sénonien (CTS) sont regroupés dans le losange du diagramme correspondant au faciès chimique chlorure et sulfate calcique et magnésien. Cette classification est principalement due à la tendance à avoir des proportions égales entre les cations dans le triangle des cations pour les échantillons de CTS. En revanche, le triangle des anions indique une tendance marquée vers les chlorures et les sulfates.

III.9.2 Diagramme de Chadha

Le graphique de Chadha, également appelé diagramme de Chadha, représente un outil essentiel en hydrochimie, développé par R.S. (Chadha 1999), pour scruter la composition chimique des eaux souterraines et éclairer les processus hydrochimiques à l'œuvre dans leur formation.

Ce graphique s'appuie sur l'analyse des concentrations des principaux ions présents dans les eaux souterraines, incluant le sodium (Na), le calcium (Ca), le magnésium (Mg), le potassium (K), le chlorure (Cl), le sulfate (SO_4), le bicarbonate (HCO_3), et d'autres encore. Ces données proviennent habituellement d'analyses chimiques de laboratoire réalisées sur des échantillons d'eau souterraine collectés sur le terrain.

Le graphique de Chadha se présente sous la forme de divers champs ou zones, chacun caractérisant un faciès chimique spécifique de l'eau souterraine. Les axes du graphique de Chadha reflètent les rapports entre les concentrations des différents ions. En disposant les données chimiques d'une eau souterraine donnée sur ce graphique, il devient possible de

déterminer dans quelle zone elles se situent, permettant ainsi d'identifier le faciès chimique dominant de cette eau.

En général, les zones ou champs du graphique de Chadha correspondent à des faciès tels que le faciès chlorure-sodique, le faciès sulfate-sodique, le faciès bicarbonate-calcique, entre autres. Selon l'emplacement des données sur le graphique, il est possible de déduire les processus géochimiques ayant influencé la composition chimique de l'eau souterraine, tels que la dissolution de minéraux, les échanges ioniques, ou l'influence marine, par exemple.

Le diagramme de Chadha se révèle être un outil extrêmement précieux pour la compréhension de la chimie des eaux souterraines. Il permet d'identifier les sources potentielles de contamination, d'évaluer la qualité de l'eau, et de guider la gestion des ressources en eau souterraine. Il s'avère particulièrement utile pour les hydrogéologues et les chercheurs cherchant à mieux appréhender les processus influant sur la composition chimique des eaux souterraines dans une région donnée.

Dans le cadre de cette étude, il a été observé que 83 % des échantillons d'eaux souterraines des nappes CI et CT (CTM) sont classés dans le champ 3 (Na-Cl-SO₄), ce qui indique une composition chimique résultant d'un mélange entre le faciès marin (Na-Cl) et des échanges ioniques. De plus, 57 % des échantillons d'eaux souterraines de la nappe CT (CTS) se situent dans le champ 2 (Ca-Mg-Cl-SO₄), suggérant un mélange entre le faciès (Ca-SO₄) et des échanges ioniques inverses.

En fin de compte, les résultats obtenus à travers le graphique de Chadha concordent avec ceux issus du diagramme de Piper. Ils mettent en lumière la prédominance des anions acides forts (Cl⁻, SO₄²⁻) sur les anions acides faibles (CO₃²⁻, HCO₃⁻) et la prédominance des cations alcalins (Na, K) sur les cations alcalinoterreux. D'une manière générale, les faciès hydrochimiques des eaux souterraines des nappes CI et CT (CTM) sont de type sulfate sodique ou chlorure sodique, tandis que les eaux souterraines de la nappe CT (CTS) se caractérisent par un faciès sulfate calcique ou chlorure calcique.

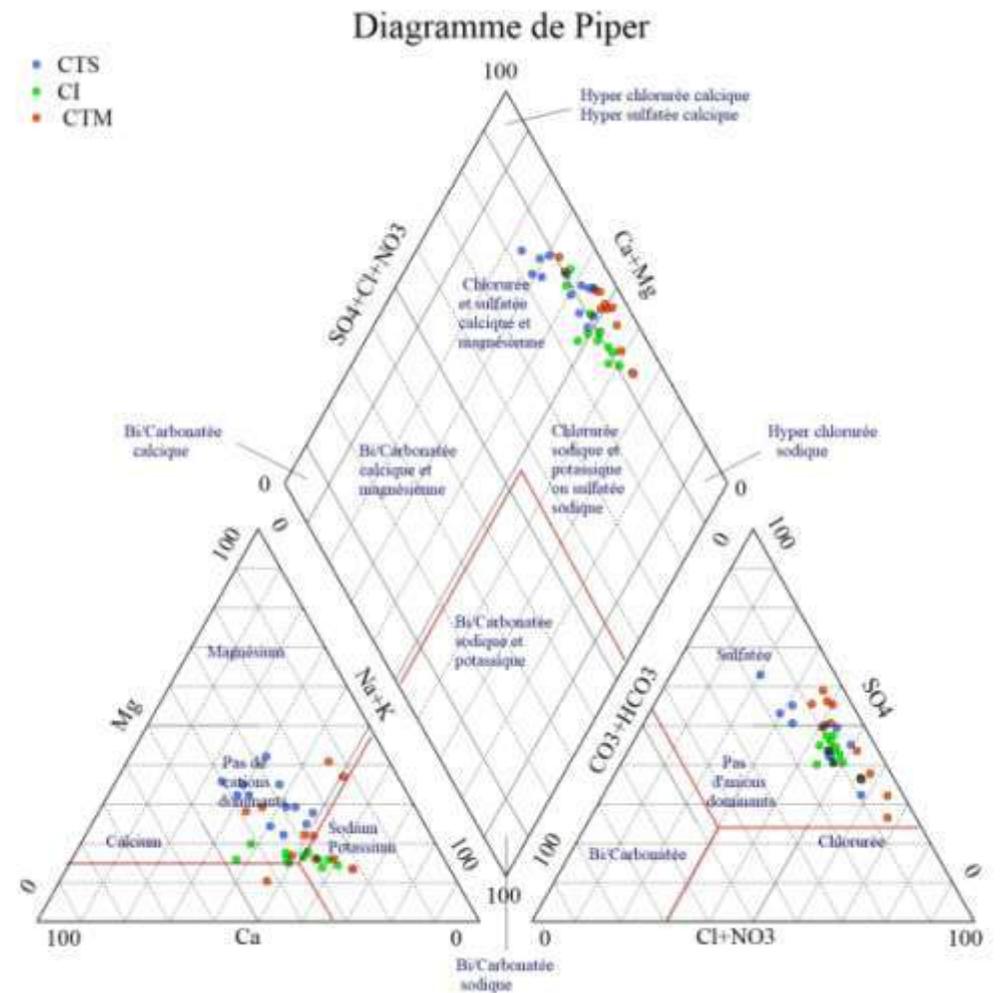
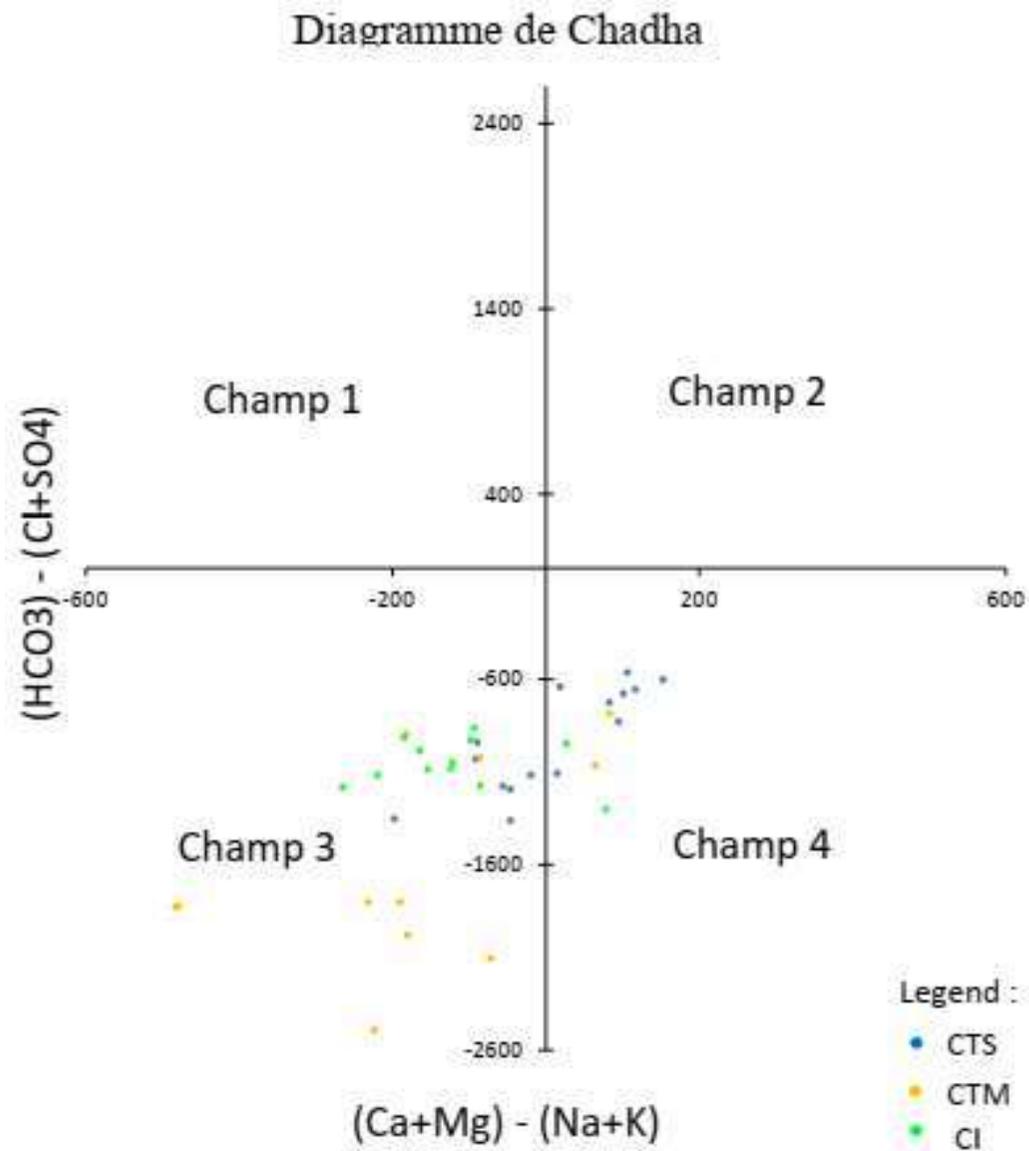


Figure 37 : Diagramme de Piper et chadha montre les eaux souterraines (CI) et (CT).

III.9.3 Diagramme de Schoeller-Berkaloff

Le diagramme de Schoeller-Berkaloff, parfois appelé diagramme (SB) est un instrument largement utilisé en hydrogéologie et en hydrochimie pour analyser la composition chimique des eaux souterraines et comprendre les processus hydrochimiques qui façonnent cette composition. Il a été conçu par les hydrogéologues français (**Schoeller 1962; Berkaloff 1967**).

Ce diagramme s'appuie sur l'analyse des concentrations des principaux ions présents dans l'eau souterraine, tels que le sodium (Na), le calcium (Ca), le magnésium (Mg), le potassium (K), le chlorure (Cl), le sulfate (SO₄), le bicarbonate (HCO₃), entre autres. Ces données chimiques sont généralement obtenues grâce à des analyses de laboratoire des échantillons d'eau souterraine collectés sur le terrain.

Le graphique de Schoeller-Berkaloff prend généralement la forme d'un quadrilatère ou d'un losange, avec chaque coin représentant un ion majeur : Na, Ca, Mg et HCO₃. Les données chimiques des échantillons d'eau souterraine sont disposées sur ce graphique en fonction de leurs concentrations relatives en ions. L'emplacement des données sur le diagramme permet d'identifier le faciès chimique prédominant de l'eau souterraine.

Les différentes zones ou champs présentes sur le diagramme de Schoeller-Berkaloff correspondent à des types de faciès chimiques, tels que le faciès chlorure-sodique, le faciès sulfate-calcique, le faciès bicarbonate-calcique, et bien d'autres. En examinant la position des données sur le graphique, les hydrogéologues peuvent déduire les processus géochimiques qui ont contribué à la composition chimique de l'eau souterraine, comme la dissolution des minéraux, les échanges ioniques, l'influence marine, etc.

Ce diagramme se révèle être un outil inestimable pour appréhender la chimie des eaux souterraines, repérer les sources éventuelles de contamination, évaluer la qualité de l'eau et guider la gestion des ressources en eau souterraine. Il permet aux hydrogéologues d'obtenir une vue d'ensemble des processus hydrochimiques opérant dans une région donnée, ce qui est essentiel pour garantir une utilisation durable des eaux souterraines. Contrairement à d'autres diagrammes, le diagramme de Schoeller représente les échantillons en fonction de leurs concentrations en éléments majeurs, ce qui permet d'identifier les différentes familles chimiques caractérisant les eaux souterraines du système aquifère étudié.

III.1.1.9 La nappe Continentale Intercalaire (CI) :

Dans le diagramme de Schoeller-Berkaloff, représenté dans la figure 38, les échantillons (CI) se regroupent en une seule famille chimique homogène. En ce qui concerne les cations, le sodium prédomine, tandis que du côté des anions, les concentrations de chlorure et de sulfate

sont similaires. Cependant, il est à noter que certains échantillons de cette nappe plus profonde présentent des concentrations élevées en chlorure et en sodium, ce qui suggère une origine liée à un faciès chimique chloruré-sodique. En revanche, d'autres échantillons se distinguent par des concentrations relativement élevées en sulfate, ce qui indique une origine différente liée à un faciès chimique sulfaté-sodique..

III.1.1.10 La nappe Complexe Terminal Sénonien (CTS) :

Sur le diagramme de Schoeller-Berkaloff, représenté dans la figure 38, les échantillons (CTS) se divisent en deux familles distinctes. L'une de ces familles est caractérisée par un faciès chimique chloruré-sodique, qui prédomine sur l'autre famille présentant un faciès chimique sulfate-calcique, et parfois magnésien. Cette distinction suggère une origine complexe pour les eaux de cette nappe profonde, ce qui est en corrélation avec la diversité des caractéristiques lithologiques observées dans la région.

III.1.1.11 La nappe Complexe Terminal Mio-Pliocène (CTM) :

Sur le diagramme de Schoeller-Berkaloff, représenté dans la figure 38, les échantillons de la nappe Complexe Terminal Mio-Pliocène (CTM) se regroupent principalement dans une catégorie de faciès caractérisée par la présence de chlorure et de sulfate sodique. De plus, ces eaux, qui sont fortement minéralisées, présentent des concentrations significatives de magnésium pour les échantillons CTM3 et CTM4, ainsi que de calcium pour le CTM12. Il est important de noter que ces échantillons sont situés entre la zone urbaine et industrielle de Hassi Messaoud. Cette composition chimique complexe suggère que les eaux de la nappe peu profonde de CTM ont une origine multifactorielle, influencée par diverses sources, y compris l'impact de la nappe et les activités humaines dans la région.

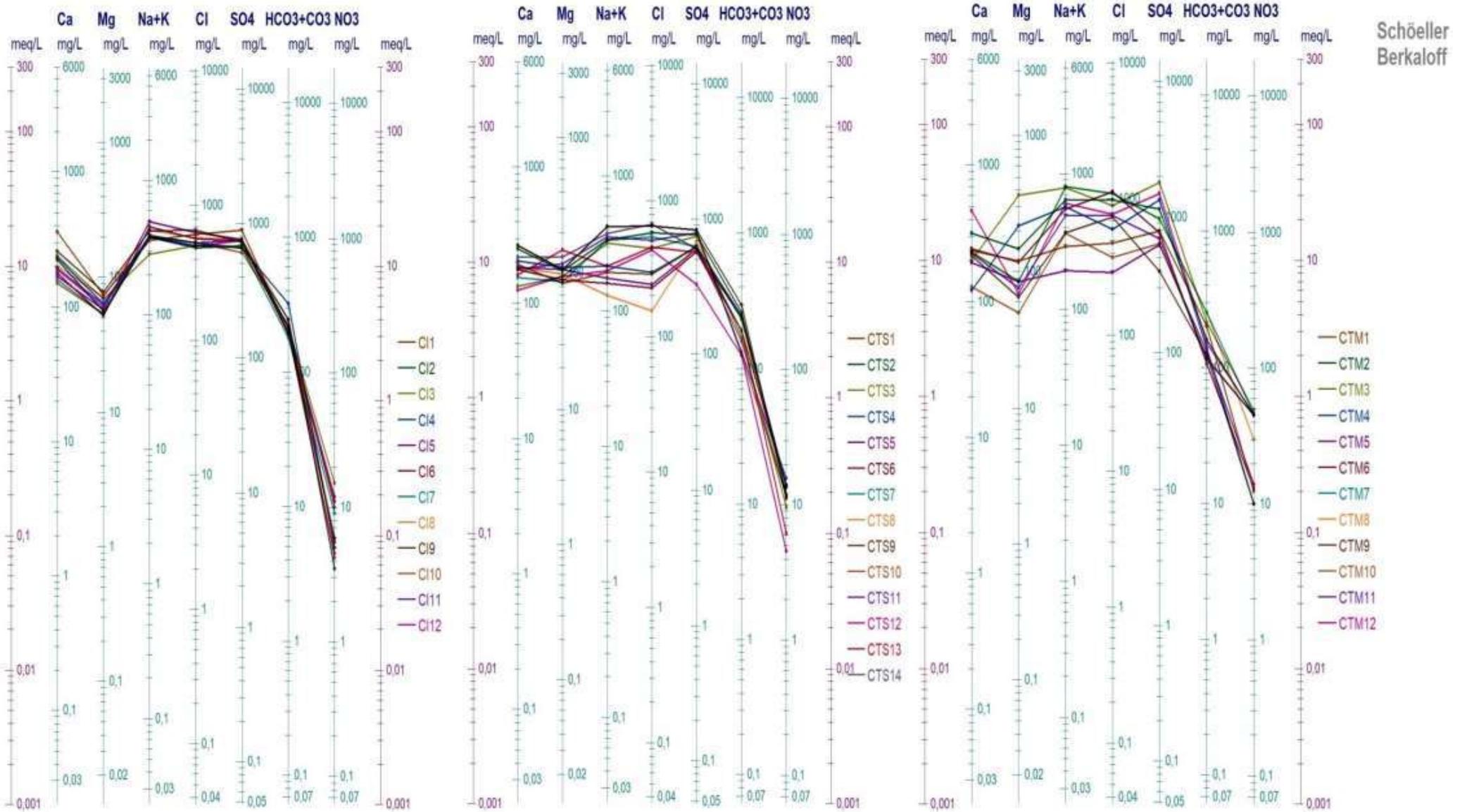


Figure 38: Diagramme de Scheller Berkaloff des eaux souterraines (CI) et (CT).

III.10 la potabilité

La potabilité de l'eau concerne la qualité de l'eau et son aptitude à être consommée sans mettre en danger la santé humaine. En d'autres termes, une eau potable est une eau qui peut être consommée en toute sécurité. Pour qu'une eau soit considérée comme potable, elle doit respecter des normes de qualité de l'eau établies par les autorités sanitaires et environnementales.

III.10.1 Les critères de potabilité de l'eau comprennent généralement :

Absence de contaminants chimiques nocifs : L'eau potable ne doit pas contenir de concentrations excessives de produits chimiques dangereux, tels que les métaux lourds (plomb, mercure, arsenic), les substances toxiques, les pesticides, les herbicides, les médicaments, etc.

- 1) **Absence de contaminants microbiologiques** : L'eau potable ne doit pas abriter de bactéries, de virus ou de parasites pathogènes susceptibles de provoquer des maladies chez les êtres humains. Cela implique généralement que l'eau doit être traitée pour éliminer ces micro-organismes.
- 2) **Transparence et absence de particules visibles** : L'eau potable doit être limpide et ne pas contenir de matières en suspension ni de particules visibles.
- 3) **Goût et odeur acceptables** : L'eau potable ne doit pas avoir de goût ou d'odeur désagréables qui la rendraient impropre à la consommation.

Les critères de potabilité de l'eau varient d'un pays à l'autre, mais ils sont généralement établis pour garantir la sécurité sanitaire des consommateurs. Les organismes gouvernementaux et les agences de régulation de l'eau sont responsables de surveiller et de maintenir la qualité de l'eau potable, ainsi que de faire respecter les normes appropriées.

Dans le cadre de cette étude, la potabilité de l'eau est évaluée en comparant ses caractéristiques physico-chimiques aux normes de référence de l'Algérie) en premier lieu illustre sur le tableau 7, et en utilisant la méthode de l'Indice de Qualité de l'Eau (WQI) en second lieu (Horton 1965). Cette dernière a été privilégiée en raison de sa notoriété et de sa large utilisation (Bouselsal et Saibi. 2022 ; Kharroubi et al. 2022 ; Ouarekh et al. 2021), elle consiste à attribuer un poids relatif à chaque paramètre, puis à effectuer des calculs étape par étape de manière arithmétique, comme suit :

- ✓ Calcul du poids relatif (W_i) en utilisant l'équation (A) :

$$W_i = w_i / \sum w_i$$

Avec :

Wi : le poids relatif. wi : le poids respectif.

✓ Évaluation de la qualité respective (qi) avec l'équation (B) :

$$q_i = c_i / s_i * 10$$

Avec :

- qi : la qualité respective.
- ci : la concentration respective en mg/l.
- si : le norme Algérien.

✓ Calcul du sous-indice respectif (SI) avec l'équation (C) :

$$SI_i = W_i * q_i.$$

✓ Calcul de l'indice global de qualité de l'eau (WQI) en utilisant l'équation (D) :

$$WQI = \sum SI_i.$$

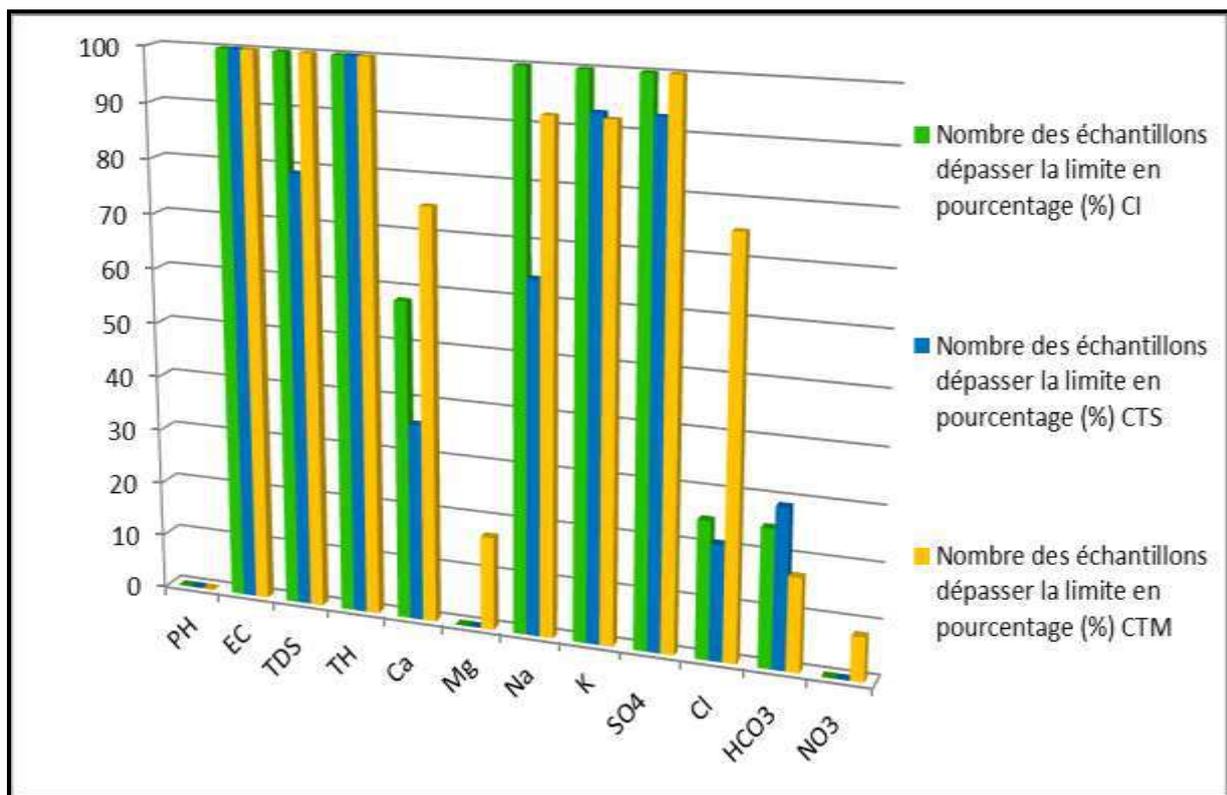


Figure 39: les échantillons des eaux souterraines (CI) et (CT) dépasser la limite admissible.

Tableau 7: les poids relatifs et respectifs des paramètres physico-chimique.

Paramètres	PH	EC	TDS	Ca	Mg	Na	K	SO ₄	Cl	HCO ₃	NO ₃	Total
le poids respectif (wi)	4	4	5	2	1	2	2	4	3	3	5	35
le poids relatif (Wi)	0,114	0,114	0,114	0,057	0,028	0,057	0,057	0,114	0,085	0,085	0,114	1

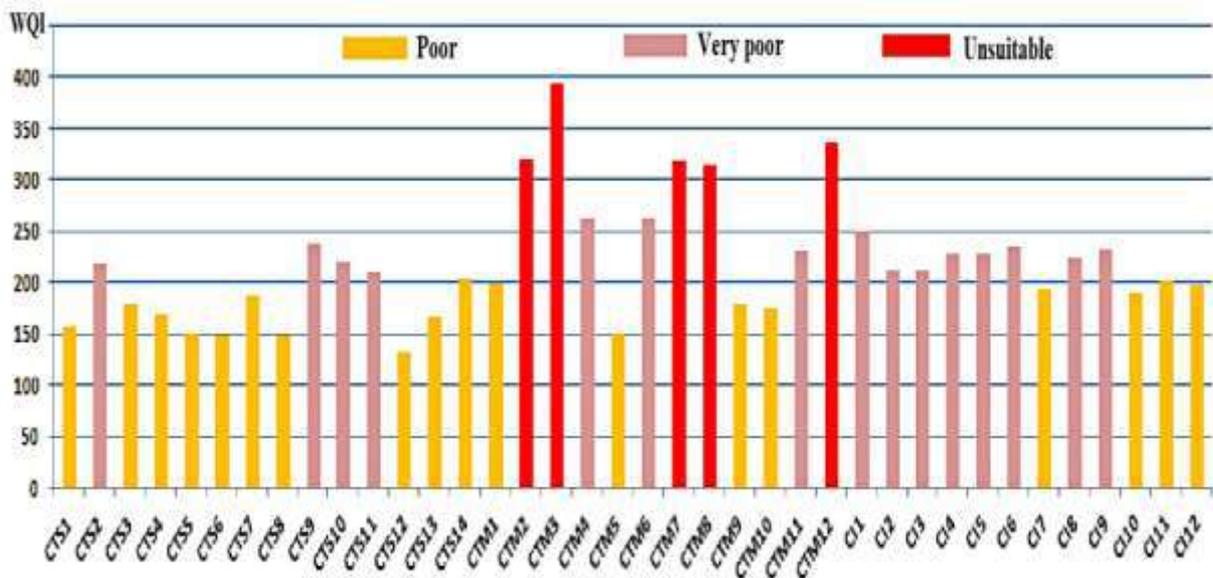


Figure 40 : les catégories de potabilité des eaux souterraines (CI) et (CT).

En effet, les résultats des analyses physico-chimiques des eaux des nappes Continentale Intercalaire (CI) et Complexe Terminal (CT) montrent que la plupart des échantillons prélevés à Hassi Messaoud présentent des valeurs nettement supérieures aux limites recommandées par l'Organisation mondiale de la santé (OMS) dans la figure 39, à l'exception des nitrates qui demeurent à des niveaux relativement faibles, inférieurs à 50 mg/l.

En général, les eaux de ces nappes sont fortement minéralisées et très dures. Les valeurs de l'indice de qualité de l'eau (WQI) permettent de classer ces eaux en trois catégories illustre dans la figure 40 et le tableau 8, allant de mauvaise à très mauvaise et non potable. La classe de mauvaise qualité représente environ 71,4 % des échantillons d'eau de l'aquifère sénonien (CTS), 33,3 % des échantillons d'eau de l'aquifère mio-pliocène (CTM) et 33,3 % de l'aquifère continental intercalaire (CI). La classe de très mauvaise qualité représente environ 28,6 % des échantillons d'eau de l'aquifère sénonien, 25 % des échantillons d'eau de l'aquifère mio-pliocène et 66,7 % de l'aquifère continental intercalaire. De plus, la classe non potable représente environ 41,7 % des échantillons d'eau de l'aquifère mio-pliocène.

Tableau 8 : La classification de potabilité des eaux souterraines (CI) et (CT).

Catégorie	index	CTM		CTS		CI	
		N°Ech	%	N°Ech	%	N°Ech	%
Excellent	(<50)	0					
bon	(50.1 – 100)	0					

médiocre	(100.1 – 200)	4	33,3	10	71,4	4	33,3
très médiocre	(200.1 – 300)	3	25	04	28,6	8	66,7
non potable	(>300.1)	5	41,7	0	0	0	0

Il est à noter que les eaux de la nappe Complexe Terminal (CT) présentent des valeurs d'indice de qualité de l'eau (WQI) principalement médiocres, tandis que pour la nappe Continentale Intercalaire (CI), la plupart des échantillons sont classés comme de mauvaise qualité, voire impropre à la consommation.

III.11 L'irrigation :

L'hydrochimie joue un rôle crucial dans l'irrigation agricole, en particulier en ce qui concerne les paramètres qui définissent la qualité de l'eau utilisée pour l'irrigation. Les paramètres qui présentent un impact sur le sol et les plantes sont les suivants (Kebili et al. 2021 ; Touahri et al. 2022 ; Arfa et al. 2022) :

III.11.1 Conductivité électrique (EC) :

C'est un indicateur essentiel de la présence de sels minéraux dans l'eau d'irrigation, lorsque l'eau contient une concentration élevée de sels dissous, sa conductivité électrique augmente. Ces sels dissous comprennent principalement des ions minéraux tels que le calcium, le magnésium, le sodium, le potassium, le chlorure, le sulfate, le bicarbonate, entre autres.

La conductivité électrique de l'eau d'irrigation peut avoir un impact significatif sur la santé des plantes et la qualité des sols.

Voici quelques points clés à prendre en compte :

- **Salinité du sol** : Une eau d'irrigation avec une conductivité électrique élevée la salinité du sol au fil du temps, ce qui peut la croissance des plantes en déduction pour leur capacité à absorber l'eau et les nutriments.
- **Certaines cultures**: sont plus sensibles à la salinité que d'autres. Les cultures sensibles peuvent montrer des symptômes de stress hydrique ou de toxicité des ions en présence d'une conductivité électrique élevée dans l'eau d'irrigation.
- **Besoin en irrigation**: Une eau d'irrigation avec une conductivité électrique élevée peut nécessiter une quantité supplémentaire d'eau pour rincer les sels accumulés dans le sol et maintenir la fertilité du sol.
- **Gestion de l'eau**: La surveillance régulière de la conductivité électrique de l'eau d'irrigation est essentielle pour une gestion efficace de l'irrigation. Des ajustements

peuvent être nécessaires pour maintenir la qualité de l'eau à des niveaux acceptables pour les cultures et les sols.

En résumé, la conductivité électrique est un paramètre clé à surveiller dans l'eau d'irrigation car elle peut avoir un impact significatif sur la santé des plantes, la fertilité des sols et la gestion globale de l'irrigation.

Dans cette étude, tous les points d'eau (CI, CTM et CTS) présentent une salinité dépassant les 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Tableau 9). De plus, selon Wilcox (1955), 100 % des points d'eau (CI), 92 % des points d'eau (CTM) et 71 % des points d'eau (CTS) sont classés comme présentant un risque de salinité très élevé (Tableau 11).

III.11.2 Pourcentage de sodium (Na%) :

Ce pourcentage indique la proportion de sodium parmi les cations totaux dans l'eau d'irrigation. Des niveaux élevés de sodium peuvent être problématiques car ils peuvent entraîner des effets néfastes sur la structure et la fertilité des sols.

Le diagramme de Wilcox est un outil graphique largement utilisé pour évaluer la qualité de l'eau d'irrigation en fonction du pourcentage de sodium et de la conductivité électrique. Contrairement au diagramme de Wilcox log, le diagramme de Wilcox classique ne prend pas de logarithme des valeurs de conductivité électrique. Le diagramme de Wilcox classique divise l'espace graphique en zones qui permettent d'interpréter rapidement la qualité de l'eau d'irrigation :

- Excellente : Convient parfaitement à l'irrigation, caractérisée par un faible pourcentage de sodium et une faible conductivité électrique.
- Bonne : Acceptable pour l'irrigation, avec un pourcentage de sodium légèrement plus élevé mais toujours dans les limites acceptables, et une conductivité électrique modérée.
- Admissible : Appropriée pour certaines cultures tolérantes au sodium, mais nécessitant une attention particulière en matière de drainage et de gestion des sols.
- Médiocre : Utilisable dans des conditions spécifiques, mais susceptible d'avoir des effets néfastes sur les sols et les cultures.
- Mauvaise : Non adaptée à l'irrigation en raison d'une concentration élevée de sodium et/ou d'une conductivité électrique élevée.

Combiné à d'autres paramètres comme le SAR et la conductivité électrique, le diagramme de Wilcox offre une indication rapide de la qualité de l'eau d'irrigation et des mesures potentielles à prendre pour minimiser les impacts négatifs sur les sols et les cultures.

Dans l'étude mentionnée, il est observé que le pourcentage de sodium dépasse souvent les 10 % dans tous les échantillons d'eau (Tableau 9), ce qui indique un risque potentiel pour les cultures et les sols.

En outre, sur le diagramme de Wilcox (Figure 41), les points d'eau de type (CTS) présentent une qualité médiocre, tandis que les points d'eau de type (CTM) et CI sont de qualité mauvaise.

III.11.3 Rapport de sodium adsorption (SAR) :

le SAR évalue la tendance de l'eau à causer la dispersion des particules de sol et à altérer sa structure, ce qui peut entraîner une mauvaise infiltration de l'eau et des problèmes de drainage. Un SAR élevé indique généralement une eau riche en sodium, ce qui peut être préjudiciable à la qualité du sol et donc à la croissance des cultures. Pour calculer le SAR on utilise la formule suivant :

$$SAR = 2 \frac{Na^+}{\sqrt{Ca^{2+} + Mg^{2+}}}$$

La Conductivité Électrique (CE) mesure la capacité d'une solution à conduire l'électricité, influencée par la quantité totale de sels dissous tels que les ions sodium, calcium, magnésium et autres. En agriculture, la CE est souvent utilisée comme indicateur de la salinité de l'eau d'irrigation. Une CE élevée peut signaler une concentration élevée de sels dissous, ce qui peut également affecter la qualité du sol et la croissance des cultures.

Le diagramme de Riverside est un outil graphique représentant la relation entre le SAR et la conductivité électrique pour évaluer la qualité de l'eau d'irrigation. Il divise le graphique en zones qui indiquent le potentiel de l'eau d'irrigation à endommager les sols :

- **Zone 1** : Eau de qualité acceptable, avec un faible SAR et une faible conductivité électrique.
- **Zone 2** : Eau de qualité moyenne, caractérisée par un faible SAR mais une conductivité électrique élevée.
- **Zone 3** : Eau de qualité moyenne à mauvaise, avec un SAR modéré à élevé et une conductivité électrique élevée.
- **Zone 4** : Eau de mauvaise qualité, présentant un SAR très élevé et une conductivité électrique élevée.

En utilisant le diagramme de Riverside, les utilisateurs peuvent déterminer si l'eau d'irrigation nécessite un traitement ou des pratiques d'irrigation particulières pour minimiser les effets négatifs sur les cultures et les sols.

Par conséquent, les valeurs de SAR indiquées dans le tableau 10 et représentées sur le diagramme de Riverside (figure 42) montrent que les échantillons d'eaux souterraines étudiées

(CTS) appartiennent à la zone 2, tandis que les échantillons (CI) sont dans la zone 3 et les échantillons (CTM) dans la zone 4.

III.11.4 Rapport de Kelly (KR) :

Le rapport de Kelley est calculé en comparant les concentrations des principaux ions présents dans l'eau d'irrigation, à savoir le sodium (Na^+), le calcium (Ca^{2+}), le magnésium (Mg^{2+}), et les anions chlorure (Cl^-) et sulfate (SO_4^{2-}).

La formule du rapport de Kelley est la suivante :
$$\text{Rapport de Kelley} = \frac{\text{Na}^+}{\sqrt{\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}}}$$

Un rapport de Kelley élevé indique une concentration relative élevée de sodium par rapport aux ions calcium et magnésium. Ceci est significatif car des niveaux élevés de sodium dans l'eau d'irrigation peuvent entraîner une détérioration de la structure des sols, ce qui peut affecter négativement la croissance des cultures.

En utilisant le rapport de Kelley, les agriculteurs et les gestionnaires des ressources en eau peuvent évaluer rapidement le potentiel de l'eau d'irrigation à provoquer des problèmes de salinité des sols et à affecter la croissance des cultures. Cependant, il convient de noter que le rapport de Kelley ne prend pas en compte d'autres paramètres importants tels que la conductivité électrique ou le pourcentage de sodium, et doit donc être utilisé en conjonction avec d'autres mesures pour une évaluation plus complète de la qualité de l'eau d'irrigation.

Le rapport de Kelley est généralement classé en différentes catégories en fonction de ses valeurs, afin d'évaluer la qualité de l'eau d'irrigation.

- ✓ Si le rapport de Kelley inférieur à 1 est considérée comme la plus favorable en termes de qualité de l'eau d'irrigation. Elle indique une faible concentration de sodium par rapport aux ions calcium et magnésium, ce qui est bénéfique pour la santé des sols et la croissance des cultures.
- ✓ Si le Rapport de Kelley entre 1 et 2 est généralement considérée comme acceptable pour l'irrigation, bien que légèrement élevée. Elle suggère une concentration modérée de sodium par rapport aux ions calcium et magnésium, mais peut nécessiter une surveillance accrue pour éviter tout risque de détérioration des sols.
- ✓ Si le Rapport de Kelley supérieur à 2 indique une concentration élevée de sodium par rapport aux ions calcium et magnésium. Une valeur aussi élevée peut être préjudiciable à la structure des sols et nécessiter des mesures correctives telles que le drainage ou l'amendement du sol pour minimiser les impacts sur les cultures.

Il est important de noter que cette classification peut varier en fonction des conditions locales et des cultures spécifiques cultivées. Il est également recommandé de combiner l'évaluation

du rapport de Kelley avec d'autres paramètres tels que la conductivité électrique et le pourcentage de sodium pour une analyse plus complète de la qualité de l'eau d'irrigation.

Dans cette étude, la plupart des échantillons d'eau montrent des valeurs inférieures à 1, ce qui signifie qu'ils conviennent à l'irrigation entre 100% des points d'eau (CTS) de bon qualité Par contre 50% et 58% de qualité médiocre respectivement pour les points (CTM) et (CI) (Tableau 10).

III.11.5 Rapport risque de magnésium (MR) :

Le rapport de risque de magnésium, selon Ragunath 1987, est une mesure utilisée pour évaluer le risque potentiel d'une eau d'irrigation sur la qualité des sols et la santé des cultures en raison de sa teneur en magnésium. Cette mesure est dérivée en comparant les concentrations de magnésium (Mg^{2+}) et de calcium (Ca^{2+}) dans l'eau d'irrigation.

Le rapport de risque de magnésium est calculé en utilisant la formule suivante :

$$\text{Rapport de risque de magnésium } Mg = \frac{Mg^{2+}}{Ca^{2+}}$$

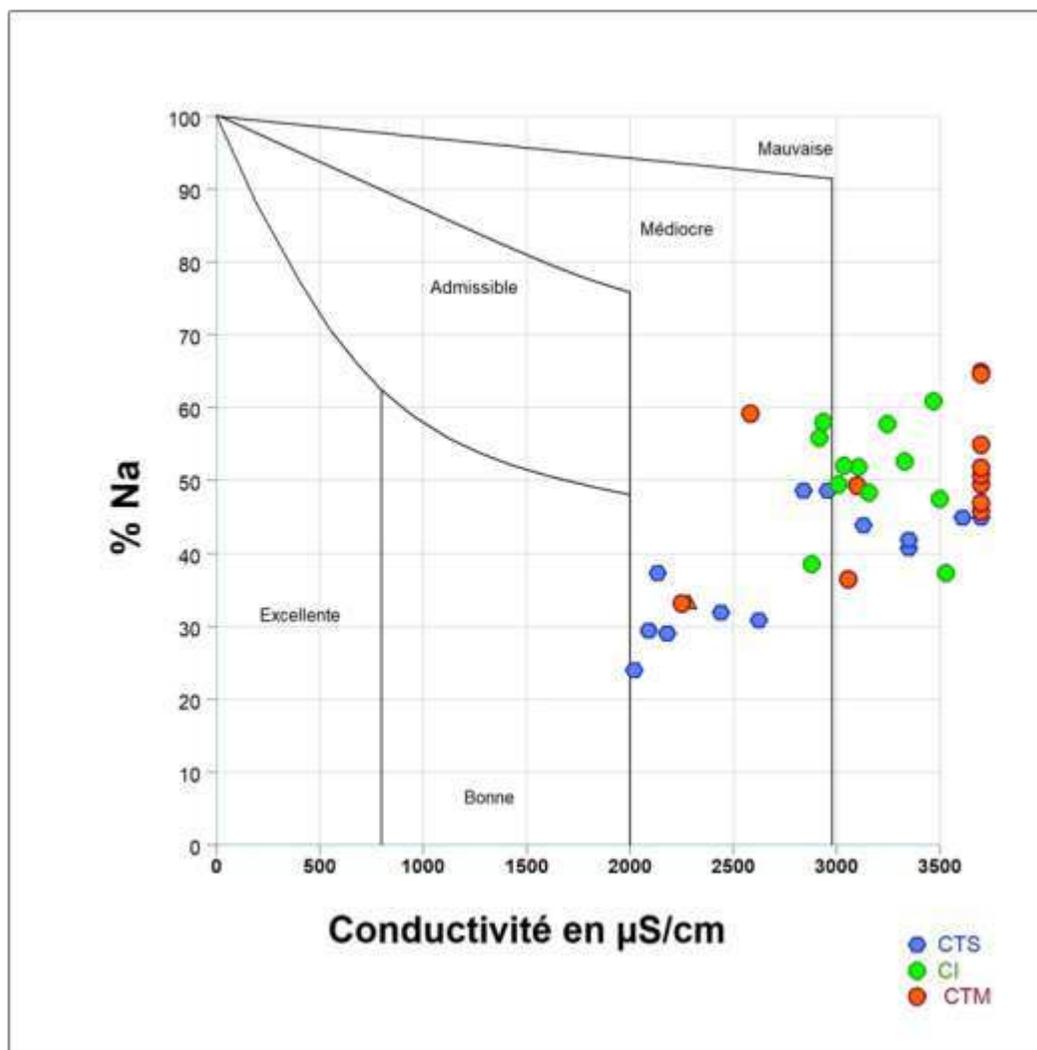
Un rapport élevé de magnésium par rapport au calcium peut indiquer un risque accru pour les sols et les cultures. Une concentration élevée de magnésium peut influencer négativement la structure du sol, en particulier dans les sols à forte teneur en argile, ce qui peut entraîner une mauvaise perméabilité, un compactage du sol et des problèmes de drainage.

De plus, un excès de magnésium dans l'eau d'irrigation peut également affecter la disponibilité des autres nutriments pour les plantes et entraîner des déséquilibres nutritionnels, ce qui peut affecter la santé et le rendement des cultures.

En se basant sur le rapport de risque de magnésium, les agriculteurs et les gestionnaires des ressources en eau peuvent évaluer la probabilité que l'eau d'irrigation entraîne des problèmes associés à la présence de magnésium dans les sols et les cultures, et prendre des mesures préventives si nécessaire, telles que l'amendement du sol ou le choix de pratiques d'irrigation appropriées. Dans cette étude, la plupart des échantillons d'eau présentent un rapport de risque de magnésium supérieur à 30 % (Tableau 9), ce qui indique un potentiel risque pour les cultures et les sols.

Tableau 9: les parametres détermine l'eau d'irrigation de la zone d'étude

Echantillons	CE μS/cm	SAR	RK	MR %	PI %	Na %
CTS1	2285	2,76	0,478	41,9	44	11
CTS2	3351	4,32	0,664	40,9	51	14
CTS3	2840	4,94	0,918	54	61	16
CTS4	2438	2,8	0,45	47,5	43	12
CTS5	2178	2,36	0,393	49,2	40	11
CTS6	2088	2,25	0,396	45,5	41	10
CTS7	2956	5,02	0,92	48,1	60	16
CTS8	2022	1,77	0,301	46,8	35	08
CTS9	3711	5,29	0,795	39,9	55	16
CTS10	3608	5,3	0,796	39,1	54	17
CTS11	3132	4,41	0,722	51,9	56	15
CTS12	2134	2,96	0,559	55,7	50	14
CTS13	2623	2,73	0,428	60,7	44	11
CTS14	3350	4,59	0,692	50	53	16
CTM1	1080	3,64	0,553	45,8	47	13
CTM2	1400	7,09	0,947	43,6	59	18
CTM3	2010	7,33	0,819	75,1	59	17
CTM4	1200	7,04	1,018	75	64	19
CTM5	830	2,76	0,478	41,9	44	12
CTM6	1090	6,88	1,04	44,8	62	18
CTM7	920	10,9	1,801	37,9	73	22
CTM8	930	10,9	1,781	37,9	73	22
CTM9	810	5,36	0,943	33,1	58	18
CTM10	530	6,32	1,379	39,2	69	19
CTM11	870	6,94	1,175	35,8	64	19
CTM12	1440	6,39	0,841	19,5	54	16
CI1	1200	3,61	0,521	25,3	47	12
CI2	790	4,93	0,879	29,3	60	15
CI3	880	3,16	0,532	32,2	50	11
CI4	840	4,8	0,826	31,3	59	15
CI5	660	7,46	1,455	36,3	71	19
CI6	660	6,1	1,19	32,5	68	16
CI7	620	5,85	1,172	35,8	66	17
CI8	800	5,8	1,028	37,3	63	17
CI9	960	5,18	0,834	33,3	58	16
CI10	590	6,43	1,318	37,4	68	18
CI11	740	5,56	1,022	35	62	16
CI12	720	5,51	1,025	34,1	62	16



III.11.6 Indice de perméabilité (PI) :

Le diagramme de Donnan, 1964, également connu sous les appellations de modèle de Donnan ou équilibre de Donnan, revêt une importance cruciale dans le domaine de la chimie et de la physico-chimie. Il permet de comprendre comment les ions se répartissent au travers d'une membrane semi-perméable lorsque des particules chargées, comme les ions, sont en jeu. Lorsqu'on isole des particules chargées au moyen d'une membrane semi-perméable, on observe une distribution inégale de ces particules de part et d'autre de la membrane. Cette asymétrie résulte des interactions électrostatiques entre les ions et les charges présentes à la surface de la membrane. Ce phénomène de Donnan est fréquemment observé dans des contextes biologiques, notamment au niveau des cellules, où les membranes cellulaires agissent comme des barrières semi-perméables.

Un exemple concret de l'effet de Donnan se manifeste dans des solutions électrolytiques contenant à la fois des ions chargés positivement (cations) et des ions chargés négativement (anions). Lorsqu'une telle solution est séparée par une membrane semi-perméable, les cations sont attirés vers la membrane, tandis que les anions sont repoussés. En effet, une concentration plus élevée de cations se forme près de la membrane, tandis qu'une concentration plus élevée d'anions se développe de l'autre côté.

L'indice de perméabilité, quant à lui, mesure la capacité d'une substance à traverser une membrane semi-perméable. Dans le contexte du diagramme de Donnan, cet indice permet d'évaluer la capacité d'un ion ou d'une particule à franchir la membrane, en prenant en compte sa charge et sa taille. Les particules ayant une plus grande perméabilité traverseront plus aisément la membrane.

Pour résumer, le diagramme de Donnan est un modèle qui explique comment les particules chargées se répartissent de manière inégale de chaque côté d'une membrane semi-perméable sous l'influence d'interactions électrostatiques. L'indice de perméabilité évalue la capacité d'une substance à traverser cette membrane en prenant en compte sa charge et sa taille. Cette notion est fondamentale dans divers domaines, notamment en biologie, en chimie des membranes et en physico-chimie.

Il est à noter que l'indice de perméabilité est utilisé pour évaluer la capacité de l'eau souterraine à s'infiltrer dans le sol. Les valeurs de cet indice indiquent que toutes les eaux souterraines examinées, qu'elles appartiennent aux nappes (CI) ou (CT), sont adaptées à l'irrigation, car elles présentent une perméabilité comprise entre 35 à 75 % (Tableau,9 et 10). Cependant, il convient de noter que certaines eaux extraites de la nappe (CTS) ne conviennent pas aux conditions pédologiques et ne sont donc pas adaptées à l'irrigation.

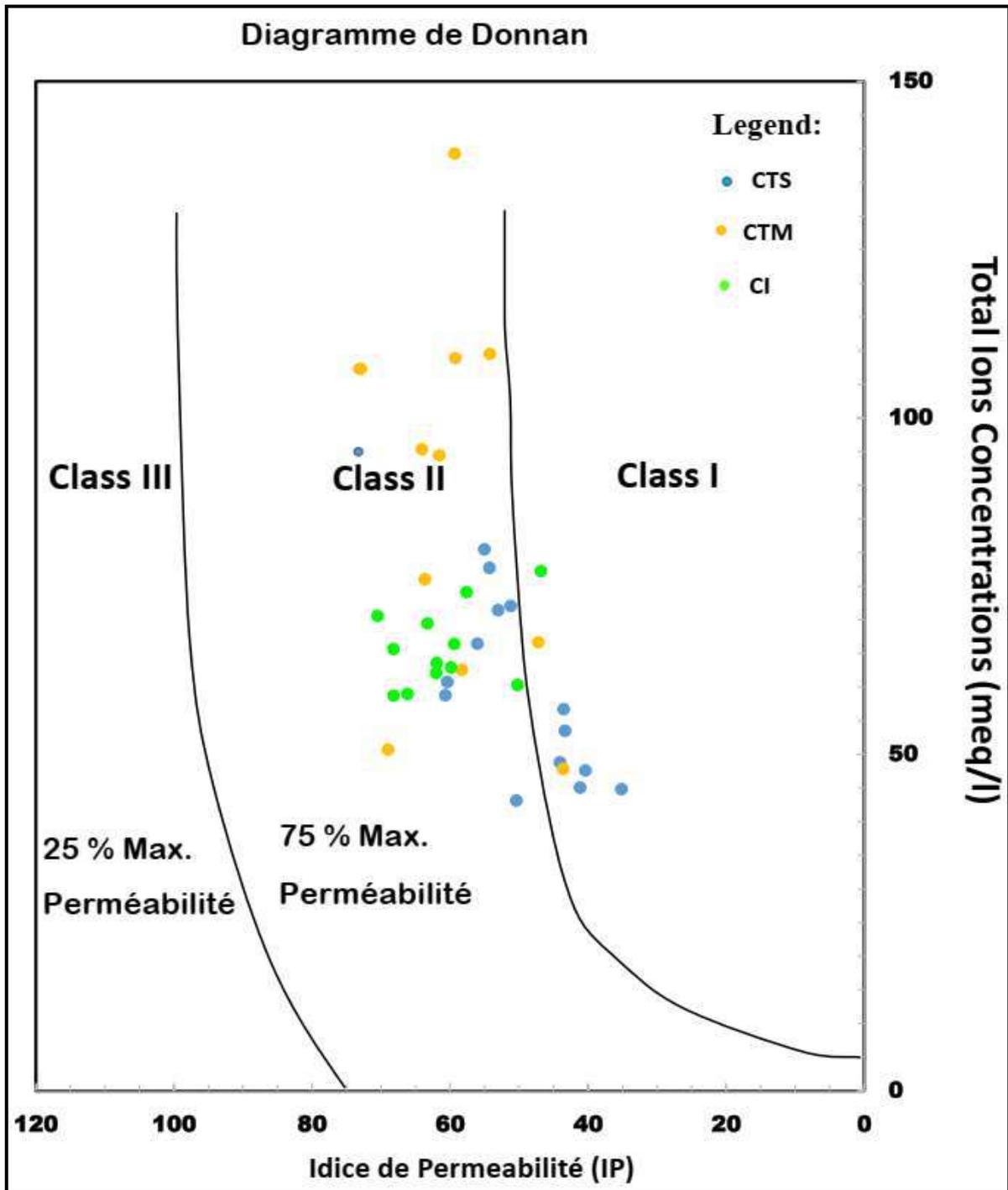


Figure 43 L'indice de Perméabilité (IP) des eaux souterraines (CI) et (CT).

En conclusion, l'évaluation de la qualité de l'eau d'irrigation est essentielle pour garantir la santé des sols et des cultures. Les paramètres tels que la conductivité électrique, le pourcentage de sodium, les rapports de sodium adsorption et de risque de magnésium l'indice de perméabilité fournissent des indications cruciales sur la pertinence de l'eau pour l'irrigation. Les résultats de cette étude mettent en évidence des niveaux préoccupants de salinité et de sodium, soulignant la nécessité d'une gestion attentive de l'eau d'irrigation pour maintenir la productivité agricole et la durabilité des terres.

Tableau 10: La classification des échantillons par les paramètres d'irrigation.

Paramètre	Gamme	Classe d'eau	Nombre d'échantillons en % (CI)	Nombre d'échantillons en % (CTS)	Nombre d'échantillons en % (CTM)
EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$) (Wilcox 1955)	<250	Risque de faible salinité (bon)	00	00	00
	250-750	Risque de salinité moyen (modéré)	00	00	00
	750-2250	Risque de salinité élevé (faible)	00	29	08
	>2250	Risque de salinité très élevé (très faible)	100	71	92
SAR (meq/l) (Richards 1954)	0-10	Excellent	100	100	83
	10-18	Bon	00	00	17
	18-26	Douteux	00	00	00
	> 26	Inadapté	00	00	00
RK (Kelley 1963)	< 1	Bon	42	100	50
	1-2	Douteux	58	00	50
	> 2	Inadapté	00	00	00
PI (%) (Doneen 1964)	>75	Max. perméabilité	00	00	00
	75-25	75% of max. perméabilité	100	100	100
	< 25	25% of max. perméabilité	00	00	00
RM (%) (Ragunath 1987)	< 50%	Adapté	100	64	93
	> 50%	Inadapté	00	36	17
%Na	0-20	Excellent	100	100	83
	20-40	Bon	00	00	17
	40-60	Admissible	00	00	00
	60-80	Douteux	00	00	00
	80-100	Inadapté	00	00	00

III.12 L'industrie :

L'aptitude des eaux souterraines de la région de Hassi Messaoud, en particulier les nappes (CI) et (CT), à des fins industrielles revêt une grande importance en raison de la forte présence d'industries pétrolières dans la région. Bien que la qualité de l'eau destinée à un usage industriel varie considérablement d'un endroit à l'autre, elle joue un rôle crucial dans l'économie locale et nationale. De plus, son impact se fait ressentir de manière significative sur les systèmes de distribution d'eau, en particulier sur l'infrastructure des réseaux d'eau potable, et elle a des répercussions directes sur la santé humaine et l'environnement dans son ensemble. En général, les phénomènes liés à la qualité de l'eau sont confrontés à divers problèmes, les plus courants et les plus graves étant la corrosion et l'entartrage (Bouselsal et Johnbosco 2024).

- ✓ **La corrosion** : est un processus d'altération chimique ou physico-chimique des matériaux, induit par l'action de substances corrosives ou d'un environnement corrosif.
- ✓ **L'entartrage** : est un phénomène naturel qui survient lorsque les carbonates de calcium se précipitent dans l'eau, se transformant en calcite et en aragonite. Cela se produit en raison de divers facteurs, tels que des températures élevées et une exposition à l'air lors de la circulation au sein des réseaux.

Ces problèmes de corrosion et d'entartrage sont d'autant plus préoccupants pour les industries locales, car ils peuvent entraîner des coûts élevés de maintenance et de remplacement des infrastructures, en plus de potentielles conséquences négatives sur la qualité de l'eau utilisée à des fins industrielles.

Ces deux phénomènes, la corrosion et l'entartrage, sont le résultat d'une combinaison de plusieurs facteurs qui influent sur la corrosivité de l'eau. Ces facteurs incluent la composition géologique du sol, le pH anormalement élevé ou bas de l'eau, le débit d'eau, les températures élevées, la présence accrue de bactéries, une forte concentration de gaz dissous, la conductivité électrique, des niveaux élevés de chlorure, de sulfate et de bicarbonate, des quantités élevées de solides dissous, la dureté de l'eau, la présence d'oxygène dissous, ainsi que la proportion de tuyaux en fer et en acier utilisés dans les systèmes de distribution. Cependant, dans le cas de l'entartrage des systèmes d'eau, il est principalement attribué à des niveaux élevés de minéraux dissous, notamment le carbonate de calcium, qui se transforme en calcite, aragonite, etc.

Ces facteurs sont essentiels dans l'évaluation de la qualité de l'eau, en particulier dans les zones industrielles. Ils sont évalués à l'aide de plusieurs indices significatifs, notamment le

rapport massique chlorure-sulfate (CSMR), l'indice de Revelle (RI), l'indice de Larson-Skold (LSI), l'indice de Langelier (LI), l'indice de stabilité de Ryznar (RSI), l'indice d'agressivité (AI) et l'indice d'échelle de Puckorius (PSI).

Dans les systèmes de distribution d'eau, des concentrations élevées de chlorure et de sulfate peuvent favoriser la corrosion, et cet effet est également reflété dans plusieurs indices qui mesurent la susceptibilité de l'eau à corroder différents types de matériaux. Ces indices incluent le rapport massique chlorure-sulfate (CSMR), l'indice Revelle (RI) et l'indice Larson (LSI, calculé comme la somme des équivalents de chlorure et de sulfate divisée par les équivalents de bicarbonate). En outre, l'indice de Langelier (LI), l'indice de stabilité de Ryznar (RSI) et l'indice d'agressivité (AI) sont des paramètres très efficaces pour évaluer l'impact corrosif et incrustant des concentrations de CaCO_3 sur les systèmes de distribution d'eau et les infrastructures industrielles. Tous ces indices sont généralement exprimés et calculés en mg/l, à l'exception de l'alcalinité, qui est mesurée en mg/l de CaCO_3 .

III.12.1 Rapport massique chlorure-sulfate (CSMR) :

indique si l'eau favorise la corrosion galvanique des connexions plombées dans les canaux de distribution d'eau. le (CSMR) > 0,5 signifie une tendance à la corrosion, il a été calculé comme :

$$\text{CSMR} = \frac{\text{Cl}}{\text{SO}_4}$$

La plupart des échantillons d'eaux souterraines (CI) (CTS) et (CTM) de cette région ont un CSMR supérieur à 0,5, sont respectivement ce qui signifie qu'ils peuvent être corrosifs pour les connexions plombées (figure.44).

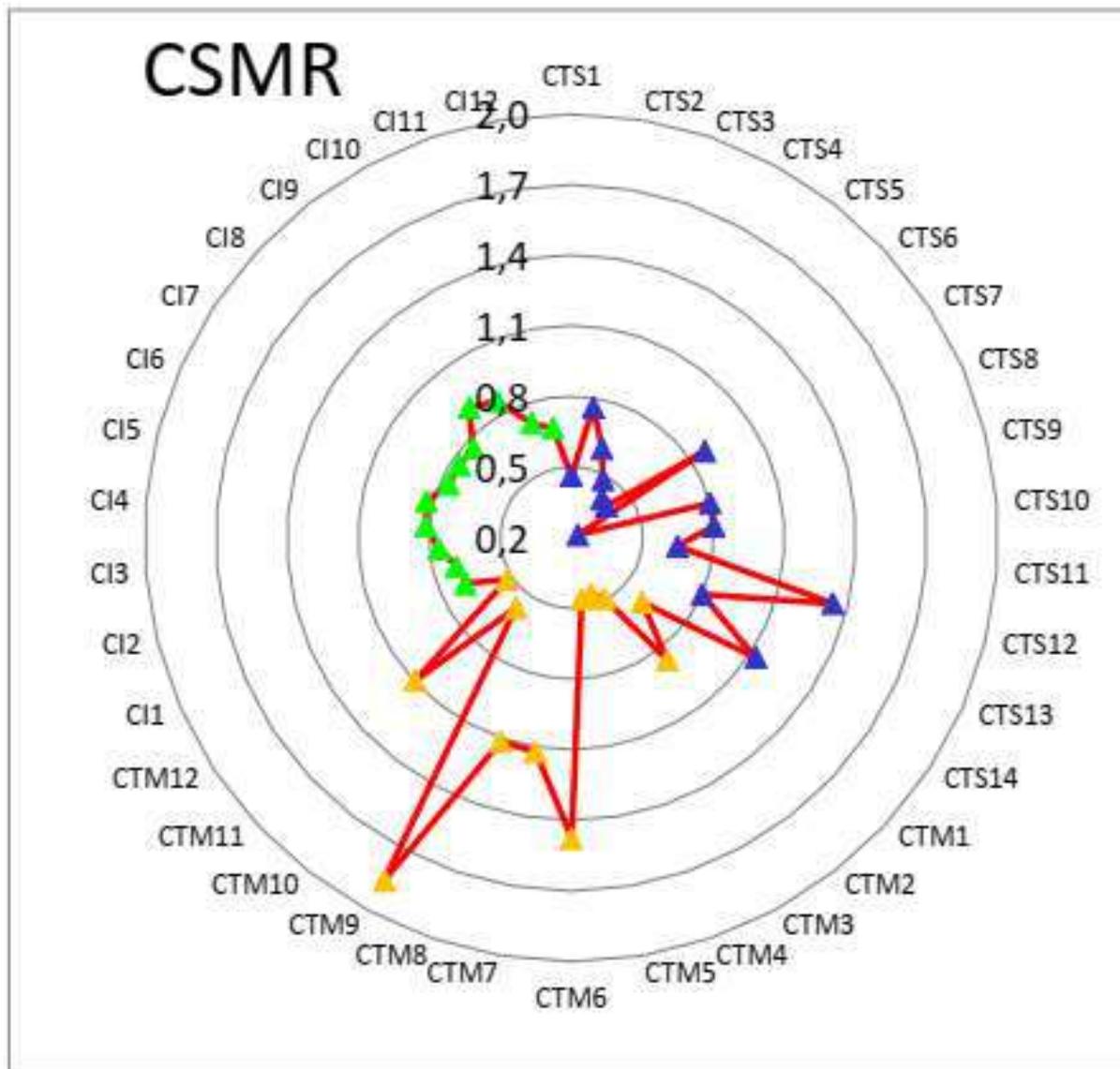


Figure 44: Rapport massique chlorure-sulfate (CSMR) des eau souterraines (CI) et (CT).

III.12.2 Indice de Revelle (RI):

Il évalue l'impact de la salinisation sur la corrosion et l'entartrage. Un RI < 0,5 indique que la chimie de l'eau n'est pas affectée par la salinité. Le (RI) a été calculé comme :

$$RI = \frac{Cl}{HCO_3}$$

Tous les échantillons d'eau souterraine ont un (RI) supérieur à 0,5 ce qui indique une influence de la salinisation sur ces phénomènes (figure.45).

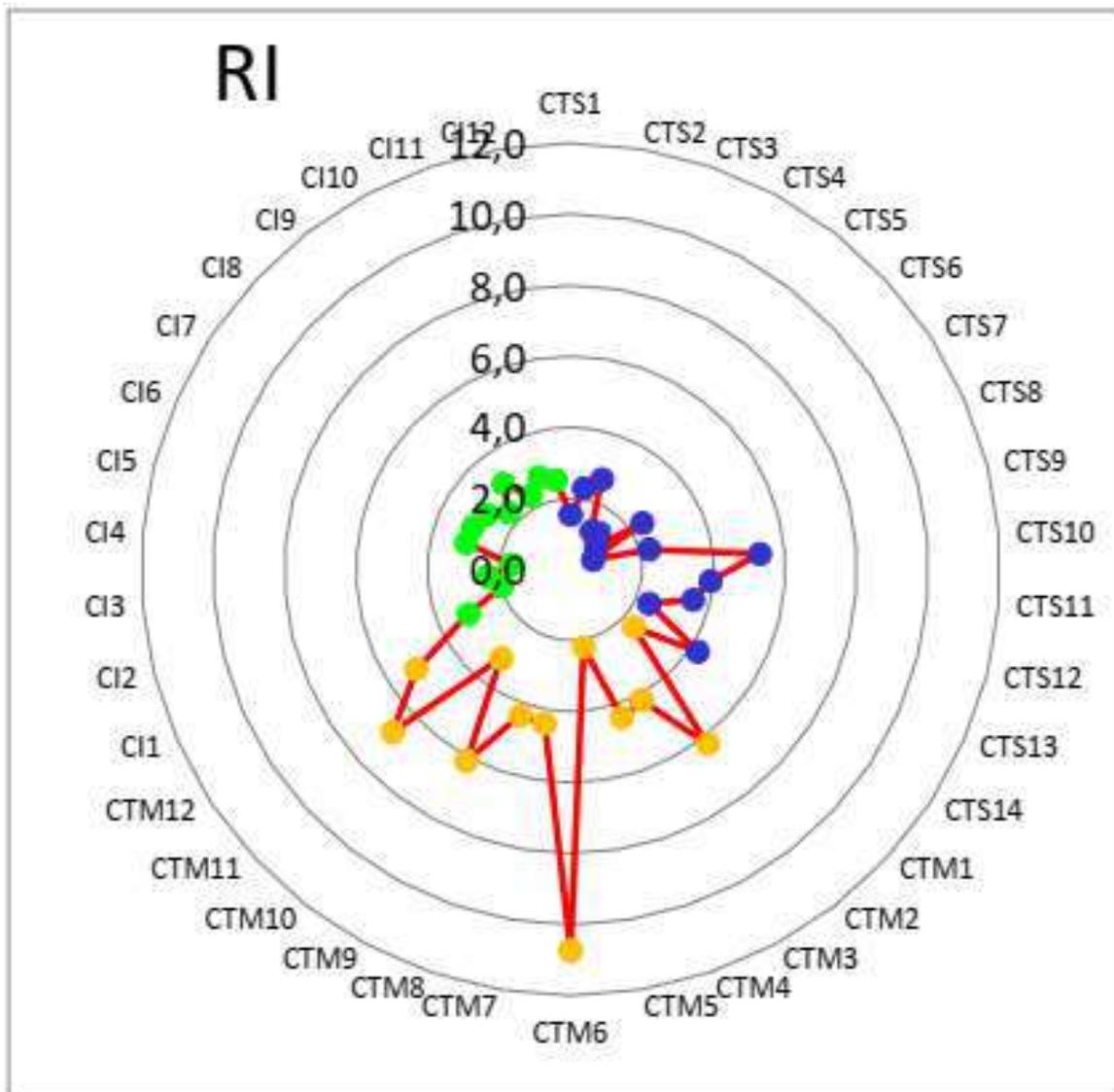


Figure 45: Indice de Revelle (RI) des eaux souterraines (CI) et (CT).

III.12.3 Indice de Larson-Skold (LSI) :

Le LSI, ou indice de Larson-Skold, est une mesure qui évalue la relation entre les anions acides forts tels que Cl^- et SO_4^{2-} , et les anions acides faibles comme CO_3^{2-} et HCO_3^- présents dans l'eau. Il a été noté que les anions HCO_3^- et SO_4^{2-} sont les plus dominants dans les échantillons d'eau.

Selon Larson et Skold ,1958, l'US-EPA ,1984, Shams et al,2012, Abbasnia et al,2018, Sajil Kumar ,2019 et Egbueri ,2020, les solutions aqueuses peuvent être classées comme suit en fonction de leurs valeurs de (LSI) :

- ✓ $\text{LSI} < 0,8$: Ces solutions ont tendance à favoriser la formation d'entartrage, ce qui signifie que des dépôts de minéraux, tels que le carbonate de calcium, peuvent se former.
- ✓ $0,8 < \text{LSI} < 1,2$: Ces solutions sont légèrement corrosives, ce qui signifie qu'elles peuvent provoquer une corrosion légère de certains matériaux comme le fer et l'acier.

✓ LSI > 1,2 : Dans ces cas, les solutions ont un potentiel de corrosion plus élevé, ce qui peut entraîner une corrosion plus importante et localisée des matériaux ferreux et en acier.

Le (LSI) est calculé en utilisant une formule spécifique, qui prend en compte les concentrations des différents ions dans l'eau.

$$LSI = \frac{(Cl + SO_4)}{(HCO_3)}$$

Les concentrations des ions $[Cl^-]$ en mg/l, $[SO_4^{2-}]$ en mg/l et $[HCO_3^-]$ en mg/l sont utilisées pour calculer le LSI, comme indiqué par **Egbueri 2020**.

Dans les échantillons d'eau étudiés, il est observé que les anions dominants sont le bicarbonate (HCO_3^-) et le sulfate (SO_4^{2-}). La présence significative de ces ions dans l'eau peut influencer l'acidité de l'eau, ce qui peut à son tour faciliter les processus de corrosion. En d'autres termes, lorsque les concentrations de bicarbonate et de sulfate sont élevées, cela peut rendre l'eau plus acide, ce qui augmente le potentiel de corrosion des matériaux en contact avec cette eau. C'est pourquoi il est essentiel de surveiller attentivement les concentrations de ces ions dans les eaux souterraines, en particulier dans les zones industrielles où la qualité de l'eau peut avoir un impact significatif sur les infrastructures et les équipements industriels.

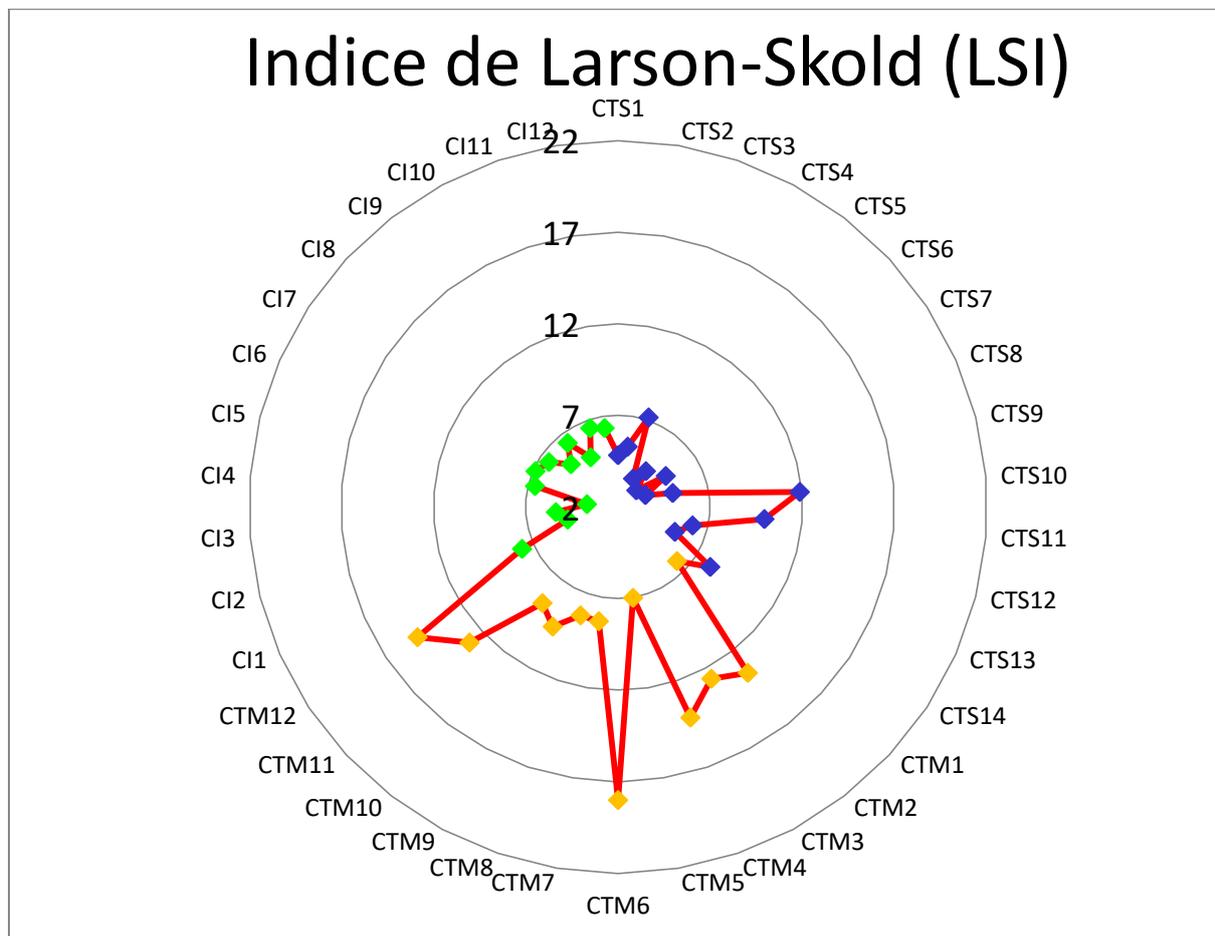


Figure 46: Indice de Larson-Skold (LSI) des eaux souterraines (CI) et (CT).

Tout les échantillons des eaux souterraines sont des valeur superieur à 1,2 (figure.46). Elle indique que les éléments précédents sont influence de l'acidité de l'eau c'est-à-dire sont facilité la corrosion des matériaux en fer et en acier.

III.12.4 L'indice de Langelier (LI):

est l'un des indices les plus couramment utilisés pour déterminer si l'eau est corrosive ou incrustante. Il est basé sur le pH, l'alcalinité totale et la dureté calcique de l'eau. Un (LI) positif indique une tendance à la formation de dépôts de CaCO_3 (entartrage), tandis qu'un (LI) négatif indique une tendance à la dissolution de CaCO_3 (corrosion).

Il est calculé selon la formule suivante :

$$LI = \text{pH} - \text{pH}_s$$

Cette formule fait intervenir les paramètres suivants :

- ✓ pH : Il s'agit du potentiel en Hydrogène de l'eau.
- ✓ pH_s : C'est le potentiel en Hydrogène de saturation de la calcite (CaCO_3).

La détermination du pH_s se fait généralement en utilisant la formule établie par Langelier, qui se présente comme suit :

$$\text{pH}_s = (\text{pK}'_2 - \text{pK}'_s) + \text{pCa} = \text{pAlc}$$

Dans cette formule :

- ✓ K'_2 représente la constante dérivée de K_2 , qui est la deuxième constante de dissociation du gaz carbonique.
- ✓ K'_s est la constante dérivée de K_s , qui correspond au produit d'activité du carbonate de calcium.
- ✓ pCa est le cologarithme de la concentration molaire en ions calcium.
- ✓ pAlc est le cologarithme de l'alcalinité totale (TAC), exprimée en équivalents g/l.

Il est important de noter que le calcul du pH_s d'une eau dépend de sa teneur en bicarbonates (pAlc), en sels de calcium (pCa), et du paramètre ($\text{pK}'_2 - \text{pK}'_s$), qui varie en fonction de la salinité totale, de la force ionique et de la température.

Lorsque l'indice LI se situe entre -0,5 et 0,5, cela signifie que l'eau est équilibrée, et l'état d'équilibre idéal est atteint lorsque LI est égal à 0,0. En revanche, un LI supérieur à 0,5 indique une tendance à l'entartrage de l'eau, tandis qu'un LI inférieur à - 0,5 suggère une forte corrosivité de l'eau. Dans ces deux derniers cas, il est nécessaire de corriger la tendance de l'eau, ce qui peut être réalisé de diverses manières, comme l'ajout d'acides ou d'alcalins, l'utilisation d'adouçissants, d'osmose inverse, ou de désalcalinisants.

En outre, pour faciliter le calcul du pH de saturation, une formule simplifiée a été proposée par Larson et Buswell :

$$pH_s = A + B - \log (Ca^{2+}) - \log (Alk). \rightarrow pH \leq 9.3$$

$$pH_s = (9.3 + A + B) - (C + D) . \rightarrow pH > 9.3$$

Ainsi que, directement à partir d'une analyse de l'eau, les tables suivantes permettent le calcul du pH de saturation :

- ✓ A représente le facteur de T.D.S (totalité des sels dissous), calculé selon $A = (\log_{10}(TDS) - 1)/10$.
- ✓ B est le facteur de température, calculé selon $B = -13.12 \times \log_{10}(T+273) + 34.55$.
- ✓ C est le facteur de dureté du calcium exprimé en °f (degrés français), calculé comme $C = \log_{10}(Ca^{2+}) - 0.4$.
- ✓ D représente le facteur d'alcalinité totale (au méthylorange) TAC exprimée en °f, calculé selon $D = \log_{10}(Alk)$.

Ces calculs au tableau suivant sont essentiels pour déterminer le pH de saturation de l'eau (pH_s), un paramètre important pour évaluer sa tendance à la corrosion ou à l'entartrage.

Tableau 11: Les facteurs de pH saturation (pH_s).

VALEUR DE B		VALEUR DE C		VALEUR DE D	
facteur de température		facteur de dureté du calcium		facteur de l'alcalinité totale	
°C	B	TH en °f	C	TAC en °f	D
0 à 1	2,6	1 à 1,1	0,6	1 à 1,1	1
2 à 5,5	2,5	1,2 à 1,3	0,7	1,2 à 1,3	1,1
6,5 à 9	2,4	1,4 à 1,7	0,8	1,4 à 1,7	1,2
10 à 13,5	2,3	1,8 à 2,2	0,9	1,8 à 2,2	1,3
14,5 à 16,5	2,2	2,3 à 2,7	1	2,3 à 2,7	1,4
17,5 à 21	2,1	2,8 à 3,4	1,1	2,8 à 3,5	1,5
22 à 26,5	2	3,5 à 4,3	1,2	3,5 à 4,4	1,6
27,5 à 31	1,9	4,4 à 5,5	1,3	4,5 à 5,5	1,7
32 à 36,5	1,8	5,6 à 6,9	1,4	5,6 à 6,9	1,8
37,5 à 43,5	1,7	7,0 à 8,7	1,5	7 à 8,8	1,9
44,5 à 50	1,6	8,8 à 11	1,6	8,9 à 11	2

51 à 56	1,5	11,1 à 13,8	1,7	11,1 à 13,9	2,1
56,5 à 63,5	1,4	13,9 à 17,4	1,8	14 à 17,6	2,2
64,5 à 71	1,3	17,5 à 22	1,9	17,7 à 22,2	2,3
72 à 81	1,2	23 à 27	2	23 à 27	2,4
82 à 89	1,1	28 à 34	2,1	28 à 35	2,5
90 à 96	1	35 à 43	2,2	36 à 44	2,6
96 à 100	0,9	44 à 55	2,3	45 à 55	2,7
		56 à 69	2,4	56 à 69	2,8
		70 à 87	2,5	70 à 88	2,9
		88 à 100	2,6	89 à 100	3

Le pH d'équilibre, également appelé pH saturé, a été calculé, et en le comparant au pH réel de l'eau, le Professeur Langelier a pu établir un indice de saturation, connu sous le nom d'indice de Langelier. Cette différence mathématique permet d'évaluer dans quelle mesure une eau est saturée en carbonate de calcium. L'indice de Langelier indique :

$$I = \text{pH réel} - \text{pHs}$$

Cette différence mathématique permet d'évaluer dans quelle mesure une eau est saturée en carbonate de calcium. L'indice de Langelier indique :

- ✓ S'il est positif, une tendance à la formation de dépôts de CaCO₃ (entartrage).
- ✓ S'il est négatif, une tendance à la dissolution de CaCO₃ (agressivité).

On constate que la plupart des échantillons d'eaux souterraines de la nappe complexe terminal (CTS) ont un indice de saturation supérieur à 0,5, ce qui suggère une tendance à l'entartrage. Cependant, quelques échantillons (CTS3, CTS11, CTS12, CTS13 et CTS14) sont en équilibre. Les eaux de la nappe complexe terminal (CTM) présentent des indices de Langelier variant entre -0,21 et 0,78, avec une valeur moyenne de 0,47, indiquant ainsi un équilibre léger. De même, les eaux de la nappe Continentale Intercalaire (CI) ont une valeur moyenne de 0,55, à l'exception de l'échantillon (CI4) qui affiche un indice de 1,05. En général, les eaux souterraines (CI) et (CTM) se caractérisent par des indices de Langelier équilibrés, situés entre -0,5 et 0,5, tandis que les eaux (CTS) montrent une tendance à l'entartrage (figure.47).

Cependant, il est essentiel de noter que l'indice de Langelier fournit uniquement une indication relative et qualitative. Il ne permet pas de déterminer si le degré de saturation est suffisant pour entraîner la formation d'un dépôt substantiel ou simplement d'un film de protection. De plus, pour des eaux peu minéralisées, présentant une faible teneur en bicarbonates de calcium, l'utilisation de l'indice de Langelier est parfois sujette à interprétation, car il peut donner des indices positifs pour des eaux en réalité agressives. C'est pourquoi, dans le but d'obtenir des indications plus précises, une notation différente est de plus en plus utilisée, connue sous le nom d'indice de stabilité ou indice de Ryznar.

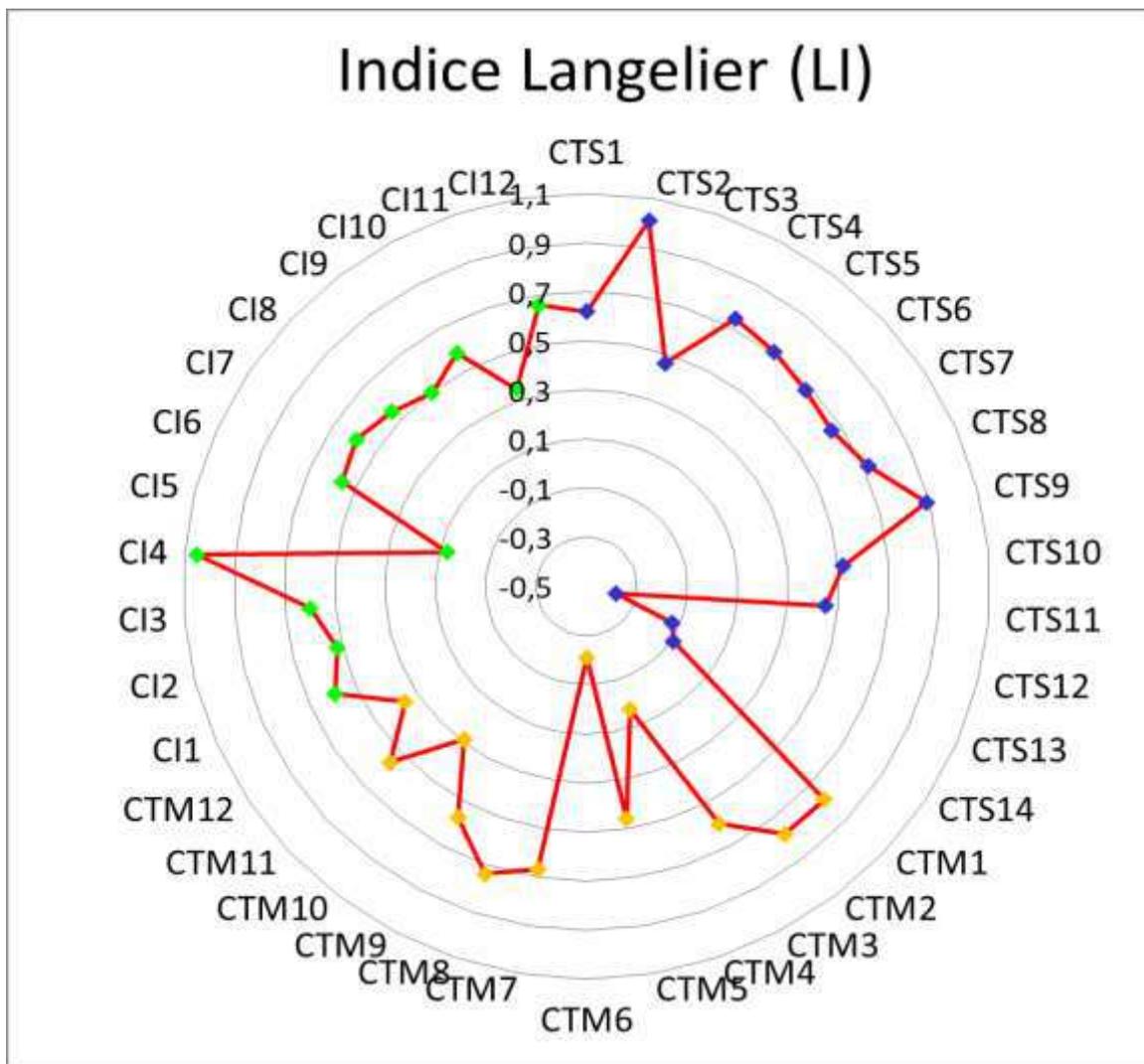


Figure 47: Indice de Langelier (LI) des eaux souterraines (CI) et (CT).

III.12.5 Indice Stabilité de Ryznar (RSI):

Il s'agit d'une adaptation de l'indice de Langelier qui permet d'évaluer la propension de l'eau à l'entartrage ou à l'agressivité. Cet indice de stabilité, abrégé RSI, est utilisé pour évaluer la tendance à la formation de dépôts ou à la corrosion de l'eau exposée à l'air. Un RSI inférieur à 6,5 indique une inclination à l'entartrage. Sa formule est la suivante :

$$RSI = 2pH_s - pH$$

Les composants de cette formule sont les suivants :

- ✓ pH : le potentiel en hydrogène de l'eau.
- ✓ pH_s : le potentiel en hydrogène de saturation de la calcite (CaCO₃).

L'évaluation du RSI se traduit comme suit :

- Si RSI est inférieur ou égal à 6,5 : l'eau n'a pas de tendance corrosive.
- Si RSI est supérieur à 6,5 et inférieur ou égal à 7,2 : il y a une corrosion légère.
- Si RSI est supérieur à 7,2 et inférieur ou égal à 7,8 : une corrosion légère est présente (elle devient sévère si la température dépasse 60°C).
- Si RSI est supérieur à 7,8 et inférieur ou égal à 8,5 : une corrosion sévère se manifeste (surtout si la température est supérieure à 15°C).
- Si RSI est supérieur à 8,5 : une corrosion très importante se produit, ce qui signifie qu'un métal peut se corroder facilement.

Tous les échantillons d'eaux souterraines provenant des nappes (CTS), (CTM) et (CI) présentent des valeurs de Ryznar allant respectivement de 5,8 à 7,8, de 6,2 à 7,5 et de 5,7 à 6,9, avec des moyennes de 6,6, 6,7 et 6,4 (figure.48).

Par conséquent, les eaux des nappes CTS et CTM sont stables ou modérément agressives, tandis que les eaux de la nappe CI, bien qu'elles aient des valeurs relativement basses, présentent une légère agressivité en raison de la température élevée, située entre 55 et 60°C.

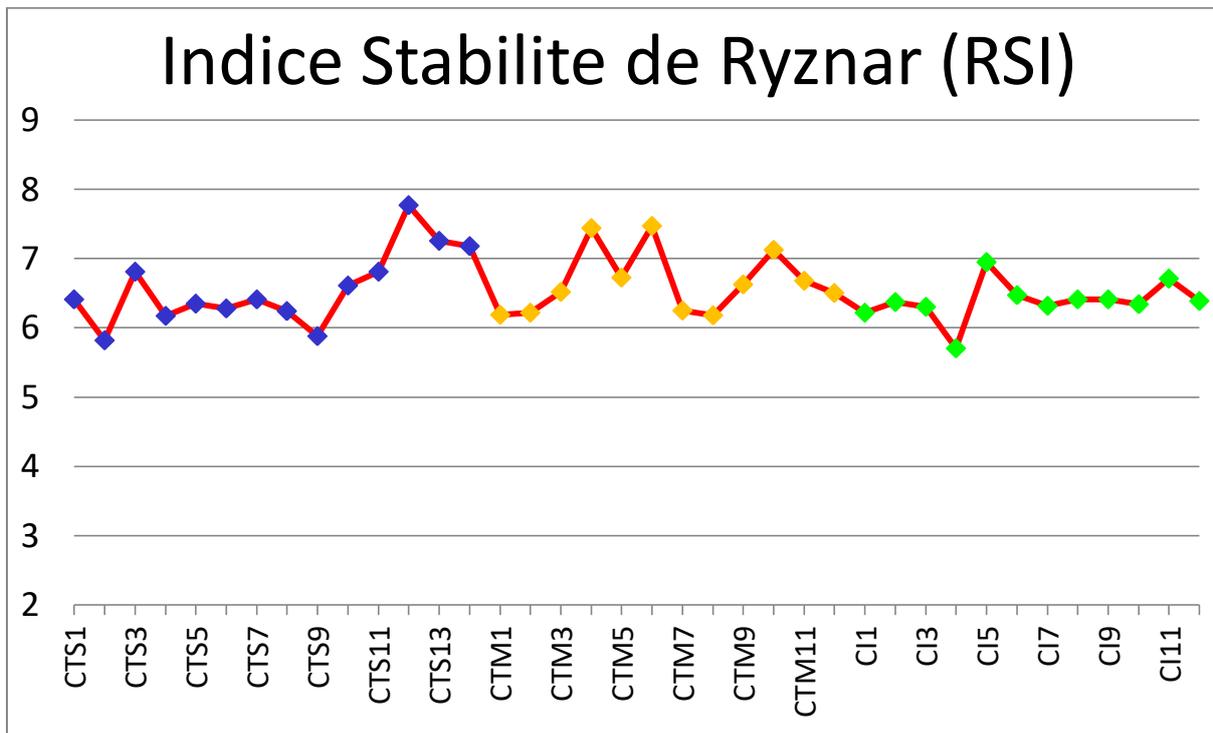


Figure 48 : Indice stabilité de Ryznar (RSI) des eaux souterraines (CI) et (CT).

III.12.6 Indice Agressivite (AI):

L'indice d'agressivité (AI) est une méthode plus simple que l'indice de Langelier (LI). Il dépend du pH, de l'alcalinité totale et de la dureté calcique, ne nécessitant pas les valeurs de température et de TDS. (AI) est un paramètre utilisé pour évaluer la corrosivité de l'eau en tant qu'alternative à l'indice de Langelier. Cependant, il est moins précis que le (LI) est généralement considéré comme un indicateur qualitatif plutôt qu'une mesure quantitative.

L'AI est déterminé à l'aide de la formule suivante :

$$AI = pH + \log[(Alk)(H)]$$

Les composants de cette formule sont :

- ✓ pH : le potentiel en hydrogène de l'eau.
- ✓ Alk : l'alcalinité totale en CaCO₃ (mg/l).
- ✓ H : la dureté calcique en CaCO₃ (mg/l).

Les interprétations de l'indice d'agressivité sont les suivantes :

- AI > 12 : Non agressif.
- 10 < AI < 12 : Modérément agressif.
- AI < 10 : Très agressif.

Tous les échantillons d'eaux souterraines provenant des nappes (CI), (CTM) et (CTS) présentent des valeurs d'indice d'agressivité variant entre 10 et 12 (figure.49). Cela indique que ces eaux sont modérément agressives. Ce résultat est cohérent avec l'indice de Ryznar.

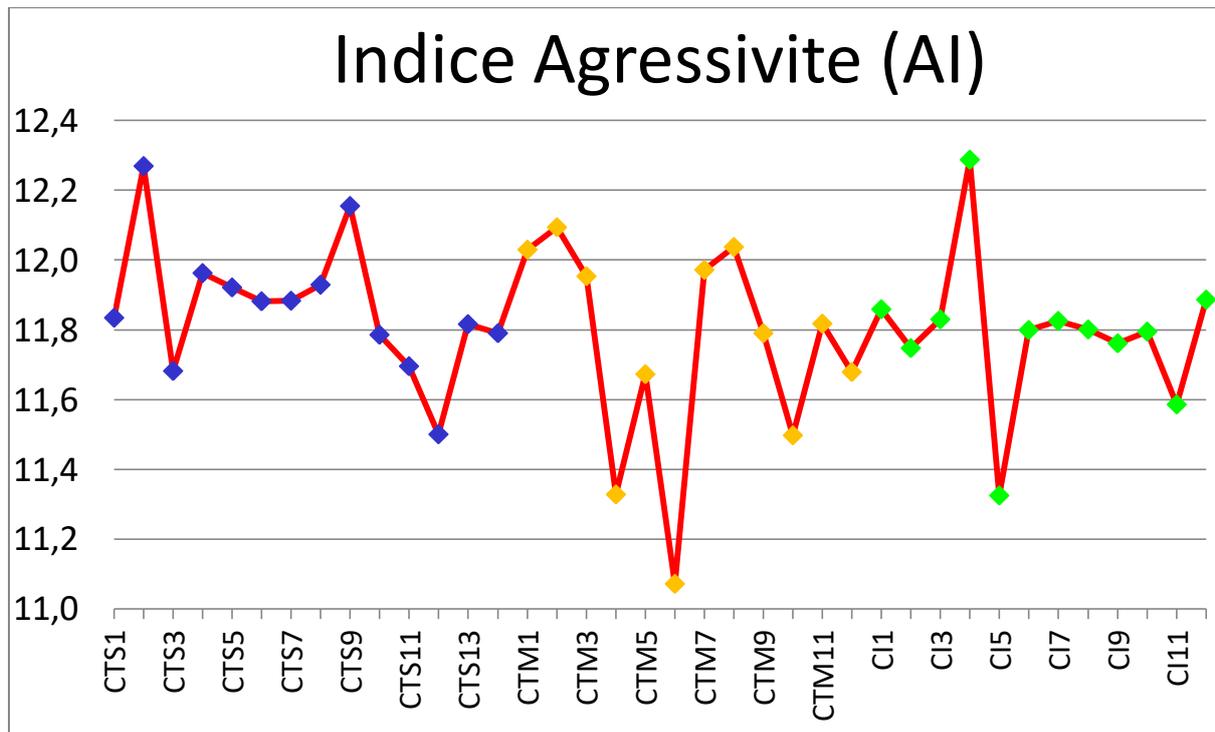


Figure 49: Indice agressivité (AI) des eaux souterraines (CI) et (CT).

III.12.7 Indice de Puckorius (IP):

L'indice de Puckorius (IP) est une mesure basée sur la relation entre le pH et l'alcalinité de l'eau, ce qui est essentiel pour évaluer et quantifier la tendance à l'entartrage dans les systèmes domestiques et industriels. En d'autres termes, il s'agit de la capacité d'une eau à tamponner et à précipiter des substances pour atteindre un équilibre (Egbueri, 2020). Cet indice est calculé selon la formule suivante :

$$IP = 2pH_s - pHeq$$

Avec :

$$pHeq = 1.465 \times \log_{10}(\text{Alk}) + 4.54$$

Selon les directives de l'US-EPA (1984), l'eau peut être classée comme suit en fonction de son indice de Puckorius (IP) :

- $IP < 6$: Tendance à l'entartrage.
- $6 \leq IP \leq 7$: Tendance légère à l'entartrage et à la corrosion.
- $IP > 7$: Tendance significative à la corrosion.

Dans cette étude, la plupart des échantillons d'eau des nappes peu profondes (CTS) et (CTM) présentent des indices de Puckorius (IP) compris entre 7 et 8, ce qui indique une tendance à la corrosion. En revanche, tous les échantillons d'eau de la nappe Continentale Intercalaire (CI), qui est plus profonde, environ 1500 m, et plus chaude, avec une température d'environ 55°C, présentent des valeurs de (IP) comprises entre 6 et 7. Cela signifie que cette eau est en équilibre, c'est-à-dire qu'elle a peu de tendance à l'entartrage et à la corrosion (figure.50).

Cependant, il est important de noter que l'élévation de la température de l'eau dans la nappe (CI) peut entraîner des réactions chimiques plus rapides, notamment en ce qui concerne la formation de tartre et la corrosion. Pour utiliser cette eau, un refroidissement préalable est nécessaire, souvent réalisé à l'aide de tours de refroidissement. Pendant, le transport de l'eau à travers des canalisations, des refroidisseurs, des tuyaux, et d'autres composants similaires peut favoriser la corrosion et la précipitation de tartre.

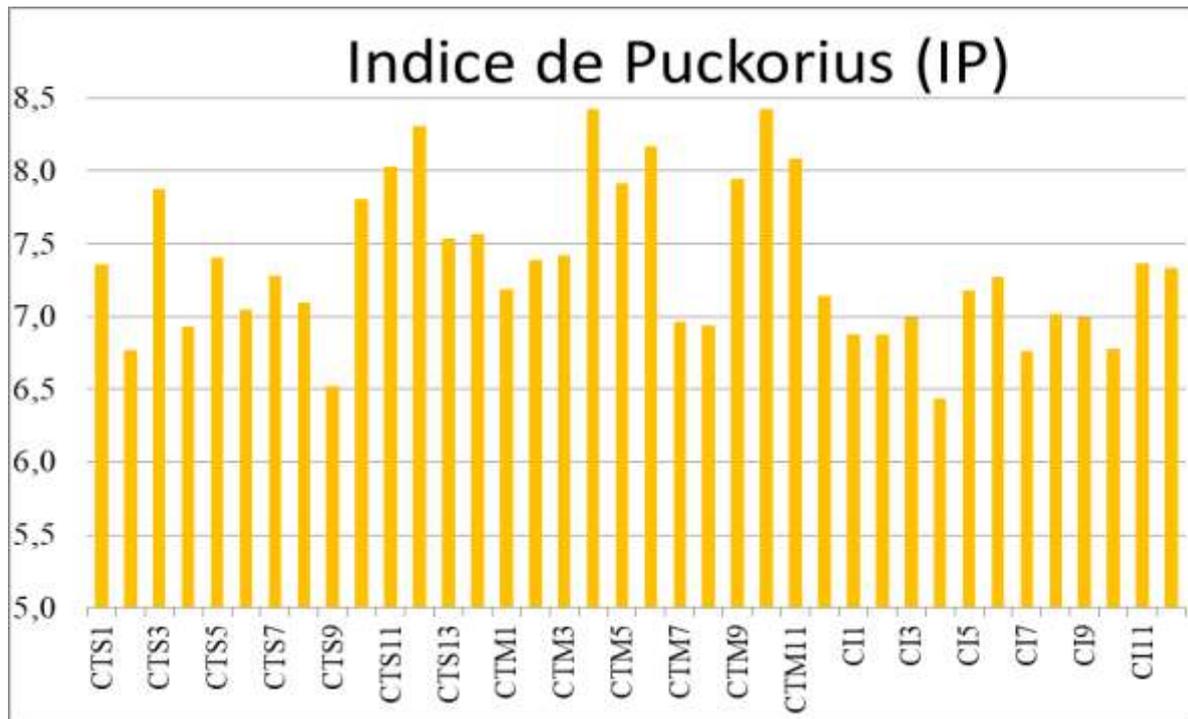


Figure 50: Indice Puckorius (IP) des eaux souterraines (CI) et (CT).

Tableau 12: Potentiel de corrosivité et d'entartrage et leurs indices de qualité des eaux souterraines dans l'aquifère étudié

Paramètres	Intervalle	Indication	Nombre d'échantillons en % (CI)	Nombre d'échantillons en % (CTM)	Nombre d'échantillons en % (CTS)
Indice de Langelier (LI)	< 0	L'eau est sous-saturée en CaCO ₃ et a tendance à se corroder	17	08	21
	0	L'eau est saturée (en équilibre) en CaCO ₃ et n'a pas de tendance à l'entartrage	75	92	64
	> 0	L'eau est sursaturée en CaCO ₃ et a tendance à s'entartrer	08	00	15
Indice stabilité	< 5,5	Lourd			
	5.5–6.2	Échelle	08	00	14

de Ryznar (RSI)	6.2–6.8	Pas d'échelle	84	75	50
	6,8–8,5	Agressif	08	25	36
	> 8,5	Très agressif			
Indice de Larson-Skold (LSI)	< 0,8	Tendance à l'entartrage			
	0,8–1,2	Des taux de corrosion plus élevés peuvent être obtenus			
	> 1.2	Des taux élevés de corrosion localisée peuvent être attendus	100	100	100
Indice Puckorius (IP)	< 6	Tendance à l'entartrage	00	00	00
	6–7	Tendances peu entartrantes et corrosives	58	17	14
	> 7	Tendance corrosive importante	42	83	86
Indice agressivité (AI)	IA < 10	Très corrosif (très agressif)			
	10 < IA < 12	Modérément corrosif	100	100	100
	IA < 12	Tendance à l'entartrage et tendance non agressive			
Ce tableau est repris de Kalyani et al,2017					

La qualité des eaux souterraines dans la région de Hassi Messaoud, cruciale pour les industries pétrolières locales, est soumise à des problèmes de corrosion et d'entartrage. Ces défis résultent de facteurs tels que la composition géologique du sol, les températures élevées et la présence de divers ions dans l'eau. Les indices comme le CSMR, le RI, le LSI, le LI, le RSI, l'AI et l'IP offrent une évaluation précieuse de la tendance à la corrosion et à l'entartrage. Les résultats indiquent une prédominance de tendances à la corrosion dans les nappes peu profondes, tandis que les eaux de la nappe CI présentent une stabilité relative. Cependant, une surveillance continue est nécessaire pour maintenir la qualité de l'eau et éviter les conséquences néfastes sur l'industrie et l'environnement.

III.13 Processus primaire de la minéralisation :

La composition chimique des eaux souterraines est marquée par la prédominance de certains ions par rapport à d'autres, soit en raison de leur abondance naturelle, soit en raison de processus anthropiques. L'abondance de ces éléments découle de divers processus de minéralisation, qui peuvent être d'origine naturelle ou humaine. Certains de ces processus sont associés à des interactions avec la formation géologique environnante, et leur contribution dépend de la durée de séjour de l'eau dans la couche aquifère.

L'étude de la minéralisation des eaux du système aquifère de Hassi Messaoud, qui englobe les nappes CI et CT, implique plusieurs étapes. Tout d'abord, pour évaluer la saturation de l'eau vis-à-vis de certains minéraux carbonatés et évaporitiques, des calculs ont été effectués à l'aide des logiciels Excel et (SPSS) pour déterminer la force ionique et les indices de saturation.

De plus, afin de comprendre les mécanismes responsables de cette minéralisation, il était essentiel de déterminer l'origine de chaque composant chimique. Cette démarche a été réalisée en examinant les corrélations entre les différents anions et entre les différents cations, ainsi qu'en analysant le comportement des éléments provenant de sources similaires.

En résumé, cette étude vise à décortiquer la composition chimique des eaux souterraines de Hassi Messaoud, en évaluant leur degré de saturation par rapport à certains minéraux et en identifiant les processus clés contribuant à leur minéralisation, le tout grâce à une analyse méticuleuse des corrélations chimiques et du comportement des éléments.

III.13.1 Notion d'activité ionique :

L'évaluation de l'équilibre chimique des eaux souterraines étudiées et de leur saturation par rapport aux minéraux repose sur le calcul des activités ioniques, prenant en compte les interactions électrostatiques entre les différents ions en solution. Dans une solution idéale, l'activité est équivalente à la concentration ($a_i = m_i$) (Daoud, 1992).

Les valeurs de la force ionique calculées pour les eaux de la nappe Mio-Pliocène (CTM) de Hassi Messaoud varient entre un minimum de $3,15 \times 10^{-2}$ et un maximum de $8,32 \times 10^{-2}$. Les eaux de la nappe profonde du Sénonien (CTS) présentent des valeurs de force ionique situées entre $2,82$ et $4,97 \times 10^{-2}$. De même, dans la nappe la plus profonde, le Continental Intercalaire (CI), les valeurs de force ionique se situent entre $3,66$ et $4,84 \times 10^{-2}$, bien inférieures à celles enregistrées dans la nappe superficielle.

Cette variation des valeurs de la force ionique entre les différentes nappes aquifères de Hassi Messaoud témoigne des différences dans la composition chimique de ces eaux souterraines,

ce qui peut avoir des implications significatives en termes de stabilité et de saturation vis-à-vis des minéraux.

III.13.2 Indice de saturation (IS) :

En géochimie, les eaux souterraines agissent comme un réservoir de différentes espèces ioniques, résultant de divers processus, qu'ils soient d'origine naturelle ou anthropique. L'origine de l'eau et les échanges qu'elle subit avec l'atmosphère et/ou le sol jouent un rôle significatif dans cette composition chimique. Par conséquent, il est essentiel d'évaluer l'indice de saturation (IS) d'une eau par rapport à un minéral, étant donné que le pH est souvent un paramètre influençant. Pour ce faire, l'indice de saturation (IS) de cette eau par rapport au minéral concerné est calculé. Il est défini comme suit :

$$IS = \log (PAI/K)$$

- ✓ PAI : représente le produit de solubilité exprimé en utilisant les activités ioniques.
- ✓ K : est la constante d'équilibre associée à la dissolution du minéral.

On suppose que, à l'équilibre, l'activité d'un minéral donné est égale à 1, ce qui implique $PAI = K$, et par conséquent $IS = \log (PAI/K) = 0$.

Dans le contexte des solutions aqueuses :

- Si $IS = 0$, l'eau est en équilibre (saturée) par rapport au minéral.
- Si $IS < 0$, l'eau est sous-saturée par rapport au minéral, ce qui signifie que l'eau va dissoudre le minéral.
- Si $IS > 0$, l'eau est sursaturée, ce qui signifie que l'eau va précipiter le minéral.

Cependant, il est important de noter que l'indice de saturation dépend de la précision des mesures des concentrations ioniques et du pH, en particulier lors de la saturation vis-à-vis des minéraux carbonatés. Les variations du pH et les erreurs dans les analyses chimiques peuvent entraîner des inexactitudes dans le calcul de l'indice de saturation. De plus, dans un système calco-carbonique, la sous-saturation de l'eau en contact avec les carbonates est liée à de courtes périodes de contact avec la roche. À l'inverse, la sursaturation est associée à de longues périodes de contact ou à des dégazages dans l'aquifère. Par conséquent, il est recommandé de considérer que la saturation est atteinte dans une plage légèrement plus large, telle que $-1 < IS < 1$ (Daoud, 1992 ; Bouselsal 2016).

III.13.3 Saturation des minéraux carbonatés :

L'évaluation de la saturation des minéraux carbonatés, tels que la calcite, l'aragonite ($CaCO_3$), la dolomite ($CaMg(CO_3)_2$), et la magnésite ($MgCO_3$), a été réalisée dans le cadre de cette étude. Les eaux souterraines de Hassi Messaoud montrent principalement des valeurs

positives pour les indices de saturation ($IS > 0$) par rapport à la calcite, à l'exception de quelques échantillons qui présentent des valeurs négatives (figure.51).

Globalement, ces indices restent inférieurs à 1, indiquant un état de saturation par rapport à la calcite. En revanche, la grande majorité des échantillons montre des valeurs d'indices de saturation vis-à-vis de la dolomite supérieures à 1, ce qui signifie que les eaux souterraines étudiées sont sursaturées par rapport à ce minéral. Cette différence dans le degré de déséquilibre entre la calcite et la dolomite est attribuable aux taux de dissolution distincts de ces minéraux, dépendant de leur cinétique respective.

III.13.4 Saturation des minéraux évaporitiques :

L'analyse de la saturation des minéraux évaporitiques, tels que l'halite ($NaCl$), le gypse ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) et l'anhydrite ($CaSO_4$), a également été réalisée. Tous les échantillons provenant du système aquifère CI et CT étudié présentent des indices de saturation négatifs ($IS < -1$) en ce qui concerne l'halite, ce qui indique que les eaux souterraines sont en sous-saturation par rapport à ce minéral (figure.51). Cependant, ces mêmes échantillons montrent un état de saturation vis-à-vis des minéraux sulfatés, à savoir le gypse et l'anhydrite. Par conséquent, il est très probable qu'il y ait une importante dissolution de l'halite, du gypse et de l'anhydrite dans ces eaux souterraines.

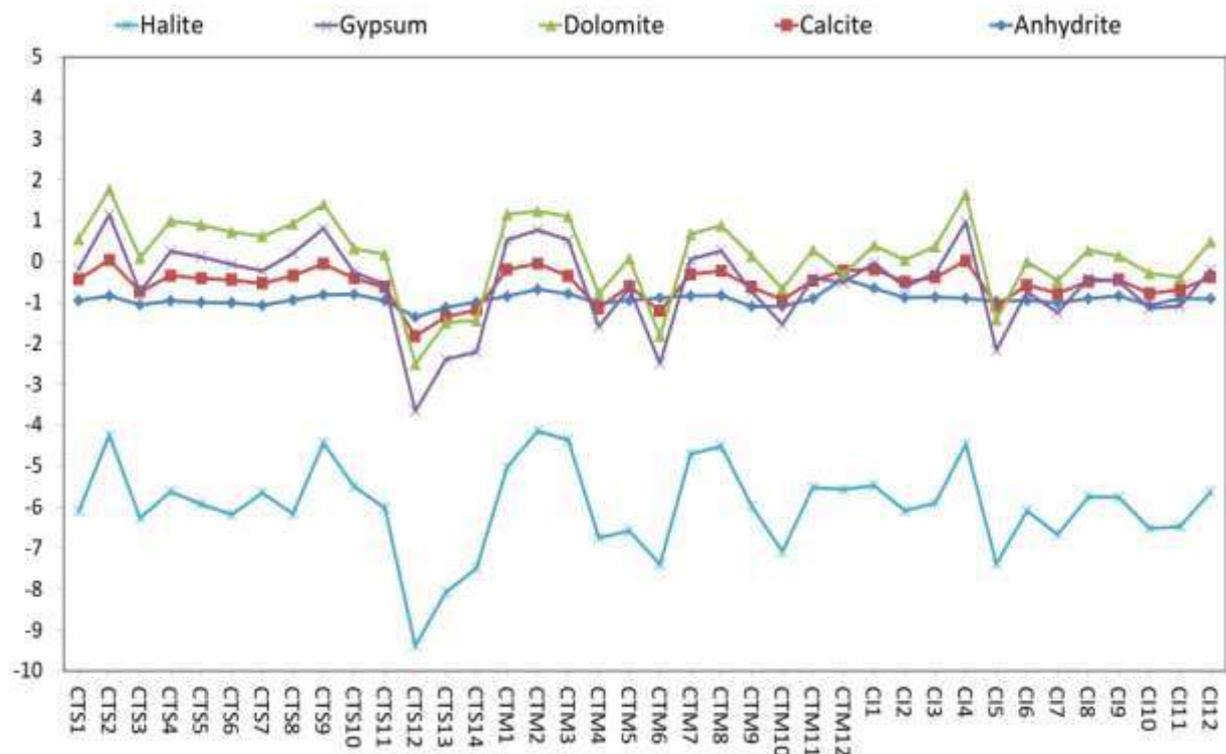


Figure 51: les indices de saturations évaporitique et carboniques.

III.13.5 Corrélations anions/ Σ anions et cations/ Σ cations :

Dans le but d'identifier les principaux éléments responsables de la salinité des eaux souterraines de Hassi Messaoud, des corrélations ont été établies entre la somme des anions (Σ anions) et chaque anion, d'une part, et entre la somme des cations (Σ cations) et chaque cation, d'autre part. Pour la grande majorité des échantillons d'eau souterraine, il existe une corrélation significative entre le sodium et le calcium avec la somme des cations. De même, le chlorure et le sulfate montrent une corrélation notable avec la somme des anions.

En revanche, le bicarbonate et le magnésium présentent une corrélation plus faible avec la somme des anions et des cations respectivement. Ceci suggère que les ions sodium, calcium, chlorure et sulfate ont contribué de manière significative à l'accumulation de la salinité dans les eaux souterraines du système aquifère (CI) et (CT) de cette zone (Figure.52 et 53).

III.13.6 Correlation des éléments majeurs

Après avoir identifié les éléments majeurs qui ont contribué à la salinité des eaux souterraines de Hassi Messaoud, il était essentiel de déterminer leur source. Pour ce faire, nous avons examiné la variation de leurs concentrations en relation les unes aux autres, en tenant compte des minéraux présents dans le milieu sédimentaire naturel, notamment les minéraux évaporitiques. Une corrélation significative entre deux éléments majeurs suggère une origine commune, généralement la dissolution du minéral dont ils sont issus.

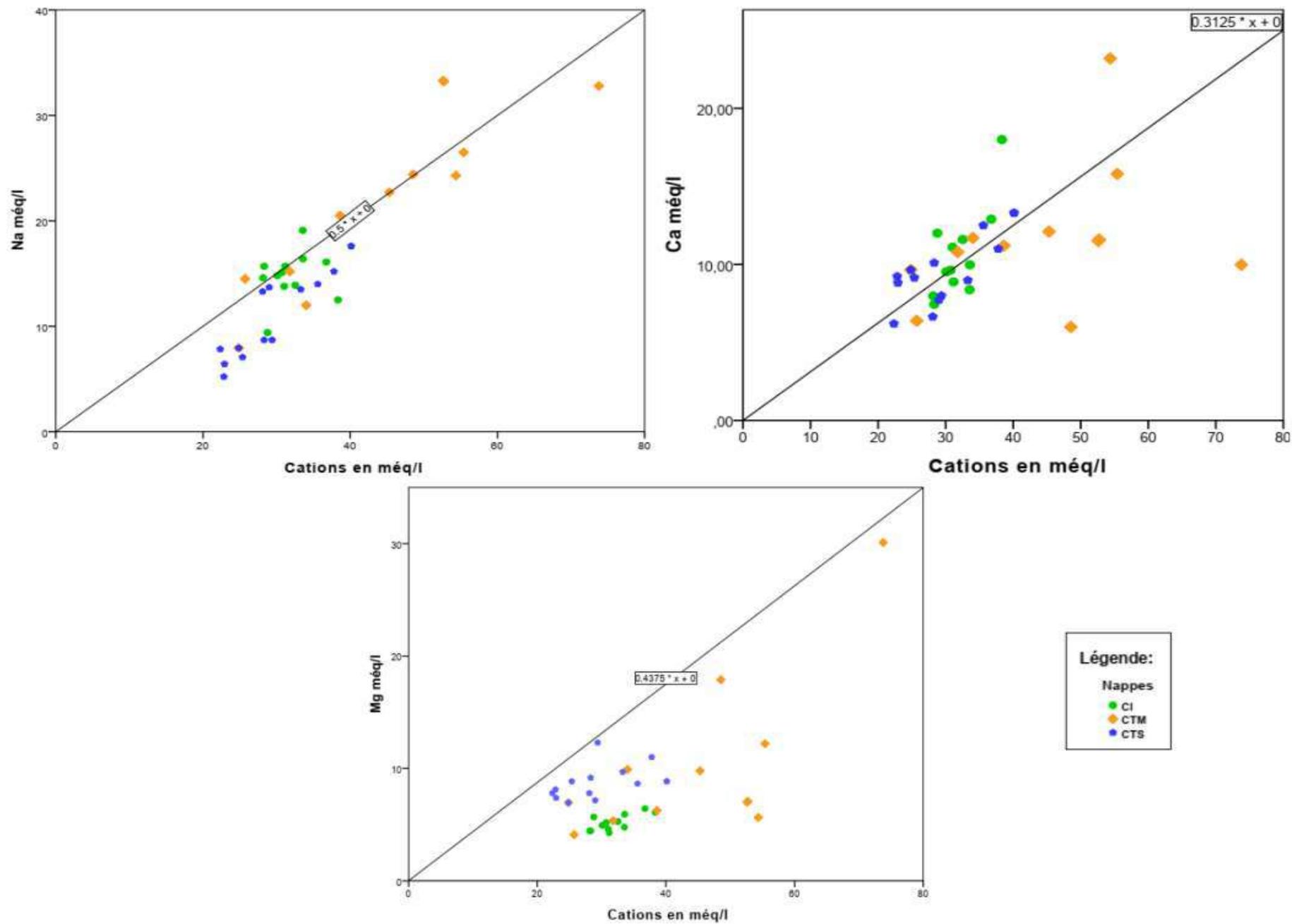


Figure 52 : Corrélation des cations/ Σ cations des eaux souterraines.

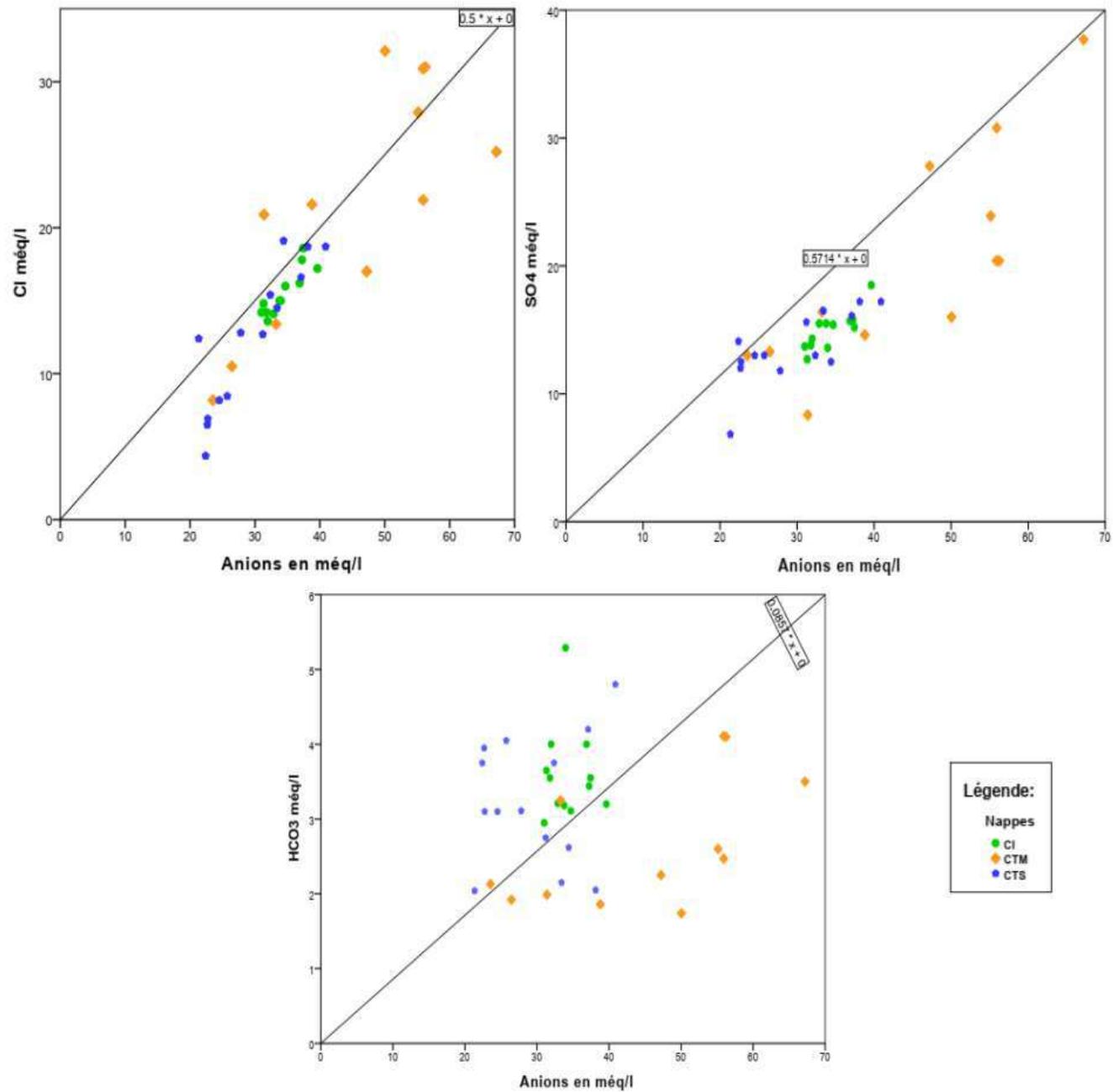


Figure 53: Corrélation des anions/ Σ anions des eaux souterraines.

III.1.1.12 Na/Cl

Sur le diagramme représentant la relation entre le sodium (Na) et le chlorure (Cl), les échantillons des eaux souterraines des différentes nappes CI et CT (CTM, CTS) de la zone d'étude montrent une corrélation significative entre ces deux éléments, avec un coefficient de détermination (R^2) d'environ 0,8 (figure.54). Cette forte corrélation suggère que le sodium et le chlorure proviennent probablement de la même source, qu'est la dissolution de l'halite (NaCl) (Bouselsal et Belksier 2018).

De plus, les indices de saturation négatifs indiquent que les eaux étudiées sont sous-saturées par rapport à l'halite, ce qui confirme cette hypothèse. Cependant, les échantillons de la nappe Mio-Pliocène (CTM) montrent une dispersion plus importante des points, suggérant une absence de corrélation entre le sodium et le chlorure. Malgré cela, ces eaux présentent également des indices de saturation négatifs par rapport à l'halite, indiquant une sous-saturation par rapport à ce minéral. Cela suggère que la dissolution de NaCl dans cette nappe a peut-être été influencée ou perturbée par d'autres processus de minéralisation complémentaires. Il convient de noter que les eaux de cette nappe présentent des variations relativement importantes dans les concentrations de sodium et de chlorure, ce qui met en évidence l'impact significatif du mélange des masses d'eau et de la pollution d'origine anthropique. De plus, la présence de lentilles argileuses discontinues peut également jouer un rôle dans ces variations.

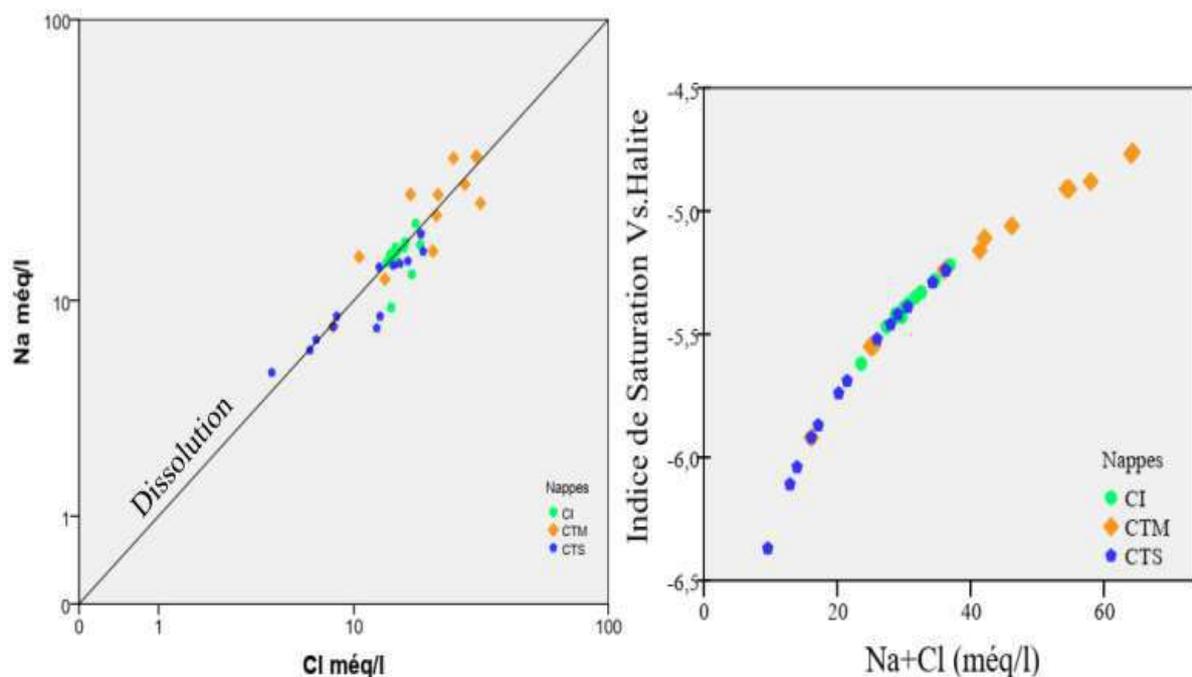


Figure 54: Corrélation Na/Cl et IS/Na+Cl des eaux souterraines.

III.1.1.13 Ca/SO₄ :

Les échantillons d'eaux provenant des différentes nappes de Hassi Messaoud, à savoir CI et CT, présentent une tendance à s'aligner en dessous de la ligne 1:1 ou suivent une droite avec une pente proche de l'unité ($R^2 = 0,6$) (figure 55). Cette observation suggère que la dissolution du gypse et de l'anhydrite a été perturbée par différents processus de minéralisation et de mélange.

Cette perturbation est également confirmée par les valeurs négatives des indices de saturation, qui évoluent de manière linéaire. Ces indices de saturation négatifs par rapport au gypse et à l'anhydrite indiquent que les eaux sont sous-saturées par rapport à ces minéraux sulfatés. De plus, la corrélation entre les concentrations de sulfate et de calcium suggère que les sulfates sont en excès par rapport au calcium. Cela indique que la mise en solution du gypse et de l'anhydrite a été influencée par d'autres processus de minéralisation, notamment la pollution d'origine anthropique dans le cas de la nappe peu profonde Mio-Pliocène (CTM) d'une part, et l'impact d'un échange de cations positif d'autre part.

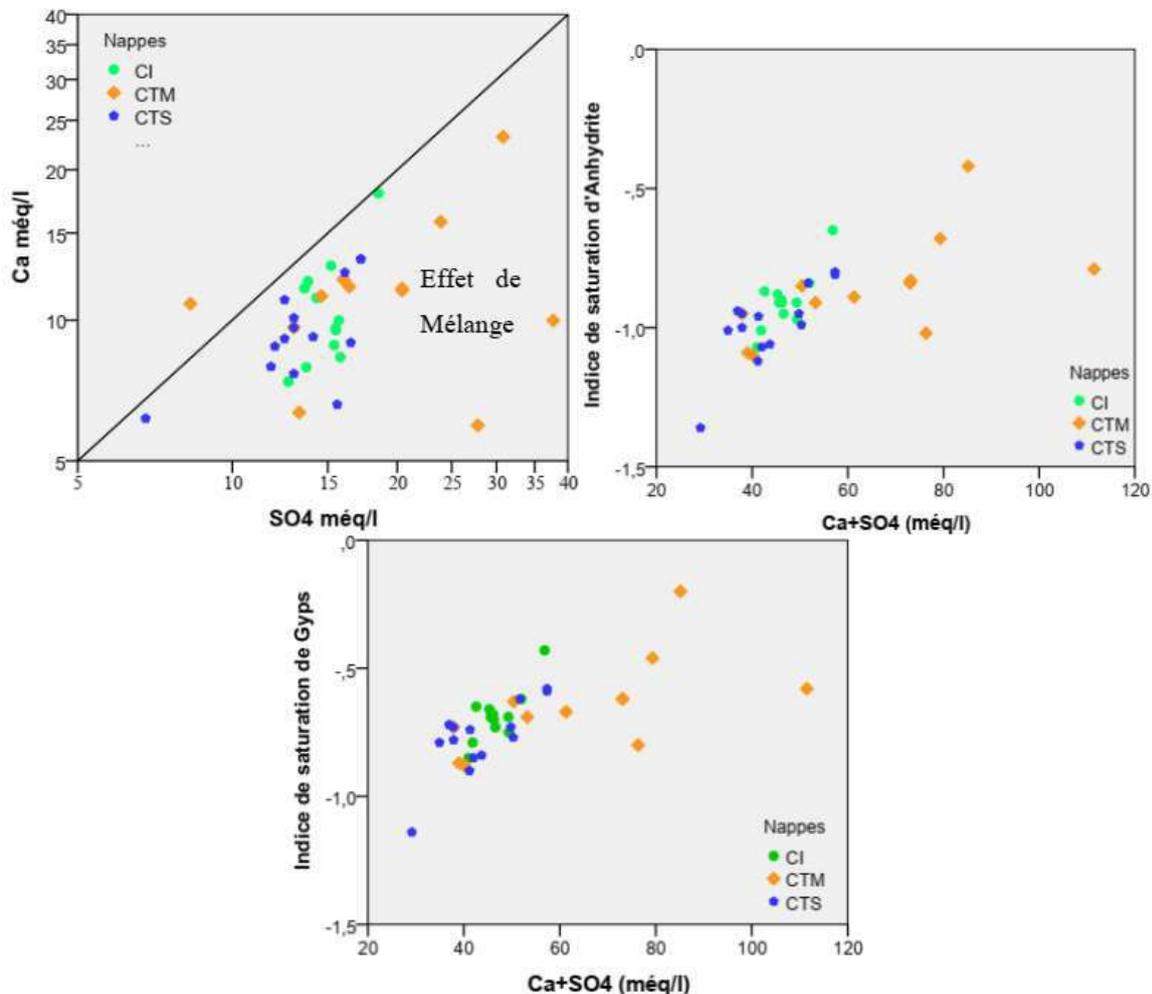


Figure 55 : Corrélation Ca/SO₄ et IS (gypse et Anhydrite)/Ca+SO₄.

III.1.1.14 Mg/ SO₄ :

Le rapport entre le magnésium (Mg) et le sulfate (SO₄), tout comme le rapport entre le calcium (Ca) et le sulfate (SO₄), montre que la plupart des échantillons s'alignent en dessous de la ligne 1:1, Cela suggère un excès de sulfates par rapport au magnésium (Bouselsal 2016), ce qui signifie que la mise en solution a été influencée par d'autres processus de minéralisation (figure 56).

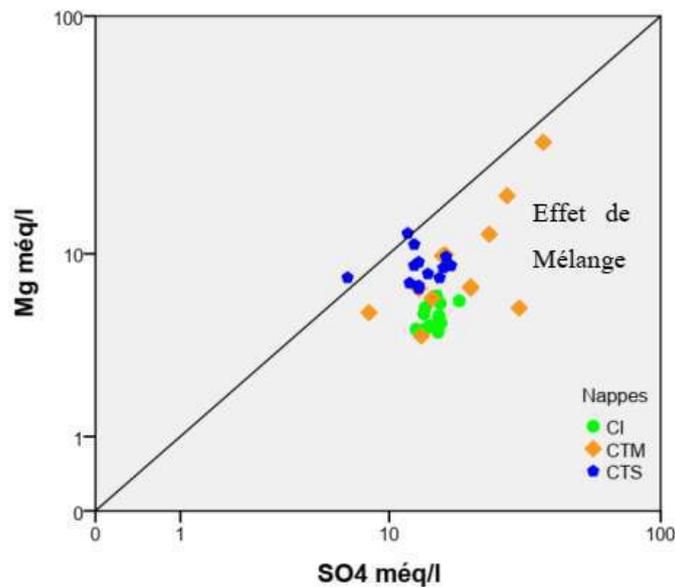


Figure 56:Corrélation Mg/SO₄ des eaux souterraines.

III.1.1.15 Diagramme de Gibbs

Le diagramme de Gibbs est un outil utile pour comprendre l'interaction géochimique entre les minéraux constituant la roche de l'aquifère et les eaux souterraines. Il se divise en deux parties équilatérales. La première partie représente le rapport entre le sodium (Na) et la somme du sodium et du calcium (Na/(Na+Ca)) pour les cations, tandis que la deuxième partie représente le rapport entre le chlorure (Cl) et la somme du chlorure et du bicarbonate (Cl/(Cl+HCO₃)) pour les anions, exprimés en mg/l. Les échantillons d'eau sont tracés séparément en fonction de leurs TDS respectives (Hammed et al. 2023; Boussaada et al. 2023).

Ce diagramme met en évidence que la plupart des échantillons d'eaux souterraines des nappes CI et CT (CTS, CTM) sont davantage influencés par des processus d'évaporation que par l'altération de la roche. Cela suggère que l'évaporation est le principal mécanisme qui contrôle l'évolution des ions dans ces eaux (figure.57).

Cependant, il est important de noter que l'interaction par évaporation ne reflète pas l'ensemble des caractéristiques lithologiques des aquifères CI et CT. Le diagramme de Gibbs permet

simplement de mettre en évidence la nature de l'origine du faciès chimique de l'eau et d'établir des relations entre les rapports caractéristiques.

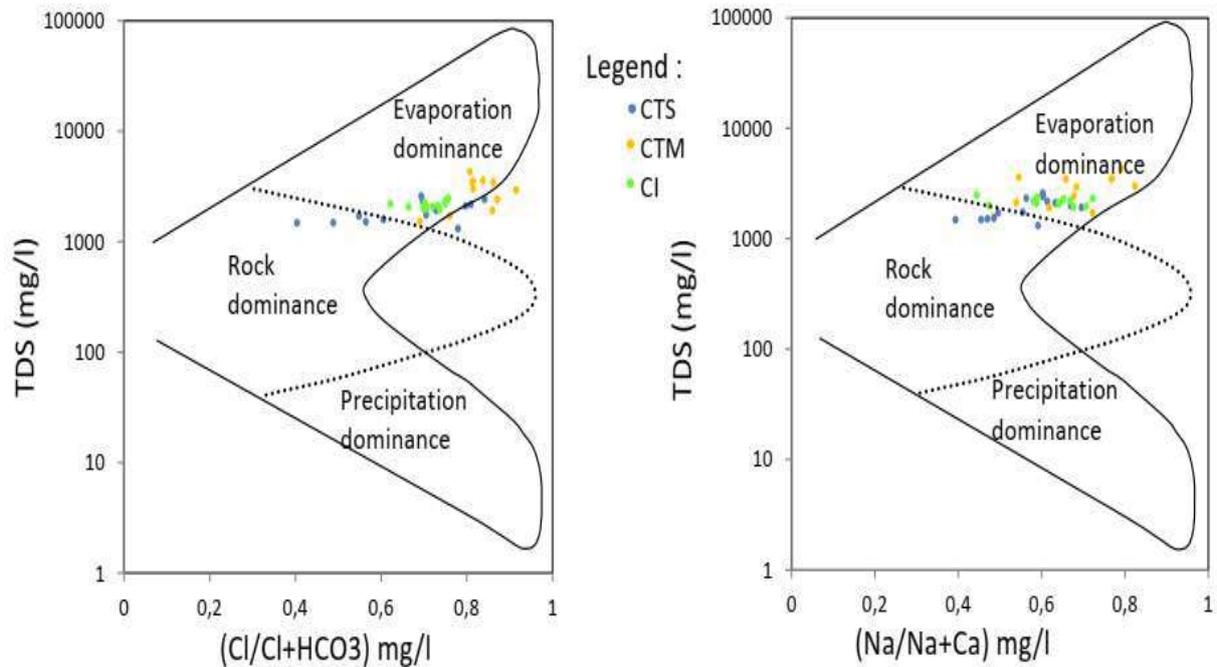


Figure 57: Diagramme de Gibbs des eaux souterraines.

III.1.1.16 Rapports caractéristiques :

Les rapports $\text{HCO}_3/\text{Na} - \text{Ca}/\text{Na}$ et $\text{Mg}/\text{Na} - \text{Ca}/\text{Na}$ (figure.58 a et b) permettent de comprendre les mécanismes d'interaction géochimique, notamment l'altération des silicates, la dissolution de formations carbonatées ou évaporitiques (Houari et al. 2024).

Tous les échantillons d'eaux souterraines des nappes CI et CT (Continental Intercalaire et Mio-Pliocène) sont principalement marqués par une interaction géochimique liée à l'altération des silicates plutôt qu'à la dissolution d'évaporites. Le rapport Ca/Mg, en particulier, suggère la dissolution de calcite, de dolomite et de silicates dans ces eaux souterraines. Si le rapport Ca/Mg est égal à 1, cela indique la dissolution de la dolomite, s'il est compris entre 1 et 2, cela suggère la dissolution de la calcite, et si le rapport est supérieur à 2, cela signifie la dissolution des silicates.

Ainsi, tous les échantillons des nappes (CI) et (CTM) montrent des valeurs de Ca/Mg supérieures à 1, ce qui indique que ces eaux souterraines sont principalement influencées par l'altération des silicates plutôt que par la dissolution d'évaporites. Cette observation reflète la nature lithologique des aquifères de la zone d'étude pour ces nappes.

En revanche, les échantillons de la nappe (CTS) montrent des valeurs de rapport Ca/Mg plus proches de 1, ce qui suggère que les eaux souterraines de cette nappe sont davantage affectées par la dissolution carbonique que par la dissolution d'évaporites. Cette variation reflète

également la nature lithologique spécifique des aquifères de la nappe (CTS) dans la zone d'étude.

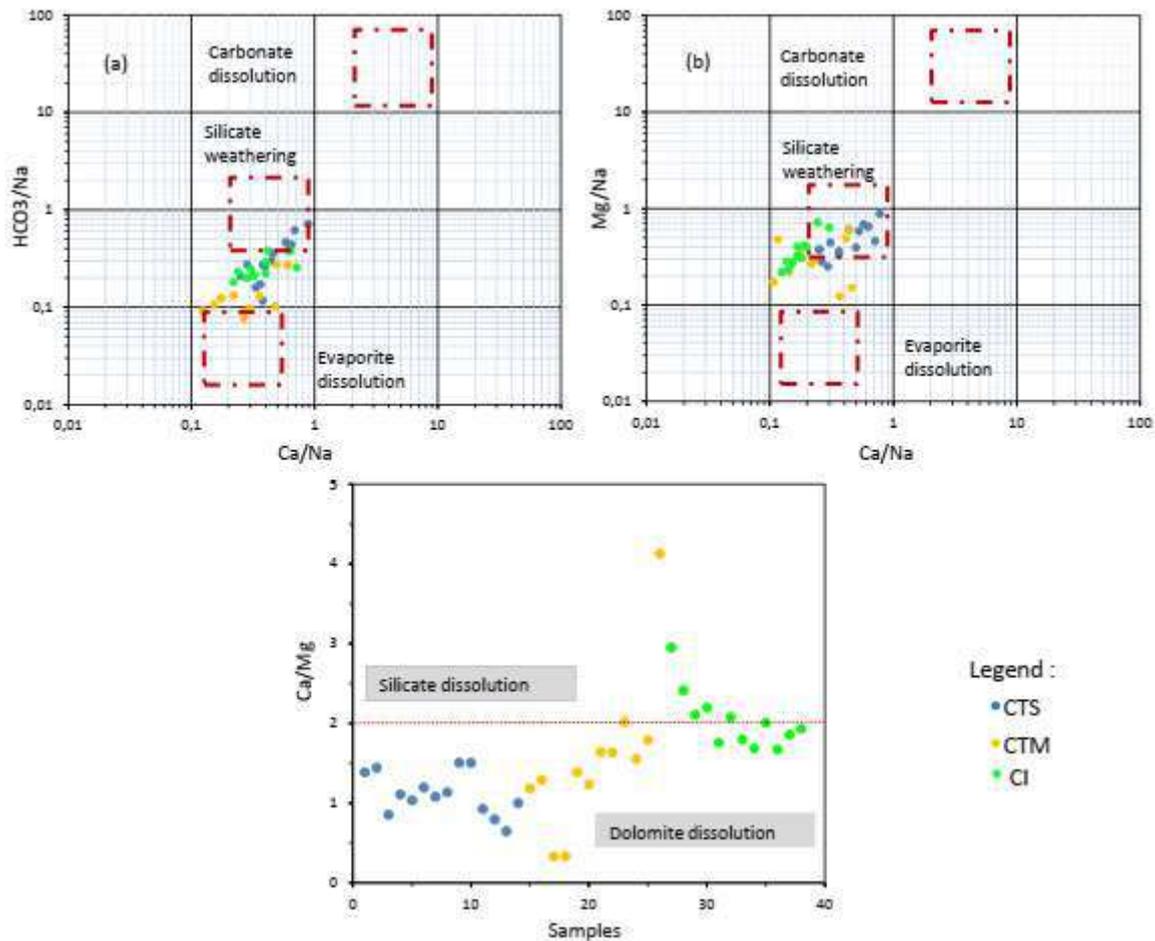


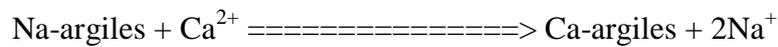
Figure 58: Les rapports Ca/Na versus HCO_3^-/Na , versus Mg/Na et Ca/Mg.

III.14 Processus secondaires de la minéralisation :

III.14.1 Echanges de base :

Les échanges de base, également appelés échanges cationiques, représentent un processus significatif dans la minéralisation des eaux souterraines de la région de Hassi Messaoud, en particulier lorsque des minéraux argileux sont présents en quantités relativement importantes dans le système aquifère des nappes CI et CT. En général, ces minéraux argileux cherchent à équilibrer leur charge électrostatique en fixant des cations monovalents, tels que le Na^+ et le K^+ , tandis qu'ils libèrent des cations bivalents, notamment le Ca^{2+} et le Mg^{2+} . Cela résulte en un échange de charges positives et négatives (Bouselsal et Zoari 2022 ; Kharroubi et al. 2023). La plupart des échantillons d'eaux souterraines de Hassi Messaoud montrent un excès de sodium, compensé par un déficit en calcium et en magnésium. Cette situation est également cohérente avec un excès de sulfate par rapport aux éléments de même origine, tels que les ions alcalino-terreux (figure.59).

Ce phénomène d'échanges cationiques est probablement dû à l'interaction entre les eaux souterraines et les minéraux argileux, qui sont relativement abondants dans les niveaux aquifères du système étudié. Au cours de ce processus, les ions Ca^{2+} et Mg^{2+} présents dans les eaux souterraines sont échangés avec les ions Na^+ qui étaient précédemment adsorbés à la surface des minéraux argileux. Ces échanges cationiques obéissent à une équation globale de bilan de masse, illustrée par la réaction suivante :



L'impact significatif des échanges cationiques sur la minéralisation des eaux souterraines (CI et CT) de Hassi Messaoud est montré par le diagramme $[(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) - (\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})]$ par rapport $[(\text{Na}^+ + \text{K}^+) - \text{Cl}^-]$. Sur ce diagramme, les points représentant les échantillons d'eau s'alignent le long d'une droite de pente -1, ce qui indique une relation inversement proportionnelle entre les ions Na^+ , d'une part, et les ions Ca^{2+} et/ou Mg^{2+} , d'autre part (figure.59).

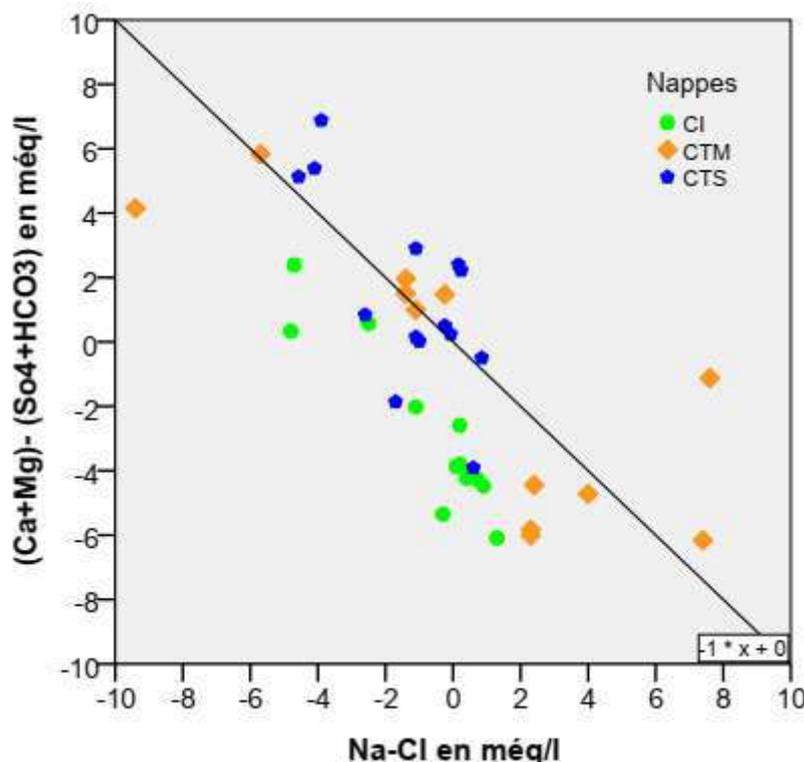


Figure 59: Diagramme illustre l'échange de base des eaux souterraines.

III.14.2 Processus anthropique :

La région de Hassi Messaoud est un important centre industriel pétrolier et connaît également un développement agricole intense, accompagné d'une croissance démographique. Toutefois, on observe des concentrations excessives de nitrate et de sulfate dans les eaux souterraines, en particulier dans la nappe Mio-Pliocène (CTM). Les nitrates, qui représentent la forme la plus oxydée de l'azote, sont naturellement présents dans l'eau à des concentrations généralement

inférieures à 10 mg/l . Cependant, dans cette région, les concentrations de nitrate et de sulfate sont plus élevées. Ces concentrations élevées, résultant de l'utilisation d'engrais et de pesticides dans divers secteurs, qu'il s'agisse de l'industrie, des usages domestiques ou de l'agriculture. Cette situation met en évidence l'impact significatif des activités humaines sur la qualité des eaux souterraines, en particulier dans la nappe superficielle du Mio-Pliocène (CTM). Cependant, les concentrations de nitrate dans les nappes profondes de (CTS) et de (CI) restent faibles. En revanche, les concentrations de sulfate sont élevées, en particulier par rapport au calcium et au magnésium, dans les eaux souterraines de la nappe Mio-Pliocène (CTM) (figure.55 et 56).

Ce phénomène présente un risque potentiel de contamination à long terme des eaux souterraines, en raison de l'utilisation excessive d'engrais et de pesticides. Il souligne la nécessité de contrôler et de réglementer ces activités afin de préserver la qualité de la ressource en eau souterraine dans la région.

III.15 Conclusion

Les données mettent en évidence des variations de température au sein des aquifères étudiés, oscillant entre 25 et 30 °C dans les eaux de CT, tandis que les eaux de l'aquifère profond (CI) atteignent des températures de 50 à 55°C en raison de leur profondeur. Le pH de l'ensemble des sources demeure légèrement alcalin, se maintenant entre 7 et 7,85. La conductivité électrique (CE) est notablement élevée, couvrant une gamme allant de 2022 à 3711 mS/cm pour les eaux peu profondes (CTS) et de 2248 à 5969 mS/cm pour les eaux de surface (CTM). La dureté totale (TH) est particulièrement marquée pour les eaux de l'aquifère superficiel (CTM), se situant entre 530 et 2010 °F. Les eaux des aquifères profonds (CI) et peu profonds (CTS) présentent également une dureté significative. En ce qui concerne les TDS (solides dissous totaux), les eaux de l'aquifère superficiel (CTM) enregistrent des valeurs élevées, allant de 1531 à 4326 mg/L, dépassant les autres aquifères. D'une manière générale, le TDS dépasse la barre des 1200 mg/l, et la salinité demeure uniforme dans l'ensemble de la région. Cette situation reflète l'influence de la surexploitation et des influences naturelles, et parfois humaines, sur la qualité des eaux de cet aquifère peu profond (CTM), avec une salinité plus élevée que celle des nappes plus profondes (CTS) et (CI).

La représentation graphique des ions majeurs des eaux souterraines de la zone d'étude sur les diagrammes de Piper et Chadha révèle que 100 % des eaux de la nappe Continentale Intercalaire (CI), 66,67 % des eaux de la nappe Complexe Terminal Moyen (CTM), et 85,74

% des eaux de la nappe Complexe Terminal Supérieur (CTS) sont de type Ca-Mg-SO₄-Cl, tandis que 33,33 % des eaux de CTM et 15,26 % des eaux de CTS sont de type Ca-Mg-HCO₃. En outre, l'analyse chimique révèle que les anions acides forts (Cl⁻ et SO₄²⁻) prédominent sur les anions acides faibles (CO₃²⁻ et HCO₃⁻), tandis que les ions alcalins (Na⁺ et K⁺) sont plus abondants que les ions alcalinoterreux (Ca²⁺ et Mg²⁺). Dans l'ensemble, les faciès hydrochimiques des eaux souterraines (CI) et (CTM) sont de type sulfate sodique ou chlorure sodique, tandis que les eaux souterraines (CTS) présentent un faciès sulfate calcique ou chlorure calcique.

En ce qui concerne la qualité de l'eau destinée à la consommation humaine, les eaux souterraines de Hassi Messaoud peuvent être classées en trois catégories distinctes. La première catégorie, qualifiée de médiocre, regroupe environ 71,4 % des échantillons d'eau provenant de l'aquifère sénonien (CTS), 33,3 % des échantillons d'eau de l'aquifère mio-pliocène (CTM) et 33,3 % de l'aquifère continental intercalaire (CI). La deuxième catégorie, caractérisée comme étant de qualité très médiocre, concerne environ 28,6 % des échantillons d'eau de l'aquifère sénonien (CTS), 25 % des échantillons d'eau de l'aquifère mio-pliocène (CTM) et 66,7 % de l'aquifère continental intercalaire (CI). De plus, la troisième catégorie, considérée comme non potable, inclut environ 41,7 % des échantillons d'eau de l'aquifère mio-pliocène (CTM). Ces conclusions mettent en évidence la nécessité d'un traitement préalable avant de distribuer les eaux de Hassi Messaoud à des fins de consommation humaine.

Pour ce qui est de l'utilisation agricole, les eaux souterraines de la zone d'étude peuvent être classées comme suit : en ce qui concerne la conductivité électrique (EC), elles conviennent mal aux sols à drainage restreint (10,5%) et ne sont pas adaptées à l'irrigation des sols (89,5%). En ce qui concerne le pourcentage de sodium (Na%), elles sont idéales pour l'irrigation (100%). En ce qui concerne le rapport de sodium adsorbé (SAR), elles présentent un excellent niveau (97,4%), un bon niveau (2,6%) et un niveau inapproprié (8%). Pour ce qui est du ratio de Kelly, elles sont adéquates (50% du CTM, 100% du CTS et 41,7% du CI) et inappropriées (50% du CTM et 58,3%). En ce qui concerne l'indice de perméabilité (PI), elles sont jugées adéquates (100%). Quant au sodium échangeable (MH), elles sont acceptables à hauteur de (81,2%) ou inacceptables à hauteur de (18,4%). De plus, la projection sur le diagramme de Wilcox montre que les eaux souterraines de la zone d'étude se classent dans la catégorie médiocre ou inadaptée pour l'irrigation. En résumé, ces eaux sont appropriées pour certaines cultures sahariennes, telles que les palmeraies, les oliviers, ainsi que les cultures fruitières et fourragères, cependant, il est recommandé de les désaler avant leur utilisation.

Ces eaux souterraines revêtent une importance cruciale pour les industries locales, notamment l'industrie pétrolière. Cependant, des défis liés à la qualité de l'eau se posent, tels que la corrosion et la formation de tartre, attribuables à des facteurs comme le pH, la composition géologique et la température. Les indices de qualité de l'eau indiquent une tendance légère à modérée à la formation de tartre et à la corrosion, avec quelques variations selon les nappes. Plus spécifiquement, les eaux de la nappe (CI) présentent une légère agressivité due à leur température élevée. Par conséquent, il est impératif de surveiller attentivement la qualité de l'eau afin de minimiser les problèmes potentiels. Les résultats numériques, notamment un rapport massique chlorure-sulfate (CSMR) supérieur à 0,5, un indice de Revelle (RI) supérieur à 0,5, un indice de stabilité Langelier (LSI) supérieur à 1,2 et un indice de Larson (LI) équilibré situé entre -0,5 et 0,5 pour les eaux souterraines des nappes (CI) et (CTM), alors que les eaux de la nappe (CTS) présentent un coefficient de stabilité de Ryznar (RSI) indiquant une tendance à la formation de tartre, parfois en équilibre, avec une valeur de Ryznar inférieure ou égale à 7,8, suggérant une légère tendance à la formation de tartre et à la corrosion. Par conséquent, il est recommandé d'utiliser une méthode de traitement cathodique, notamment le traitement électrochimique, à des fins industrielles.

Finalement, l'étude sur la minéralisation met en avant l'influence notable des processus primaires, notamment la saturation par les minéraux carbonatés et évaporitiques, sur la composition chimique des eaux souterraines. Les indices de saturation révèlent que ces eaux sont en général sous-saturées par rapport à l'halite, mais en excès de saturation par rapport au gypse et à l'anhydrite. Les ions sodium, calcium, chlorure et sulfate sont identifiés comme étant les principaux contributeurs à la salinité de ces eaux.

En outre, les processus secondaires de minéralisation, comme les échanges d'ions, exercent une influence significative sur la composition ionique des eaux en favorisant l'accumulation de sodium aux dépens du calcium et du magnésium, principalement en raison de la présence de minéraux argileux dans les aquifères. Enfin, l'étude met en évidence l'impact des activités humaines, notamment l'industrie pétrolière et l'agriculture intensive, sur la contamination des eaux souterraines par des nitrates et des sulfates, en particulier au sein de la nappe Mio-Pliocène (CTM). Ces concentrations élevées de contaminants posent un risque potentiel pour la qualité à long terme des ressources en eau souterraine de la région.

En résumé, cette recherche met en lumière la complexité de la minéralisation des eaux souterraines de Hassi Messaoud, résultant de l'interaction entre des processus géologiques, des échanges chimiques et des activités humaines. Elle souligne l'impératif d'une gestion attentive de ces ressources pour garantir leur durabilité à long terme.

CHAPITRE IV
GESTION DES
EAUX
SOUTERRAINES

IV. Gestion des eaux souterraines

IV.16 Introduction

La région de Hassi Messaoud est réputée pour sa production d'hydrocarbures et comprend une grande agglomération principale, le chef-lieu (ACL), ainsi que des zones d'agglomérations secondaires qui combinent urbanisme et agriculture, telles que Hassi Bakrate et Hassi Khuildet (AS). Comme de nombreuses autres régions en Algérie et dans le Sahara, elle est affectée par les changements climatiques, ce qui entraîne des pressions considérables d'origine naturelle et humaine sur les ressources en eau (CI) et (CT), avec des répercussions négatives multiples.

La complexité des processus naturels, des infrastructures en place, et des contextes socio-économiques rendent impératif pour les gestionnaires et les planificateurs des ressources en eau de choisir l'outil le plus efficace pour répondre à la question fondamentale : combien de sources d'eau sont nécessaires pour satisfaire les besoins en termes de quantité (volume) et de qualité (salinité), tout en réduisant le coût moyen de l'eau et en préservant l'environnement (minimisation du rabattement de la nappe). En outre, les décideurs cherchent un outil d'aide à la décision sous la forme d'un système de support à la décision (DSS). En d'autres termes, ils recherchent une modélisation capable de résoudre ce problème complexe en fonction des données de base, des modèles de simulation et des outils de génération de scénarios.

Face à la multitude de logiciels disponibles et de méthodologies, cette étude repose sur le choix du logiciel gratuit (WEAP). Ce logiciel permet de modéliser le fonctionnement du système hydrologique en tenant compte des aspects socio-économiques. Il offre une estimation quantitative des ressources en eau disponibles, permet de simuler la demande en eau et sa distribution dans différents scénarios. L'objectif est de parvenir à une gestion intégrée et durable de cette ressource cruciale pour la région.

IV.17 La gestion intégrée des ressources en eau (GIRE) :

La gestion des problèmes liés à l'eau est devenue un défi croissant pour de nombreux pays, notamment en raison de la pénurie d'eau, de la dégradation de sa qualité et des conséquences des inondations. La gestion intégrée de l'eau vise à aider ces pays à mettre en place une gestion économique, efficace et durable de cette ressource cruciale.

Concrètement, la (GIRE) consiste en un développement coordonné des ressources en eau, des terres et des ressources connexes dans le but de maximiser de manière équitable le bien-être économique et social, tout en préservant la durabilité des écosystèmes vitaux. Cette approche s'appuie sur une participation active de tous les acteurs, y compris les utilisateurs, les

planificateurs et les décideurs, dans toutes les parties du système naturel et humain. Elle s'étend progressivement à un niveau régional, voire mondial.

La gestion intégrée des ressources en eau englobe les activités humaines et leurs impacts sur les bassins versants et les écosystèmes. C'est un processus systématique visant le développement durable et le suivi de l'utilisation des ressources en eau, tout en tenant compte des objectifs sociaux, économiques et environnementaux.

L'intégration consiste à harmoniser les différentes parties d'un système et à assurer leur compatibilité pour garantir un fonctionnement global cohérent. Cependant, l'intégration seule ne suffit pas pour une mise en œuvre optimale des stratégies, mécanismes et plans de gestion. Dans la GIRE, l'intégration se coordonne entre deux systèmes : le système naturel (accès à l'eau et qualité) et le système humain (utilisation de l'eau, production d'eaux usées, pollution) qui détermine également les priorités de développement.

De nombreux facteurs menacent les ressources en eau douce, notamment la croissance démographique, l'amélioration du niveau de vie, les inégalités sociales et l'absence de programmes de lutte contre la pauvreté, conduisant souvent les populations les plus défavorisées à surexploiter les ressources en eau, sols et forêts, entraînant des conséquences néfastes sur l'eau. La communauté internationale, par l'intermédiaire du Comité technique consultatif, reconnaît plusieurs principes directeurs pour la gestion intégrée des ressources en eau :

- ✓ L'eau douce est une ressource limitée et vulnérable, essentielle à la vie, au développement et à l'environnement.
- ✓ L'approche participative impliquant les usagers, les planificateurs et les décideurs à tous les niveaux est essentielle pour la (GIRE).
- ✓ Le rôle des femmes est crucial dans la gestion intégrée des ressources en eau.
- ✓ L'eau a une dimension économique dans la concurrence entre différents utilisateurs.

Pour définir et évaluer divers plans et projets de gestion des ressources en eau, il est nécessaire de choisir des instruments, c'est-à-dire des outils et des méthodes, en fonction de divers facteurs tels que les politiques de gestion, les ressources disponibles, l'impact environnemental et les conséquences sociales et économiques. Ces méthodes quantitatives et qualitatives, combinées à des connaissances en économie, en hydrologie, en hydraulique, en sciences de l'environnement, en sociologie et dans d'autres disciplines pertinentes, permettent d'identifier et d'évaluer les problèmes réels et potentiels liés à l'eau et les solutions requises.

L'évaluation des ressources en eau est essentielle pour une gestion efficace de l'eau, car elle fournit des informations cruciales sur le cycle de l'eau et les écosystèmes associés, permettant

ainsi d'équilibrer les disponibilités et la qualité de l'eau par rapport aux besoins. Sans des données pertinentes sur la rareté de l'eau et la concurrence entre les utilisateurs, la planification sectorielle risque d'être trop optimiste quant aux développements possibles et aux besoins en eau. En conclusion, une gestion efficace de l'eau peut avoir un impact significatif sur la demande en eau.

IV.18 La législation en matière de régulation des services de l'eau :

Pour soutenir le développement social et économique, il est essentiel de mettre en place des infrastructures d'eau pour répondre aux besoins de tous les utilisateurs. Pour cela, il est impératif d'avoir en place un cadre juridique efficace qui permette de gérer la distribution, le contrôle de l'utilisation, et la préservation des ressources en eau.

Dans notre pays, le dernier code des eaux, publié au Journal Officiel en 2005, définit l'eau comme un bien de la collectivité nationale. Ce texte repose sur plusieurs principes fondamentaux pour l'utilisation, la gestion et le développement durable des ressources en eau, à savoir :

- 1) Le droit d'accès à l'eau et à l'assainissement pour satisfaire les besoins essentiels de la population, en veillant à l'équité en matière de services publics.
- 2) Le droit d'utilisation des ressources en eau, accordé à toute personne physique ou morale, qu'elle soit de droit public ou privé, dans les limites de l'intérêt général et en respectant les obligations définies par la loi et les règlements qui en découlent.
- 3) La planification des aménagements hydrauliques, la mobilisation et la distribution des ressources en eau dans le cadre des bassins hydrographiques.
- 4) La prise en compte des coûts réels des services d'approvisionnement en eau pour les besoins domestiques, industriels et agricoles, ainsi que des services de collecte et de traitement des eaux usées, grâce à des mécanismes de tarification visant à économiser l'eau et à protéger sa qualité.

Ce code vise à améliorer les services publics liés à l'eau et à l'assainissement, à étendre les zones agricoles, à préserver et restaurer la qualité de l'eau, ainsi qu'à garantir la sécurité et la valorisation de la mobilisation des ressources en eau, qu'elles soient conventionnelles (renouvelables et fossiles) ou non conventionnelles (dessalement et réutilisation des eaux usées traitées).

IV.19 Principes généraux sur l'eau en Algérie :

La loi sur l'eau en Algérie repose sur des principes et des règles qui s'appliquent à l'utilisation, à la gestion et au développement durable des ressources en eau en tant que bien de la collectivité nationale. Cette loi se compose de 10 titres, à savoir :

- 1) Dispositions préliminaires.
- 2) Régime juridique des ressources en eau et des infrastructures hydrauliques.
- 3) Protection et conservation des ressources en eau.
- 4) Instruments institutionnels pour la gestion intégrée des ressources en eau.
- 5) Régime juridique de l'utilisation des ressources en eau.
- 6) Services publics liés à l'eau et à l'assainissement.
- 7) Utilisation de l'eau en agriculture.
- 8) Tarification des services liés à l'eau.
- 9) Réglementation de la police de l'eau.
- 10) Dispositions transitoires et finales.

Ces différents titres établissent le cadre juridique et réglementaire nécessaire pour garantir une utilisation responsable et durable de l'eau en Algérie. Ils couvrent divers aspects, de la protection des ressources en eau à la tarification des services liés à l'eau, en passant par la gestion des infrastructures hydrauliques et la réglementation de la police de l'eau.

IV.19.1 La politique de l'eau en Algérie :

Depuis l'indépendance de l'Algérie, la gestion de l'eau a connu deux périodes distinctes :

La période de 1962 à 1985 : Cette période se caractérise par une approche centrée sur l'offre, avec la mise en œuvre de politiques axées sur les grands ouvrages hydrauliques (**GH**). Cela signifie que l'accent était mis sur la construction d'infrastructures hydrauliques massives pour augmenter la disponibilité de l'eau.

La période d'après 1985 à 2005 : Cette période est associée à une approche basée sur la demande, marquée par la tarification des services liés à l'eau. Pendant cette période, l'accent a été mis sur la gestion des ressources en eau et la mise en œuvre de politiques axées sur les travaux hydrauliques de taille moyenne et petite (**PMH**). Cette approche visait à mieux répondre aux besoins réels des utilisateurs en eau.

Ces deux périodes reflètent l'évolution de la politique de l'eau en Algérie, passant d'une approche axée sur la construction d'infrastructures massives à une approche plus axée sur la gestion durable des ressources en eau et la satisfaction des besoins de la population.

IV.1.1.1 Modes de gestion:

La politique algérienne de gestion de l'eau s'est orientée ces dernières années davantage vers la mobilisation de nouvelles ressources que vers l'amélioration de l'utilisation des ressources déjà disponibles. Deux modes de gestion principaux sont mis en œuvre :

- 1) **Gestion directe** : Dans ce mode de gestion, l'État assume la responsabilité directe de la gestion de l'eau. Cela signifie que les autorités gouvernementales sont chargées de toutes les étapes de la gestion de l'eau, de sa distribution à son traitement, en passant par sa mobilisation. Cette approche est sous le contrôle direct des organismes publics.
- 2) **Gestion déléguée** : Dans ce mode de gestion, la responsabilité de la gestion de l'eau est confiée à une entreprise ou une société des eaux, qu'elle soit nationale ou internationale. Les organismes gouvernementaux accordent des contrats de délégation de service public à ces entités pour qu'elles assurent la gestion complète de l'eau, y compris la fourniture de services de distribution, de traitement et de maintenance. Cette approche implique une collaboration entre le secteur public et le secteur privé ou des entités spécialisées.

Ces deux modes de gestion visent à répondre aux besoins en eau de la population et à garantir une gestion efficace et durable des ressources en eau en Algérie.

A. Stratégies et vision:

La vision globale et durable des ressources en eau en Algérie doit prendre en compte la potentialité du pays, la préservation des écosystèmes aquatiques et environnementaux, ainsi que la coopération avec les pays voisins du bassin méditerranéen. Les stratégies mises en place se concentrent sur la gestion anticipée de la pénurie d'eau à l'avenir, causée en partie par une croissance démographique inévitable et une distribution inégale des ressources. Il est important de noter que l'activité humaine contribue également à cette pénurie par la pollution et le gaspillage des ressources déjà limitées.

Voici quelques principes clés qui devraient guider les futures stratégies et la vision de la gestion de l'eau en Algérie :

Priorité à l'alimentation en eau potable : Assurer l'accès à l'eau potable pour la population doit être la priorité absolue.

Évaluation de la demande en eau pour divers usages d'ici 2020-2050 : Comprendre et anticiper les besoins en eau pour différents usages au cours de cette période est essentiel pour une planification efficace.

Prélèvement maximal d'eau cohérent et équilibré : Les prélèvements d'eau doivent être effectués de manière cohérente et harmonieuse pour éviter l'épuisement des ressources.

Principe "qui pollue, paye" : Ce principe doit être appliqué pour encourager la responsabilité environnementale et le traitement adéquat des polluants.

Tarifification réaliste des services de l'eau : Les coûts réels des services de l'eau doivent être facturés, ce qui encourage une gestion plus efficace et durable des ressources.

Distribution régulière de l'eau : Assurer une distribution régulière et fiable de l'eau est essentiel pour répondre aux besoins de la population de manière équitable et efficace.

Ces principes devraient guider les futures stratégies de gestion de l'eau en Algérie pour garantir une utilisation durable et responsable de cette ressource précieuse.

IV.1.1.2 La structures du secteur de l'eau :

En Algérie, les principaux secteurs utilisateurs de l'eau comprennent l'agriculture, l'industrie, et le secteur urbain et domestique. Les stratégies de répartition et de gestion durable des ressources en eau sont mises en œuvre par le biais d'établissements publics de gestion, répartis selon un découpage territorial en cinq Agences du bassin hydrographique, comme suit :

- Agence de bassin hydrographique Algérois-Hodna Soummam (ABH-AHS).
- Agence de bassin hydrographique Cheliff-Zahrez (ABHCZ).
- Agence de bassin hydrographique Oranie-Chott Chergui (ABH-OCC).
- Agence de bassin hydrographique Constantinois–Seybousse-Mellegue (ABH-CSM).
- Agence de bassin hydrographique Sahara.

Ces Agences du bassin hydrographique sont responsables de la gestion, de la régulation et de la planification des ressources en eau dans leurs zones respectives. Elles jouent un rôle essentiel dans la coordination des activités liées à l'eau et dans la mise en œuvre des politiques visant à assurer une utilisation efficace et durable de cette ressource vitale en Algérie.



Figure 60: Les grands bassins hydrographiques de l'Algérie.

Dans la zone d'étude, la gestion intégrée des ressources en eau (CI) et (CT) est d'abord supervisée par l'Agence Nationale de Gestion Intégrée des Ressources en Eau (AGIR), l'Agence de Bassin Hydrographique Sahara (ABH-S) et le Comité de Bassin. Ces établissements se concentrent principalement sur l'utilisation industrielle et agricole de l'eau. Ensuite, l'Entreprise Nationale Algérienne des Eaux (ADE) et l'Office National d'Assainissement (ONA) sont responsables de la gestion des services publics d'eau et d'assainissement dans l'agglomération principale de la ville de Hassi Messaoud. Pour les agglomérations secondaires ou éparpillées, cette gestion est assurée par la commune de Hassi Messaoud.

IV.20 la gestion des ressources en eau souterraines (CI) et (CT) :

Les eaux souterraines, principalement situées dans le bas Sahara, sont considérées comme des ressources non renouvelables ou fossiles et sont contenues dans deux grands réservoirs, le Complexe Terminal et le Continental Intercalaire. Cependant, après cinquante années d'exploitation de ces eaux, en particulier dans le bas Sahara, plusieurs problèmes environnementaux sont apparus, notamment la remontée des nappes phréatiques, l'augmentation de la salinité des ressources en eau et des sols, la baisse de la pression, les problèmes de corrosion et d'entartrage pour la nappe du Continental Intercalaire (CI).

Ces problèmes alarmants sont en grande partie dus à des lacunes dans la gestion, la planification et le suivi des ressources en eau. En général, une gestion rationnelle et durable des eaux souterraines nécessite des modifications dans le fonctionnement physique, chimique et biologique de l'environnement (**A. Khadraoui/ABH - Sahara**).

Dans la région de Hassi Messaoud, il existe trois secteurs d'utilisation de l'eau :

Approvisionnement en eau potable (AEP) : Il est assuré par des camions-citernes pour l'eau potable ou des bouteilles d'eau minérale et d'eau de source provenant d'autres régions du pays comme El Golea et Sidi Khaled. Cette eau est appréciée pour son goût agréable.

Irrigation (IRR) : L'eau est extraite des nappes phréatiques (CT) et (CI) par le biais de puits et de forages pour l'irrigation agricole.

Secteur industriel, touristique et de services (ITS) : Ces secteurs sont alimentés en eau à partir des nappes phréatiques (CT).

De plus, le secteur pétrolier utilise principalement les eaux douces de la nappe du Continental Intercalaire (CI) pour les opérations pétrolières, notamment les travaux de forage tels que les interventions de maintenance et l'augmentation de la pression.

Dans le cadre de ce travail, une tentative a été faite pour modéliser et comprendre les interactions entre le système naturel et humain de la région afin de simuler la demande en eau et la distribution des eaux sous différents scénarios. L'objectif est d'obtenir une gestion intégrée durable de cette ressource. Pour ce faire, le logiciel WEAP a été choisi pour effectuer cette modélisation.

IV.21 Application du modèle (WEAP) dans la région d'étude :

IV.21.1 Logiciel (WEAP) :

Le logiciel WEAP (Water Evaluation And Planning) est un outil gratuit, facilement accessible, et convivial qui permet une modélisation de la gestion de l'eau. Il offre une interface conviviale et n'exige pas des données complexes pour fonctionner. Vous pouvez télécharger ce logiciel sur le site suivant : (<http://www.weap21.org>).

Pour l'utiliser, vous devez obtenir une licence valide avec un nom d'utilisateur et un code d'enregistrement (figure.61).

IV.21.2 Fonctionnement du logiciel :

Le fonctionnement du logiciel WEAP est basé sur le soutien fondamental de l'Institut de l'Environnement de Stockholm (SEI). Il peut être appliqué à des systèmes simples ou à des zones de planification uniques, ainsi qu'à des systèmes complexes de gestion de l'eau couvrant de vastes territoires. WEAP permet de répondre à plusieurs questions liées à l'analyse sectorielle de la gestion de l'eau, notamment la demande en eau, la préservation des ressources, les droits d'utilisation, les priorités d'allocation, la simulation des eaux souterraines et de surface, les exigences des écosystèmes, et la vulnérabilité, tout en intégrant des aspects socio-économiques.

Le logiciel (WEAP) effectue des calculs hydrologiques et modélise les interactions complexes entre les composantes du système de gestion de l'eau, offrant ainsi une vision complète de la gestion de l'eau et de ses implications tant sur le plan technique que socio-économique.

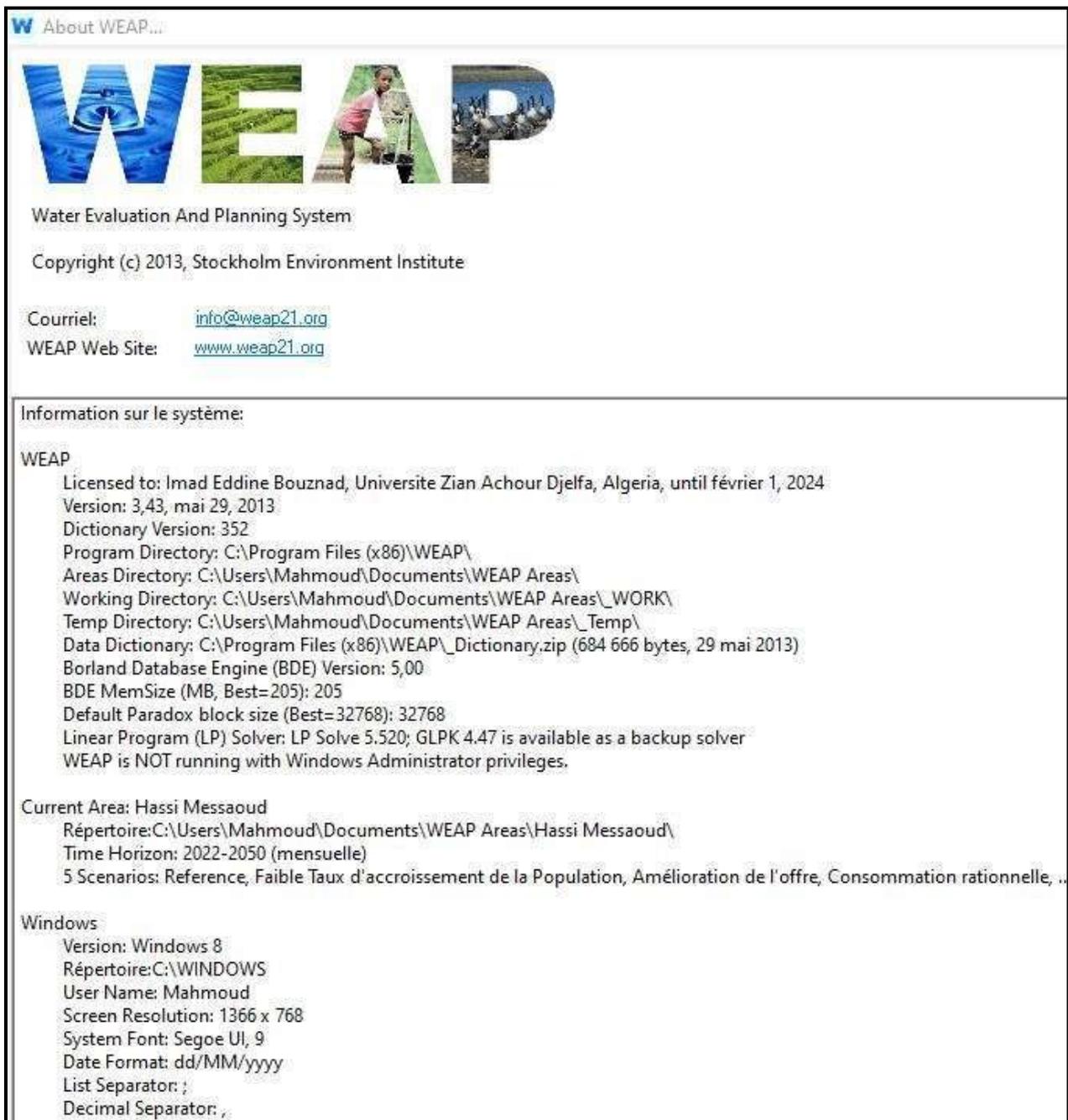


Figure 61: Information about l'enregistrement du logiciel WEAP.

IV.21.3 Méthodologie du travail :

La méthodologie de travail pour cette modélisation est présentée dans le plan de collecte des données et les étapes de modélisation, comme illustré sur les figures 62 et 63. Elles décrivent les étapes essentielles du processus de modélisation de la gestion des ressources en eau, de la collecte initiale des données à la mise en œuvre du modèle (WEAP) pour simuler la gestion de l'eau dans la région d'étude. La collecte de données solides et précises est cruciale pour alimenter le modèle et obtenir des résultats fiables pour la gestion intégrée et durable de la ressource en eau.

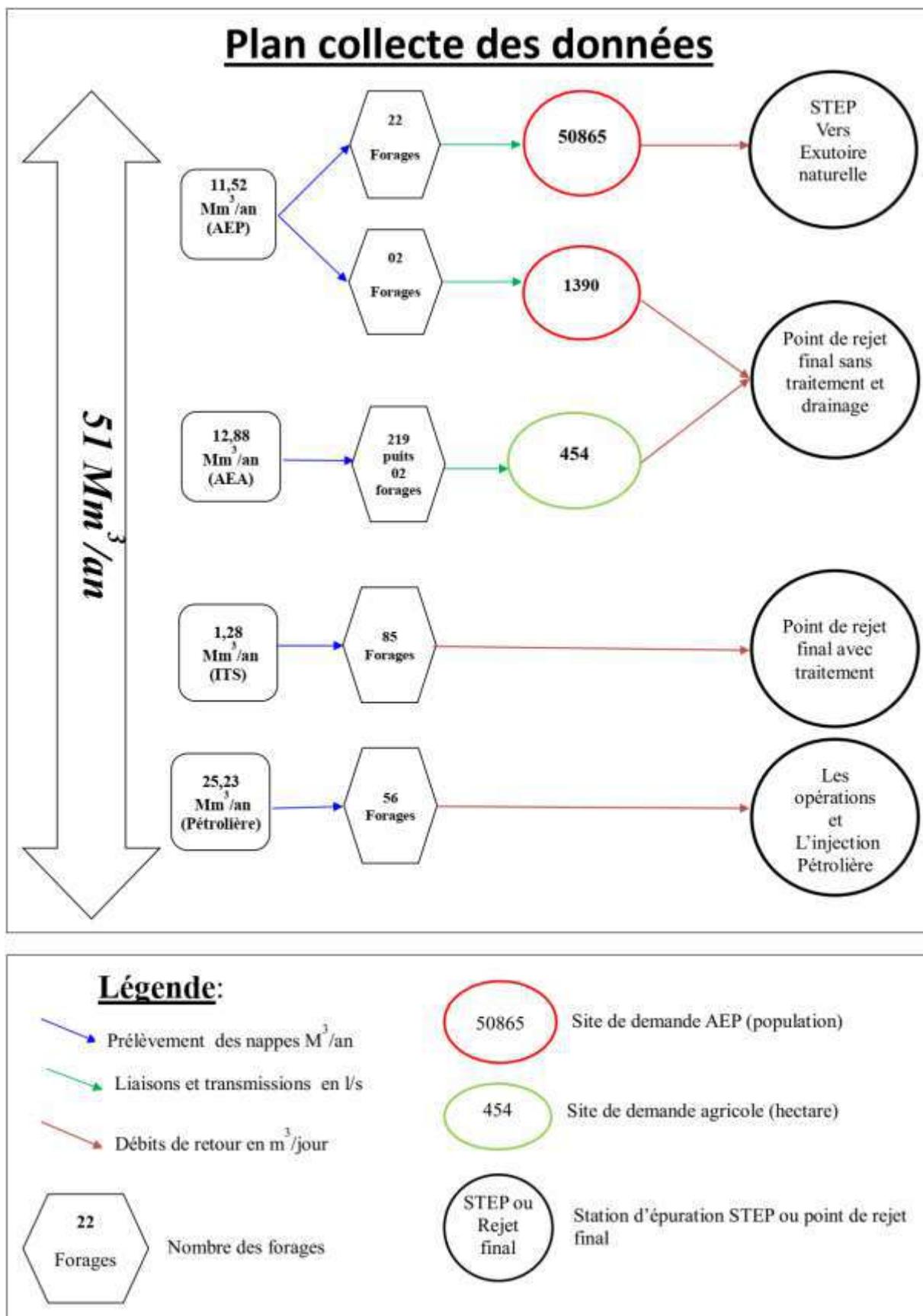


Figure 62: Plan de base des données.

Les étapes de modélisation

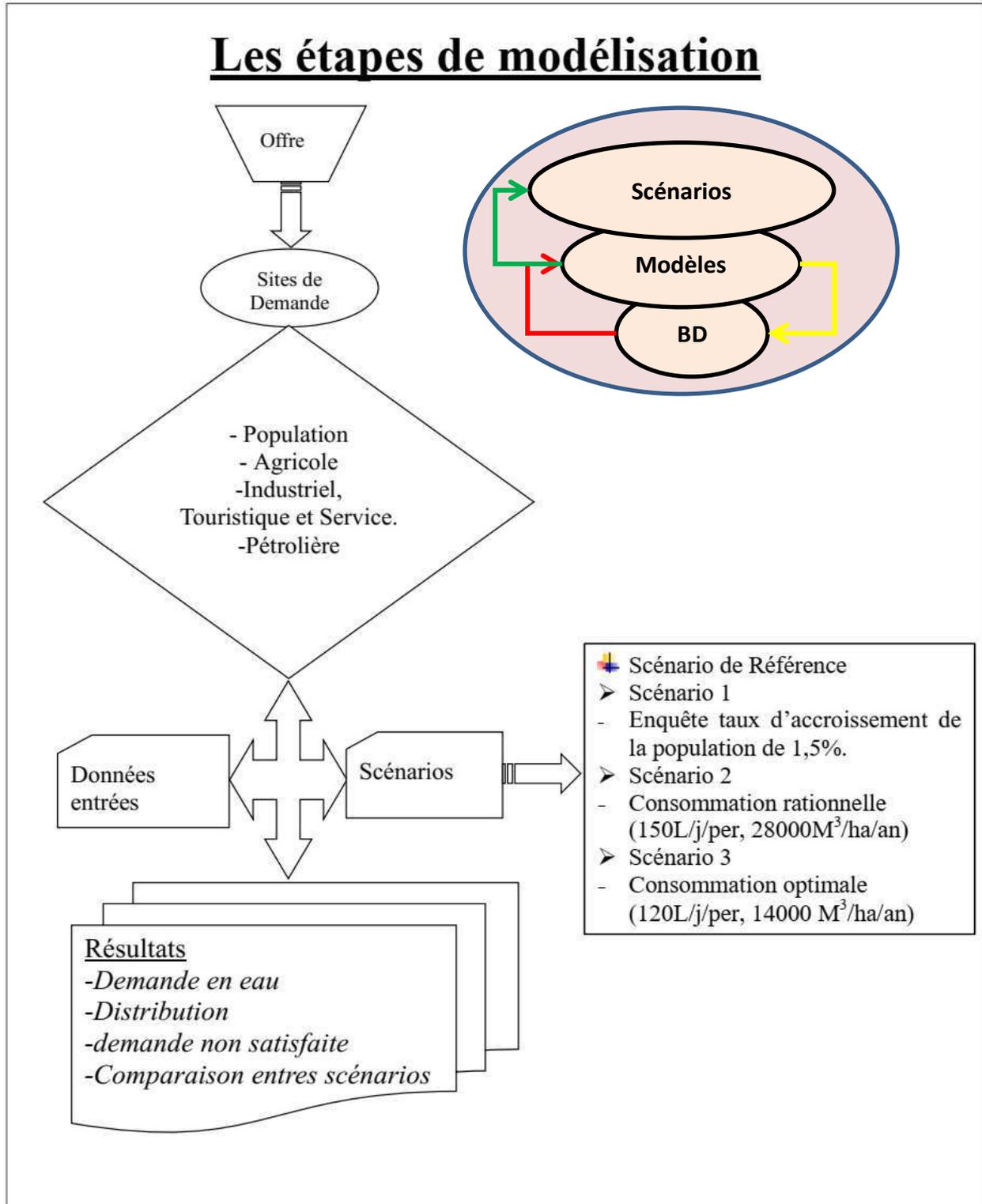


Figure 63: les étapes de modélisation.

IV.21.4 Création la zone d'étude:

Dans cette étude, la zone d'étude a été définie en suivant d'abord le Plan Directeur d'Aménagement et d'Urbanisme (PDAU), qui distingue la zone en deux parties : la principale agglomération, la ville de Hassi Messaoud, appelée le Site Chef Lieu (Site ACL), et d'autres zones d'agglomérations secondaires, notamment Hassi Bakrat et Hassi Khuildet (Site AS).

Ensuite, des sites supplémentaires ont été ajoutés pour prendre en compte les besoins des secteurs industriel, touristique, des services (Site ITS) et pétrolier (Site Pétrolier). Cette zone fait partie du champ pétrolier de Hassi Messaoud et est représentée dans le logiciel sous forme de couche vectorielle au format shapefile, superposée sur la carte d'occupation des sols sous forme d'image raster. Cette représentation sert de base cartographique pour élaborer le modèle conceptuel du nouveau projet appelé Hassi Messaoud, afin de visualiser et de distinguer les secteurs qui nécessitent une gestion spécifique (figure 64).

La bonne gestion des ressources en eau dépend de la capacité à équilibrer la disponibilité naturelle de l'eau avec les pressions exercées par les utilisateurs. Cette gestion est régie par une combinaison de politiques locales, régionales et nationales, dans laquelle l'eau potable est gérée par l'entreprise nationale algérienne d'eau (ADE). En revanche, la gestion des eaux d'irrigation et des autres services tels que l'industrie et le tourisme est prise en charge par l'Agence du Bassin Hydrographique Sahara (ABH-Sahara).

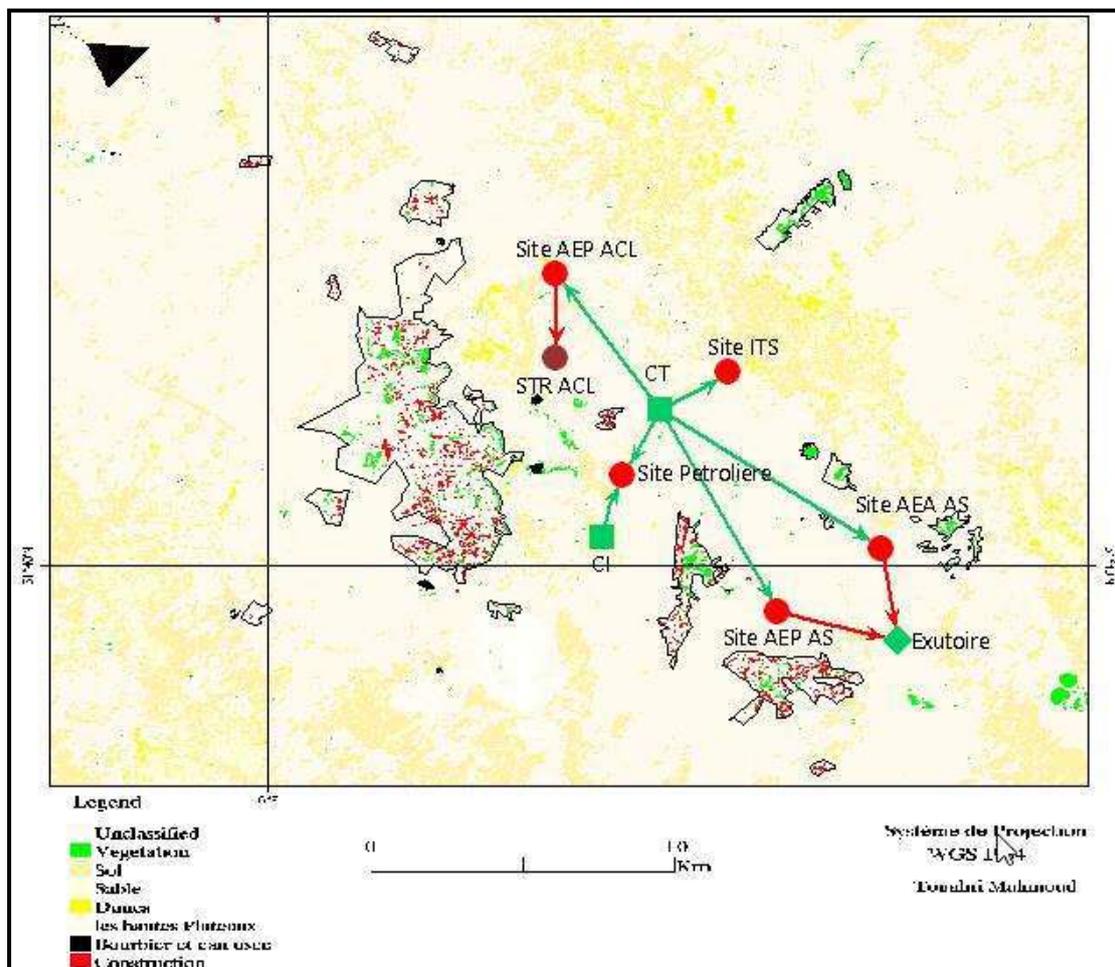


Figure 64: le modèle conceptuel (WEAP).

IV.1.1.3 Analyse et traitement des données :

La modélisation de la gestion des ressources en eau dans une zone de planification à l'aide de WEAP passe par trois étapes essentielles :

- ✓ La première étape consiste à préparer une base de données du système naturel, des aménagements existants, et des aspects socio-économiques.
- ✓ La deuxième étape implique la compréhension du fonctionnement du système et l'élaboration d'un modèle conceptuel qui relie toutes les composantes modélisées de manière cohérente avec la réalité.
- ✓ La troisième étape de la modélisation implique la conception de scénarios, qui peuvent être liés au climat, à l'aménagement du territoire, ou aux politiques.

Dans cette étude, le modèle conceptuel de la zone d'étude repose sur la ressource en eau des eaux souterraines non renouvelables des nappes du Complexe Terminal (CT) et du Continental Intercalaire (CI). Il est divisé en quatre sections distinctes :

- La première section concerne la ville de Hassi Messaoud, l'agglomération principale Chef Lieu (ACL). Cette section est alimentée par 22 forages destinés à l'alimentation en eau potable (AEP) et à un usage domestique, avec un débit de retour des eaux usées important. Les eaux usées sont traitées dans une station d'épuration (STEP) avant d'être transférées vers un site de réutilisation ou un point de rejet final.
- La deuxième section concerne les zones éparpillées, comprenant deux sites de demande d'agglomérations secondaires (AS) : l'un pour l'alimentation en eau potable (AEP AS) et l'autre pour un usage agricole (AEA AS). Les débits de retour de ces deux sites sont dirigés vers un point de rejet final sans traitement préalable pour les eaux usées, tandis que les eaux d'irrigation sont infiltrées dans la nappe phréatique superficielle.
- La troisième section concerne les sites de demande liés aux usages industriels (ITS), touristiques et de services dans le champ de Hassi Messaoud. Elle comprend 85 forages qui exploitent les eaux de la nappe du Complexe Terminal (CT), à l'exception d'un seul forage destiné à l'industrie et un autre aux services.
- La quatrième section concerne les sites de demande liés à l'usage pétrolier dans le champ de Hassi Messaoud, que ce soit pour les opérations pétrolières (forage et work-over), l'injection d'eau dans les puits pétroliers, ou l'usage domestique au sein des unités industrielles et des bases de vie. Cette section est alimentée par 56 forages, dont 32 exploitent l'eau douce de la nappe du Continental Intercalaire (CI), principalement pour l'injection afin d'augmenter la pression des puits pétroliers.

La représentation graphique du modèle conceptuel WEAP de Hassi Messaoud est illustrée sur une carte pour visualiser et comprendre les différentes sections et leurs interactions.

IV.1.1.4 Compte actuel:

Pour cette étude, l'année de référence des données disponibles utilisées pour l'ensemble des sources d'approvisionnement en eau et des sites de demande a été fixée à 2022. En outre, la période de prévision pour cette modélisation s'étend de 2023 à 2050. Cela signifie que les données et les simulations sont basées sur la situation en 2022 en tant que point de départ, et les projections vont jusqu'en 2050 pour évaluer la gestion des ressources en eau à l'avenir.

A. Sites de demande :

Les sites de demande ont été intégrés dans le modèle conceptuel de cette étude dans le but d'analyser la demande en eau, la demande non satisfaite en eau, et la distribution des ressources, entre autres. Chaque site de demande est représenté graphiquement par un nœud, correspondant à un usage spécifique, qu'il s'agisse d'usage domestique, agricole, industriel, touristique, de services, ou pétrolier. Dans ce modèle, cinq sites de demande ont été créés, à savoir :

- 1) **Site AEP ACL** : Ce site représente l'agglomération principale de Hassi Messaoud, utilisée pour les besoins domestiques et urbains en eau (AEP).
- 2) **Site AEP AS** : Ce site désigne l'agglomération secondaire de Hassi Messaoud (zone éparses), destinée à un usage domestique et urbain en eau (AEP).
- 3) **Site AEA AS** : Ce site est dédié à un usage agricole (AEA) dans les zones secondaires ou éparses.
- 4) **Site ITS** : Il correspond à un usage industriel, touristique, et de services (ITS) dans la région de Hassi Messaoud.
- 5) **Site Pétrolière** : Ce site est destiné à un usage pétrolier dans le champ pétrolier de Hassi Messaoud.

En général, tous les sites de demande sont alimentés à partir des eaux souterraines extraites de la nappe du Complexe Terminal (CT), à l'exception des opérations pétrolières d'injection d'eau, qui sont fournies par la nappe Continental Intercalaire (CI). Ces sources sont représentées graphiquement dans le modèle par deux points distincts.

B. Demande en eau domestique et urbaine

Le demande en eau domestique et urbaine dépendent principalement de la population et de la disponibilité des ressources en eau. Selon les estimations de l'Agence Nationale de Gestion Intégrée des Ressources en Eau (AGIRE), le besoin en eau pour chaque habitant est d'environ 150 l/j. Cependant, la croissance démographique et économique joue un rôle essentiel dans la

détermination de la demande en eau à l'échelle spatiale et temporelle, qu'elle soit annuelle ou mensuelle.

Dans cette étude, le site de demande AEP ACL est approvisionné par 22 forages, tandis que le site de demande AEP AS est alimenté par seulement deux forages, avec une fréquence de pompage de l'ordre de 16 à 24 heures (ADE, 2022). Par conséquent, le volume annuel d'eau consommé s'élève à 10,79 Mm³/an pour l'agglomération principale (AEP ACL). Cela équivaut à une dotation d'environ 581 l/j/h en fonction de l'offre en ressources en eau, compte tenu du niveau d'activité annuel, soit une population d'environ 50865 habitants en 2002. En ce qui concerne les zones éparses ou les agglomérations secondaires, elles comptent environ 1390 habitants avec une dotation de 1430 l/j/h.

Il est important de noter que la dotation en eau potable est considérablement peu élevée que le besoin en eau d'habitant 150 l/j/h. Cette augmentation notable s'explique par divers facteurs, notamment les pertes et les problèmes de distribution dans les réseaux, le gaspillage d'eau et son utilisation à des fins agricoles, que ce soit pour l'irrigation de jardins ou de forêts. Dans tous les cas, l'eau potable est largement utilisée à des fins domestiques dans cette région, où elle est disponible et abordable à un coût relativement bas. Cependant, la sensibilisation à l'économie de l'eau semble être en déficit parmi les citoyens.

C. Demande en eau d'irrigation :

En 2022, une enquête menée par les autorités locales (DSA, ABH-S et DRE) a permis de caractériser les zones agricoles dispersées de Hassi Khuildet et Hassi Bakrat (AS). Ces zones se concentrent principalement sur deux types de cultures : les palmeraies de dattiers, les cultures maraîchères et parfois l'olivier. L'irrigation gravitaire est le principal mode d'irrigation dans ces zones. La superficie agricole totale (SAT) a été estimée en utilisant des outils de Système d'Information Géographique (SIG) pour cartographier ces zones, avec une surface irriguée totale d'environ 454 hectares. La détermination des besoins en eau d'irrigation a été effectuée en tenant compte de divers facteurs tels que le climat, le type de culture, le mode d'irrigation, la qualité des sols et de l'eau, entre autres.

Dans cette étude, la disponibilité en eau d'irrigation a été calculée en se basant sur les prélèvements actuels et habituels des eaux souterraines dans la nappe du Complexe Terminal (CT). Ces prélèvements proviennent de 219 puits captant la nappe phréatique à une profondeur comprise entre 20 et 30 m, avec un débit variant entre 1 et 2 l/s, ainsi que de 2 forages captant la nappe souterraine profonde avec un débit de 20 à 30 l/s.

Cependant, les besoins en eau d'irrigation varient selon les cultures ainsi que d'autres facteurs tels que la nature du sol et le climat. Par exemple, les besoins en eau pour les palmeraies sont

estimés à 28 000 m³/h/an (7 Mois), tandis que pour les cultures maraîchères, ils varient selon la plante, par exemple 16000 m³/h/an (4 Mois), pour la pastèque, et 14000 m³/h/an (105 jour) pour la pomme de terre et la tomate. En général, le volume maximum utilisé correspond aux besoins en eau des palmeraies, soit 28000 m³/h/an.

Par ailleurs, selon l'estimation de la Direction des ressources en eau (DRE-Ouargla), le débit total produit est en moyenne de 490 l/s avec une fréquence de pompage d'environ 10 heures. Ainsi que, la disponibilité réelle en eau d'irrigation est estimée à environ 14181,94 m³/h/an.

D. Demande en eau industriel touristique et service (ITS) :

En 2018, une enquête administrative visant à recenser les points d'eau destinés à un usage industriel, touristique et de services (ITS) a été lancée par l'Agence du Bassin Hydrographique Sahara (ABH-S) dans la wilaya de Ouargla. Cette enquête a révélé que la commune de Hassi Messaoud comptait le plus grand nombre de forages en exploitation, soit un total de 85 forages, dont 84 étaient destinés à un usage de services et un seul à un usage industriel. Les prélèvements annuels d'eau dans cette catégorie ont été estimés à environ 1,28 Mm³/an.

E. Demande en eau pétrolière:

Le champ pétrolier de Hassi Messaoud abrite l'un des gisements d'hydrocarbures les plus importants en Algérie. Dans ce champ, la Société Sonatrach Division Production (SHDP) exploite environ 56 forages d'eau pour soutenir les opérations pétrolières, en particulier l'injection d'eau dans les puits pétroliers. Parmi ces forages, 32 d'entre eux captent l'eau douce de la nappe du Continental Intercalaire (CI). En supposant un débit moyen par forage et par nappe de 100 l/s pour le Continental Intercalaire et de 30 l/s pour le Complexe Terminal (Sénonien et Mio-Pliocène), avec une fréquence de pompage moyenne d'environ 5 heures /Jour, les prélèvements annuels d'eau pour ces opérations sont estimés à environ 25 Mm³/an.

F. La ressource en eau :

La ressource en eau est le point de départ de chaque modèle de gestion, que ce soit pour l'alimentation en eau potable (AEP), l'irrigation agricole (AEA) ou d'autres usages tels que l'industrie, le tourisme et les services (ITS), ainsi que les opérations pétrolières. Les prélèvements se font principalement à partir du réservoir Complexe Terminal (CT), qui comprend deux nappes distinctes.

- La première est la nappe Mio-Pliocène (CTM), située à une profondeur d'environ 20 à 30 m et caractérisée par une qualité d'eau contenant plus de 2 g/l. En général, la plupart des eaux extraites de cette nappe sont utilisées à des fins agricoles.

- La seconde est la nappe du Sénonien (CTS), qui est utilisée principalement pour l'alimentation en eau potable. Cette nappe est plus profonde que la nappe Mio-Pliocène, atteignant jusqu'à 350 m, et sa qualité est d'environ 2 g/l.
- Les eaux douces de la nappe la plus profonde, le Continental Intercalaire (CI), ont une qualité d'eau comprise entre 1,5 et 2 g/l. Cette nappe est fréquemment utilisée pour les opérations d'injection pétrolière.

En 2022, les prélèvements en eaux souterraines (CI et CT) étaient estimés à 50,8 hm³. Parmi ceux-ci, 11,52 hm³ étaient destinés à l'alimentation en eau potable (AEP), 13 hm³ à l'irrigation, 1,28 hm³ aux secteurs des services, du tourisme et de l'industrie (ITS). De plus, environ 25 hm³ étaient utilisés pour les activités pétrolières, notamment l'injection dans les puits pétroliers pour maintenir la pression dans le gisement d'hydrocarbures, l'alimentation des installations industrielles, des camps de base des sociétés pétrolières, ainsi que pour les opérations de forage et de work over.

IV.21.5 Création et analyse des scénarios :

La création de scénarios est un élément essentiel de la modélisation (WEAP). Elle consiste à élaborer des hypothèses clés concernant la gestion de l'eau, les politiques et les technologies pour évaluer leur impact sur le système. Le scénario de référence part des données actuelles et simule l'évolution du système sans intervention, en considérant l'année actuelle comme année de base.

Les scénarios sont utilisés pour explorer le modèle sous différents angles en fonction du contexte socio-économique et technologique. Chaque scénario est formulé sous forme d'hypothèses clés, et le modèle (WEAP) permet de simuler les conséquences de ces hypothèses, notamment la demande en eau, la demande non satisfaite et la distribution de l'eau. Les besoins en approvisionnement de chaque scénario sont comparés à ceux du scénario de référence.

Dans cette étude, quatre scénarios distincts figure 65, ils ont été créés :

1) Scénario de référence (2023-2050) :

- Taux d'accroissement de la population de 2,15 % à long terme.
- Dotations calculées pour différents secteurs.
- ✚ Le secteur en eau potable 581,3 l/j/hab pour le Site AEP ACL, 1430,5 l/j/hab pour le Site AEP AS.
- ✚ Le secteur agricole nécessite 28000 m³/ha/an pour l'agriculture c'est-à-dire le besoin en eau de palmeraies <7 Mois> pour le Site AEA AS.

- 2) Scénario d'enquête (taux d'accroissement de la population de 1,5 % contrepartie 2,15 %).
- 3) Scénario de consommation rationnelle (le niveau de consommation de 150 l/j/hab et 16000 m³/ha/an pour l'agriculture c'est-à-dire le besoin en eau de la pastèque < 4Mois>).
- 4) Scénario de consommation optimale (avec niveaux de consommation de 120 l/j/hab et 14 000 m³/ha/an pour l'agriculture c'est-à-dire le besoin en eau de la pomme de terre et la tomate < 105jour>).

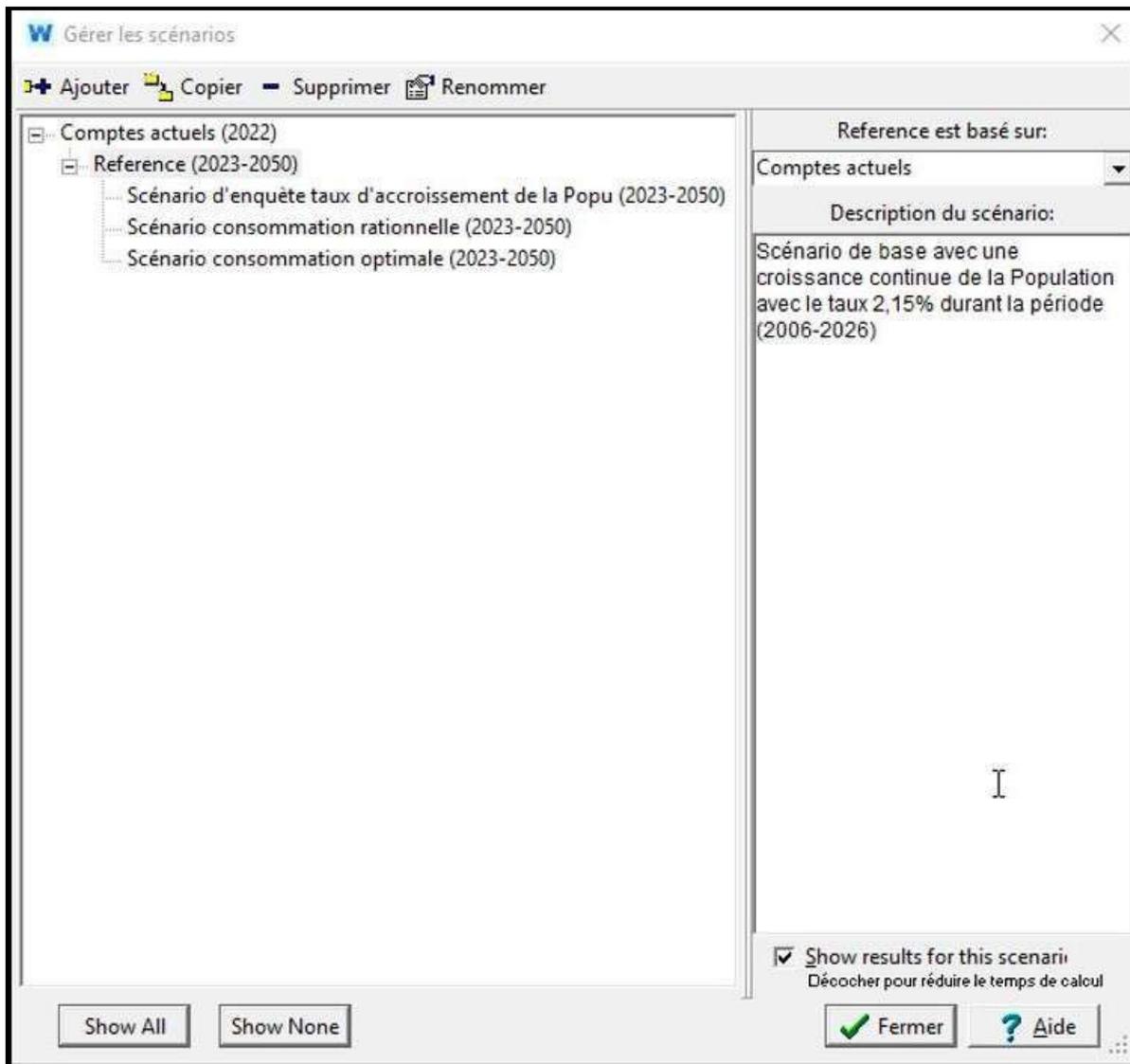


Figure 65: illustre la création de Scénario (WEAP).

IV.1.1.5 Scénario de référence (2023-2050) :

Le scénario de référence repose sur les données actuelles en place et vise à modéliser l'évolution du système sans aucune modification significative. Il sert de point de référence pour la période allant de 2023 à 2050 dans le cadre des autres scénarios. Ce scénario reflète la trajectoire actuelle du système et nous permet d'approcher la réalité présente et future.

A. Secteur Urbaine :

1) Projection d'accroissement de la population :

La région d'étude connaît une croissance démographique avec un taux d'accroissement de la population de 2,15% (PDAU 2018). Selon les données de l'Office National de Statistique , la population de la zone d'étude était d'environ 53378 habitants en 2023. Les projections démographiques estiment qu'elle atteindra près de 61949 habitants en 2030 et 94799 habitants en 2050 (figure 66).

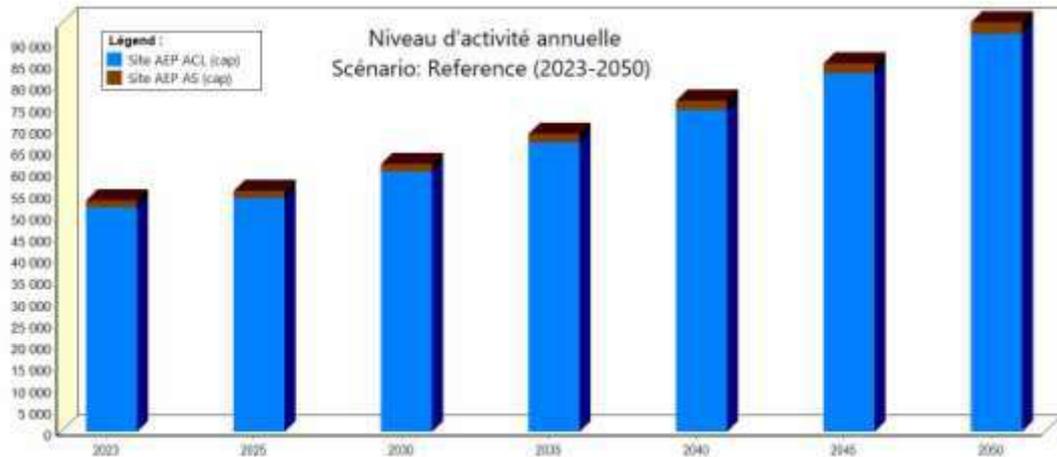


Figure 66: la projection démographique (cap).

2) Demande en eau Domestique :

La demande en eau domestique englobe l'utilisation de l'eau par les ménages pour des activités telles que la consommation, la cuisine, le nettoyage, la douche et la chasse d'eau des toilettes. En nous basant sur les pratiques courantes et en tenant compte du niveau d'activité de la zone d'étude, qui dépend de l'accroissement de la population, nous pouvons estimer la demande en eau pour le scénario de référence de la période 2023-2050 (figure 67). L'évolution de la demande en eau augmente progressivement, passant de 11,77 Mm³/an en 2023 à 13,66 Mm³/an en 2030, pour finalement atteindre 20,9 Mm³/an en 2050.

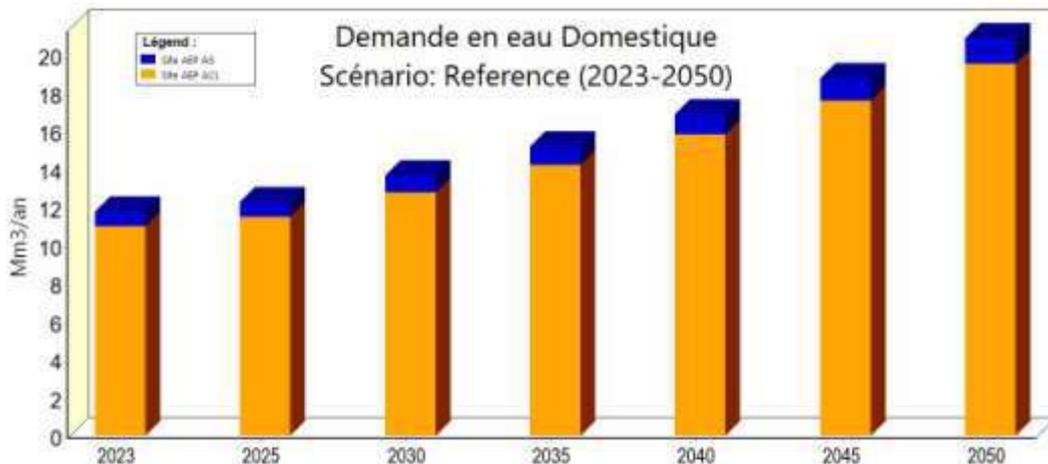


Figure 67: la demande en eau domestique en Mm³/an.

3) Eau Distribuée domestique :

L'approvisionnement en eau domestique est marqué par un déséquilibre entre l'offre et la demande, entraînant ainsi une demande en eau non satisfaite. À l'heure actuelle, le volume d'eau approvisionné est d'environ 11,31 Mm³/an en 2023. Cette quantité augmentera légèrement pour atteindre environ 11,47 Mm³/an en 2025, puis restera stable à 11,68 Mm³/an en 2030 à 2050.

4) Demande non satisfaite en eau domestique :

La demande non comblée dans la gestion des ressources en eau se réfère à la situation où les besoins en eau d'une population ou d'une région ne sont pas pleinement satisfaits en raison de divers facteurs, tels que le manque d'approvisionnement en eau, les pertes dans la distribution, les infrastructures insuffisantes, une gestion déficiente des ressources en eau ou d'autres contraintes. En d'autres termes, lorsque la demande en eau destinée à un usage domestique dépasse la quantité réellement disponible ou fournie, on parle de demande non comblée. Cela peut avoir des conséquences telles que la pénurie d'eau, la dégradation de la qualité de l'eau ou des conflits pour l'accès à cette ressource vitale.

La gestion efficace des ressources en eau vise à réduire cette demande non comblée en optimisant l'utilisation de l'eau disponible et en mettant en place des politiques et des infrastructures appropriées pour répondre aux besoins de la population tout en préservant de manière durable les ressources en eau.

Dans le scénario de référence (2023-2050), il est observé que la demande en eau non comblée annuelle, comme illustré dans la figure 68, est estimée à environ 0,45 Mm³/an en 2023. Ce chiffre augmente progressivement pour atteindre 1,98 Mm³/an en 2030, pour finalement atteindre près de 9,22 Mm³/an en 2050.

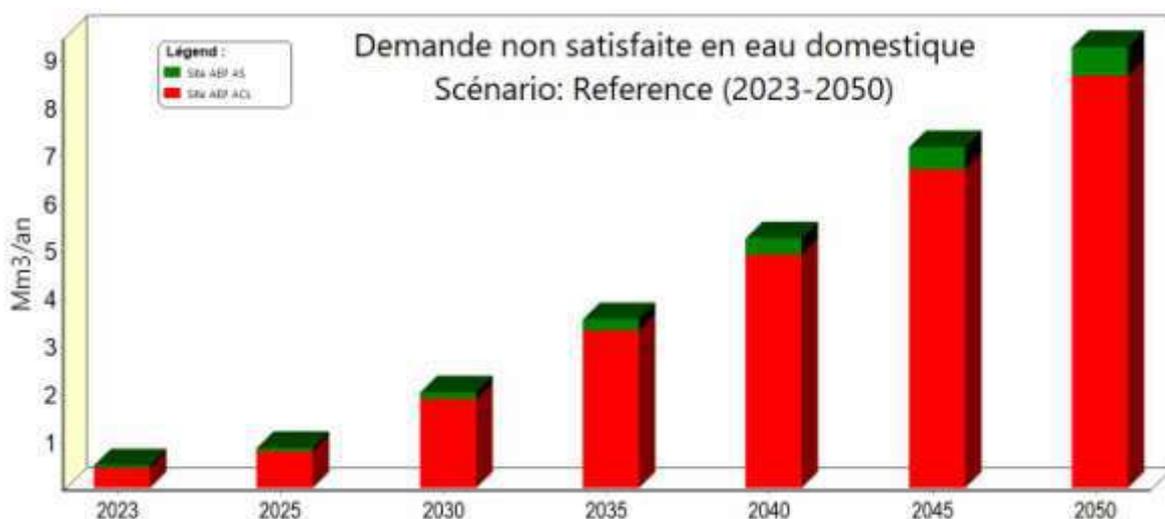


Figure 68: Demande non satisfaite en eau domestique en Mm³/an.

B. Secteur agricole :

1) Projection des superficies irriguées :

Dans cette étude, les zones agricoles de Hassi Khuilidet et Hassi Bakrate ont été sélectionnées comme sites de demande agricole (Site AEA AS). La superficie agricole irriguée (SAU) de ce site s'élève à environ 454 hectares. Cependant, selon les résultats de l'enquête menée par la Direction des Services Agricoles (DSA), il a été constaté que le taux de croissance de la superficie agricole dans cette zone est relativement faible, s'établissant à environ 1,5%. Cela implique que la superficie irriguée passera de 460 h en 2023 à 511 h en 2030, pour finalement atteindre 689 h en 2050 (figure.69).

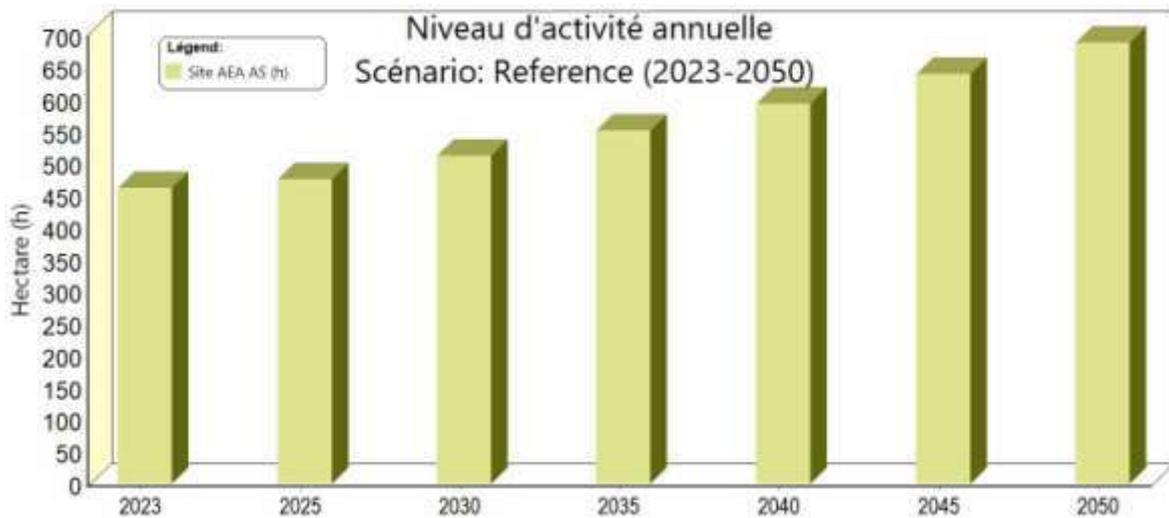


Figure 69: la projection des superficies irriguées en hectare.

2) Demande en eau d'irriguée :

Les besoins en eau pour des fins agricoles sont généralement évalués en fonction de la disponibilité requise de la ressource en eau. Dans la zone d'étude, le secteur agricole est principalement représenté par des périmètres agricoles établis par l'État ou exploités par des acteurs privés, équipés d'infrastructures d'investissement. En général, la plupart des exploitants gèrent des superficies de 2 à 3 hectares. Ces surfaces sont irriguées à l'aide de puits traditionnels d'une profondeur d'environ 30 m et d'un débit de 1 à 2 l/s, en utilisant des méthodes d'irrigation gravitaire ou au goutte-à-goutte.

Par conséquent, la figure 70 montre que la demande en eau agricole est estimée à 13 Mm³/an en 2023, augmentant à 14 Mm³/an en 2030, pour finalement atteindre 19 Mm³/an en 2050.

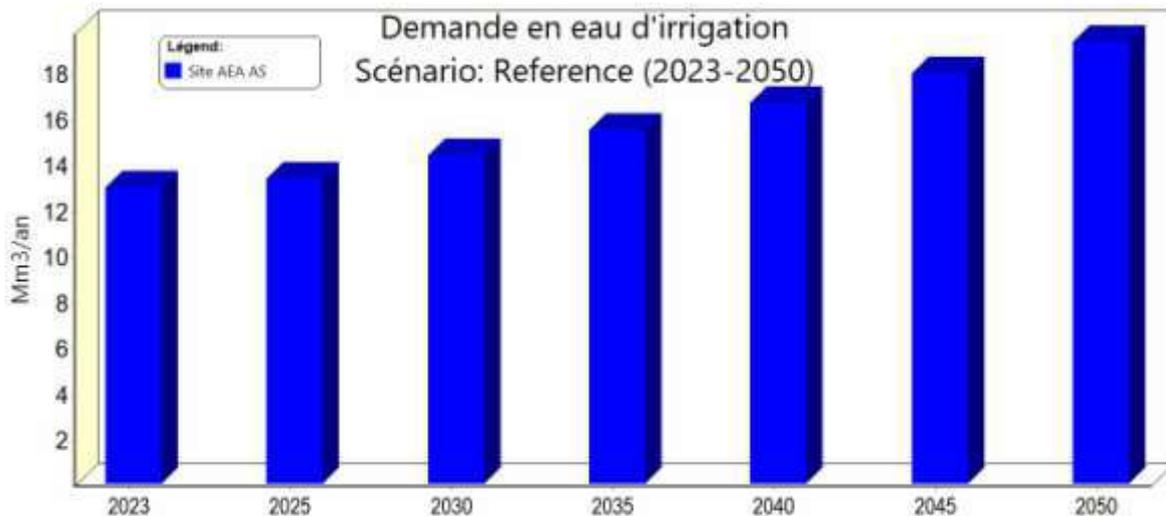


Figure 70 : Demande en eau d'irrigation en Mm³/an.

3) Approvisionnement en eau d'irrigation :

La distribution d'eau dans le secteur agricole implique la mise à disposition d'eau pour l'irrigation et d'autres besoins liés à l'agriculture. Elle englobe la fourniture d'eau aux exploitations agricoles, qu'elle soit puisée à partir de sources telles que des rivières, des puits, des lacs ou d'autres réserves d'eau, et son acheminement vers les zones où elle est nécessaire pour l'irrigation des cultures, l'abreuvement du bétail et d'autres activités agricoles. Cette distribution revêt une importance capitale pour favoriser la croissance et la production de cultures agricoles, ce qui contribue directement à la sécurité alimentaire et à l'approvisionnement en produits agricoles. La gestion de cette distribution peut être confiée à des entités gouvernementales, des coopératives agricoles ou des exploitants privés, en fonction des politiques et des pratiques en vigueur dans une région donnée.

En ce qui concerne la distribution spécifique d'eau d'irrigation dans la gestion des ressources en eau, il s'agit du volume d'eau disponible pour répondre aux besoins agricoles. Selon les données de la figure 71, ce volume s'élevait à environ 6 Mm³/an en 2023. Il connaît une légère augmentation pour atteindre environ 6,08 Mm³/an en 2030, pour finalement se stabiliser à 6,33 Mm³/an en 2050.

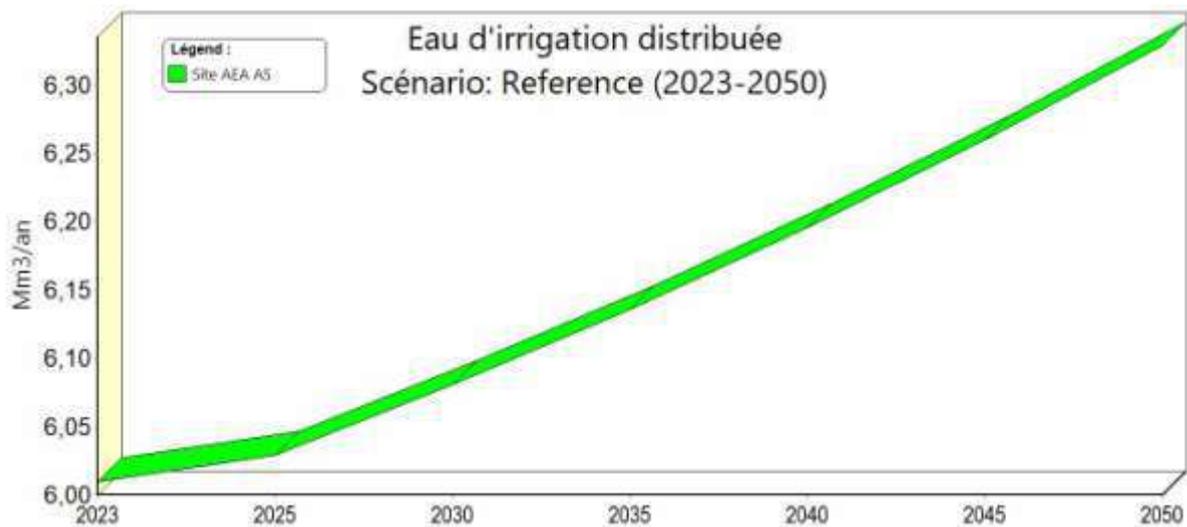


Figure 71: La distribution en eau d'irrigation en Mm³/an.

4) Demande non satisfaite en eau d'irrigation :

La demande en eau non satisfaite dans le secteur agricole se définit comme la disparité entre la quantité d'eau requise pour répondre aux besoins d'irrigation des terres agricoles et la quantité d'eau effectivement disponible ou fournie pour l'irrigation. En d'autres termes, il s'agit de la demande en eau agricole qui ne peut être entièrement comblée en raison de diverses limites telles que des ressources en eau insuffisantes, des infrastructures d'irrigation inadéquates, des pertes importantes d'eau ou d'autres contraintes.

Cette demande non satisfaite peut avoir des répercussions sur la productivité agricole et la sécurité alimentaire d'une région donnée. Il est à noter, comme le montre la figure 72, que les pertes de distribution atteignent un niveau élevé, soit 53%. Par conséquent, la demande en eau non satisfaite est estimée à environ 6,89 Mm³/an en 2023, puis augmente à 8,24 Mm³/an en 2030, pour finalement atteindre 12,96 Mm³/an en 2050.

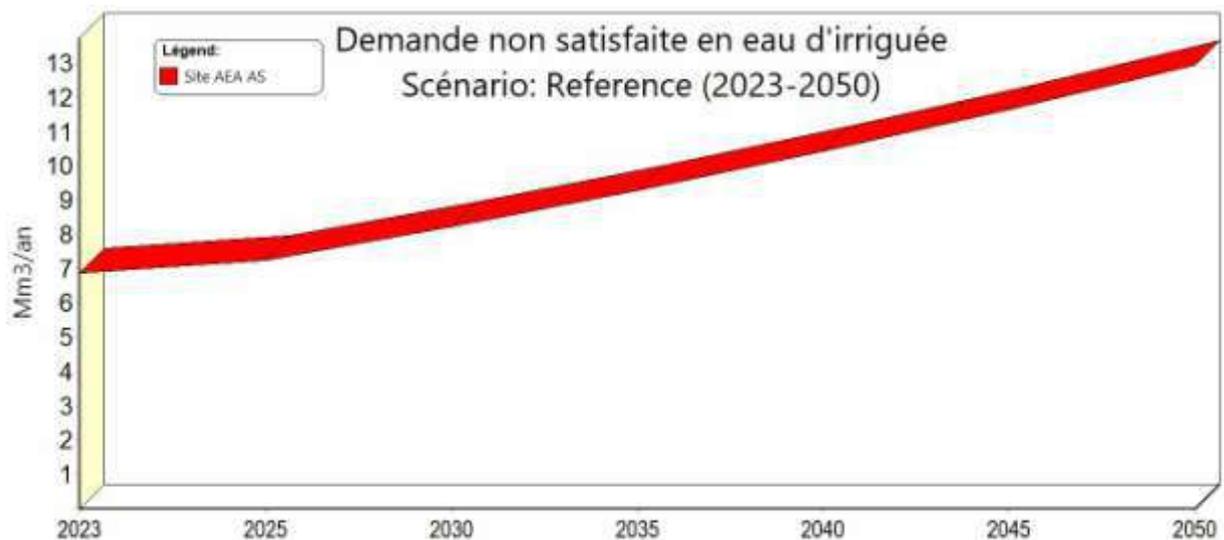


Figure 72: Demande en eau d'irrigation non satisfaite en Mm³/an.

IV.1.1.6 Scénarios d'enquête 2023-2050 :

Le scénario d'enquête étudie l'impact de la réduction du taux d'accroissement de la population des sites (ACL) et (AS) de 2,15 % à 1,5 %. Selon le Plan directeur d'aménagement et d'urbanisme (PDAU 2018) de la région d'étude, on observe un ralentissement à long terme de la croissance démographique de 2006 à 2026, en raison de plusieurs facteurs. Parmi ces facteurs, on peut citer la limitation de l'expansion urbaine vers la zone industrielle et le retour des habitants vers leurs lieux d'origine dans le nord du pays. En général, la ville de Hassi Messaoud, en tant que centre d'activité pétrolière et industrielle, voit sa population stabilisée, en grande partie en fonction des opportunités d'emploi, ce qui constitue un facteur déterminant.

IV.1.1.7 Scénarios consommation rationnelle 2023-2050 :

Dans cette étude, nous examinons la consommation actuelle ou habituelle de l'eau dans la zone d'étude pour différents secteurs d'utilisateurs. Cette consommation dépend principalement de la projection du niveau d'activité, qu'il s'agisse de la population totale ou de la superficie agricole totale. Dans ce scénario, nous remplaçons la consommation réelle par une consommation rationnelle ou théorique 150 l/j/hab et 16000 m³/ha/an pour l'agriculture c'est-à-dire le besoin en eau de la pastèque < 4Mois> comme le maraichère le plus utilisé par saison.

L'objectif est de déterminer la durabilité des résultats de ce modèle (demande en eau, distribution et demande non satisfaite) avec cette approche rationnelle de la consommation d'eau.

IV.1.1.8 Scénarios consommation optimale 2023-2050 :

Dans ce modèle, nous avons utilisé une approche de consommation optimale (120 l/j/hab, et 14 000 m³/ha/an pour l'agriculture c'est-à-dire le besoin en eau de la pomme de terre et la tomate < 105jour >)> comme le maraichère le plus utilisé par saison et arrière-saison.

Dans le but d'obtenir des résultats améliorés par rapport aux autres scénarios. Nous cherchons à réduire les pertes de distribution afin d'améliorer la gestion des ressources en eau non renouvelables de la zone d'étude.

IV.1.1.9 Comparaison les scénarios 2023-2050 :

C. Secteur Urbaine :

La dotation réelle en eau potable dans la zone d'étude dépasse la dotation théorique de 150 l/j/hab, ainsi que la dotation optimale (le besoin en eau pour l'être-humaine) de 120 l/j/hab. Plus précisément, dans la ville de Hassi Messaoud, la dotation réelle annuelle est d'environ

581 l/j/hab, tandis que dans les zones éparses Hassi Bakkrate et Hassi Khouildate, elle atteint 1430 l/j/hab.

En générale, on observe que la dotation réelle plus que la dotation théorique ou bien pour le besoin en eau d'être-humaine il indique il y a une interférence non claire entre le besoin et la demande en eau potable et domestique à cause de plusieurs facteurs tel que l'utilisation dans l'autre usage comme l'irrigation pour les jardins, les plaintes, les bisses et les lavages pourtant que le peu de gaspillage, lorsque selon l'AGIRE et l'ABH Sahara en 2018 dans la zone d'étude la perte linéaire de réseau distribuée est estimée environ de $100 \text{ m}^3/\text{j}/\text{km}$ c'est-à-dire 62 % de volume d'eau non facturer aussi 30% de volume d'eau facturer ou compter et le reste forfait par de volume produit totale (AGIRE (ABH-Sahara) 2018).

En comparant tous les scénarios figure 73,74 et 75 avec le tableau 13, qui projetés la demande en eau diminue dans tous les modèles par rapport au scénario de référence, en particulier dans les modèles de consommation rationnelle et optimale. Le scénario d'enquête, avec un taux de croissance de la population de 2,15 % à 1,5 %, montre une réduction de la demande en eau d'environ $0,07 \text{ Mm}^3/\text{an}$ en 2023, passant à $0,68 \text{ Mm}^3/\text{an}$ en 2030, pour finalement atteindre $3,42 \text{ Mm}^3/\text{an}$ en 2050. En revanche, les autres scénarios montrent une réduction de la demande allant jusqu'à $9 \text{ Mm}^3/\text{an}$ en 2023, augmentant à $10 \text{ Mm}^3/\text{an}$ en 2030, pour finalement atteindre près de $15 \text{ Mm}^3/\text{an}$ en 2050. En général, la distribution en eau potable suit une tendance similaire à la demande en eau. Cependant, les pertes de distribution et la demande non satisfaite dans le scénario de référence atteignent environ $0,45 \text{ Mm}^3/\text{an}$, soit environ 4 % en 2023, passant à $2 \text{ Mm}^3/\text{an}$ en 2030, dont 14,5 %, pour finalement atteindre près de $9,22 \text{ Mm}^3/\text{an}$, soit 44 %, en 2050. Cependant, il est à noter que les scénarios de consommation rationnelle et optimale affichent des pertes de distribution nulles, à l'exception du scénario d'enquête, qui montre une demande non satisfaite faible, allant de 9,5 % en 2030 à 28 % en 2050.

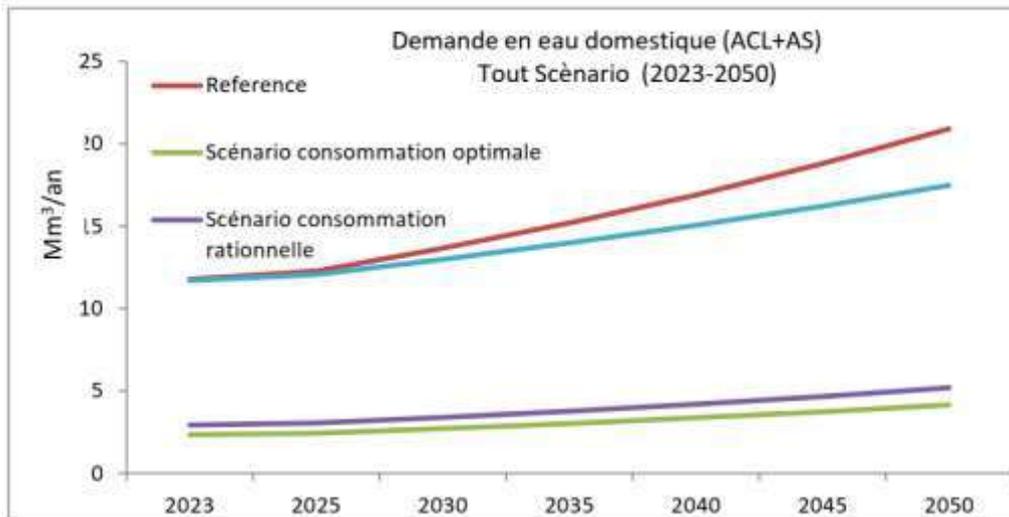


Figure 73: Demande en eau domestique (ACL et AS) en Mm³/an.

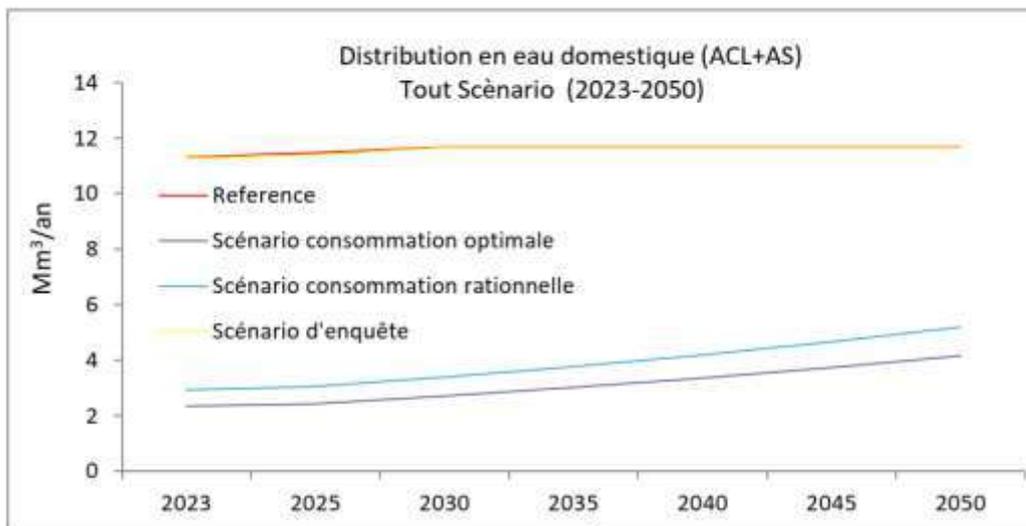


Figure 74: Distribuée en eau domestique (ACL et AS) en Mm³/an.

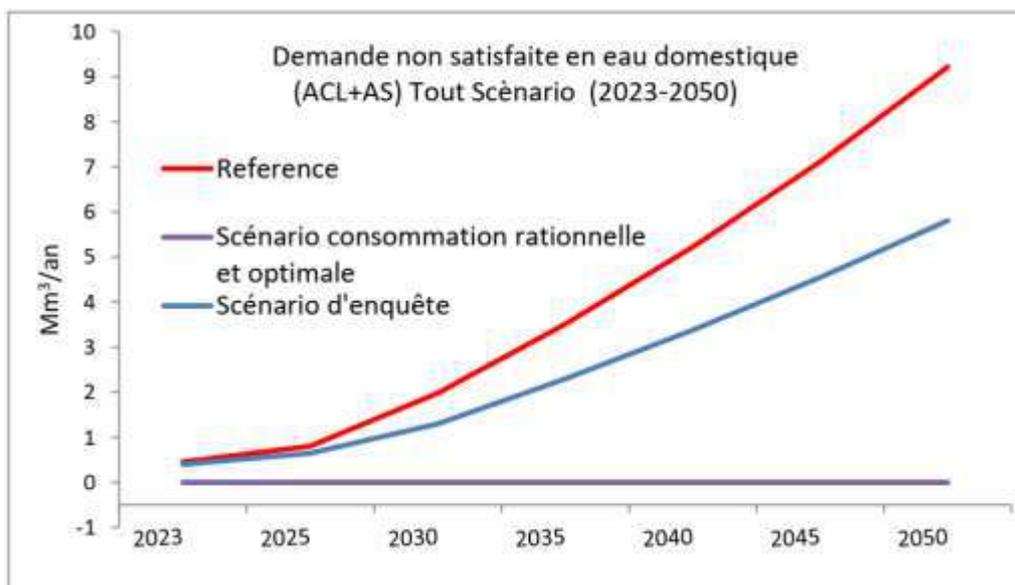


Figure 75: Demande non satisfaite en eau domestique (ACL et AS) en Mm³/an.

Tableau 13: Demande et Distribution en eau Domestique en Mm3/an.

Années	2023	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Demande en eau Domestique (ACL et AS)							
Référence	11,77	12,27	13,66	15,19	16,89	18,79	20,9
Scénario consommation optimale	2,34	2,43	2,71	3,02	3,36	3,73	4,15
Scénario consommation rationnelle	2,92	3,05	3,39	3,77	4,19	4,66	5,19
Scénario d'enquête	11,7	12,05	12,98	13,98	15,06	16,22	17,48
Distribution en eau Domestique (ACL et AS)							
Référence	11,31	11,47	11,68	11,68	11,68	11,68	11,68
Scénario consommation optimale	2,34	2,43	2,71	3,02	3,36	3,73	4,15
Scénario consommation rationnelle	2,92	3,05	3,39	3,77	4,19	4,66	5,19
Scénario d'enquête	11,29	11,4	11,68	11,68	11,68	11,68	11,68
Demande non satisfaite en eau Domestique (ACL et AS)							
Référence	0,45	0,81	1,98	3,51	5,22	7,11	9,22
Scénario consommation optimale	0	0	0	0	0	0	0
Scénario consommation rationnelle	0	0	0	0	0	0	0
Scénario d'enquête	0,4	0,65	1,3	2,3	3,38	4,55	5,81

D. Secteur Agricole :

Selon les figure 76, 77 et 78 avec le tableau 14, la demande en eau dans ce secteur reste toujours plus élevée que dans les secteurs de l'alimentation en eau potable, domestique. Dans les zones éparses ou secondaires de la région de Hassi Messaoud, correspondant à une superficie irriguée de 454 hectares, la demande en eau atteint environ 13 Mm³/an en 2023, pour finalement atteindre 19 Mm³/an en 2050. Cependant, cette demande diminue d'environ 50 % pour une consommation optimale.

En général, pour ce secteur, la demande non satisfaite est atteinte environ 50 % en 2023, 57% en 2030 et 67 % en 2050. Ce déficit en raison de plusieurs facteurs tels que le mode d'irrigation traditionnel gravitaire.....etc.

En revanche, la demande non satisfaite est plus faible avec une consommation optimale, variant de 13 % en 2023, 15 % en 2030 à 21 % en 2050.

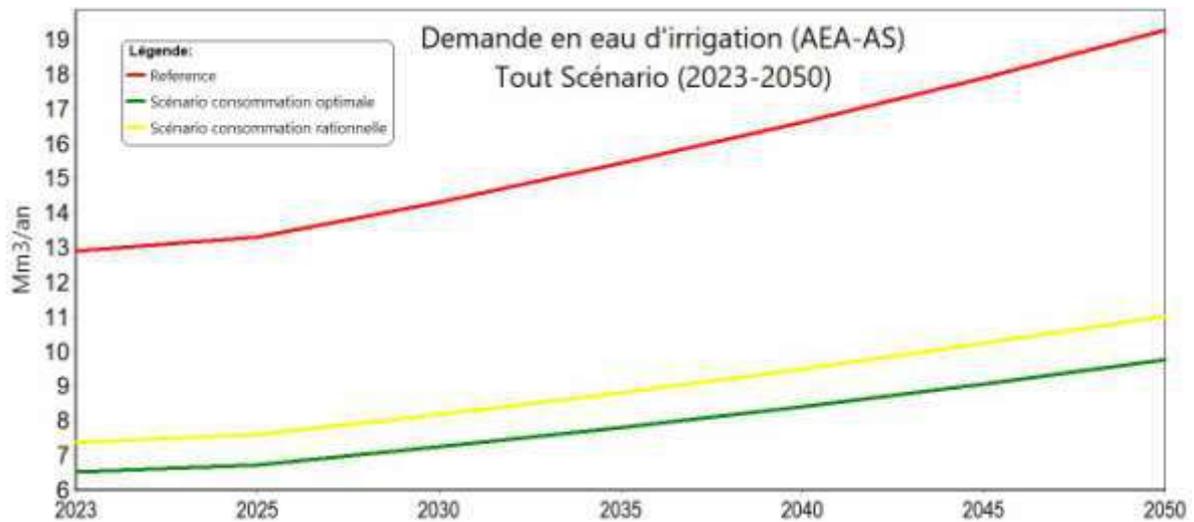


Figure 76: Demande en eau d'irrigation.

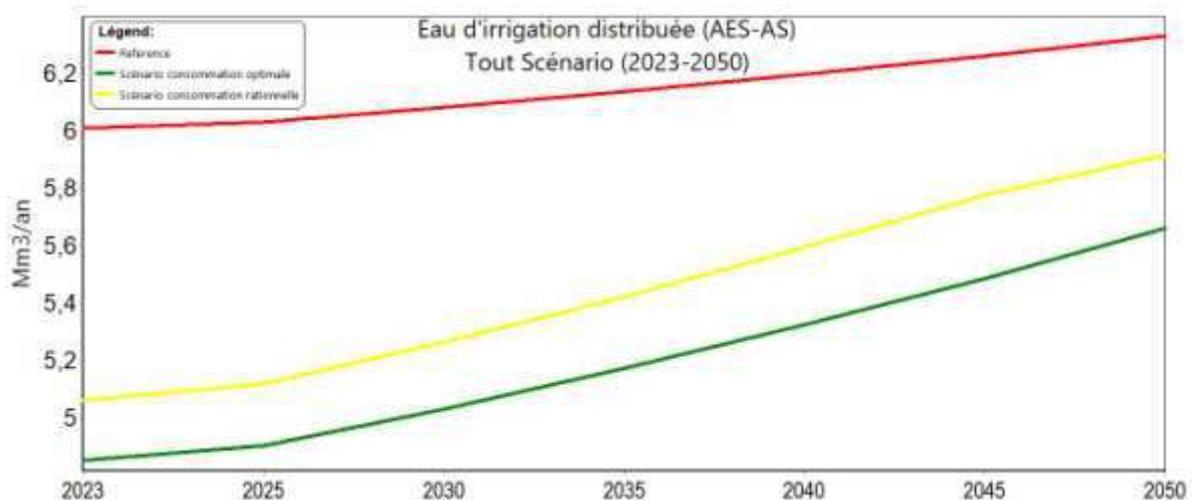


Figure 77: Distribution en eau d'irrigation (AEA AS).

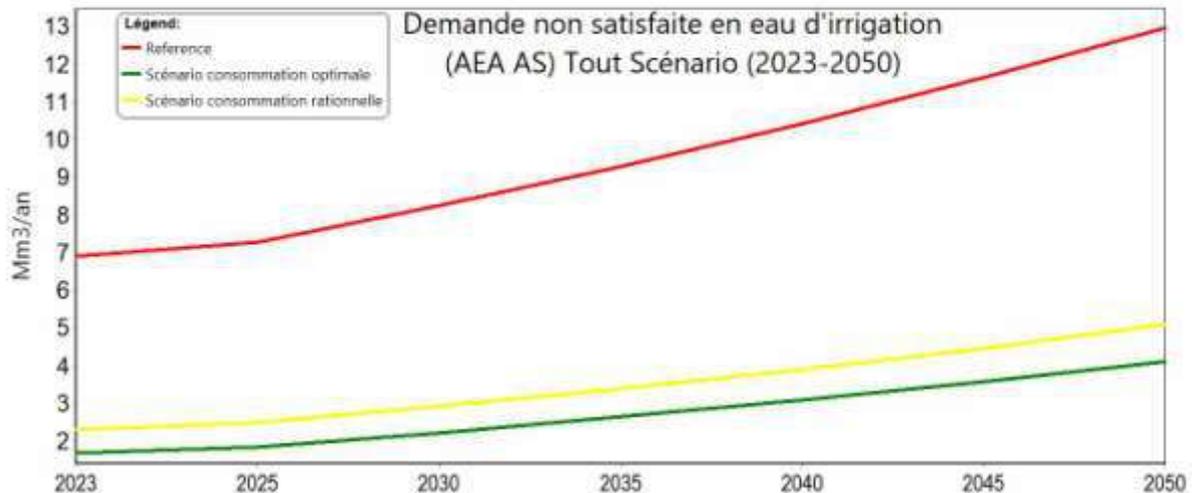


Figure 78: Demande non satisfaite en eau d'irrigation.

E. Secteur Industriel :

La région d'étude abrite un secteur industriel majeur, principalement axé sur l'activité pétrolière en premier lieu, suivie de près par les matériaux de construction. Le secteur industriel comprend un total de 85 forages pour les usages industriels, touristiques et de services, ainsi que 56 forages dédiés à l'usage pétrolier dans le champ de Hassi Messaoud. Les prélèvements annuels en eau pour ces différents usages sont estimés à environ 1,28 Mm³/an. En ce qui concerne l'usage pétrolier, il est géré par les opérateurs pétroliers, en particulier la Société Sonatrache Division Production (SH-HMD) avec des prélèvements annuels estimés à 25 Mm³/an, principalement pour les opérations d'injection dans les puits pétroliers, visant à maintenir la pression des gisements d'hydrocarbures, ainsi que pour l'alimentation des usines, des bases de vie des sociétés et des chantiers pétroliers, ainsi que les travaux de forage et de work-over.

Tableau 14: Demande et Distribution en eau d'irrigation en Mm3/an.

Années	2023	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Demande en eau Irrigation (AEA-AS)							
Référence	12,9	13,29	14,32	15,43	16,62	17,9	19,29
Scénario consommation optimale	6,54	6,73	7,25	7,81	8,42	9,07	9,77
Scénario consommation rationnelle	7,37	7,6	8,18	8,82	9,5	10,23	11,02
Distribution en eau Irrigation (AEA-AS)							
Référence	6,01	6,03	6,08	6,14	6,2	6,26	6,33
Scénario consommation optimale	4,85	4,9	5,03	5,17	5,32	5,49	5,66
Scénario consommation rationnelle	5,06	5,12	5,26	5,42	5,59	5,78	5,92
Demande non satisfaite en eau Irrigation (AEA-AS)							
Référence	6,89	7,26	8,24	9,29	10,42	11,64	12,96
Scénario consommation optimale	1,68	1,83	2,22	2,64	3,09	3,58	4,11
Scénario consommation rationnelle	2,31	2,48	2,92	3,39	3,9	4,45	5,11

IV.22 Conclusion :

La région de Hassi Messaoud, de par sa position géographique et sa richesse en ressources hydrocarbonées, revêt une importance cruciale. La gestion intégrée des ressources en eau, qui repose sur les nappes d'eau souterraine Complex Terminal (CT) et Mio-Pliocène (CTM), englobe quatre secteurs d'utilisation : l'alimentation en eau potable (AEP), l'agriculture, les services, le tourisme et l'industrie, en particulier l'usage pétrolier. Cette gestion est déléguée à divers organismes, de l'Agence Nationale Intégrée des Ressources en Eau (AGIR) à l'Agence de Bassin Hydrographique Sahara (ABH-S), ainsi qu'aux autorités locales.

Dans le scénario de référence, la demande en eau totale des quatre secteurs s'élève à 11,52 Mm³/an pour le secteur urbain, 13 Mm³/an pour le secteur agricole, et 26 Mm³/an pour les services et l'industrie, dont 65 % sont utilisés pour l'injection dans les puits pétroliers. La demande non satisfaite augmente progressivement, passant de 4 % en 2023 à 44 % en 2050 pour le secteur urbaine et de 50 % en 2023 à 67 % en 2050 pour le secteur agricole.

Cependant, les scénarios de consommation rationnelle et optimale présentent des perspectives plus prometteuses. Ils réduisent considérablement la demande en eau, éliminant les pertes de distribution et réduisant ainsi la demande non satisfaite. Les pertes de distribution sont pratiquement nulles dans ces scénarios, sauf dans le scénario d'enquête, où la demande non satisfaite reste faible, allant de 9,5 % en 2030 à 28 % en 2050 pour le secteur urbaine de 13 % en 2023, 15 % en 2030 à 21 % en 2050 pour le secteur agricole.

Pour garantir une gestion durable des ressources en eau dans la région de Hassi Messaoud, il est impératif d'adopter des politiques de gestion appropriées. Cela pourrait inclure la promotion de pratiques de consommation rationnelle de l'eau, l'optimisation des systèmes d'irrigation agricole, la réduction des pertes de distribution, et la mise en place de mécanismes de contrôle et de suivi plus efficaces.

De plus, une sensibilisation accrue à l'importance de la gestion responsable de l'eau est essentielle pour impliquer la communauté locale dans la préservation de cette ressource vitale. En fin de compte, une approche holistique et collaborative entre les différentes parties prenantes est nécessaire pour assurer un avenir durable pour la gestion de l'eau dans la région de Hassi Messaoud.

CONCLUSION
GÉNÉRALE

Conclusion générale

la zone d'étude, occupe une place cruciale au sein de la région de Hassi Messaoud, ce qui en fait l'un des principaux gisements mondiaux. Toutefois, cette relation étroite avec la richesse pétrolière expose également la région à des risques environnementaux associés aux activités industrielles. En parallèle, les populations locales secondaires dépendent largement de l'agriculture pour leur subsistance.

La région présente un climat désertique avec peu de précipitations et des variations de température extrêmes. Malgré cela, les ressources en eau souterraine sont vitales, bien que leur utilisation excessive, due en partie à un bilan hydrologique négatif causé par la sécheresse et le réchauffement climatique, soit préoccupante. Sur le plan géologique, la région est riche en formations rocheuses et abrite un important gisement pétrolier. Elle détient également d'importantes réserves d'eau douce, principalement dans les nappes du Continental Intercalaire (CI) et du Complexe Terminal (CT), bien que leur surexploitation et leur gestion inadéquate posent des défis.

La composition chimique des eaux souterraines est influencée par divers facteurs géologiques et anthropiques, notamment la subsidence Plio-Quaternaire et les activités tectoniques. Les données révèlent des variations significatives de température, de pH, de conductivité électrique et de dureté. Les analyses ioniques indiquent des compositions chimiques variées, avec des implications pour l'utilisation de l'eau à des fins humaines, agricoles et industrielles. Les défis liés à la qualité de l'eau, tels que la corrosion et la formation de tartre, nécessitent une surveillance continue et des méthodes de traitement appropriées. En outre, l'étude met en lumière l'impact des processus géologiques et des activités humaines sur la minéralisation des eaux souterraines.

La gestion durable des ressources en eau dans la région de Hassi Messaoud est essentielle pour assurer leur pérennité. En raison de son emplacement stratégique et de sa richesse en hydrocarbures, la région revêt une importance cruciale. La gestion intégrée des ressources en eau, axée sur les nappes d'eau souterraine Complexe Terminal (CT) et Mio-Pliocène (CTM), englobe divers secteurs tels que l'approvisionnement en eau potable, l'agriculture, les services, le tourisme et l'industrie, en particulier l'utilisation pétrolière. Cette gestion est supervisée par différents organismes, de l'Agence Nationale Intégrée des Ressources en Eau (AGIR) à l'Agence de Bassin Hydrographique Sahara (ABH-S), ainsi que par les autorités locales.

Dans le scénario de référence, la demande totale en eau des quatre secteurs est significative, notamment dans les puits pétroliers. Cependant, la demande non satisfaite augmente

progressivement, soulignant le besoin de mesures de gestion plus efficaces. Les scénarios de consommation rationnelle et optimale offrent des perspectives plus encourageantes en réduisant la demande en eau et en éliminant les pertes de distribution, contribuant ainsi à réduire la demande non satisfaite. Ces scénarios démontrent que des pratiques de gestion adaptées peuvent atténuer les pressions sur les ressources en eau à long terme.

Pour garantir une gestion durable des ressources en eau dans la région de Hassi Messaoud, il est impératif d'adopter des politiques de gestion appropriées. Cela pourrait inclure la promotion de pratiques de consommation rationnelle de l'eau, l'optimisation des systèmes d'irrigation agricole, la réduction des pertes de distribution, et la mise en place de mécanismes de contrôle et de suivi plus efficaces. De plus, une sensibilisation accrue à l'importance de la gestion responsable de l'eau est essentielle pour impliquer la communauté locale dans la préservation de cette ressource vitale. En fin de compte, une approche holistique et collaborative entre les différentes parties prenantes est nécessaire pour assurer un avenir durable pour la gestion de l'eau dans la région de Hassi Messaoud.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

1. **Abbasnia, A, Nader Yousefi, Amir Hossein Mahvi, Ramin Nabizadeh, Majid Radfard, Mahmood Yousefi, et Mahmood Alimohammadi. 2019.** « Evaluation of groundwater quality using water quality index and its suitability for assessing water for drinking and irrigation purposes: Case study of Sistan and Baluchistan province (Iran) ». *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal* 25 (4): 988-1005. <https://doi.org/10.1080/10807039.2018.1458596>.
2. **Achour, S, L Youcef, et S Guergazl. 2008.** « Qualité physico-chimique des eaux souterraines et superficielles du sahara septentrional oriental algérien », 79. <https://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=20353814>.
3. **AGIRE (ABH-Sahara) (2018)** 'Rapport de l'enquête administrative forages AEP-ITS'. 'Rapport de service public de l'eau potable - Enquête 2018 -Ouargla'
4. **Alaya, Mohsen Ben, Salwa Saidi, Thouraya Zemni, et Fouad Zargouni. 2014.** « Suitability Assessment of Deep Groundwater for Drinking and Irrigation Use in the Djefara Aquifers (Northern Gabes, South-Eastern Tunisia) ». *Environmental Earth Sciences*. <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2729-9>.
5. **Arfa A, Bouselsal B, Zeddouri A, Kebili M (2022)** Groundwater Geochemical and Quality of the Continental Intercalary Aquifer in Béni Ounif, Southwest Algeria. *Journal of Ecological Engineering* 2022, 23(9), 1–12. <https://doi.org/10.12911/22998993/151070>.
6. **Bagnouls, F. et Gaussen, H. (1952)** 'L'indice xéothermique'. Available at: https://www.persee.fr/doc/bagf_0004-5322_1952_num_29_222_7361.
7. **Ballais, J.-L. et Heddouche, A. (1997)** 'Bas Sahara septentrional et Grand Erg Oriental', p. 27. Available at: <https://hal.science/hal-01567846/>.
8. **Bel et Cuhe (1969)** 'Mise au point des connaissances sur la nappe du Complexe Terminal'.
9. **Bel et Demargne (1966)** 'Etude géologique du Continental Intercalaire', DEC Alger .
10. **Benlaieb, Moussa, Heythem Bouhafs, Abdelhak Bennaoui, Imed Eddine Nezli, et KECHICHED, Rabah. (2019).** « caractérisation et modélisation du réservoir Cambro-Ordovicien de la zone 01 du champ de Hassi Messaoud ». Thesis. <http://dspace.univ-ouargla.dz/jspui/handle/123456789/22203>.
11. **Benmeriem, R. (2016)** Synthèse géologique et étude géostatistique des réservoirs Cambriens de la zone « Up Side » Nord de champ de Hassi Messaoud (Sud Algérien). Kasdi Merbah Ouargla. Available at: <http://dspace.univ-ouargla.dz/jspui/handle/123456789/13068>.
12. **Berkaloff, A. (1967)** Biologie et physiologie cellulaires. Hermann. Available at: <https://books.google.dz/books?id=IVUa0AEACAAJ>.

13. **Bouchahm, Nora, et Samia Achour. 2008.** « Hydrochimie des eaux souterraines de la région orientale du Sahara septentrional algérien – Identification d'un risque de fluorose endémique ». *La Houille Blanche*, n° 2 (avril): 76-82. <https://doi.org/10.1051/lhb:2008020>.
14. **Boudjema, A., S. Guettaia, A. Bouanania, et K. Baba Hamed. (2010).** « Élaboration de la carte de vulnérabilité méthode DRASTIC:(cas de la nappe du Mio-Pliocene a Hassi-Messaoud, Nord-Est Algerien) ». *Communication Science & technologie*, n° 8.
15. **Boudjema, A. (2008)** Etude d'impact de l'activité pétrolière sur la nappe du mio-pliocène dans le champ de Hassi Messaoud. Tlemcen, Université Abou Bekr Belkaïd. Faculté des Science. Available at: <https://www.ccdz.cerist.dz/admin/notice.php?id=123214>.
16. **Bouselsal B., Johnbosco C. E. (2024).** Graphical, statistical and index-based techniques integrated for identifying the hydrochemical fingerprints and groundwater quality of In Salah, Algerian Sahara. *Environmental Geochemistry and Health* 46, 158 (2024). <https://doi.org/10.1007/s10653-024-01931-6>
17. **Bouselsal, Boualem, et Hakim Saibi. (2022).** « Evaluation of groundwater quality and hydrochemical characteristics in the shallow aquifer of El-Oued region (Algerian Sahara) ». *Groundwater for Sustainable Development* 17 (mai): 100747. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2022.100747>.
18. **Bouselsal B., Zouari K. (2022).** Identification of Groundwater Quality and Hydrogeochemical Processes in the Shallow Aquifer of El-Oued (Algerian Sahara). *New Prospects in Environmental Geosciences and Hydrogeosciences*. Springer International Publishing. DOI: 10.1007/978-3-030-72543-3_130.
19. **Bouselsal, B., Ouarekh, M. (2021).** Mapping of the Vulnerability to Pollution of El Oued Shallow Aquifer in the Algerian Sahara. In: Ksibi, M., et al. *Recent Advances in Environmental Science from the Euro-Mediterranean and Surrounding Regions* (2nd Edition). EMCEI 2019. Environmental Science and Engineering. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-51210-1_150.
20. **Bouselsal B, Belksier MS (2018)** Caractérisation géochimique de l'aquifère de Complexe Terminal de El-Oued (SE Algérie). *Journal International Sciences et Technique de l'Eau et de l'Environnement*. Volume III - Numéro 1 - Avril 2018. P 74 -80.
21. **Bouselsal, B. 2017.** « Groundwater Quality in Arid Regions: The Case of Hassi Messaoud Region (Se Algeria) ». *Journal of Fundamental and Applied Sciences* 9 (1): 528-41. <https://doi.org/10.4314/jfas.v9i1.30>.
22. **Bouselsal, B (2016).** Etude hydrogéologique et hydrochimique de l'aquifère libre d'El Oued souff (SE Algérie). Th. Doctorat Univ.de Annaba, 204p

23. **Bouselsal, B., Kherici, N., Hadj-Said, S. (2015a).** Vulnérabilité et risque de Pollution de la nappe libre d'El-Oued (SE Algérie) : application de la Méthode DRASTIC. Bulletin du Service Géologique National., Vol. 26, n° 1.
24. **Bouselsal, B., Zeddouri A., Belksier M.S., Fenazi B. (2015b).** Contribution de la Méthode de Vulnérabilité Intrinsèque GOD à l'Etude de la Pollution de la Nappe Libre d'Ouargla (SE Algérie). International Journal for Environment & Global Climate Change. Vol 3, Issue 4, 2015. P 92-99.
25. **Bouselsal B., Kherici N., Hadj-Said S., Belksier M.S. (2014).** Qualité des eaux des aquifères de Sahara septentrionale cas des eaux des aquifères d'el-oued (SE Algérie). International Journal for Environment & Global Climate Change. Vol 2, Issue 3, 2014. P 21-31.
26. **Boussaada N., Bouselsal Boualem, Slimane Abdeldjabbar Benhamida, Nabila Hammad, et Maha Kharroubi. 2023.** « Geochemistry and Water Quality Assessment of Continental Intercalary Aquifer in Ouargla Region (Sahara, Algeria) ». *Journal of Ecological Engineering* 24 (2): 279-94. <https://doi.org/10.12911/22998993/156832>.
27. **Bousseniou, A., Moad, I. et Mansouri, A. (2018)** Etude géologique du phénomène de la perte de boue dans le champ de Hassi Messaoud. Thesis Master. Kasdi Merbah Ouargla. Available at: <http://dspace.univ-ouargla.dz/jspui/handle/123456789/19454>.
28. **Bouznad, Imad Eddine. 2009.** « Ressources en eau et essai de la gestion intégrée dans la vallée Sud d'Oued Righ (W. Ouargla) (Sahara septentrional algérien) ». Mémoire Magister, Université Badji Mokhtar de Annaba (UBMA). <http://www.secheresse.info/spip.php?article26721>.
29. **Bouznad, Imad Eddine, Derradji Zouini, Issam Nouri, et Fayçal Khelfaoui. 2016.** « Essay of Modelling Water Resources Management of the Oued Righ Watershed (Algeria) Using the WEAP Decision Support System ». *Synthèse: Revue Des Sciences et de La Technologie* 33 (janvier): 56-71. <https://www.ajol.info/index.php/srst/article/view/149980>.
30. **BRL ingénierie, BNEDER, et Ecole des mines de Paris. 1999a.** « Plan Directeur Général de Développement des Régions Sahariennes - Modélisation du Complexe Terminal. »
31. **BRL ingénierie, BNEDER, et Ecole des mines de Paris (1999)** 'Plan Directeur Général de Développement des Régions Sahariennes - Modélisation du Continental Intercalaire.'
32. **BRL ingénierie, BNEDER, et Ecole des mines de Paris (2000)** 'Plan Directeur Général de Développement des Régions Sahariennes. – Note complémentaire sur le Modèle du CT'.
33. **Busson, G. (1970)** Le Mésozoïque Saharien, essai de synthèse des données des sondages algéro-tunisiens. CNRS “Centre de Recherches sur les zones arides”. Paris (série géologie

- N°11). Available at: <https://www.abebooks.fr/M%C3%A9sozo%C3%AFque-Saharien-essai-synth%C3%A8se-donn%C3%A9es-sondages/1418091373/bd>.
34. **Capot, R. (1952)** Annales de Géographie. Inst. Rech. Sah., Alger. Available at: https://www.persee.fr/doc/geo_0003-4010_1978_num_87_479_17800.
35. **Castany, G. 1982.** « Bassin Sédimentaire du Sahara Septentrional (Algérie-Tunisie). Aquifère du Continental Intercalaire et du Complexe Terminal ». *Bassin Sédimentaire du Sahara Septentrional (Algérie-Tunisie). Aquifère du Continental Intercalaire et du Complexe Terminal*, Bull, BRGM 2 III (2): 127-47.
36. **Chadha, D.K. (1999)** ‘A proposed new diagram for geochemical classification of natural waters and interpretation of chemical data’, *Hydrogeology Journal*, 7(5), pp. 431–439. Available at: <https://doi.org/10.1007/s100400050216>.
37. **Chehema, A. 2013.** « Le Sahara en Algérie, Situation et Défis ». <http://dspace.univ-ouargla.dz/jspui/handle/123456789/2532>.
38. **Cornet, A. (1964)** Introduction à l’hydrogéologie saharienne. Available at: <https://www.abebooks.fr/Introduction-lhydrog%C3%A9ologie-saharienne-Cornet-Andr%C3%A9/20665435176/bd>.
39. **Coté, M. (2005)** La ville et le désert: le bas-Sahara algérien. Available at: https://www.academia.edu/72235733/La_ville_et_le_d%C3%A9sert_le_bas_Sahara_alg%C3%A9rien.
40. « **Cours : Gestion Durable des Ressources En Eau** ». 2005. <http://elearning.centre-univ-mila.dz>.
41. **Derruau, M. (1967)** Précis de Géomorphologie . Cinquième. Available at: <https://www.abebooks.fr/Pr%C3%A9cis-G%C3%A9omorphologie-Cinqui%C3%A8me-%C3%A9dition-M-Derruau/30288315145/bd> .
42. **Dubief, J. (1952)** ‘Le vent et le déplacement du sable au Sahara.’, *Algiers Univ Inst. Rech. Sahariennes*, 8, pp. 123–164.
43. **Dubief, J. (1963)** Le climat du Sahara. Alger, Algérie: Université d’Alger. Institut de recherches sahariennes.
44. **Edmunds, W. M, A. H Guendouz, A Mamou, A Moulla, P Shand, et K Zouari. 2003.** « Groundwater evolution in the Continental Intercalaire aquifer of southern Algeria and Tunisia: trace element and isotopic indicators ». *Applied Geochemistry* 18 (6): 805-22. [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(02\)00189-0](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(02)00189-0).
45. **Egbueri, Johnbosco C. 2021.** « Signatures of Contamination, Corrosivity and Scaling in Natural Waters from a Fast-Developing Suburb (Nigeria): Insights into Their Suitability for

- Industrial Purposes ». *Environment, Development and Sustainability* 23 (1): 591-609.
<https://doi.org/10.1007/s10668-020-00597-1>.
46. **El-Aziz, Salah Hassanien Abd. 2018.** « Application Of Traditional Method And Water Quality Index To Assess Suitability Of Groundwater Quality For Drinking And Irrigation Purposes In South-Western Region Of Libya ». *Water Conservation & Management (WCM)* 2 (2): 20-32. <https://ideas.repec.org/a/zib/zbnwcm/v2y2018i2p20-32.html>.
47. **Estienne, P. et Godard, A. (1970)** Climatologie. Available at: <https://www.placedeslibraires.fr/ebook/9791037636157-climatologie-pierre-estienne-alain-godard/>.
48. **Fabre, J. (1976)** Introduction à la géologie du Sahara algérien et des régions voisines: La couverture phanérozoïque.
49. **Gardi, R. (1973)** monographie d'un grand désert.
50. **Guendouz, A. (1985)** Contribution à l'étude géochimique et isotopique des nappes profondes du Sahara Nord-Est septentrional, Algérie. These de doctorat. Paris 11. Available at: <https://www.theses.fr/1985PA112275>.
51. **Haddane, A. (2020)** Les chotts et les lacs du Sud-Est Algérien. étude géologique, géochimique et valorisation des potentialités. Thèse Doctorat Sciences. Kasdi Merbah Ouargla. Available at: <http://dspace.univ-ouargla.dz/jspui/handle/123456789/24909>.
52. **Hammad N, Bouselsal B, Boussaada N, Satouh A, Lakhdari A.S. 2023.** « Application of Water Quality Index to Assess the Potability of the Phreatic Aquifer in Ouargla (Algeria) ». *Ecological Engineering & Environmental Technology* 24 (5): 36-45. <https://doi.org/10.12912/27197050/163122>.
53. **Houari I.M, Bouselsal B, Lakhdari A.S. 2024.** Evaluating Groundwater Potability and Health Risks from Nitrates in the Semi-Arid Region of Algeria. *Ecological Engineering & Environmental Technology* 2024, 25(6), 222–236. <https://doi.org/10.12912/27197050/186954>
54. **Houérou, H.-N.L. (1990)** 'Définition et limites bioclimatiques du Sahara', *Science et changements planétaires / Sécheresse*, 1(4), pp. 246–259. Available at: https://www.jle.com/fr/revues/sec/e/docs/definition_et_limites_bioclimatiques_du_sahara_271135/article.phtml?tab=supp.
55. **Jean-Louis Ballais (2010)** 'Des oueds mythiques aux rivières artificielles : l'hydrographie du Bas-Sahara algérien', *Physio-Géo*, (Volume 4), pp. 107–127. Available at: <https://doi.org/10.4000/physio-geo.1173>.

56. **Kebili, M., Bouselsal, B., Gouaidia L. (2021).** Hydrochemical Characterization and Water Quality of the Continental Intercalare Aquifer in the Ghardaïa Region (Algerian Sahara). *Journal of Ecological Engineering*. 2021, 22(10), 152–162.
57. **Kerner, F. (1905)** Thermoïsochromes: Versuch einer kartographischen Darstellung des jährlichen Ganges der Lufttemperatur. Lechner.
58. **Kharroubi, Maha, Boualem Bouselsal, Mohammed Ouarekh, Lahcen Benaabidate, et Rahma Khadri. 2022.** « Water Quality Assessment and Hydrogeochemical Characterization of the Ouargla Complex Terminal Aquifer (Algerian Sahara) ». *Arabian Journal of Geosciences* 15 (3): 251. <https://doi.org/10.1007/s12517-022-09438-z>.
59. **Kharroubi, Maha, Boualem Bouselsal, Samia Hadj Said, Aziez Zeddouri, et Mohammed Ouarekh. 2023.** « Mineralization Mechanisms and Water Quality of the Complex Terminal Aquifer in Algerian Desert (Ouargla) ». In *Selected Studies in Environmental Geosciences and Hydrogeosciences*, édité par Amjad Kallel, Maurizio Barbieri, Jesús Rodrigo-Comino, Helder I. Chaminé, Broder Merkel, Haroun Chenchouni, Jasper Knight, et al., 197-200. *Advances in Science, Technology & Innovation*. Cham: Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-43803-5_42.
60. **Lelubre, M. (1952)** 'Conditions structurales et formes de relief dans le Sahara', *Inst. Rech. Saha., Alger*, 8, pp. 189–190.
61. **Kharroubi M, Bouselsal B, Sudhir K.S. 2024.** Groundwater Quality and Non-Carcinogenic Element Health Risks Assessment Using Multi-Technical Models: A Case of the Deep Aquifer of the Complex Terminal in Ouargla City (Southeastern Algeria). *Groundwater for Sustainable Development* 25 (mai): 101140. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2024.101140>.
62. **Marandi, Andres, et Paul Shand. 2018.** « Groundwater chemistry and the Gibbs Diagram ». *Applied Geochemistry* 97 (octobre): 209-12. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2018.07.009>.
63. **Martonne, E. de (1926)** 'L'indice d'aridité', *Bulletin de l'Association de Géographes Français*, 3(9), pp. 3–5. Available at: <https://doi.org/10.3406/bagf.1926.6321>.
64. **Shanahan, M. et al. (2014)** 'Le Changement climatique en Afrique', OSS/UNESCO. Available at: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000227151>.
65. **Monod, Theodore. 1992.** « Du désert ». *Science et changements planétaires / Sécheresse* 3 (1): 7-24. https://www.jle.com/fr/revues/sec/e-docs/du_desert_271072/article.phtml?cle_doc=000422E0&cle_doc=000422E0.
66. **Moral, P. (1964)** 'Essai sur les régions pluviothermiques de l'Afrique de l'Ouest', *Annales de géographie*, 73(400), pp. 660–686. Available at: <https://doi.org/10.3406/geo.1964.16735>.

67. **Ndoye, Seyni, Claude Fontaine, Cheikh Becaye Gaye, et Moumtaz Razack. 2018.** « Groundwater Quality and Suitability for Different Uses in the Saloum Area of Senegal ». *Water* 10 (12): 1837. <https://doi.org/10.3390/w10121837>.
68. **Nguyen, Caroline K., Kendall R. Stone, et Marc A. Edwards. 2011.** « Chloride-to-Sulfate Mass Ratio: Practical Studies in Galvanic Corrosion of Lead Solder ». *Journal AWWA* 103 (1): 81-92. <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.2011.tb11384.x>.
69. **ONM (2018)** 'Office National Météorologique'.
70. **OSS (2016)** Les changements climatiques dans la zone d'action de l'OSS. Entre vulnérabilité et adaptation. Available at: <https://www.pseau.org/outils/biblio/resume.php?d=6505>.
71. **Ouarekh, Mohammed, Boualem Bouselsal, Mohamed Salah Belksier, et Lahcen Benaabidate. 2021.** « Water Quality Assessment and Hydrogeochemical Characterization of the Complex Terminal Aquifer in Souf Valley, Algeria ». *Arabian Journal of Geosciences* 14 (21): 2239. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-08498-x>.
72. **Ouarekh, M., Bouselsal, B., Belksier, M.S., Kharroubi, M. (2023).** Hydrogeochemical and Groundwater Flow Studies in El Oued Region (Southeast Algeria). In: Kallel, A., et al. Selected Studies in Environmental Geosciences and Hydrogeosciences. CAJG 2020. Advances in Science, Technology & Innovation. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-43803-5_40
73. **Ould Baba Sy, M. (2005)** Recharge et Paléorecharge du Systeme Aquifère du Sahara Septentrional - Sécheresse info. Available at: <http://www.secheresse.info/spip.php?article43194>.
74. **Ozenda, P. (1991)** Flore et végétation de Sahara. CNRS. Available at: <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/19926785765>.
75. **DUCH (2018)** 'Plan Directeur Aménagement et Urbain'.
76. **Petit-Maire, N. et al. (1991)** 'Paléoclimats holocènes du Sahara septentrional. Dépôts lacustres et terrasses alluviales en bordure du Grand Erg Oriental à l'extrême-Sud de la Tunisie', Comptes Rendus de l'Academie des Sciences. Série IV, Physique, Astronomie, t. 312(série II), p. 1661. Available at: <https://amu.hal.science/hal-01562566>.
77. **PNUD (1983)** Actualisation de l'Etude des Ressources en Eau du Sahara Septentrional. RAB 80/011.
78. **Qu, Shen, Zheming Shi, Xiangyang Liang, Guangcai Wang, et Jiaqian Han. 2021.** « Multiple factors control groundwater chemistry and quality of multi-layer groundwater system in Northwest China coalfield - Using self-organizing maps (SOM) ». *Journal of*

79. **Sajil Kumar, P. J. 2019.** « Assessment of Corrosion and Scaling Potential of the Groundwater in the Thanjavur District Using Hydrogeochemical Analysis and Spatial Modeling Techniques ». *SN Applied Sciences* 1 (5): 395. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-0423-6>.
80. **Satouh A, Bouselsal B, Chellat S & Benaabidate L (2021)** Determination of Groundwater Vulnerability Using the DRASTIC Method in Ouargla Shallow Aquifer (Algerian Sahara). *Journal of Ecological Engineering*, 22(6), 1–8. <https://doi.org/10.12911/22998993/137680>
81. **Schlumberger et Sonatrach (2007)** Geology of Algeria. Available at: <https://www.academia.edu/10687479>.
82. **Schoeller, H. (1962)** Les eaux souterraines : Hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Available at: <https://www.abebooks.com/Schoeller-Eaux-souterraines-Hydrologie-dynamique-chimique/30782700574/bd>.
83. **SONATRACH. s. d.** « Reconnaissance lithologique et diagraphiques des étages géologiques champ de Hassi Messaoud ».
84. **Stets, E. G., C. J. Lee, D. A. Lytle, et M. R. Schock. 2018.** « Increasing Chloride in Rivers of the Conterminous U.S. and Linkages to Potential Corrosivity and Lead Action Level Exceedances in Drinking Water ». *The Science of the Total Environment* 613-614 (février): 1498-1509. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.119>.
85. **TAC. 2000.** « La gestion intégrée des ressources en eau ». Partenariat mondial pour l'eau 04. Comité technique consultatif. <https://www.gwp.org/globalassets/global/toolbox/publications/background-papers/04-integrated-water-resources-management-2000>.
86. **Tassili (2017)** Rapports fin sondage. Nouvelle ville Hassi Messaoud.
87. **Touahri, Mahmoud, Mohamed Salah Belksier, Boualem Bouselsal, et Mokhtar Kebili. 2022.** « Groundwater Quality Assessment of Hassi Messaoud Region (Algerian Sahara) ». *Journal of Ecological Engineering* 23 (11): 165-78. <https://doi.org/10.12911/22998993/153396>.
88. **Toutain, G. (1979)** Eléments d'agronomie saharienne. De la recherche au développement. Marrakech: Station Centrale d'Agronomie Saharienne.
89. **Ullman, W.J. (1985)** 'Evaporation rate from a salt pan: Estimates from chemical profiles in near-surface groundwaters', *Journal of Hydrology*, 79(3), pp. 365–373. Available at: [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(85\)90066-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(85)90066-6).

90. **UNESCO (1972)** Études des ressources en eau du Sahara septentrional. Programme des Nations-Unies pour le Développement Élément Fonds Spécial. Available at: <https://books.google.dz/books?id=PrTixgEACAAJ>.