

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE AKLI MOAND OULHADJE-BOUIRA



Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées
Département Génie Civil

Mémoire de fin d'étude

Présenté par :

GACI Nourredine

En vue de l'obtention du diplôme de **Master** en :

Filière : HYDRAULIQUE
Option : RESSOURCES HYDRAULIQUES

Thème

**CARACTERISATION DES EAUX SOUTERRAINES DE LA REGION
HASSI R'MEL (W.LAGHOAT)**

Devant le jury composé de :

YAHIAOUI Abdelhalim	MCA	IT (U. Bouira)	Président
GHERNAOUT Redhouane	MCA	FSSA (U. Bouira)	Examineur
REZIG Amina	MAA	IT (U. Bouira)	Examineur
METAICHE Mehdi	MCA	FSSA (U. Bouira)	Encadreur

Année Universitaire 2019/2020

DEDICACES

À ma chère mère fontaine de tendresses et d'espoir, À mon cher père mon exemple éternel ; Aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de l'amour dont ils ne cessent de me combler. Qu'Allah leur procure bonne santé et longue vie.
À mon épouse source de patience et soutien, Je remercie le bon Dieu qui a croisé nos chemins

À mes frères et sœurs pour leurs appui & encouragements permanent, surtout Faiza; qu'Allah l'accueille dans son vaste paradis.

À mes enfants Faiza, Marwa & Med Badis ma vie et mon bonheur.
À tous les enseignants & professeurs qui ont contribués à ma formation.
À toute personne qui a contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce mémoire.

Je dédie ce modeste travail.

REMERCIEMENTS

Avant tout nous remercions, ALLAH tout puissant, de nous avoir accordé la force, la patience et les moyens pour la réalisation de ce modeste travail ainsi accomplissement de cette année en Master 2 après 20 ans de l'ingéniorat.

Nous tenons à remercier ;

Notre promoteur Mr METAICHE Mehdi, pour sa confiance, sa patience et surtout pour ses remarques et ses conseils.

Les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer et examiner ce mémoire.

L'ensemble des enseignants ayant contribué à notre formation durant cette année.

Mon ami CHARROUK Amine de service Hydraulique de SH/DP Hassi R'mel.

Tous les collègues de la promotion Ressources hydrauliques surtout ceux qui ont facilité mon intégration Khaled & Hamid.

Enfin, nos remerciements sont adressés plus particulièrement à nos familles pour leur encouragement, nos amis(es) et toutes les personnes ayant contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

ملخص

الهدف من هذا العمل هو دراسة خصائص المياه الجوفية في منطقة حاسي الرمل (المنطقة الصناعية للنفط والغاز) من خلال تقييم المعايير الفيزيائية والكيميائية لهذه المياه من أجل تحديد خصائصها: من خلال حساب عياراتها المختلفة، ونشاطها الأيوني، ومؤشرات تشبعها لدراسة حالة التوازن الكالكو كربوني، وتصنيفاتها وفقاً للوائح المختلفة، ومدى امتثالها للمعايير الجزائرية لقبلية الشرب، ومدى ملاءمتها للاستخدام في الري. كشفت هذه الدراسة أن هذه المياه هي: معتدلة المعدن، قاسية بشكل أساسي، مغطاة أو متقشرة، لكن لديها ميل واضح للتآكل هذه المياه صالحة للشرب وتتفاوت صلاحيتها للري من جيدة إلى مقبولة.

الكلمات الرئيسية: الجودة، للعصر التوروني، الصلابة، التوصيل الكهربائي، القلوية، المعايير، القابلية للشرب، الري.

RESUME

L'objectif de ce travail est d'étudier les caractéristiques des eaux de la nappe de La région de Hassi R'mel (zone industrielle pétrolière & gazière) à travers l'évaluation des paramètres physico-chimiques de ces eaux afin de déterminer leurs qualités : en calculant les différents titres, l'activité ionique, les indices de saturations pour étudier son état équilibre calco-carbonique, la classification selon divers règlementations ainsi la conformité vis-à-vis les normes algériennes de potabilité, et leurs aptitudes à l'utilisation dans l'irrigation.

Cette étude a divulguée que ces eaux sont : modérément minéralisées et majoritairement dures, incrustantes ou entartrantes, mais ils ont une nette tendance à la corrosion, les eaux de la région de Hassi R'mel sont potable et l'aptitude à l'irrigation varie de bonne à admissible.

MOTS-CLÉS : Qualité, Nappe d'âge Turonien, Dureté, Conductivité électrique, Alcalinité, Normes, potabilité, irrigation.

ABSTRACT

The objective of this work is to study the characteristics of the under groundwater of the Hassi R'mel region (oil & gas industrial zone) through the evaluation of the physico-chemical parameters of these waters in order to determine their qualities : by calculating their different titers, their ionic activity, their saturation indices to study its calco-carbonic balance state, their classifications according to various regulations, their compliance with Algerian standards of potability, and their suitability for use in irrigation.

This study revealed that these waters are: moderately mineralized and mainly hard, encrusting or scaling, but they have a clear tendency to corrosion. These waters are potable and their suitability for irrigation varies from good to acceptable.

KEYWORDS: Quality, Turonian age water table, Hardness, Electrical conductivity, Alkalinity, Standards, potability, irrigation.

SOMMAIRE

Liste des figures.

Liste des tableaux.

INTRODUCTION GENERALE.....1

CHAPITRE I : Présentation Géologique de la Région Hassi R'mel.

I.1.Introduction.....3

I.2. Cadre Geographique3

I.2.1. Situation géographique de la région d'étude3

I.2.2. Géomorphologie3

I.3. Cadre Geologique:5

I.3.1. Stratigraphie5

I.3.1.1. Quaternaire5

I.3.1.2. Cenozoïque5

I.3.1.3. Mésozoïque6

I.4. Schema Structural9

I.5. Les traits paléogéographiques majeurs..... 10

I.5.1. L'héritage des mouvements Autrichiens 10

I.5.2. Les mouvements Atlasiques 11

I.5.3. Les mouvements Alpains 12

I.5.4. La morphologie anti Mio-Pliocène 12

I.6. Les Horizons aquifères.....12

I.7. Conclusion.....13

CHAPITRE II : Présentation Hydrologique & hydrogéologique de la région Hassi R'mel.

PREMIERE PARTIE : Etude Hydrologique.

II.1.1. Introduction 15

II.1.2. Les phénomènes accidentels 16

II.1.2.1. Le sirocco 16

II.1.2.2. Les orages 16

II.1.2.3. Le verglas 16

II.1.2.4. La gelée blanche 16

II.1.2.5. Le brouillard 16

II.1.2.6. Le vent 17

II.1.3. Analyse des paramètres climatiques 17

II.1.3.1- La température de l'air 17

II.1.3.2. La pluviométrie 19

II.1.3.3. Le vent 21

II.1.3.4. Humidité relative 21

II.1.3.5. L'insolation 22

II.1.3.6. Indice de continentalité thermique	23
II.1.4. Etude du climat	23
II.1.4.1. Les indices climatiques	24
II.1.4.2. Le régime thermique	27
II.1.5. Déficit d'écoulement de Hassi R'Mel	28
II.1.6. Conclusion.....	29

DEUXIEMME PARTIE : Etude Hydrogéologique

II.2.1. Introduction	30
II.2.2. Secteur d'études	30
II.2.2.1. La nappe superficielle du Sénono-Turonien	30
II.2.2.2. Alimentation de la nappe.....	31
II.2.3. Inventaire des points d'eau	32
II.2.4. Variations piézométriques	32
II.2.5. Caractéristiques hydrodynamiques	42
II.2.6. Conclusion	44

CHAPITRE III : Recherche bibliographique, définitions et concepts

III.1. Introduction	45
III.2. Les sources naturelles de l'eau	45
III.2.1. Les eaux de pluie	45
III.2.2. Les eaux de mer	45
III.2.3. Les eaux de surface.....	46
III.2.4. Les eaux souterraines.....	46
III.3. Les eaux d'approvisionnement.....	47
III.3.1. Eaux de surface	47
III.3.2. Eaux souterraines	47
III.4. Les origines des eaux souterraines	47
III.4.1. Eaux météorique	47
III.4.2. Eaux connées	47
III.4.3. Eaux juvéniles.....	48
III.5. Les aquifères.....	48
III.5. 1. Les aquifères des roches sédimentaires.....	48
III.5. 2. Les aquifères d'alluviaux.....	48
III.5. 3. Les aquifères des roches cristallines.....	48
III.6. Les nappes d'eau	49
III.6.1. La nappe phréatique.....	49
III.6.2. La nappe captive.....	50
III.6.3. La nappe alluviale	50
III.6.4. La nappe karstique	50
III.7. Zonalité de l'eau dans le sous -sol.....	51
III.7.1. La zone non saturée (ZNS)	51

III.7.2. La frange capillaire	51
III.7.3. La zone saturée (ZS).....	51
III.8. Constituants des eaux souterraines.....	52
III.8. 1. Les ions majeurs	52
III.8. 2. Les ions mineurs.....	53
III.8. 3. Les Eléments traces et gaz dissous	53
III.9. La qualité des eaux souterraines.....	53
III.9.1. Les Paramètres physico-chimique	53
III.9.2. Les Paramètres bactériologique	60
III.9.3. Normes de la qualité de l'eau	62
III.10. La pollution des eaux souterraines.....	64
III.10.1. Les différents critères de pollution des eaux souterraines	64
III.10.2. Transfert des polluants dans les eaux souterraines	67
III.10.3. Mécanisme de transfert des polluants dans les eaux souterraines :	68
III.10.4. Vulnérabilité des eaux souterraines.....	69
III.10.5. Traitement des eaux souterraines	70
III.11. Conclusion.....	70

CHAPITRE IV : Analyses, interprétations & recommandations

IV.1. Introduction	71
IV.2. Etude des paramètres physicochimiques	71
IV.2.1. Caractéristiques physiques	71
IV.2.1.1. La Température	71
IV.2.1.2. Le pH	72
IV.2.1.3. Conductivité électrique	72
IV.2.1.4. La turbidité	73
IV.2.2. Caractéristiques chimiques	74
IV.2.2.1. Vérification des analyses chimiques	74
IV.2.2.2. Les Cations	75
IV.2.2.3. Les Anions	79
IV.3. Les Titres de l'eau	83
IV.3.1. Le titre hydrométrique (TH) ou la dureté	83
IV.3.2. Titre alcalimétrique (alcalinité)	84
IV.3.2.1. Titre alcalimétrique simple (Titre TA).....	85
IV.3.2. Titre alcalimétrique complet (Titre TAC).....	85
IV.3.3. Dureté permanente PH.....	86
IV.3.4. Dureté temporaire KH (dureté alcaline, dureté carbonatée)	87
IV.3.5. Titre en sels d'acides forts SAF	87
IV.3.6. Salinité totale cationique STC	88
IV.3.7. Salinité anionique SA	88
IV.4. Activité ionique	89
IV.5. Etude de l'équilibre carbonique de l'eau (indices de saturation)	90
IV.5.1. Indice de LANGELIER	90

IV.5.2. Indice de RYZNAR	91
IV.5.3. L'indice de LARSON	93
IV.5.4. L'indice de LEROY	94
IV.6. Classification des eaux	95
IV.6.1. Salinité	95
IV.6.2. Total des solides dissous (TDS)	96
IV.6.3. Conductivité	97
IV.6.4. Selon la minéralisation	98
IV.6.5. Selon les normes européennes	99
IV.6.6. Selon Voronov	100
IV.7. Vérification aux normes Algériennes	100
IV.8. Etudes de l'aptitude des eaux à l'irrigation	101
IV.8.1. Classification de l'eau d'irrigation selon de RIVERSIDE	101
IV.8.2. Classification des eaux selon WILCOX	103
IV.9. Conclusion	104
CONCLUSION GENERALE.....	106
Références bibliographiques.....	I
Annexe.....	III

LISTE DES FIGURES

Figure	Page
Figure I.01 : Situation Géographique de champ Hassi R'mel	03
Figure I.02 : Carte topographique du champ de Hassi R'Mel	04
Figure I.03 : Situation géologique du champ de Hassi R'Mel	05
Figure I.04 : Coupe litho-stratigraphique du Hassi R'Mel	10
Figure I.05 : Carte structurale de la région de Hassi R'Mel	11
Figure I.06 : Carte géologique du champ de Hassi R'Mel	13
Figure I.07 : Coupe Géologique des nappes aquifères (N-S)	14
Figure II-01 : Bassins versant méridional de l'Atlas Saharien	15
Figure II-02 : Variations des températures moyennes mensuelles (2001 - 2020)	17
Figure II-03 : Variations moyennes annuelles des températures (2001-2020)	18
Figure II.04 : Variations moyennes mensuelles des Précipitations (2001 - 2020)	19
Figure II.05 : Variation annuelles des précipitations (2001 - 2020)	20
Figure II.06 : Variation moyennes mensuelles de vitesse du vent (2001-2020)	21
Figure II.07 : Variation moyennes mensuelles de l'humidité moyenne relative (2001-2020)	21
Figure II.08 : Variation moyennes mensuelles d'ensoleillement (2001-2020)	22
Figure II.09 : Le diagramme de DE MARTONE	25
Figure II.10 : Climagramme d'EMBERGER	27
Figure II.11 : Le Diagramme Pluviométrique	28
Figure III.01 : Répartition de l'eau sur Terre	49
Figure III.02 : Principaux types d'aquifères	52
Figure III.03 : Les différents types de nappes	54
Figure III.04 : Zonalité de l'eau dans le sous-sol	55
Figure III.05 : Différentes sources de pollution pouvant affecter les eaux souterraines	70
Figure III.06 : schéma simplifié de migration de polluant dans les formations géologique	73

Figure IV.01: Variation du pH des eaux des forages (2011-2020)	77
Figure IV.02: Variation de la Conductivité des eaux des forages (2011-2020)	78
Figure IV.03: Variation de la Teneur en Calcium des eaux des Forages (2011 - 2020)	81
Figure IV.04: Variation de la Teneur en Magnésium des eaux des Forages (2011 - 2020)	82
Figure IV.05: Variation de la Teneur en Sodium des eaux des Forages (2011 - 2020)	83
Figure IV.06: Variation de la Teneur en Potassium dans les eaux des Forages (2011-2020)	84
Figure IV.07: Variation de la Teneur en Bicarbonate dans les Forages d'eau (2011-2020)	85
Figure VI.08: Variation de la Teneur en Chlorure dans les eaux des Forages (2011-2020)	86
Figure VI.09 : Variation de la Teneur en Sulfate dans les eaux des Forages (2011-2020)	87
Figure VI.10: Variation de la Teneur en Nitrate dans les eaux des Forages (2011-2020)	88
Figure IV.11 : Variation de la Dureté des eaux des forages étudiés (2011 - 2020)	89
Figure IV.12: Titre Alcalimétrique complet des eaux étudiées	91
Figure IV.13: Dureté Permanente des eaux étudiées	92
Figure IV.14: Titre en sels d'acides forts des eaux étudiées	94
Figure IV-15: Force Ionique des eaux étudiées	95
Figure IV-16 : Salinité des eaux étudiées	103
Figure IV.17 : Variation de la TDS des eaux étudiées	104
Figure IV.18 : Variation de la Conductivité calculée des eaux étudiées	105
Figure IV.19 : Représentation sur le Diagramme de RIVERSIDE des eaux étudiées	110
Figure IV.20 : Représentation sur le Diagramme de WILOX des eaux étudiées	111

LISTE DES TABLEAUX

Tableau	Page
Tableau II.01 : Variations des Températures moyennes mensuelles de Hassi R'Mel (2001-2020)	17
Tableau II.02 : Variations des Températures moyennes annuelles de Hassi R'Mel (2001-2020)	18
Tableau II.03 : Variations Moyennes mensuelles des Précipitations (2001-2020)	19
Tableau II.04 : Variation Annuelles des Précipitations (2001 – 2020)	19
Tableau II.05 : Variation Moyennes mensuelles de Vitesse du vent (2001-2020)	20
Tableau II.06 : Variation Moyennes mensuelles de l'Humidité moyenne relative (2001-2020)	21
Tableau II.07 : Variation Moyennes mensuelles d'Ensoleillement (2001-2020)	22
Tableau II.08 : Les valeurs de "i" l'indice de DE MARTONNE	24
Tableau II.09 : classification des climats en fonction de l'indice de DE MARTONNE	24
Tableau II.10 : Relation Température –Précipitations	29
Tableau III.01 : Normes Physico-chimique des eaux souterraines (OMS)	66
Tableau III.02 : Normes Bactériologique des eaux Souterraines (OMS)	67
Tableau III.03 : Origines et natures de différentes sources de pollution de l'eau	70
Tableau IV.1 : Résultats de la Balance ionique des analyses physico-chimique	80
Tableau IV.02 : Qualité de l'eau en fonction du TH des eaux étudiées	90
Tableau IV-03 : Variation des constantes thermodynamiques (pk2 & pks) en fonction de la température	96
Tableau IV- 04 : Classification des eaux selon LANGELIER	96
Tableau IV-05 : Variation de l'indice de saturation de LANGELIER des eaux étudiées	97
Tableau IV-06 : Classification de l'eau selon l'indice de saturation de RYZNAR	98
Tableau IV-07 : Variation de l'indice de RYZNAR des eaux étudiées	98
Tableau IV-08 : Classification de l'eau selon l'indice de LARSON	99
Tableau IV-09 : Variation de l'indice de LARSON des eaux étudiées	100

Tableau IV-10 : Classification de l'eau selon l'indice de LEROY	100
Tableau IV-11 : Variation de l'indice de LEROY des eaux étudiées	101
Tableau IV.12 : Classification des eaux en fonction de la minéralisation	105
Tableau IV.13 : Classification des eaux selon les Normes européennes	106
Tableau IV.14 : Classification des eaux selon VORONOV	107
Tableau IV.15 : Normes de Paramètres Physico-chimiques des eaux	108
Tableau IV.16 : Résultats selon le Diagramme de RIVERSIDE des eaux étudiées	109
Tableau IV.17 : Résultats selon le Diagramme de WILOX des eaux étudiées	111

INTRODUCTION

GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

L'eau souterraine, est une ressource qui circule dans les profondeurs de la terre représentent environ 97 % du total des eaux douces continentales liquides sensée d'être loin de la pollution causées par l'être humain (industrielle, agricole et urbaine), sa qualité pure rend aujourd'hui 75 à 90 % de la population mondiale utilise une eau d'origine souterraine.

Les régions désertiques telles que celle de Hassi R'mel, sont caractérisées par une faible pluviométrie, sont soumises à des températures élevées, et vu l'importance industrielle et économique de cette région, l'eau joue un rôle clé dans l'activité pétrolière et gazière à tous les stades de production, exploitation & raffinage.

La région de Hassi R'mel a connu ces dernières années une croissance démographique rapide suivi d'une activité humaine importante qui couvre presque tous les domaines, et par conséquence ; les besoins en eau sont augmentés. Cette situation a incité les autorités concernées de chercher d'autres potentiels hydrauliques. Malheureusement, un déficit en eau potable est devenu une réalité, surtout en période estivale, provoqué par une chute continue du niveau statique de la nappe superficielle.

D'un point de vue hydrogéologique, la réserve des eaux souterraines du système aquifère du Sahara est non renouvelable (fossile) donc l'exploitation doit être rationnelle, la nature de la qualité de cette eau est issue par les formations traversées, cela influence sur la variation des teneurs de certains éléments susceptibles d'être présents dans l'eau.

Afin de qualifier une eau souterraine bonne ou nocive pour la santé humaine, ou bien son aptitude ou non à l'irrigation ; il y a des normes d'utilisation qui fixent les teneurs limites à ne pas dépasser pour un certain nombre de substances comme (calcium, magnésium, sodium, chlorure, sulfates, bicarbonate, nitrate) et certains paramètres comme le pH, Conductivité électrique, salinité et TDS.

Cette étude constitue une contribution à la mise en évidence des caractéristiques hydrogéologiques et physico-chimiques des eaux de la nappe en question issues des différents puits des trois zones (Nord, centre, sud) et qui a pour objectif ; regrouper,

exploiter et analyser les données, afin de déterminer leur conformité aux normes de potabilité et leur aptitude à l'irrigation.

L'élaboration de ce mémoire est basée sur les données récoltées au niveau des services Géologiques et Hydrauliques de la région (DP-Sonatrach/HRM) dont les mesures sont faites par le CRD-Sonatrach de Boumerdes.

La démarche à suivre dans ce travail s'articule sur quatre (04) chapitres :

- Le premier chapitre : où on expose la situation géographique, géomorphologique, et géologique de la région d'étude.
- Le deuxième chapitre : divisé en deux parties, première partie concerne l'étude Hydrologique et hydro climatique, et la deuxième partie s'articule autour de l'hydrogéologie de la région.
- Le troisième chapitre : consacré à une recherche bibliographique sur l'eau (les caractéristiques des eaux souterraines, et les différentes normes et classifications).
- Le quatrième chapitre : englobe l'étude physico-chimique basée sur l'illustration des différents diagrammes des différents paramètres de l'eau de la nappe Turonien de Hassi R'mel ainsi que l'interprétation des résultats d'analyse et la discussion qui comporte ;
 - La vérification de la fiabilité des données d'analyses physico-chimiques.
 - Les calculs des titres de l'eau.
 - L'étude de l'équilibre Calco-carbonique de l'eau.
 - La classification de l'eau.
 - La vérification aux normes Algériennes.
 - Et l'étude de l'aptitude des eaux à l'irrigation.

A la fin, l'étude se termine par une Conclusion Générale.

CHAPITRE I

PRESENTATION GEOLOGIQUE DE LA REGION HASSI R'MEL

I.1. Introduction :

Ce chapitre a pour but de donner une idée générale sur la région d'étude, de traiter ses caractéristiques particulièrement sa localisation géographique, son aspect structural et ses horizons aquifères.

I.2. Cadre géographique :

I.2.1. Situation géographique de la région d'étude

La région du Hassi R'mel est située au Nord de la plate-forme saharienne à 550 km au sud d'ALGER et à 120 km au sud de la ville de Laghouat (Fig.I.01), entre les méridiens 2°55' et 3°50' Est, et les parallèles 33°15' et 33°45' Nord, avec une altitude moyenne de 750 m au-dessus de niveau de la mer, d'une superficie de 3500 km², et un périmètre de 380 km, (Aricha 2003).

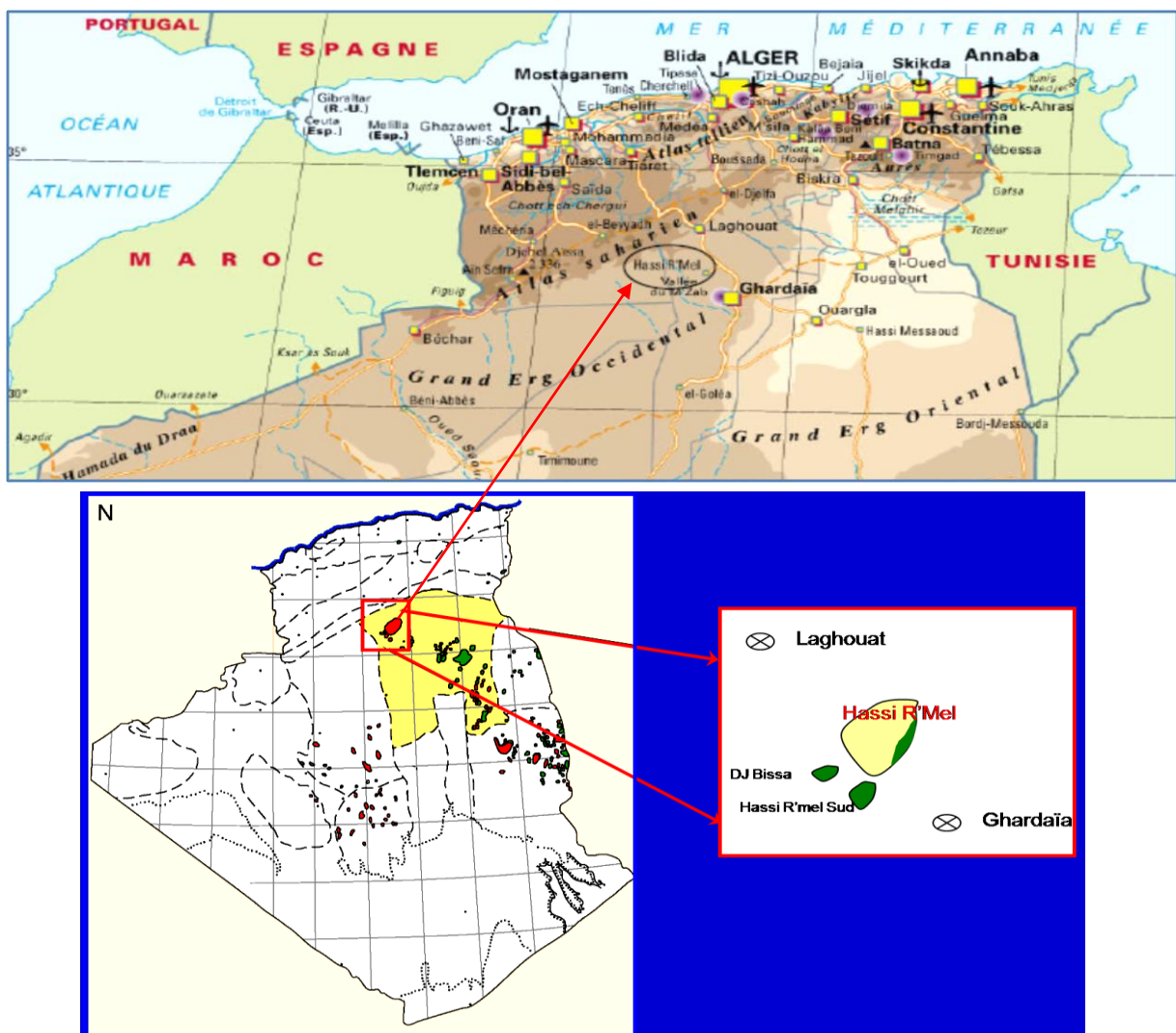


Fig. I.01: Situation Géographique de champ Hassi R'mel (source : google map)

I.3. Cadre Géologique:

La structure de Hassi R'Mel plonge en pente douce vers le Nord, en direction de la flexure Sud-Atlasique tout en se prolongeant vers le Sud – Ouest par la petite structure anticlinale du Djebel Bissa et vers le Sud par celle de HassiR'Mel. Elle se limite à l'Est par la dépression d'oued Mya (Sonatrach, 1972).

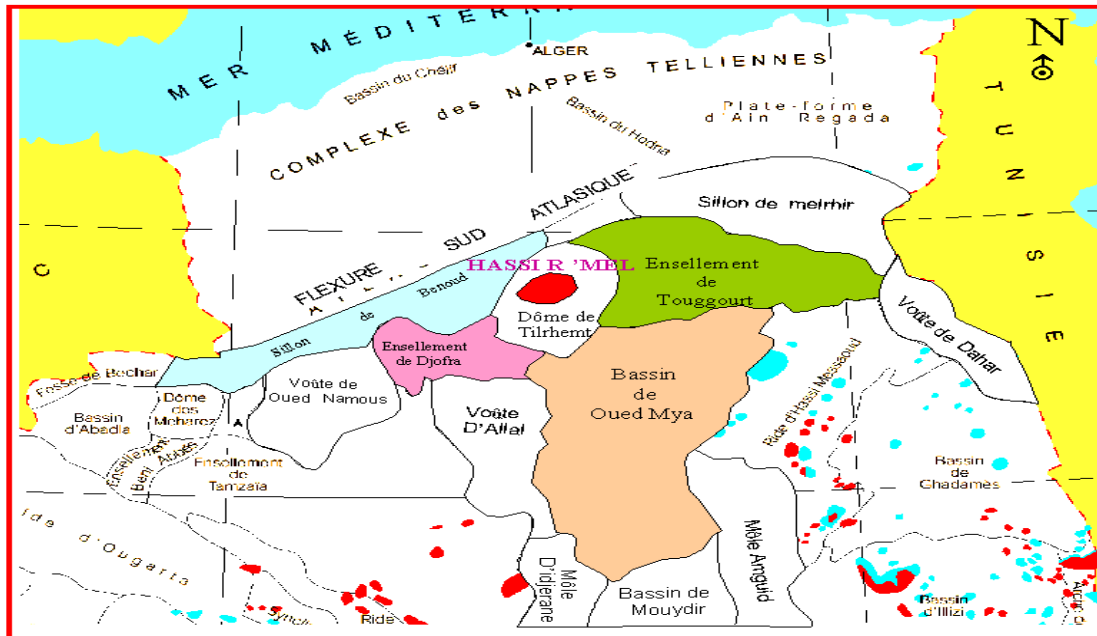


Fig. I.03 : Situation géologique du champ de Hassi R'Mel

I.3.1. Stratigraphie :

La série stratigraphique du champ de Hassi R'mel est marquée par les formations suivantes, décrites de haut en bas (voir Fig. I.04) :

I.3.1.1. Quaternaire :

Constitué d'une croûte calcaire épaisse de 10 m, (croûte amadienne), localisée par endroits dans la partie nord du champ.

I.3.1.2. Cénozoïque :

Mio-Pliocène : Epaisseur moyenne 100 m. Représenté par des calcaires et des intercalations d'une formation Argilo-gréseuse, localisée essentiellement au Nord et à l'Ouest du champ.

I.3.1.3. Mésozoïque :

I.3.1.3.1 – Le Crétacé: Epaisseur moyenne environ 700 m.

a - Sénonien: (ép. 40 m)

Il est composé de calcaires dolomitiques blancs ou beiges et de dolomies cristallines fissurées et une passée de calcaire marneux, à sa base apparaît quelques minéraux de dolomie fissurée dans les dépressions (Daïas).

b - Turonien: (ép. 40 m)

Formations dolomitique à Calcaire-dolomitique, blanches à beiges, fissurées dans les dépressions (Daïas), devenant vers la base une formation argileuse de couleur grisâtre, tendre à plastique.

c - Cénomaniens: (ép. 100 m).

Ensemble Argileux blanc à beige, parfois vacuolaires à intercalations, avec fines intercalations de calcaires dolomitiques beiges cristallins ou microcristallins.

d - Albien: (ép. 220 m).

Il est entièrement gréseux, se subdivise en une série de grès fins rouges et/ou beiges à ciment argilo-dolomitique et des intercalations d'argiles versicolores et une série de grès sable rose mal cimenté et mal classé, devenant plus argileux et gypseux vers la base.

e - Aptien : (ép. 20 à 40 m)

Il est caractérisé par des marnes gréseuses, des passées de grès argileux au Sud et des inclusions de gypse au Nord.

f - Barrémien : (ép. 35 m)

Il est totalement absent au Nord, il est formé d'une succession de grès fins à grossiers.

I.3.1.3.2. Le Jurassique :

Epaisseur moyenne d'environ 1100 m.

a - Malm : Carbonates, grés et argiles en alternance.

b - Dogger (Argileux et Lagunaire) : Succession de bancs de calcaire et d'argile.

c - Lias Marneux : Marnes et calcaires en bancs.

d - Lias Carbonaté : Calcaires a passées d'argile et d'anhydrite.

e - Lias Anhydritique : Anhydrite massive à passées d'argile.

f - Lias Salifère I : Sel massif à passées d'argile et d'anhydrite à la base.

g - Repère D1 : passées de dolomies et de Marnes (Repère Sismique et Litho-diagraphique).

h - Lias Salifère II et III : sel massif à passées d'argile.

i - Repère D2 : passées de dolomies et de marnes (Repère Sismique et Litho-diagraphique).

j - Lias Salifère 4 :

Constitué essentiellement de sel massif rosâtre et d'intercalations d'argile, il n'est développé que dans les régions du Djebel Bissa, de Hassi R'Mel Sud et le flanc Est du Champ.

I.3.1.3.3 - Le Trias : Epaisseur moyenne 200 m au Nord et 75 m au Sud.

a - Trias Argileux :

Représenté par des argiles indurées, souvent brunes chocolat à vertes, par endroits et parsemées de filons nets d'anhydrite et de sel.

b - Trias Argilo Gréseux :

C'est une superposition de trois niveaux gréseux A, B et C, séparés par des bancs d'argiles formant le gisement du gaz de Hassi R'mel :

• **NIVEAU A** :

Représenté par des grès fins, localement argileux et Anhydritiques (surtout au sommet). Présence de passées conglomératiques. Les grès sont rarement Silteux. Absents dans le Djebel Bissa.

• **NIVEAU B** :

C'est un dépôt lenticulaire composé de grès fins à moyens et d'extension limitée à la partie nord et centrale du Champ.

• **NIVEAU C** :

Constitué de grès moyens, localement grossiers, moyennement dures à friables avec parfois, la présence de dépôts conglomératiques à caractère de brèche à sa base. Absent dans HR Sud.

c - Série Inférieure :

Repose en discordance sur les termes du paléozoïque (discordance hercynienne). Constituée d'une alternance de grès fins à moyens souvent argilo silteux et de passées d'argiles silteuses.

Les Grès sont parfois carbonatés à sulfatés par endroits. Cette série est surmontée par un dépôt d'épanchement andésitique très compact, parfois altéré.

I.3.1.3.4. Le Paléozoïque :

a - Silurien :

D'une épaisseur moyenne de 350 m, est constitué par des argiles noires indurées à graptolites.

b - Ordovicien:

D'une épaisseur moyenne de 150 m, développé surtout à l'Ouest, il est entièrement détritique et subdivisé de bas en haut en :

- **Zones des alternances:** grès et argiles.
- **Argiles d'El Gassi :** finement micacées, avec présence de glauconies et de pyrite.
- **Grès d'El Atchane :** caractérisés par des grès propres et des grès argileux et siliceux.
- **Quartzites de Hamra :** représentés par des grès fins de type silt stone et d'argile.

c - Cambrien:

D'une épaisseur moyenne de 250 m, il repose directement sur un socle granitique, débutant par un conglomérat de base constituée d'éléments de roches volcaniques, de granites, de grès fins et d'argiles. Le tout est surmonté par un ensemble gréseux dans lequel se trouvent des horizons réservoirs.

De haut en bas, on distingue :

- **Liho-zone "Ri"** (e ≈ 45m) : réservoir isométrique.
- **Liho-zone "Ra"** (e >70 m) : réservoir anisométrique.
- **Liho-zone "R2"** : des grès moyens à grossiers, anisométrique, à ciment argileux et caractérisés par de nombreuses intercalations millimétriques d'illite. Les caractéristiques pétrophysiques sont mauvaises.
- **Liho-zone "R3"** : grès quartzitiques, argileux, très grossiers, mal classés, d'épaisseur variable. Leurs caractéristiques pétrophysiques sont mauvaises.

I.3.1.3.5. Le Socle :

Il s'agit de grands blocs granitiques fracturés, de couleur rose.

Syst	EP moy	ETAGES	STRAT	DESCRIPTION LITHOLOGIQUE	
CRETACE	100	MIO-PLIOCENE Discordance Alpine		Croûte calcaire et série argilo-gréseuse	
	40	SENONIEN		Calcaire à silex	
	40	TURONIEN		Dolomie vacuolaire	
	100	CENOMANIEN		Calcaire et argile	
	460	ALBIEN		Grès fins, friables, à passées d'argile	
		APTIEN		Marnes et grès	
		BARREMIEN		Grès fins à grossiers, à ciment carbonaté	
		NEOCOMIEN		Grès à passées d'argile, de calcaire et de lignite	
	JURASSIQUE	600	MALM		Carbonates grès et argile
		220	DOGGER	ARGILEUX	Calcaire dolomitique et argile.
LAGUNAIRE				Calcaire dolomitique et argile.	
510		LIAS	MARNEUX	Marnes et calcaire.	
			CARBONATE	Calcaire à passées d'argile et d'anhydrite.	
			ANHYDRITIQUE	Anhydrite massive à passées d'argile.	
			SALIFERE I	Sel massif avec une passée dolomitique "D1"	
			SALIFERE II & III	Sel à passées d'argile.	
			ARGILEUX SUPERIEUR	Argile plastique avec une passée dolomitique. "D2"	
TRIAS		50	ARGILEUX INFERIEUR	Sel massif et Argile brun-choclat	
	200	ARGILO-GRESEUX	A	Grès fin à moyen, à ciment plus ou moins argileux, anhydritique, à intercalations d'argile brune.	
			B		
			C		
30	SERIE INFERIEURE Disc. Hercynienne	Andésite, argile et passées de grès argileux.			
PALEO-ZOIQUE	22	DEVONIEN	Argile à passées de grès		
	100	SILURIEN	Argile noire à grapholites		
	128	CAMBRO-ORDOVICIEN	Quartzite-Grès à grès quartzite, grès fin à moyen,, gris-blanchâtre à lits d'argile Grès fin, argilo-bitumineux et brèches tectoniques. Grands éléments de granite fracturé, rose, orange, ferronagnésites.		
		SOCLE	++++++		

Fig.I.04:Coupe litho-stratigraphique du Hassi R'Mel (Soussi S. 2003).

I.4. Schéma Structural :

La structure de Hassi R'mel apparaît comme un grand anticlinal ondulé, de direction NNE-SSE, affecté par un réseau assez dense de failles, imprimant à celles-ci un certain compartimentage structural (PDDRHR, 1972).

Les dimensions de cette structure sont de l'ordre de 70 km du Nord et au Sud et 50 km de l'Ouest vers l'Est.

Cette structure est caractérisée par un réseau de failles orientées Sud - Nord et Est - Ouest dont le rejet peut atteindre 100 m et jouant un rôle important dans le compartimentage de la structure et l'accumulation des hydrocarbures.

La structure de Hassi R'mel est caractérisée par l'individualisation de trois zones marquées par de nombreuses culminations et dépressions d'ampleur variable.

Zone Sud : Formée par une série d'ondulations de dimensions notables (5x10 km), de forte amplitude verticale (50 m) et affectée par de nombreuses failles de rejet parfois important (100 m).

Zone Centre : Structuralement haute, elle apparaît comme un plateau faiblement ondulé pour les formations mésozoïques. Par contre, l'importance des chutes structurales des flancs Est et Ouest lui assurent une bonne fermeture structurale.

Zone Nord : ou périclinale nord du champ. Cette zone est fortement affectée par les mouvements tectoniques particulièrement pour les formations post- jurassique. Des failles assez profondes ont donné naissance à des horsts et grabens et favorisant le dépôt du Mio-Pliocène.

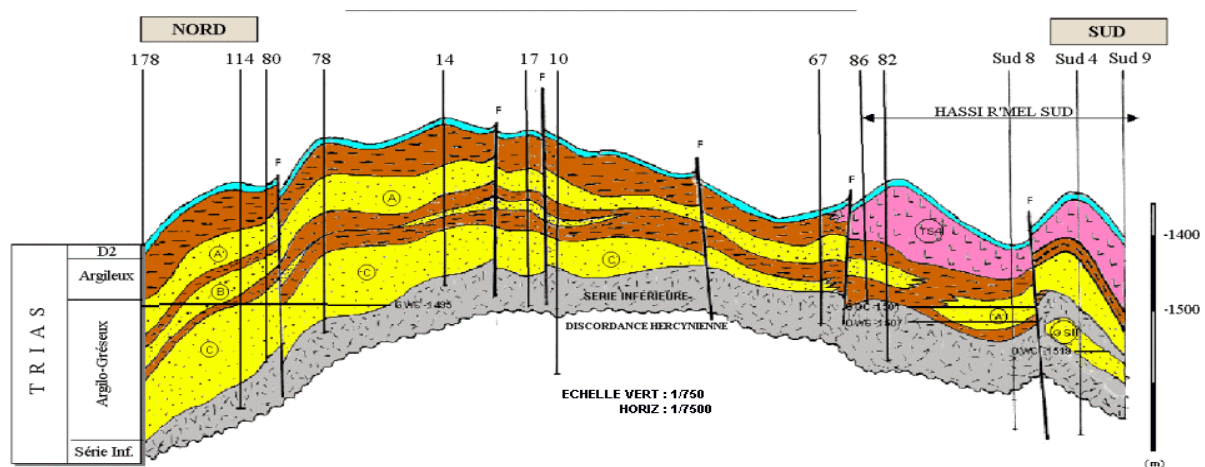


Fig. I.05 : Carte structurale de la région de Hassi R'Mel (Etude BEICIP, SONATRACH)

I.5. Les Traits paléogéographiques majeurs

I.5.1. L'héritage des mouvements Autrichiens :

Une importante phase de déformation, de type compression, s'est produite au Sahara vers l'Aptien (phase autrichienne). La direction majeure des contraintes étant orientée E-W, les grands traits structuraux méridiens à subméridiens ont subi une tendance positive.

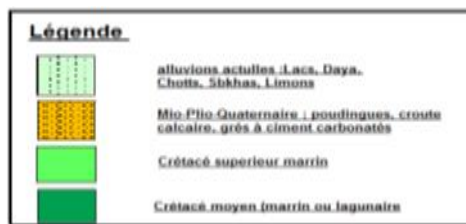
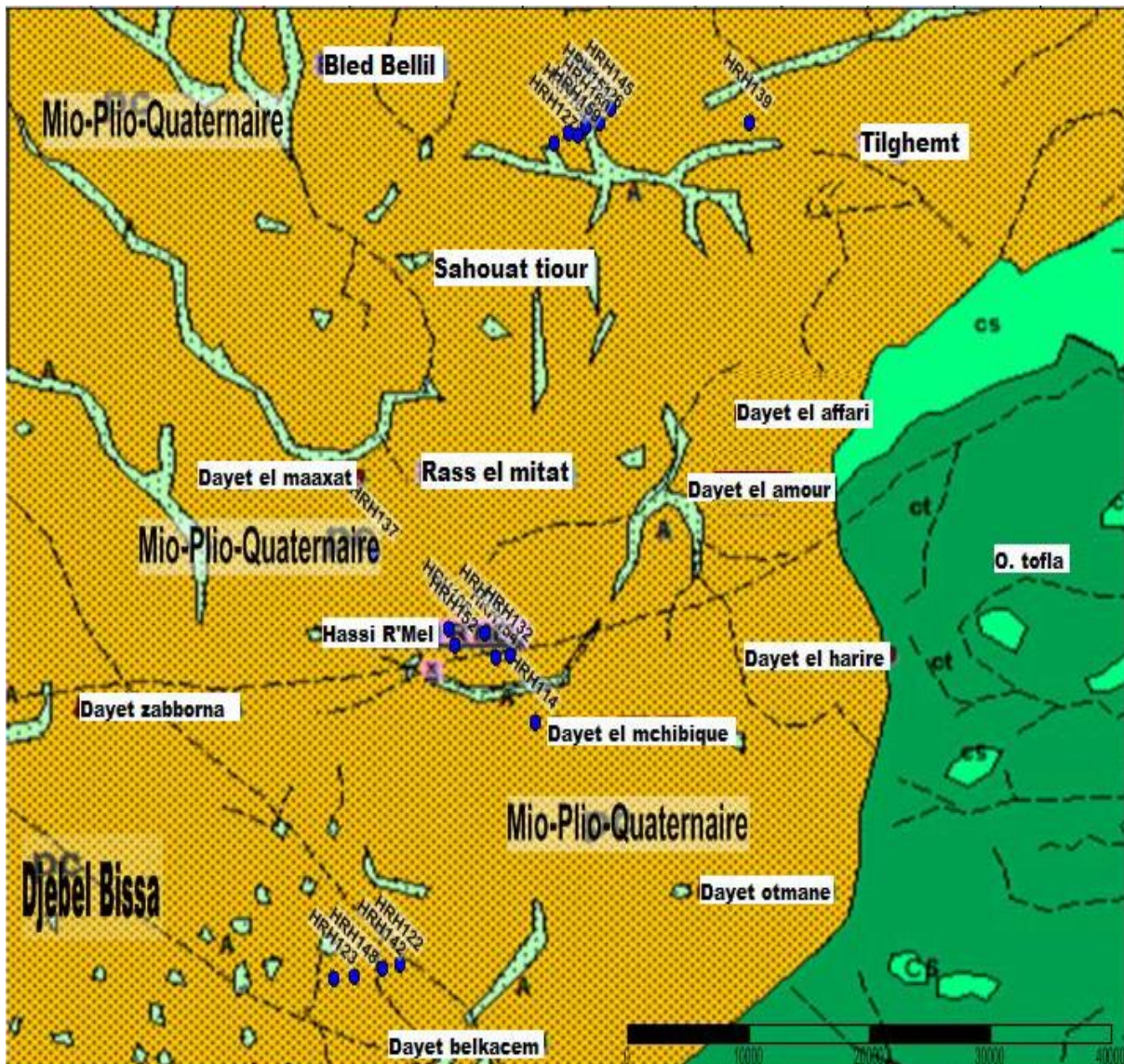


Fig. I.06: Carte géologique du champ de Hassi R'Mel (M. BOUILLON).

I.5.2. Les Mouvements Atlasiques:

Dès cette époque, sous l'action de contraintes régionales sensibles, un premier système de fracturation et fissuration a été induit dans les calcaires turoniens sans compter des déformations plus notables (amorce de flexures, rejet local d'accidents, etc...). L'érosion consécutive à ces déformations, dès le début du Tertiaire a attaqué les niveaux calcaires

et il est possible que la circulation des eaux météoriques, facilitée par les réseaux de fissures, ait déjà contribué à la karstification des horizons aquifères.

I.5.3. Les Mouvements Alpins :

Une série de mouvements tectoniques ont été mis en évidence en Algérie du Nord. Au Sahara a été analysée une phase de compression orientée NNE-SSW qui devrait correspondre à ces mouvements. Il est probable que le Nord Sahara et la région de Hassi R'Mel aient été affectés et que les horizons turoniens et cénomaniens aient subi des déformations et des érosions locales.

I.5.4. La Morphologie Anti Mio-Pliocène :

Dans la région de Hassi R'Mel, on ne connaît pas d'affleurements datés entre le Sénonien et le Mio-Pliocène. Au Nord (Tilghemt), les épaisseurs du Mio-pliocène et le degré d'érosion des calcaires du Crétacé supérieur peuvent être très variables, en raison des accidents associés au graben de Tilghemt.

I.6. Les Horizons Aquifères :

L'étude géologique nous a permis de déceler les aquifères datés Cénozoïque au Quaternaire : (voir Fig. I.07)

- La nappe superficielle formée par un ensemble de formation calcaire à Calcaire-dolomitique blanchâtre d'âge du Turonien au Quaternaire dans la partie Nord, tandis que la partie Ouest elle est d'âge Turonien au Mio-pliocène, le reste de la zone d'étude est formée par des formations d'âge Sénono-Turonien.
- La nappe captive dans la région de Hassi R'mel est formée par un ensemble gréseux à ciment carbonaté avec intercalations des argiles sableuses rosâtres, devenant plus argileuse et gypseuses vers la base d'âge Albien.
- La seconde nappe captive est celle du Barrémien, formée par une succession de grès fins à grossiers, limitée vers le haut par des formations argileuses à argileux gréseuse et des inclusions de gypse vers le Nord, d'âge Aptien.

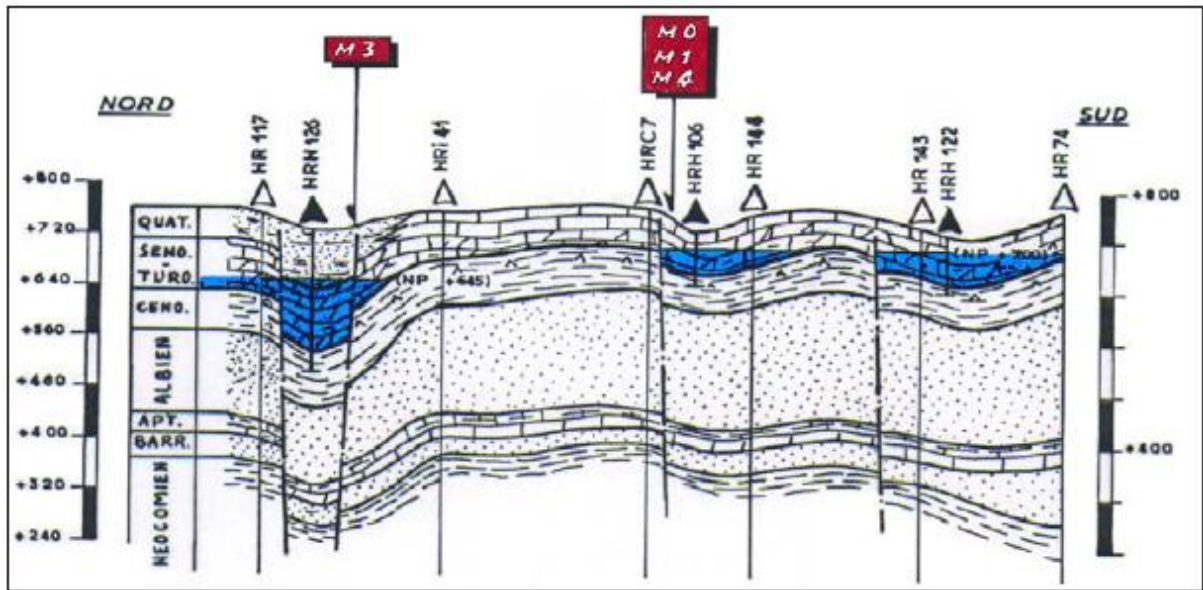


Fig. I.07: Coupe Géologique des Nappes aquifères (N-S) (BOOTS & COOTS, 2011)

I.7. Conclusion :

L'analyse structurale nous a permis de répertorier trois traits paléogéographiques majeurs et qui sont ;

- L'héritage des mouvements Autrichiens;
- Les mouvements Atlasiques;
- La morphologie Anti Mio-Pliocène.

Ces mouvements ont permis l'individualisation de trois zones, marquées par de nombreuses culminations et dépressions d'ampleur variable ;

- Zone Sud, affectée par de nombreuses failles de rejet parfois important (100 m)
- Partie Centre apparaît comme un plateau faiblement ondulé pour les formations mésozoïques,
- Partie Nord est fortement affectée par les mouvements tectoniques particulièrement pour les formations post jurassique. Des failles assez profondes ont donné naissance à des horsts et grabens et favorisant le dépôt du Mio-pliocène.

L'étude a discernée l'existence de trois principales nappes ;

- Une nappe superficielle libre d'âge du **Turonien** ; Calcaire dolomitique et dolomie vacuolaire
Profondeur : 0 à 150m
- Une nappe captive d'âge **Albien** ; Grès fins friables à ciment argileux
Profondeur : de 150 à 450m
- Une nappe captive **Barrémien** ; Grès moyens à ciment carbonaté et argileux.
Profondeur : de 480 à 540 m.

CHAPITRE II

PRESENTATION HYDROLOGIQUE & HYDROGEOLOGIQUE DE LA REGION

HASSI R'MEL

PARTIE 1 : ETUDE HYDRAULIQUE

II.1.1.Introduction :

" Le climat est un ensemble de données physiques qui, avec ses variations, traduit l'environnement atmosphérique dans une région. Un climat est le cadre géographique des phénomènes météorologiques "(ROCHE, 1986); il est conditionné surtout par la répartition physique naturelle des reliefs (altitude, situation par rapport à la mer....etc.).

Le climat est une ressource naturelle qui affecte une bonne partie des activités humaines, telle que la production agricole, la production et la consommation d'énergie, l'utilisation de certaines ressources telles que l'eau.

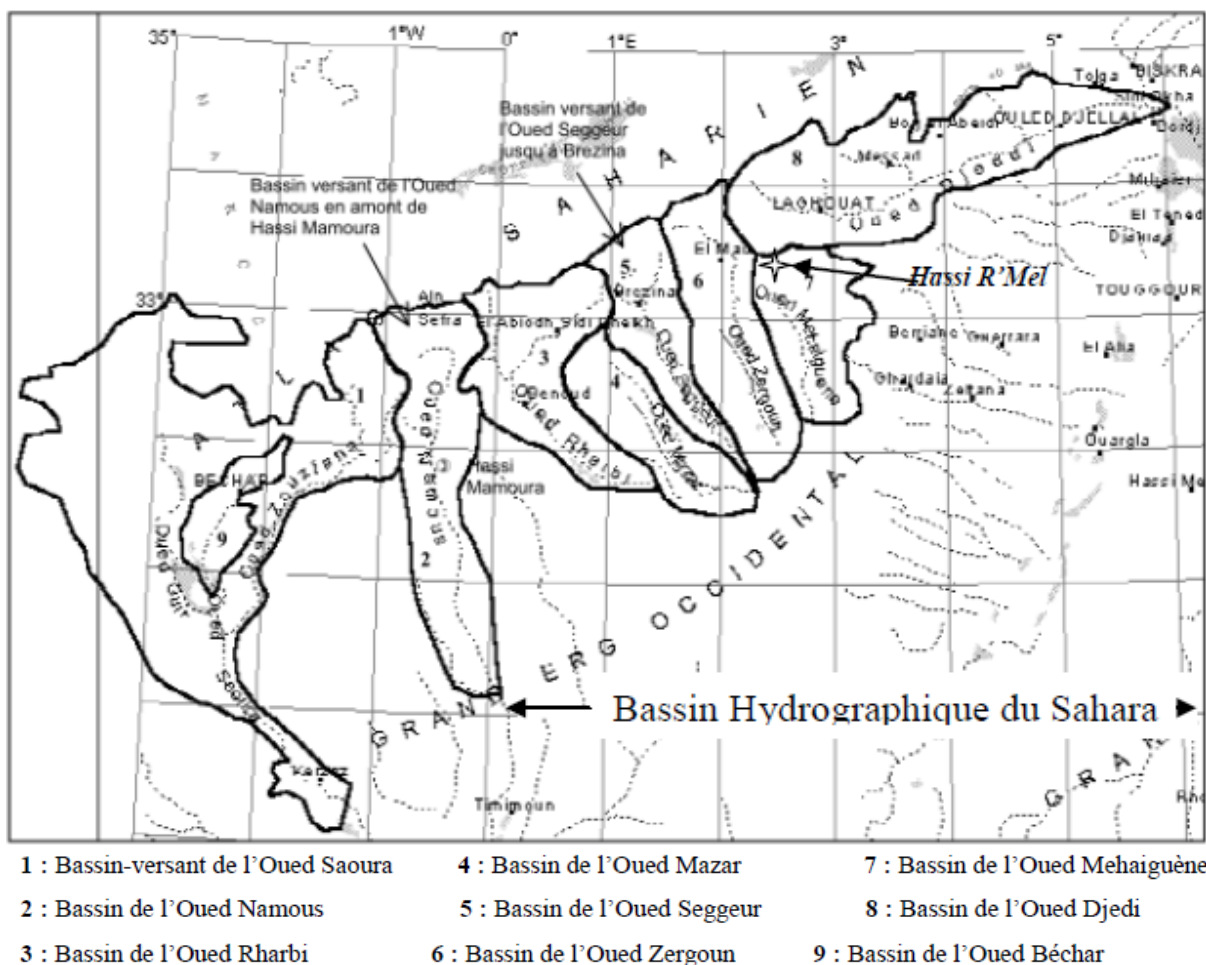


Figure II.01: Bassins versant méridional de l'Atlas Saharien (Baba S, 2005)

Les aspects essentiels de l'environnement relevant immédiatement de la climatologie, à savoir la température au sol et son rythme annuel, les précipitations et le régime pluviométrique, la variation dans l'espace et dans le temps de l'humidité atmosphérique, le régime des vents, répondant avec autres paramètres moins ressentis à la notion courante de climat.

La zone d'étude se situe dans le sous-bassin N°07, selon la classification de l'Agence Nationale des Ressources Hydriques (ANRH) et qui fait partie de la région hydrographique du Sahara (Fig.II.01).

Les paramètres climatiques utilisés pour cette étude proviennent des données de la station météorologique de Hassi R'mel, sur une durée d'observation qui s'étale de 2001-2020 pour les précipitations et la température.

II.1.2. Les Phénomènes accidentels :

Les plus significatifs dans la région de Hassi R'mel sont les suivants :

II.1.2. 1. Le Sirocco :

Le sirocco est un vent saharien violent, très sec et très chaud qui souffle sur l'Afrique du nord. Le sirocco est lié à l'aire saharienne et à son système dépressionnaire en été. Il est généralement rare en hiver; il se manifeste au cours du mois de Mai avec une fréquence croissante jusqu'au mois d'Août, accentué le plus souvent par les phénomènes d'évaporation et d'évapotranspiration.

II.1.2.2. Les orages :

Les orages sont considérés comme une perturbation atmosphérique d'origine convective, associée à un type de nuage caractéristique. Leur fréquence augmente d'Août à Octobre.

II.1.2. 3. Le Verglas :

C'est un dépôt de glace compacte et lisse provenant d'une pluie ou d'une brume d'eau en état de surfusion, dans la région de HRM il apparaît généralement de Novembre à Mai.

II.1.2. 4. La Gelée blanche :

C'est un dépôt de glace qui provient de la vapeur d'eau contenue dans l'air, il apparaît du Septembre à Avril.

II.1.2. 5. Le Brouillard :

C'est le phénomène météorologique constitué de fines gouttelettes. Très rare dans notre région d'étude, il peut apparaître au mois de Janvier.

II.1.2. 6. Le Vent :

Le vent né sous l'effet des différences de températures et de pression avec des différentes vitesses. Cette vitesse peut atteindre 83 km / h, accompagnée le plus souvent par la formation de tourbillon entraînant des quantités plus ou moins importantes de poussières.

II.1.3. Analyse des paramètres climatiques :

II.1.3.1. La température de l'air :

Ce paramètre est un facteur très important dans l'évaluation du déficit d'écoulement, et l'estimation du bilan hydrologique. Le climat de Hassi R'mel est très contrasté.

a. Températures moyennes mensuelles :

Tab. II.01 : Variations des températures moyennes mensuelles de Hassi R'Mel (période : 2001-2019).

Mois	Jan.	Fév.	Mar.	Avr.	Mai.	Juin	Juil.	Aout	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.
Temp. Moy. (°C)	8,8	10,3	14,4	17,8	23,3	28,5	32,2	31,3	26,4	20,8	13,8	9,7
Temp. Max. (°C)	20	13,69	19,45	21,09	25,92	32,79	35,19	33,68	29,04	24,1	19,74	15
Temp. Min. (°C)	5,25	6,77	8,7	12,85	19,95	23,5	28,98	27,7	23,47	17,9	11,02	6,66

Les valeurs du tableau II.1, illustrées par le graphe de la figure II.02, font ressortir des températures mensuelles pour la période 2001-2019, classifiés en deux phases :

- **Période froide** : débute à partir du mois de Novembre et se termine jusqu'au mois d'Avril, avec une température minimale au mois de janvier de **5.25 °c**

- **Période chaude** : débute à partir du mois de mai et se termine jusqu'à Octobre avec une température maximale de **35,19°c** au mois de Juillet,

La moyenne mensuelle est de **21.7°c**.

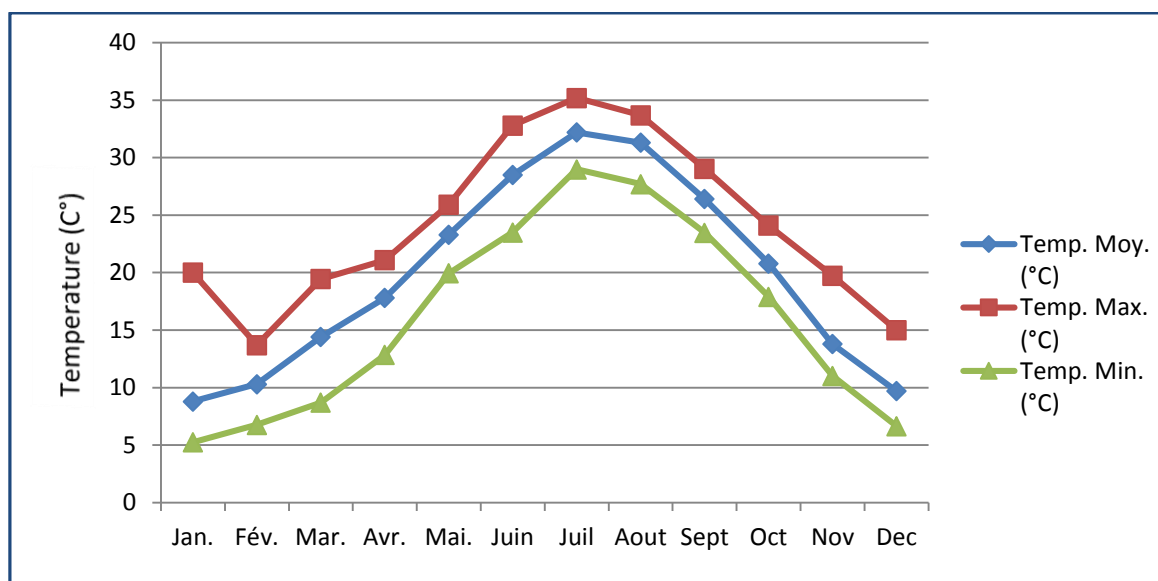


Fig II-02: Variations des températures moyennes mensuelles de Hassi R'Mel (période : 2001-2019).

b. Températures moyennes annuelles :

Tab. II.02 : Variations des températures moyennes annuelles de Hassi R'mel (Période : 2001-2019).

Année	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
T moy. Ann.(°C)	18,6	20	19,4	20,4	19,6	21,8	19,5	19,9	19,5	20,4
Année	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	
T moy. Ann.(°C)	20	19,6	19,7	19,6	20,5	19,6	20,6	19,9	20,6	

L'examen du tableau II.02, illustré par la figure II.03 fait ressortir de très faibles variations des températures moyennes annuelles, sur la période s'étalant de 2001 à 2019.

D'après les courbes des variations des températures moyennes annuelles, on constate durant l'année hydrologique 2006 une température moyenne maximale de 21.8 °C, et une température moyenne minimale de 18.6 °C, durant 2001.la température moyenne annuelle est de 19,95°c.

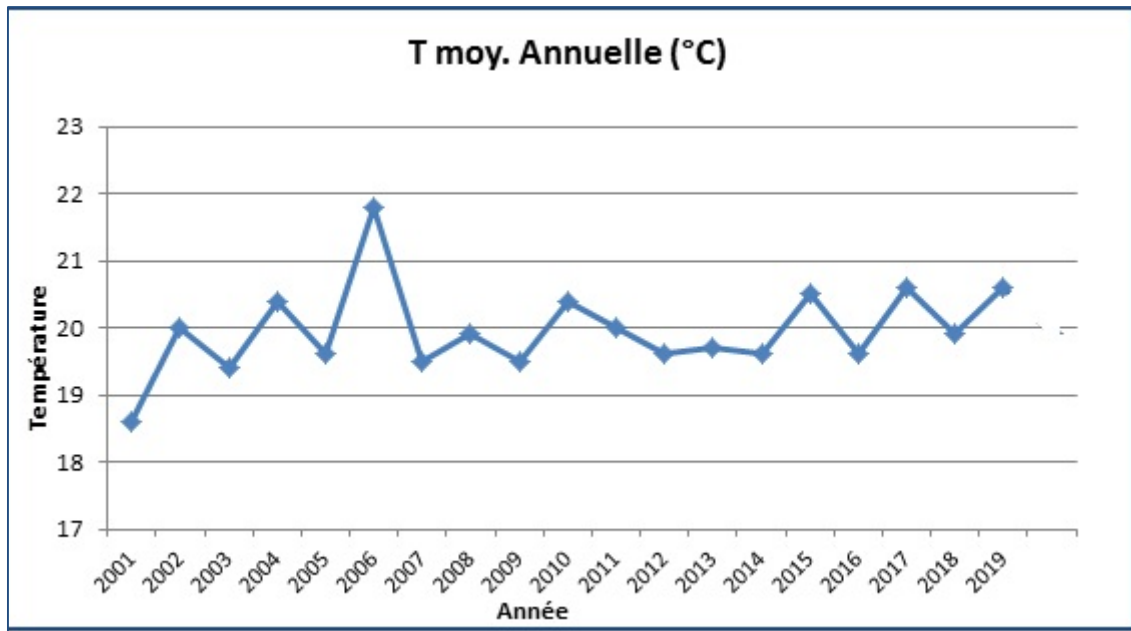


Fig. II-03 : Variations moyennes annuelles des températures de HRM (période : 2001-2019).

II.1.3.2. La Pluviométrie :

a. Précipitations moyennes mensuelles :

Tab. II.03: Variations moyennes mensuelles des Précipitations (période:2001-2019)

Mois	Jan.	Fév.	Mar.	Avr.	Mai.	Juin	Juil	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec
Prec. Moy. (mm)	8,6	4,4	4,7	4,7	4,4	5	1,4	5,9	24,1	7,2	7,6	6

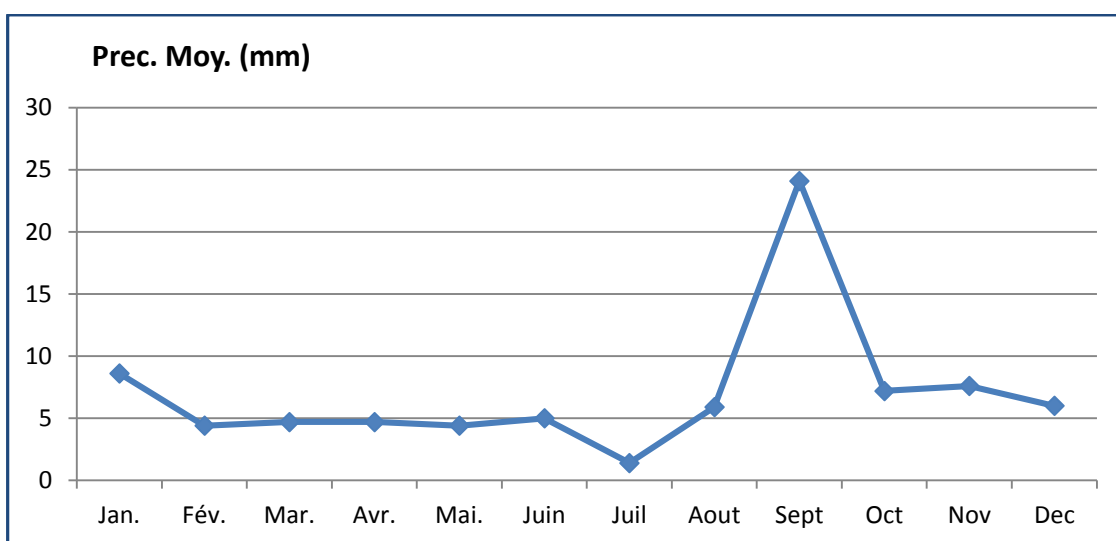


Fig. II.04 : Variations moyennes mensuelles des Précipitations (période : 2001-2019)

La région de Hassi R'Mel est caractérisée par une faible pluviométrie; on constate ainsi que le mois le plus pluvieux est Septembre avec 24.1 mm, alors que le mois le plus sec est Juillet avec 1,4 mm ; la moyenne mensuelle est de 7mm (Fig.II.04).

b. Précipitations moyennes annuelles de la station de Hassi R'Mel :

Tab. II.04 : Variation annuelle des précipitations (période : 2001 – 2019)

Année	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
P Ann. (mm)	83,6	79,8	65,9	91,2	25	37,1	41,7	93,3	118,2	120,3
Année	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	
P Ann. (mm)	174,1	113,8	189,5	192,1	99,5	134,2	69,3	87,3	77,8	

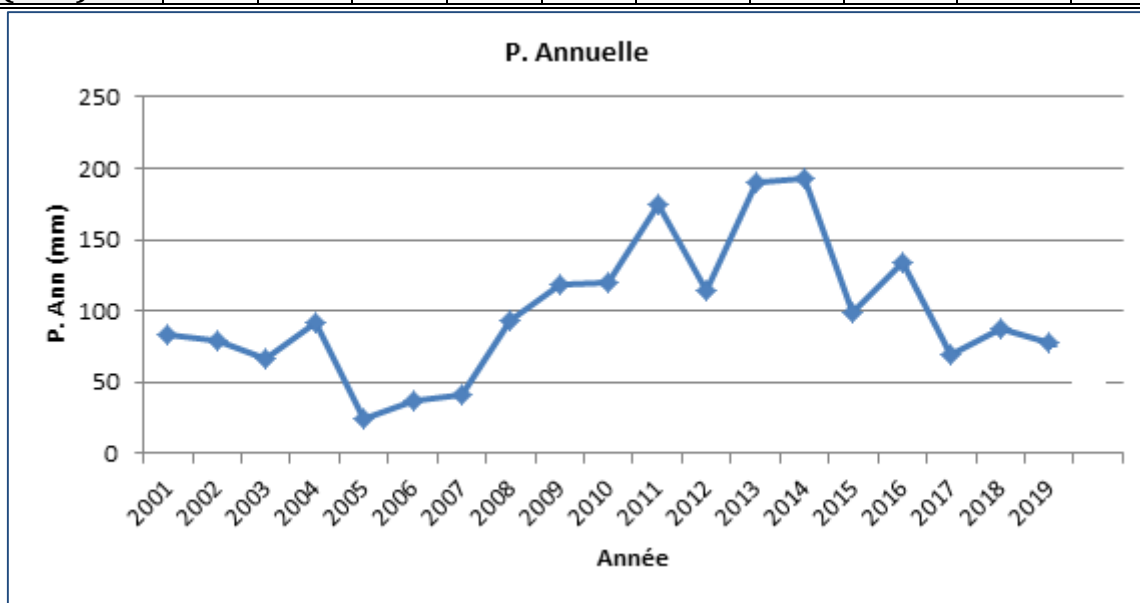


Fig. II.05: Variation annuelle des précipitations (période : 2001 – 2019)

D'après la courbe précédente, on remarque pour la station de Hassi R'Mel que l'année la plus pluvieuse est celle de l'année 2014, avec un cumul de précipitations de 192.1 mm et l'année 2005 comme l'année la plus sèche avec une précipitation de 25 mm, la moyenne annuelle est 96.86 mm (Fig.II.05).

c. Coefficient d'irrégularité du régime des précipitations :

Ce coefficient est donné par le rapport de l'année la plus humide (PM) à celui de l'année la plus sèche (pm) :

$$PM / pm = 192.1 / 25 = 7.68$$

C'est coefficient dont la valeur caractéristique est celle d'un *climat Aride*.

II.1.3.3. Le Vent :

Tab. II.05 : Variation moyenne mensuelle de la vitesse du vent
(période : 2001-2019)

Mois	Jan.	Fév.	Mar.	Avr.	Mai.	Juin	Juil.	Aout	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
Vitesse du vent (Km/h)	21,81	21,27	24	26,68	26,87	22,12	20,66	21,1	20,71	16,88	16,31	20,08

D'après La Courbe des moyennes mensuelles des vitesses du vent à la station de Hassi R'mel, on constate que le maximum de vitesse du vent est au mois de Mai (26.87 km / h), et un minimum de (16.31 km / h) au mois de Novembre.

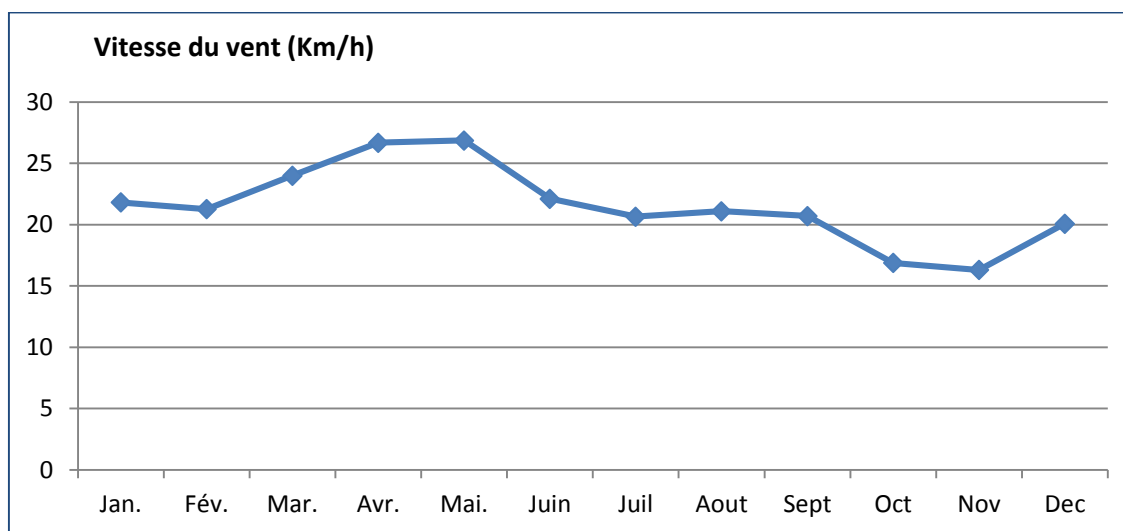


Fig. II.06 : Variation moyenne mensuelle de la vitesse du vent (période : 2001-2019)

II.1.3.4. Humidité relative :

Tab. II.06 : Variation moyenne mensuelle de l'humidité moyenne relative (période : 2001-2019)

Mois	Jan.	Fév.	Mar.	Avr.	Mai.	Juin	Juil.	Aout	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
Humidité (%)	58,47	51,75	47,1	37,87	33,72	29,33	25,67	31,54	42,78	50	56,19	61,93

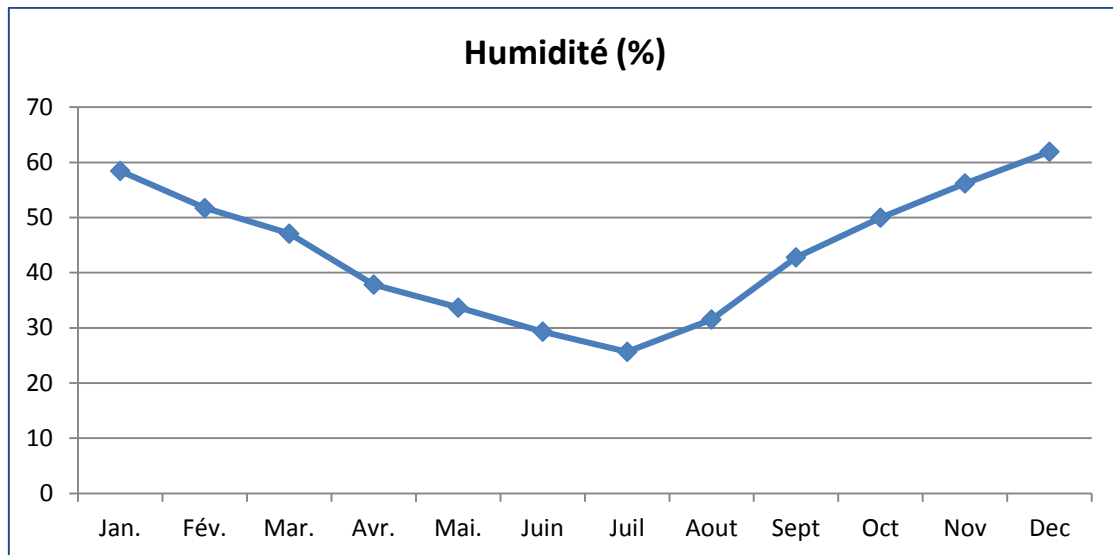


Fig. II.07 : Variations moyennes mensuelles de l'humidité moyenne relative (période : 2001-2019)

C'est un élément essentiel dans l'étude du climat, qui a une influence sur le bilan hydrologique, l'histogramme montre les différentes variations mensuelles de l'humidité (2001-2020).

Le taux de l'humidité le plus élevé est enregistré en mois de décembre (61.93%) et le plus faible en mois de Juillet (25.67%).

II.1.3.5. L'insolation :

Les mois d'Avril, Mai, Juin, Juillet, Août et Septembre sont les mois les plus chauds et les plus ensoleillés variant de (285 h à 315 h), par contre les mois les plus froids (Octobre, Novembre, Décembre, Janvier, Février et Mars) sont les mois les plus pluvieux et les moins ensoleillés (231 h à 263 h). Ce coefficient indique qu'il n'y a pas une influence maritime sur notre zone d'étude, d'où le régime désertique typiquement saharien.

Le tableau II.07 résume les variations des ensoleillements mensuels de la période 2001 à 2020.

Tab. II.07 : Variation moyennes mensuelles d'ensoleillement (période : 2001-2019)

Mois	Jan.	Fév.	Mar.	Avr.	Mai.	Juin	Juil.	Aout	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
Ins. Moy.(H)	236,25	252,25	231,25	295,5	309,25	303,25	315,25	314,75	285,5	231	232,75	236,75

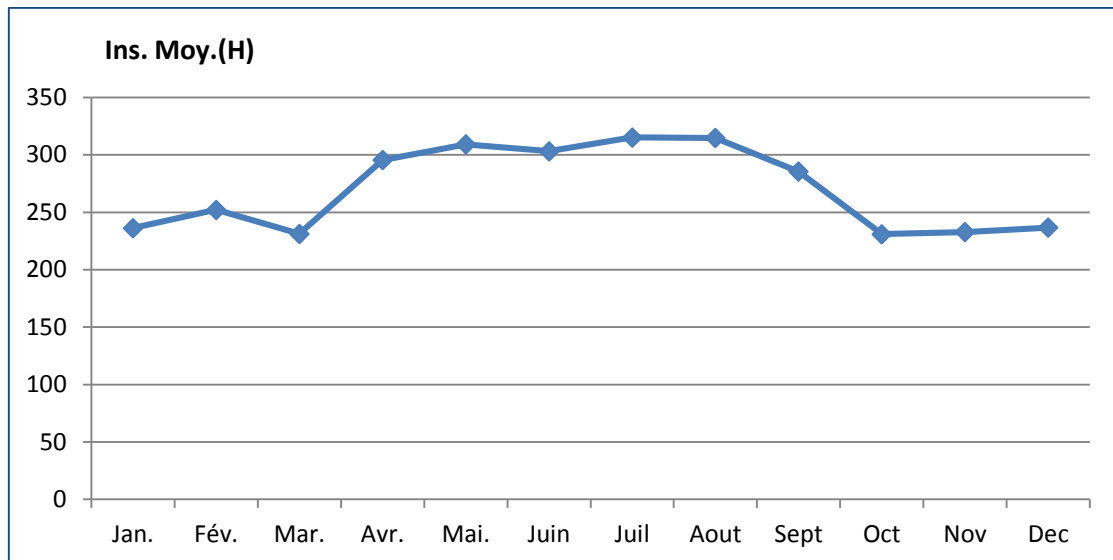


Fig. II.08 : Variation moyennes mensuelles d'ensoleillement (période : 2001-2019)

II.1.3.6. Indice de continentalité thermique :

L'éloignement par rapport à la mer est un facteur qui intervient dans l'augmentation du degré d'aridité.

Parmi les différentes formules proposées, nous retiendrons la suivante :

$$K = (tO - tA) * 100 / A$$

Où :

K : indice de continentalité thermique

K = 100% pour climat océanique

K = 0% pour climat continental

tO : température moyenne du mois d'octobre en°C

tA : température moyenne du mois d'avril en° C

A : amplitude thermique annuelle (la température moyenne du mois le plus chaud moins la température moyenne du mois le plus froid).

Pour notre ca : tO = 20,8°C ; tA = 17,8°C ; A = 23,2°C ; K =12,93%

II.1.4. Etude du climat :

Les températures et les précipitations constituent les éléments majeurs qui régissent le climat d'une région. Il existe 3 méthodes pour déterminer la nature du climat.

- Méthode de DE MARTONNE.
- Méthode d'EMBERGER.
- Méthode d'EUVERTE.

II.1.4.1. Les indices climatiques

a- Indice d'aridité annuel et les indices mensuels de DE MARTONNE :

- **Indice d'aridité annuelle :**

D'après De Martonne l'indice est exprimé comme suit :

$$I = P / (T+10)$$

P : précipitations moyennes annuelles de HR ; P = 84 mm

T : Températures moyennes annuelles de HR ; T = 19.95 °c

I : Indice d'aridité annuel ; I= 2,80

L'indice d'aridité est compris entre 0 et 5, on peut dire que notre secteur d'étude est caractérisé par un climat hyper aride.

- **Indice d'aridité mensuel :**

D'après De Martonne l'indice est exprimé comme suit : $i = 12 P / (T+10)$

Tab. II.08 : Classification des régions selon l'indice de DE MARTTONNE

Indice 'DE MARTTONNE'	Type de climat
0<I<5	Hyper-aride
5<I<10	Aride
10<I<20	Semi-aride
20<I<30	Semi-humide
30<I<55	Humide

Tab. II.09 : Classification des climats en fonction de l'indice de DE MARTONNE

Mois	Prec. Moy. (mm)	Mois	Temp. Moy. (°C)	Indice i	Type de climat
Jan.	8,6	Jan.	8,8	5,49	Aride
Fév.	4,4	Fév.	10,3	2,6	Hyper-aride
Mar.	4,7	Mar.	14,4	2,31	Hyper-aride
Avr.	4,7	Avr.	17,8	2,03	Hyper-aride
Mai.	4,4	Mai.	23,3	1,59	Hyper-aride
Juin	5	Juin	28,5	1,56	Hyper-aride
Juil.	1,4	Juil	32,2	0,4	Hyper-aride
Aout	5,9	Aout	31,3	1,71	Hyper-aride
Sept.	24,1	Sept	26,4	7,95	Aride
Oct.	7,2	Oct	20,8	2,81	Hyper-aride
Nov.	7,6	Nov	13,8	3,83	Hyper-aride
Déc.	6	Dec	9,7	3,65	Hyper-aride

D'après les valeurs des indices d'aridité mensuels, le climat est caractérisé par un climat Hyper-aride (Fig.II.09) sur toute l'année sauf mois de septembre et janvier.

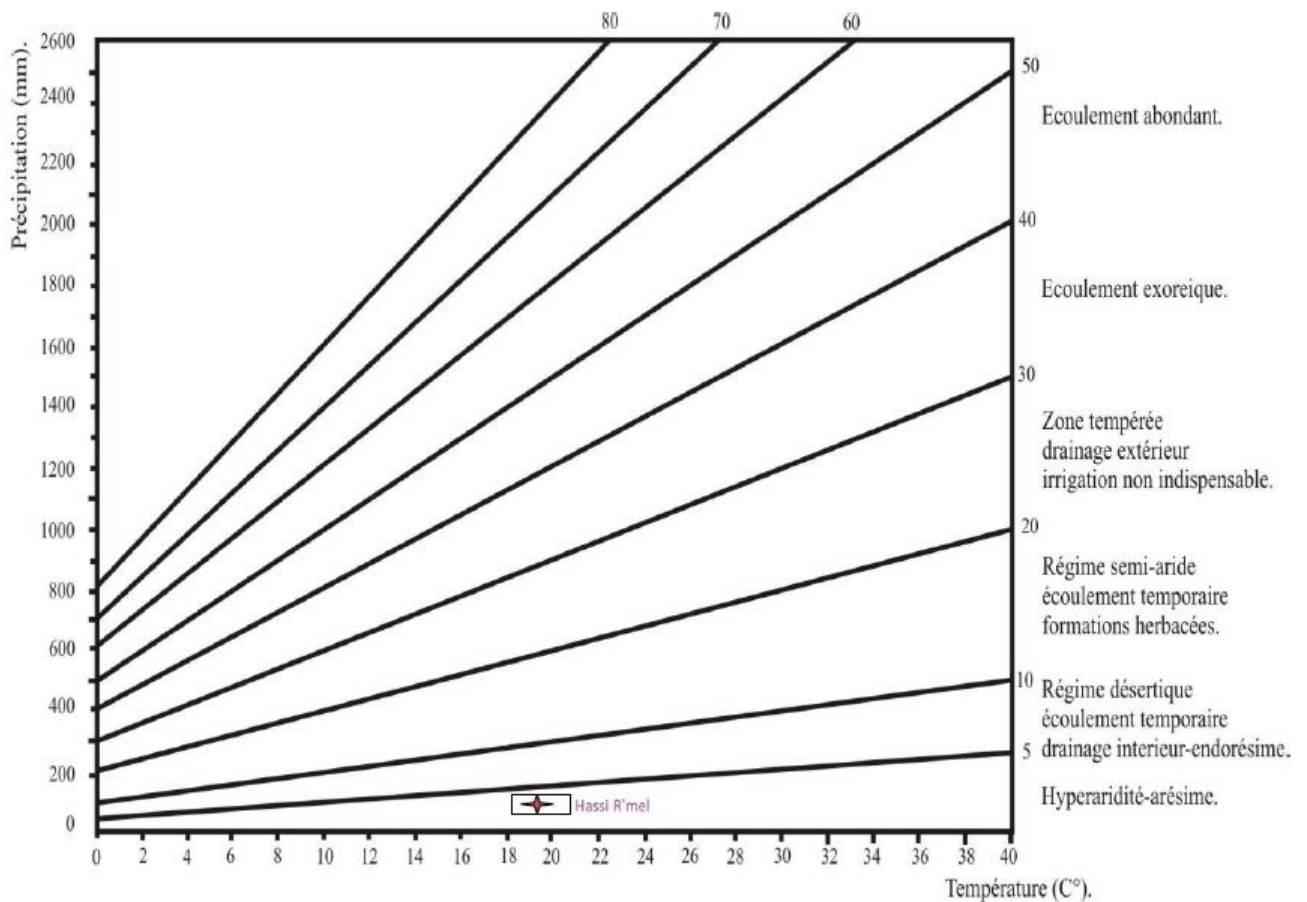


Fig. II.10: Le Diagramme de DE MARTONE (A.GHRIEB ,2011)

b. Indice pluviométrique annuel de MORAL :

Calculé par la relation suivante :

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

dans notre cas : P = 84 mm

T = 19.95 °c

I = 0.20

La région de HASSI R'MEL se caractérise par un climat sec pour la période estivale allant de Juin à Août, et un climat humide pour la période de Septembre à Mai. L'indice pluviométrique annuel est généralement de faible valeur, c'est-à-dire que notre région se caractérise par une faible pluviométrie.

c. Indice d'EMBERGER :

Le climogramme d'Emberger permet d'obtenir le type de climat qui caractérise une région donnée. L'indice d'Emberger se calcule par la relation suivante :

$$Q2 = 2000 P / M^2 - m^2$$

Q2 : quotient pluviométrique d'EMBERGER

M : moyenne des températures maximales du mois le plus chaud (Juillet) en degré absolu (°k) ; $M = 35.19\text{ °c} + 273 = 308.19\text{ °k}$

m : moyenne des températures minimales du mois le plus frais (Janvier) en degré absolu (°k) ; $m = 5.25\text{ °c} + 273 = 278.25\text{ °k}$

P : précipitations moyennes annuelles en mm ; $P=84\text{ mm}$

Ce qui permet d'obtenir : $Q2 = 09.57$

Les valeurs de Q2 sont reportées sur le diagramme d'EMBERGER en ordonnée. On remarque que le secteur d'études est caractérisé par un climat saharien avec un hiver frais (Fig. II.11).

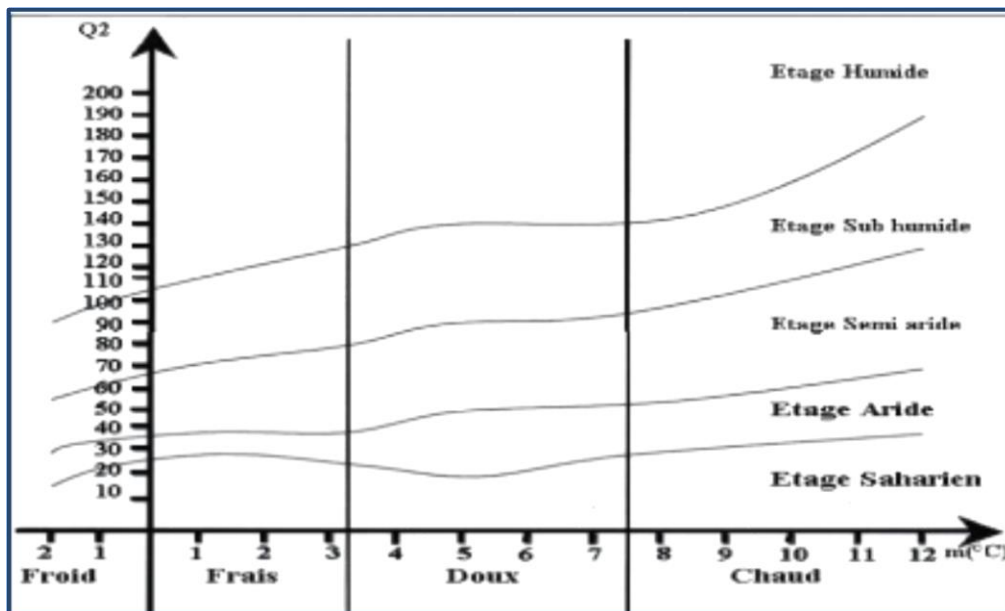


Fig. II.11: Climagramme d'Emberger (A.BABA 2011)

d. Indice de STEWART :

$$Qr = P * 3.43 / (M + m)$$

$M=35.19\text{ °c}$, $m=5.25\text{ °c}$, $P=84\text{ mm}$

La valeur de Qr est de 7,12 donc comprise entre 5 et 20 ; caractérise un climat aride.

II.1.4.2. Le Régime thermique

a. Diagramme pluviométrique (méthode de GAUSSEN) :

La méthode de Bagnouls et Gausсен permet d'établir la courbe pluviométrique à partir de la relation $P = 2T$. On porte les valeurs de précipitations et les températures en fonction des mois.

Les températures sont portées à une échelle double des précipitations; lorsque les deux courbes (P) et (T) se croisent et que la courbe (P) passe au-dessous de celle des températures (fig.II.12) on aura une période sèche qui s'étale sur toute l'année.

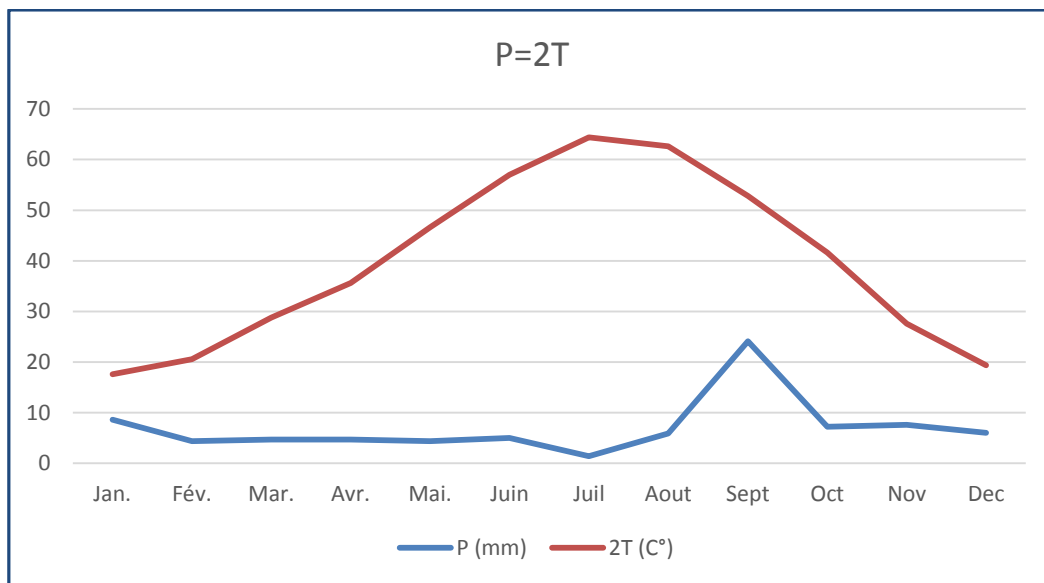


Fig. II.12: Le Diagramme Pluviométrique

b. Méthode d'EUVERTE :

Se basant sur les températures et les précipitations établies mensuellement, cette méthode renseigne sur l'évolution de l'humidité du sol qui est donnée par le rapport (P/T), qui permet de définir quatre types de régimes :

- Un régime très sec : $P / T < 1$
- Un régime sec : $1 < P / T < 2$
- Un régime subhumide : $2 < P / T < 3$
- Un régime humide : $P / T > 3$

Tab. II.10 : Relation Température -Précipitations

Mois	Jan.	Fév.	Mar.	Avr.	Mai.	Juin	Juil.	Aout	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
Prec. Moy.(mm)	8,6	4,4	4,7	4,7	4,4	5	1,4	5,9	24,1	7,2	7,6	6

Temp. Moy. (°C)	8,8	10,3	14,4	17,8	23,3	28,5	32,2	31,3	26,4	20,8	13,8	9,7
P/T	0,98	0,43	0,33	0,26	0,19	0,18	0,04	0,19	0,91	0,35	0,55	0,62
Régime	Très sec	Très sec	Très sec	Très sec	Très sec	Très sec	Très sec	Très sec	Très sec	Très sec	Très sec	Très sec

D'après les valeurs de P / T, la région de HRM est très sèche P / T < 1, (valeur maximale est de 0,98).

II.1.5. Déficit d'écoulement de Hassi R'Mel :

L'évapotranspiration est un terme qui correspond à la quantité d'eau totale transférée du sol vers l'atmosphère, par l'évaporation au niveau du sol et par la transpiration des plantes. Elle joue un grand rôle dans le climat. On distingue l'évapotranspiration réelle (ETR) et l'évapotranspiration potentielle (ETP). Ces données sont utiles et nécessaires pour étudier les bilans de circulations d'eau ; on peut estimer la valeur de ce paramètre, en fonction de la température d'air et du module pluviométrique, grâce à plusieurs méthodes :

- **Formule de TURC:**

L'évapotranspiration est calculée par la formule suivante :

$$ETR = P / 0.9 + (P^2 / L^2)$$

Avec :

$$L = 300 + 25 T + 0.05 T^3$$

L : facteur en fonction de T ; L = 1178.94

P : précipitations moyennes annuelles ; P = 84 mm

T : température moyenne annuelle ; T = 19.95 °c

ETR : évapotranspiration réelle en mm

$$ETR = 92.81 \text{ mm}$$

Avec une température de 19.95 °C et des précipitations de 84 mm ; l'application numérique pour la station de Hassi R'Mel donne une valeur de ETR= 92,81 mm, ce qui induit que la formule n'est pas applicable pour ce cas, car l'évapotranspiration annuelle est supérieure aux précipitations moyennes annuelles.

- **Formule de COUTAGNE :**

On peut calculer le déficit d'écoulement (ETR) à partir de la relation :

$$ETR = P - \lambda P^2$$

Avec :

$$\lambda = 10.8 + 0.14T$$

T : température moyenne

P : précipitations moyennes

Cette formule s'applique pour l'intervalle suivant : $1/8\lambda < P < 1/2\lambda$

Pour notre cas :

$$\lambda = 1 / 0.8 + 0.14 T ; P = 84 \text{ mm} ; T = 19.95 \text{ }^\circ\text{C} ; \lambda = 0.28$$

$$1/8 \lambda = 0.45 \quad \text{et} \quad 1/2 \lambda = 1.78$$

$$\text{Donc : } P = 0.0084 \text{ m} < 1/8 \lambda$$

Les précipitations sont inférieures à $1/8 \lambda$, donc cette méthode n'est pas applicable.

II.1.6. Conclusion

La région de HASSI R'MEL est située dans une zone saharienne et jouit d'un climat désertique dont l'aridité est importante ; elle est caractérisée par une faible pluviométrie moyennes annuelles soit **84 mm**, la température moyenne annuelle est de **19,95 °C**.

La période sèche s'étale sur toute l'année.

Hassi R'Mel est caractérisé par un climat Aride & Hyper-aride.

Hassi R'Mel se caractérise par un climat sec pour la période estivale allant de Juin à Août, et un climat humide pour la période de Septembre à Mai.

Le secteur d'étude est caractérisé par un climat saharien avec un hiver frais

Les quantités d'eaux apportées par les précipitations à la surface du sol sont systématiquement reprises par l'évaporation, suite aux températures élevées et l'évapotranspiration annuelle est supérieure aux précipitations moyennes annuelles.

PARTIE 2 : ETUDE HYDROGEOLOGIQUE

II.2.1. Introduction :

L'étude géologique portée dans la zone de Hassi R'Mel, nous a permis de déterminer les horizons aquifères suivants

- Horizon du Sénono – Turonien : calcaire et dolomies
- Horizon de l'Albien : sable et grés argileux
- Horizons barrémien. Grès moyens carbonaté et argileux.

Le complexe Sénono-Turonien est moins profonde; son exploitation a besoin d'un équipement léger pour la production et présente une eau de bonne qualité pour la consommation. La nappe de l'ensemble albo-barrémien est relativement plus profonde et demande par conséquent un équipement onéreux, quant à son exploitation. Elle présente une eau d'une potabilité médiocre pour la consommation où elle est utilisée dans l'irrigation et l'approvisionnement des chantiers de génie civil, forage et unités industrielles.

La nappe turonienne est phréatique, tandis que les nappes albiennes et barrémiennes sont captives et ne présentent apparemment aucune communication avec la surface du sol et la nappe turonienne.

II.2.2. Secteur d'études :

II.2.2.1. La nappe superficielle du Sénono-Turonien :

L'analyse géo-structurale portée dans la zone d'étude nous a permis de distinguer que cette dernière est compartimentée en trois zones du Nord vers le Sud, il s'agit des creux d'effondrements, surtout dans la partie nord ce qui a favorisé l'accumulation de forte épaisseur de dolomie et des formations calcaire-dolomitique.

Le complexe calcaire-dolomitique qui constitue la nappe phréatique ne se produit qu'à la faveur des karsts, liés au développement d'une fissuration et la présence de grandes fractures, pouvant facilement atteindre la surface du sol. Les dolomies massives de ce niveau sont très peu perméables.

L'hétérogénéité de l'aquifère explique les variations importantes de la transmissivité et de débit entre les puits productifs (voir tableau II.11 page 45).

Les trois grandes dépressions, contenant la nappe superficielle, forment un alignement de direction Est- Ouest, situées sur la moitié ouest de la concession de Hassi R'Mel (Fig.I.07 page 13).

a- Zone nord :

Zone à structure complexe, représentée par plusieurs blocs de grabens, de direction Est-Ouest et dont le plus favorable est en production au niveau des puits HRH 126, HRH 127, et HRH 145, HRH 139, HRH 160, HRH 161, où la nappe est plus profonde de 150 à 220 m en moyenne. La hauteur moyenne d'eau est de 100 m. Le niveau statique de plan d'eau se trouve à cote absolue de + 638 m (par rapport au niveau de la mer).

b- Zone centrale :

Cette zone se présente sous forme d'une grande gouttière s'étendant de HRH 114 à l'Est au HRH 107 à l'Ouest sur environ 15 km. La hauteur moyenne initiale d'eau était de 40 m et le niveau piézométrique à la côte absolue (+ 700 m). Cette zone est productive au niveau des puits (HRH 106, 137, 147, 152, 132, 114, 137).

c- Zone sud :

Peu connue, cette zone est localisée dans l'axe HRH 148 - HRH 122 - HRH 123. Sa longueur est très limitée, la hauteur moyenne initiale d'eau était de 40 m, avec une profondeur moyenne de (25 à 75 m). Le niveau piézométrique est à la côte absolue (+ 700 m).

La zone sud et la zone centrale, ayant les mêmes côtes piézométriques, ne semblent pas présenter une limite qui les sépare.

II.2.2.2. Alimentation de la nappe :

L'existence de fissures et grandes fractures en surface permettent à la nappe de se réalimenter par les eaux des précipitations localement.

Elle est très vulnérable à la pollution par infiltration; la profondeur des puits est en moyenne de 80 mètres dans la zone centre et sud et de 225 m dans la zone nord.

Du point de vue structural, le Crétacé supérieur épouse faiblement la forme anticlinale du gisement. La partie centrale, étant surélevée par rapport aux flancs, conditionne la circulation des eaux du centre de la structure vers toutes ses limites.

La nappe a donc une piézométrie divergente, le niveau piézométrique enregistre des fluctuations, selon les saisons. Cela confirme donc l'hypothèse de l'alimentation de la nappe par les apports des eaux de précipitations locales.

II.2.3. Inventaire des points d'eau :

Le but de l'inventaire des points d'eau de la région d'étude est d'établir un document de base pour établir une cartographie hydrogéologique qui nous permettra de valoriser les ressources en eau du champ de Hassi R'Mel.

La profondeur des niveaux d'eau varie d'une zone à l'autre et oscille entre 80 m et 250 m. L'ensemble des forages captent l'horizon aquifère du Turonien caractérisé par des formations calcaires localement fissurées.

Dans cette région, la nappe superficielle est captée par plusieurs forages (19), dont le suivi a été réalisé par SONATRACH.

Le niveau aquifère superficiel est géologiquement compartimenté. On s'est imposé de tracer provisoirement une piézométrie générale et lissée pour faciliter la compréhension des grandes directions des écoulements souterrains et l'alimentation de la nappe.

II.2.4. Variations piézométriques :

L'examen des variations piézométriques démontre clairement que la nappe est en décrue continuellement. Cet état de fait est illustré sur les figures ci-dessous, à savoir les réactions de la nappe aux infiltrations des pluies d'hiver, au tarissement d'été et aux pompages incontrôlés dans le champ captant de Hassi R'mel.

Les mesures piézométriques prises au niveau des trois zones de Hassi R'mel pendant différentes périodes, nous montrent clairement que la nappe est en décrue, due à l'action conjuguée de la surexploitation et de la faiblesse de la pluviométrie.

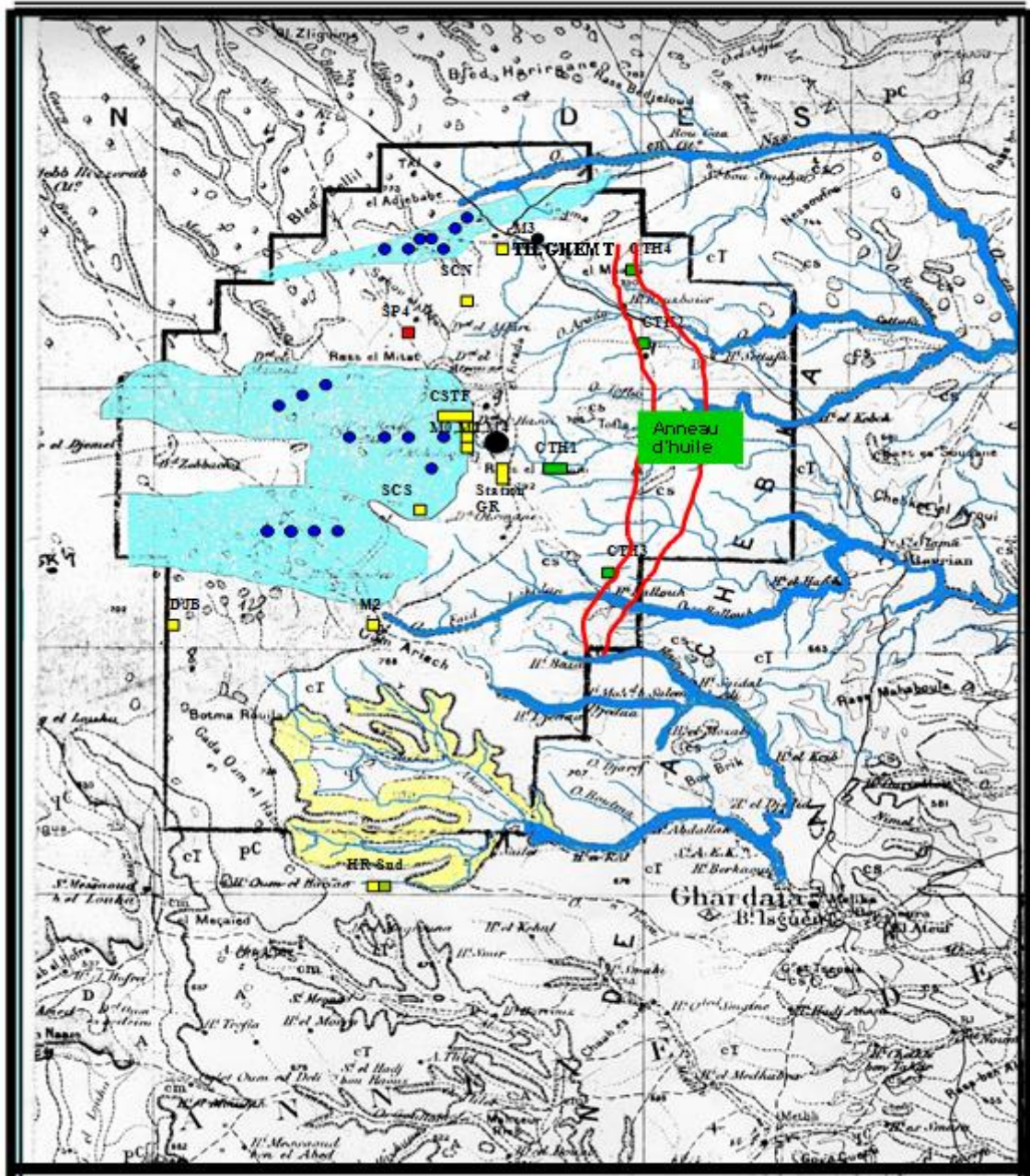


Fig. II.13 : Réseau hydrographique et limites de la nappe Turonienne HRM (M.ARICHA, 2013)

a- Zone centrale :

La zone centrale constitue la partie principale du développement de la nappe superficielle. Cette zone étant très sollicitée subit une chute remarquable du niveau piézométrique.

Au niveau de cette zone, la production d'eau est assurée actuellement par 07 puits d'eau : HRH (106, 132, 137, 147, 152, 154 et 114).

L'analyse des courbes montre une chute progressive et générale des niveaux piézométriques au niveau de toute la zone.

L'analyse des courbes piézométriques des puits laisse imaginer que la zone centrale semble être constituée de deux blocs faiblement communicants, à savoir un bloc Est comprenant la cuvette des puits HRH (106, 147, 154) et un bloc Ouest comprenant les puits HRH (137, 107 et 105).

- Pour le puits HRH106 : La courbe montre que le niveau piézométrique a chuté 29 m durant 33 ans, et à partir de 2005 jusqu'au 2010 il y a une augmentation de niveau (les précipitations dépassent les 100 mm pendant cette période), une diminution de 0.2 m par an a été remarqué pendant la période 2011-2016 à cause de la sécheresse ainsi que le soutirage accru.

- Pour le puits HRH 105 : un abaissement de 25 mètres depuis 1977, asséché depuis le 28/06/2010.

- Pour le puits HRH 114 : destiné généralement au citernage, la courbe de niveau piézométrique montre une baisse de 02 mètres sur une période de 26 ans (1977 - 2003) et une stabilité remarquable à partir de 2005. Ce puits n'était pas très sollicité.

- Pour le puits HRH 137 : la courbe de niveau piézométrique montre une baisse de 14 mètres pendant 18 ans (1987-2005) soit 0,8 m/an.

- Pour le puits HRH 147 : la courbe de niveau piézométrique montre une baisse de niveau de 11 mètres pendant 18 ans (1998 - 2016) soit 0.6 m/an.

-

La chute du niveau piézométrique est estimée à 20 m dans cette cuvette et ce depuis le début de l'exploitation de 1972 à 2012.

Les puits HRH (147, 152, 154), forés tardivement respectivement en 1996, 1998 et 2000, ont révélé des niveaux piézométriques comparables aux niveaux initiaux des anciens puits. Ces données montrent que le niveau piézométrique de la nappe superficielle n'a pas évolué uniformément au niveau de cette zone. Cela s'explique par la faible transmissivité de la nappe, caractérisant en général les formations calcaires.

Dans le bloc ouest, les puits sont situés dans un relief tabulaire, faiblement raviné par des oueds. La chute du niveau piézométrique est plus marquée : 25 mètres au niveau du puits HRH105 bis et HRH107 (de 1977 à 2010).

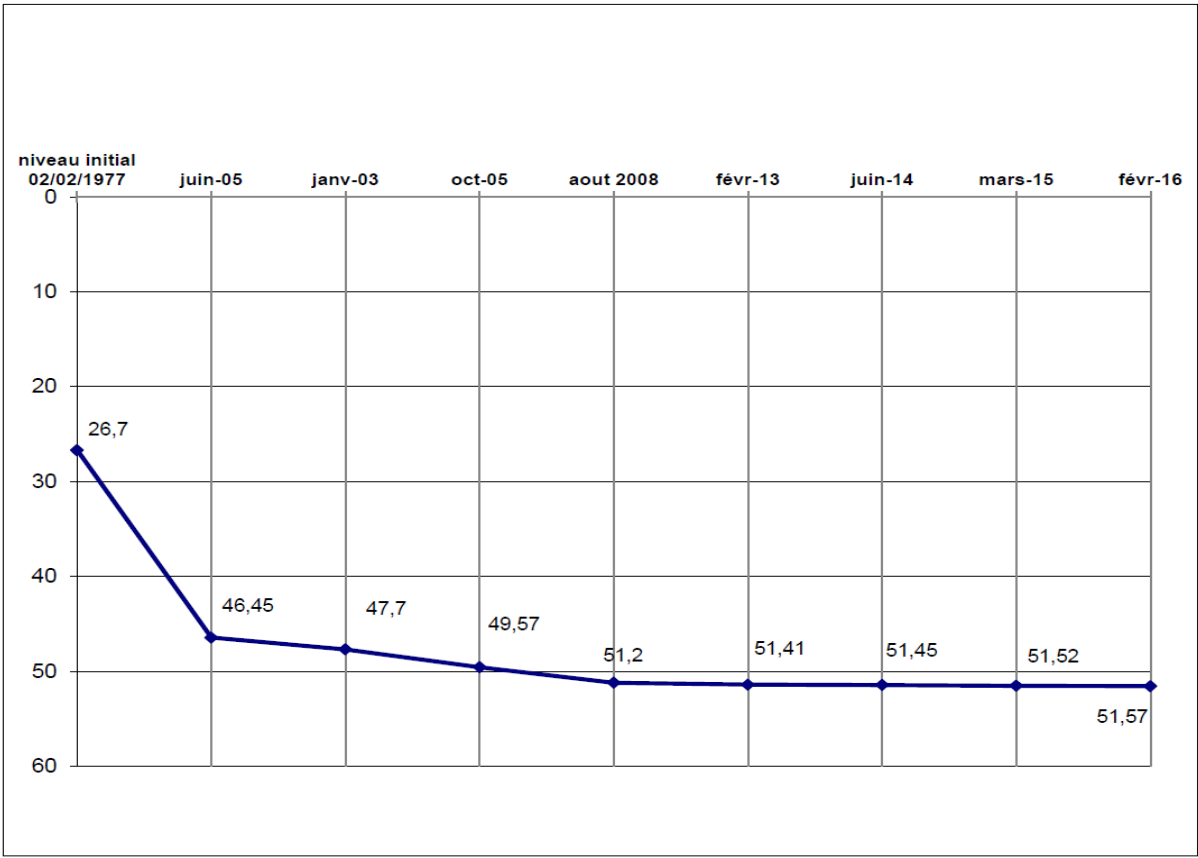


Fig. II.14 : Variations piézométriques mensuelles du puits HRH105 (1977-2016)

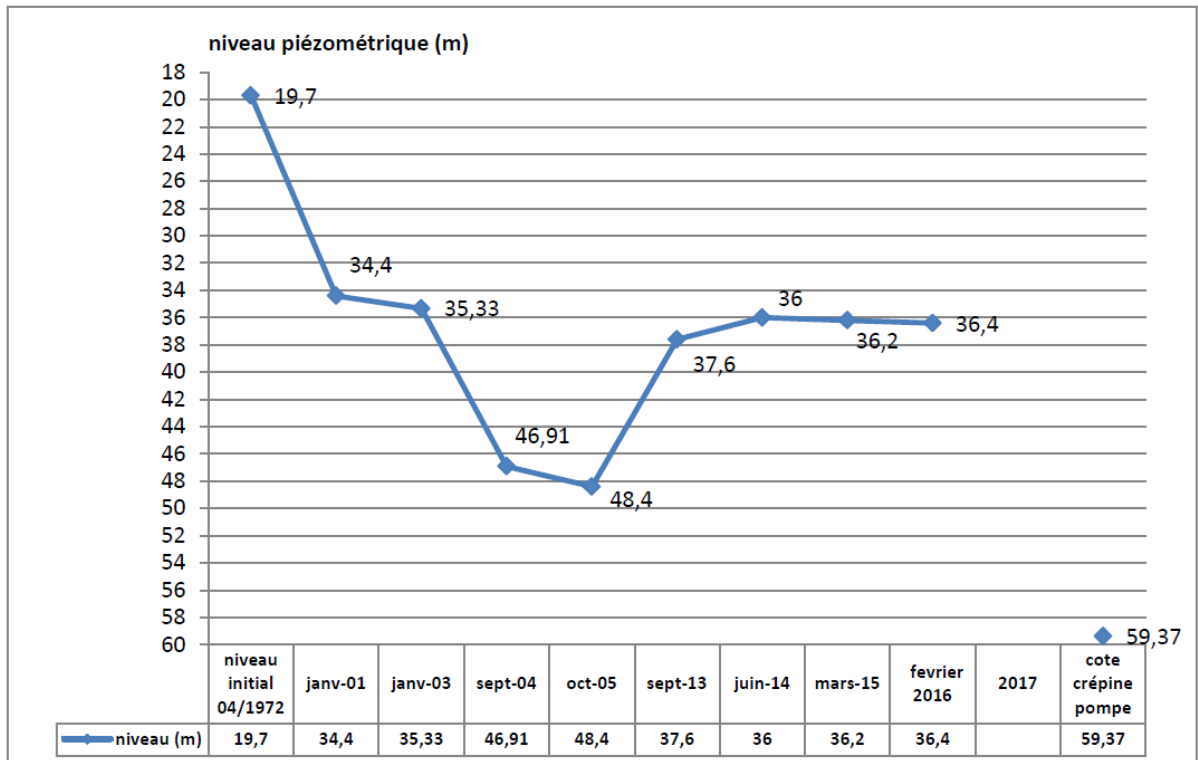


Fig. II.15 : Variations piézométriques mensuelles du puits HRH106 (1972-2016).

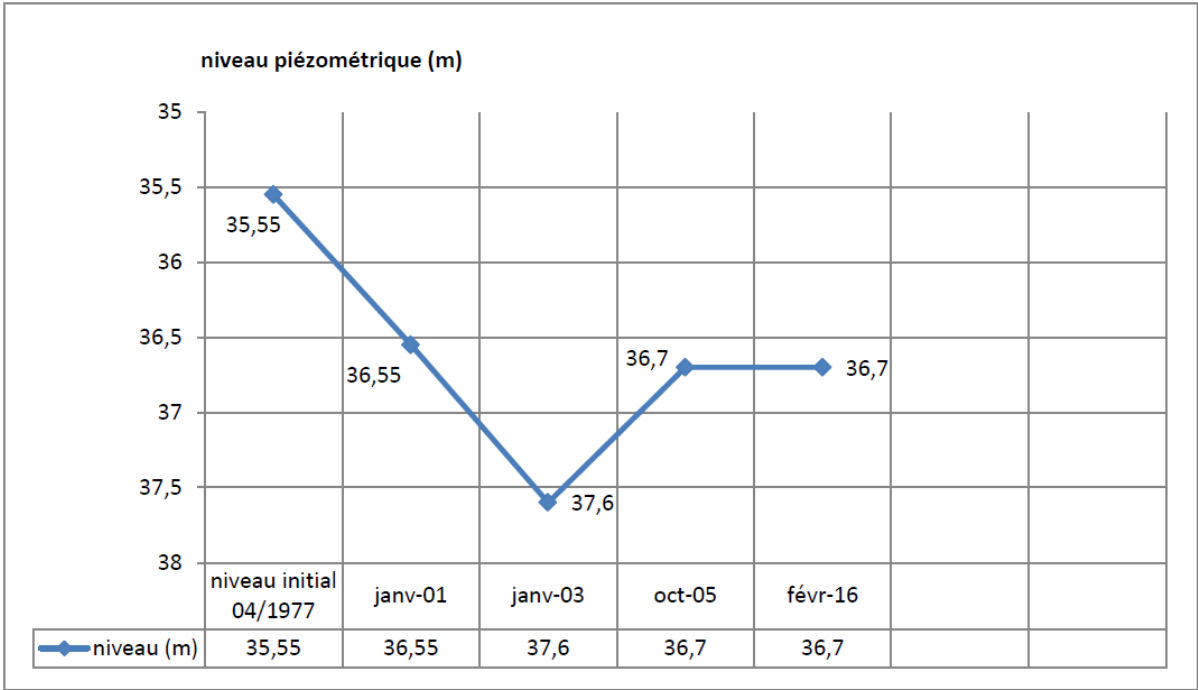


Fig. II.16 : Variations piézométriques mensuelles du puits HRH114 (1977-2016).

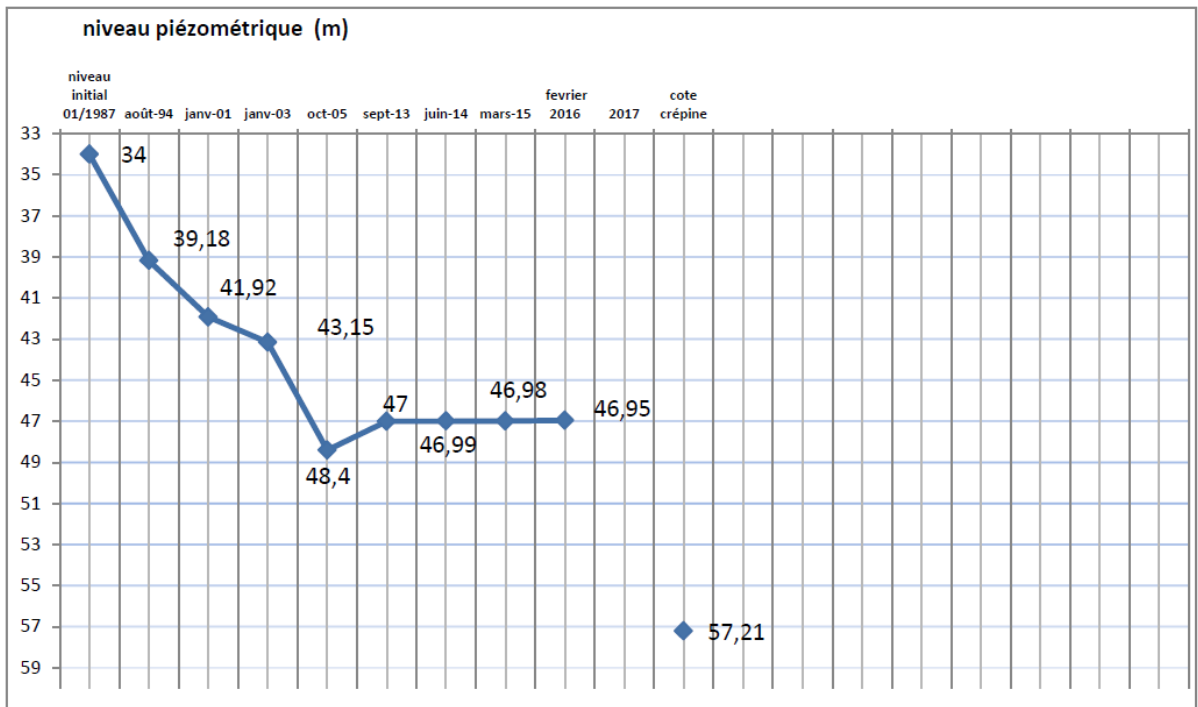


Fig. II.17 : Variations piézométriques mensuelles du puits HRH137 (1987-2016).

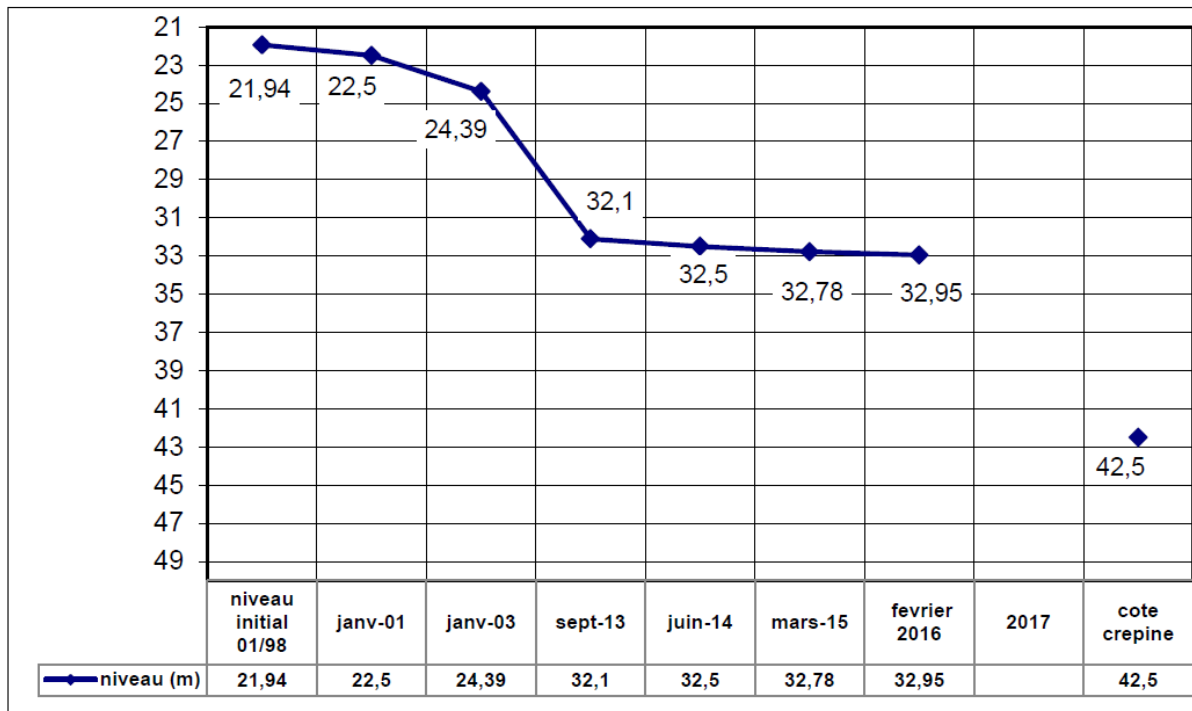


Fig. II.18 : Variations piézométriques mensuelles du puits HRH147(1998-2016).

b- Zone nord :

C'est une zone à structure complexe représentée par plusieurs blocs en Horst et grabens dont la plus favorable est en production au niveau des puits HRH (127, 161, 160, 126, 139, 154,151) destinés pour la région de Hassi R'Mel et 03 autres puits producteurs d'eau destinés pour la localité de BELLIL. Le niveau piézométrique pour cette zone se trouve à la cote (+ 640 m).

L'interprétation des variations des courbes des niveaux piézométriques montre les faits suivants :

- Pour le puits HRH127, une chute de niveau de 15 mètres pendant 39 ans (1977 - 2016) soit 0,38 m/an.
- Pour le puits HRH 139, une chute de niveau de 14 mètres pendant 23 ans (1993 - 2016) soit 0,61 m/an.
- Pour le puits HRH 151, une chute de niveau de 13.7 mètres pendant 18 ans (1998 - 2016) soit 0,76 m/an.
- pour le puits HRH 126, une baisse de niveau piézométrique de 15 mètres pendant 39 ans (1977 - 2016) soit 0.38 m/an
- pour le puits HRH 145, une baisse de niveau piézométrique de 13.43 mètres pendant 18 ans soit 0,74 m/an

- Pour les puits HRH160 et HRH161, nouvellement forés fin 2011 début 2012. Son rabattement moyen est : 3.3 m; 0.99 m respectivement.

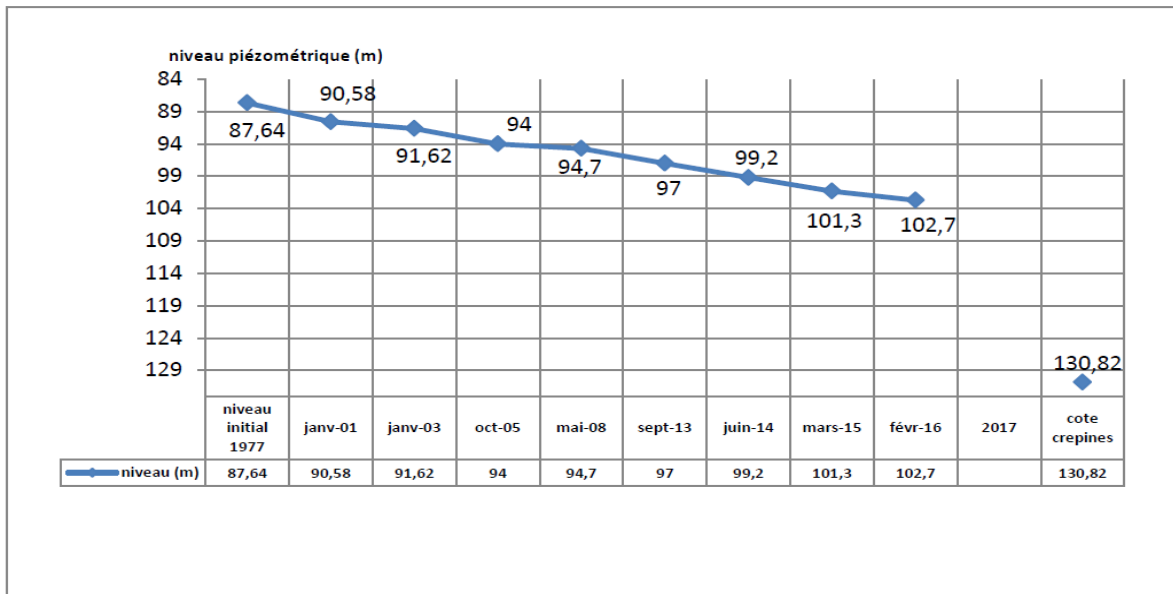


Fig. II.19 : Variations piézométriques mensuelles du puits HRH127(1977-2016).

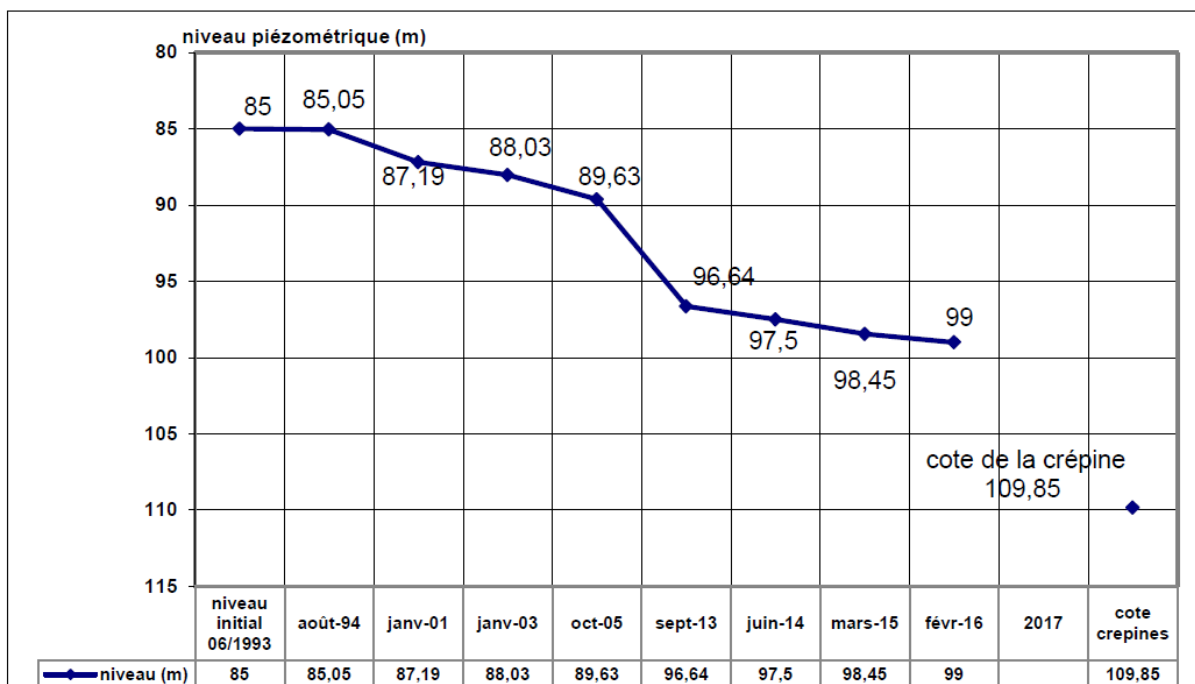


Fig. II.20 : Variations piézométriques mensuelles du puits HRH139(1993-2016).

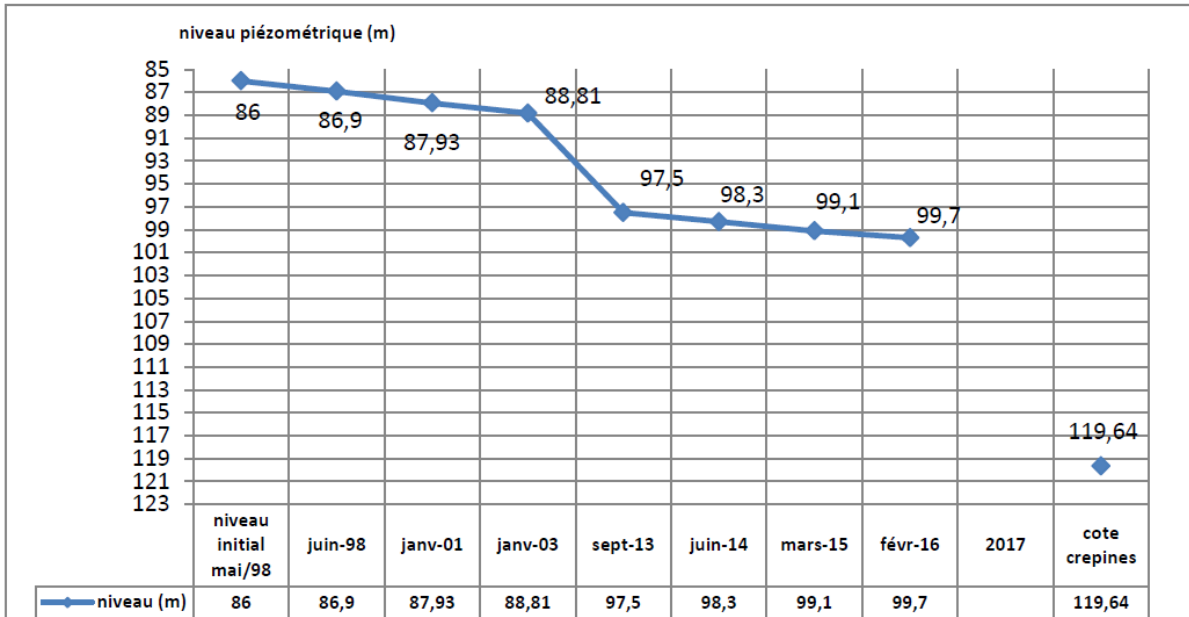


Fig. II.21 : Variations piézométriques mensuelles du puits HRH151(1998-2016).

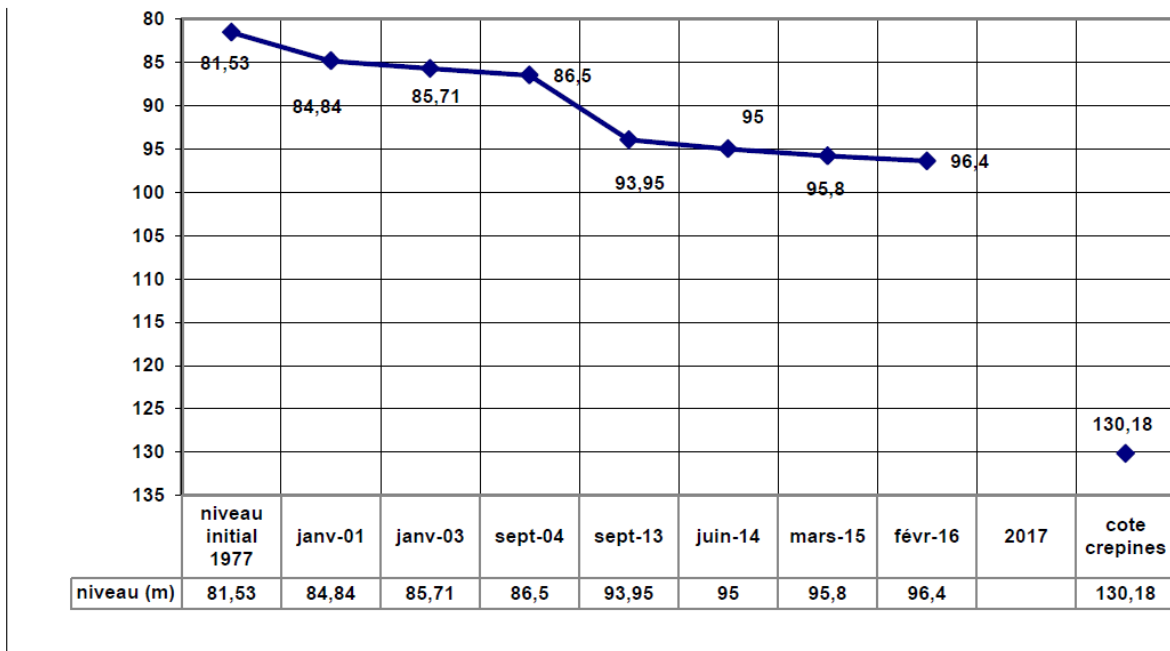


Fig. II.22 : Variations piézométriques mensuelles du puits HRH126(1977-2016).

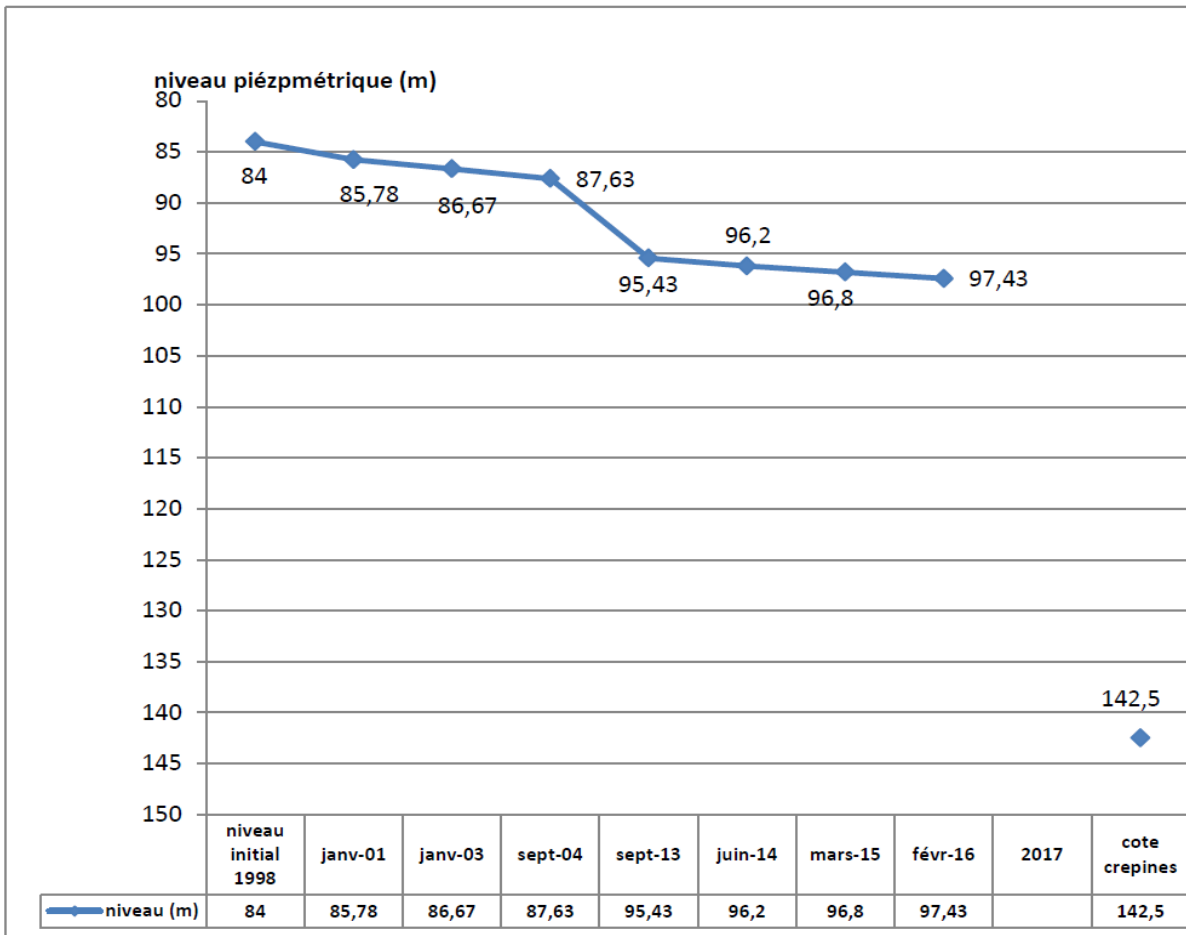


Fig. II.23 : Variations piézométriques mensuelles du puits HRH145(1998-2016).

c- Zone sud :

Cette zone est productive au niveau des puits HRH (122, 142,148); le niveau piézométrique actuel est à la cote (de + 678 m à + 690 m).

Pour le puits HRH 122, la courbe de variation du niveau piézométrique montre une chute de niveau de 26.74 mètres pendant 39 ans (1977 - 2016) soit 0.68 m/an.

Pour le puits HRH 142, la courbe de variation du niveau piézométrique montre une chute de niveau de 15.32 mètres pendant 23 ans (1993 - 2016) soit 0,66 m/an.

Pour le puits HRH 148, la courbe de variation du niveau piézométrique montre une chute de niveau de 11.15 mètres pendant 18 ans (1998 - 2016) soit 0,62 m/an.

Pour le puits HRH 123, asséché à partir de 1999. Lors de l'opération de son forage, le mur du turonien n'a pas été atteint.

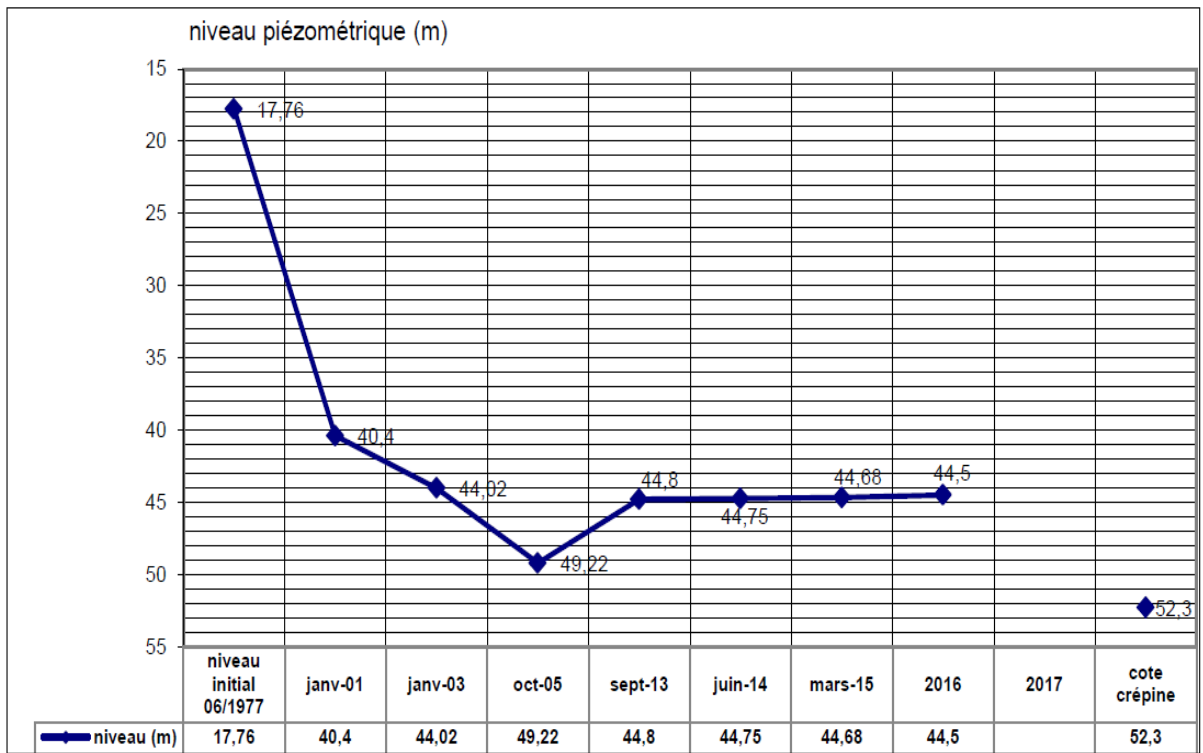


Fig. II.24 : Variations piézométriques mensuelles du puits HRH122 (1977-2016).

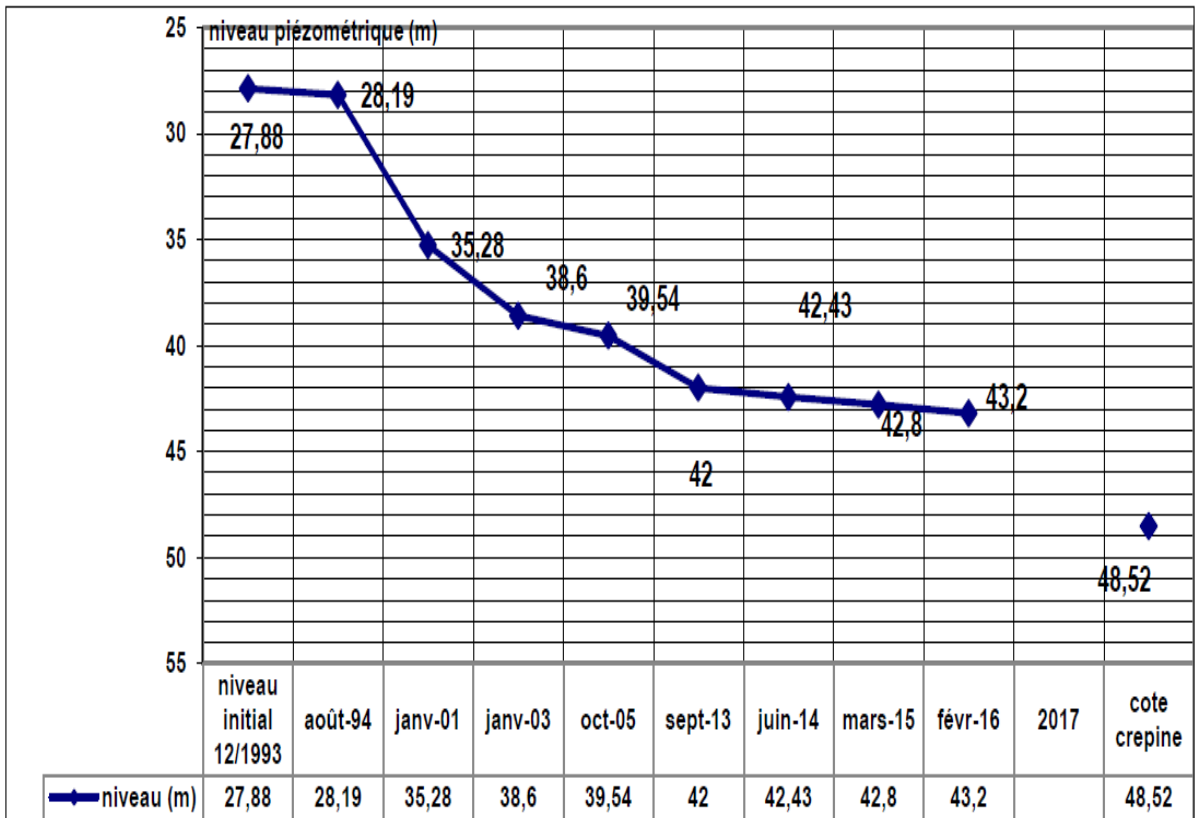


Fig. II.25 : Variations piézométriques mensuelles du puits HRH142 (1993-2016).

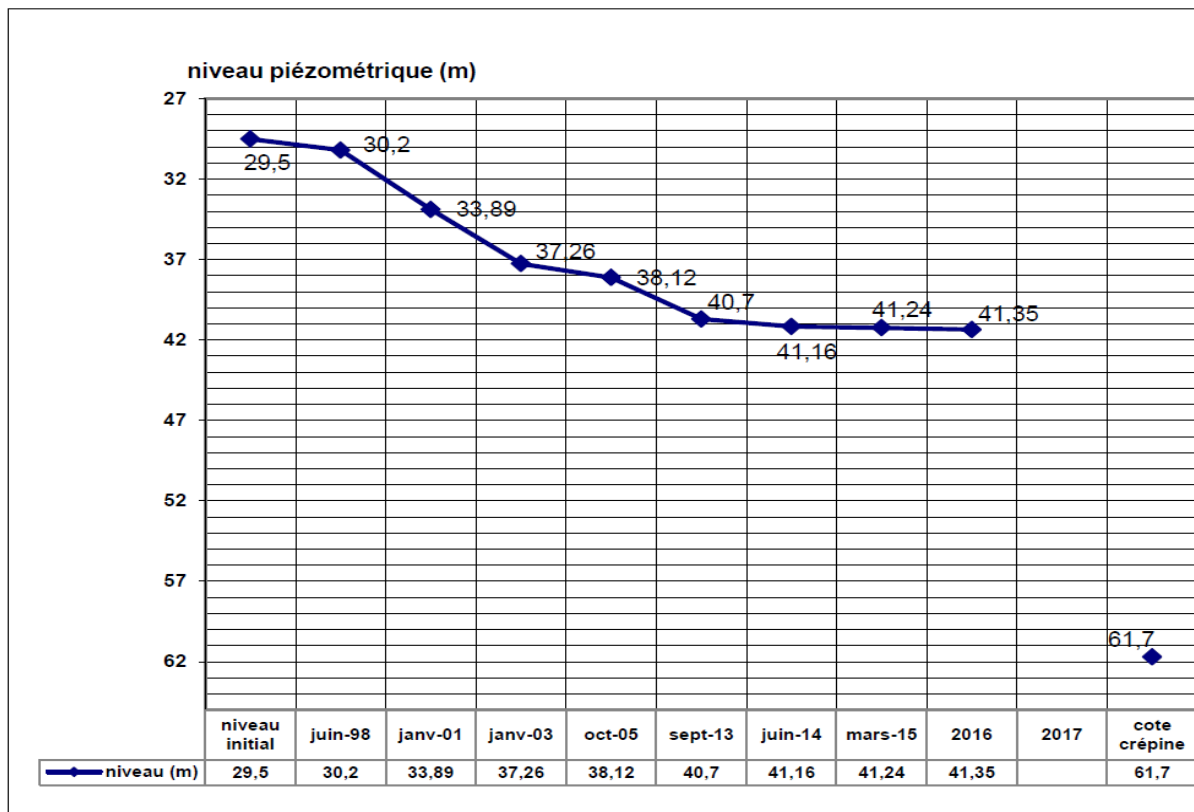


Fig. II.26 : Variations piézométriques mensuelles du puits HRH148 (1998-2016).

II.2.5. Caractéristiques hydrodynamiques :

La vérification des impacts potentiels d'un projet de captage d'eau souterraine nécessite l'évaluation des propriétés physiques (la perméabilité, la transmissivité, coefficient d'emménagement des formations géologiques aquifères qui contiennent cette eau).

Pour arriver à évaluer les conditions aux limites ainsi que les paramètres hydrodynamiques de l'aquifère, on a eu recours aux essais de pompage.

Les pompages d'essai permettent de connaître la quantité d'eau qui peut être prélevée dans un aquifère. L'essai de puits a pour objet de déterminer le débit optimum fourni par un puits ; il consiste à pomper par paliers avec des débits de plus en plus importants et de mesurer corrélativement le rabattement du niveau d'eau dans le puits.

Les pompages d'essais de longue durée sont exécutés avec un seul palier à débit constant. La remontée des niveaux doit être observée pendant une durée, telle que le niveau statique doit être atteint.

L'exécution et l'interprétation des données mesurées, rabattements et temps, reposent sur l'emploi des expressions d'hydrodynamiques en régime transitoire. L'essai de pompage a pour but principal de calculer les paramètres hydrodynamiques : T, K, S.

- Perméabilité (K) : C'est l'aptitude d'un milieu aquifère à se laisser traverser par un fluide, sous l'effet d'un gradient hydraulique « symbole K, unité (m/s)».
- Transmissivité (T): Paramètre régissant le débit d'eau qui s'écoule par unité de largeur de la zone saturée d'un aquifère continu par unité de gradient hydraulique. C'est ainsi le produit du coefficient de perméabilité (de Darcy) K par la puissance de l'aquifère b en milieu isotrope, « Symbole T, unité (m²/s) ».
- Coefficient d'emmagasinement (S) : C'est le rapport du volume d'eau libéré ou emmagasiné par unité de surface d'un aquifère à la variation de charge hydraulique correspondant sous référence au temps. Ce paramètre est lié à la compressibilité et à l'expansibilité de l'eau et du milieu aquifère, ainsi qu'à la puissance de la couche aquifère. Il équivaut en pratique à la porosité efficace.

- Pour déterminer les caractéristiques hydrodynamiques de la nappe superficielle dans la région de Hassi R'Mel, des essais de pompages ont été réalisés par SONATRACH au niveau de quelques forages d'eau.

Sur la base des données de ces essais de pompage, on a calculé leur transmissivité par les méthodes de Jacob et Theis. Les résultats sont consignés dans le tableau suivant :

Tab.II.11 : Récapitulatif des données de la transmissivité et de la perméabilité.

Puits	T*10⁻⁴ (m²/s)	b(m)	K*10⁻⁵ (m/s)
HRH106	1030,3	25	417,35
HRH107	16,67	38	4,44
HRH123	18,82	25	7,35
HRH129	1,87	66	0,29
HRH114	7,7	20	3,85

La valeur de la transmissivité varie de 1.875*10⁻⁴ m²/s comme valeur minimale au niveau du HRH129 et 1030.03*10⁻⁴ m²/s comme valeur maximale au niveau du HRH106.

- La valeur de la perméabilité varie de 0.288*10⁻⁵ m/s pour HRH129, cette valeur présente une mauvaise perméabilité. Le forage HRH106 a subi plusieurs acidifications, la valeur présente 417.35 m/s (cas exceptionnel), (d'après l'échelle de la perméabilité)

une bonne perméabilité affirmée par la présence des terrains karstiques (calcaire fissuré).

Ces résultats illustrant l'idée principale que l'emmagasinement et surtout la circulation d'eau dans ces calcaires turoniens sont très dépendantes de l'état de fracturation, également du niveau de karstification qui s'est développée suivant le réseau de fissures et de fractures. Les meilleures productivités des forages d'eau seront donc obtenues dans les secteurs les plus fracturés.

II.2.6. Conclusion :

- Les eaux souterraines de Hassi R'Mel jouent un rôle important par rapport aux eaux superficielles, qui sont inexistantes.
- à Hassi R'Mel, on exploite généralement la nappe phréatique (dite aussi superficielle) du SENONO-TURONIEN son épaisseur varie de 25 à 220 m, elle est plus importante au Sud.
- La nappe superficielle du SENONO - TURONIEN représentée par trois dépressions ou trois zones (zone nord, centre et sud), est favorablement productrice dans ces zones.
- Cette nappe phréatique est liée généralement au développement d'une fissuration et fracturation plus importantes, par localité.
- La nappe superficielle alimentée par les eaux des précipitations locales.

L'essai de pompage a montré que les valeurs de la transmissivité varient entre $1.875 * 10^{-4} \text{ m}^2 / \text{s}$ comme valeur minimale, et $1030.03 * 10^{-4} \text{ m}^2 / \text{s}$ comme une valeur maximale, et celles de la perméabilité varie entre $0.288 * 10^{-5} \text{ m} / \text{s}$ comme une médiocre perméabilité et $417.35 \text{ m} / \text{s}$ comme une forte perméabilité.

Les valeurs de la transmissivité et de la perméabilité varient d'un puits à un autre, ceci est dû essentiellement au changement de faciès et de fissurations des calcaires.

- Les eaux souterraines au sud sont généralement considérées comme des eaux fossiles, et en raison des très faibles précipitations dans le Sahara ($<100 \text{ mm} / \text{an}$), la recharge active de ces aquifères est extrêmement faible. L'exploitation des ressources en eaux souterraines du Sahara est donc généralement de type « minier », avec un déclin inexorable des ressources disponibles.

CHAPITRE III

Recherche bibliographique, définitions et concepts.

III.1. Introduction :

L'eau est très présente sur notre planète, ainsi vue de l'espace, la terre apparaît bleue car les océans recouvrant près des trois quarts de la surface terrestre (70%). La totalité de l'eau sur terre représente un volume de 1,4 milliard de km³ sous forme liquide, solide ou gazeuse. Cependant, la majeure partie de l'eau (97 %) est salée, elle est contenue dans les océans, ce qui la rend inutilisable par l'homme (CIE, 2013).

En Algérie, le potentiel des eaux souterraines exploitables disponibles a été estimé à 123 unités hydrogéologiques différentes par l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH). Le potentiel exploitable d'eau souterraine total disponible est estimé à environ 2,7 milliards de m³ dans la région nord de l'Atlas et à 5 milliards de m³ dans la région du sud du Sahara (ANRH / Energoprojekt, 2009).

III.2. Les sources naturelles de l'eau :

On trouve quatre sources principales d'eaux brutes : les eaux de pluie, les eaux de mer, les eaux de surface et les eaux souterraines. Les caractéristiques générales de chacune de ces sources reflètent l'interaction de l'eau et du milieu environnant. (Boeglin, 2009).

III.2.1. Les eaux de pluie :

Les eaux de pluie sont des eaux de bonne qualité pour la consommation humaine. Elles sont très douces par la présence d'oxygène et d'azote et l'absence des sels dissous, comme les sels de magnésium et de calcium. Dans les régions industrialisées, les eaux de pluie peuvent être souillées par des poussières atmosphériques. La distribution des pluies dans le temps ainsi que les difficultés de captage font que peu de municipalités utilisent cette source d'eau (Boeglin, 2009).

III.2.2. Les eaux de mer :

Les eaux de mer sont une source d'eau brute qu'on n'utilise que lorsqu'il n'y a pas moyen de s'approvisionner en eau douce. Ces eaux sont caractérisées par une grande salinité (varie de 33000 à 37000 mg.L⁻¹), elles sont dénommées aussi «eaux saumâtres». Ce qui rend l'utilisation de ces eaux difficile, notamment leur coût très élevé pour leur traitement (Boeglin, 2009).

III.2.3. Les eaux de surface :

Les eaux de surface sont des eaux qui circulent ou qui sont stockées à la surface des continents. Elles proviennent soit par des nappes souterraines dont l'émergence constitue une source, soit par les eaux de ruissellement (fleuves, rivières, barrages, mares) ,elles sont caractérisées par une surface de contact eau-atmosphère toujours en mouvement et une vitesse de circulation appréciable (Degremont, 2005).

En plus, ces eaux superficielles doivent subir un traitement en plusieurs étapes pour être utilisées pour la boisson et les usages domestiques. Elles ne peuvent être utilisées sans traitement. De plus, pour envisager d'alimenter des populations à partir d'eaux de surface, il faut éviter les conditions favorisant l'érosion des sols, les conditions non hygiéniques et les pollutions accidentelles et chroniques (Molinie, 2009).

III.2.4. Les eaux souterraines :

On dit « eau souterraine » l'eau qui se trouve sous le niveau du sol et qui remplit soit les fractures du socle rocheux, soit les pores présents dans les milieux granulaires tels que les sables et les graviers. Contrairement à l'eau de surface, l'eau souterraine n'est pas rassemblée comme un ruisseau ou une rivière, mais elle circule en profondeur dans les formations géologiques qui constituent l'espace souterrain (Myrand, 2008).

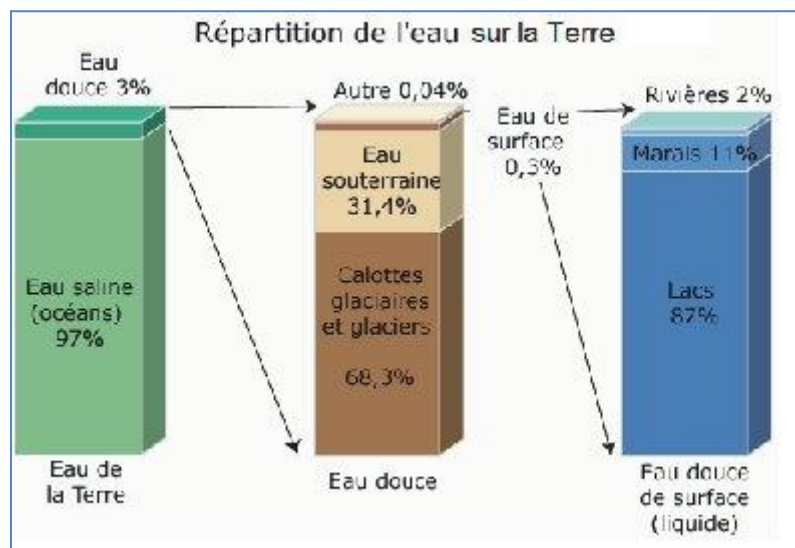


Fig. III.01 : Répartition de l'eau sur Terre

III.3. Les eaux d'approvisionnement :

Les réserves disponibles des eaux naturelles sont constituées des eaux de surface stagnantes (lacs, retenue de barrage) ou en écoulement (rivières), des eaux souterraines (infiltration, nappes) (Degriment, 2005).

III.3. 1. Eaux de surface :

Les eaux de surface sont des eaux qui circulent ou qui sont stockées à la surface des continents elles ont pour origine, soit des nappes souterraines dont l'émergence constitue une source, soit les eaux de ruissellement.

Les eaux de surface sont moins stables, et contiennent des matières minérales et organiques en suspension qui peuvent engendrer désagrément olfactifs et gustatifs. Elles nécessitent un traitement physico-chimique parfois complexe dans des infrastructures importantes (Degriment, 2005).

III.3. 2. Eaux souterraines :

Ce sont les plus potables, souvent de meilleure qualité, mais moins celles provenant chargées de matière organique en traversant les couches supérieures des sols et s'enrichissent en sels minéraux provenant de terrains rencontrés sur leur parcours (Aliouane, 2010).

III.4. Les origines des eaux souterraines :

III.4.1. Eaux météoriques :

La plupart des eaux souterraines ont une origine météorique, c'est-à-dire proviennent des précipitations (pluie, neige) et de leurs infiltrations dans le sous-sol. Dans les aquifères de grande taille, l'eau peut provenir de périodes où le climat était différent et peut donc servir comme indicateur de paléoclimats. (Renard 2015).

III.4.2. Eaux connées :

Les eaux que l'on trouve en profondeur dans la croûte terrestre (à partir de 1 à 2 km) sont dérivées de réservoirs d'eaux météoriques qui ont réagi avec les roches environnantes, souvent ces eaux sont relativement salées. Les eaux connées peuvent contribuer à l'hydrologie de formation géologique qui s'est enfouies très récemment ou bien rester piégées dans des roches dont la perméabilité est faible et dont toute l'eau n'a

pas été expulsée. Souvent cette eau est présente depuis la formation de la roche (Reanrd, 2015).

III.4.3. Eaux juvéniles :

L'eau juvénile est l'eau qui provient directement des profondeurs du manteau terrestre. Elle quitte généralement ce compartiment lors du dégazage des volcans terrestres, de la cristallisation du magma ou des éruptions des sources hydrothermales.

III.5. Les aquifères :

Les formations géologiques qui composent le sol ont, lorsqu'elles sont assez perméables et poreuses, la capacité de permettre les écoulements verticaux et transversaux de l'eau et de l'emmagasiner. Elles constituent alors des aquifères dans lesquels le comportement des eaux souterraines est très variable selon les caractéristiques physiques et structurales des terrains.

Le mot « aquifère » désigne simplement une couche de sol contenant de l'eau. C'est un gisement d'eau souterraine utilisable comme source d'eau (Kettab, 1992 ; Arjen, 2010).

On distingue trois grandes familles d'aquifères :

III.5. 1. Les aquifères de roches sédimentaires :

Sont composés de calcaires, sables, grès, craie. Ils caractérisent les dépôts en couches dans les grands bassins actuels : bassins parisien, aquitain... ou ceux morcelés, voire déformés dans les chaînes de montagne (Alpes, Pyrénées...).

III.5. 2. Les aquifères alluviaux :

Sont constitués de matériaux déposés par les cours d'eau dans leurs vallées : sables et graviers, intercalés dans des limons fins. Vulnérables, ces nappes en relation avec les eaux de surface servent souvent de relais aux grandes nappes libres qui s'écoulent naturellement vers les points bas que sont les vallées.

III.5. 3. Les aquifères de roches cristallines (granite, gneiss,...) et volcaniques (laves, cendres) :

Stockent l'eau dans les fissures et les zones altérées (arènes). Ils abritent de petites nappes et sont fréquents en Bretagne, dans les Alpes, le Massif central, les Pyrénées. Cela étant dit, il n'existe pas de classification précise et unique des différents types d'aquifères, et l'illustration suivante présente des contextes aquifères variés.

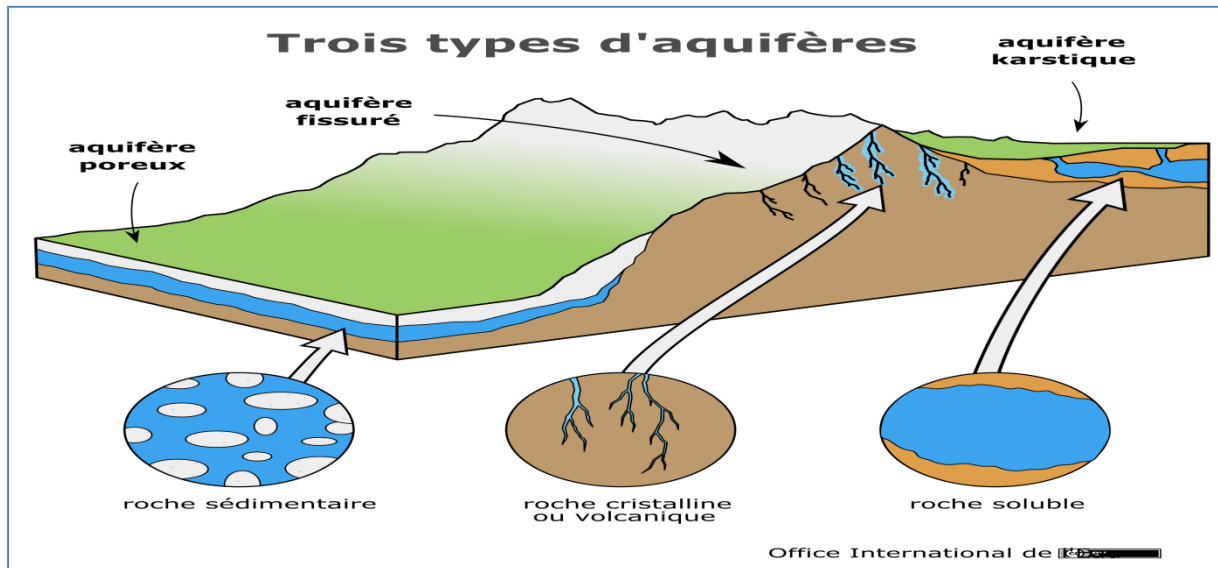


Fig. III.02 : Principaux types d'aquifères

III.6. Les nappes d'eaux :

Les nappes d'eau souterraine ne sont ni des lacs ni des cours d'eau souterrains. Elles sont de l'eau contenue dans les pores ou les fissures des roches saturées par les eaux de pluie qui se sont infiltrées, c'est le contenu des aquifères. (AEAG, 2012).

La porosité et la structure du sol déterminent le type de nappe et le mode de circulation souterraine (OMS, 2000).

Les types de nappes peuvent également être classés selon les roches-magasins et selon la nature du réservoir :

III.6. 1. Les nappes libres :

Des formations sédimentaires : il s'agit de roches poreuses (sable, craie, calcaire) jadis déposées en vastes couches. Ces nappes sont dites libres parce que la surface supérieure de l'eau fluctue sans contrainte. Les eaux de cette nappe ne sont pas maintenues sous pression à cause d'un toit moins perméable que la formation qui la contient, il n'y a pas de « couvercle » imperméable au toit du réservoir et la pluie efficace peut les alimenter par toute la surface (Jean-Claude ROUX, 2006)

III.6. 2. Les nappes captives :

Elles sont constituées à peu près des mêmes types de roche, mais sont recouvertes par une autre couche géologique imperméable qui confine l'eau. Celle-ci est alors sous pression et peut jaillir dans des forages dits artésiens. Les nappes captives sont souvent profondes, voire très profondes (1000 m et plus). On peut alors les exploiter pour la géothermie haute température (Jean-Claude, 2006).

III.6. 3. Les nappes alluviales :

Elles constituent un type particulier de nappes, formées par les grands épandages de sables et graviers des fleuves et des rivières. Ces nappes caractérisées par leur facilité d'accès et leur bon débit. Elles sont le lieu privilégié des échanges entre les cours d'eau et les autres grandes nappes des coteaux (nappes libres). C'est à travers ces nappes alluviales que les grands flux issus des nappes libres rejoignent les rivières.

III.6. 4. Les nappes karstiques

C'est des nappes des roches dures fissurées, la nappe karstique se rencontre dans les formations calcaires. Les eaux en dissolvant le calcaire à la faveur des fissures préexistantes constituent des vides dans lesquels peuvent s'écouler les eaux. Ces vides peuvent atteindre de grandes dimensions (gouffres, cavernes).

Dans ces conduites, les eaux peuvent cheminer rapidement et constituer des cours d'eau souterraines

Aux points de sortie, les sources présentent des débits souvent variables dans le temps (leur valeur varie au cours de l'année).

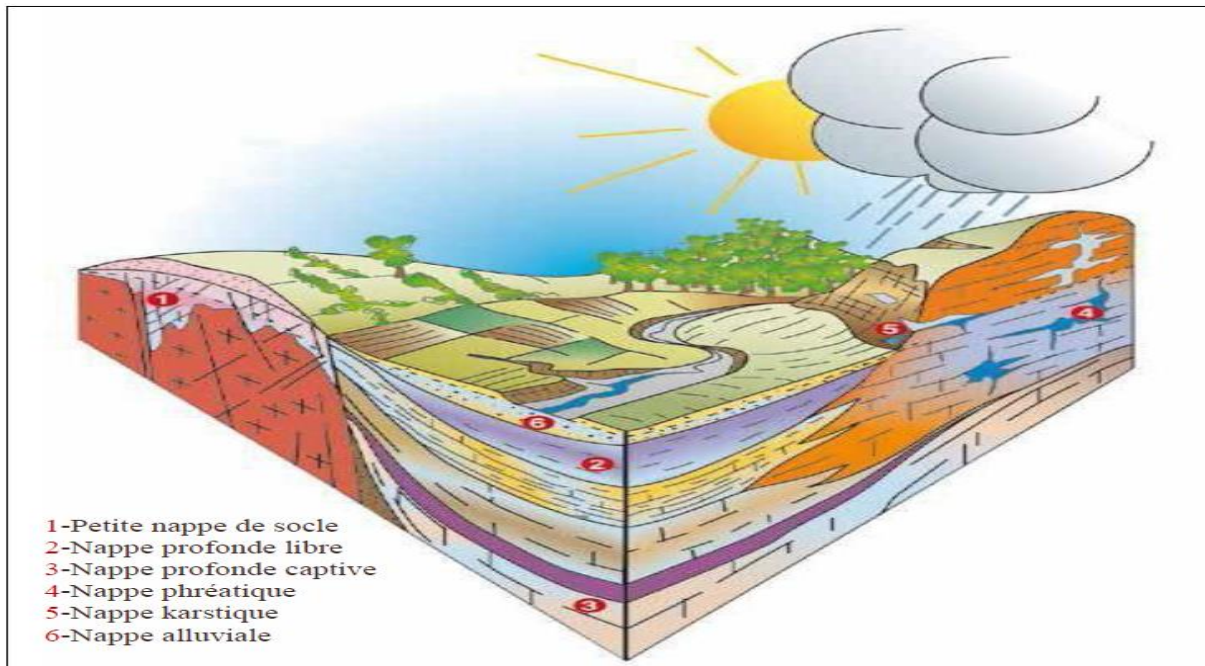


Fig. III.03 : Les différents types de nappes

III.7. Zonalité de l'eau dans le sous -sol :

L'eau qui s'infiltré dans le sol rencontre différentes zones. Une coupe depuis la surface du sol jusqu'à la nappe phréatique montre la zonalité suivante :

III.7.1. La zone non saturée (ZNS) :

L'eau ne remplit pas l'intégralité des pores et se trouve en mouvement, vers la surface et vers les profondeurs. Dans cette zone l'eau n'est présente que sous forme d'humidité ou les pores sont remplis partiellement d'eau et d'air.

III.7.2. La frange capillaire

Où l'eau remonte de la zone saturée vers la zone non saturée .cette région correspond à la partie inférieure de la zone sous saturée.

III.7.3. La zone saturée (ZS)

Qui renferme la nappe. L'eau remplit tous les pores et s'écoule dans le sous-sol sur la couche imperméable, et occupe la totalité des vides disponibles (fissures, pores des sédiments ou des roches). (Voire la figure 4 suivante).

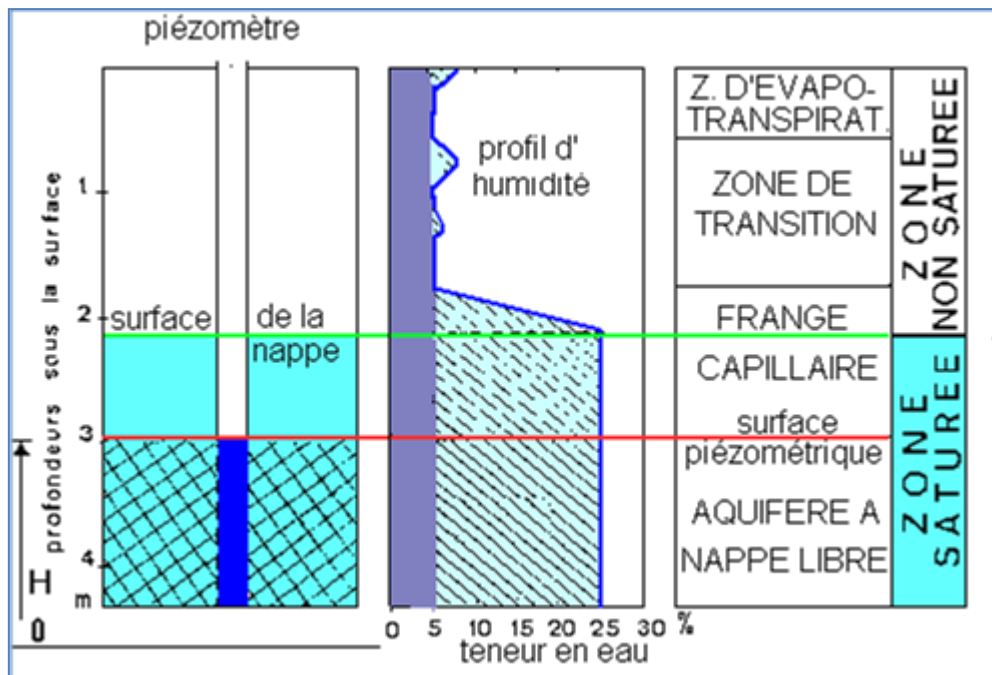


Fig. III.04 : Zonalité de l'eau dans le sous-sol.

III.8. Constituants des eaux souterraines :

Les eaux souterraines contiennent des molécules d'eau autour desquelles sont dissous des ions (majeurs, mineurs, et traces), des gaz dissous (oxygène, gaz carbonique) et parfois de la matière organique dissoute. Les origines de ces composants sont diverses et proviennent de sources naturelles ou anthropiques (déchets, activités industrielles, agriculture, mines...).(Kevin LUZOLOLUTETE, 2012).

III.8. 1. Les ions majeurs (~10⁰- 10⁴ mg/l) :

Cations majeurs : calcium (Ca²⁺), magnésium (Mg²⁺), sodium (Na⁺), potassium (K⁺). Anions majeurs: chlore (Cl⁻), bicarbonate (HCO₃⁻), sulfate (SO₄²⁻).

Dans les saumures (eaux fortement salées), le strontium (Sr²⁺) et les ions bromures (Br⁻) peuvent aussi avoir des concentrations élevées. Dans les eaux naturelles on trouve aussi de la silice (SiO₃²⁻), du fer (Fe²⁺), éventuellement des nitrates (NO₃⁻).

Les concentrations de ces ions majeurs sont utilisées pour déterminer le type d'eau, par exemple une eau du type Na-HCO₃ ou Na-Cl. Il n'y a pas de définition rigoureuse de ces types d'eaux, mais on les utilise pour différencier les eaux provenant de réserves différentes telle que les aquifères, les précipitations ou l'eau océanique.

La dureté totale d'une eau est produite par les sels de calcium et de magnésium qu'elle contient. On distingue :

- Une dureté carbonatée qui correspond à la teneur en carbonates et bicarbonates de Ca et Mg.
- Une dureté non-carbonatée produite par les autres sels.

III.8. 2. Les ions mineurs (~10⁻¹- 10¹ mg/l) :

Alors que les ions majeurs se retrouvent dans la plupart des eaux souterraines, des eaux d'aquifères peuvent avoir des teneurs en ions mineurs différentes. On trouve les ions suivants : nitrates (NO₃⁻), ammonium (NH₄⁺), silice (SiO₃⁻²), fer (Fe²⁺), manganèse (Mn²⁺), aluminium (Al³⁺), strontium (Sr²⁺), bore (BO₄³⁻), bromure (Br⁻).

III.8. 3. Les Eléments traces (~10⁻⁴- 10⁻¹ mg/l) et gaz dissous :

Les espèces dissoutes à très faible concentration représentent les métaux lourds et composants organiques. Leur concentration est souvent inférieure au mg/l ou même au µg/l.

- Métaux traces (zinc, chrome, cuivre, nickel, arsenic, mercure, cadmium, plomb).

-Traces d'hydrocarbures ;

Les gaz dissous (méthane, CO₂, oxygène, hydrogène, sulfite) représentent aussi des composants fréquents des eaux souterraines. Ils apportent souvent des informations sur les processus physiques et chimiques qui se produisent dans un aquifère.

III.9. La qualité des eaux souterraines :

Étant donné que les eaux souterraines sont généralement pures sur le plan bactériologique (UNICEF, 1999) elles constituent une meilleure solution que les eaux de surface en termes de génie sanitaire (Fiambsch, 1998). Dans la réalité, la qualité naturelle de l'eau souterraine ne concerne pas seulement les aspects sanitaires et techniques de l'eau potable. Il faut se souvenir en particulier que l'eau des nappes alimente les rivières et que, par conséquent, certaines propriétés chimiques et microbiologiques des eaux souterraines peuvent avoir des incidences sur la vie aquatique (Collin, 2004). Donc les qualités requises sont d'ordre bactériologique et physico-chimique.

III.9. 1. Les paramètres physico-chimiques :

Les qualités physico-chimiques de l'eau se basent sur des paramètres qualitatifs relativement facile à déterminer. Parmi ces paramètres on distingue les suivants :

a. La température : en unité (°C)

C'est un paramètre physique mesuré in situ. La température joue un rôle important dans l'augmentation de l'activité chimique (solubilité des sels et dissociation des gaz), l'activité bactérienne, la quantité d'oxygène dissous (plus la température est élevée, plus la quantité d'oxygène dissous est faible et favorise la croissance des micro-organismes, peut accentuer le goût, l'odeur et la couleur (OMS)). Par contre une température inférieure à 10°C ralentit les réactions chimiques dans les différents traitements des eaux (Rodier et al., 2009).

La température de l'eau est un paramètre de confort pour les usagers. Elle permet également de corriger les paramètres d'analyse dont les valeurs sont liées à la température (conductivité notamment). La température joue un rôle notable lorsque l'on fait des mélanges entre des eaux de composition différentes ; la couche protectrice formée par l'eau légèrement entartrant sur les parois d'une conduite peut ainsi changer de structure et diminuer en épaisseur ce qui n'est pas favorable. (BENAMOUR.M, 2007).

La température de la nappe superficielle varie entre 19°C et 21°C, elle ne dépasse pas 25°C.

b. Le pH (à la température de mesure) :

Le PH d'une eau est une indication de sa tendance à être acide ou alcaline et défini comme le cologarithme de l'activité des ions H⁺ d'une solution; $pH = -\log [H^+]$. C'est un élément important pour la détermination du caractère agressif ou incrustant, l'échelle du pH varie en fonction de la force ionique :

- pH > 7 : milieu basique.
- pH < 7 : milieu acide.
- pH = 7 : milieu neutre.

Les valeurs limites du pH sont comprises entre 6,5 et 9 (JORA, 2011). Au-dessous de ce seuil l'eau est dite « aggressive ».

Dans les eaux naturelles cette activité est due à des différentes causes en particulier l'ionisation de l'acide carbonique et de ses sels, il dépend de la température et de la nature géologique des terrains traversés par l'eau souterraine. (Rodier et al., 2009).

c. La turbidité : en unité NTU :

C'est le premier paramètre aperçu par le consommateur (Andriamiradis, 2005). La turbidité est la réduction de la transparence de l'eau due à la présence de matière non dissoute (débris organiques, argiles, organismes microscopiques ...) (Rodier et al., 2009).

Une forte turbidité de l'eau révèle la précipitation de fer, aluminium ou manganèse due à une oxydation dans le Réseau, et favorise aussi la fixation et la multiplication des micro-organismes, rendant sa qualité bactériologique suspecte (OMS, 2004). Selon (Desjardins, 1990; Kettab, 1992; Boeglin, 2000), parmi les caractéristiques générales des eaux souterraines, il faut retenir leur très faible turbidité.

d. La conductivité et minéralisation en $\mu\text{S}/\text{cm}$ à une température de 25°C :

La conductivité électrique traduit la capacité d'une solution aqueuse à conduire le courant électrique ; Elle détermine la teneur globale des minéraux présent dans une solution : une eau douce accusera généralement une conductivité basse et bien au contraire une eau dite dure affichera une conductivité élevée. Elle est également en fonction de la température de l'eau, et proportionnelle à la minéralisation (Bremaude et al., 2006), la conductivité permet d'évaluer rapidement et approximativement la minéralisation globale de l'eau.

La mesure de conductivité est réalisée en mesurant la conductance d'une eau entre 2 électrodes métalliques, elle est l'inverse de la résistivité électrique.

La mesure de la conductivité d'une eau (γ) est réalisée en mesurant la conductance d'une eau entre 2 électrodes métalliques de 1 cm^2 de surface et séparés l'une de l'autre de 1 cm . Elle est l'inverse de la résistivité électrique (ρ). » (RODIER, 2009).

$$\gamma = 1/\rho = (1/R)(L/S)$$

γ : conductivité (en $\Omega^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$)

ρ : résistivité (en $\Omega\cdot\text{m}$)

L : distance entre les deux électrodes (en m)

S : surface de chaque électrode (en m^2).

e. Les matières en suspensions (MES) : en mg/l MES

Elles représentent les matières qui ne sont ni à l'état soluble ni à l'état colloïdal, donc retenues par un filtre. Les matières en suspension limitent la pénétration de la lumière dans l'eau, réduisant la teneur en oxygène dissous et nuisant au développement de la vie aquatique (Hakmi, 2006). Pour une eau qui contient des matières en suspensions à des teneurs de quelques milligrammes par litre, ne pose pas de problèmes majeurs (Dégremont, 2005).

e.1. Méthode par filtration : La détermination des matières en suspension (MES) est un indicateur de pollution concernant la charge en matières solides. L'eau est filtrée et le poids de matières retenues par le filtre est déterminé par une pesée différentielle après un séchage à 105 °C.

e.2. Méthode par centrifugation : L'eau est centrifugée, le culot est recueilli, séché à 105°C et pesé. Cette méthode est surtout réservée aux eaux contenant trop de matières colloïdales pour être filtrées dans de bonnes conditions. C'est le cas des boues de stations d'épuration.

f. Les Résidus sec :en mg/l

Cette mesure permet d'évaluer la teneur des matières dissoutes et en suspension déterminée par pesée. Une certaine quantité d'eau est évaporée soit à 110 ou 180 °C dans une coupelle tarée. Le résidu desséché est ensuite évalué par pesée.

g. La dureté : en °F (degré français)

La dureté de l'eau est liée au lessivage des terrains traversés. On parle de dureté totale d'une eau ou de titre hydrométrique (TH).

Elle correspond à la somme des concentrations en cations métalliques à l'exception de ceux des métaux alcalins et de l'ion hydrogène. Dans la plupart des cas la dureté est surtout due aux ions calcium (Ca) et magnésium (Mg) auxquels s'ajoutent quelquefois les ions fer, aluminium, manganèse, strontium. Ces déterminations sont basées sur la neutralisation d'un volume d'eau par un acide minéral dilué.

La dureté est encore appelée dureté calcique et magnésienne. Elle s'exprime en milliéquivalents de concentration en. Elle est CaCO₃ aussi très souvent donnée en degrés français.» (Rodier, 2009).

h. La Couleur : en mg/l Pt (Platine)

Cette analyse consiste en la détermination de l'intensité de la couleur brun jaunâtre d'un échantillon par comparaison visuelle avec une série de solutions étalons. La couleur est exprimée en mg/l de Pt représentant l'intensité de la couleur produite par les solutions étalons.

i. Les cations :

- **L'ion de Calcium (Ca²⁺) :**

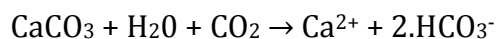
Le calcium est l'élément présent dans toutes les eaux naturelles (Benamar et al. 2011). C'est un métal alcalino-terreux très répandu dans la nature et en particulier dans les roches calcaires sous forme de carbonates. Il existe principalement à l'état d'hydrogénocarbonates et en quantité moindre sous forme sulfate, chlorure...etc (Rodier et al., 2005).

Le calcium est aussi fréquent dans les roches sédimentaires. Il peut provenir également des formations gypsifères (CaSO₄, 2H₂O) qui sont facilement solubles (Sedrati, 2011).

Le calcium ne pose pas des problèmes de potabilité, le seul inconvénient domestique lié à une dureté élevée est l'entartrage (Gaujour, 1995).

« Les eaux qui dépassent 200 mg/l de calcium présentent de sérieux inconvénients pour les usages domestiques et pour l'alimentation des chaudières.» (RODIER, 1996).

Il provient de la dissolution des roches carbonatées (surtout de la mise en solution de la calcite, l'aragonite, la dolomite, l'anhydrite et le gypse), due à la présence du gaz carbonique dans l'eau qui s'infiltré à travers ces formations :



- **L'ion de Magnésium (Mg²⁺) :**

Il constitue l'élément significatif de la dureté de l'eau avec les ions calcium, c'est l'un des éléments les plus répandus dans la nature (Rodier et al., 2009). La variation du magnésium dans les eaux souterraines est due à l'influence des formations carbonatées

telles que les calcaires, d'une part, et les formations salifères d'autre part, comme les argiles et les marnes qui sont riches en Mg^{2+} (Dib, 2009).

Son abondance géologique, sa grande solubilité, sa large utilisation industrielle font que les teneurs dans l'eau peuvent être importantes (SEVESC, 2013).

Les ions de Mg^{++} proviennent de la dissolution des dolomies et des calcaires dolomitiques, leur contact avec de l'eau en présence du gaz carbonique favorise la libération du magnésium.

- **L'ion de Sodium (Na^+) :**

C'est un élément dont les concentrations dans l'eau varient d'une région à une autre (Bouziani, 2000). Son origine peut être naturelle (mer, terrain salé....) ; humaine (10 à 15 g NaCl dans les urines /jour) ou industrielle (potasse, industrie pétrolière).

Les eaux très riches en sodium deviennent saumâtres, prennent un goût désagréable et ne peuvent pas être consommées (Rodier et al., 2005).

« L'absorption de quantités relativement importantes de sodium (>200 mg/l) peut-être dangereuse chez certains malades. » (RODIER, 1996), souvent le sodium est lié aux minéraux argileux.

- **L'ion de Potassium (K^+) :**

Le potassium est étroitement rattaché au sodium à tel point, qu'il est rarement analysé comme un constituant à part dans les analyses de l'eau. Sa présence est très répandue dans la nature sous forme de sels. Il joue un rôle important dans l'équilibre électrolytique de l'organisme et règle la teneur en eau à l'intérieur des cellules (Mercier, 2000).

- **L'ion de Fer (Fe) :**

Le fer est un métal assez soluble que l'on peut retrouver dans l'eau et qui précipite par oxydation à l'air. Ce métal se classe en 4^{ème} rang des éléments de la croûte terrestre.

Un excès de fer dans l'eau, se précipite au contact de l'air en formant des flocons rouges qui troublent l'eau et tachent le linge (Bouziani, 2000).

j. Les anions :

- **Les Chlorures (Cl⁻) :**

Les chlorures sont très répandus dans la nature généralement sous forme de sels du sodium (NaCl), de potassium (KCl) et de calcium (CaCl₂) (SEVESC, 2013). L'ion chlorure n'est pas adsorbé par les formations géologiques, reste très mobile et ne se combine pas facilement avec les éléments chimiques. Il constitue un bon indicateur de la pollution (Chaker et Slimani, 2014).

Les teneurs en chlorures des eaux extrêmement variées sont liées principalement à la nature des terrains traversés. Le gros inconvénient des chlorures est la saveur désagréable qu'ils confèrent à l'eau à partir de 250 mg.L⁻¹ surtout lorsqu'il s'agit de chlorure de sodium (Rodier et al., 2005).

« Le gros inconvénient des chlorures est la saveur désagréable qui communique à l'eau à partir de 250 mg/l, surtout lorsqu'il s'agit de chlorures de sodium. Ils sont aussi susceptibles d'amener une corrosion dans les canalisations et les réservoirs. » (RODIER, 1996).

- **Les Sulfates (SO₄²⁻) :**

Les sulfates qui se dissolvent dans l'eau proviennent de certains minéraux en particulier du gypse ou apparaissent à partir de l'oxydation des minéraux sulfureux (Beriere, 2000). Selon l'intolérance des consommateurs, l'excès de sulfates dans l'eau peut entraîner des troubles intestinaux. Les concentrations admissibles sont de l'ordre de 400 mg.L⁻¹ (Bouziani, 2000).

- **Les Bicarbonates (HCO₃⁻) :**

L'augmentation des concentrations des bicarbonates HCO₃⁻ est liée à la dissolution des carbonates par le CO₂ des eaux de pluie.

« Quelles que soient les teneurs en bicarbonates, la potabilité n'est pas affectée. » (RODIER, 1996).

- **Les Nitrates (NO₃⁻) :**

Le nitrate, sel de l'acide nitrique, a pour formule chimique NO₃⁻. Pour se former, il a donc besoin d'azote (N) et d'oxygène (O).

Les nitrates sont naturellement présents dans l'eau mais selon les milieux, leur concentration varie de 0,1 à 1 mg/l pour l'eau souterraine.

L'apport de nitrates dans le sol, puis dans les eaux, est donc fortement lié à la quantité de matières organiques présente et aux conditions de milieu. Les actions anthropiques sont donc importantes : utilisation d'engrais azotés et de lisier. De même, les rejets de stations d'épuration ou plus simplement de latrines et fosses septiques représentent un apport en matières organiques susceptibles de produire des nitrates (Demdoum, 2010). Toutes les formes d'azote sont susceptibles d'être à l'origine des nitrates par un processus d'oxydation biologique. Pour connaître la méthode de détermination voir § "anions". Les composés carbonés : il existe différents indicateurs de pollution organique. Les composés carbonés peuvent avoir différentes origines liées aux activités humaines, industrielles, agricoles ainsi qu'aux activités naturelles.

- **Les Nitrites (NO_2^-) :**

Les nitrites sont répandus dans le sol, dans les eaux et dans les plantes, mais en quantités relativement faibles. Ils résultent soit d'une oxydation incomplète de l'ammoniac, soit d'une réduction des nitrates. Ils peuvent aussi provenir de l'étape de traitement des eaux en cas de gestion inadéquate des filtres à sable, des filtres à charbon actif ou des étapes de nitrification-dénitrification biologique.

Toutefois, une eau renfermant une quantité élevée de nitrites est considérée comme suspecte car cette présence est souvent liée à une détérioration de la qualité microbiologique (Bouziani, 2000 ; Savary, 2010).

III.9. 2. Les Paramètres bactériologiques :

C'est le paramètre le plus important de la qualité de l'eau potable. Elle se mesure par la présence d'organismes indicateurs de pollution : les Germes totaux et les Coliformes qui vivent normalement dans les intestins humains et animaux. Les bactéries indicatrices de contamination fécale sont les Coliformes connus sous le nom d'*Escherichia coli* (E.coli), les *Streptocoques fécaux* et les *Clostridium sulfato-réducteurs*. Elles se multiplient très facilement et sont utilisées généralement comme germes tests de contamination fécale (Ahonon, 2011).

a. Les Germes totaux :

La numération des germes aérobies mésophiles ou germes totaux, vise à estimer la densité de la population bactérienne générale dans l'eau potable. Elle permet ainsi une appréciation globale de la salubrité générale d'une eau, sans toutefois déterminer les sources de contamination (Levallois, 2003). D'une manière générale, ce dénombrement est utilisé comme indicateur de pollution et également comme indicateur d'efficacité de traitement, en particulier des traitements physiques comme la filtration par le sol, qui devrait entraîner soit une très forte diminution de la concentration bactérienne, soit même une absence de bactéries (CEAEQ, 2000 ; El Haisoufi et al., 2011).

b. Les Coliformes totaux :

Les coliformes totaux sont utilisés depuis très longtemps comme indicateurs de la qualité microbienne de l'eau car ils peuvent être indirectement associés à une pollution d'origine fécale. Les coliformes totaux sont définis comme étant des bactéries en forme de bâtonnet, aérobies ou anaérobies facultatifs, possédant l'enzyme β -galactosidase permettant l'hydrolyse du lactose à 35 °C afin de produire des colonies rouges avec reflet métallique sur un milieu gélosé approprié (Archibald, 2000; CEAEQ, 2000; Edberg et al., 2000). Ce groupe composé des principaux genres suivants : Citrobacter, Enterobacter, Escherichia, Klebsiella et Serratia (Chevalier, 2003). La plupart des espèces sont non pathogènes et ne représentent pas de risque direct pour la santé, à l'exception de certaines souches d'Escherichia coli (E. coli) ainsi que de rares bactéries pathogènes opportunistes (Edberg et al., 2000; OMS, 2000).

c. Les Coliformes fécaux (Escherichia coli) :

Les coliformes fécaux, ou coliformes thermo tolérants, sont un sous-groupe des coliformes totaux ont la capacité de fermenter le lactose à une température de 44,5 °C. L'espèce la plus habituellement associé à ce groupe bactérien est l'Escherichia coli (E. coli) (Elmund et al., 1999; Edberg et al., 2000). E. coli est la seule bactérie indicatrice qui représente sans équivoque une contamination d'origine fécale animale ou humaine. Sa détection dans une eau doit être considérée comme reflétant la présence possible des germes pathogènes d'origine entérique.

E. coli est considérée en fait comme le meilleur indicateur de contamination fécale de l'eau (Edberg et al., 2000) qui selon son origine, comporte des risques plus ou moins importants d'infection à caractère entérique (Bopp et al., 1999). Sa détection dans un

puits peut donc être indicatrice d'une source ponctuelle de contamination (Gouvernement du Québec, 2004).

d. Les Streptocoques fécaux :

Les entérocoques font partie d'un groupe de bactéries naturellement présentes dans la flore intestinale des animaux et des humains ; certains streptocoques fécaux sont très apparentés aux entérocoques et sont encore utilisés à titre d'indicateurs de contamination fécale (Gleeson et Gray, 1997). Ils se retrouvent habituellement dans les eaux souterraines à la suite d'une pollution d'origine fécale (Gleeson et Gray, 1997 ; Edberg et al., 2000).

e. Les Clostridium sulfito-réducteurs :

Parmi les paramètres retenus pour déterminer la qualité microbiologique d'une eau d'alimentation, les Clostridium sulfito-réducteurs sont pris en compte aussi. Les Clostridium sulfito-réducteurs sont souvent utilisés comme des témoins de pollution fécale. La forme spore, beaucoup plus résistante que les formes végétatives, les coliformes fécaux et les streptocoques fécaux, permettrait ainsi de détecter une pollution fécale ancienne ou intermittente. Sans débattre de l'intérêt réel d'une telle indication concernant la date de la pollution, il faut cependant considérer que si les Clostridium sulfito-réducteurs peuvent certes être des germes fécaux, ce sont encore des germes telluriques et que, de ce fait, aucune spécificité d'origine fécale ne peut être attribuée à leur mise en évidence (Rodier et al., 2009).

III.9. 3. Normes de la qualité de l'eau :

Afin de définir régulièrement une eau potable, des normes ont été établies qui fixent notamment les teneurs limites à ne pas dépasser pour un certain nombre de substances nuisibles et susceptibles d'être présentes dans l'eau. Le fait qu'une eau soit conforme aux normes, c'est-à-dire potable, ne désigne donc pas qu'elle soit exempte de matières polluantes, mais que leur concentration a été jugée suffisamment faible pour ne pas mettre en danger la santé du consommateur (Alouane, 2012).

Globalement, les qualités de l'eau de boisson doit obéir à des normes définies par une réglementation nationale. Il peut en résulter, pour un pays ou une région donnée, des dispositions réglementaires différentes de la qualité de l'eau, par rapport aux normes

internationales (Bouziani, 2000), en Algérie, il existe des réglementations locales pour la qualité de l'eau de boisson en citant le Journal Officiel de la République Algérienne (JORA, 2011).

Tableau III.01 : Normes physico-chimique des eaux potable (JORA, 2011).

Paramètres physico-chimique	Unité	Normes OMS	Normes Algériennes
Température	°C	/	25
Ph	/	7-8,5	6,5-9
Conductivité électrique à 20°C	µS/cm	/	2800
Turbidité	NTU	5	5
Dureté Totale	mg/l CaCO ₃	500	200
Sodium	mg/l	200	200
Calcium	mg/l CaCO ₃	/	200
Potassium	mg/l	/	12
Alcalinité	mg/l CaCO ₃	/	500
Magnésium	mg/l	/	150
Sulfates	mg/l	500	400
Chlorures	mg/l	250	500
Nitrates	mg/l	50	50
Nitrites	mg/l	0,5	0,2
Résidus sec	mg/l		1500

Tableau III.02 : Normes bactériologique des eaux souterraines (QUATRIÈME ÉDITION, OMS 2017)

Microorganismes	Les valeurs indicatives	Remarque
Toutes les eaux destinées à la consommation : Coli ou bactéries coliformes Thermotolérantes	0 0	Non détectables dans un échantillon de 100 ml
Eaux traitées à l'entrée du réseau de distribution : Coli ou bactéries coliformes Thermotolérantes Coliformes totaux	0 10	Non détectables dans un échantillon de 100 ml Non détectables dans un échantillon de 100 ml
Eaux traitées dans le réseau de distribution : coli ou bactéries coliformes Thermotolérantes Coliformes totaux	0 10	Non détectables dans un échantillon de 100ml Non détectables dans un échantillon de 100ml. Dans les installations importantes, lorsqu'un nombre suffisant d'échantillons sont examinés on ne doit pas trouver de coliformes dans 95% des échantillons prélevés sur une période de 12 mois.

III.10. La pollution des eaux souterraines :

La pollution de l'eau est actuellement placée en tête des problèmes de l'environnement car l'eau est une interface entre l'air et le sol, subit donc les dégradations de ces deux milieux (Bouziani, 2000).

Une eau est dite polluée lorsque son équilibre est modifié de façon durable par l'apport en quantités très importantes des substances plus ou moins toxiques, d'origines naturelles ou issues d'activités humaines (Rodier et al., 2005).

III.10.1. Les différents critères de pollution des eaux souterraines :

La nature des sols et les activités humaines sur un territoire conditionnent et modifient la qualité des eaux souterraines. La source de pollution de cette ressource peut donc être d'origine naturelle ou anthropique (Frioua, 2014).

Les pollutions peuvent être classées sur différents critères :

- Selon l'origine de pollution.
- Selon la nature de pollution.
- Selon la répartition spatiale.
- Selon la répartition temporelle.

III.10.1.1. Selon l'origine de pollution :

Généralement ce type de pollution d'origine humaine due à l'activité de l'homme peut causer l'émission de substances susceptible de contaminer les sols et s'infiltrer jusqu'aux eaux souterraines. Le risque de contamination est non seulement fonction des activités humaines et de leur intensité, mais aussi de la vulnérabilité des eaux souterraines. Puisque les eaux souterraines constituent un vecteur de propagation des contaminants au sein de sols. Leur mouvement dans les formations géologiques pourra :

- Menacer des ouvrages de captage existants situé sur son parcours d'écoulement.
- Comportement de potentiel d'exploitation d'une formation aquifère.
- Constituer un rejet diffus de contaminants susceptibles d'altérer de façon significative la qualité de l'eau.

a- Pollution domestique :

Dans le cas d'un assainissement (collectif ou individuel) défectueux, des substances indésirables contenues dans les eaux vannes et les eaux ménagères peuvent être transférées à la nappe (matières organique, détergent, solvant, antibiotique, micro-organismes...). Le cas se manifeste avec les puits perdus, l'assainissement individuel avec infiltration dans le sol mal conçue ou mal dimensionné, les stations d'épuration urbaines surchargée.

Les ordures ménagères accumulées dans des décharges sauvages ou non mises à la norme (centre d'enfouissement technique) libèrent également des lixiviations riches en polluants (Faurie et al., 2003).

b- Pollution industriel :

Les activités industrielles restent principalement des métaux, des hydrocarbures, des acides, et augmentent la température de l'eau. En moyenne, de 2004 à 2009, le SOES (Service de l'Observation et de Statique du Ministère en charge du Développement

Durable) en France, à montrer que les secteurs de métallurgie et la chimie sont des responsables des rejets de pollution dans les eaux les plus importants (Benmaid, 2013).

c- Pollution agricole :

Le régime et la qualité des eaux sont fortement influencés par les pratiques actuelles des cultures et l'élevage (Faurie et al., 2003).

L'utilisation des engrais chimique azotés et phosphorés, des produits phytosanitaires (pesticides) destinés à protéger les cultures, ces produits parfois toxique lorsqu'ils sont utilisé en excès vont contaminer en période de pluie les surface et les eaux souterraines par infiltration (Djabri, 996).

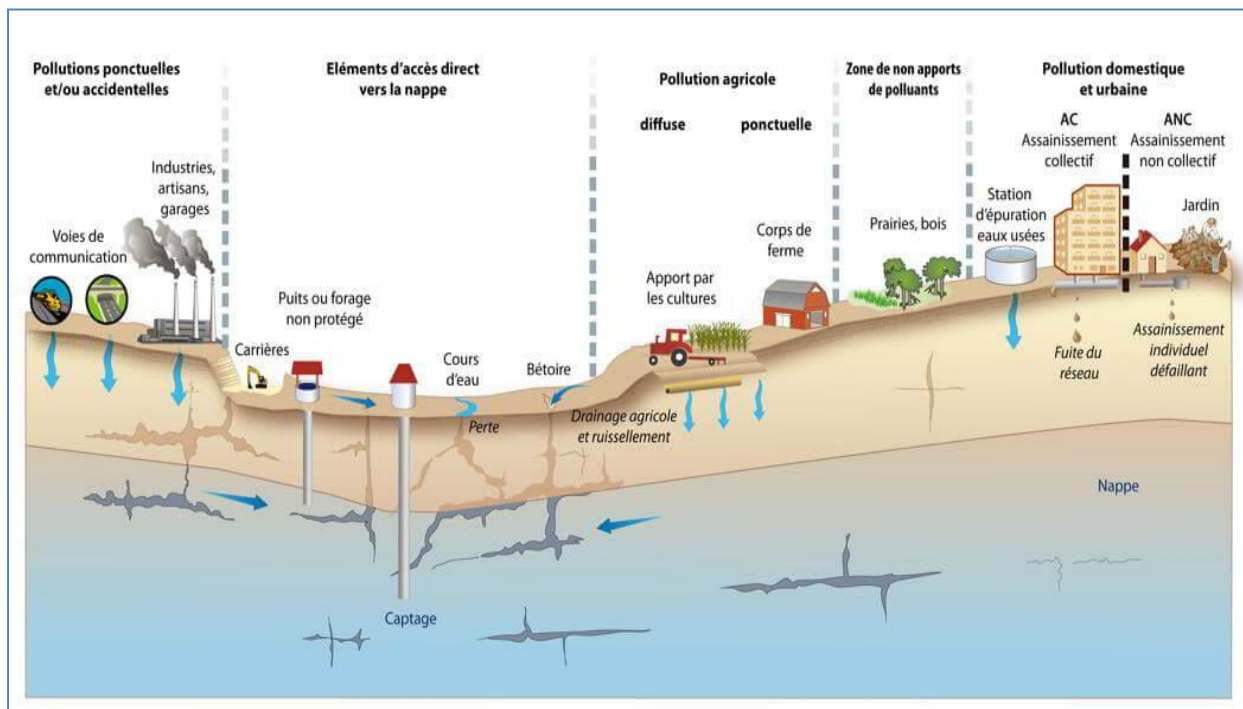


Figure III.05 : Différentes sources de pollution pouvant affecter les eaux souterraines (Nolwenn Croiset, 2012).

III.10.1.2. Selon la nature de pollution :

Généralement ce type de pollution est d'origine naturelle. La contamination de source naturelle est ponctuelle puisqu'elle est liée au contexte géologique. En fonction du contexte minéralogique, nous pouvons retrouver des problèmes de fluor, de fer, de manganèse, de carbonates de calcium, de sulfate, de salinités, d'arsenic, de baryum, de plomb, de cuivre, de zinc, de sélénium, d'uranium et d'autres métaux présents naturellement dans les eaux souterraines.

a- Microbiologique :

De nombreux micro-organismes, virus, bactéries et protozoaires, et des algues sont présents dans l'eau. Ces pollutions peuvent être aussi dues à des fuites de canalisation ou d'égouts ou à l'infiltration des eaux superficielles. Chimique, les micropolluants métalliques, les détergents, les pesticides, les hydrocarbures, les solvants chlorés.

Tableau III.04 : Origines et natures de différentes sources de pollution de l'eau (Henaut, 2011).

Type de pollution	nature	origine
Physique	Rejet d'eau chaude	Centrales thermiques nucléaires
	M.E.S (matière en suspension)	Rejet baign, érosion des sols.
Chimique	Matière organique	Effluents domestiques, agricoles, agroalimentaires.
	Fertilisants (nitrate, phosphate)	Agriculture, lessives.
	Métaux (Cd, Pb, Al, As)	Industries, agriculture, déchets.
	Pesticides (insecticides, herbicides, fongicides...)	Industries, agriculture.
	Organochlorés (PCB, Solvants)	Industries.
	Composés organiques de synthèse	Industries.
	Détergents	Effluents domestiques.
	Hydrocarbures	Industrie pétrolière, transports.
Biologique	Bactéries, virus, champignons.	Effluents urbains, agricoles.

III.10.2. Transfert des polluants dans les eaux souterraines :

Il s'agit d'une pollution diffuse de type agricole ou d'une pollution accidentelle, le schéma générale de contamination des eaux souterraines est le même, le point de départ est la surface du sol jusqu'à la nappe en passant par la zone non saturée, puis le cheminement subhorizontal avec étalement progressif du panache de pollution.

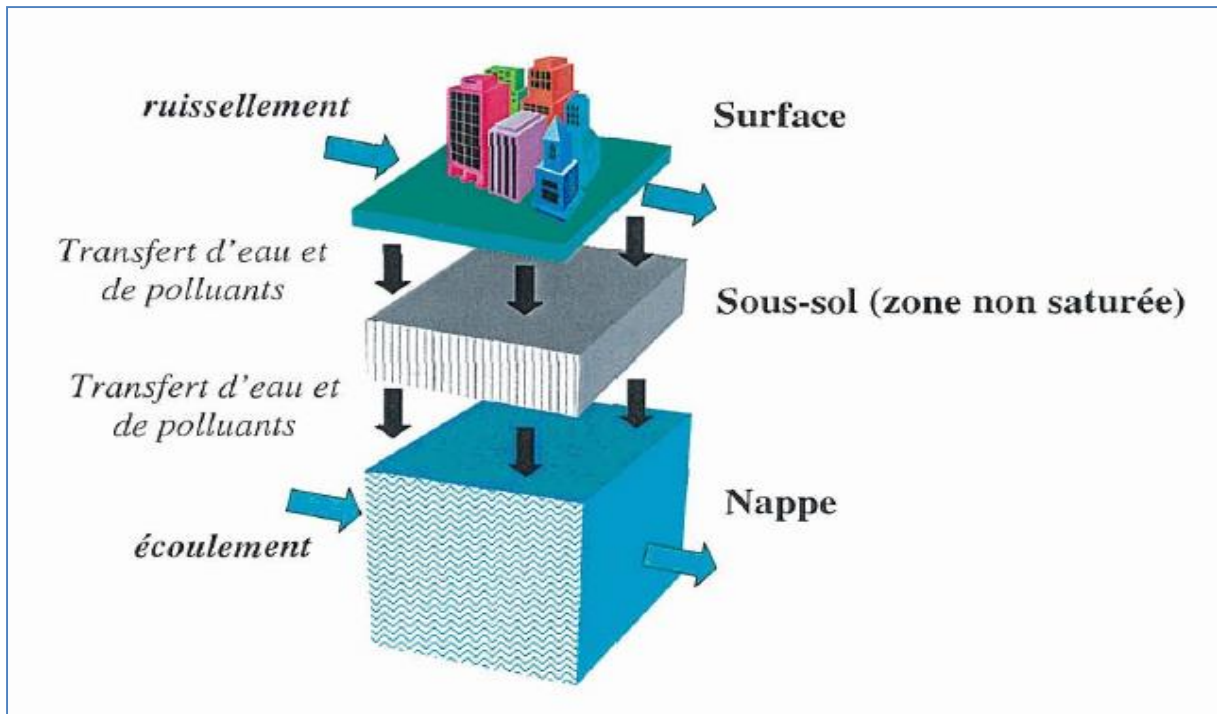


Figure III.06 : Schéma simplifié de migration de polluant dans les formations géologique (Frioua, 2014).

Le transfert d'un polluant étant indissociable de l'écoulement du fluide qui est le véhicule, l'écoulement de liquide avec différents facteurs influent sur le transfert des polluants vers les ressources en eau souterraines.

III.10.3. Mécanisme de transfert des polluants dans les eaux souterraines :

Les polluants sont rarement rejetés directement dans les nappes souterraines. Leur présence est due à leur transfert depuis la surface, au cours duquel différents processus physiques, chimiques et biologiques vont jouer un rôle dans l'atténuation, le délai de transfert, la distance de propagation et la rétention plus ou moins réversible du produit. Dans les différents compartiments d'un système aquifère (sol, zone non saturée et eau souterraine), les processus sont de nature et d'ampleur variable.

Les principaux processus qui contrôlent le transfert d'éléments sont la convection (entraînement de l'élément à la même vitesse que l'eau), la dispersion (étalement du panache de pollution sous l'effet de l'hétérogénéité du milieu), les échanges avec la phase solide (adsorption sur la matière organique ou la matrice rocheuse, précipitation/dissolution) et la dégradation (chimique ou biologique).

Les propriétés intrinsèques des polluants (solubilité, adsorption, dégradation), les propriétés intrinsèques des milieux traversés, (perméabilité, teneur en matière

organique, degré d'oxydation), les interactions entre les polluants et le milieu ainsi que le contexte climatique sont autant de facteurs qui contrôlent ces différents processus de migration des polluants. (Amalric et al., 2003).

III.10.4. Vulnérabilité des eaux souterraines :

La vulnérabilité est définie comme étant un défaut de protection ou de défense naturelle de l'eau souterraines contre les menaces de pollution, en fonction des conditions hydrogéologiques. de ce fait, certaines eaux souterraines ne sont pas à l'abri des pollutions éventuelles, malgré l'idée de pureté naturelle qui leur est communément attachée. En effet, certains types de sol notamment les sols minces et hautement perméables, favorisent l'infiltration directe de polluants vers les eaux souterraines. Aussi dans les aquifères sableux, la porosité d'interstice favorise l'infiltration des eaux superficielles conduisant ainsi à la contamination des eaux souterraines.

Par ailleurs, les aquifères en nappe libre semblent plus vulnérables que les aquifères en nappe captive parce qu'ils ne sont pas protégés par une couverture imperméable.

1. La vulnérabilité d'une nappe traduit la facilité avec laquelle elle peut être affecté par la pollution en provenance de la surface du sol.

2. Plusieurs paramètres interviennent donc dans le transfert vertical de la pollution à partir de la surface du sol, notamment :

- la recharge de la nappe (par les précipitations, les cours d'eau, l'infiltration des eaux d'irrigation, etc...).
- la nature et l'épaisseur du sol.
- les caractéristiques (lithologie, perméabilité, etc...) de la zone non saturée
- la profondeur de l'eau par rapport au sol.

3. En plus des raisons géologiques, d'autres critères naturel et anthropique interviennent telle que :

- l'accroissement démographique et la densité de populations.
- évaporation intense et le faible pluviomètre.
- les catastrophes naturelles telles que : les inondations et la sécheresse.
- accroissement industriel.
- accroissement agricole et touristique (tourab 2013).

III.10.5. Traitement des eaux souterraines :

La moitié des eaux souterraines que nous consommons n'a besoin d'aucun traitement (Myrand, 2008), mais certaines d'entre elles présentent toutefois, naturellement, des teneurs excessives en certains éléments (fer, manganèse, turbidité). D'autres dépourvues de protection naturelle, sont soumises à des pollutions ponctuelles (souvent accidentelles), diffuses (nitrates et produits phytosanitaires) ou microbiologiques (liées à certains aquifères sensibles tels que les milieux fissurés karstiques ou à des contaminations de proximité au niveau des installations de captage) et donc doivent subir un traitement spécifique avant mise en distribution (Jestin, 2006).

Le traitement de ces eaux souterraines comportera en générale les étapes suivantes (le nombre et le choix des étapes étant fonction de la qualité de l'eau) :

- Décantation : celle-ci peut être accélérée par l'addition d'un flocculant (sels de fer ou d'aluminium).
- Filtration sur lit de sable : cette opération étant parfois combinée à la première, ou plus récemment sur filtres en matériaux céramiques ou cellulosiques.
- Elimination des composés organiques ou minéraux indésirables ou en excès par passage sur charbon actif (adsorption des molécules organiques) ou sur résine échangeuse des ions (élimination des sels minéraux) (Jestin, 2006).
- Désinfection par traitement oxydant à l'ozone, au chlore, au bioxyde de chlore ou aux dichloramines, qui élimine les micro-organismes.
- Post-chloration, avant envoi dans le réseau, ou les réservoirs de façon à maintenir une teneur résiduelle en chlore libre actif de 0,1 mg.L⁻¹ environ (Festy et al., 2003).

III.11. Conclusion

Dans ce chapitre on a montré les différents paramètres et notions sur la qualité des eaux souterraines avec les normes de potabilités ainsi les différents types de pollutions en tenant compte de mode de traitement si nécessaire.

CHAPITRE IV

Analyses, interprétations et recommandations.

IV.1. Introduction :

Vu l'importance industrielle et économique du champ de Hassi R'Mel, l'eau joue un rôle-clé dans l'activité pétrolière et gazière à tous les stades de la production (puits d'huile & gaz, Centre de traitement) et exploitation (Modules & stations de compression) ainsi que pour la consommation domestique et agricole, devrait donc être soumise aux normes de potabilité.

Pour cela, SONATRACH faisait des contrôles périodiques des eaux souterraines, seule source d'eau dans la région.

On s'est fondé dans ce chapitre sur l'étude et l'interprétation des paramètres physico-chimiques des eaux de la nappe superficielle de Hassi R'Mel, (17 puits) de 10 ans (2011-2020) afin de voir la conformité aux normes algériennes, d'une part et de donner une idée sur la qualité de ces eaux, sa classification et aptitude à l'irrigation d'autre part.

L'ensemble des analyses ont été faites dans le cadre de campagnes réalisées par le laboratoire de CRD - SONATRACH (Boumerdès).

Les paramètres étudiés en question sont :

Les paramètres physiques : (Température, pH, Conductivité Electrique, Dureté).

Les paramètres chimiques : correspondant aux éléments majeurs (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , NO_3^-).

IV.2. Etude des paramètres physicochimiques :

IV.2. 1. Caractéristiques physiques :

IV.2. 1.1. La Température :

C'est un paramètre physique mesuré in situ. La température joue un rôle important dans l'augmentation de l'activité chimique (solubilité des sels et des gaz), l'activité bactérienne, la quantité d'oxygène dissous (plus la température est élevée, plus la quantité d'oxygène dissous est faible).

La température de l'eau est un paramètre de confort pour les usagers. Elle permet également de corriger les paramètres d'analyse dont les valeurs sont liées à la température (conductivité notamment). La température joue un rôle notable lorsque l'on fait des mélanges entre des eaux de composition différentes. (BENAMOUR.M, 2007)

La température des eaux de la nappe **varie entre 18°C et 22°C**. Et ça sur l'ensemble des puits étudiés ; donc ils sont conformes à la norme de potabilité algérienne qui est fixée à 25°C (JORADP 2011).

IV.2. 1.2. Le pH :

La mesure de ce paramètre, montre que ses valeurs varient à l'échelle de la région, mais sans écart notables .Elle varient de 7.08 enregistré dans le Puits (HRH147 Année 2020) et 8.30 mesuré dans le Puits (HRH105 Année 2016 et HRH107 Année 2018). La moyenne est en tre 7.51 et 7.90. Ceci est lié à la nature de roches présentes dans la région qui sont essentiellement constituées des roches sédimentaires à composante carbonatée importante. Le pH selon les normes algériennes est entre 6.5 & 9 ; Les valeurs des eaux de forages de notre région ne dépassent pas cette norme, alors elles sont conformes à la norme de potabilité algérienne (JORADP ,2011).

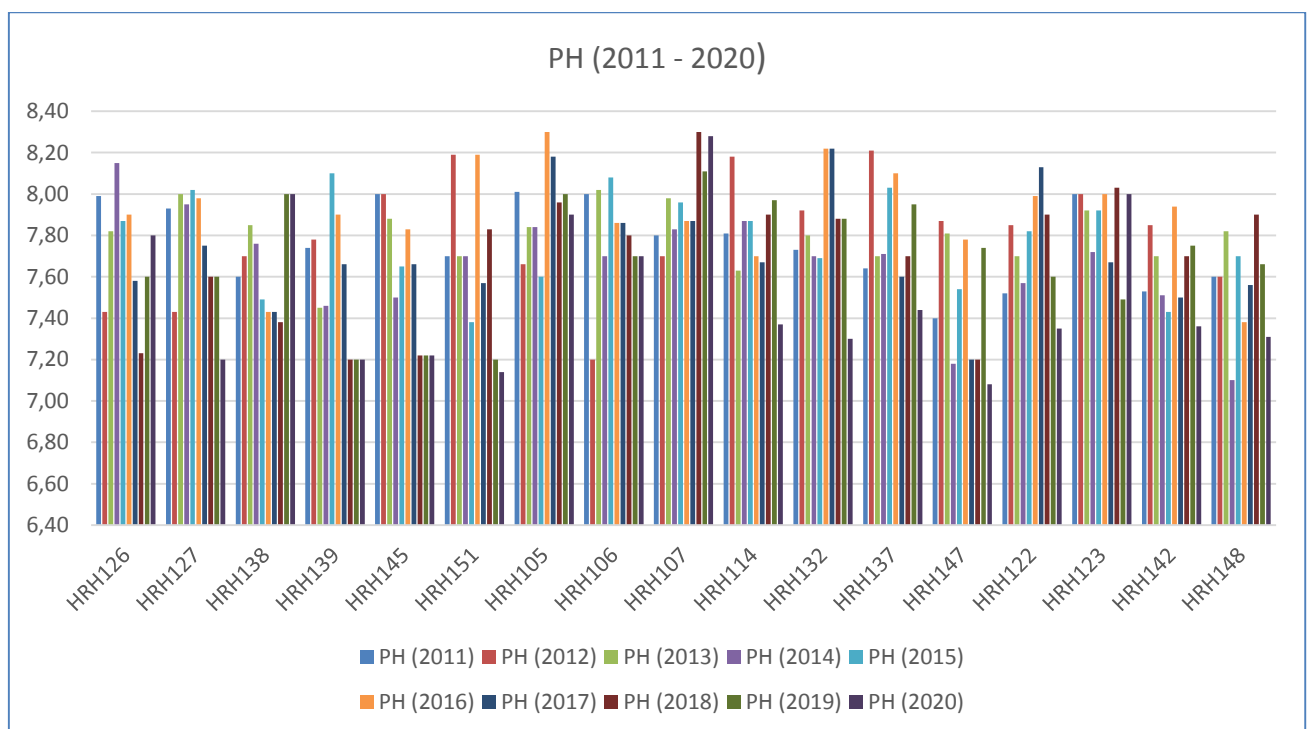


Figure IV.01: Variation du pH des eaux des différents forages (période : 2011- 2020)

IV.2. 1.3. Conductivité électrique (CE) :

Les valeurs de la conductivité pour les 17 forages varient entre 420.85 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (HRH148-2017) à 2075.03 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (HRH114 - 2015 & HRH147 - 2012) et une moyenne de 1355.25 $\mu\text{S}/\text{cm}$.Ces valeurs avec un degré de minéralisation varient entre moyenne à Excessive. Donc on peut dire que la qualité de ses eaux entre bonne et utilisable.

« Il existe une relation entre la teneur en sels dissous d'une eau et sa conductivité. Toutefois, la minéralisation déterminée par pesée de l'extrait sec n'est pas rigoureusement identique à celle calculée à partir de la conductivité. » (RODIER, 1996).

Pour l'ensemble des puits de la nappe superficielle de Hassi R'Mel, la conductivité présentent des valeurs qui ne dépassent pas la norme algérienne de potabilité fixée à 2800 $\mu\text{S}/\text{cm}$

La minéralisation de la nappe superficielle varie entre 0,32 g/l et 1.77 g/l, elle ne dépasse pas les 2 g/l dans la totalité du champ.

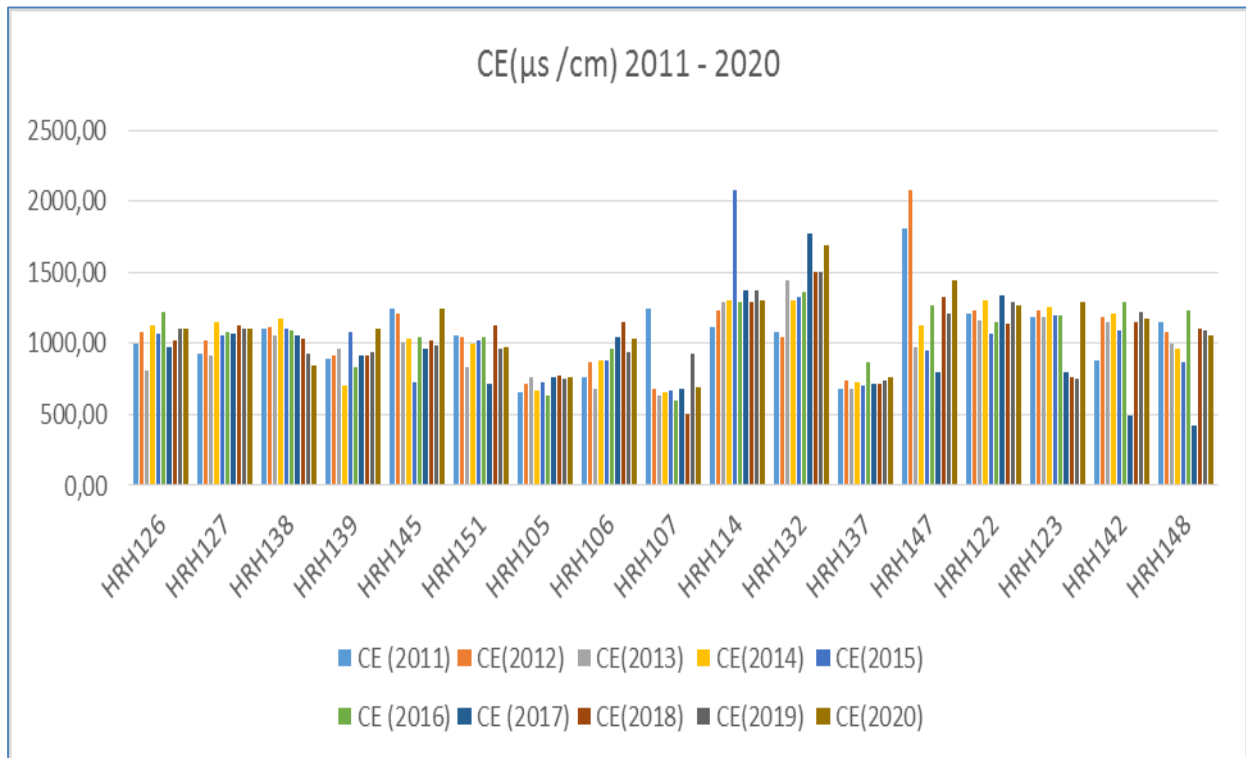


Figure IV.02: Variation de la conductivité des eaux des différents forages (période : 2011 – 2020)

IV.2. 1.4. La turbidité :

C'est un paramètre, qui varie en fonction des composés colloïdaux (argiles, débris de roche, micro-organismes,...) ou aux acides humiques (dégradation des végétaux) mais aussi pollutions qui troublent l'eau. Avec un appareil (turbidimètre) on mesure la résistance qu'elle oppose par l'eau au passage de la lumière pour lui donner une valeur. On mesure la turbidité par la méthode normalisée NTU (Nephelometric Turbidity Unit) par spectrométrie, c'est à dire mesure de l'absorption de la lumière par l'eau (CPEPESC 2004).

La turbidité des eaux **varie entre 0.3 NTU et 0.4 NTU**. Et ça sur l'ensemble des puits étudiés ; donc ils sont conformes à la norme de potabilité algérienne qui est fixée à 5 NTU (JORADP, 2011).

IV.2. 2. Caractéristiques chimiques :

IV.2. 2.1. Vérification des analyses chimiques :

Avant d'entamer l'étude des paramètres chimiques et de valider nos analyses, on a jugé nécessaire la détermination de la qualité des analyses par le calcul de la balance ionique (BI en %) qui permet de déterminer le pourcentage d'erreur.

La balance ionique doit être équilibrée en admettant une erreur acceptable de 5% à 10%. Une erreur sur la balance ionique peut provenir d'une erreur analytique ou d'une minéralisation particulière.

La balance ionique est le rapport de la différence entre Les teneurs des cations majeurs et les anions majeurs à la somme des même teneurs (BARBAROUX et al, 2011).

Se calcule comme suit :

$$BI = \frac{\sum \text{Cations} - \sum \text{Anions}}{\sum \text{Cations} + \sum \text{Anions}} \cdot 100$$

Les teneurs des actions et des anions sont exprimées en meq/l

- 2% < BI < 2% : Fiabilité des résultats d'analyses excellente.
- 5% < BI < 5% : Fiabilité des résultats d'analyses acceptable.
- 10% < BI <10% : Fiabilité des résultats d'analyses médiocre mais exploitable.
- BI < -10% ou BI > 10% : Mauvaise fiabilité des résultats d'analyses.

Sur l'ensemble des forages, les analyses présentent une fiabilité excellente, acceptable et parfois médiocre donc vont être validées sauf pour les 02 puits (HRH145 & HRH 147), en 2011 qui vont pas être considéré (Voir le tableau IV.1).

Tableau IV.1 : Résultats de calcul de la Balance Ionique(BI) pour les eaux des différents puits (période : 2011-2020)

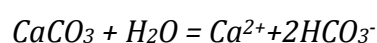
PUITS	BI (%) (2011)	BI (%) (2012)	BI (%) (2013)	BI (%) (2014)	BI (%) (2015)	BI (%) (2016)	BI (%) (2017)	BI (%) (2018)	BI (%) (2019)	BI (%) (2020)
HRH126	-0,48	-1,45	-2,93	-0,32	-2,48	-1,37	-2,18	-0,46	-3,47	-2,76
HRH127	-0,51	-0,41	-7,14	2,93	1,45	2,38	1,29	0,62	0,49	1,95
HRH138	1,95	2,30	9,32	0,11	4,45	-6,78	-2,14	8,57	6,96	1,01
HRH139	1,15	-3,35	-0,65	-1,15	2,18	-0,08	1,35	-0,81	1,96	1,95
HRH145	-16,32	-0,80	0,37	-2,16	-2,29	6,74	-1,93	-0,43	-3,81	1,94
HRH151	-1,07	1,80	3,26	0,97	-0,40	0,43	1,87	-0,57	0,25	1,73
HRH105	3,42	0,75	-3,75	2,06	0,28	-3,56	3,63	-1,91	1,61	-0,64

HRH106	-1,94	-1,14	-1,47	-0,83	0,77	6,93	-2,24	-2,57	-0,03	-0,84
HRH107	-4,77	-1,68	-1,30	-4,48	3,57	3,90	-0,28	-3,05	0,42	-2,20
HRH114	-1,02	0,97	1,12	-1,33	-2,77	2,53	1,63	1,96	1,76	1,01
HRH132	-1,30	-1,48	-3,63	0,43	2,51	-0,14	1,16	2,26	-5,95	-1,35
HRH137	0,32	-5,18	2,17	-0,16	2,49	0,28	-2,81	-1,40	-1,76	-0,73
HRH147	16,46	-4,14	1,09	-0,65	2,17	5,32	3,39	1,90	-1,38	-4,76
HRH122	2,80	-0,42	0,62	0,59	-2,76	-1,30	-2,09	-2,69	-3,72	0,85
HRH123	1,22	-3,99	2,90	2,06	1,93	2,19	0,53	3,31	-2,10	1,22
HRH142	2,56	3,36	1,76	1,33	-2,13	6,70	-1,88	1,89	0,55	0,44
HRH148	2,48	3,62	2,81	-1,21	-0,97	-3,39	-1,99	-2,67	-0,96	0,00

IV.2. 2.2. Les Cations :

IV.2. 2.2.1. Le Calcium :

La présence des ions Ca^{2+} dans l'eau est liée principalement à deux origines naturelles : soit à la dissolution des formations carbonatées ($CaCO_3$) (surtout de la mise en solution de la calcite, l'aragonite, la dolomite, l'anhydrite et le gypse), soit la dissolution des formations gypseuses ($CaSO_4$), (Dalila, 2009).



“Les eaux qui dépassent 200 mg/l de calcium, présentent des inconvénients pour les usages domestiques et pour l'alimentation des chaudières » (RODIER, 1996).

La nappe superficielle est marquée par des fortes concentrations de calcium dans la majeure partie du champ d'étude, due à la nature lithologique de la région mais les teneurs en calcium des eaux analysées des 17 forages étudiés sont toutes inférieures à la concentration maximale admissible qui est 200 mg/l édictée par les normes Algérienne de l'eau potable (JORADP 2011), (Voir la figure IV.03 suivante).

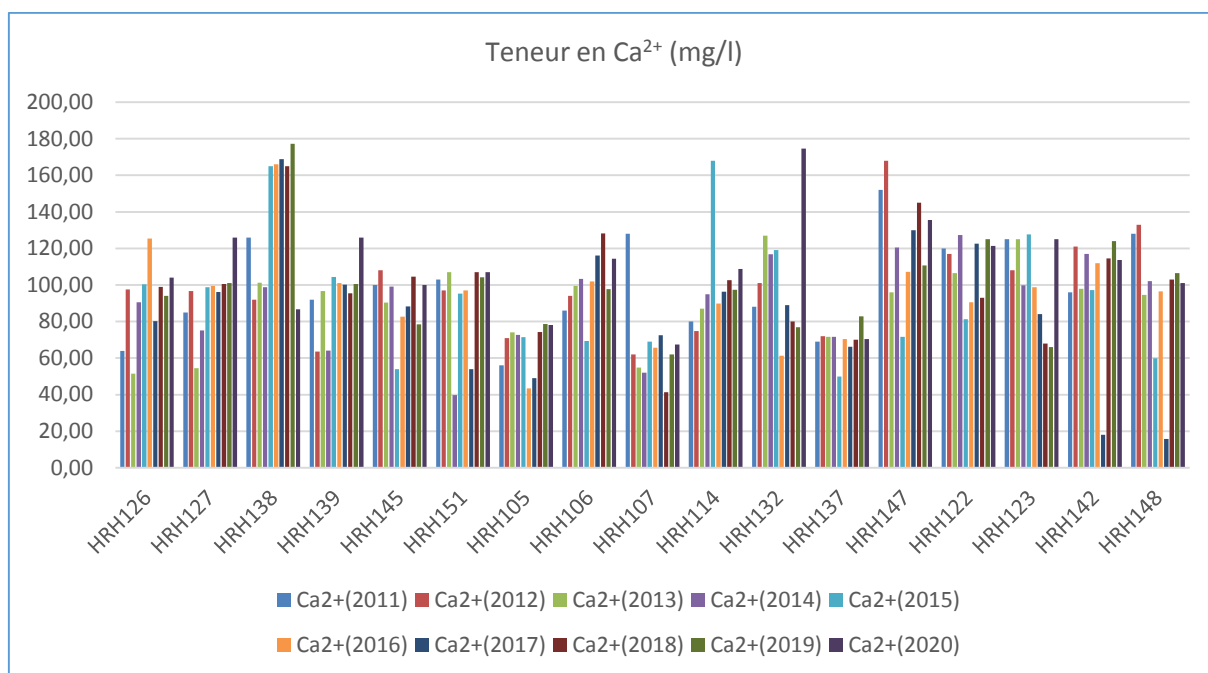
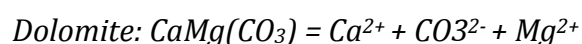


Figure IV.03 : Variation de la teneur en calcium dans les eaux des différents forages (période : 2011 – 2020)

IV.2. 2.2.2- Le Magnésium :

Ses origines sont comparables à celle du calcium, car il provient de la dissolution des formations carbonatées à fortes teneurs en magnésium (magnésite et dolomite ; la dissolution des dolomies et des calcaires dolomitiques, leur contact avec de l'eau en présence du gaz carbonique favorise la libération du magnésium), (Dalila, 2009). Et la dissolution du $MgSO_4$ des terrains gypseux du Trias.



«La présence de cette substance, en quantité excessive dans l'eau de boisson, donne un goût désagréable» (RODIER, 1996).

Les teneurs en magnésium des eaux analysées de la région de Hassi R'mel sont toutes inférieures à la concentration maximale admissible qui est de 150 mg/l édictée par les normes algérienne pour l'eau naturelle potable. On peut donc conclure que ces eaux sont conformes (JORADP, 2011). (Voir la figure IV.04).

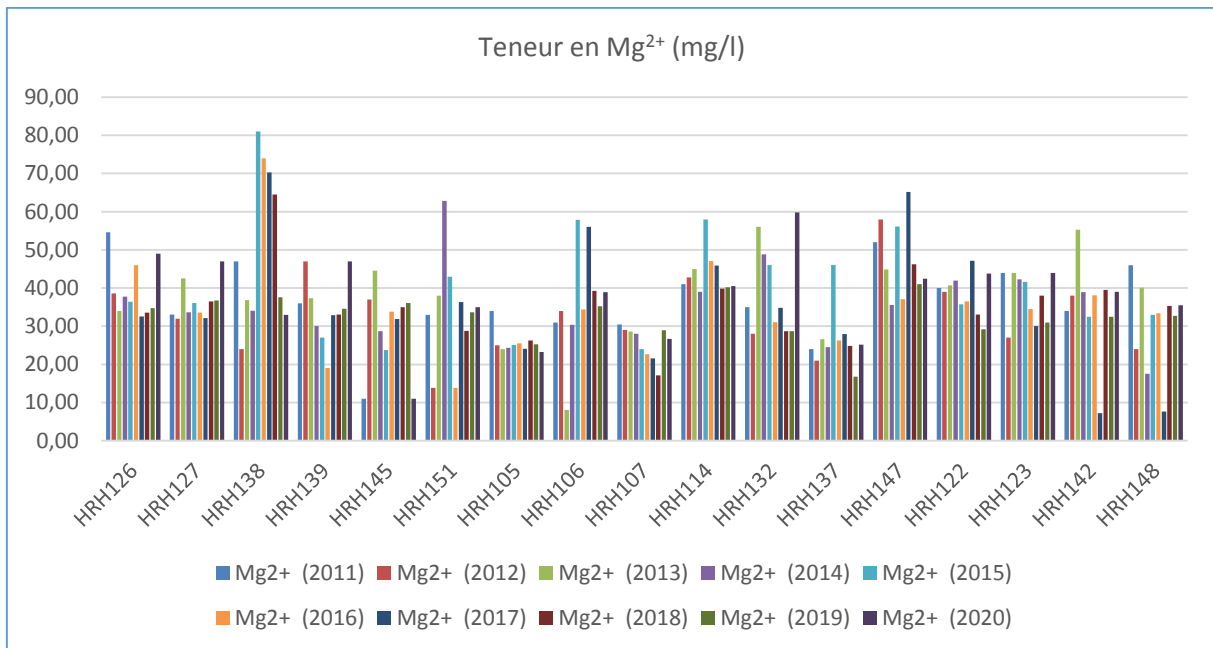
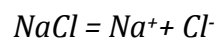


Figure IV.04 : Variation de la teneur en magnésium dans les eaux des différents forages (période : 2011-2020)

IV.2. 2.2.3- Le Sodium :

Les eaux pauvres en sodium sont conseillées en cas d’hypertension ou de rétention d’eau. L’origine du sodium est liée principalement à la dissolution des minéraux salifères. (Dalila, 2009).

L’origine du sodium dans les eaux est liée principalement au lessivage des dépôts évaporitiques et ceci par des phénomènes de lessivage, d’évaporation et par échange de base. La dissolution des minéraux salifères se fait selon la relation suivante :



Les teneurs en sodium des eaux de la nappe superficielle ne dépassent pas la norme Algérienne fixée à 200 mg/l donc sont conformes à la norme de potabilité algérienne (JORADP, 2011).

Les eaux étudiées sont considérées non sodiques ($Na < 200 \text{ mg/l}$) selon (CEE, 2009). (Voir la figure IV.05).

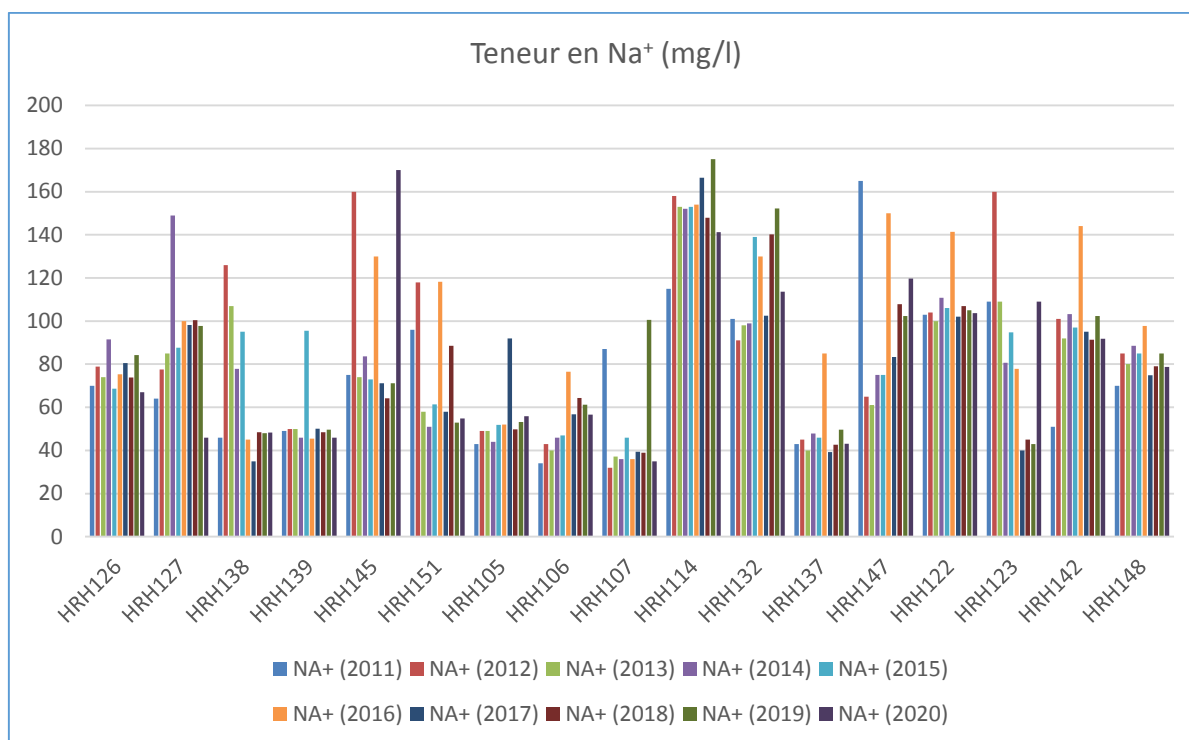


Figure IV.05: Variation de la teneur en sodium dans les eaux des différents forages (période : 2011-2020).

IV.2. 2.2.4. Le Potassium :

La concentration de potassium est assez faible dans la plupart des eaux minérales. Un excès de potassium pourrait avoir des effets néfastes sur le système neuromusculaire et provoque des contractions cardiaque. Une eau riche en potassium est déconseillée en cas d'insuffisance rénale, (ART).

Le Potassium provient de l'altération des formations silicatées (Gneiss, Schiste), des argiles potassiques et de la dissolution des engrais chimiques. (Dalila, 2009).

Les teneurs en potassium dans la région d'étude varient entre 2.8 mg/l (Puits HRH 139 – 2019) et 17 mg/l (Puits HRH 147- 2012).

En générale ces faibles valeurs sont dues à la lithologie (diminution de formations argileuses).

Les teneurs en potassium des eaux de la nappe HRM ne dépassent pas la norme Algérienne fixée à 12 mg/l ((sauf quelques valeurs exceptionnelles ;HR147 en 2012 & HR142 en 2016). donc sont conformes à la norme de potabilité algérienne (JORADP, 2011). (Voir la figure IV.06).

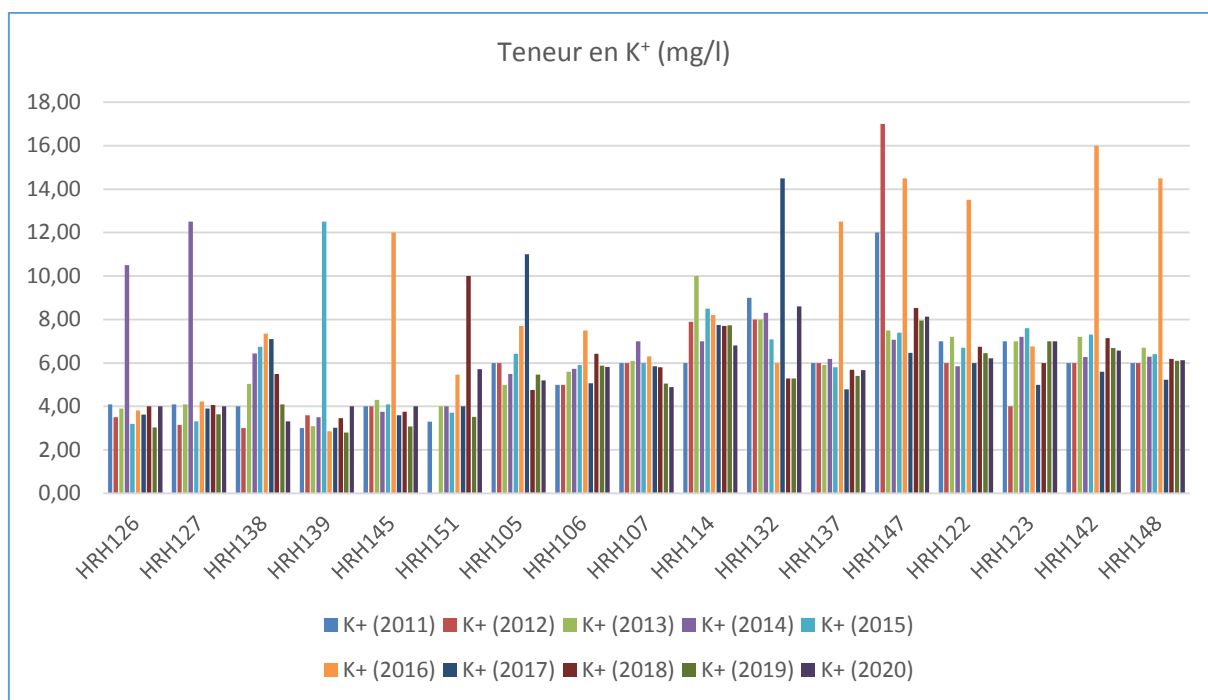


Figure IV.06: Variation de la teneur en potassium dans les eaux des différents forages (période : 2011-2020).

IV.2. 2.3. Les Anions :

IV.2. 2.3.1. Les Bicarbonates :

Les carbonates et les bicarbonates donnent un goût agréable à l'eau et ne présentent aucun risque pour la santé humaine. Ils facilitent la digestion et calment les brûleurs d'estomac grâce à la propriété anti acide du bicarbonate de sodium.

La dissolution des minéraux carbonatés et l'action du CO₂ des eaux météoriques (eaux de pluie) et du sol sont, d'une manière générale, à l'origine des Bicarbonates (Parizot M., 2008).

Pour l'ensemble des forages les valeurs bicarbonates varient entre 59.60 mg/l (HRH148 - 2017) et 382.17 mg/l (HRH 132 - 2020).

« Quelles que soient les teneurs en bicarbonates, la potabilité n'est pas affectée. » (RODIER, 1996).

Ces eaux sont considérées non bicarbonatées ($\text{HCO}_3^- < 600 \text{ mg/l}$) selon (CEE, 2009). (Voir la figure IV.07).

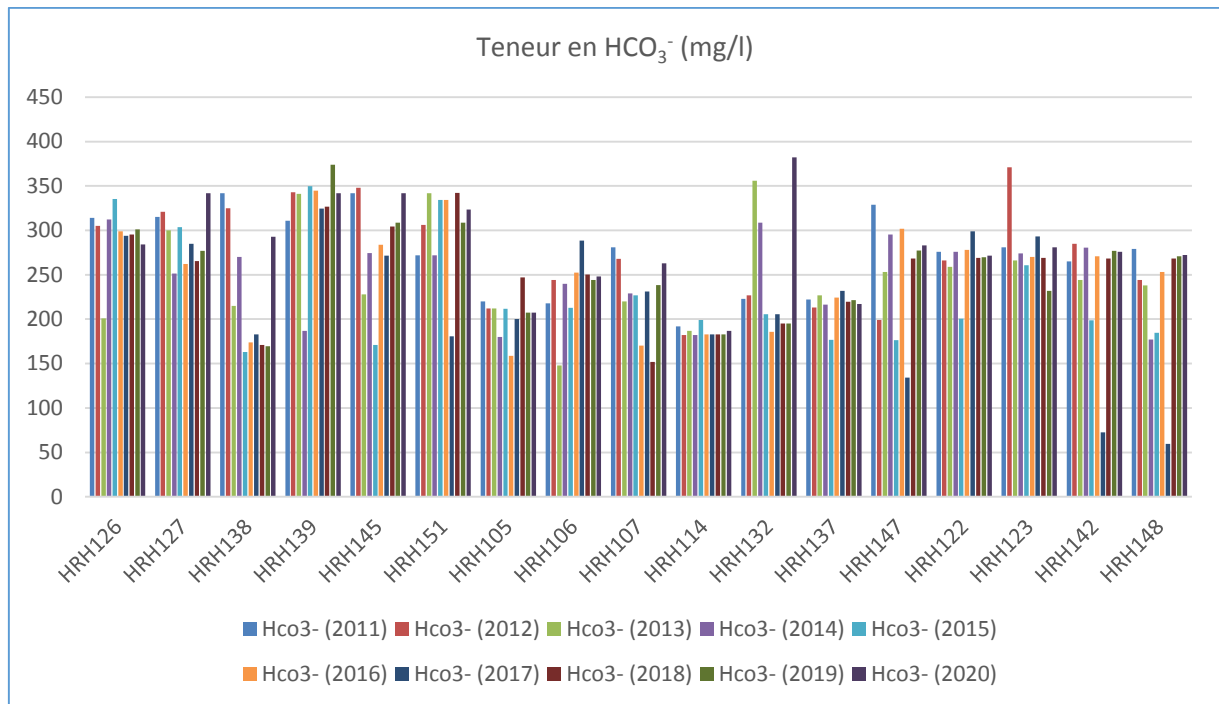


Figure IV.07: Variation de la teneur en bicarbonate dans les eaux des différents forages (période : 2011-2020).

IV.2. 2.3.2. Les Chlorures :

Le chlorure a la même origine que le sodium, la dissolution des minéraux salifères. (Dalila, 2009).



Les eaux de pluie peuvent apporter des chlorures qui s'accumulent en surface pour être entraînés dans les aquifères. (RODIER, 1996).

L'analyse des eaux prélevées a révélé des quantités de chlorures varient entre 42.64mg/l (HRH 138 - 2018) et 309.18 mg/l (HRH 132 - 2017).

Les teneurs en chlorures des eaux ne dépassent pas la norme Algérienne fixée à **500 mg/l** donc sont conformes à la norme de potabilité algérienne (JORADP 2011).

Les fortes concentrations qui sont observées au centre sont liées probablement à la dissolution des sels naturels par lessivage des terrains salifères.

Les eaux des forages sont considérées non chlorurées ($\text{Cl} < 200 \text{ mg/l}$) selon (CEE, 2009) sauf ceux des puits (HRH132-HRH147) ; (Voir la figure IV.08)

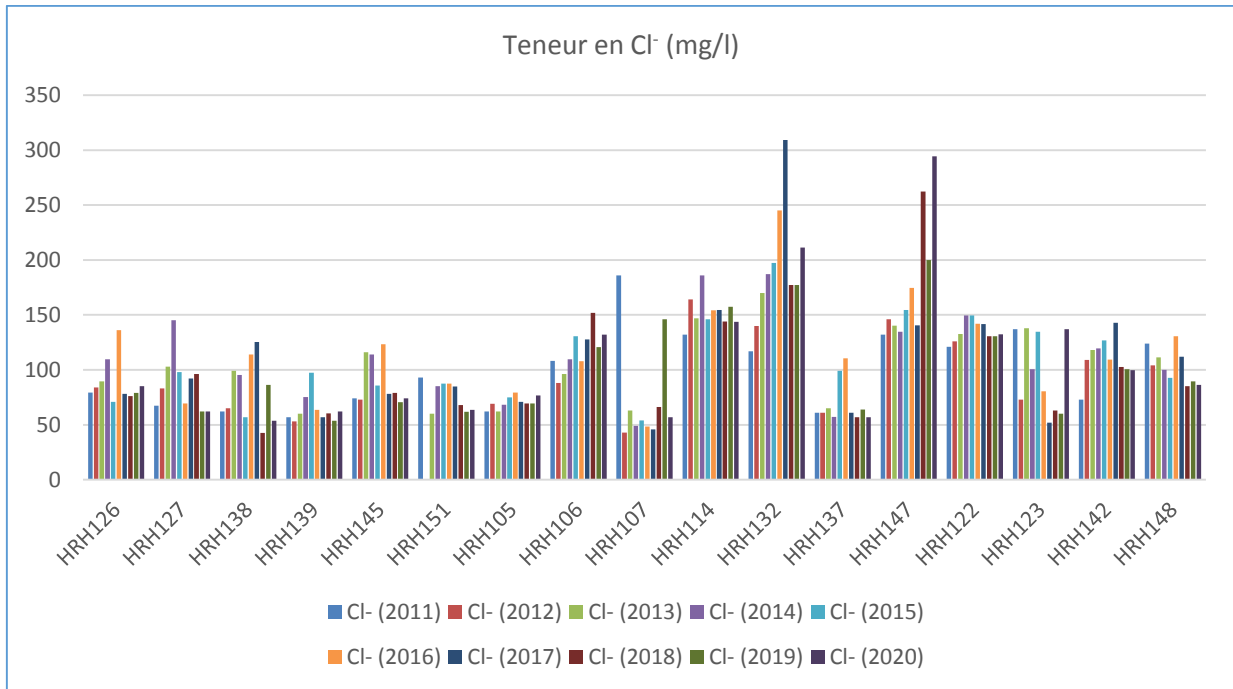


Figure IV.08: Variation de la teneur en chlorure dans les eaux des Forages (période : 2011-2020).

IV.2. 2.3.3. Les Sulfates :

La présence des ions sulfatés dans l'eau est liée à la dissolution des formations gypseuses (Christian et al, 2008).

Peut avoir plusieurs origines :

- L'oxydation des minéraux riches en soufre : les teneurs mesurées sont alors de quelques mg/l à quelques dizaines de mg/l.
- Le lessivage de formations évaporitiques : les teneurs sont alors de l'ordre de la centaine ou du millier de mg/l. (Parizot M., 2008)
- Rejets d'eaux usées et industrielles contenant de l'acide sulfurique (H₂SO₄).et L'utilisation d'engrais chimiques.

Les différentes teneurs en sulfate sont conformes à la norme de potabilité algérienne (400mg/l) sauf pour le Forage (HRH138 de 2015 à 2018),. (Voir la figure IV.09).

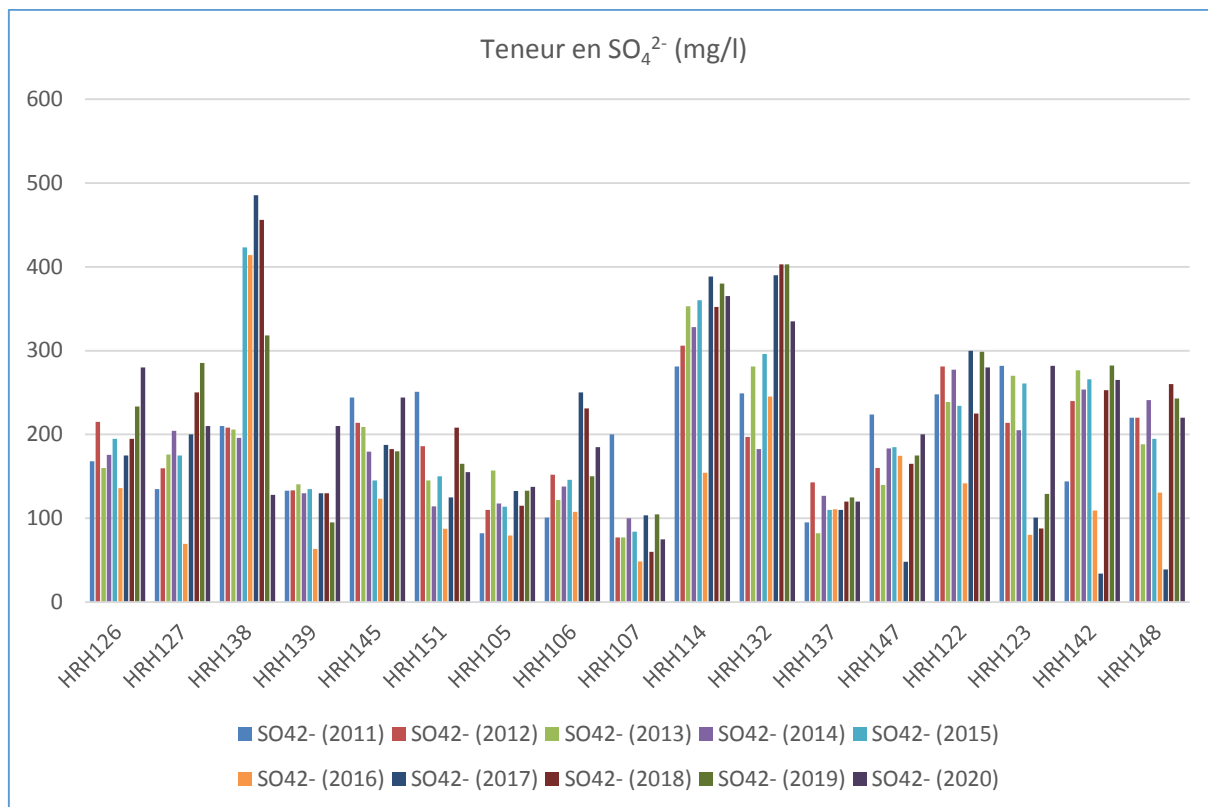


Figure IV.09 : Variation de la teneur en sulfate dans les eaux des Forages (période : 2011-2020).

IV.2. 2.3.4. Les Nitrates :

Les nitrates sont indésirable en grande quantité car une fois ingérer, il se transforme en nitrite et peuvent être à l'origine de problème toxicologique.

Ils représentent la forme la plus oxygénée de l'azote, c'est une forme très soluble, sa présence dans les eaux souterraines est liée à l'utilisation intensive des engrais chimiques utilisé en agriculture et au rejet des eaux usées (Dalila, 2009).

D'après la réglementation algérienne, il est recommandé pour le cas des nitrates, une valeur maximale admissible de 50mg/l dans une eau destinée à la consommation (JORADP, 2011).

Pour tous les Forages on note une faible teneur en nitrates (0.9 mg/l – HRH142 en 2020 & 15.40 mg/l HRH122 en 2014) qui est inférieur à la valeur maximale admissible. (Voir la figure IV.10).

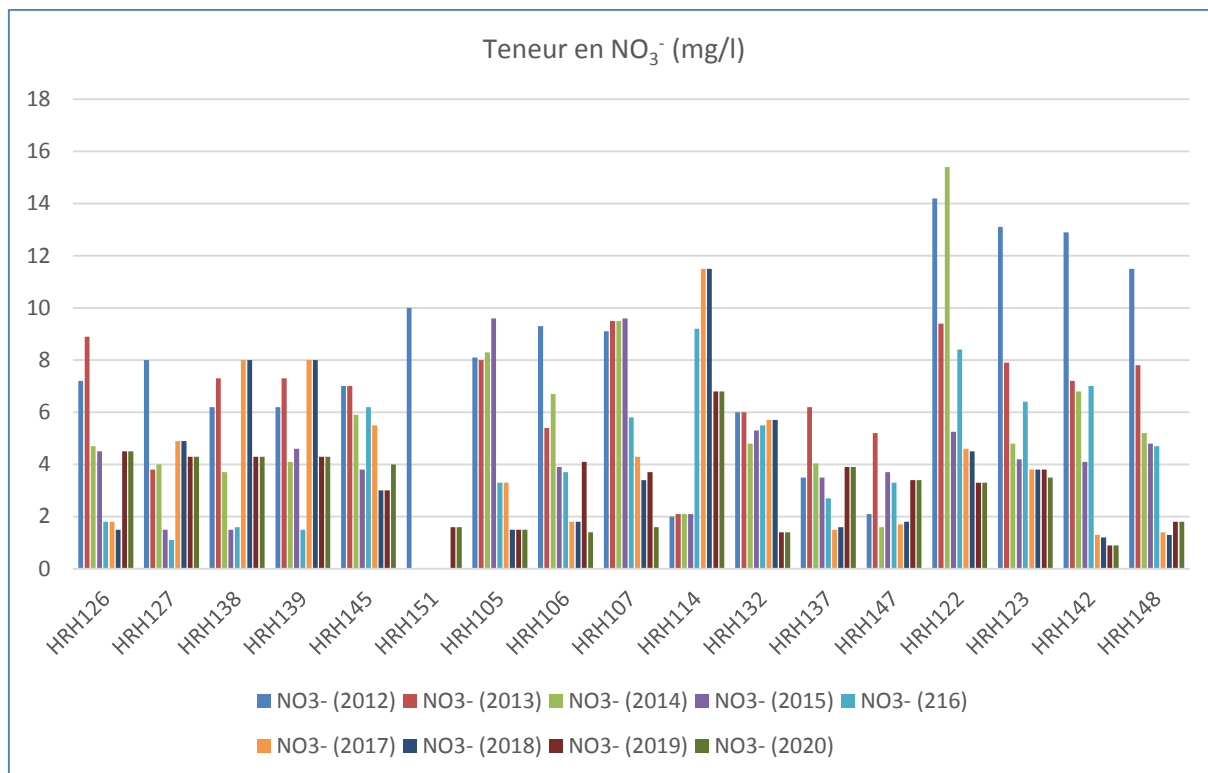


Figure IV.10: Variation de la teneur en nitrate dans les eaux des Forages (période : 2011-2020).

IV.3. Les Titres de l'eau :

IV.3. 1. Le titre hydrométrique (TH) ou la dureté:

La dureté d'une eau est due principalement à la présence de calcium et de magnésium. On l'exprime en général en degré français (°F).

Selon les normes algériennes les eaux de bonne qualité sont les eaux qui ont une dureté entre 20°F et 50°F.

- 75% à 95% des eaux des forages de dureté entre 20°F et 50°F.

Les analyses des échantillons montrent que les eaux de la région de Hassi R'mel (95% des puits) varient de qualité de assez douce à dure ; voir tableau IV-02:

- 20% à 35% des Forages sont de qualité assez douce.
- 55% à 75% des Forages sont de qualité dure.
- 0% à 05% des Forages sont de qualité très dure.

Les valeurs de la dureté pour les 17 forages varient entre 7.08°F (HRH148 – 2017) et 75°F (HRH138 – 2015). (Voir la figure 11 suivante).

Fortes valeurs du TH sont liées à l'augmentation de la concentration du magnésium et du calcium correspondant au lessivage des terrains calcaire-dolomitiques.

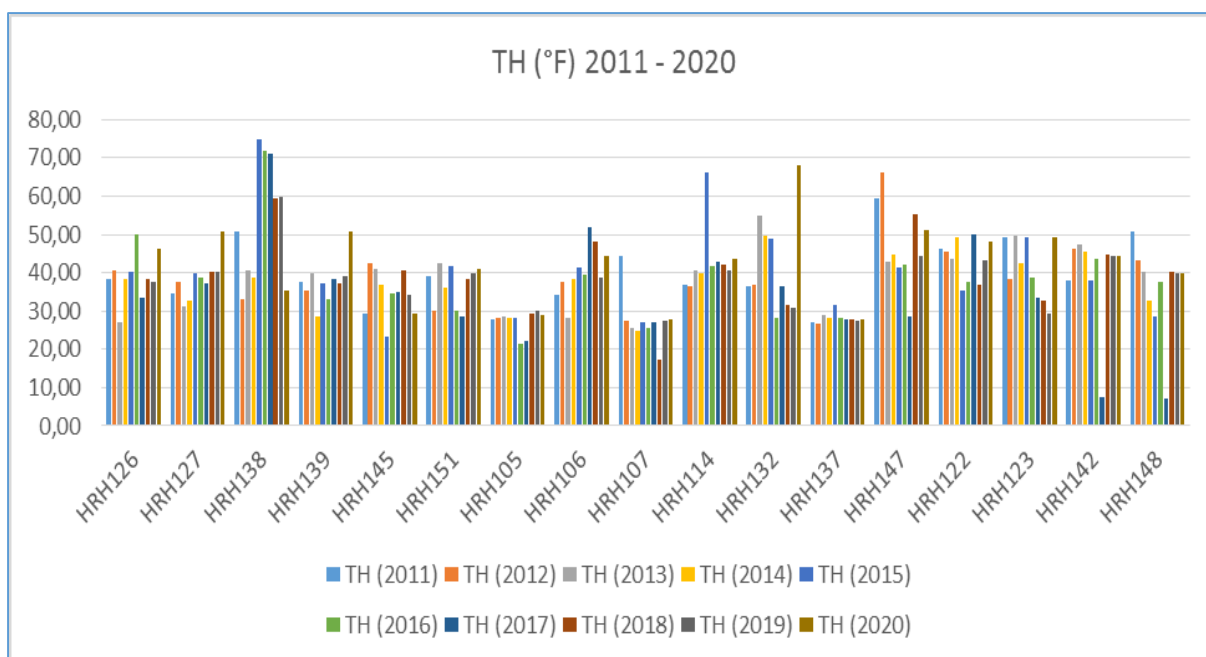


Figure IV.11 : Variation de la dureté des eaux des forages étudiés (période : 2011 - 2020)

Tableau IV.02 : Qualité de l'eau en fonction du TH des eaux étudiées

TH (°F)		0 - 7	7 - 22	22 - 32	32 - 54	> 54
Dureté de l'eau		Douce	Modérément douce	Assez douce	Dure	Très dure
Année	2011	0%	0%	20%	75%	5%
	2012	0%	0%	25%	70%	5%
	2013	0%	0%	35%	60%	5%
	2014	0%	0%	25%	75%	0%
	2015	0%	0%	35%	60%	5%
	2016	0%	5%	25%	65%	5%
	2017	0%	10%	30%	55%	5%
	2018	0%	5%	25%	65%	5%
	2019	0%	0%	30%	65%	5%
	2020	0%	0%	25%	70%	5%

IV.3. 2. Titre alcalimétrique (Alcalinité) :

L'alcalinité d'une eau correspond à la présence des bicarbonates, carbonates et les hydroxydes, elle est mesurée soit par le titre alcalimétrique (TA) ou par le titre alcalimétrique complet (TAC). Le TA et le TAC traduisent l'alcalinité d'une eau. La connaissance de ces valeurs est essentielle pour l'étude de l'agressivité d'une eau.

IV.3. 2.1. Titre alcalimétrique simple (Titre TA) :

$$TA = [OH^-] + [CO_3^{2-}] ; \quad \text{en } (^\circ F) \text{ ou } (\text{mg/l CaCO}_3)$$

$[CO_3^{2-}]$: concentration en carbonate ;

$[OH^-]$: concentration en hydroxyde

Les résultats de l'alcalinité simple **sont nuls** parce que les eaux naturelles ne contiennent pas de carbonate ou d'hydroxyde.

IV.3. 2.2. Titre alcalimétrique complet (Titre TAC) :

$$TAC = [CO_3^{2-}] + [OH^-] + [HCO_3^-] ; \quad \text{en } (^\circ F) \text{ ou } (\text{mg/l CaCO}_3)$$

$[CO_3^{2-}]$: concentration en carbonate.

$[OH^-]$: concentration en hydroxyde.

$[HCO_3^-]$: concentration en bicarbonate.

Le bicarbonate, le carbonate et l'hydroxyde forment *l'alcalinité complète ou totale* de l'eau.

Il a une importance fondamentale dans la connaissance de la capacité d'entartrage de l'eau et dans le traitement des eaux de chaudières vapeur.

Dans notre cas $TAC = [HCO_3^-]$ car les concentrations de $[OH^-]$ et $[CO_3^{2-}]$ sont nulles.

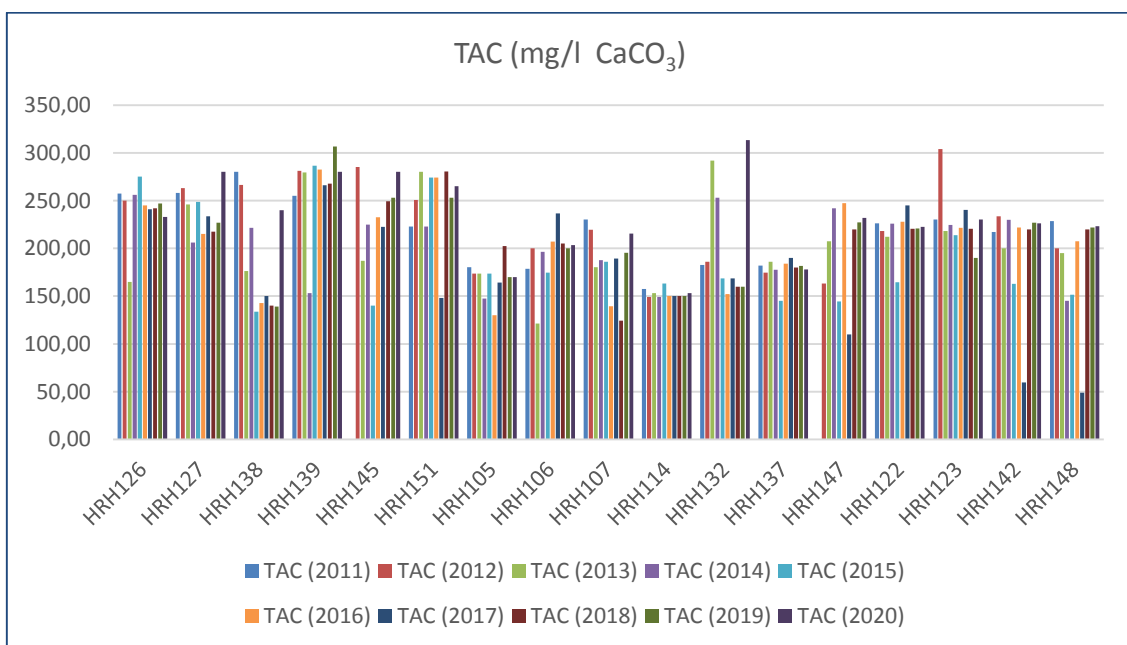


Figure IV.12: Titre alcalimétrique complet (mg/l CaCO₃) des eaux étudiées (période : 2011-2020).

Les valeurs calculées de l'alcalinité des eaux la nappe de la région de Hassi R'mel varient entre la valeur minimale 4.89 °F (48,9 mg/l CaCO₃) qui est enregistrée au forage HRH 148 (2017) et la valeur maximale 31.33 °F (313,3 mg/l CaCO₃) enregistrée au forage HR132 (2020), selon la norme Algérienne des eaux potables qui sont à l'ordre de 500 mg/l CaCO₃ les valeurs sont conformes

On constate que dans tous les forages, la dureté (TH) est supérieure à l'alcalinité (TAC) alors on conclut que les eaux étudiées ont une *dureté carbonatée*.

IV.3. 3. Dureté permanente PH :

La dureté permanente, qui persiste après l'ébullition, est donc la dureté non carbonatée : cela signifie qu'elle ne prend pas en compte les carbonates et bicarbonates de calcium et de magnésium ; elle correspond notamment aux sulfates de calcium et de magnésium.

$$PH = TH - TAC$$

(À condition que l'eau ne renferme pas NaHCO₃).

PH : Dureté permanente.

TH : Titre hydrotimétrique.

TAC : Titre d'alcalimétrie complet.

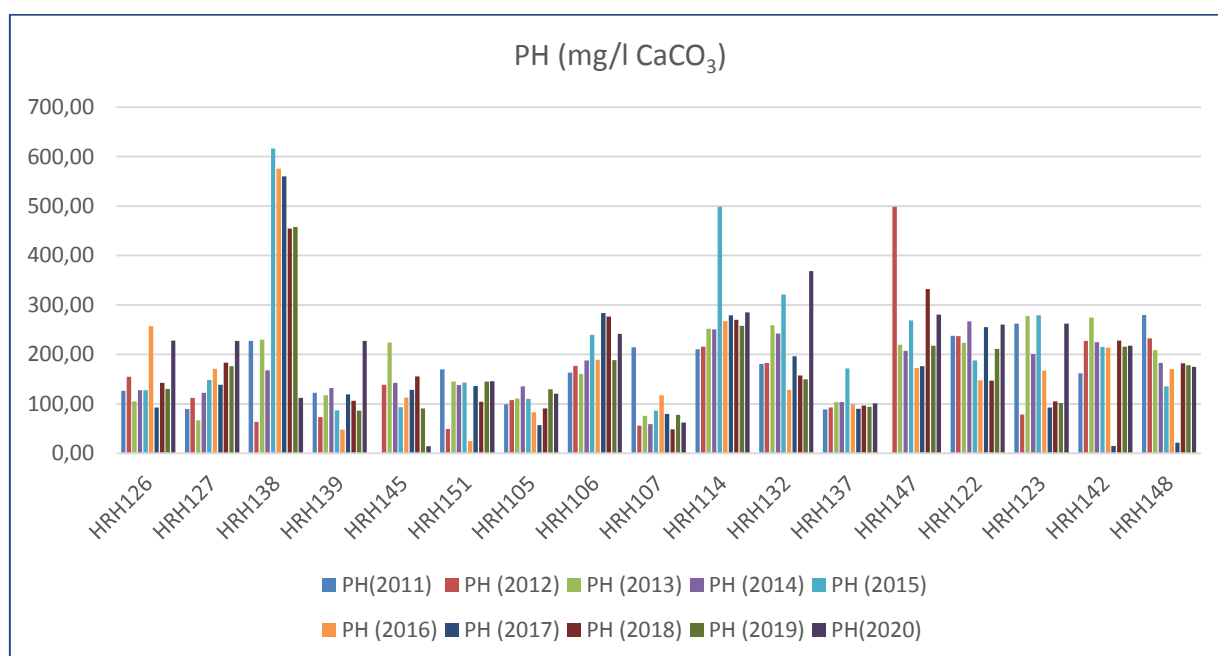


Figure IV.13: Dureté Permanente (mg/l CaCO₃) des eaux étudiées (période : 2011-2020)

Les valeurs calculées de la dureté permanente des eaux la nappe de la région de Hassi R'mel varient entre la valeur minimale 1.43 °F (14,3 mg/l CaCO₃) qui est enregistrée au

forage HRH 145 (2020) et la valeur maximale 61.64 °F (616,4 mg/l CaCO₃) enregistrée au forage HR138 (2015).

IV.3. 4. Dureté temporaire KH (dureté alcaline, dureté carbonatée) :

La dureté temporaire, qui disparaît au moment de l'ébullition, appelée aussi dureté carbonatée (KH), ou encore TAC pour Titre Alcalimétrique Complet, correspond uniquement aux carbonates et bicarbonates de calcium et de magnésium ; elle ne prend pas en compte les sulfates de calcium et de magnésium.

$$KH = PH - TH$$

TAC ≤ TH: Dureté temporaire KH = TAC.

TAC > TH : Dureté permanente PH = 0, Dureté temporaire KH = TH.

$$TH = PH + KH$$

On constate dans tous les forages TAC < TH, c'est-à-dire KH= TAC alors on conclut les eaux ont une *dureté temporaire*.

IV.3. 5. Titre en sels d'acides forts SAF :

La dénomination SAF vient donc de Sels d'Acides Forts, car les anions cités sont présents dans les trois acides forts suivants : acide sulfurique, acide chlorhydrique, acide nitrique.

$$SAF = [Cl^-] + [NO_3^-] + [SO_4^{2-}]$$

SAF : Titre en sels d'acides forts.

[Cl⁻] : concentration en chlorure.

[NO₃⁻] : concentration en nitrate.

[SO₄²⁻] : concentration en sulfate.

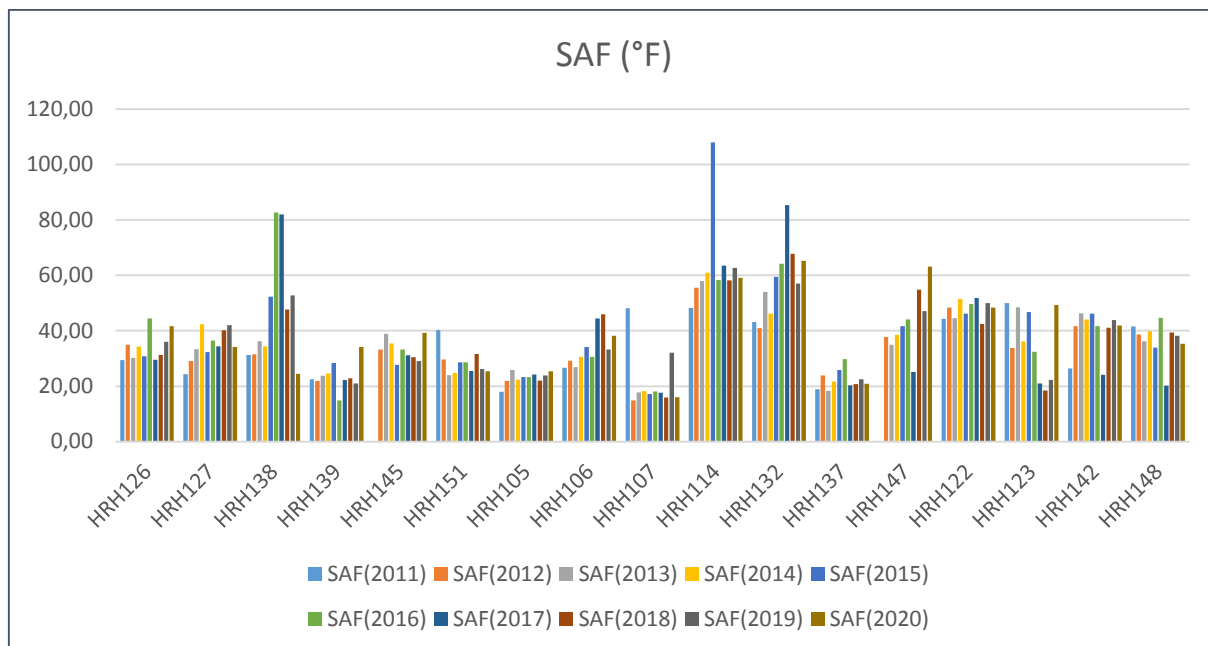


Figure IV.14: Titre en sels d'acides forts des eaux étudiées (période : 2011-2020)

Les valeurs calculées de SAF des eaux la nappe de la région de Hassi R'mel varient entre la valeur minimale 14,93 °F (149,3 mg/l CaCO_3) qui est enregistrée au forage HRH 139 (2016) et la valeur maximale 107.93 °F (1079,3 mg/l CaCO_3) enregistrée au forage HR114 (2015).

IV.3. 6. Salinité totale cationique STC :

La STC permet de définir l'échange sur une résine cationique forte en cycle sodium ou hydrogène (régénération à l'acide).

$$STC = [H^+] + [Ca^{2+}] + [Mg^{2+}] + [Na^+] + [K^+]$$

[H⁺] : est négligeable pour les eaux naturelles ; donc :

$$STC = [Ca^{2+}] + [Mg^{2+}] + [Na^+] + [K^+]$$

IV.3. 7. Salinité anionique SA :

C'est l'ensemble de titre bicarbonate et concentrations chlorure, nitrate, et sulfate, elle permet de définir l'échange sur une résine anionique forte en cycle chlorures.

$$SA = [HCO_3^-] + [Cl^-] + [NO_3^-] + [SO_4^{2-}]$$

$$SA = TAC + SAF = STC$$

IV.4. Activité Ionique :

Une activité ionique correspond à un type de grandeur rendant compte des phénomènes d'interactions entre ions en solution qui augmentent lorsque la concentration augmente. Elle correspond à la notion de concentration efficace d'un ion.

Pour calculer la force ionique nous utilisons la formule ci-dessous :

$$I(\text{mol/l}) = 0,5\sum C_i.Z_i$$

Avec :

C_i (mol/l) : concentration de l'ion i .

Z_i : charge de l'ion i

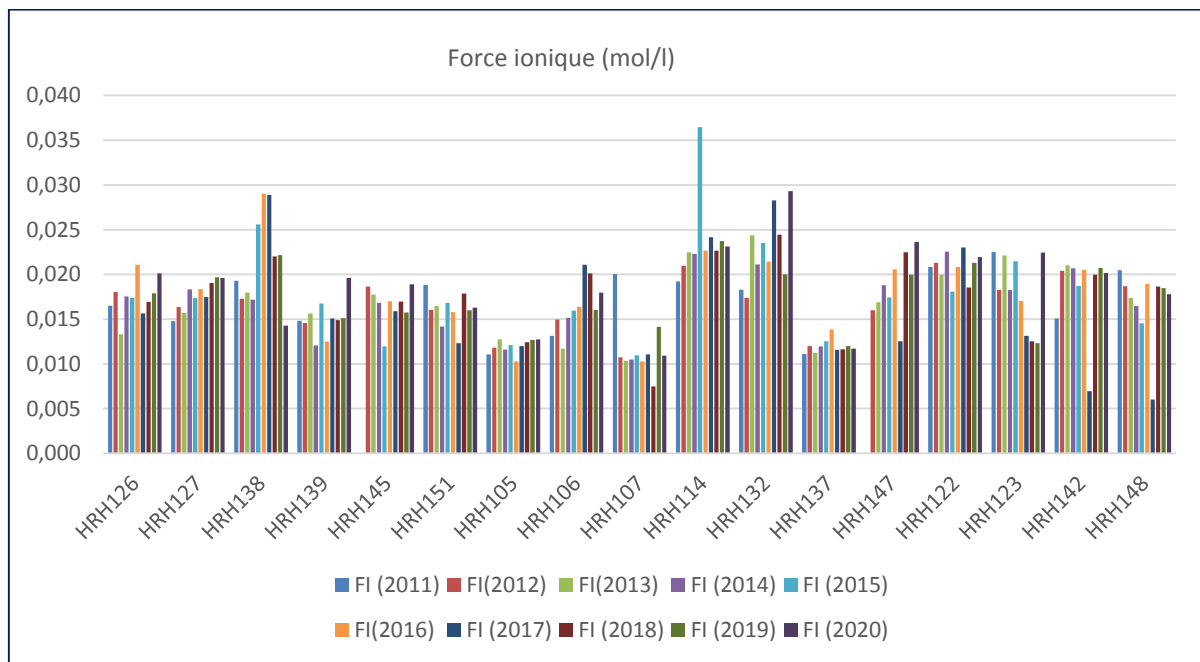


Figure IV-15: Force ionique des eaux étudiées (période (2011-2020))

Les valeurs calculées de la force ionique des eaux la nappe de la région de Hassi R'mel varient entre la valeur minimale 0.006 mol/l enregistrée au forage HRH 148 (2017) et la valeur maximale 0.036mol/l enregistrée au forage HR114 (2015), Conforme à la norme des eaux souterraines potables Fi entre 0.001 mol/l et 0.02mol/l.

IV.5. Etude de l'équilibre carbonique de l'eau (indices de saturation) :

IV.5.1. Indice de LANGELIER :

La méthode la plus simple pour le calcul de l'agressivité est la méthode de LANGELIER. Cet auteur a établi un indice **IL**, appelé indice de saturation ou indice de LANGELIER, il définit comme étant la différence entre le pH de l'eau considérée et son pHs calculé :

$$IL = pH - pHs$$

LANGELIER propose une formule simple pour déterminer le pH d'équilibre (pHs):

$$pHs = pk2 - pKs - \log [Ca^{2+}] - \log [HCO_3^-]$$

Dans cette formule pK2 et pKs dépendent de la température de l'eau.

Tableau IV-03 : Variation des constantes thermodynamiques (pk2 & pks) en fonction de la température

Température (°c)	pk2	pks	Température (°c)	pk2	pks
0	10.63	8.02	40	10.22	8.51
10	10.49	8.15	50	10.17	8.62
18	10.40	8.26	60	10.14	8.74
20	10.38	8.28	70	10.12	8.86
25	10.33	8.34	80	10.12	8.97
30	10.29	8.39			

Tableau IV- 04 : Classification des eaux selon LANGELIER

IL < 0 , pH < pHs	IL = 0 , pH = pHs	IL > 0 , pH > pHs
Eau est agressive, très acide sous saturé en CaCO3 et dissous le calcaire sous l'action du CO2 agressif	Eau à l'équilibre	Eau incrustante ou entartrante, tend à déposer le CaCO3 formant une couche aux parois des tuyauteries

Tableau IV-05 : Variation de l'indice de LANGELIER IL des eaux étudiées (période : 2011-2020).

Puits	IL (2011)	IL (2012)	IL (2013)	IL (2014)	IL (2015)	IL (2016)	IL (2017)	IL (2018)	IL (2019)	IL (2020)
HRH126	0,80	0,40	0,36	1,00	0,90	0,86	0,37	0,12	0,55	0,66
HRH127	0,87	0,43	0,72	0,63	1,00	0,80	0,62	0,45	0,53	0,25
HRH138	0,72	0,68	0,68	0,62	0,58	0,27	0,27	0,24	0,95	0,84
HRH139	0,71	0,64	0,48	0,01	1,17	0,91	0,61	0,14	0,29	0,26
HRH145		1,07	0,69	0,37	0,15	0,63	0,47	0,14	0,11	0,15
HRH151	0,64	1,17	0,77	0,17	0,39	1,12	0,03	0,82	0,22	0,12
HRH105	0,64	0,38	0,57	0,43	0,32	0,62	0,64	0,67	0,74	0,55
HRH106	0,80	0,08	0,73	0,52	0,76	0,69	0,79	0,73	0,59	0,59
HRH107	0,84	0,47	0,61	0,38	0,70	0,40	0,55	0,58	0,80	0,99
HRH114	0,48	0,73	0,31	0,50	0,81	0,30	0,31	0,55	0,69	0,08
HRH132	0,52	0,78	0,92	0,67	0,54	0,69	0,84	0,47	0,54	0,50
HRH137	0,37	0,93	0,45	0,37	0,51	0,75	0,26	0,36	0,75	0,01
HRH147		0,74	0,70	0,15	0,14	0,70	-0,04	0,19	0,71	0,03
HRH122	0,52	0,82	0,62	0,50	0,53	0,78	1,07	0,70	0,61	0,25
HRH123	1,02	1,10	0,91	0,58	0,92	0,86	0,53	0,76	0,21	0,95
HRH142	0,45	0,87	0,56	0,42	0,21	0,82	-0,86	0,59	0,77	0,27
HRH148	0,63	0,60	0,67	-0,2	0,26	0,19	-0,94	0,77	0,61	0,18

Les valeurs des indice des eaux de tous les forages dans le tableau ci-dessus sont supérieures à zéro donc l'eau de ces forages sont incrustante sauf les puits HRH147, HRH142 pour l'année 2017 & HRH 148 pour les années 2014 et 2017 sont agressive, on peut dire que l'aspect générale de ces eaux sont incrustantes selon **LANGELIER**.

NB : Les deux cases vides de tableau dû à la fiabilité de l'analyse variée déjà par la balance ionique pour les deux puits (voir point IV.2. 2.1 & tableau VI.1)

IV.5.2. Indice de saturation de RYZNAR (indice de stabilité) :

Appelé également indice de stabilité, il permet de définir la tendance agressive ou entartrant d'une eau, cet indice est défini par la formule suivante :

$$IR = 2pHs - pH$$

Le tableau ci-dessous montre la relation entre l'indice de stabilité et la tendance incrustante ou agressive de l'eau.

Tableau IV-06 : Classification de l'eau selon l'indice de saturation de RYZNAR

IR	TENDANCE
<3,9	Très entartrante
4 à 5,9	Entartrage faible
6 à 6,9	Stable ou équilibré
7 à 8,5	Moyennement agressive
> 8,5	Très agressive ou corrosive

Tableau IV-07 : Variation de l'indice de RYZNAR IR des eaux étudiées (période : 2011-2020).

PUITS	IR (2011)	IR (2012)	IR (2013)	IR (2014)	IR (2015)	IR (2016)	IR (2017)	IR (2018)	IR (2019)	IR (2020)
HRH126	6,4	6,6	7,1	6,1	6,1	6,2	6,8	7,0	0,5	6,5
HRH127	6,2	6,6	6,6	6,7	6,0	6,4	6,5	6,7	0,5	6,7
HRH138	6,2	6,4	6,5	6,5	6,3	6,9	6,9	6,9	6,1	6,3
HRH139	6,3	6,5	6,5	7,4	5,8	6,1	6,4	6,9	6,6	6,7
HRH145		5,9	6,5	6,8	7,4	6,6	6,7	7,0	7,0	6,9
HRH151	6,4	5,9	6,2	7,4	6,6	6,0	7,5	6,2	6,8	6,9
HRH105	6,7	6,9	6,7	7,0	7,0	7,1	6,9	6,6	6,5	6,8
HRH106	6,4	7,1	6,6	6,7	6,6	6,5	6,3	6,4	6,5	6,5
HRH107	6,1	6,8	7,8	7,1	6,6	7,1	6,8	7,1	6,5	6,3
HRH114	6,8	6,6	7,0	6,9	6,3	7,1	7,1	6,8	6,6	7,2
HRH132	6,7	6,4	6,0	6,4	6,6	6,8	6,5	6,9	6,8	6,3
HRH137	6,9	6,3	6,8	7,0	7,0	6,6	7,1	7,0	6,5	7,3
HRH147		6,4	6,4	6,9	7,3	6,4	7,3	6,8	6,3	7,0
HRH122	6,5	6,2	6,5	6,6	6,8	6,4	6,0	6,5	6,4	6,9
HRH123	6,0	5,8	6,1	6,6	6,1	6,3	6,6	6,5	7,1	6,1
HRH142	6,6	6,1	6,6	6,7	7,0	6,3	9,2	6,5	6,2	6,8
HRH148	6,3	6,4	6,5	7,5	7,2	7,0	9,4	6,4	6,4	7,0

Selon l'indice de RYZNAR on a trouvé la majorité des eaux souterraines de la région de HRM sont en état d'équilibre sauf quelque puits pour quelque années sont légèrement agressive (HRH126, HRH151, HRH107, HRH114, HRH137, HRH147, HRH142, HRH148).

NB : Les deux cases vides de tableau dû à la fiabilité de l'analyse variée déjà par la balance ionique pour les deux puits (voir point IV.2. 2.1 & tableau VI.1)

IV.5.3. L'indice de LARSON :

L'indice de LARSON permet de définir la tendance à la corrosion d'une eau, il est calculé par cette formule :

$$IC = (2[SO_4^{2-}] + [Cl^-]) / [HCO_3^-]$$

Où :

IC : mol/l.

[SO₄²⁺]: mol/l

[Cl⁻]: mol/l

[HCO₃⁻]: mol/l

Cette formule empirique est basée sur de nombreuses expérimentations effectuées par les américains Larson et Skold, qui ont estimé que cet indice ne devrait pas dépasser 0,2 ou 0,3. D'autres ont estimé des valeurs allant jusqu'à l'unité étaient acceptables. Le tableau ci-contre montre l'interprétation que l'on peut faire des valeurs de l'indice.

Tableau IV-08 : Classification de l'eau selon l'indice de LARSON

IC	TENDANCE
<0,2	Pas tendance à la corrosion
0,2 à 0,4	Faible tendance à la corrosion
0,4 à 0,5	Légère tendance à la corrosion
0,5 à 1	Tendance moyenne à la corrosion
> 1	Nette tendance à la corrosion

Selon l'indice de LARSON on a trouvé la majorité des eaux étudiés possèdent une nette tendance à la corrosion sauf HRH139.

Tableau IV-09 : Variation de l'indice de LARSON IC des eaux étudiées (période : 2011-2020)

PUITS	IC (2011)	IC (2012)	IC (2013)	IC (2014)	IC (2015)	IC (2016)	IC (2017)	IC (2018)	IC (2019)	IC (2020)
HRH126	1,80	2,27	2,80	2,04	1,85	2,83	1,98	2,13	2,43	3,03
HRH127	1,46	1,71	2,09	3,08	2,03	2,92	2,35	3,03	3,01	1,88
HRH138	1,88	1,98	3,24	2,46	7,21	11,16	10,80	11,30	9,76	1,43
HRH139	1,41	1,26	1,36	2,47	1,47	0,73	1,32	1,33	0,89	1,88
HRH145		1,93	3,22	2,39	3,03	1,93	2,26	1,98	1,88	2,19
HRH151	2,94	1,92	1,38	1,61	1,60	1,60	2,58	1,89	1,71	1,56
HRH105	1,44	1,89	2,39	2,32	1,99	2,67	2,30	1,67	2,21	2,33
HRH106	2,04	2,21	3,22	2,26	2,81	2,18	2,97	3,41	2,42	2,82
HRH107	2,96	1,01	1,39	1,48	1,36	2,04	1,48	1,76	2,18	1,10

HRH114	4,92	5,84	6,17	6,36	10,18	6,20	6,87	6,26	6,78	6,31
HRH132	3,75	3,28	2,84	2,56	5,33	6,08	7,44	6,83	6,83	3,19
HRH137	1,57	2,21	1,42	1,95	2,56	2,36	1,66	1,84	1,94	1,86
HRH147		3,32	2,37	2,38	4,20	2,53	2,73	3,27	2,86	3,61
HRH122	3,05	3,51	3,23	3,50	4,26	3,41	3,38	2,97	3,66	3,47
HRH123	3,40	1,81	3,48	2,54	3,44	2,36	1,19	1,24	1,86	3,40
HRH142	1,86	2,81	3,72	3,04	4,51	3,00	4,62	3,06	3,22	3,07
HRH148	2,78	3,03	2,83	4,44	3,55	3,37	4,94	3,01	2,85	2,60

Selon l'indice de LARSON on a trouvé la majorité des eaux étudiés possèdent une nette tendance à la corrosion sauf HRH139 pour l'année 2016 et 2019.

NB : Les deux cases vides de tableau dû à la fiabilité de l'analyse variée déjà par la balance ionique pour les deux puits (voir point IV.2. 2.1 & tableau VI.1)

IV.5.4. L'indice de LEROY :

L'indice de LEROY permet de confirmer ou non la tendance à la corrosion d'une eau, il est égal à :

$$IC = TAC/TH \text{ (exprimées en meq/l)}$$

Tableau IV-10 : Classification de l'eau selon l'indice de LEROY

LR	TENDANCE
< 0,7	à forte risque de corrosivité
0,7 à 1,3	à faible risque de corrosivité
> 1,3	sans risque de corrosivité

Il est à utiliser en complément de l'indice de LEROY. Ils permettent, à eux deux, de préciser les tendances d'une eau.

Tableau IV-11 : Variation de l'indice de LEROY des eaux étudiées (période : 2011-2020).

Puits	LR (2011)	LR (2012)	LR (2013)	LR (2014)	LR (2015)	LR (2016)	LR (2017)	LR (2018)	LR (2019)	LR (2020)
HRH126	0,67	0,62	0,61	0,67	0,69	0,49	0,72	0,63	0,65	0,50
HRH127	0,74	0,71	0,79	0,63	0,63	0,56	0,63	0,54	0,56	0,55

HRH138	0,55	0,81	0,44	0,57	0,18	0,20	0,21	0,21	0,23	0,68
HRH139	0,68	0,80	0,71	0,54	0,77	0,85	0,69	0,72	0,78	0,55
HRH145		0,68	0,46	0,62	0,60	0,67	0,63	0,62	0,74	0,95
HRH151	0,57	0,84	0,66	0,62	0,66	0,92	0,52	0,73	0,64	0,64
HRH105	0,65	0,62	0,61	0,52	0,62	0,61	0,74	0,69	0,57	0,59
HRH106	0,52	0,53	0,43	0,51	0,42	0,52	0,45	0,43	0,51	0,46
HRH107	0,52	0,80	0,71	0,77	0,69	0,54	0,70	0,72	0,71	0,78
HRH114	0,43	0,41	0,38	0,38	0,25	0,36	0,35	0,36	0,37	0,35
HRH132	0,50	0,51	0,53	0,51	0,35	0,54	0,46	0,50	0,52	0,46
HRH137	0,67	0,66	0,65	0,64	0,46	0,65	0,68	0,65	0,66	0,64
HRH147		0,25	0,49	0,54	0,35	0,59	0,19	0,40	0,51	0,45
HRH122	0,49	0,48	0,49	0,46	0,47	0,61	0,49	0,60	0,51	0,46
HRH123	0,47	0,80	0,44	0,53	0,44	0,57	0,72	0,68	0,65	0,47
HRH142	0,57	0,51	0,42	0,51	0,43	0,51	0,80	0,49	0,51	0,51
HRH148	0,45	0,46	0,49	0,44	0,53	0,55	0,69	0,55	0,56	0,56

Selon LEROY on a trouvé que 80% des eaux étudiés ont un indice inférieur à 0,7 donc ont à forte risque de corrosivité et 20% ont un indice varie de 0.7 à 1.3 alors à faible risque de corrosivité donc sans toute à risque de corrosivité.

NB : Les deux cases vides de tableau dû à la fiabilité de l'analyse variée déjà par la balance ionique pour les deux puits (voir point IV.2. 2.1 & tableau VI.1)

IV.6. Classification des eaux :

La classification des eaux minérales basées sur une combinaison des propriétés géologiques, hydrochimique, et l'aspect thérapeutique (A. Hazzab, 2002).

IV.6. 1. Salinité :

La salinité totale d'une eau correspond à la somme des Cations et des anions présents exprimée en mg/l.

Salinité = Σ sels dissous minéraux et organiques (ions minéraux et non minéraux).

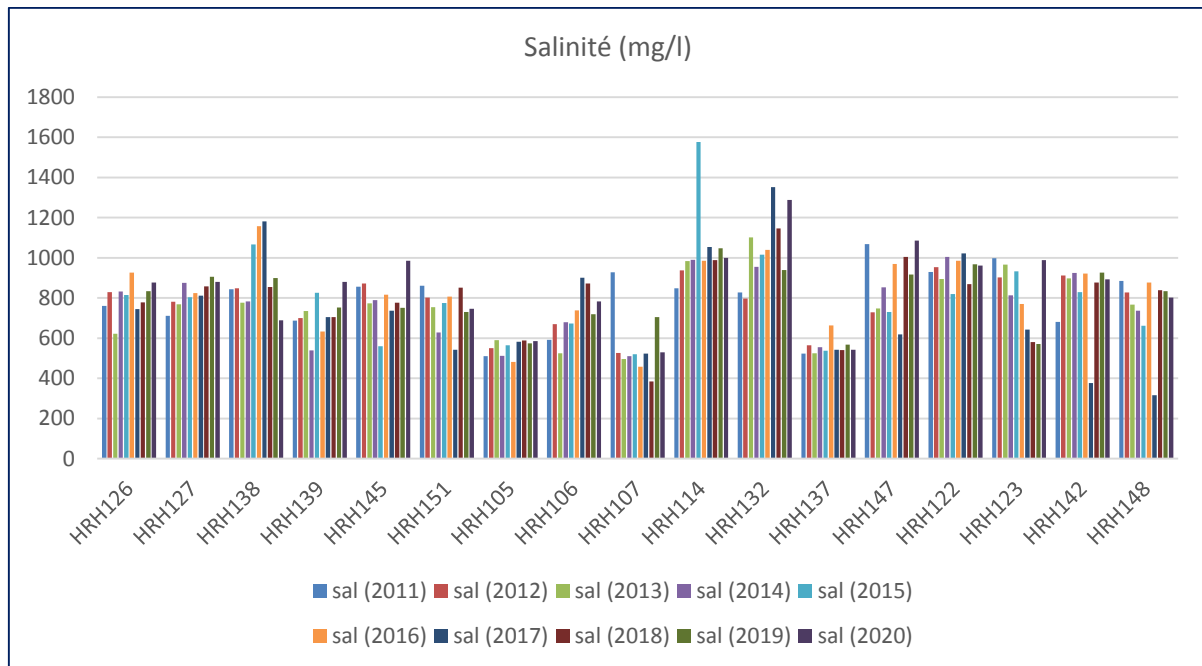


Figure IV-16 : Salinité des eaux étudiées (période : 2011-2020)

Les eaux de la région de Hassi R'mel présentent une salinité comprise entre 315.55mg/l à 1577,11 mg/l, on peut dire que la salinité de ces eaux est modérée.

IV.6. 2. Total des solides dissous (TDS) :

Le TDS signifie Total des Solides Dissous et représente la concentration totale des substances dissoutes dans l'eau. Le TDS est composé de sels inorganiques et de quelques matières organiques. Les sels inorganiques communs trouvés dans l'eau incluent le calcium, le magnésium, le potassium et le sodium qui sont tous des cations et des carbonates, nitrates, bicarbonates, chlorures et sulfates qui sont tous des anions ;

$$TDS = \Sigma \text{ matière dissoute (mg/l)}.$$

Le TDS varie entre 315.55mg/l à 1577,11 mg/l donc l'eau de cette nappe est moyennement minéralisée (voir Figure IV.17).

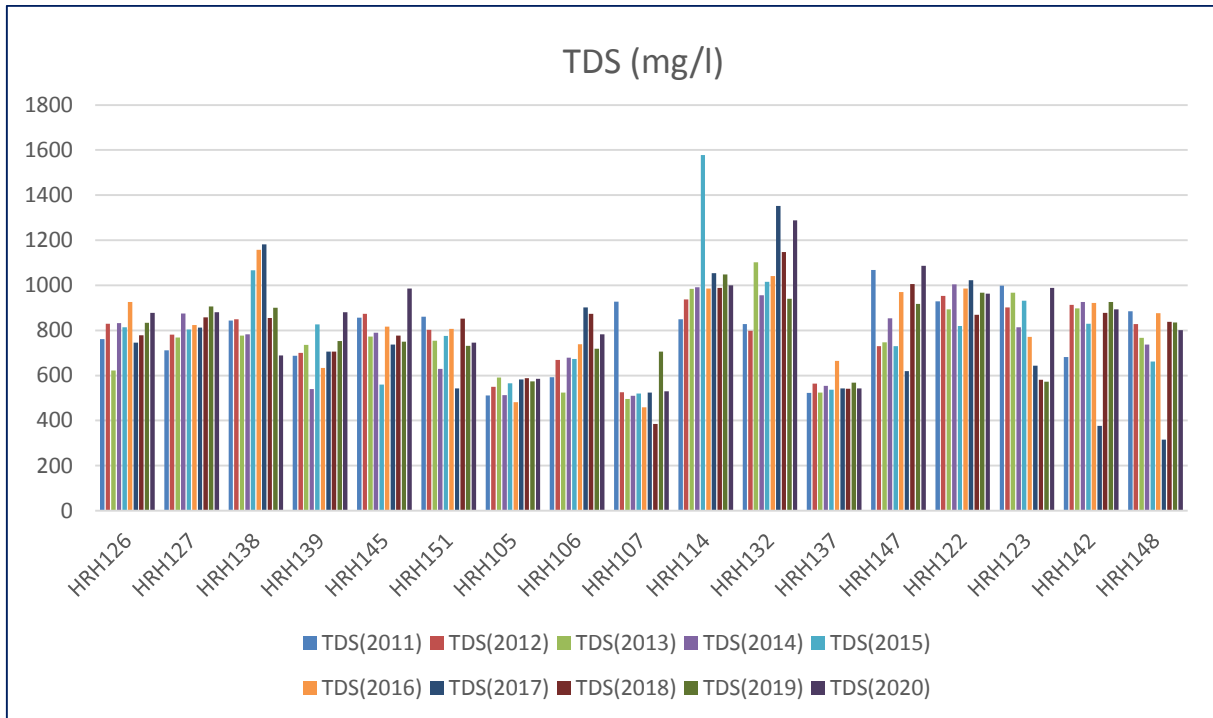


Figure IV.17 : Variation de la TDS des eaux étudiées (période : 2011-2020)

IV.6. 3. Conductivité calculée:

La conductivité électrique de l'eau représente sa capacité à laisser les charges électriques se déplacer librement. Cette caractéristique dépend de la quantité d'ions présents en solution, donc de degré de minéralisation globale de l'eau.

La formule pour calculer la Conductivité en fonction de l'activité ionique :

$$\sigma_t (\mu\text{S/cm}) = 100. (\Sigma\text{Activité ionique des cations(méq/l)} + \Sigma\text{Activité des anions(méq/l)}) / 2$$

$$\sigma_t = \frac{\sigma_{25^\circ\text{C}}}{1 + 0.023. (25 - t)}$$

$$\sigma_{25^\circ\text{C}} = \sigma_t * [1 + 0.023. (25 - t)]$$

σ_t ($\mu\text{S/cm}$) : conductivité électrique a la température t .

σ_{25° ($\mu\text{S/cm}$) : conductivité électrique a la température 25°C .

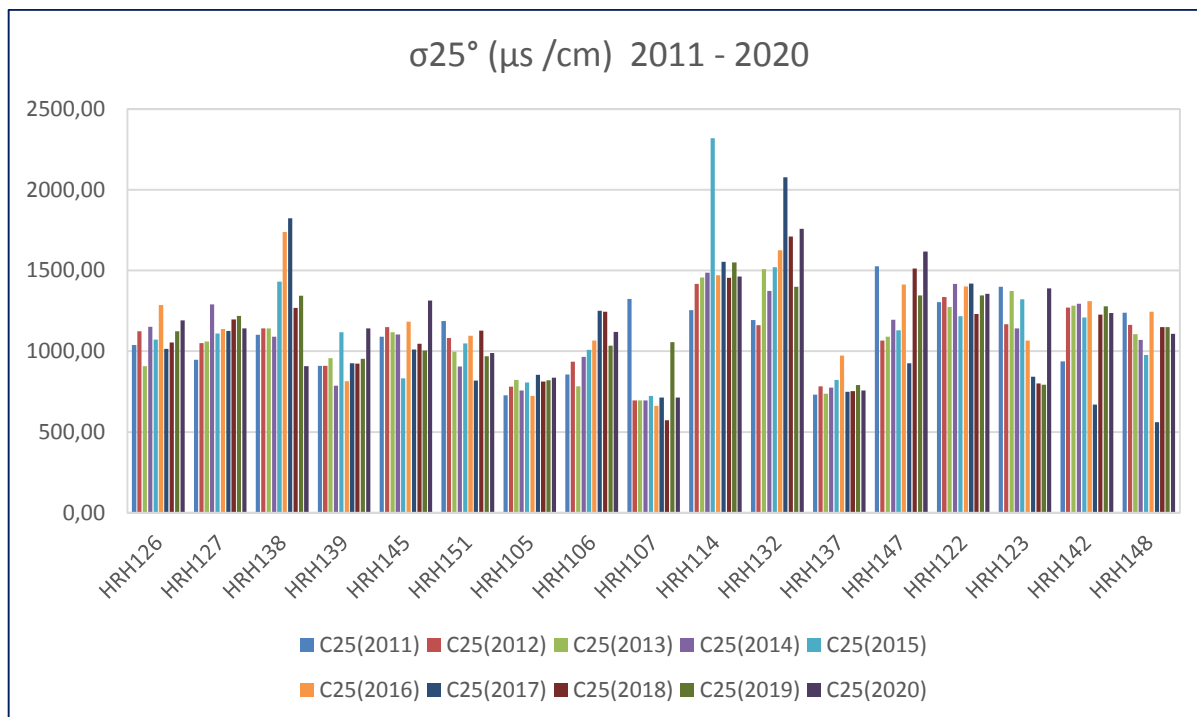


Figure IV.18 : Variation de la conductivité des eaux étudiées (période : 2011-2020)

La figure ci-dessus indique que la conductivité calculée est entre 500 $\mu\text{S/cm}$ et 2500 $\mu\text{S/cm}$; faible à moyenne conductivité

IV.6. 4. Selon la minéralisation :

« Il existe une relation entre la teneur en sels dissous d'une eau et sa conductivité. Toutefois, la minéralisation déterminée par pesée de l'extrait sec n'est pas rigoureusement identique à celle calculée à partir de la conductivité. » (RODIER, 1996).

Tableau IV.12 : Classification des eaux en fonction de la minéralisation

Conductivité ($\mu\text{S/cm}$) à 25°C	Degré de minéralisation
<450	Très faible
450 - 750	Faible
750 - 1500	Moyen
1500 - 2300	Moyennement élevé
2300 - 3000	Elevé
> 3000	Très élevé

Les résultats de calculs de la conductivité des eaux étudiées varient entre la valeur maximale 2300 ($\mu\text{S}/\text{cm}$) et la valeur minimale 561 ($\mu\text{S}/\text{cm}$), la classification des eaux en fonction de la conductivité montre que la majorité des forages ont une minéralité $<1500 \text{ mg/l}$ donc moyenne, à l'exception quelque puits, qui ont une valeur de minéralité faible, et une autre d'une minéralité moyennement élevé à une minéralité élevé cela due à la présence des minéraux dans ces forges, la conversion de la conductivité a ($20 \text{ }^\circ\text{C}$) montre que tous les forages sont conforme à la normes Algériennes qui est à l'ordre de $2800 \text{ } (\mu\text{S}/\text{cm})$.

IV.6. 5. Selon les normes européennes :

La classification des eaux selon les normes européennes tient compte de la teneur des constituants ionique; calcium $[\text{Ca}^{2+}]$, magnésium $[\text{Mg}^{2+}]$, chlorure $[\text{Cl}^-]$, sulfate $[\text{SO}_4^{2-}]$
Le tableau ci-dessous représente la classification des eaux selon les normes européennes :

Tableau IV.13 : Classification des eaux Selon les normes européennes.(CEE 2005)

Caractéristique	Teneur (mg/l)
Faiblement minéralisée	$\text{TDS} \leq 500$
Très faiblement minéralisée	$\text{TDS} \leq 50$
Riche en sels minéraux	$\text{TDS} > 1500$
Bicarbonatée	$[\text{HCO}_3] > 600$
Sulfatée	$[\text{SO}_4] > 200$
Chlorurée	$[\text{Cl}] > 200$
Calcique	$[\text{Ca}] > 150$
Magnésienne	$[\text{Mg}] > 50$
Fluorée ou contient du fluore	$[\text{F}] > 1$
Ferrugineuse ou contient du fer	$[\text{Fe bivalent}] > 1$
Acidulée	$[\text{CO}_2 \text{ libre}] > 250$
Sodique	$[\text{Na}] > 200$
Convient pour régime pauvre en sodium	$[\text{Na}] < 20$
Ne convient pas pour l'alimentation des bébés et la consommation régulière des jeunes enfants [réglementation Algérienne : Arrêté interministériel du 23 Février 2008]	$[\text{F}] > 1,5$
Selon cette réglementation ; TDS : teneur en sels minéraux, calculée comme résidu fixe	

Les résultats obtenus révèlent que :

- Les eaux Hassi R'mel ont un caractère moyennement minéralisé.
- Toutes les valeurs de $[HCO_3^-]$ ne dépassent pas 600 mg/l, on conclut que toutes les eaux de forages étudiées ne sont pas bicarbonatées.
- Les forages (HRH138, HRH114, HRH132, HRH122, HRH123, HRH142, HRH143) caractérisés d'une eau sulfatée
- On a constaté que deux forages (HRH132, HRH147), leur eau est chlorurée.
- Il y a un forage (HRH138) qui a une eau calcique.
- Les forages HRH138, HRH147) ont une eau magnésienne.
- Les eaux de HRM sont moyennement sodiques.

IV.6. 6. Selon Voronov 2000 :

La classification selon Voronov basé sur la concentration en total des solides dessous (TDS) qui correspond à la valeur des résidus secs (A. Hazzab 2012) :

Tableau IV.14: Classification des eaux selon Voronov

Eaux faiblement minéralisées	Résidu sec ≤ 50 mg/l
Eaux oligo-minérales	50 mg/l < Résidu sec ≤ 500 mg/l
Eaux modérément minéralisées	500mg/l < Résidu sec ≤ 1500 mg/l
Eaux riches en sels minéraux	Résidu sec > 1500 mg/l

D'après les résultats obtenus (voir la figure IV.16) : On constate que tous les forages se caractérisent par une eau modérément minéralisée.

IV.7. Vérification aux normes Algériennes :

Afin de définir régulièrement une eau potable, des normes qui ont été établies, fixent notamment les teneurs limites à ne pas dépasser pour un certain nombre de substances nuisibles et susceptibles d'être présentes dans l'eau. Le fait qu'une eau soit conforme aux normes, c'est-à-dire potable, ne désigne donc pas qu'elle soit exempte de matières polluantes, mais que leur concentration a été jugée suffisamment faible pour ne pas mettre en danger la santé du consommateur (Alouane, 2012).

En Algérie, il existe des réglementations locales pour la qualité de l'eau de boisson en citant le Journal Officiel de la République Algérienne (JORA, 2011) qui représente les différents paramètres physico-chimiques et bactériologiques de la qualité de l'eau de consommation humaine avec des valeurs limites.

Tableau IV.15: Normes Algériennes de potabilisation des eaux (paramètres physico-chimiques), (JORA, 2011).

Paramètres physico-chimique	Unité	Normes Algériennes
Température	°C	25
Ph	/	6,5-9
Conductivité électrique à 20°C	µS/cm	2800
Turbidité	NTU	5
Dureté Totale TH	°F	50
Alcalinité TAC	mg/l CaCO ₃	500
Sodium	mg/l	200
Calcium	mg/l	80
Potassium	mg/l	12
Magnésium	mg/l	150
Sulfates	mg/l	400
Chlorures	mg/l	500
Nitrates	mg/l	50
Nitrites	mg/l	0,2
Résidus sec	mg/l	1500

IV.8. Etudes de l'aptitude des eaux à l'irrigation :

L'agriculture durable passe par le maintien de la qualité du sol et de l'eau. Notre région d'étude étant à vocation agricole, l'eau destinée à l'irrigation doit présenter des caractéristiques physico-chimiques et chimiques tolérables par les plantes. Afin d'estimer l'influence de ces eaux sur le sol et sur certaines cultures pratiquées dans la région, nous allons essayer d'évaluer leur aptitude à l'irrigation. Pour cela, nous allons utiliser plusieurs méthodes à l'aide de logiciel Diagrammes à fins de les classer.

IV.8. 1. Classification de l'eau d'irrigation selon le diagramme de Riverside :

Le risque de l'alcalinisation des sols par suite d'échanges ioniques, concernant surtout le sodium, le calcium et le magnésium, entre l'eau et les argiles du sol. De fortes teneurs en sodium modifient la structure des sols et leur perméabilité. On a utilisé le diagramme de Riverside qui permet de faire une classification des eaux selon leur aptitude à l'irrigation. Il travaille avec la conductivité électrique à 25° C et la relation d'absorption du Sodium (S.A.R), ce dernier est évalué par la formule ci-dessous :

$$SAR = \frac{Na}{\sqrt{\frac{Ca + Mg}{2}}} \quad \text{Na, Ca et Mg en meq/l}$$

La projection des différentes valeurs de SAR en fonction de la conductivité sur le diagramme de Riverside, a donné les classes suivantes :

Tableau IV.16 : Répartition des forages selon les classes des eaux d'après les résultats obtenus selon le diagramme de Riverside des eaux étudiées (période : 2011-2020)

Classe	QUALITE	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
C2S1	BONNE	HRH137 HRH105	HRH107	HRH137 HRH107	HRH105 HRH107	HRH105 HRH107	HRH105 HRH107	HRH137 HRH107	HRH137 HRH107	HRH137 HRH107	HRH137 HRH107
C3S1	ADMISSIBLE	Reste des puits	Reste des puits	Reste des puits	Reste des puits	Reste des puits	Reste des puits	Reste des puits	Reste des puits	Reste des puits	Reste des puits
C3S2	MEDIOCRE					HRH114	HRH132	HRH132	HRH132		

NB : Pour les diagrammes relatifs aux autres années ; voir l'annexe VI & VII.

Ci-dessous, le diagramme de RIVERSIDE des différentes eaux pour l'année 2020.

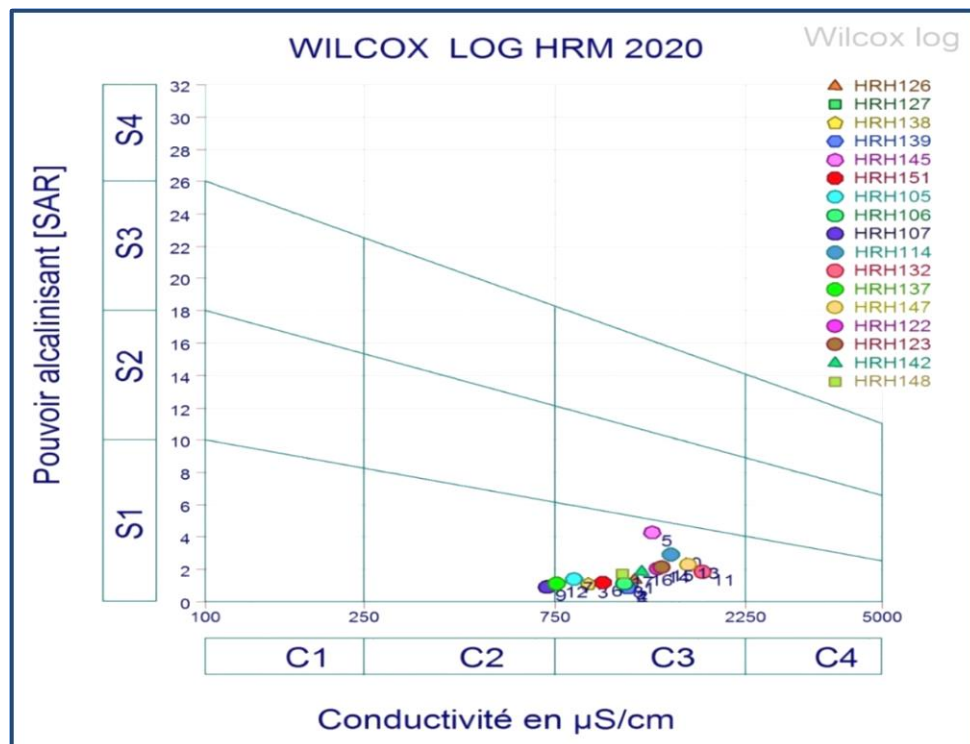


Figure IV.19 : Diagramme de Riverside des eaux étudiées (année : 2020).

IV.8. 2. Classification des eaux selon Wilcox :

Le développement des plantes est très faible ou nul dans les sols saturés en sodium, c'est pourquoi on utilise une classification basée sur la conductivité électrique et la teneur du sodium dans l'eau, qui est définie par la relation suivante :

$$\%Na = 100 \times \frac{Na + K}{(Ca + Mg + Na + K)}$$

Où : les éléments sont exprimés en (méq/l).

Tableau IV.17 : Répartition des forages selon les classes des eaux d'après les résultats obtenus selon le diagramme de WILCOX des eaux étudiées (période : 2011-2020)

QUALITE	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Excellente	HRH137	HRH137	HRH137	HRH137	HRH105	HRH105	HRH137	HRH137	HRH137	HRH137
	HRH105	HRH105 HRH107	HRH106 HRH107	HRH105 HRH107	HRH107	HRH107	HRH107	HRH107	HRH107	HRH107
Bonne	Reste des puits	Reste des puits	Reste des puits	Reste des puits	Reste des puits	Reste des puits	Reste des puits	Reste des puits	Reste des puits	Reste des puits
Admissible						HRH132		HRH132		HRH145
Médiocre					HRH114		HRH132			

Ci-dessous, le diagramme de WILCOX des différentes eaux pour l'année 2020.

NB : Pour les diagrammes des autres années ; voir l'annexe Page VII & VIII.

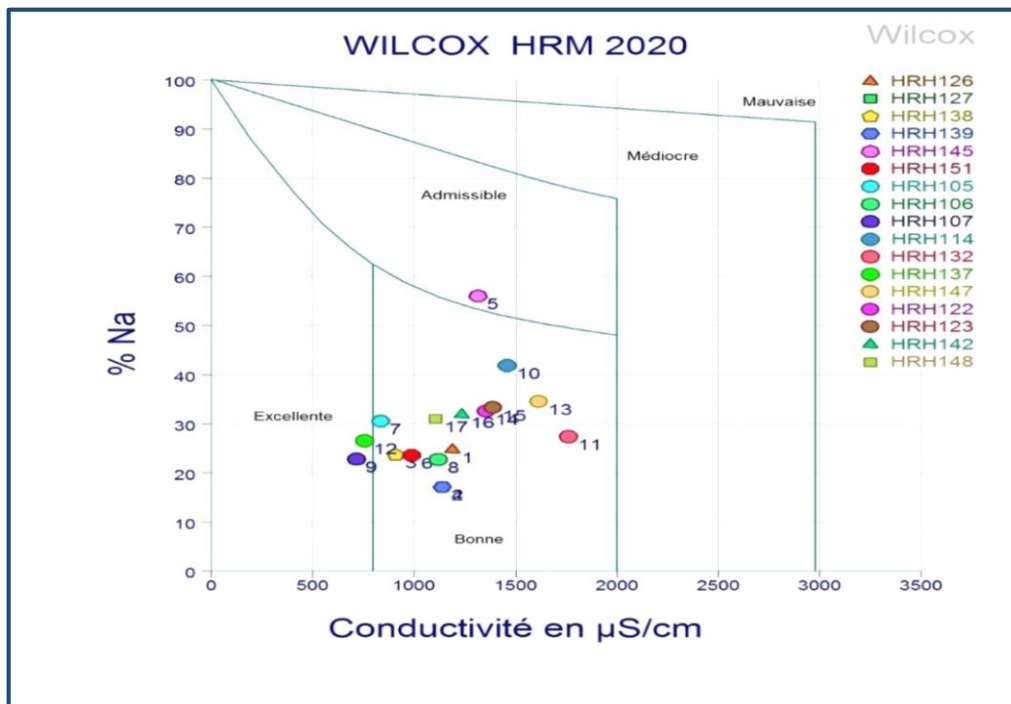


Figure IV.20 : Diagramme de WILCOX des eaux étudiées (année : 2020).

D'après la classification de Riverside et Wilcox on conclut que les eaux de la région étudiées sont bonnes ou admissible pour l'irrigation, excellentes pour les eaux des puits (HRH 105, HRH107, HRH137) parcontre médiocre pour les eaux des puits (HRH114 , HRH132).

IV.8. 3. Conclusion :

Ce chapitre est basé sur les calculs et l'interprétation des résultats.

La partie vérification de la fiabilité des données, nous a obligés à ne pas considérer dans l'étude seulement deux forages en 2011 (HRH145 & HRH147) à cause de leurs balances ioniques qui est supérieure à 10 %.

Selon l'évaluation des paramètres physico-chimiques, la qualité des eaux étudiées est conforme pour la consommation humaine selon les normes algériennes sauf l'eau du puits HRH138 (de 2015 à 2018) qui pose un problème relatif à l'élément SO_4^{2-} .

On constate selon l'analyse du titre hydrométrique (TH) que 80 % des eaux de Hassi R'mel sont dures et 20 % sont assez douces. La dureté (TH) des différentes eaux est supérieure à l'alcalinité (TAC) ; ce qui permet de conclure que les eaux étudiées ont des duretés carbonatées.

L'étude de l'équilibre carbonique de l'eau montre selon l'indice de LANGELIER que presque pour tous les forages, cet indice est supérieures à zéro ; donc les eaux de ces forages sont incrustantes sauf les puits HRH147 et HRH142 pour l'année 2017. Les eaux du forage HRH 148 pour les années 2014 et 2017 sont agressives.

Selon l'indice RYZNAR on a trouvé que la majorité des eaux souterraines de la région de HRM sont en état stable ou équilibré sauf quelques puits pour quelques années où sont légèrement agressives (HRH126, HRH151, HRH107, HRH114, HRH137, HRH147, HRH142, HRH148).

Selon l'indice de LARSON on a trouvé que la majorité des eaux étudiées possèdent une nette tendance à la corrosion sauf l'eau du forage HRH139 qui a une tendance moyenne à la corrosion pour l'année 2016 et 2019.

Selon l'indice de LEROY on a trouvé que les eaux étudiés ont toutes un risque de corrosivité soit faible ou fort.

La classification de l'eau montre que la majorité des eaux de forages ont une minéralisation moyenne ou modérément minéralisées, cela due à la présence des minéraux dans ces forges :

- Toutes les eaux des forages étudiées ne sont pas bicarbonatées.
- Les eaux des forages (HRH138, HRH114, HRH132, HRH122, HRH123, HRH142, HRH143) sont caractérisées comme eaux sulfatées.
- Deux forages (HRH132, HRH147), dont l'eau est chlorurée.
- Un forage (HRH138) dont l'eau est calcique.
- Les forages (HRH138, HRH147) ont une eau magnésienne.
- Les eaux du forage HRM sont moyennement sodiques.

L'aptitude des eaux à l'irrigation montre que la majorité des eaux analysées sont bonne et admissible pour l'utilisation à l'irrigation, où un contrôle de l'évolution de la salinité est toujours utile.

La réglementation sur l'eau potable, pour ce qui concerne l'équilibre calco-carbonique de l'eau, impose que les eaux distribuées ne soient pas agressives. La prise en compte de ce critère implique donc une surveillance et/ou un ajustement de l'équilibre calco-carbonique de l'eau. Par ailleurs, dans un souci de protection des réseaux de distribution, on donne à l'eau une tendance légèrement incrustante afin qu'un léger dépôt de CaCO_3 tapisse les canalisations, et limite ainsi les phénomènes de corrosion.

Il existe plusieurs méthodes permettant d'ajuster la qualité de l'eau en fonction de sa tendance plus ou moins agressive ou corrosive ; à savoir :

- la reminéralisation.
- la correction du pH.
- la neutralisation du CO_2 agressif.

CONCLUSION

GENERALE

Conclusion générale

Le secteur d'étude est situé au Nord de la plate-forme saharienne à 500 km au sud d'Alger et à 120 km au Sud de la ville de Laghouat.

Du point de vue litho stratigraphique, la région de Hassi R'mel est représentée par des formations tertiaires et quaternaires constituées de bas en haut par des grès fins, friables, à passées d'argiles de milieu continental, des calcaires et argiles d'âge Cénomaniens et des dolomies vacuolaires et calcaires.

- Ce réservoir Calcaire- dolomitique (Calcaire dolomitique et dolomie vacuolaire à silex) d'âge du Sénono-Turonien, constituant la nappe phréatique libre, ne produit qu'à la faveur de karsts liés au développement de fissures et grandes fractures plus importantes par localité, remontant jusqu'à la surface du sol assurant son alimentation, par les infiltrations des eaux de précipitations.
- L'étude climatique de la région sur une période allant de (2001 à 2020) montre que la moyenne annuelle des précipitations est de 84 mm avec une température moyenne annuelle de 19,95 °C. La zone d'étude est caractérisée par un climat de type Hyper-Aride à hiver frais, ou climat saharien dont la période sèche s'étale sur toute l'année.
- Les résultats des essais de pompage des forages existants ont montré que les valeurs de la transmissivité varient entre $1.875.10^{-4}$ m²/s comme valeur minimale et $1030.03.10^{-4}$ m²/s comme une valeur maximale, et de la perméabilité qui varient entre $0.288.10^{-5}$ m/s comme une mauvaise perméabilité, et 417.35 m/s comme une forte perméabilité, les valeurs de la transmissivité et de la perméabilité varient d'un puits à un autre ceci est dû essentiellement au changement de faciès et de fissurations des calcaires.
- La majorité des eaux souterraines de la région de Hassi R'mel sont dures ; où environ de 20 % des forages sont caractérisés par des eaux assez douces, et environ de 5% sont caractérisés par des eaux très dures.
- L'étude d'équilibre Calco-carbonique a révélé d'après LANGELIER et RYZNAR ; les eaux de Hassi R'mel sont incrustantes ou équilibrées, mais selon LARSON & LEROY ces eaux ont une nette tendance à la corrosion.

- La majorité des eaux souterraines de la région sont moyennement minéralisés; elles ne sont pas bicarbonatées, mais par contre il y a quelques puits qui sont caractérisés par une eau sulfatée (puits : HRH138, HRH114, HRH132, HRH122, HRH123, HRH142, HRH143), chlorurée (puits : HRH132, HRH147), ou calcique et magnésienne (puits : HRH138).
- Nous pouvons dire que toutes les eaux souterraines de la région de Hassi R'mel sont potables, car elles sont conformes aux normes Algériennes de potabilisation.
- L'aptitude des eaux pour l'irrigation varie de bonne à admissible. Elle est excellente pour les eaux des puits : HRH107 et HRH137.

Afin de préserver la nappe superficielle, il est judicieux de diminuer le débit d'exploitation et cela par la recherche d'autres potentiels hydriques dans cette région considérée où dans les régions limitrophes.

On recommande aussi d'installer une station d'épuration et de traitement des eaux, afin de récupérer les eaux usées et traiter les eaux du Barrémien.

REFERENCES



BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

- Aricha M. (2003)**, Le Complexe Hydrogéologique de Hassi R'Mel, document interne de la DP de Sonatrach de Hassi R'Mel.
- Aricha M. (2013)**, Rapport fin de sondage des puits : HRH 159, HRH160 et HRH161, document interne de la DP de Sonatrach de Hassi R'Mel.
- BANGOY L. M., BANTON.O et LUMONY M. B. (1999)**, Hydrogéologie Multiscience environnementale des eaux souterraines, Presses de l'Univ. Québec, 460p.
- BILOUD H. (2012)**, Contribution à l'étude hydrogéologique de la nappe Turonienne du champ de Hassi R'mel, mémoire d'ingénieur d'état, Instit. Sci. Ter. Oran. (Algérie), 93p.
- BOOT & COOT (2011)**, Rapport d'Audit Environnemental HASSI R'MEL NORD, DP de Sonatrach de Hassi R'Mel, 271p.
- BOUTELDJA O. et BEROUGAT S. (2002)**, Contribution à l'étude Hydrogéochimique de la nappe libre de Sidi Bel Abbes (Algérie Nord Occidentale), mém. Ingénieur d'Etat, Instit. Sci. Ter. Univ. UAB. Tlemcen (Algérie), 146p.
- CASTANY G. et MARGAT J. (1977)**, Dictionnaire Français d'hydrogéologie. B.R.G.M, Orléans, 249p.
- JOURNAL OFFICIEL (2011)**, Norme algériennes, NA 6360.
- KADA Hakim et ARAB Kamel (2019)**, Caractérisation des eaux souterraines de la région de BOUIRA, mémoire de master de l'université de Bouira.
- Logiciels utilisés** : Surfer .12 – Diagramme.
- MANSOUR ACHOUR (2014)**, Vulnérabilité et protection des eaux souterraines en zone aride : cas de la vallée du M'ZAB, mémoire de magister de l'université d'Oran.
- OULD BABA SY M. (2005)**, Recharge et paleorecharge du système aquifère du Sahara septentrional, Thèse. Doctorat, Dép. Géol. Univ. Tunis, El Manar. pp.81.
- PDDRHR (1972)**, Plan directeur de développement pour la région de Hassi R'Mel. DP. Sonatrach, Hassi R'Mel.
- Rapport géologique (1972)**, Service de géologie, DP. Sonatrach, Hassi R'Mel.
- Rapport hydrogéologique (1977)**, La nappe du séno-turonien. DP. Sonatrach, Hassi R'Mel.
- Revue de HASSI R'MEL (1978)**, Les hydrocarbures à Hassi R'Mel., Dp. Sonatrach, Hassi R'Mel. 45 p.
- ROCHE M. F. (1986)**, Dictionnaire Français d'hydrologie de surface (avec équivalents en anglais espagnole allemand), Ed. Masson, 288p.

RODIER J. (1996), L'analyse de l'eau, Ed. Dunod, Paris, 1383p.

RODIER J. (2009), L'analyse de l'eau, 9^{ième} édition entièrement mise à jour, Ed. Dunod, Paris, 1511p.

SOUSSI S. (2003), Description des champs pétroliers. Site Interne GEO, ALGE, HTML, Dir.Rég.de Forage Hassi Messaoud.

TALEB Mahmoud et BADAOUI Said (2019), Etude qualitative des eaux souterraines de la région de Bouira, mémoire de master de l'université de Bouira.

Sites Internet : Wikipedia – Google earth.

ANNEXES

Tableau A : Données climatiques des températures moyennes mensuelles pour la période : 2001-2020

	Jan.	Fév.	Mar.	Avr.	Mai.	Jui.	Juil.	Arm.	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.
2001	11,01	8,80	12,16	17,03	21,68	25,76	29,20	30,40	24,27	19,07	11,85	11,72
2002	9,93	13,51	15,00	15,75	23,24	30,13	31,35	29,59	24,44	20,79	13,40	12,40
2003	8,50	9,01	14,03	19,67	23,05	27,78	31,95	31,13	28,06	18,17	14,69	6,66
2004	7,90	7,90	14,80	19,00	24,50	31,30	32,60	33,40	27,60	22,90	12,10	10,30
2005	5,80	10,80	15,29	18,50	24,50	27,70	31,90	27,70	25,90	17,90	14,10	15,00
2006	20,00	10,40	18,50	17,79	22,60	39,70	33,30	31,90	28,70	24,10	14,80	9,00
2007	7,60	12,00	15,50	17,60	23,10	23,50	32,40	30,80	26,00	20,40	14,10	11,10
2008	13,90	9,30	8,70	18,80	23,79	28,90	35,00	30,50	26,10	21,90	13,20	8,80
2009	9,30	12,30	15,20	17,50	20,29	28,20	30,80	32,50	25,20	22,50	11,70	8,90
2010	5,86	7,45	15,17	19,05	25,92	29,01	34,45	31,73	25,93	22,00	19,74	8,80
2011	6,21	9,33	16,02	21,09	25,41	29,27	32,27	31,37	23,93	22,36	14,43	8,85
2012	9,21	12,24	12,83	16,75	23,23	29,80	31,80	30,92	27,27	20,94	12,87	7,89
2013	8,62	10,92	14,82	19,93	23,57	27,73	33,69	32,52	27,11	18,59	11,02	7,47
2014	8,14	9,48	14,03	15,62	23,09	29,65	33,65	31,95	23,47	19,98	14,06	11,86
2015	10,41	13,37	16,14	20,19	21,70	29,03	32,64	31,96	25,97	19,57	13,81	10,86
2016	9,60	9,25	12,53	19,55	22,37	27,10	32,87	31,99	28,86	18,52	13,37	8,98
2017	7,84	6,77	13,65	18,04	24,97	32,79	35,19	33,68	27,34	22,42	15,16	9,82
2018	10,00	9,39	15,58	18,92	22,79	27,74	32,44	29,96	26,93	24,05	13,24	8,18
2019	9,73	11,49	13,02	20,32	24,83	27,63	33,42	33,32	28,69	21,81	14,98	8,31
2020	7,67	8,28	13,62	20,77	25,85	27,96	31,66	31,35	27,11	20,92		

Tableau B : Données climatiques des précipitations moyennes mensuelles pour la période : 2001-2020

	Jan.	Fév.	Mar.	Avr.	Mai.	Jui.	Juil.	Arm.	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.
2001	20,7	17,6	39,1	0	0	0	2	0	3,1	0	0	1,1
2002	1	0	0	35,8	4,7	0	0	11,5	21,9	4,5	0	0
2003	0	0	0	0	1,5	4,9	0	0	58	1,5	0	0
2004	7,8	01	?5	1,8	5	0	3	2,2	31,2	0,7	37	0
2005	1,4	0	4	0	1	2,7	0	10,7	4,9	0,3	0	0
2006	4,8	1,6	0	0	1,8	0	0	5,3	2,6	2	6,2	13
2007	0	0,3	0,7	0	0,7	2	0	9	5,8	3,2	20	0
2008	4	3	28,5	6	3	0	0,3	6,5	1,7	27,6	1,8	11
2009	26	0	1,4	35,1	1,9	10,7	2	10,8	0	8,4	21,2	24,1
2010	10	0	0,8	0,1	0,6	26	0,1	5,7	12,4	62,4	1,8	0,4
2011	42,4	3,7	1,0	11,5	13,4	0,0	8,3	7,8	34,4	1,9	10,8	38,9
2012	2,7	6,3	6,4	24,5	2,0	0,0	0,0	46,3	17,3	4,9	2,0	1,4
2013	9,1	13,1	0,4	0,0	0,0	19,8	0,0	0,2	68,1	61,8	5,1	11,9
2014	43,0	16,1	5,1	9,0	0,4	0,6	0,0	4,6	109,6	0,3	0,8	2,6
2015	9,9	4,0	2,4	3,3	25,8	1,0	9,2	19,8	16,8	6,6	0,7	0,0
2016	1,2	2,5	41,0	17,9	10,2	21,3	0,0	1,5	19,1	12,9	6,6	0,0
2017	2,2	3,2	7,5	8,0	0,3	8,2.	2,1	0,1	11,0	6,6	19,3	0,8
2018	3,6	0,0	0,3	0,8	4,2	2,1	0,7	2,0	18,0	16,9	7,9	30,8
2019	5,4	18,1	0,2	0,0	10,2	12,9	2,3	0,0	14,1	1,0	11,1	2,5
2020	3,8	14,3	7,5	0,3	0,0	1,0	0,0	1,2	7,3	0,8		

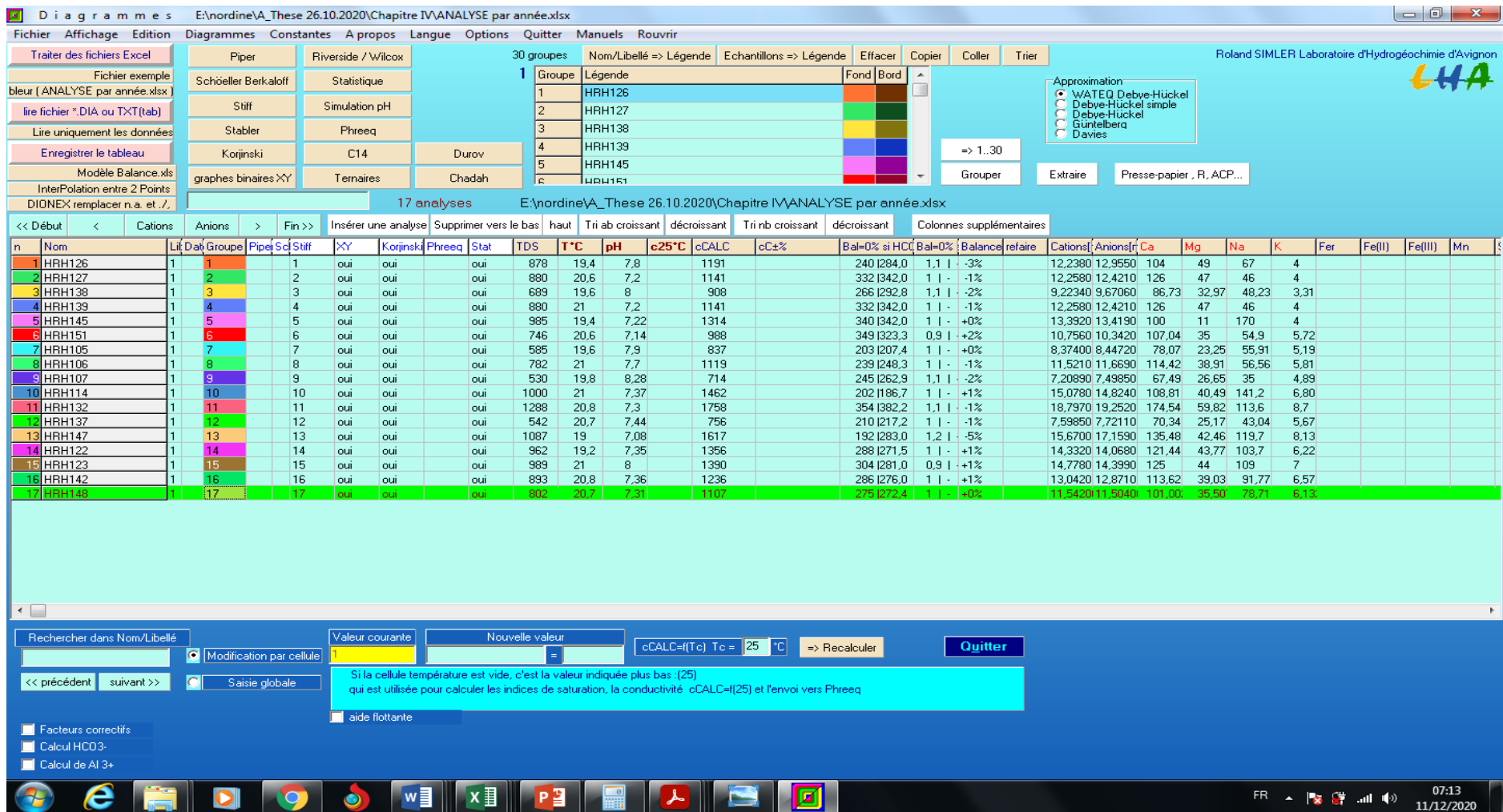


Figure A : Exemple de calcul par Logiciel Diagrammes (Année 2020)

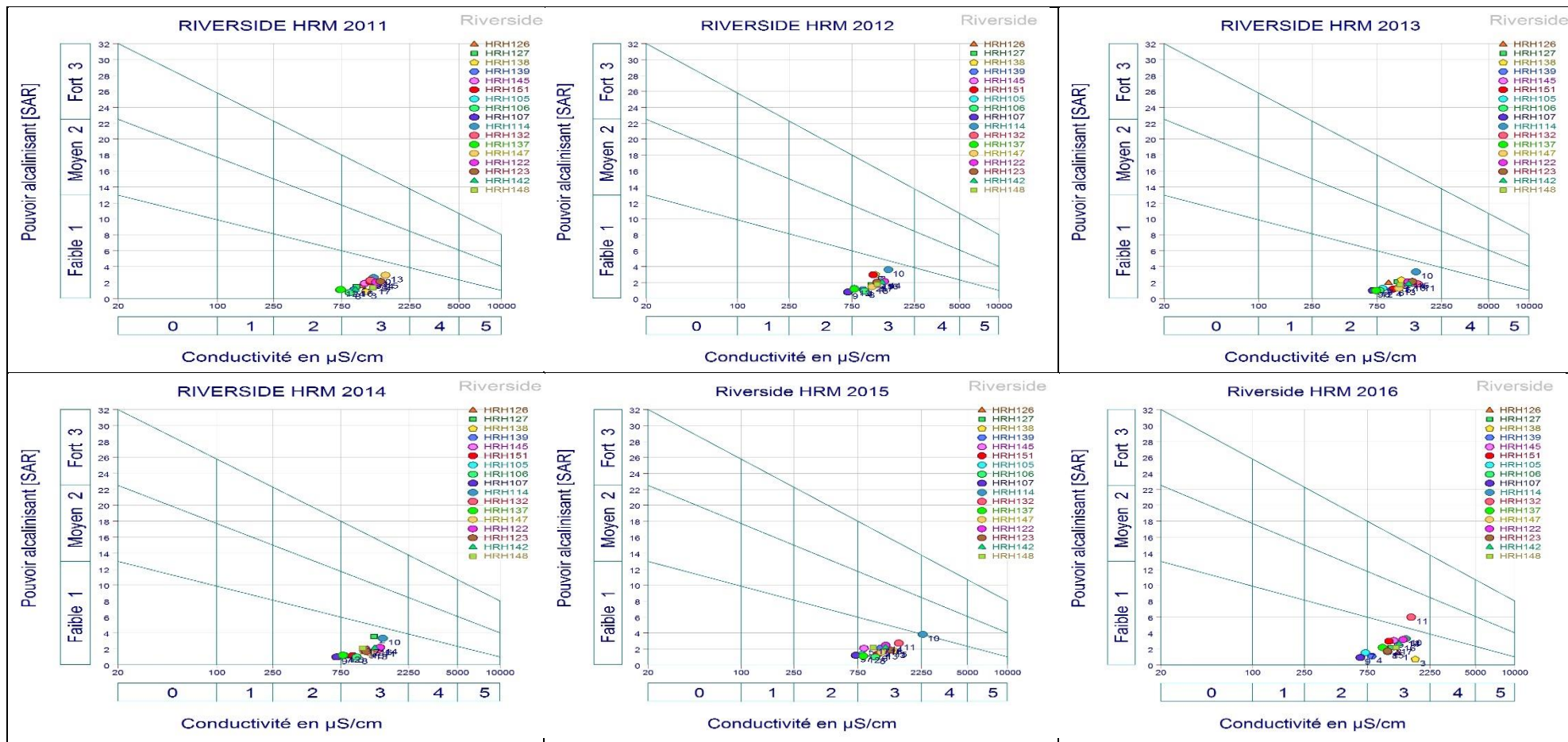


Figure B : Diagrammes RIVERSIDE 2001-2016

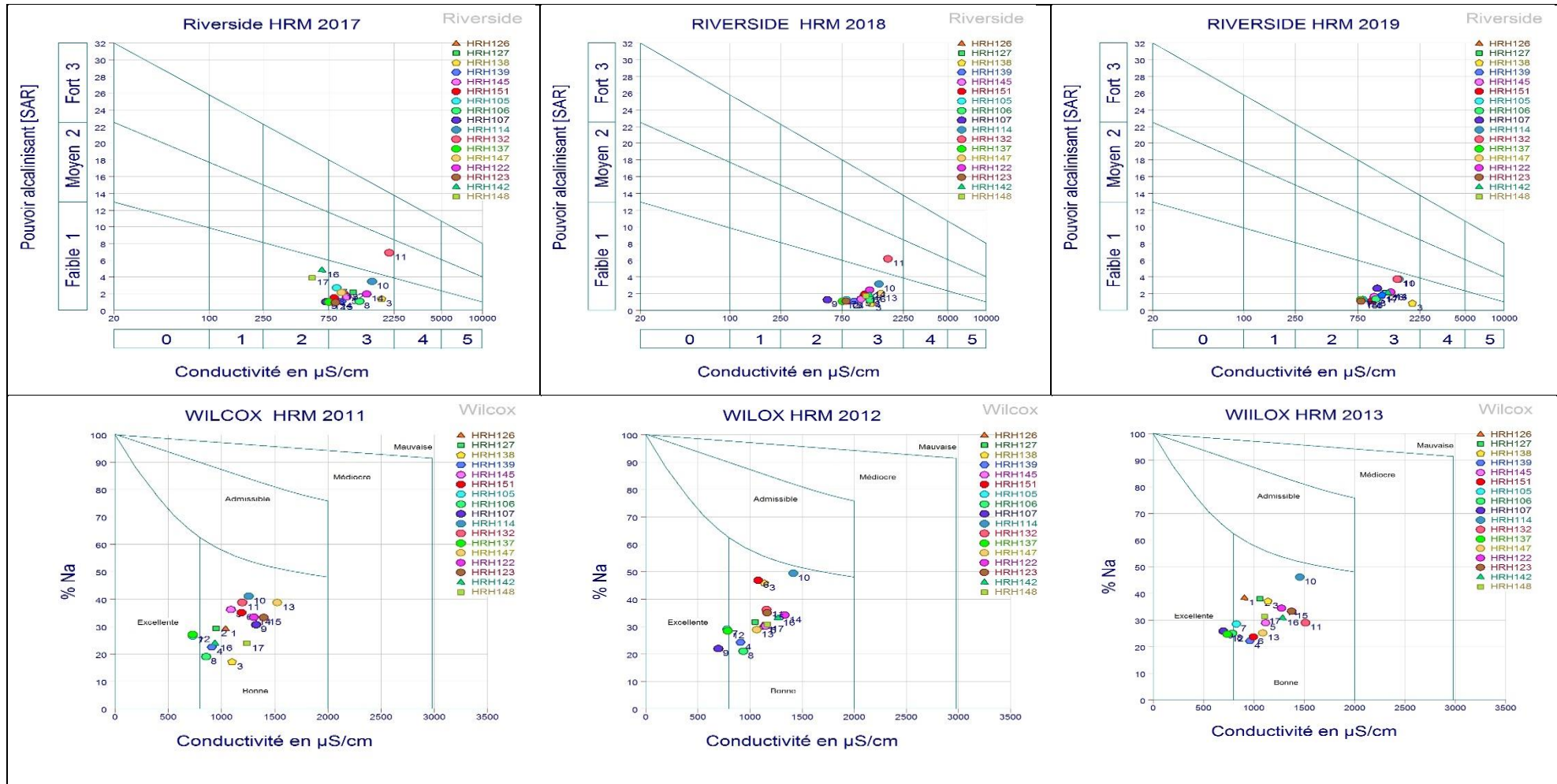
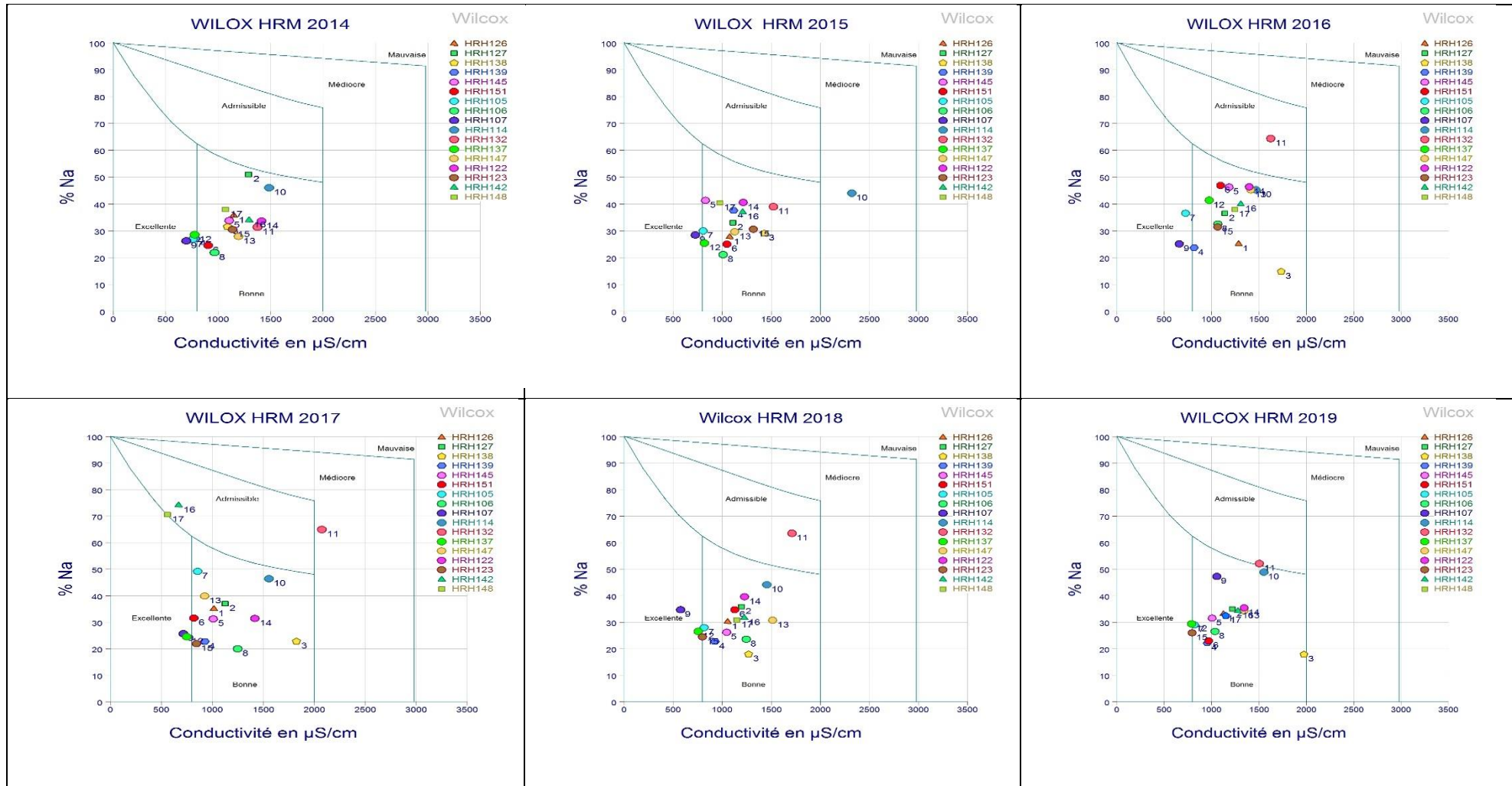


Figure C : Diagrammes RIVERSIDE 2016-2019 ,
Diagrammes WILOX 2011-2013



Diagrammes WILOX 2014-2019