

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJ DE BOUIRA



Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées
Département de Génie Civil

Mémoire de fin d'études

Présenté par :
KADRI SALIMA
MESROUA NOURA

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

Filière : HYDRAULIQUE
Option : RESSOURCES HYDRAULIQUES

Thème :
CARACTERISATION DES EAUX SOUTERRAINES DE
LA REGION DE BOUIRA

Devant le jury composé de :

M. YAHIAOUI Abdelhalim	MCA	UAMOB	Président
Mme REZIG Amina	MAA	UAMOB	Examinatrice
M. METAICHE Mehdi	MCA	UAMOB	Encadreur

Année Universitaire 2019/2020

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier vivement, tous ceux qui nous feront apporter leur soutien pour l'élaboration de ce modeste mémoire, particulièrement nos époux et nos enfants.

Nous remercions notre promoteur Mitaiche Mehdi de nous avoir encadré, aidé et conseillé tout le long de l'élaboration de notre travail.

Notre grand respect s'adresse aux membres de jury qui nous ferons l'honneur d'apprécier ce travail.

Nous tenons à présenter par occasion tout notre respect à tous les enseignants qui ont contribué à notre formation durant notre cycle d'étude.

Un grand remerciement s'adresse à madame Merri Samia et monsieur Arab Kamel qui nous ont beaucoup aidé et soutenu pour la réalisation de ce mémoire.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail particulièrement à mes très chers défunts parents c'est grâce à dieu et à eux ce que je suis aujourd'hui.

A mon cher époux qui m'a encouragé et soutenu moralement et matériellement, sans son aide, ses conseils et ses encouragements, ce travail n'aurait vu le jour.

A mes très chers enfants, je leur souhaite la réussite dans leurs études.

A mes très chères sœurs, je leur souhaite une longue vie pleine de bonheur.

A monsieur Arab Kamel qui m'a beaucoup aidé que dieu le protège.

A mon binôme que dieu exauce ses vœux.

A toutes personnes qui a contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce mémoire.

KADRI SALIMA

DEDICACES

À mes chers parents,

*À l'homme de ma vie ; **mon époux**, qui m'a toujours soutenu,
Et aidé à affronter les difficultés jusqu'au bout,*

*À mes chères enfants : **Faiza, Maroua et Badis**, je leur
souhaite une grande réussite.*

À ma sœurs, mes frère,

Mes nièces, et mes neveux,

À mes beaux-parents,

À mes belles sœurs et mes beaux-frères,

Et leurs enfants,

À mon binôme,

À toutes mes amies,

*À toute personne qui a contribué de près ou de loin à
l'élaboration de ce mémoire.*

MESROUA NOURA

Résumé :

L'objectif de cette étude est de déterminer les principales caractéristiques physico-chimiques des eaux souterraines de la région de Bouira.

Pour identifier la qualité d'une eau, on doit se baser sur des mesures et des analyses physico-chimiques des eaux souterraines de cette région, effectuées par les services de la société de l'Algérienne des eaux (ADE).

Après avoir vérifié leur fiabilité, on a procédé à plusieurs calculs de paramètres qui caractérisent ces eaux souterraines tels que l'alcalinité, la dureté, la conductivité électrique, minéralité, TDS, salinité et les indices de saturation.

Ces eaux sont apparues d'après les résultats : modérément minéralisées et majoritairement non dures, et la totalité de ces eaux sont moyennement agressives ou entartrantes.

A partir des valeurs du SAR qui respectent la norme, le risque d'alcalinité est faible, les eaux des forages étudiées pourraient convenir donc à l'irrigation.

Mots clés : Bouira, qualité des eaux souterraines, les caractéristiques physico-chimiques.

ملخص :

الهدف من هذه الدراسة هو تحديد الخصائص الفيزيائية والكيميائية الرئيسية للمياه الجوفية في منطقة البويرة. للتعرف على جودة المياه، يجب أن نعتمد على القياسات والتحليلات الفيزيائية والكيميائية للمياه الجوفية في هذه المنطقة، والتي تقوم شركة الجزائرية للمياه.

بعد التحقق من موثوقيتها، تم إجراء العديد من الحسابات و العمليات من أجل توضيح مميزات هذه المياه الجوفية مثل القلوية، والصلابة، والتوصيل الكهربائي، والمعادن والمواد الصلبة الذائبة، والملوحة، والتشبع.

أظهرت نتائج الدراسة ان هذه المياه تحتوي على المعادن بشكل معتدل وليست صلبة في الغالب، وجميع هذه من قيم معدل الامتصاص النوعي التي تحترم المعيار، فإن خطر المياه تقريباً عدوانية او مرسبة بشكل معتدل. القلوية منخفض، وبالتالي يمكن أن تكون مياه الآبار المدروسة مناسبة للري.

الكلمات المفتاحية: البويرة، جودة المياه الجوفية، الخصائص الفيزيائية والكيميائية.

Abstract:

The objective of this study is to determine the main physicochemical characteristics of groundwater in the Bouira region.

To identify the quality of water, we must base ourselves on measurements and physicochemical analyzes of groundwater in this region, carried out by the services of the Algerian Water Company (ADE).

After verifying their reliability, several calculations of parameters that characterize these groundwater such as alkalinity, hardness, electrical conductivity, minerality, TDS, salinity and saturation indices are carried out.

These waters appeared from the results to be moderately mineralized and not predominantly hard, almost all of these waters are moderately aggressive and scaling.

From the values of the SAR which respect the standard, the risk of alkalinity is low, the water of the studied boreholes could therefore be suitable for irrigation.

Keywords: Bouira, groundwater quality, physico-chemical characteristics.

Table des matières

Introduction générale :.....	15
Chapitre I : Recherche bibliographique sur les caractéristiques des eaux souterraines	
I.1 Introduction :.....	2
I.2 Les états de l'eau :.....	2
I.3 Les sources naturelles de l'eau :.....	3
I.3.1 Les eaux de pluie :.....	3
I.3.2 Les eaux de mers :.....	4
I.3.3 Les eaux de surface :.....	4
I.3.4 Les eaux souterraines :.....	4
I.3.4.1 Les nappes de l'eau :.....	5
I.3.4.2 Les différents types de nappes :.....	5
I.3.4.2.1 La nappe libre :.....	5
I.3.4.2.2 La nappe perchée :.....	5
I.3.4.2.3 La nappe phréatique :.....	6
I.3.4.2.4 La nappe alluviale :.....	6
I.3.4.2.5 La nappe captive :.....	7
I.4 Cycle de l'eau.....	7
I.5 Les eaux d'approvisionnement :.....	8
I.5.1 Eaux de surface :.....	9
I.5.2 Eaux souterraines :.....	9
I.6 Les Principales différences entre les eaux souterraines et les eaux de surface :.....	9
I.7 La circulation de l'eau dans le sous-sol :.....	10
I.7.1 La zone vadose ou non saturée (ZNS) :.....	10
I.7.2 La frange capillaire :.....	11
I.7.3 La zone saturée (ZS) :.....	11
I.8 Origines des eaux souterraines :.....	11
I.8.1 Eaux météoriques :.....	11
I.8.2 Eaux connées :.....	11
I.8.3 Eaux juvéniles :.....	12

I.9 La qualité de l'eau de consommation.....	12
I.9.1 La qualité des eaux souterraines :.....	12
I.9.1.1 Température :	12
I.9.1.2 Conductivité électrique :	12
I.9.1.3 Potentiel d'hydrogène (pH) :.....	12
I.9.1.4 Matières en suspension (MES) :.....	13
I.9.1.5 Ion de calcium (Ca ²⁺) :.....	13
I.9.1.6 Ion de magnésium (Mg ²⁺)	13
I.9.1.7 Ion de sodium (Na ⁺) :	13
I.9.1.8 Ion de potassium (K ⁺) :.....	14
I.9.1.9 Ion de fer (Fe ²⁺) :.....	14
I.9.1.10 Chlorures (Cl ⁻) :.....	14
I.9.1.11 Nitrates (NO ₃ ⁻) :.....	14
I.9.1.12 Nitrites (NO ₂ ⁻) :.....	14
I.9.1.13 Sulfates (SO ₄ ²⁻) :.....	15
I.9.1.14 Fluor (F).....	15
I.10 La pollution des eaux souterraines :.....	15
I.10.1 Les types de pollution de l'eau :.....	15
I.10.1.1 La pollution bactériologique :	15
I.10.1.2 La pollution chimique :	15
I.10.1.3 La pollution des milieux aquatiques :	15
I.10.2 Les différentes sources de pollution :.....	16
I.10.2.1 La pollution domestique :.....	16
I.10.2.2 La pollution industrielle :	16
I.10.2.3 La pollution agricole :	16
I.10.3 Les solutions pour lutter contre la pollution des eaux souterraines :.....	16
Conclusion :.....	17

Chapitre II : Présentation hydrologique et hydrogéologique de la zone d'étude

II.1 Introduction :.....	18
II.2 Présentation hydrologique de la zone d'étude :.....	18
II.2.1 Présentation de la wilaya de Bouira :.....	18
II.2.1.1 Situation géographique de la wilaya de Bouira :	18

II.2.1.2 Présentation administrative de la wilaya de Bouira :.....	19
II.2.2 Contexte géographique :.....	20
II.2.2.1 Relief :.....	20
II.2.2.2 Réseau hydrographique :.....	21
II.2.3 Le contexte climatologique :.....	22
II.2.3.1 Précipitation :.....	23
II.2.3.1.1 Précipitations moyennes mensuelles :.....	23
II.2.3.1.2 Evaluation de la lame d'eau précipitée :.....	24
II.2.3.1.3 Précipitations moyennes interannuelles :.....	25
II.2.3.1.4 La variabilité des précipitations annuelles.....	25
II.2.3.2 Température :.....	26
II.2.3.2.1 Températures moyennes mensuelles :.....	26
II.2.3.2.2 Températures moyennes interannuelles :.....	27
II.2.3.3 Le vent :.....	27
II.2.3.4 Humidité relative :.....	28
II.2.3.5 Insolation :.....	29
II.2.3.6 Evaporation :.....	30
II.2.3.6.1 Relation évaporation –température :.....	31
II.2.3.6.2 Evapotranspiration :.....	31
II.2.3.6.2.1 Estimation de l'évapotranspiration potentielle (ETP) :.....	31
II.2.3.6.2.2 Calcul de l'évapotranspiration réelle (ETR) :.....	34
II.2.3.7 Estimation de la lame ruisselée (R).....	35
II.2.3.8 Calcul de l'infiltration.....	35
II.2.3.9 Détermination du type du climat.....	36
II.2.3.9.1 Indice annuelle d'aridité de De Martonne :.....	36
II.2.3.9.2 Diagramme pluviométrique (Ombrothermique) :.....	37
II.2.4 Contexte socio-économique.....	38
II.2.4.1 Population.....	38
II.2.4.2 Activité agricole.....	38
II.2.4.3 Activité industrielle.....	38
II.2.4.4 Ressources hydriques.....	38
II.2.4.5 Activité touristique.....	38
II.2.4.6 Réseau électrique.....	39

II.3 Présentation hydrogéologique de la région d'étude.....	39
II.3 Cadre géologique :	40
II.3.1 Géologie locale :.....	40
II.3.1.1 Les séries autochtones ou parautochtones :	40
II.3.1.2 Les séries allochtones :	40
II.3.1.3 Les formations récentes post-nappes :	41
II.3.2 Hydrogéologie :.....	41
II.3.3 Présentation des données d'analyse physico-chimique :.....	42
Conclusion.....	48

Chapitre III : Calcul des différents paramètres caractéristiques des eaux souterraines et interprétation des résultats

III.1 Introduction :	49
III.2 Vérification de la balance ionique.....	49
III.2.1 Balance ionique :.....	49
III.2.2 Activité ionique :.....	53
III.3 Calcul des titres de l'eau :	57
III.3.1 Titre alcalimétrique (alcalinité) :.....	57
III.3.1.1 Titre alcalimétrique simple (alcalinité simple) :.....	58
III.3.1.2 Titre alcalimétrique complet (alcalinité complète) :.....	58
III.3.2 Titre hydrométrique (Dureté) :.....	59
III.3.2.1 Dureté totale :	59
III.3.2.2 Dureté calcique :	60
III.3.2.3 Dureté magnésienne :	60
III.3.3 Comparaison entre TH et TAC :	62
III.4 Etude de l'équilibre calco- carbonique de l'eau (indice de saturation) :.....	62
III.4.1 Logiciel Equil1F :	62
III.4.2 Indice de Langelier :.....	63
III.4.3 Indice de saturation de Ryznar (indice de stabilité) :.....	65
III.4.4 Indice de saturation de Larson IC (indice de corrosion) :.....	66
III.4.5 Indice de saturation de Leroy :.....	67
III.5 Classification des eaux :	68
III. 5.1 Salinité :	68

III.5.2 Total des solides dissous (TDS) :.....	69
III.5.3 Conductivité :	70
III.5.4 Selon la réglementation européenne :	72
III.5.5 Selon Voronov 2000 :	74
III.6 Vérification aux normes Algériennes :	74
III.6.1 Température (T) :	75
III.6.2 Potentiel hydrogène (pH) :	75
III.6.3 Turbidité :	76
III.6.4 Conductivité électrique :	77
III.6.5 La dureté totale :	77
III.6.6 Calcium Ca^{2+} :	78
III.6.7 Magnésium (Mg^{2+}) :	79
III.6.8 Sodium (Na^+) :	79
III.6.9 Potassium K^+ :	80
III.6.10 Bicarbonates (HCO_3^-) :	80
III.6.11 Chlorures (Cl^-) :	81
III.6.12 Sulfate (SO_4^{2-}) :	81
III.6.13 Nitrates (NO_3^-) :	82
III.7 Etude de l'aptitude des eaux à l'irrigation :	83
Conclusion :	823
 Conclusion générale :	 845
Références bibliographiques	
Annexes	
Cartes géographique de localisation des forages	

Liste des figures

Figure I.1 : Structure cristalline des molécules.....	2
Figure I. 2 : Désordre des molécules.	3
Figure I. 3 : Désordre des molécules.	3
Figure I. 4: Représentation des eaux souterraines	4
Figure I. 5: La nappe libre.....	5
Figure I. 6: La nappe perchée	6
Figure I. 7: La nappe phréatique	6
Figure I. 8: La nappe alluviale	7
Figure I. 9: La nappe captive	7
Figure I. 10 : Cycle de l'eau.....	8
Figure I. 11 : Circulation de l'eau dans le sous-sol	11
Figure I. 12 : Différentes sources de pollution pouvant affecter les eaux souterraines - Exemple d'un aquifère calcaire.	17
Figure II. 1: Situation géographique de la wilaya de Bouira	18
Figure II. 2: Localisation. Administrative de la wilaya de Bouira	20
Figure II. 3: Situation géographique de Bouira et des sous bassins versants (1, 2, 3).....	20
Figure II. 4: Situation des sous bassins versants par rapport aux grands bassins versants de la région de Bouira.	22
Figure II. 5: Histogramme des précipitations moyennes mensuelles pour la période (2003-2013).....	24
Figure II. 6: Variations du coefficient pluviométrique à la station de Bouira (2003/2013).....	26
Figure II. 7: Répartition des températures moyennes mensuelles, maximales et minimales (station de Bouira) pour une période de (2003-2013).....	27
Figure II. 8: Répartition mensuelle du vent, max et moy de la station de Bouira.....	28
Figure II. 9: Humidité relative pour la station de Bouira période (2003-2013)	29
Figure II. 10: Insolation moyenne mensuelle de la station de Bouira de la période (2003-2013).....	29
Figure II. 11:Evaporation pour la région de Bouira (2003-2013, station de Bouira)	30
Figure II. 12: Évolution de l'évaporation en fonction de la température	31
Figure II. 13: Abaque de l'indice d'aridité annuel de De Martonne	37
Figure II. 14: Diagramme ombrothermique de la région de Bouira	37
Figure II. 15: Localisation du plateau d'El Asnam.....	40

Figure III. 1: Représentation de la balance ionique pour l'année 2006.....	52
Figure III. 2: Variation de l'alcalinité complète (TAC) pour l'année 2006.	59
Figure III. 3: Variation de la dureté pour l'année 2006.	61
Figure III. 4: Comparaison du TH par rapport au TAC	62
Figure III. 5 : Variation de l'indice de Langelier. pour l'année 2006	65
Figure III. 6 : Variation de l'indice de Ryznar pour l'année 2006.	66
Figure III. 7 : Variation de l'indice de Larson. pour l'année 2006.....	66
Figure III. 8 : Variation de l'indice de Leroy pour l'année 2006	68
Figure III. 9: Variation de la salinité des eaux de forages étudiés pour l'année 2006	69
Figure III. 10 : Variation de la TDS max et TDS min pour l'année 2006.....	70
Figure III. 11 : Variation de la conductivité mesurée et calculée à (25°C). pour l'année 2006.....	72
Figure III. 12 : Variation de la température dans les eaux de forages étudiées.	75
Figure III. 13 : Variation du pH des eaux des forages de l'année 2006.	76
Figure III. 14 : Variation du pH des eaux des forages de l'année 2006	76
Figure III. 15 : Variation de la conductivité électrique des eaux des forages de l'année 2006.....	77
Figure III. 16 : Variation de la dureté des eaux des forages de l'année 2006.	78
Figure III. 17 : Variation de la teneur en calcium des eaux des forages de l'année 2006.....	78
Figure III. 18: Variation de la teneur en magnésium des eaux des forages de l'année 2006.....	79
Figure III. 19 : Variation de la teneur en sodium des eaux des forages de l'année 2006.....	79
Figure III. 20 : Variation de la teneur en potassium des eaux des forages de l'année 2006.....	80
Figure III. 21 : Variation de la teneur des bicarbonates dans les eaux des forages de l'année 2006.....	80
Figure III. 22 : Variation de la teneur en chlorure des eaux des forages de l'année 2006.....	81
Figure III. 23 : Variation de la teneur en sulfates des eaux des forages de l'année 2006	82
Figure III. 24 : Variation de la teneur en nitrates des eaux des forages de l'année 2006.....	82
Figure III. 25: Variation des valeurs de SAR pour les eaux des forages de l'année 2006	84

Liste des tableaux

Tableau I. 1: Comparaison entre les eaux de surface et les eaux souterraines	10
Tableau II. 1: Découpage administrative de la wilaya de Bouira.....	19
Tableau II. 2: Précipitations moyennes mensuelles pour la période (2003-2013)	23
Tableau II. 3: Evaluation de la lame précipitée par la méthode arithmétique	24
Tableau II. 4: Précipitations moyennes interannuelles à la station de Bouira.....	25
Tableau II. 5: Variabilité des coefficients pluviométriques	25
Tableau II. 6: Température moyenne mensuelle à la station de Bouira (2003-2013)	26
Tableau II. 7: Températures moyennes interannuelles à la station de Bouira de la période (2003-2013).....	27
Tableau II. 8: La vitesse du vent (max et moy) mensuelle en m/s période (2003-2013).....	28
Tableau II. 9: L'humidité moyenne mensuelle en % de la période (2003-2013).....	28
Tableau II. 10: Insolations mensuelles au niveau de la station de Bouira (2003-2013).....	29
Tableau II. 11: Evaporation moyenne mensuelle à la station de Bouira (2003-2013)	30
Tableau II. 12: Répartition de l'évaporation moyenne mensuelle en fonction de la température.....	31
Tableau II. 13: Estimation de l'évapotranspiration potentielle moyenne mensuelle en mm par la formule de Thornthwaite	32
Tableau II. 14: Estimation de l'évapotranspiration potentielle moyenne mensuelle en mm par la formule Serra	33
Tableau II. 15: Les valeurs d'évapotranspiration potentielle et évapotranspiration réelle de la région de Bouira	35
Tableau II. 16: Résultats récapitulatifs de la lame ruisselée.....	35
Tableau II. 17: Résultats d'infiltration.....	35
Tableau II. 18: Indice d'aridité annuelle pour la station de Bouira	36
Tableau II. 19 : Données d'analyse des paramètres physico-chimiques	42
Tableau III. 1: Valeurs calculées de la balance ionique pour l'année 2006..	50
Tableau III. 2: Les forages dont leurs valeur est superieur à 10%.....	52
Tableau III. 3: Diamètre effectif moyen de l'ion hydraté.....	54
Tableau III. 4: Valeurs de la force ionique de chaque forage pour l'année 2006.....	54
Tableau III. 5: Coefficient d'activité ionique γ_i pour l'année 2006.....	55
Tableau III. 6: Valeurs calculées de l'activité ionique pour l'année 2006.	56

Tableau III. 7: Teneurs des ions majeurs en mg/l pour l'année 2006.	57
Tableau III. 8: Valeurs calculées de l'alcalinité simple et complet des eaux des forages de l'année 2006.	58
Tableau III. 9: Classes des eaux en °F selon W.THEOBALD et A.GAMA,1969.	60
Tableau III. 10: Valeurs calculées de la dureté des eaux des forages de l'année 2006.	61
Tableau III. 11 : Variation des constantes thermodynamiques en fonction de la température.....	63
Tableau III. 12 : Valeurs de pHs des eaux des forages de l'année 2006.....	64
Tableau III. 13: Variation de l'indice de Langelier IL pour l'année 2006..	64
Tableau III. 14 : Classification de l'indice de saturation de Ryznar (indice de stabilité) pour l'année 2006..	65
Tableau III. 15 : Calcul de l'indice de Ryznar pour l'année 2006..	65
Tableau III. 16 : Classification de l'indice de Larson pour l'année 2006. :	66
Tableau III. 17 : Calcul de l'indice de corrosivité pour l'année 2006.	66
Tableau III. 18 : Calcul de l'indice de Leroy pour l'année 2006.	67
Tableau III. 19 : Valeurs de salinité pour l'année 2006.....	69
Tableau III. 20: Valeurs de la TDS max et TDS min. pour l'année 2006.	70
Tableau III. 21 : Classification des eaux en fonction de la conductivité.	71
Tableau III. 22 : Valeurs de la conductivité pour l'année 2006..	71
Tableau III. 23: Classification des eaux.....	73
Tableau III. 24 : Classification des eaux selon Voronov.	74
Tableau III. 25 : Normes des paramètres physico-chimiques des eaux.....	74
Tableau III. 26 : Résultats de calcul du SAR pour les eaux des forages de l'année 2006.....	83

Introduction Générale

Introduction générale :

L'eau est la seule molécule à être présente sous trois états sur la terre : solide, liquide et gazeuse ; elle change d'état sans l'intervention de l'être humain, c'est aussi le fondement de la vie sur terre.

Cette précieuse eau est indispensable pour la survie de l'humanité et de toute espèce animale ou végétale et pour l'environnement.

En Algérie, l'approvisionnement en eau potable se fait à partir d'eaux de surface par le biais des retenues d'eaux ou barrages avec acheminement de l'eau dans un réseau de canalisation, mais de plus en plus l'individu et la municipalité se tournent vers les nappes phréatiques qui renferment un volume énorme d'eau exploitable (Chekroud, 2007).

Les eaux souterraines en Algérie sont polluées à partir de la surface et sont irréversiblement endommagées par l'intrusion d'eau saline, la surexploitation des couches aquifères entame la capacité de celle-ci à retenir l'eau, ce qui provoque l'enfoncement des couches sous-jacentes. Certaines régions algériennes se révèlent incapables de fournir en quantité suffisante de l'eau potable et des équipements d'hygiène et ainsi l'eau est menacée dans sa qualité et sa quantité (Remini, 2010).

A cet effet, l'objectif de cette présente étude est la caractérisation des eaux souterraines de la région de Bouira. Elle est divisée en trois chapitres.

Le premier chapitre consiste à l'étude bibliographique de l'eau de façon générale, et de l'eau souterraine de façon particulière dans lequel on a cité son origine, sa qualité physico-chimique et bactériologique, ainsi que la pollution des eaux souterraines.

Le deuxième chapitre concerne l'étude hydrologique et hydrogéologique de la région de Bouira, qui comprend au départ la présentation de la wilaya de Bouira, après l'hydrologie, la géologie, et l'hydrogéologie, on le termine par une présentation des données d'analyse physico-chimique prélevées dans plusieurs forages de cette région d'étude. Ensuite la présentation de la situation géographique de la région de Bouira, après l'hydrologie, la géologie et l'hydrogéologie.

Le troisième chapitre est consacré en premier lieu, aux calculs des différents paramètres qui influencent sur la qualité des eaux souterraines, avec leurs interprétations, il comporte six phases :

- Vérification de la fiabilité des données physico-chimique (balance ionique).
- Calcul des titres de l'eau (alcalinité simple et complète, dureté calcique, magnésienne et totale, activité ionique, conductivité électrique, minéralité, TDS, salinité).
- Etude de l'équilibre calco-carbonique (calcul des indices de saturation et interprétation, Langelier, Larson, Ryznar, Leroy).
- Classification des eaux (classification selon la réglementation européenne, de Voronov).
- Vérification aux normes Algériennes.
- Etude de l'aptitude des eaux souterraines à l'irrigation.

A la fin, nous tirons une conclusion générale.

Chapitre I :
Recherche
bibliographique sur les
caractéristiques des
eaux souterraines

I.1 Introduction :

L'eau est l'élément liquide le plus répandu sur la surface de la terre. Elle est indispensable à toute forme de vie sur la planète. L'homme est composé à 65% d'eau, les plantes à plus de 85%. L'homme doit boire au moins 1.5 litres d'eau par jour (le reste est contenu dans les aliments). L'eau sert à faire pousser les plantes, grâce à la pluie, puis par irrigation des rivières et fleuves.

Notre planète est appelée « planète bleue » car l'eau des océans et des mers recouvre 71% de la surface de la terre, contre 29% pour les terres émergées... 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, et l'eau douce représente à peine 3% du volume total de l'eau présente sur terre.

Sur ces 3% d'eau douce, 99% sont très difficilement exploitables : 77% sont gelés au niveau des calottes polaires et dans les glaciers de montagne et 22% sont profondément enfouis dans le sous-sol. Sur toute l'eau présente sur la terre, moins de 1% est donc véritablement disponible pour les êtres vivants qui en dépendent, soit environ 9 millions de km³.

L'eau peut se trouver sous trois états : liquide, solide et gazeuse dépendant des conditions particulières de température et de pression. Elle a des propriétés physico-chimiques assez particulières par rapport aux autres liquides car elle est un excellent solvant, elle solubilise de nombreux gaz, corps minéraux et organiques, ionise les électrolytes et disperse les colloïdes électro- chargés (Aissaoui, 2013).

I.2 Les états de l'eau :

L'eau est un constituant fondamental de notre environnement. Elle se présente sous différents états : sous forme solide, liquide et gazeuse.

-Etat solide : L'eau est solide quand la température est inférieure à 0 °C. C'est la glace de la banquise au niveau des pôles, celle des glaciers alpins, la neige sur laquelle nous pouvons skier, le givre qui se forme par temps froid sur les arbres en hiver. Les calottes glaciaires et les glaciers représentent (2,1%) de l'eau présente sur la Terre.

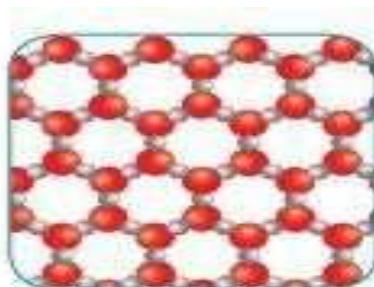


Figure I.1 : Structure cristalline des molécules.

-Etat liquide : Les plus grands réservoirs d'eau liquide sont les océans et les mers constitués d'eau salée ; ils représentent (97,2%) de l'eau de la Terre. Les autres réservoirs d'eau liquide sont les lacs, les rivières et les eaux souterraines. Ils sont constitués d'eau douce. Les rivières correspondent à (0,01%) de l'eau présente sur Terre et les eaux souterraines à (0,06%) de cette eau.

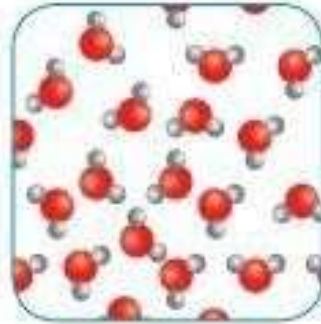


Figure I. 2 : Désordre des molécules.

-Etat gazeux : Dans l'atmosphère, l'eau existe sous forme de gaz. C'est la vapeur d'eau présente dans l'air humide. Elle ne correspond qu'à (0,001%) de l'eau de la Terre (Encarta, 2005).

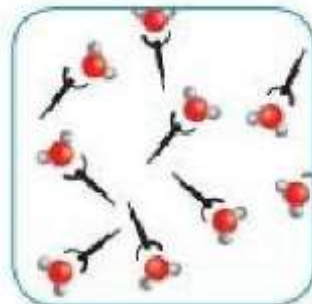


Figure I. 3 : Désordre des molécules.

I.3 Les sources naturelles de l'eau :

Les réserves disponibles d'eaux naturelles sont constituées : des eaux souterraines (infiltration, nappe), des eaux de surface retenues ou en écoulement (barrages, lacs, rivières), des eaux de mer et des eaux de pluie.

I.3.1 Les eaux de pluie :

Ce 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.

I.3.2 Les eaux de mers :

Les mers et les océans constituent des énormes réservoirs d'eau. Elles représentent près de 97.4% du volume d'eau existant actuellement sur notre planète. Le reste est la part des eaux continentales (eaux souterraine et superficielles).

Les eaux de mers sont caractérisées par une grande salinité. Elles sont dénommées aussi « eaux saumâtres », ce qui rend leur utilisation difficile. Notamment leur coût très élevé pour leur traitement (Ayad Wissam, 2017).

I.3.3 Les eaux de surface :

Elles sont appelées aussi eaux superficielles, sont constituées, par opposition aux eaux souterraines, de l'ensemble des masses d'eau courantes ou stagnantes, douces, saumâtres ou salées qui sont en contact direct avec l'atmosphère.

I.3.4 Les eaux souterraines :

Ce sont toutes les eaux se trouvant sous la surface du sol, dans la zone de saturation et en contact direct avec le sol ou le sous-sol. Contrairement aux eaux de surface, les eaux souterraines ne sont pas rassemblées comme un ruisseau ou une rivière, mais elles circulent en profondeur dans les formations géologiques qui constituent l'espace souterrain.

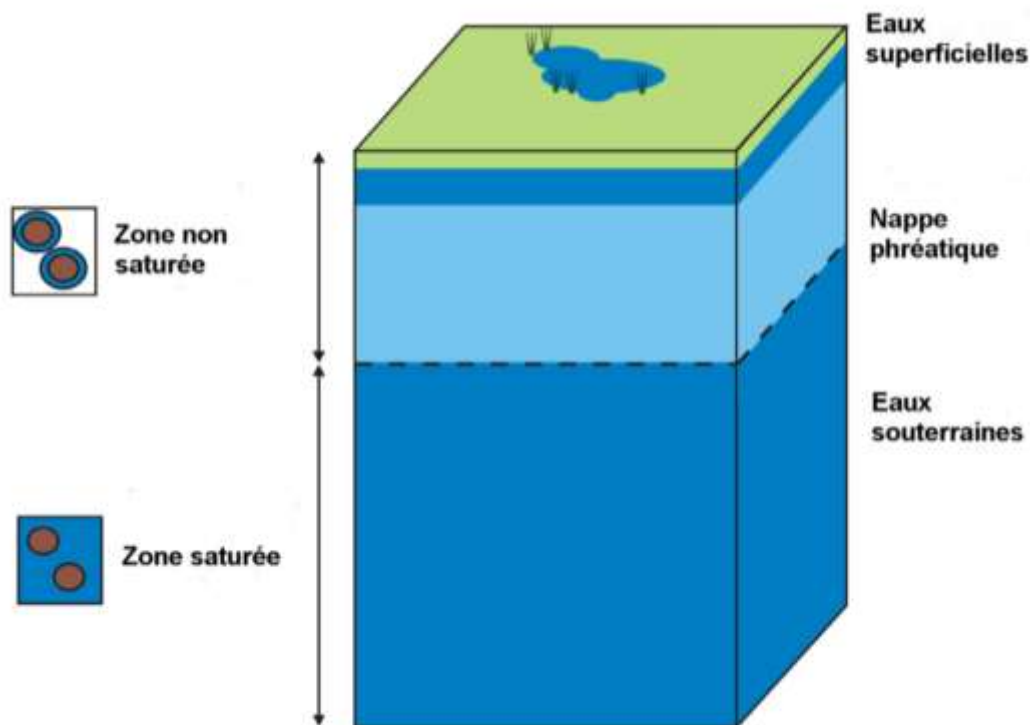


Figure I. 4: Représentation des eaux souterraines (RAMSAR, 2010)

I.3.4.1 Les nappes d'eaux :

Une nappe d'eau souterraine est une eau contenue dans les interstices ou les fissures d'une roche du sous-sol qu'on nomme aquifère. Seule l'eau libre, c'est-à-dire capable de circuler dans la roche, fait partie de la nappe. Ce type de réservoir peut être exploité et peut approvisionner les réseaux de distribution d'eau potable. Le rapport de la nappe avec l'aquifère est le même qu'entre le contenu et son contenant.

I.3.4.2 Les différents types de nappes :

I.3.4.2.1 La nappe libre :

La nappe est dite « libre » lorsque son niveau peut varier sans être bloqué par une couche imperméable. Si on crée un puits dans une telle nappe, le niveau de l'eau reste inchangé.

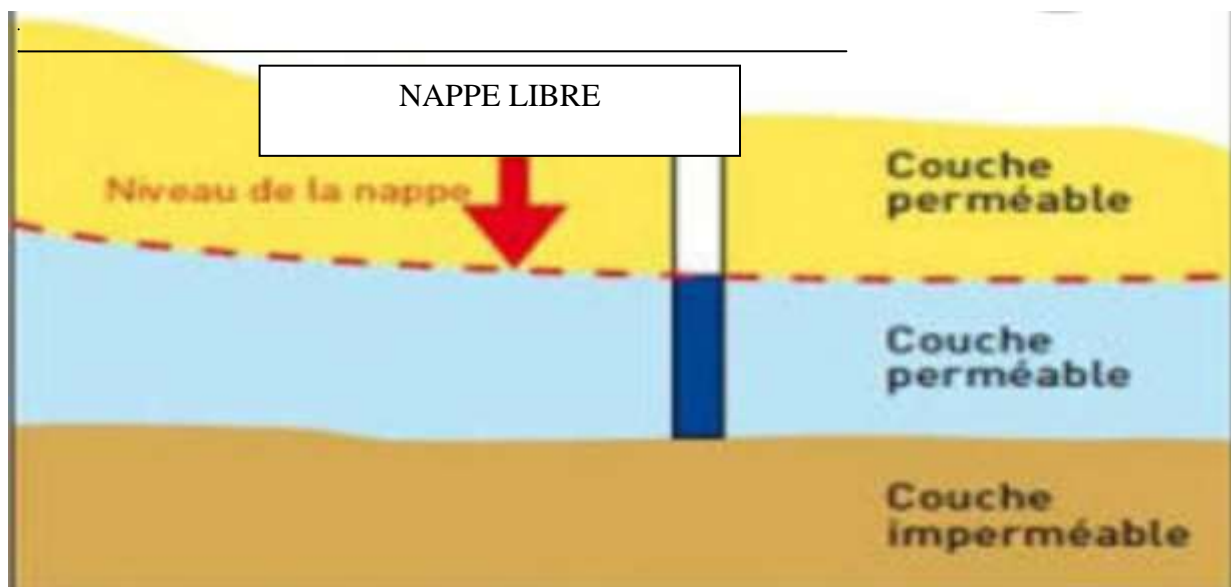


Figure I. 5: La nappe libre

I.3.4.2.2 La nappe perchée :

C'est une nappe libre permanente ou temporaire, formée dans une zone non saturée, et qui surmonte une nappe libre de plus grande extension.

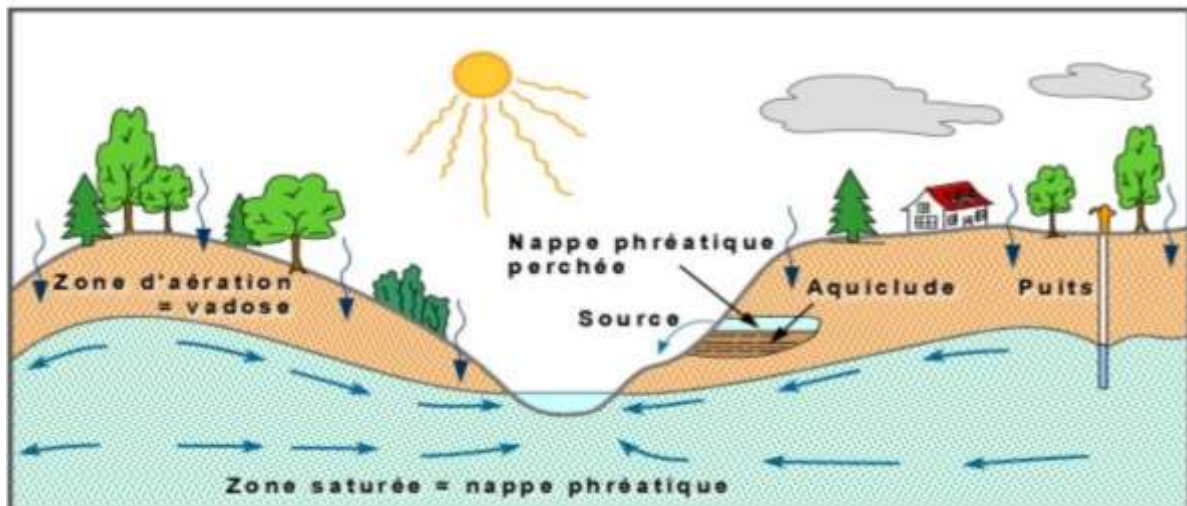


Figure I. 6: La nappe perchée

I.3.4.2.3 La nappe phréatique :

C'est une nappe d'eau que l'on rencontre à faible profondeur. Elle alimente traditionnellement les puits et les sources en eau potable. C'est la nappe la plus exposée à la pollution en provenance de la surface.

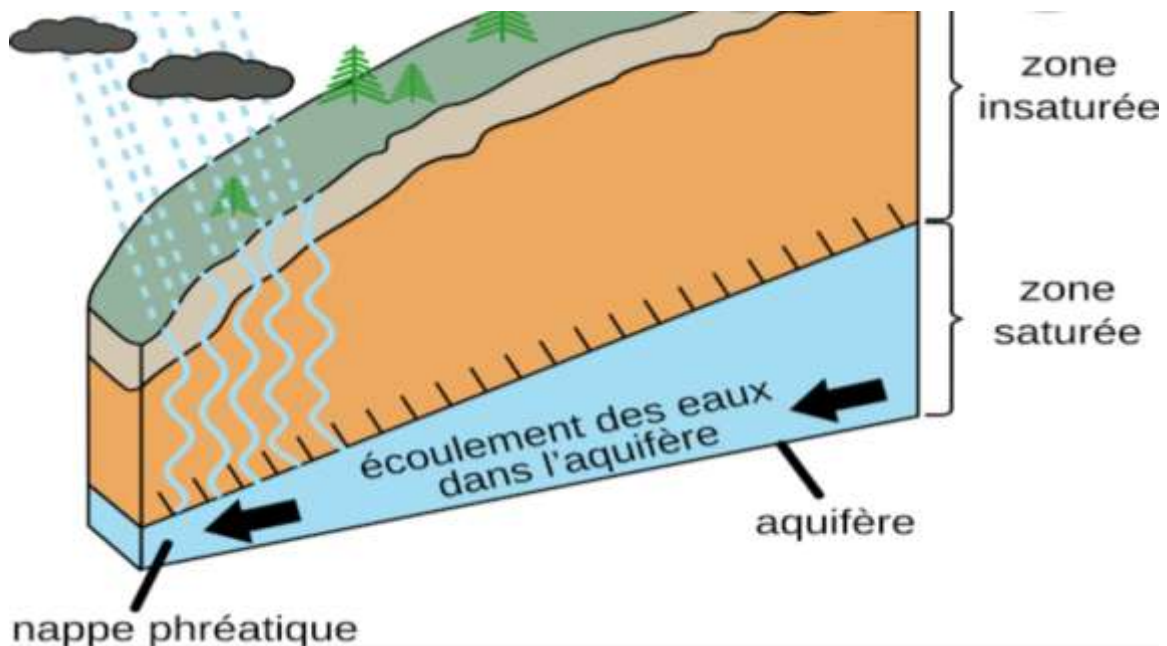


Figure I. 7: La nappe phréatique

I.3.4.2.4 La nappe alluviale :

C'est un cas particulier de nappe libre (nappe peu profonde située sous un sol perméable). Les nappes alluviales sont des nappes qui circulent dans les sédiments des rivières, c'est une masse d'eau se trouvant dans des terrains alluvionnaires.

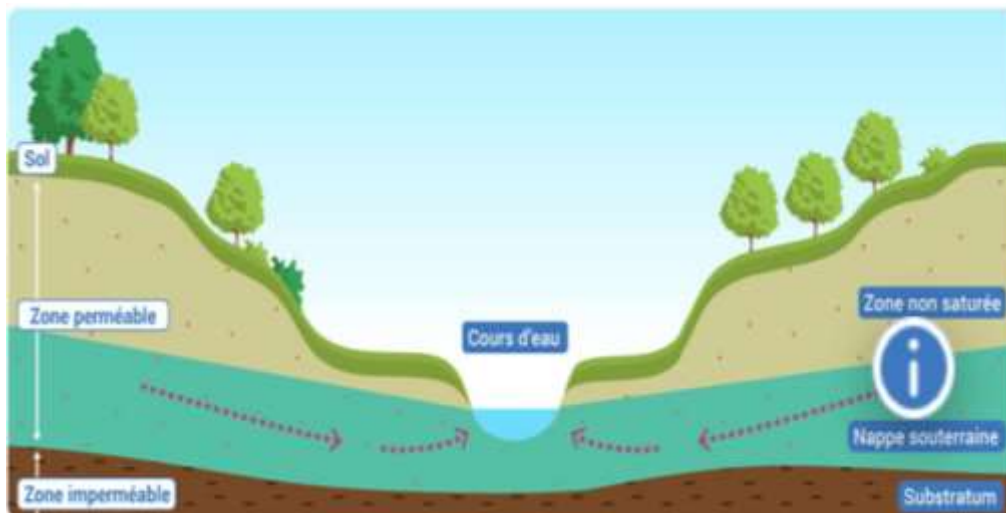


Figure I. 8: La nappe alluviale

I.3.4.2.5 La nappe captive :

C'est une nappe qui est surmontée par une formation peu perméable où la surface aquifère est très poreuse et dont la charge hydraulique (surface piézométrique) de l'eau qu'elle contient est supérieure au toit de la nappe. Elle est sous pression.

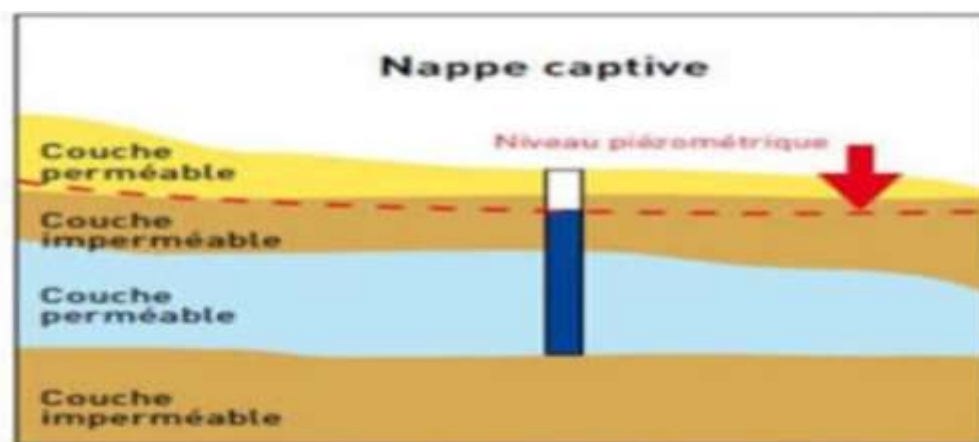


Figure I. 9: La nappe captive

I.4 Cycle de l'eau :

La masse d'eau totale de l'hydrosphère n'évolue pas au cours des années, elle reste toujours constante : l'eau s'évapore, forme la vapeur d'eau qui, en se transformant en pluie, va alimenter les mers, les océans et les nappes souterraines.

On peut appliquer au cycle de l'eau la fameuse phrase de Lavoisier : « Rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme ». L'eau change d'état au cours de son cycle, passant de l'état gazeuse à l'état liquide ou à l'état solide. Cependant, sa qualité globale est restée inchangée depuis trois milliards d'années, date de son apparition sur terre.

Dans l'atmosphère, l'eau est surtout présente à l'état de vapeur. Puis sous l'effet du refroidissement, l'eau passe de l'état de vapeur à l'état liquide. Cette eau liquide est rentrée dans les nuages puis dans les précipitations.

Une fois que l'eau a atteint le sol, son cycle va se dérouler de façon essentiellement liquide. Seule, une toute petite partie de cette eau est en mouvement, la grande majorité étant stockée dans les nappes souterraines. Une partie de l'eau est utilisée par les plantes, le reste est drainé vers les rivières ou dans les nappes. Les racines des plantes vont capter l'eau, qui s'évaporerait ensuite par le système de transpiration des feuilles. Cette transpiration constitue de la vapeur d'eau. De la même façon, les lacs, les océans, vont évaporer une partie de leur eau.

La somme des évaporations, soit 500 000 km³/an, est toujours égale à la somme des précipitations. Or, sur les continents, les précipitations sont supérieures de 40 000 km³/an à l'évaporation. Sur les océans, de façon à ce que le cycle de l'eau soit équilibré.

Le moteur de ce cycle est le soleil, ou plus exactement l'énergie solaire qu'il dégage. En effet, c'est cette dernière qui entraîne les changements d'état de l'eau : la formation et la fonte des glaces, ou encore l'évaporation de l'eau et son élévation dans l'atmosphère.

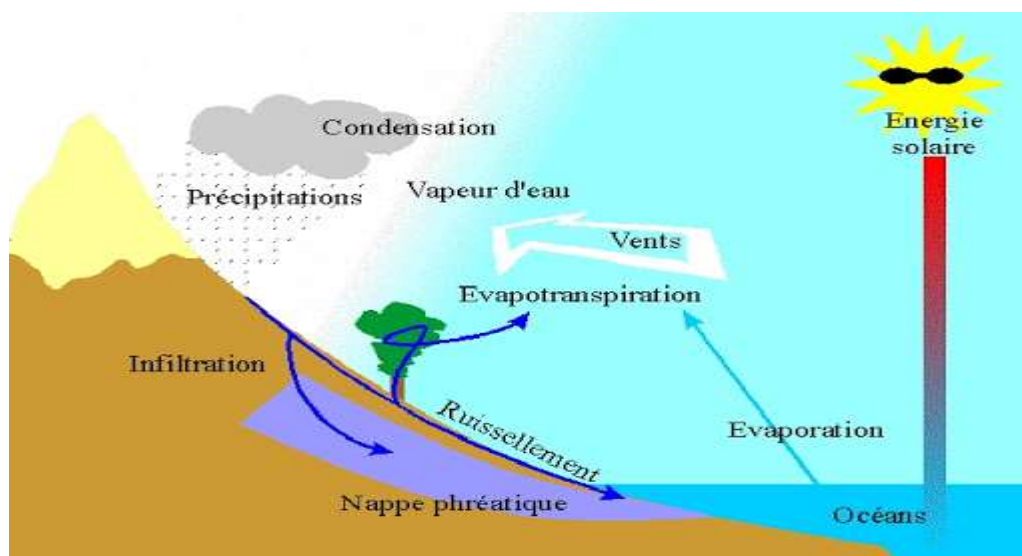


Figure I. 10 : Cycle de l'eau

I.5 Les eaux d'approvisionnement :

Les réserves disponibles des eaux naturelles sont les eaux souterraines (infiltration, nappes), des eaux de surfaces stagnantes (lacs, barrage) ou courantes (rivière) (Degremont, 2005).

I.5.1 Eaux de surface :

Ce sont des eaux qui circulent ou qui sont stockées à la surface des continents. Ces dernières 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 désagréments olfactifs. Elles nécessitent un traitement physico-chimique parfois complexe dans des infrastructures importantes (Degremonts, 2015).

I.5.2 Eaux souterraines :

Ce sont des eaux du sous-sol qui constituent une provision d'eau potable pour l'humanité. Elles sont traditionnellement les ressources en eau privilégiées pour l'eau potable car elles sont plus à l'abri des pollutions que les eaux de surface (Guergazi et Achour, 2005).

I.6 Les Principales différences entre les eaux souterraines et les eaux de surface :

Les eaux de surface sont plus chargées de matières en suspension que les eaux souterraines, ainsi que de matières colloïdales, plancton animal et végétal. Les eaux souterraines sont souvent considérées comme des eaux naturellement pure ce qui est une erreur, car souvent elles contiennent du fer, manganèse, ammoniacque et matières organiques sans parler de la teneur excessive en fluor et nitrates (Ayad Wissem 2016) (Tableau. I.1).

Tableau I. 1: Comparaison entre les eaux de surface et les eaux souterraines (Bourrier et Selmi, 2011)

Caractéristiques	Eaux de surface	Eaux souterraines
Température	Variable suivant les saisons	Relativement constante
Turbidité, MES	Variable, parfois élevée	Faible ou nulle
Couleur	Liée surtout aux MES (argile, algue)	Liée surtout aux matières en solution (acide humique)
Fer et Mn divalent (à l'état dissous)	Généralement absents sauf en profondeur des pièces d'eau en état d'eutrophisation	Généralement présents sensiblement
Minéralisation globale	Variable en fonction des terrains, des précipitations, des rejets.	Constante en générale nettement plus élevée que dans les eaux de surface de la même région
Goût et odeur	Fréquents	Rares
CO ₂ agressif	Généralement absent	Souvent présent en grande quantité
O ₂ oxygène dissous	Le plus souvent au voisinage de la saturation. Absent dans le cas d'eaux très polluées.	Absent dans la plupart des cas
H ₂ S sulfure d'hydrogène	Généralement absent	Souvent présent
NH ₄ Ammonium	Présent seulement dans les eaux polluées	Être un indice systématique de pollution bactérienne
Nitrates	Peu abondants en général	Teneur parfois élevée
Micropolluants minéraux et organiques	Présents dans les eaux de pays développés	Généralement absents, mais une pollution accidentelle subsiste plus longtemps
Eléments vivants	Bactéries (dans certaines pathogénies), virus, plancton	Ferrobactéries

I.7 La circulation de l'eau dans le sous-sol :

L'eau qui s'infiltré dans le sol rencontre différentes zones :

I.7.1 La zone vadose ou non saturée (ZNS) :

(Terme initié par Frantisek Posepny, 1984 Latin vadosus « guéable »). C'est une zone à trois phases (solide, liquide, gaz) où seule une partie des espaces lacunaires est remplie d'eau, le reste étant occupé par l'air du sol. (Jean-Luc Akouete, 2019)

I.7.2 La frange capillaire :

Dans le cas d'un écoulement libre dans un aquifère, on distingue une partie de l'aquifère saturée en eau (c'est la zone saturée), et une partie pour laquelle la saturation est inférieure à 1, c'est la zone non-saturée qui est bien entendu située au dessus de la zone saturée. La zone de transition entre la zone saturée et la zone non saturée est appelée la frange capillaire.

I.7.3 La zone saturée (ZS) :

C'est une zone à deux phases (solide, liquide) où tous les pores sont remplis d'eau.

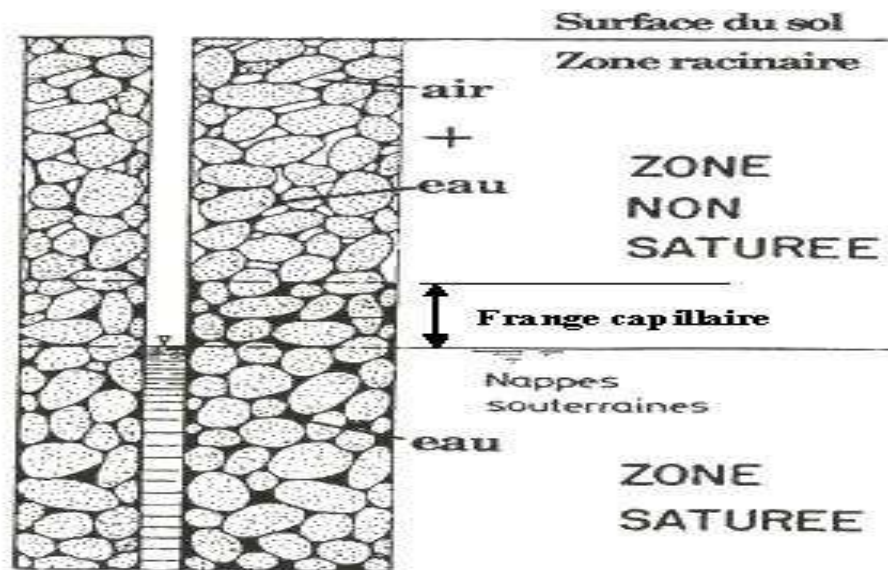


Figure I. 11 : Circulation de l'eau dans le sous-sol

I.8. Origines des eaux souterraines :

I.8.1. Eaux météoriques :

La plupart des eaux souterraines ont une origine météorique, c'est-à-dire proviennent des précipitations (pluie, neige) et de leur infiltration 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 d'indicateur de paléoclimats.

I.8.2 Eaux connées :

Ce sont des eaux que l'on trouve en profondeur dans la croûte terrestre (à partir de 1 à 2 km) sont dérivées des 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 formations géologiques qui se sont enfouies très récemment ou bien rester piégées dans des roches dont la perméabilité est très faible et dont toute l'eau n'a pas été expulsée. Souvent cette eau est présente depuis la formation de la roche.

I.8.3 Eaux juvéniles :

Ce sont des eaux libérées directement par des processus magmatiques en profondeur. Elles sont difficilement distinguables des eaux situées en profondeur. Les processus magmatiques peuvent relâcher en plus de l'eau, des composés gazeux CO₂.

I.9 La qualité de l'eau de consommation :

Une eau potable est une eau douce chimiquement et biologiquement saine, conforme pour un usage lié à la consommation humaine pour éviter toute maladie. Les normes appliquées à une telle eau ne devraient pas être inférieures à celles proposées dans la dernière édition de « Normes internationales pour l'eau potable » publiée par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS). L'eau potable est une eau non salée, une eau douce suffisamment sûre et saine pour être consommée par les humains ou utilisée avec un faible risque de préjudice immédiat ou à long terme.

I.9.1 La qualité des eaux souterraines :

Les qualités physico- chimiques de l'eau se basent sur des paramètres qualitatifs relativement faciles à déterminer. Ces paramètres sont cités comme suit :

I.9.1.1 Température :

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). De plus, en mettant en évidence des contrastes de température de l'eau sur un milieu, il est possible d'obtenir des indications sur l'origine et l'écoulement de l'eau. (Rodier et al. 2005)

Une température élevée favorise la croissance des micro-organismes, peut accentuer le goût, l'odeur et la couleur (OMS, 1994). Par contre une température inférieure à 10⁰C ralentit les réactions chimiques dans les différents traitements des eaux (Rodier et al, 2009).

I.9.1.2 Conductivité électrique :

La conductivité mesure la capacité de l'eau à conduire le courant électrique. La plupart des matières dissoutes dans l'eau se trouvent sous forme d'ions chargés électriquement. La mesure de la conductivité permet donc d'apprécier la quantité de sels dissous dans l'eau. Elle est en fonction de la température de l'eau, elle est plus importante lorsque la température augmente. (Bremaude et al, 2006).

I.9.1.3 Potentiel d'hydrogène (pH) :

Le pH d'une eau est une indication de sa tendance à être acide ou alcaline. Il est en fonction de l'activité des ions hydrogènes H⁺ présents dans cette eau. Dans les eaux naturelles cette activité est due à des différentes causes en particulier l'ionisation de l'acide carbonique et de ses sels (Rodier et al, 2009). Les valeurs limites du pH sont

comprises entre 6,5 et 9 (Jora, 2011). Au dessus de ce seuil l'eau est dite « agressive », elle a un effet corrosive sur les canalisations et peut mener à la dissolution de certains métaux toxiques tel que le plomb des conduites (Savary, 2010. Bouziani, 2000, Ayad Wissem 2016)

I.9.1.4 Matières en suspension (MES) :

Elles représentent l'ensemble des matières solides insolubles visibles à l'œil nu qui se trouvent en suspension dans un liquide. Plus une eau en contient, plus elle est dite turbide. Les matières en suspension limitent la pénétration de la lumière dans l'eau, réduisant la teneur en oxygène dissous et nuisant au développement aquatique (Hakmi, 2006, Ayad Wissam, 2016). Pour une eau qui contient des matières en suspension à des teneurs de quelques milligrammes par litre, ne pose pas de problèmes majeurs (Dégremont, 2005).

I.9 1.5 Ion de calcium (Ca^{2+}) :

Le calcium est l'élément présent dans toutes les eaux naturelles (Benamar et al, 2011). La teneur en calcium est liée directement à la nature géologique des terrains traversés par les cours d'eau. L'ion calcium est obtenu en majorité par l'attaque par CO_2 dissous (acide carbonique) des roches calcaires (dolomie) ou par simple dissolution sous la forme de sulfate dans le cas de gypse. Il se présente principalement sous forme de bicarbonate, $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$, soluble. On le rencontre en moins grande quantité sous forme de carbonate, de chlorure et de sulfate...etc. (Bremond. R, et Vuéchar. R 1973).

I.9 1.6 Ion de magnésium (Mg^{2+}) :

Dans la plupart des cas, la dureté est surtout due aux ions calcium Ca^{2+} et magnésium Mg^{2+} (ion alcalino terreux). La variation du magnésium dans les eaux souterraines est due à l'influence des formations carbonatées tels 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.

I.9.1.7 Ion de sodium (Na^+) :

C'est un élément dont les concentrations dans l'eau varient d'une région à une autre (Bouziani, 2000, Ayad Wissam). 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).

I.9.1.8 Ion de potassium (K^+) :

Le potassium est très répandu dans la nature sous forme de sels. Il est étroitement rattaché au sodium à tel point, qu'il est rarement utilisé comme un constituant à part dans les analyses de l'eau. La plus grande partie du potassium de l'organisme est située à l'intérieur des cellules. Il est nécessaire au fonctionnement normal des cellules, des nerfs et des muscles. (James L. Lewis III, 2018).

I.9.1.9 Ion de fer (Fe^{2+}) :

Le fer dissous dans les eaux souterraines est sous la forme réduite du fer II. Cette forme est soluble et normalement ne pose aucun problème par elle-même. Le fer II est oxydé en fer III par le contact avec l'oxygène de l'air ou par l'action de bactérie. Le fer III précipite ensuite sous forme d'hydroxyde insoluble dans l'eau. Il est de couleur rouge rouille et cause la souillure et le colmatage des écrans des pompes des tuyaux...etc. (Bouziani, 2000).

I.9.1.10 Chlorures (Cl^-) :

Les chlorures sont très répandus dans la nature généralement sous forme de sels du sodium (NaCl), de potassium (KCl) et de calcium ($CaCl_2$). (Sevesc, 2013). L'ion chlorure n'est pas absorbé 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).

I.9.1.11 Nitrates (NO_3^-) :

Les nitrates dans les eaux souterraines sont, en général, très faible (typiquement moins de 10 mg/l NO_3^-), mais les concentrations en nitrate augmentent avec l'activité humaine, comme par exemple l'agriculture, l'industrie, les effluents domestiques et les émissions de produits de combustions. (Emilie César, 2011, 2012).

I.9.1.12 Nitrites (NO_2^-) :

Les nitrites sont répandus dans le sol, les eaux et 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. (Bouziani, 2000.Savary 2010)

I.9.1.13 Sulfates (SO_4^{2-}) :

Les sulfates contenus dans l'eau souterraine sont fournis par la dissolution du gypse. Le gypse est un sulfate de calcium hydraté qui est faiblement soluble (7g/l dans les conditions normales) (Furry V ,1997). 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 (Bouziani, 2000).

1.9.1.14 Fluor (F) :

La teneur en fluor dépend beaucoup du temps de contact de l'eau avec les minéraux fluorés de l'aquifère. Elle est plus élevée dans les nappes captives. Dans la nappe de la craie, l'ion F est fourni principalement par les minéraux phosphatés (apatites). Sa teneur ne doit excéder 1,5 mg/l. (Proeres. O, 2000)

I.10 La pollution des eaux souterraines :

L'eau est indispensable à la vie. Pour les besoins de l'homme et l'environnement, l'eau doit être de bonne qualité. Si la qualité de l'eau est altérée, c'est tout un équilibre qui est menacé. L'Europe définit une eau de bonne qualité par son état écologique et chimique. Le bon état écologique correspond à un bon fonctionnement du milieu et il s'évalue au travers de la diversité aquatique (faune et flore). Le bon état chimique, quant à lui prend en compte les paramètres de pollution par les substances toxiques.

I.10.1 Les types de pollution de l'eau :

I.10.1.1 La pollution bactériologique :

Il s'agit de bactéries qui proviennent principalement des rejets d'eaux usées (non traitées) contenant de la matière fécale et des déchets organiques.

I.10.1.2 La pollution chimique :

Elle provient généralement des rejets d'eaux usées contenant des produits d'entretien, des hydrocarbures et des métaux lourds.

I.10.1.3 La pollution des milieux aquatiques :

Elle est définie comme « tout matériau ou objet fabriqué, utilisé au profit de l'humanité qui est directement ou indirectement jeté ou abandonné dans les milieux aquatiques.

I.10.2 Les différentes sources de pollution :

I.10.2.1 La pollution domestique :

Elle est généralement liée aux rejets d'eaux usées, qui peuvent être de deux types :

- Les eaux usées issues de l'utilisation d'eau au quotidien (toilettes, cuisines, douches...) contiennent des déchets organiques ou de la matière fécale. Les habitations mal ou non raccordées au réseau d'assainissement collectif, peuvent ainsi engendrer une pollution bactériologique de l'eau.
- Les produits ménagers sont chargés de polluants chimiques nocifs pour l'environnement. Mélangés à l'eau, ils terminent dans les canalisations ou dans la nature et génèrent une pollution chimique. Difficilement traités par les réseaux d'assainissement, les résidus de ces produits viennent enrichir les cours d'eaux en substances chimiques.

I.10.2.2 La pollution industrielle :

L'industrie cause des pollutions différentes selon le secteur d'activité. Les usines de papier, par exemple, utilisent de grands volumes de produits chimiques dans leurs processus de fabrication. Malgré les réglementations imposant le traitement de leurs eaux usées, certaines substances restent difficiles à éliminer et se retrouvent dans l'environnement.

I.10. 2.3 La pollution agricole :

Les pesticides et les engrais engendrent une pollution chimique. L'utilisation massive d'engrais d'origine naturelle, tel que le fumier, peut constituer une source de pollution bactériologique. Ces substances, par le biais du cycle de l'eau, s'infilte ou ruisselle, polluant les milieux aquatiques.

I.10.3 Les solutions pour lutter contre la pollution des eaux souterraines :

- Contre la pollution domestique :

Afin d'éviter que des résidus d'eaux usées finissent dans les cours d'eau, plusieurs types d'actions sont mis en œuvre dans les stations d'épuration :

- La remise en conformité des installations (reconstruire ou moderniser)
- Le perfectionnement des méthodes de traitement de l'eau.

- Contre la pollution industrielle :

Des normes existent au niveau national, pénalisent les exploitants rejetant directement leurs eaux usées dans les lacs ou les cours d'eau.

- Contre la pollution agricole :

Chapitre I : Recherche bibliographique sur les caractéristiques des eaux souterraines

Afin d'éviter des substances chimiques présentes dans les pesticides et les engrais, les agriculteurs ont pour obligation de végétaliser les parcelles proches des cours d'eau. Cette pratique permet de créer un filtre végétal naturel, diminuant l'arrivée de polluants dans les cours d'eau.

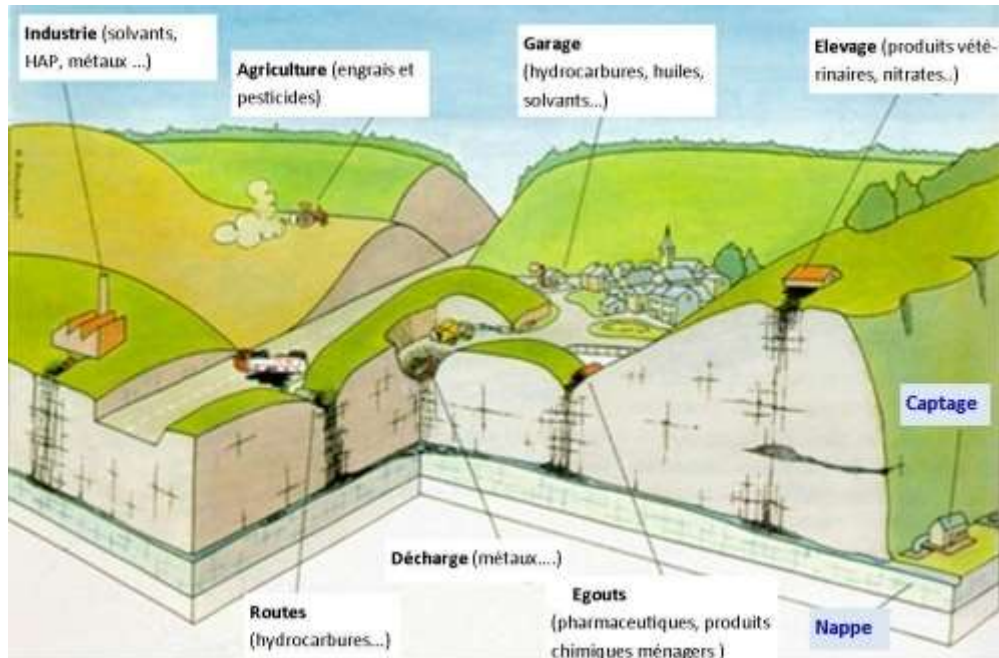


Figure I. 12 : Différentes sources de pollution pouvant affecter les eaux souterraines - Exemple d'un aquifère calcaire

Conclusion :

Dans ce chapitre, on a exposé les notions de bases et les différents paramètres de la qualité des eaux souterraines. Ainsi que les différentes sources de leurs pollutions par des interventions humaines ou naturelles qui perturbent les conditions de vie de tous les êtres vivants, raison pour laquelle, elle a besoin de protection.

Chapitre II :
Présentation
hydrologique et
hydrogéologique de la
zone d'étude

II.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 relief, son réseau hydrographique, climatique et sa situation socio-économique.

Ensuite, on s'intéresse à la partie hydrogéologique particulièrement au plateau d'El Asnam, avec ses principales réserves d'eaux souterraines, la qualité du sol présenté et leurs comportements.

A la fin de ce chapitre, on procède à la présentation des données d'analyse physico-chimiques des eaux de forages étudiées de la région d'étude.

II.2 Présentation hydrologique de la zone d'étude :

Cette première partie a pour but de donner une idée générale sur la région d'étude, de traiter ses caractéristiques particulièrement, sa localisation géographique, son relief, son réseau hydrographique, climatique et sa situation socio-économique.

II.2.1 Présentation de la wilaya de Bouira :

II.2.1.1 Situation géographique de la wilaya de Bouira :

La wilaya de Bouira est bordée par les chaînes montagneuses du Djurdjura au nord et des Bibans au sud-est, elle est délimitée :

- au nord par les deux wilayas de Boumerdès et de Tizi-Ouzou ;
- à l'est par les deux wilayas de Bejaïa et de Bordj Bou Arreridj ;
- au sud par la wilaya de M'Sila ;
- à l'ouest par les deux wilayas de Médéa et de Blida

Elle s'étend sur une superficie de 4454Km².

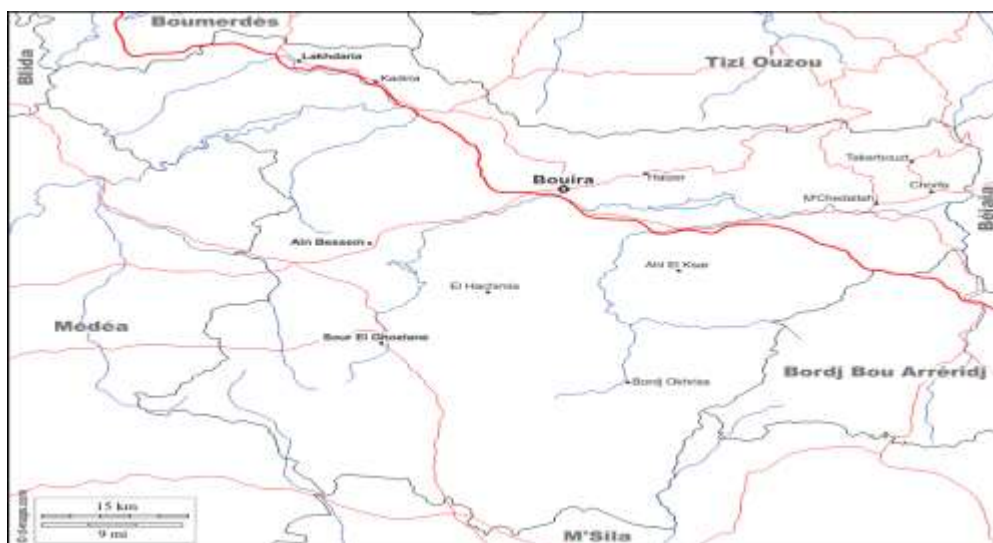


Figure II. 1: Situation géographique de la wilaya de Bouira

II.2.1.2 Présentation administrative de la wilaya de Bouira :

Issue du découpage administratif institué par ordonnance n°74/69 du 02 juillet 1974, relative à la refonte de l'organisation territoriale des wilayas. Elle subdivise en 12 daïra et 45 communes. (Voir tableau II.1).

Tableau II. 1: Découpage administrative de la wilaya de Bouira (ANDI 2013).

Daïra	Communes	Daïra	Communes
Bouira	Bouira, Ainturk, Ait laaziz	Bir ghalou	Bir ghalou, Raouraoua, Khabouzia
Haizer	Haizer, Taghzout	Ain Bessem	Ain Bessem, Ain laloui, Ain El hadjar
Bechloul	Bechloul, Elesnam, Eladjiba, Ahl el kasr, Ouled rached	Souk el khemis	Souk el khemis, Elmokrani
M'chedallah	M'chedallah, Saharidj, Chorfa, Ahnif, Aghbalou, Ath Mansour	El Hachimia	El Hachimia, Oued el berdi
Kadiria	Kadiria, Aomar, Djebahia	Sour el ghozlane	Sour el ghozlane Maamora, Ridane, El hakimia, Dechia, Dirah
Lakhdaria	Lakhdaria, Boukram, Guerrouma, Maala, Bouderbala	Bordj Okhriss	Bordj Okhriss, Mesdour, Taguedite, Hadjra zerga



Figure II. 2: Localisation. Administrative de la wilaya de Bouira

II.2.2 Contexte géographique :

La région d'étude est la wilaya de Bouira, elle comporte trois sous bassins versants (01), (2), (3) regroupés sous le nom de « Bassin versant du Sahel ». Ils appartiennent au grand bassin versant de la Soummam portant le numéro « 15 » selon la nomenclature adoptée par l'ANRH,(voir la figure II.3)

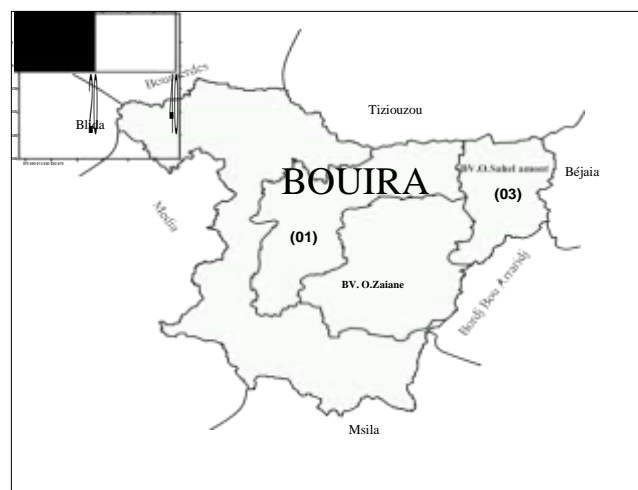


Figure II. 3: Situation géographique de Bouira et de ses sous bassins versants (1, 2, 3), (source ANRH de Blida)

II.2.2.1 Relief :

Le relief est contrasté et comporte cinq grands ensembles physiques :

- La dépression centrale (plaines des Aribes, plateau d'El Asnam, la vallée d'Ouedhous et Oued Sahel).
- La terminaison orientale de l'Atlas blidéen.
- Le versant sud du Djurdjura (Nord de la wilaya).
- La chaîne des Bibans et les hauts reliefs du sud.
- La dépression sud des Bibans.

II.2.2.2 Réseau hydrographique :

La wilaya de Bouira renferme d'importantes ressources en eau. Elle est traversée par des bassins versants importants dont l'apport moyen annuel est de 561 millions de m³ constitué par :

- Bassin versant d'Isser : 135 millions de m³/an ;
- Bassin versant Soummam : 380 millions de m³/an ;
- Bassin versant Hodna : 35 millions de m³/an ;
- Bassin versant Humus : 11 millions de m³/an.

Du Nord au Sud, on distingue trois zones différentes :

- Au Nord : les zones de montagne représentent 31% des terres de la wilaya. Elles présentent de fortes pentes et sont occupées par la pratique de l'arboriculture rustique, la céréaliculture combinée avec un élevage de type familial.
- Au centre : les plaines constituent 40% des terres et sont représentées par les plateaux de Bouira, El Asnam et El Hachimia. Ces espaces sont utilisés pour la céréaliculture, l'arboriculture fruitière et les cultures fourragères.
- Au Sud : les zones agropastorales où prédomine l'élevage bovin, s'étendent sur 29% des terres.

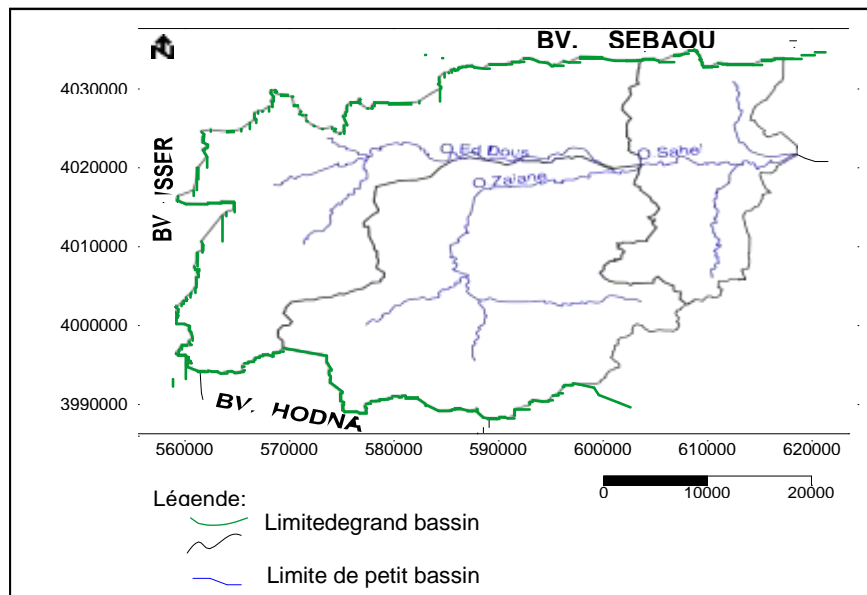


Figure II. 4: Situation des sous bassins versants par rapport aux grands bassins versants de la région de Bouira (Source : ANRH de Blida).

- Eaux superficielles : Cette wilaya comprend les barrages suivants :
 - Barrage koudiet asserdoune commune de Maala capacité 640 hm³ ;
 - Barrage tilesdit commune de Bechloul capacité 167 hm³ ;
 - Barrage lakhal commune d'Ain bessem capacité 30 hm³ ;
 - Retenus collinaires : 30 hm³;

Ces barrages font partie des 65 barrages opérationnels en Algérie 7 alors que 30 autres sont en cours de réalisation en 2015.

- Eaux souterraines : La Wilaya dispose de cinq (05) nappes, à savoir :
 - Nappe alluviale Isser8 hm³ ;
 - Nappe El Madjen et Bouira 25 hm³ ;
 - Nappe des Aribes2,5 hm³ ;
 - Nappe d'El Esnam.....5 hm³ ;
 - Nappe alluviale vallée Sahel8 hm³.

Les eaux souterraines de la Wilaya de Bouira estimées à 48,5 hm³, sont utilisées pour l'AEP, l'industrie et l'irrigation.

II.2.3 Le contexte climatologique :

La climatologie est l'étude du climat qui est le facteur le plus déterminé des ressources en eau. Les caractéristiques climatologiques ont un rôle important dans la connaissance des cours d'eaux, les variations des réserves, la compréhension des

mécanismes d'alimentation et de circulation des eaux naturelles. Pour cela l'étude climatologique est indispensable pour mieux comprendre le fonctionnement et les influences d'un système hydrologique de surface d'une région donnée. Les températures, les précipitations, le vent, l'humidité, l'évapotranspiration et l'ensoleillement et d'autres phénomènes atmosphériques constituent le climat de la région d'étude. Ainsi, l'étude des possibilités de la maîtrise des ressources en eau dans les bassins est extrêmement liée à ces phénomènes qui régissent les écoulements. Pour cela, il est très utile de faire l'approche hydroclimatique. (Boutouga.F, 2012, Bouchemal Fatoum, 2017)

II.2.3.1 Précipitation :

La pluie est un facteur essentiel qui caractérise le climat d'une région. Elle joue un rôle prépondérant dans le comportement hydraulique des cours d'eau et dans l'alimentation des nappes souterraines.

II.2.3.1.1 Précipitations moyennes mensuelles :

Les précipitations moyennes mensuelles dans les cinq stations sont représentées dans (le tableau II.2) et (la figure II.5).

Tableau II. 2: Précipitations moyennes mensuelles pour la période (2003-2013)
(ANRH)

Stations	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Août	Moy
M'chedallah	19,68	34,06	38,96	40,53	37,10	48,08	39,02	39,56	29,04	14,28	2,75	5,33	348,3
Bouira	34,85	56,31	55,48	67,62	66,15	67,33	70,28	48,27	47,81	19,12	3,3	6,59	543,1
Bordj okhris	18,3	27,27	25,22	33,06	27,86	33,56	34,63	30,08	30,83	14,13	3,73	11,38	290
El hachimia	39,11	44,76	48,77	45,94	45,99	53,54	50,84	54,08	45,27	9,6	2,03	8,08	448
Sour el ghozlane	41,52	52,35	67,66	59,92	58,58	70,03	69,22	63,62	59,08	20,92	4,14	10,94	577,9
Précip. moy	30,69	42,95	47,21	49,41	47,13	54,50	52,79	47,12	42,40	15,61	3,19	8,46	441,4

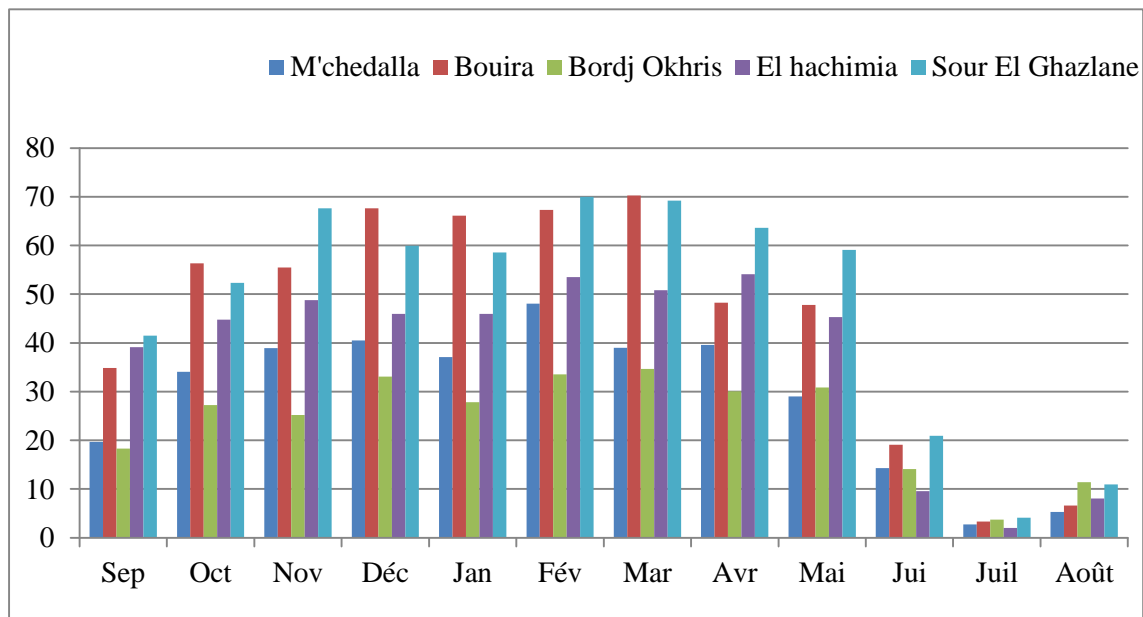


Figure II. 5: Histogramme des précipitations moyennes mensuelles pour la période (2003-2013)

II.2.3.1.2 Evaluation de la lame d'eau précipitée :

L'estimation de la lame d'eau précipitée pour les stations de la wilaya a été effectuée par la méthode arithmétique.

Méthode arithmétique :

C'est la méthode la plus simple qui consiste à calculer la moyenne arithmétique des valeurs obtenues aux stations étudiées. Elle s'applique uniquement si les stations sont bien réparties et si le relief du bassin est homogène.

$$P_{moy} = \sum iN P_i / N$$

Avec :

P_{moy} : précipitation moyenne sur le bassin en mm

P_i : précipitation enregistrée dans la station i en mm

N : nombre de stations (Voir tableau II.3).

Tableau II. 3: Evaluation de la lame précipitée par la méthode arithmétique

Stations	Précipitations (mm)
M'chedallah	29,03
Bouira	45,25
Bordj Okhris	24,17
El Hachimia	37,03

Sour El Ghozlane	48,16
N = 5	Somme = 2207,3
	$P_{moy} = 441,4$

II.2.3.1.3 Précipitations moyennes interannuelles :

Les précipitations interannuelles les plus importantes sont enregistrées en 2007-2008, avec un maximum de 656,7mm, cependant le minimum est observé en 2010-2011, avec 529,9mm. La moyenne interannuelle de 10 ans d'observation est égale à 588,4mm (Tableau II.4).

Tableau II. 4: Précipitations moyennes annuelles à la station de Bouira (ONM)

Précipitations (mm)	622,8	540,7	612,5	622,8	656,7	612,5	561,0	529,9	574,0	551,1
Années	2003-2004	2004-2005	2005-2006	2006-2007	2007-2008	2008-2009	2009-2010	2010-2011	2011-2012	2012-2013

II.2.3.1.4 La variabilité des précipitations annuelles :

La variabilité des précipitations annuelles est exprimée par le coefficient pluviométrique Cp qui permet de déterminer les années excédentaires et les années déficitaires. Il est calculé par le rapport de la pluviométrie de l'année considérée sur la pluviométrie moyenne de la période d'étude à une station donnée.

Avec :

Cp : Coefficient pluviométrique

P : Pluviométrie de l'année considérée (mm)

P_m : Pluviométrie moyenne pour la période d'étude (mm)

Si : - $CP > 1 \Rightarrow$ on a une année excédentaire.

- $CP < 1 \Rightarrow$ on a une année déficitaire.

Tableau II. 5: Variabilité des coefficients pluviométriques

Années	2003-2004	2004-2005	2005-2006	2006-2007	2007-2008	2008-2009	2009-2010	2010-2011	2011-2012	2012-2013
Coefficient pluviométrique	1,3	0,9	1,1	1,1	1,2	1,1	1,0	0,9	1,0	1,0

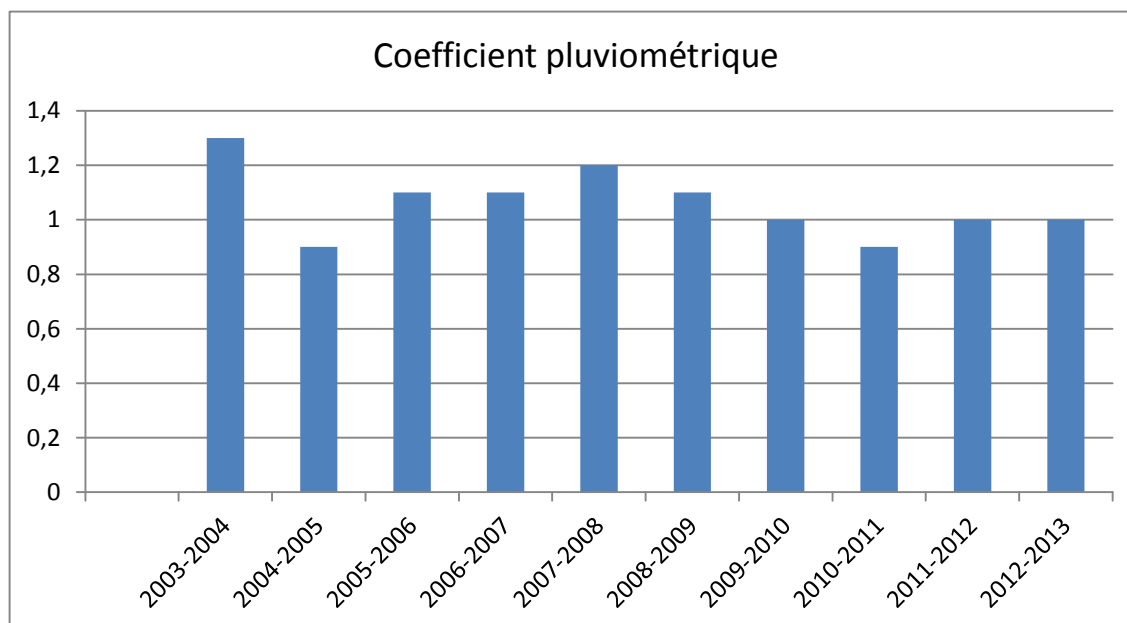


Figure II. 6: Variations du coefficient pluviométrique à la station de Bouira (2003/2013).

Par conséquent le calcul du coefficient de variation durant la période d'observation (Figure II.6) met en évidence 5 années excédentaires et 5 autres déficitaires.

II.2.3.2 Température :

II.2.3.2.1 Températures moyennes mensuelles :

La température est le second facteur après les précipitations qui conditionne le climat d'une région car elle agit directement sur le phénomène d'évapotranspiration et par conséquent le déficit d'écoulement annuel et saisonnier. On dispose des données de températures moyennes mensuelles de la station de Bouira (ONM), période de (2003-2013). La variation des températures moyennes mensuelles est établie dans le tableau et l'histogramme relatif à cette station.

Tableau II. 6: Température moyenne mensuelle à la station de Bouira (2003-2013)

mois Paramètres	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Moyenne
T ⁰ min	18,4	15,0	9,0	6,0	4,1	4,5	7,0	9,8	13,3	18,1	22,4	22,0	12,2
T ⁰ max	32,9	27,8	21,0	12,5	14,3	14,5	19,0	22,4	27,6	31,7	39,9	39,4	25,2
T ⁰ moy	24,9	20,8	13,4	9,8	8,7	8,9	12,2	15,9	20,2	26,3	30,3	30,1	18,4

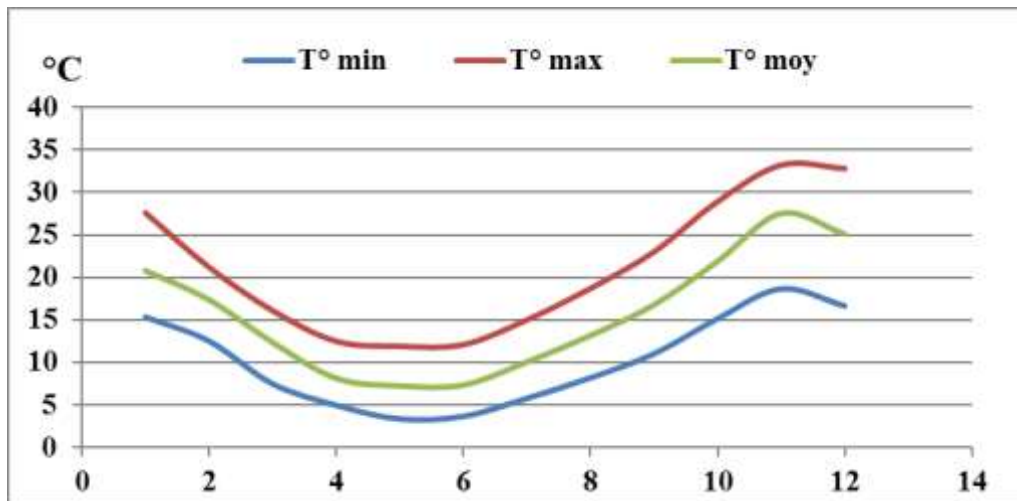


Figure II. 7: Répartition des températures moyennes mensuelles, maximales et minimales (station de Bouira) pour une période de (2003-2013)

La température moyenne annuelle est de l'ordre de 18,4°C. On remarque que les mois les plus chauds sont juillet et août avec des températures de 30,3 et 30,1°C en raison des courants chauds provenant du Sud. Les mois froids sont décembre, janvier et février.

II.2.3.2 Températures moyennes interannuelles :

A l'échelle interannuelle, on note une fluctuation thermique de faible amplitude de 16,2°C à 19,5°C donnant une certaine constance de l'allure générale. La moyenne interannuelle de 10 ans d'observation est égale à 17,2°C. (Voir tableau ci-dessous)

Tableau II. 7: Températures moyennes interannuelles à la station de Bouira de la période (2003-2013)

Année	2003-2004	2004-2005	2005-2006	2006-2007	2007-2008	2008-2009	2009-2010	2010-2011	2011-2012	2012-2013
Moyenne (°C)	16,7	16,2	16,9	19,5	19,1	16,9	16,9	16,8	16,9	16,5

II.2.3.3 Le vent :

Le vent est la clef du climat, il participe à la dynamique générale de l'atmosphère et influe sur le climat d'une région. Redouté lorsqu'il est la source d'inondation, de chute de grêle, de tornade, le vent est le plus souvent souhaité et attendu : il fournit la pluie nécessaire à l'agriculture et la neige qui constitue des réserves d'eau dans les montagnes (Jean pierre chalon, 04 janvier 2013). Dans la zone d'étude, les vents les plus dominants sont ceux de l'ouest et l'est.

Tableau II. 8: La vitesse du vent (max et moy) mensuelle en m/s période (2003-2013)

Vitesse/Mois	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jui	Août	Sep	Oct	Nov	Déc	Moy annuelle
V_{moy} (m/s)	2,4	2,6	2,8	3,0	2,6	2,6	2,4	2,5	2,2	2,2	1,8	2,2	2,2
V_{max} (m/s)	24	22	23	21	23	23	23	22	23	19	21	21	22

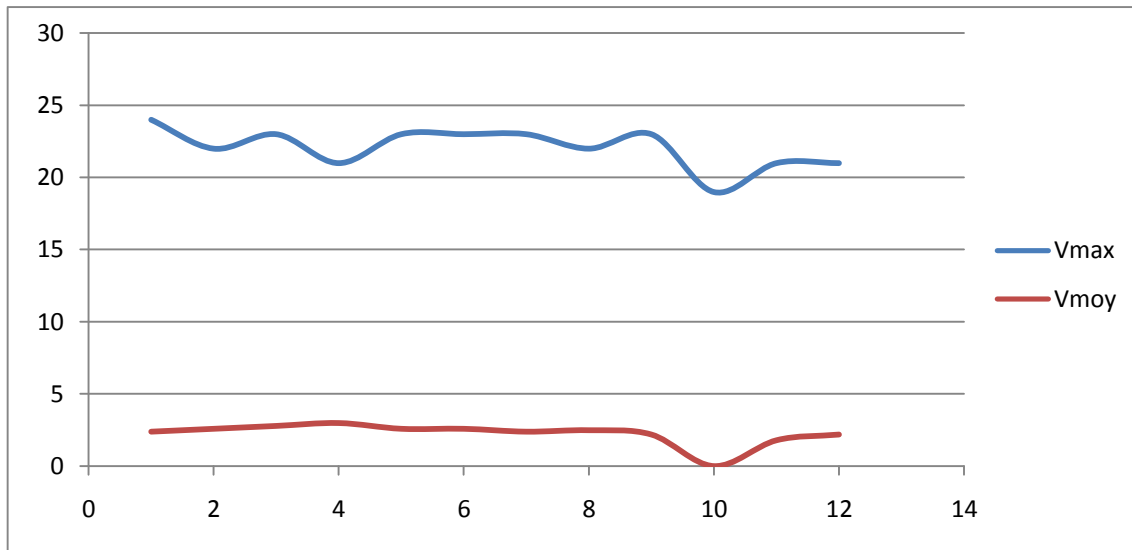


Figure II. 8: Répartition mensuelle du vent, max et moy de la station de Bouira

II.2.3.4 Humidité relative :

C'est le quotient entre la tension de vapeur réelle et la tension de vapeur saturante. L'humidité de la région montre un écart important entre la période hivernale et estivale. Les valeurs moyennes mensuelles de l'humidité mesurées à la station de Bouira sont présentées dans le tableau II.8 et la figure II.9.

Tableau II. 9: L'humidité moyenne mensuelle en % de la période (2003-2013)

Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Jui	Août	Sep	Oct	Nov	Déc	Moy
Humidité moyenne %	91	88	83	80	74	63	54	58	69	79	86	91	76

On remarque sur la figure II.9 que l'humidité relative à la station de Bouira, la valeur maximale est de l'ordre de 91% au mois de janvier, alors que la valeur minimale est observée au mois de juillet, sa valeur est de 54%.

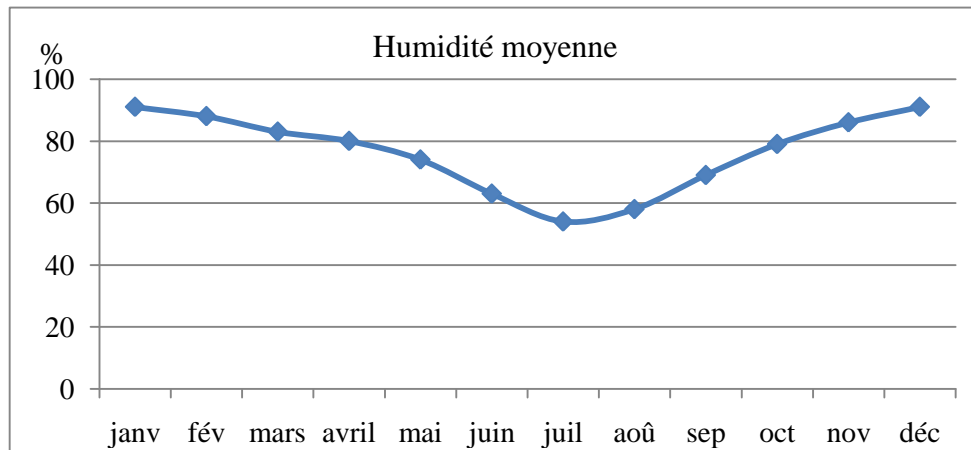


Figure II. 9: Humidité relative pour la station de Bouira période (2003-2013)

II.2.3.5 Insolation :

L'insolation représente la durée totale mensuelle d'ensoleillement en supposant un ciel dégagé de nuages. L'instrument qui permet de la mesurer s'appelle un héliographe Campbell et exprimée en heure.

D'après les valeurs d'insolation moyennes mensuelles sur une période de 10 années (2003-2013), on peut dire que les heures d'insolations augmentent en été jusqu'à atteindre 368 heures en juillet pour décroître en hiver avec une insolation minimale de 157 heures en décembre. (Source ONM Bouira).

Tableau II. 10: Insolations mensuelles au niveau de la station de Bouira (2003-2013)

Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Jui	Aoû	Sep	Oct	Nov	Déc
Insolations mensuelles (heures)	182	180	227	244	299	327	368	354	263	234	181	157

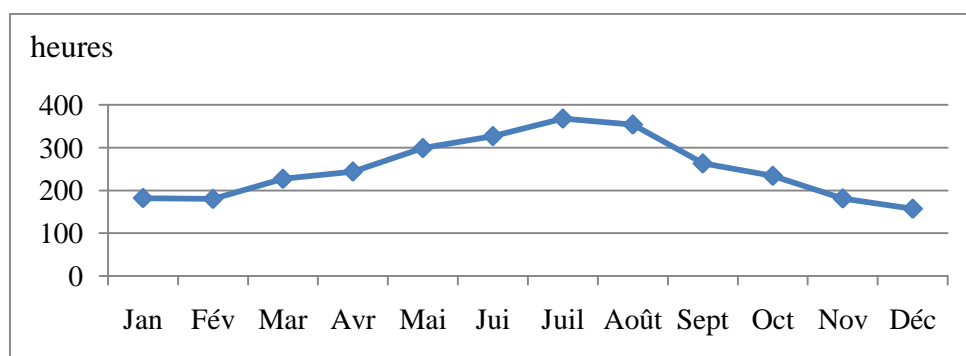


Figure II. 10: Insolation moyenne mensuelle de la station de Bouira de la période (2003-2013)

II.2.3.6 Evaporation :

L'évaporation se définit comme étant le passage de la phase liquide à la phase vapeur, il s'agit de l'évaporation physique. Les plans d'eau et la couverture végétale sont les principales sources de vapeur d'eau. On parle de sublimation lors du passage direct de l'eau sous forme solide en vapeur. Le principal facteur régissant l'évaporation est la radiation solaire (Musy, 2005). Les mesures de l'évaporation ont été effectuées sous abri à l'aide de l'évaporimètre « Piche » à la station de Bouira, les valeurs mensuelles de l'évaporation sont portées dans (le tableau II.11) pour une période (2003-2013).

Tableau II. 11: Evaporation moyenne mensuelle (en mm) à la station de Bouira (2003-2013)

Mois	Jan.	Fév.	Mar.	Avr.	Mai	Juin	Jui.	Août	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Moy.
Evaporation moyenne Mensuelle(mm)	54,5	60,6	92,4	110,8	137,8	250,7	314,6	285,5	174,9	139,3	72,4	54,1	145,6

D'après le tableau ci-dessus, l'évaporation est relativement faible dans la période allant du mois de Novembre à Février et importante en période estivale. L'évaporation moyenne est égale à 145,6 mm.

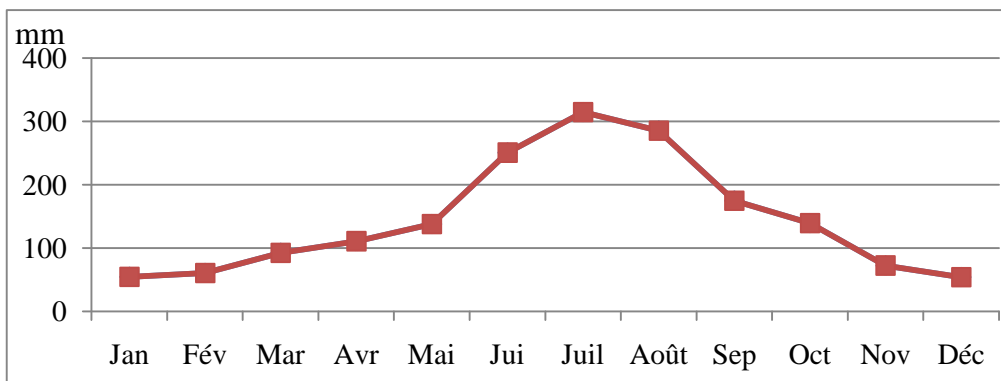


Figure II. 11:Evaporation pour la région de Bouira (2003-2013, station de Bouira)

II.2.3.6.1 Relation évaporation –température :

D'après les valeurs données dans (le tableau II .12), l'évaporation est proportionnelle à la température, ses valeurs minimales correspondent aux mois de basses températures, et l'inverse. (Voir la figure II.12)

Tableau II. 12: Répartition de l'évaporation moyenne mensuelle (en mm) en fonction de la température

Paramètre	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Jui	Août	Sep	Oct	Nov	Déc	Moy
T _{moy} (°C)	7,3	7,4	10,1	13,2	16,8	21,9	27,5	25,1	20,8	17,4	12,4	8 ,2	15,6
Evaporation mensuelle	54,5	60,6	92,4	110,8	137,8	250,7	314,6	285,5	174,9	139,3	72 ,4	54,1	145,6

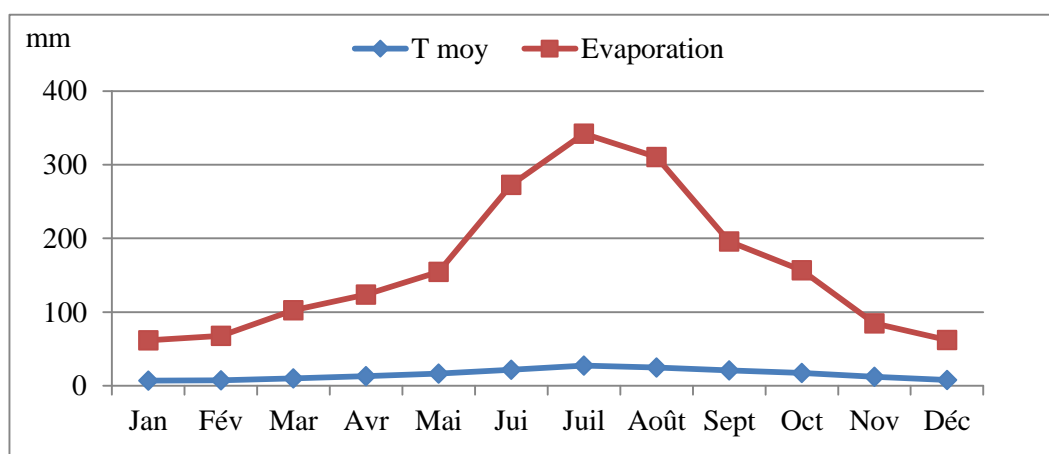


Figure II. 12: Évolution de l'évaporation en fonction de la température

II.2.3.6.2 Evapotranspiration :

L'évaporation est une composante importante du cycle de l'eau et de l'équilibre. On estime que 70% de l'eau totale reçue par précipitation est renvoyée dans l'atmosphère à travers le processus tandis que les 30% restants constituent un écoulement de surface et souterrain. La connaissance des pertes d'eau à travers le processus permet d'avoir une approche de la disponibilité de la ressource et par conséquent une meilleure distribution et gestion de celle-ci peut être faite.

II.2.3.6.2.1 Estimation de l'évapotranspiration potentielle (ETP) :

Une évaporation potentielle ETP est la quantité maximale d'eau susceptible d'être évaporée par évapotranspiration sous un climat donné par un couvert végétal continu bien alimenté en eau. Elle comprend donc l'évaporation du sol ou du substrat et la

transpiration de la végétation d'une région donnée pendant le temps considéré, elle s'exprime en hauteur d'eau.

- La formule de Thornthwaite :

La formule de Thornthwaite permet d'estimer l'évapotranspiration potentielle à l'échelle mensuelle en un lieu en fonction des températures moyennes mensuelles et de la latitude de ce lieu.

$$ETP (m) = 16 (10T(m) / I)^a ; \quad ETP(c) = ETP \cdot K$$

ETP (m) : Evapotranspiration potentielle moyenne en mm m : de 1 à 12

T(m) : Température moyenne mensuelle en °C

I : est un indice thermique annuel, somme des douze indices mensuels i(m)

$$I = \sum i$$

$$i (m) = (T(m)/5)^{1,514}$$

$$a = 6,75 \cdot 10^{-7} I^3 - 7,71 \cdot 10^{-5} I^2 + 1,79 \cdot 10^{-2} I + 0,49$$

K : coefficient de correction en fonction de la latitude. (Voir tableau II.13 ci-dessous)

Tableau II. 13: Estimation de l'évapotranspiration potentielle moyenne mensuelle en mm par la formule de Thornthwaite

Mois	T (°C)	I	I= ∑ i	a	ETP calculée (mm)	K	ETP corrigée (mm)
Jan	8,7	2,3			22,2	0,87	19,3
Fév	8,9	2,3			23,0	0,85	19,5
Mar	12,2	3,8	70,8	1,6	38,2	1,03	39,3
Avr	15,9	5,7			58,3	1,10	64,1
Mai	20,2	8,2			28,5	1,21	34,4
Jui	26,3	12,3			130,6	1,22	158,6
Jui	30,3	15,2			163,8	1,24	203,1
Août	30,1	15,1			162,0	1,16	187,9
Sep	24,9	11,3			119,6	1,03	123,1
Oct	20,8	2,7			89,7	0,97	87,0
Nov	13,4	4,4			44,4	0,86	38,1
Déc	9,8	2,7			26,9	0,84	22,5
Moy	18,4				75,5		83,0

D'après les résultats présentés dans le tableau ci-dessus, l'ETP maximale a été observée pendant le mois de juillet pour une valeur de 203, 1, ceci est dû à l'intensité du rayonnement solaire dans cette période, ce qui produit un déficit agricole, nécessitant une irrigation pour les zones de culture. Une diminution apparaît à partir du mois de novembre jusqu'à avril.

- La formule de Serra :

Serra simplifie l'expression de Thornthwaite :

Avec :

$$A = (1,6.I/100) + 0,5$$

$$I = 0,09T^{3/2}$$

(Voir le tableau II.14)

Tableau II. 14: Estimation de l'évapotranspiration potentielle moyenne mensuelle en mm par la formule Serra

Mois	T°C	I	I=∑ i	A	ETP calculée	K	ETP corrigée
Jan	8,7	2,0			19,3	0,87	16,7
Fév	8,9	2,1			20,1	0,85	17,0
Mar	12,2	3,3	77,7	1,7	34,4	1,03	35,4
Avr	15,9	4,9			54,0	1,10	59,4
Mai	20,2	7,0			81,1	1,21	98,1
Jui	26,3	10,3			92,0	1,22	112,2
Jui	30,3	12,6			161,7	1,24	200,5
Août	30,1	12,5			159,9	1,16	185,4
Sep	24,9	9,5			115,8	1,03	119,2
Oct	20,8	7,3			85,3	0,97	82,7
Nov	13,4	3,8			40,4	0,86	34,7
Déc	9,8	2,4			23,7	0,84	19,9
Moyenne	18,4				73,9		81,7

II.2.3.6.2.2 Calcul de l'évapotranspiration réelle (ETR) :

L'évaporation réelle (ETR) est la quantité d'eau réelle retirée d'une surface (par le sol et par les plantes) en raison du processus d'évaporation et de transpiration quand l'eau vient à manquer. Les plantes étant à un stade de développement physiologique et sanitaire spécifique.

A-Formule de Turc :

$$ETR = P / (0,9 + P^2 / L^2).1/2$$

Avec :

$$L=0,05T^3+25T+300$$

T : Température moyenne annuelle (°C)

P : Précipitation moyenne annuelle en (mm)

ETR : L'évapotranspiration réelle en (mm/an)

Après l'application de (L) on trouve : L = 1071,4

Après l'application de la formule on trouve ETR = 428,5 mm/an

B -Formule de Coutagne :

Le déficit d'écoulement calculé à partir de cette formule peut être rapproché de l'évapotranspiration réelle, elle fait intervenir la température et la hauteur des pluies.

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

Avec :

$$\lambda = 1 / (0,8 + 0,14. T)$$

Cette relation est valable si P appartient (1/8 λ , 1/2 λ)

ETR : évapotranspiration réelle en (m)

P : Pluie annuelle (m)

T : Température moyenne annuelle (°C)

Après calcul on trouve : λ = 0,3 et ETR = 391,4 mm

(Voir tableau ci-dessous II.15)

Tableau II. 15: Les valeurs d'évapotranspiration potentielle et évapotranspiration réelle de la région de Bouira

Paramètres	Méthodes	Valeurs	Moyennes arithmétiques (mm)
ETP	Thornthwaite	83	82,3
	Serra	81,7	
ETR	Turc	428,5	409,9
	Coutagne	391,4	

II.2.3.7 Estimation de la lame ruisselée (R) :

Elle est estimée par la formule de Tixeront Berkaloff.

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

Après l'application de la formule, la lame ruisselée est estimée à 33,82mm

La lame d'eau ruisselée peut être également estimée par la méthode de Sogreah établie pour les oueds de l'Algérie du Nord :

$$L_r = 720((P_a - 250)/1000)^{1,85}$$

L_r : Lame ruisselée (mm)

P_a : Pluie moyenne annuelle sur le bassin (mm)

Après calcul, on obtient une lame d'eau ruisselée égale à 33,85mm

Tableau II. 16: Résultats récapitulatifs de la lame ruisselée

Région	P moy (mm)	ETP moy (mm)	Lame ruisselée (mm)
Bouira	441,46	851,99	33,83

II.2.3.8 Calcul de l'infiltration :

L'infiltration est déduite à partir de l'équation principale du Bilan :

$$P = ETR + R + I \text{ d'où } I = P - ETR - R$$

L'application de la formule pour la station de Bouira, a donné les résultats mentionnés dans le tableau suivant.

Tableau II. 17: Résultats d'infiltration

Région	P moy (mm)	ETR (mm)	R (mm)	I (mm)
Bouira	441,46	395,01	33,83	12,62

D'après la valeur d'infiltration calculée ci-dessus pour la région de Bouira, on peut conclure que 2,85% des précipitations sont infiltrées.

II.2.3.9 Détermination du type du climat :

II.2.3.9.1 Indice annuelle d'aridité de De Martonne :

Pour déterminer le type du climat, on a utilisé la formule empirique de De Martonne appelée indice d'aridité annuel « A » qui est en fonction des précipitations et des températures.

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

Avec :

A : Indice d'aridité annuelle

P : Précipitations moyennes annuelles en mm

T : Températures moyennes annuelles en °C

Le climat est défini selon la valeur de A :

- A < 5: climat hyper aride
- 5 < A < 10: climat aride
- 10 < A < 20 : climat semi- aride
- 20 < A < 30 : climat tempéré
- A supérieur 30 climat humide

Après l'application de la formule, on obtient un indice d'aridité qui est égal à A=17,24 (Voir tableau II.18).

Tableau II. 18: Indice d'aridité annuelle pour la station de Bouira

Pmoy (mm)	T °C	A	Cadre climatique
441,46	15,6	17,24	Semi-aride

Selon l'abaque de De Martonne, la région de Bouira est une zone à climat semi-aride à écoulement temporaire formation herbacée. (Voir la figure suivante)

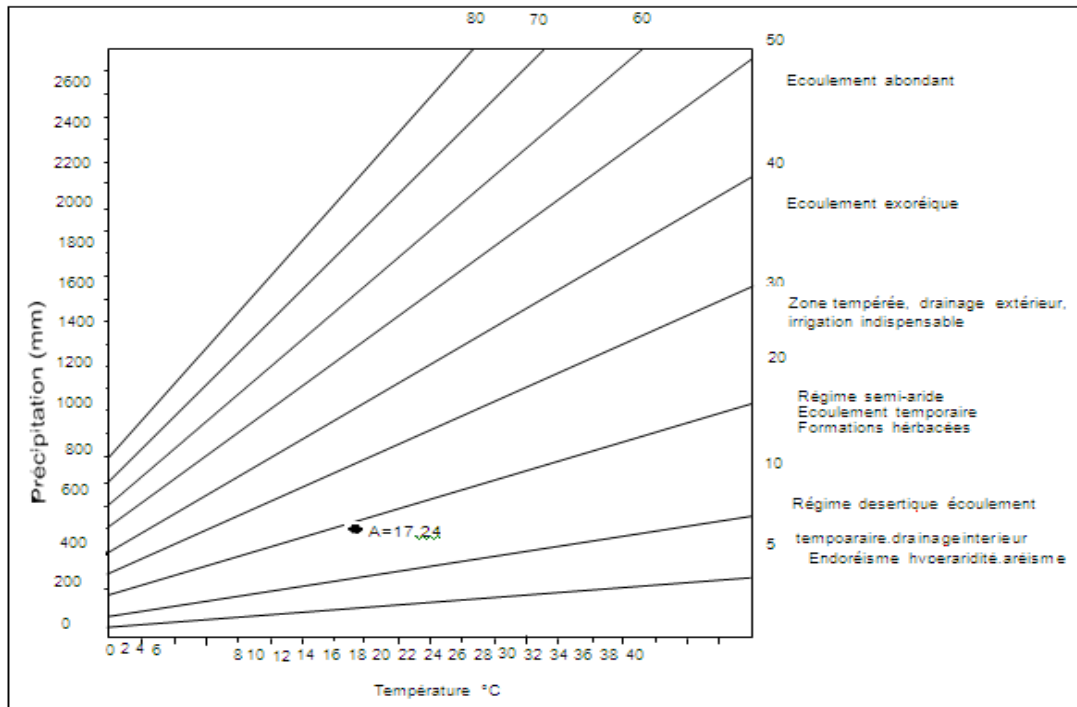


Figure II. 13: Abaque de l'indice d'aridité annuel de De Martonne.

II.2.3.9.2 Diagramme pluviométrique (Ombrothermique) :

Le diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gausson, est une méthode graphique qui permet de mettre en évidence les périodes sèches d'une région. Ce diagramme est représenté en abscisse par les mois de l'année, en ordonnée à gauche par les précipitations et en ordonnée à droite par les températures moyennes, avec une échelle de $P=2T$. Les mois secs sont définis, quand la courbe des précipitations est située au dessous de celle des températures moyennes.

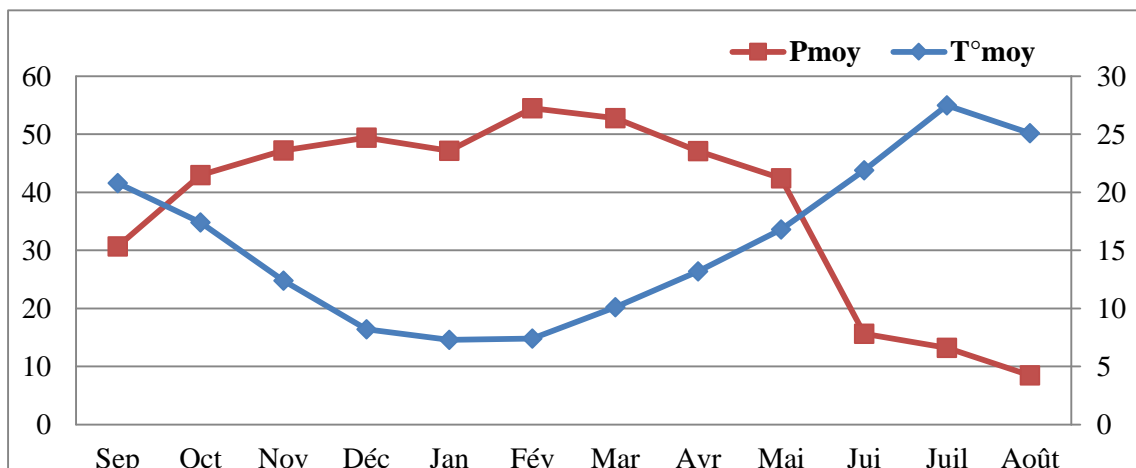


Figure II. 14: Diagramme ombrothermique de la région de Bouira.

D'après le tracé du diagramme pluviométrique de la zone d'étude (Figure II.14), permet de voir deux saisons, une saison humide à partir du mois mi-octobre jusqu'au mois mi-mai et une zone sèche du mois mi-mai au mois mi-octobre).

II.2.4 Contexte socio-économique :

II.2.4.1 Population :

La wilaya de Bouira s'étend sur une superficie de 4454 Km², représentant 0,19 du territoire national. Elle se subdivise en 12 Daïra et 45 Communes, avec une population estimée de 738 870 habitants. (ANDI, 2013).

II.2.4.2 Activité agricole :

La vocation de la wilaya de Bouira est essentiellement et résolument agricole. Elle dispose de deux grands périmètres agricoles dont le premier est à l'Est (périmètre de M'chedallah) de 1.600 ha et le second à l'ouest (périmètre des Aribes à Ain Bessem) de 2.200 ha. La production agricole au niveau de la wilaya est à prédominance céréalière et oléicole. (ANDI, 2013).

II.2.4.3 Activité industrielle :

D'importances ressources minières sont disponibles à travers la wilaya, tels que le gypse, pierre taillée et argile, exploitées entre autres par la cimenterie de Sour El Ghozlane, les briqueteries d'Aomar et plusieurs unités d'exploitations de carrières d'agrégats pour les besoins du BTPH. L'existence d'un poste transformateur de 400KV à Bir Ghbalou.

La wilaya de Bouira dispose d'une zone industrielle dans la commune d'oued el Berdi d'une superficie totale de 2 244 043 m². Le nombre de projets crée est de 49 dont 8 opérationnels avec effectifs de 180.(ANDI,2013)

II.2.4.4 Ressources hydriques :

- Barrage Koudiet Asserdoum commune de Maala sa capacité est de 640.000.000 m³
- Barrage Tilesdit commune de Bechloul de capacité 165.000.000 m³
- Barrage Lakhal commune d'Ain bessem de capacité 27.000.000m³
- Retenues collinaires : 30

II.2.4.5 Activité touristique :

Compte tenu de la diversité et de la richesse de ses paysages naturels, le secteur du tourisme et de l'artisanat de la wilaya dispose de potentialités certaines pour son développement marqué notamment par :

- les espaces montagneux et forestiers.

- le site thermal (Hamмам Ksena au Sud).
- le plan d'eau, barrages et retenues collinaires.
- le parc national de Djurdjura (18.000 ha dont 9.000 ha à Bouira).

Quant à l'activité artisanale de la wilaya de Bouira, elle est très connue par la poterie, la tuile artisanale, l'habit traditionnel dont la fameuse robe El Ksar, la robe kabyle, le burnous... (ANDI, 2013)

II.2.4.6 Réseau électrique :

- Taux d'électrification urbain : 98%
- Taux de couverture en gaz de ville

II.3 Présentation hydrogéologique de la région d'étude :

L'hydrogéologie est la science qui s'occupe de la distribution et de la circulation de l'eau souterraine dans le sol et les roches, en tenant compte de leurs interactions avec les conditions géologiques et l'eau de surface. Dans cette partie d'étude, on s'intéresse particulièrement au plateau d'El Asnam, qui se situe à 13 km à l'Est du chef-lieu de la wilaya de Bouira. Il couvre une surface de l'ordre de 55 km², chevauchant deux sous bassins à savoir l'oued Eddous au Nord et l'oued Zaiane au Sud-est, son altitude moyenne est de 700m à l'Ouest et s'abaisse progressivement vers l'Est à environ 550m. Ces deux oueds sont les affluents de l'oued Sahel, lui-même affluent de l'oued Soummam. Ce plateau abrite une nappe d'eau importante exploitée pour les besoins en eaux potables des principales agglomérations de la zone de Bouira-El Asnam.

La superficie de l'aquifère d'El Asnam est de 21,34km² et un périmètre de 36,60 km. Le plateau d'El Asnam a connu ces dernières années une expansion économique et particulièrement agricole (culture de pomme de terre, céréaliculture, élevage de volailles ...etc.), après l'application du PNDA en 2000. Ceci a augmenté la demande en eau et exposé, ces dernières années, la nappe souterraine en raison de la remontée appréciable du niveau statique (irrigation par le barrage de Telesdit (ANRH, 2010)) à différentes pollutions résultant de l'activité humaine et agricole tels que :

- Les cultures de la pomme de terre et céréalières, qui utilisent d'importantes quantités de fertilisants sous forme de fumier, ou d'engrais azotés ;
- L'irrigation incontrôlée qui entraîne la percolation de ces derniers ;
- Les rejets urbains, qui déversent les eaux usées domestiques dans le plateau, sans traitement préalable, et l'absence des réseaux d'assainissement dans certaines régions tel que le village socialiste ;
- Les décharges ménagères sauvages.

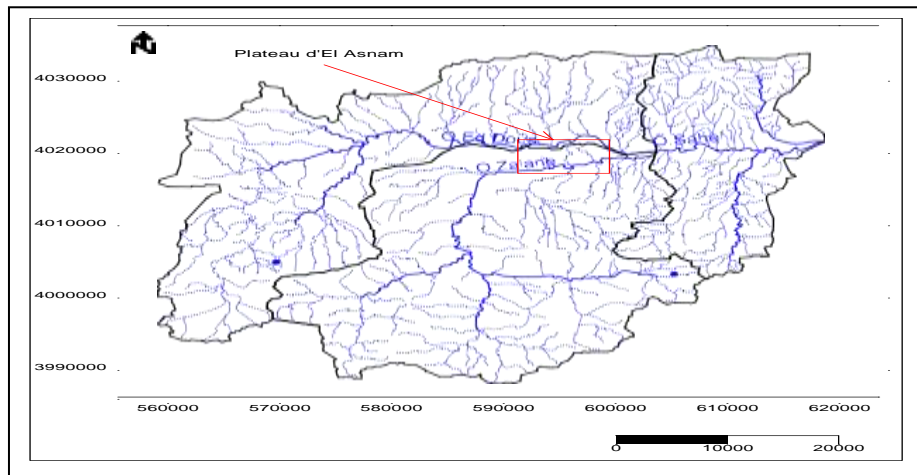


Figure II. 15: Localisation du plateau d'El Asnam

II.3 Cadre géologique :

II.3.1 Géologie locale :

La zone d'étude renferme des séries autochtones, des séries allochtones et enfin des formations récentes post-nappes.

II.3.1.1 Les séries autochtones ou parautochtones :

A-L'Albien : Il est représenté par une série d'argile schisteuses ocre et des grés quartzifères de type flysch. Localement, il affleure au nord-ouest et au sud-est de la zone d'étude.

B- L'Albien supérieur : Comprenant de la base au sommet

- Argiles et calcaires marneux ;
- Calcaires à cassure noire ;
- Alternance de calcaire et de marne grise.

Il affleure en petits liserés dans la partie ouest de la zone d'étude.

C- Le Cénomanién : Il est constitué essentiellement de marnes grises et calcaires marneux. Il affleure largement au nord et surtout à l'ouest et au sud de la zone d'étude.

II.3.1.2 Les séries allochtones :

A- Le Trias : On le rencontre en petits affleurements dans toute la plaine. Il est constitué par des argiles blanches ou jaunes, des dolomies et des gypses. Localement, il forme de petites semelles à l'est, au sud et à l'ouest de la zone d'étude.

B- Le Turono-Sénonien : Nous distinguons dans cet ensemble de bas en haut :

- Marnes grises, calcaires argileux du Turonien. Ils affleurent en petites fenêtres dans la partie nord du bassin versant.
- Flysch argilo-schisteux olivâtre du Coniacien. Il s'agit de petits affleurements de part et d'autre de l'oued Lekhal à l'est immédiat de la zone d'étude.
- Marnes grises à bancs de calcaires du Maëstrichtien-Campanien. Ces formations affleurent largement sur le pourtour du bassin versant notamment au sud de la zone.

C- Le Paléogène : Il se rencontre en petits affleurements au Sud de la zone d'étude. Il comprend :

- **L'Yprésien-Thanétién :** ce sont des calcaires à patine blanche avec des silex à la base. Il affleure au sud-ouest du bassin versant.

- **Le Lutétien :** ce sont des marnes à bancs de calcaire lumachellique jaune roux. Il apparaît en klippe dans la partie nord du bassin versant.

- **L'Oligocène (faciès numidien) :** c'est essentiellement des argiles et grès. Il affleure au nord-ouest de la zone d'étude.

II.3.1.3 Les formations récentes post-nappes :

A- Le Miocène: on le rencontre en petits affleurements sur les deux rives de l'oued Lekhal et oued d'hous.

B- Le Quaternaire ancien : il est représenté par des dépôts continentaux.

Ils sont constitués de graviers et de galets mélangés de sables et d'argiles. Ces dépôts sont les plus répandus dans la zone sud-ouest de la plaine vers l'oued Krarifes.

C- Les alluvions récentes :

Ce sont des dépôts argileux-sableux mélangés parfois de graviers et disposés en minces bandes des deux côtés des oueds.

II.3.2 Hydrogéologie :

Les principales réserves d'eaux souterraines de la région sont contenues dans la nappe alluviale des oueds et leurs affluents. Le terrain réservoir est constitué par un remplissage alluvionnaire quaternaire (sables, graviers, limons et argiles). Cet aquifère est capté par des puits paysans destinés à l'irrigation (se concentrent généralement le

long des oueds). La recharge de la nappe se fait essentiellement par l'infiltration directe des pluies mais aussi par les oueds, notamment en situation de basses eaux.

II.3.3 Présentation des données d'analyse physico-chimique :

Dans ce chapitre, on a surtout opté pour les données d'analyse physico-chimique des eaux de forages de la région de Bouira en 2006, en raison du manque de données pour les autres années. Elles sont issues d'une campagne de prélèvement réalisée par le laboratoire de contrôle de la qualité de l'eau géré par l'ADE sur 59 forages en 2006.

Tableau II. 19 : Données d'analyse des paramètres physico-chimiques pour l'année 2006

commune	N°	Nom. Forages	T °C	pH	Cond µs/cm	Tur NTU	Ca ²⁺ mg/l	Mg ² mg/l	Na ⁺ mg/l	K ⁺ mg/l	HCO ₃ ⁻ mg/l	Cl ⁻ mg/l	SO ₄ ²⁻ mg/l	NO ₃ ⁻ mg/l
Ain bessem	F1	Captage Ain El Baida r Ghbalou u Ain Bessem	16,2	6,99	1132	0,4	96	25,27	34	1	213,5	183,8	127,4	100
	F2	Captage Ain Lahdjar Ain Bessem	19,5	6,87	638	0,11	64	11,6	27	1	286,7	127,1	23,8	50,9
	F3	Forage F1 Ain Lahdjar Ain Bessem	19,2	6,8	1098	0,53	92,8	23,32	75	2	394,06	181,05	103,3	25,64
Ain bessem	F4	Forage F1 Ain Laloui Ain Bessem	20,3	6,82	1161	0,49	115,2	31,1	55	0,9	345,26	161,2	108,9	100
	F5	Forage F1 BirGhba	14,6	7,03	1188	0,13	52,8	14,58	75	<01	150,66	87,33	148	106,76

BOUIRA		lou Ain Bessm												
	F6	Source Chaiba Ain Lahdjar AINBE SSEM	20	6,88	901	0,19	83,2	19,44	42	0,8	311,1	135,1	73,3	57,27
	F7	Forage F3 El Asnam Bouira	20,5	6,55	1268	0,68	56	72,9	54	1	452,62	155,5	39,9	80,09
	F8	Forage F1 El Asnam Bouira	20,9	6,54	1993	0,77	230,4	29,16	90	1	486,78	439,5	45,02	75,32

commune	N°	N. Forages	T °C	pH	Cond µs/cm	Tur NT U	Ca ²⁺ mg/l	Mg ²⁺ mg/l	Na ⁺ mg/l	K ⁺ mg/l	HCO ₃ ⁻ mg/l	Cl ⁻ mg/l	SO ₄ ²⁻ mg/l	NO ₃ ⁻ mg/l
BOUIRA	F9	Forage F3 Bechloul Bouira	20,8	6,66	1100	0,2	112	31,1	63	1	381,86	141,3	26,86	50,32
	F10	Forage F2 Bechloul Bouira	20,4	6,81	973	0,19	83,2	27,21	63	1	320,62	141,3	31,16	40,75
	F11	Forage Ouled Abdellah Bouira	20,7	6,82	1538	0,16	185,6	42,76	48	1	442,86	189,5	260,3	7,79
	F12	Forage OuledRached Bouira	21	6,73	1476	1,1	150,4	48,6	56	2	437,98	186,7	149,2	18,25
	F13	Forage F3 AhlLaksar Bouira	22	6,38	1197	0,58	102,4	45,68	50	1	379,42	142,7	35,34	86,47
	F14	Forage F1 Guemgou-	22,2	7,16	1031,5	4,15	76	32,08	60	1	180,26	137,7	22,9	56,52

Chapitre II : Présentation hydrologique et hydrogéologique de la zone d'étude

	ma Bouira													
F1 5	Forage OuledBelil Bouira	21	7,06	900	0,49	99,2	26,4	60	1	347,7	118,57	19,5	6,24	
F1 6	Puits Oued D'ouss Bouira	17,5	6,94	1113	0,38	129,6	25,27	70	3	355,02	152,65	111,1	11,82	
F1 7	Forage F 2 Merkala Bouira	11,7	6,89	658	0,16	60,8	27,21	21	1	355,02	84,49	14,91	16,3	
F1 8	Forage F'1 Merkala Bouira	13,4	6,87	697	0,47	67,2	21,38	40	2	394,06	95,85	24,24	21,52	
F1 9	Forage F17 Merkala Bouira	14,1	6,85	771	0,26	60,8	17,49	50	1	369,66	155,5	19,76	19,09	
F2 0	Forage F2 Merkala Bouira	13,7	6,83	1724	0,72	89,6	31,1	115	2	364,3	462,2	38,56	15,23	
F2 1	Forage F4 Merkala Bouira	12,3	6,88	719	1,04	70,4	15,55	27	1	389,18	98,69	21,36	0,88	
F2 2	Forage F23 Bouira	19,5	7,44	1005	0,28	112	19,44	66	1	306,22	148,4	25,05	13,42	
F2 3	Forage Sidi Ziane Bouira	19,9	6,91	880	0,79	104	23,32	55	1	318,42	108,6	36,64	9,34	

	N°	N. Forages	T °C	pH	Con d μs/cm	Tur NT U	Ca ²⁺ mg/l	Mg ²⁺ mg/l	Na ⁺ mg /l	K ⁺ mg/l	HCO ₃ ⁻ mg/l	Cl ⁻ mg/l	SO ₄ ²⁻ m g/l	NO ₃ ⁻ mg/l
BOUIRA	F24	Forage F10 Bouira	20,2	6,88	1003	0,92	126,4	10,7	55	1	320,86	129,9	71,59	11,25
	F25	Forage F'12 Merkala Bouira	13,9	6,5	3330	1,7	112	66,09	480	2	559,98	984,7	38,62	17,14
Lakhdaria	F26	Puit P1 Bordja Lakhdari a	17,5	6,8	1971	0,32	172,8	68,04	110	3	453,58	263,4	400,5	28,57
	F27	Puits P2 Bordja Lakhdari a	17,2	6,76	1992	0,17	182,4	81,64	110	3	418,46	280,4	454,5	54,48
	F28	Puits P3 Bordja Lakhdari a	17,8	6,75	2480	0,18	211,2	104,9	130	3	516,06	325,8	640,25	18,07
	F29	Puit P2 Merdja Lakhdari a	10,1	7,41	1498	0,27	134,4	69,98	80	2	486,78	129,9	71,6	68,39
	F30	Puit P3Merdj a Débouch é Lakhdari a	10,2	6,95	1286	0,78	121,6	60,26	60	2	428,22	101,53	76,9	58,65
	F31	Forage F1 bouamou d Lakhdari a	9,8	7,57	1484	0,32	115,2	83,59	81	3	394,06	110,05	182,7	4,74

F32	Puit Zbarbour a Lakhdari a	18,5	6,7	1663	0,18	150,4	59,29	85	2	420,9	198,1	293,75	16,87
F33	Forage Tilliouin e Lakhdari a	17,6	6,95	1353	0,13	115,2	60,26	85	2	389,18	183,9	165	14,08
F34	Forage Boulerba h Lakhdari a	19,8	7,13	2880	0	240	81,65	150	3	379,4	442,3	778	16,21
F35	Forage P1 Kadiria Lakhdari a	18,4	6,73	2310	0,15	214,4	104,9	190	3	530,7	354,29	400	47,04
F36	Forage P2 Kadiria Lakhdari a	18,3	6,82	2160	1,69	188,8	68,04	200	3	472,14	325,89	419,25	36,01
F37	PuitYafti s Kadiria Lakhdari a	17,6	6,8	2240	0,75	172,8	85,53	200	3	384,3	331,57	547,5	35,08

commune	N°	N. Forages	T °C	pH	Cond μs/cm	Tur NTU	Ca ²⁺ mg/l	Mg ² mg/l	Na ⁺ mg/l	K ⁺ mg/l	HCO ₃ ⁻ mg/l	Cl ⁻ mg/l	SO ₄ ²⁻ mg/l	NO ₃ ⁻ mg/l
Lakhdaria	F3 8	Puit Ain El Beida guerrouma Lakhdaria	16,4	6,95	1394	0,37	2,4	50,54	80	2	379,42	183,89	157,5	12,22
	F3 9	Captage Guergour Lakhdaria	9,7	7,2	1205	0,21	147,2	60,26	16	2	374,54	84,49	111,14	0,75
	F4 0	PuitExhaur Aomar Lakhdaria	17,7	6,98	1875	0,42	131,2	60,26	128	4	262,3	254,89	437,5	12,22
	F4 1	Nouveau Puit Aomar Lakhdaria	17,6	6,86	2260	0,56	144	89,42	150	2	369,66	354,29	503	54,35
	F4 2	Puit Ouled Laalem Kadiria Lakhdaria	15,9	6,77	2070	0,72	78,4	62,2	130	3	481,9	274,7	487	11,25
	F4 3	Forage Lahguia Lakhdaria	17,8	6,92	2100	0,46	140,8	87,48	150	2	389,1	288,9	500,25	46,11
	F4 4	Puit Mahouane Lakhdaria	10	7,02	1663	1,15	112	87,48	95	3	423,34	172,5	182,6	0
m'chedallah	F4 5	Source Noire M'chedallah	16,2	7,13	468	0,47	68	18,95	8	1	237,9	17,75	52,2	0,7
	F4 6	Forage F1 Raffour	20,9	6,93	1046	14,5	118,4	28,18	55	1	303,78	129,9	5,9	15,15
	F4 7	Forage F2 Raffour	20,9	6,94	1480	10,7	140,8	46,65	85	2	462,38	203,7	92,3	25,25
	F4 8	Forage F1 Chorfa	23,4	6,36	1076	0,23	108	15,55	65	2	352,58	120,7	95,6	8,06
	F4 9	Forage F2 Chorfa	23,5	6,69	885	0,13	80	13,61	60	2	342,82	90,88	73,8	7,18
	F5 0	Forage F1 El Adjiba	20,3	7,04	1146	0,17	108,8	18,46	80	2	279,38	172,53	100	3,54

F5 1	Forage F2 Semmaché	20	6,83	919	0,11	81,6	31,1	70	2	267,18	131,35	52,6	1,77
F5 2	Puit Taourirt	22,2	6,69	1573	0,32	136	26,73	100	3	384,3	248,5	179	11,7
F5 3	Forage Taourirt	22,1	6,86	1516	1,06	150,4	38,88	85	2	428,22	220,81	121,2	34,64
F5 4	Forage Ouled Bouali	23	6,52	1618	0,2	145	25,27	100	2	335,5	249,92	275	13,38
F5 5	Forage GueltaZerga S.E.G	15,2	7,06	1388	3,22	70,4	27,21	150	2	472,14	226,5	176,6	30,83

commune	N°	N. Forages	T °C	pH	Cond μs/c m	Tur NTU	Ca ²⁺ mg/l	Mg ² mg/l	Na ⁺ mg/l	K ⁺ mg/l	HCO ₃ ⁻ mg/l	Cl ⁻ mg/l	SO ₄ ²⁻ m g/l	NO ₃ ⁻ mg/l
SEG	F56	Puits Guelta Zerga S.E.G	15,4	7,16	1258	0,61	144	15,55	60	1	306,2	183,8	192,6	100
	F57	PuitKhlif at SEG	18,8	7,04	1962	0,47	195,2	29	100	1	306,22	178,2	821	23,92
	F58	Puit Tarfa Taguedite S.E.G	14,8	6,76	2250	0,578	249,6	83,59	110	2	379,42	117,8	617,2	11,34
	F59	Forage Souaghi S.E.G	16,4	6,9	1044	0,13	115,2	29,16	45	2	389,18	155,5	188,7	44,3

Conclusion :

D'après les données climatologiques et les résultats obtenus par différentes méthodes permettent d'attribuer à la région d'étude un climat semi-aride, caractérisé par une saison sèche qui s'étend du mois de mi-mai au mois de mi-octobre. Et une saison humide, qui s'étend du mois mi-octobre au mois de mi-mai. La zone d'étude renferme des séries autochtones, des séries allochtones et enfin des formations récentes post-nappes. Les principales réserves d'eaux souterraines de la région sont contenues dans la nappe des oueds et leurs affluents.

Chapitre III :
Calcul des différents
paramètres
caractéristiques des
eaux souterraines et
interprétation des
résultats

III.1 Introduction :

L'étude physico-chimique de l'eau souterraine joue un rôle important dans la détermination de sa qualité, donc de la possibilité de son utilisation pour l'alimentation en eau potable ou pour d'autres usages (irrigation, industrie...etc.).

La chimie des différentes sources en eau (eaux de surface, eaux souterraines) est souvent influencée par la dissolution des formations géologiques, des rejets industriels et l'activité agricole.

Le but de ce chapitre est de définir la qualité physico-chimique des eaux souterraines de la région de Bouira à travers de plusieurs calculs comme les titres de l'eau, les indices de saturation et enfin l'aptitude de ces eaux à l'irrigation. En utilisant des données d'analyses physico-chimiques des eaux souterraines de cette région.

Ces données d'analyses sont prélevées au niveau des différents forages de la période 2003-2013 par le laboratoire de l'unité ADE de Bouira, avant de commencer les calculs, on a surtout opté pour les données d'analyse physico-chimique des eaux de forages de la région de Bouira en 2006, du fait qu'il y a un manque de données pour les autres années. Essayant de faire une vérification de la fiabilité de ces analyses en utilisant la méthode de la balance ionique (BI), les calculs sont faits avec l'activité ionique dont le but d'avoir des résultats plus précis. Par contre les années 2004 et 2010 n'ont pas été prises en considération en raison du manque de données tels que les ions majeurs $\text{Na}^+, \text{K}^+, \text{SO}_4^{2-}$. Pour les autres années, c'est-à-dire 2003/2005/2007/2008/2009/2011/2012/2013, on a considéré la balance ionique égale à zéro pour qu'on puisse calculer les teneurs en Na^+ manquantes, tout en proposant la valeur des teneurs en $\text{K}^+ = 2\text{mg/l}$. Dans le cas où, on trouverait les valeurs de Na^+ négatives, on va prendre la valeur de $\text{Na}^+ = 0$ après, on procède au calcul de la balance ionique.

III.2 Vérification de la balance ionique

III.2.1 Balance ionique :

Concernant la qualité chimique des eaux, et avant de traiter et d'interpréter les analyses des eaux prélevées au niveau des différentes stations (eaux souterraines et eaux de surfaces), il faut analyser la fiabilité des résultats de ces analyses. La méthode utilisée est la Balance Ionique (BI). Il faut rappeler qu'en théorie, une eau naturelle est électriquement neutre. De ce fait, la somme (en équivalents chimiques) des cations devrait être égale à celle des anions (en équivalents chimiques). En réalité, cette égalité est rarement obtenue. De façon générale, la différence est attribuée aux incertitudes, à la présence de certains ions non dosés ou à d'éventuelles erreurs d'analyse. Ainsi, une certaine marge de déséquilibre entre anions et cations est admise. Elle est exprimée sous forme d'un écart relatif par la formule :

$$BI = \frac{\sum \text{cations} - \sum \text{anions}}{\sum \text{cations} + \sum \text{anions}} \cdot 100$$

Le calcul de la balance ionique permet généralement de vérifier la fiabilité des résultats des analyses chimiques. Cependant, les incertitudes sur les résultats, variables selon les techniques d'analyse, peuvent expliquer les erreurs parfois élevées sur les balances ioniques, à cause de la présence éventuelle d'anions organiques non pris en compte dans les calculs. D'une manière générale, les analyses chimiques sont considérées :

- Excellentes lorsque $BI < 5 \%$;
- Acceptable lorsque $5\% < BI < 10 \%$;
- Douteuse lorsque $BI > 10 \%$

Tableau III. 1: Valeurs calculées de la balance ionique pour l'année 2006.

N° de forage	BI %	N° de forage	BI%	N° de forage	BI%
F1	10,31	F21	41,88	F41	0,44
F2	7,14	F22	47,73	F42	13,11
F3	18,18	F23	49,84	F43	2,45
F4	6,54	F24	34,68	F44	36,05
F5	14,56	F25	27,82	F45	44,96
F6	8,62	F26	5,52	F46	55,82
F7	25,47	F27	4,66	F47	37,79
F8	22,62	F28	0,05	F48	31,64
F9	37,75	F29	42,10	F49	34,59
F10	32,16	F30	45,47	F50	29,14
F11	16,22	F31	37,78	F51	43,16
F12	27,58	F32	14,24	F52	14,95
F13	25,79	F33	27,49	F53	28,89
F14	29,00	F34	8,98	F54	4,13
F15	56,36	F35	19,48	F55	5,93
F16	31,54	F36	12,57	F56	0,86
F17	44,14	F37	5,69	F57	23,71
F18	39,27	F38	0,56	F58	8,73

F19	28,06	F39	46,78	F59	7,19
F20	14,66	F40	1,36		

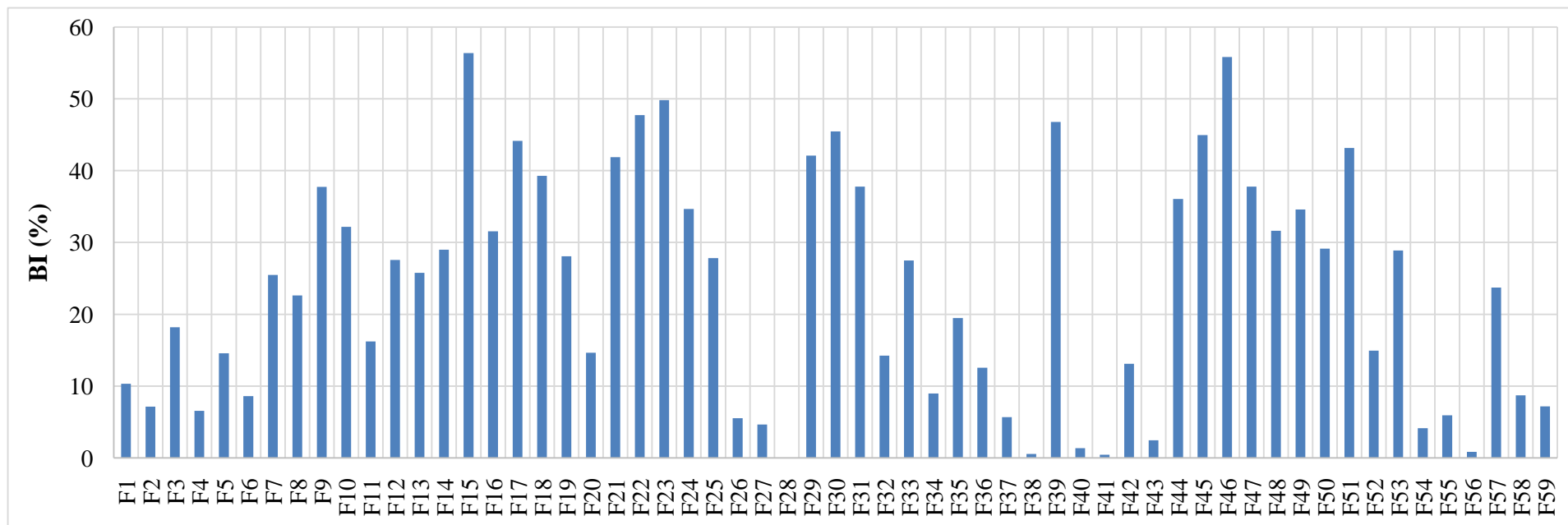


Figure III. 1: Représentation de la balance ionique pour l'année 2006

Le graphique ci-dessus représente la balance ionique calculée sur chacun des échantillons d'eau analysés. Il montre que la balance ionique des eaux des forages suivants sont supérieures à 10% ce qui est très fort. Les résultats d'analyse sont donc incorrects. Pour cela ces 42 forages sont éliminés puisque leur valeurs dépassent la norme, alors il reste 17 forages à étudier.

Tableau III. 2. Les forages dont leurs valeurs de BI non acceptable (superieur à 10%).

N° de forage	BI %	N° de forage	BI %	N° de forage	BI %	N° de forage	BI %	N° de forage	BI %
F1	10,31	F13	25,79	F22	47,73	F33	27,49	F47	37,79
F3	18,18	F14	29,00	F23	49,84	F35	19,48	F48	31,64
F5	14,56	F15	56,36	F24	34,68	F36	12,57	F49	34,59
F7	25,47	F16	31,54	F25	27,82	F39	46,78	F50	29,14
F8	22,62	F17	44,14	F29	42,10	F42	13,11	F51	43,16
F9	37,75	F18	39,27	F30	45,47	F44	36,05	F52	14,95
F10	32,16	F19	28,06	F31	37,78	F45	44,96	F53	28,89
F11	16,22	F20	14,66	F32	14,24	F46	55,82	F57	23,71
F12	27,58	F21	41,88						

III.2.2 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 avoir des valeurs précises, tous les calculs sont effectués en fonction de l'activité ionique.

L'activité ionique pour l'espèce chimie « i » est notée « ai » et s'écrit :

$$a_i = \gamma_i \frac{C_i}{C_0}$$

Avec :

ai : activité ionique de l'ion i (sans unité)

γ_i : coefficient de l'activité ionique de l'ion i

Ci : concentration de l'espèce en (mol/l)

C0 =1 : concentration de référence (standards) en mol /l

Le coefficient d'activité ionique est calculé par les formules suivantes :

Modèle de Debye Huckel :

Limité : pour $I < 10^{-2,3}$ mol/l $\ln(Y_i) = -0,509 \cdot Z_i^2 \cdot (I)^{1/2}$

Etendue : pour $I < 0,1$ mol/l $\ln(Y_i) = -0,509 \cdot Z_i^2 \cdot (I^{1/2} / 1 + 3,3 \cdot d_{ei} \cdot I^{1/2})$

d_{ei} : diamètre effectif moyen de l'ion hydraté (en nm).

Z_i : charge de l'ion i.

I (mol/l) : force ionique de l'ion i.

Tableau III. 3 : Diamètre effectif moyen de l'ion hydraté.

Ions	d_{ei} (nm)	Ions	d_{ei} (nm)
H_3O^+ , Al^{3+} , Fe^{3+}	0,900	Na^+ , HCO_3^-	0,425
Mg^{2+}	0,800	OH^- , HS^-	0,350
Ca^{2+} , Fe^{2+}	0,600	K^+ , Cl^-	0,300

La force ionique est calculée de la formule suivante :

$$I \text{ (mol/l)} = 0,5 \sum C_i Z_i^2$$

Avec :

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

Z_i : charge de l'ion i

Tableau III. 4: Valeurs de la force ionique de chaque forage pour l'année 2006

N°. Forages	I(mol/l)	N°. Forages	I(mol/l)
F2	0,00759583	F40	0,02295295
F4	0,01526228	F41	0,02939939
F6	0,01047299	F43	0,02826737
F26	0,02528502	F54	0,01782883
F27	0,02853248	F55	0,01427749
F28	0,03425874	F56	0,01689431
F34	0,0370615	F58	0,03174953
F37	0,0315015	F59	0,01436782
F38	0,01012536		

Tableau III. 5: Coefficient d'activité ionique γ_i pour l'année 2006.

N°. Forages	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻
F2	0,8596	0,8657	0,9612	0,9600	0,9612	0,9600	0,8739	0,9629
F4	0,8170	0,8272	0,9478	0,9455	0,9478	0,9455	0,8406	0,9507
F6	0,8409	0,8487	0,9555	0,9538	0,9555	0,9538	0,8591	0,9576
F26	0,7817	0,7961	0,9360	0,9325	0,9360	0,9325	0,8144	0,9403
F27	0,7728	0,7883	0,9329	0,9290	0,9329	0,9290	0,8080	0,9376
F28	0,7590	0,7764	0,9279	0,9235	0,9279	0,9235	0,7982	0,9334
F34	0,7529	0,7711	0,9257	0,9210	0,9257	0,9210	0,7940	0,9315
F37	0,7654	0,7819	0,9302	0,9260	0,9302	0,9260	0,8027	0,9353
F38	0,8430	0,8506	0,9561	0,9545	0,9561	0,9545	0,8607	0,9582
F40	0,7888	0,8023	0,9384	0,9351	0,9384	0,9351	0,8195	0,9424
F41	0,7706	0,7864	0,9321	0,9281	0,9321	0,9281	0,8064	0,9369
F43	0,7735	0,7889	0,9331	0,9293	0,9331	0,9293	0,8085	0,9378
F54	0,8065	0,8179	0,9444	0,9417	0,9444	0,9417	0,8327	0,9477
F55	0,8214	0,8312	0,9492	0,9471	0,9492	0,9471	0,8439	0,9520
F56	0,8102	0,8212	0,9456	0,9431	0,9456	0,9431	0,8354	0,9487
F58	0,7648	0,7814	0,9300	0,9258	0,9300	0,9258	0,8023	0,9352
F59	0,8210	0,8308	0,9491	0,9469	0,9491	0,9469	0,8436	0,9519

Tableau III. 6: Valeurs calculées de l'activité ionique pour l'année 2006.

N° de forage	Ca ²⁺ (mmol/l)	Mg ²⁺ (mmol/l)	Na ⁺ (mmol/l)	K ⁺ (mmol/l)	HCO ₃ ⁻ (mmol/l)	Cl ⁻ (mmol/l)	SO ₄ ²⁻ (mmol/l)	NO ₃ ⁻ (mmol/l)
F2	1,3726	0,4132	1,1289	0,0246	2,0026	0,6444	0,4631	0,7904
F4	2,3484	1,0585	2,2675	0,0242	2,5044	2,9043	0,8751	1,5333
F6	1,7457	0,6788	1,7455	0,0244	2,1159	1,9720	0,5122	0,8845
F26	3,3706	2,2286	4,4783	0,0715	4,0410	10,5337	0,2422	0,4333
F27	3,5172	2,6480	4,4634	0,0713	4,2875	11,9094	0,4582	0,8238
F28	3,9996	3,3507	5,2471	0,0709	4,9554	16,6770	0,1501	0,2720
F34	4,5088	2,5906	6,0401	0,0707	6,7115	20,2108	0,1340	0,2435
F37	3,3000	2,7514	8,0924	0,0711	5,0556	14,3008	0,2931	0,5292
F38	0,0505	1,7686	3,3270	0,0488	2,8819	4,2403	0,1095	0,1888
F40	2,5821	1,9890	5,2246	0,0957	3,9205	11,5399	0,1043	0,1857
F41	2,7687	2,8932	6,0813	0,0475	5,4127	13,1678	0,4563	0,8213
F43	2,7175	2,8396	6,0880	0,0475	4,4186	13,1121	0,3881	0,6974
F54	2,9180	0,8504	4,1077	0,0482	3,8686	7,3048	0,1160	0,2045
F55	1,4429	0,9305	6,1934	0,0484	3,5242	4,7176	0,2709	0,4734
F56	2,9111	0,5254	2,4678	0,0241	2,8488	5,1233	0,8697	1,5301
F58	4,7629	2,6873	4,4498	0,0474	1,7957	16,1172	0,0947	0,1710
F59	2,3599	0,9967	1,8578	0,0484	2,4191	5,0400	0,3890	0,6801

Tableau III. 7: Teneurs corrigées des ions majeurs en mg/l pour l'année 2006.

N°. Forages	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻
F2	55,012	10,042	25,954	2,433	122,174	22,848	44,481	49,010
F4	94,120	25,727	52,130	2,396	152,788	102,969	84,059	95,073
F6	69,965	16,499	40,130	2,418	129,084	69,916	49,198	54,842
F26	135,086	54,167	102,956	7,090	246,533	373,461	23,268	26,864
F27	140,961	64,359	102,614	7,064	261,571	422,237	44,020	51,081
F28	160,297	81,439	120,631	7,022	302,321	591,266	14,423	16,866
F34	180,703	62,964	138,862	7,003	409,457	716,552	12,870	15,100
F37	132,256	66,873	186,044	7,041	308,433	507,021	28,159	32,812
F38	2,023	42,987	76,489	4,839	175,819	150,336	10,517	11,709
F40	103,487	48,344	120,113	9,481	239,184	409,136	10,015	11,516
F41	110,963	70,318	139,809	4,705	330,220	466,850	43,828	50,922
F43	108,910	69,015	139,964	4,711	269,571	464,876	37,280	43,243
F54	116,947	20,669	94,436	4,774	236,015	258,985	11,141	12,680
F55	57,827	22,616	142,386	4,801	215,004	167,257	26,018	29,350
F56	116,669	12,769	56,735	2,390	173,797	181,640	83,544	94,874
F58	190,888	65,314	102,301	4,693	109,555	571,421	9,098	10,605
F59	94,579	24,226	42,710	4,800	147,587	178,689	37,372	42,169

III.3 Calcul des titres de l'eau :

III.3.1 Titre alcalimétrique (alcalinité) :

L'alcalinité d'une eau correspond à sa capacité à réagir avec les ions hydrogène (H⁺) qui est due à la présence des ions hydrogénocarbonates (HCO₃⁻), carbonates (CO₃²⁻) et hydroxyde (OH⁻). Elle est mesurée soit par le titre alcalimétrique (TA) ou par le titre alcalimétrique complet (TAC).

Le (TA) et le (TAC) désignent l'alcalinité d'une eau. La connaissance de ces valeurs est importante pour l'étude de l'agressivité d'une eau.

Le titre d'alcalimétrie (simple et complet) exprimé en degré français °F est donné par ces formules suivantes :

III.3.1.1 Titre alcalimétrique simple (alcalinité simple) :

$$TA = [CO_3^{2-}] + [OH^-]$$

TA : Titre alcalimétrique simple (alcalinité simple).

$[CO_3^{2-}]$ (°F) : concentration en carbonate.

$[OH^-]$ (°F) : concentration en hydroxyde.

Les résultats de l'alcalinité simple sont nuls à cause de l'indisponibilité des analyses de l'élément $[CO_3^{2-}]$ et $[OH^-]$.

III.3.1.2 Titre alcalimétrique complet (alcalinité complète) :

$$[TAC] = [CO_3^{2-}] + [OH^-] + [HCO_3^-]$$

TAC (°F) : Titre alcalimétrique complet (alcalinité complet).

$[CO_3^{2-}]$ (°F) : Concentration en carbonate.

$[OH^-]$ (°F) : Concentration en hydroxyde.

$[HCO_3^-]$ (°F) : Concentration en hydrogénocarbonate.

$$1^\circ F = 10\text{mg/l de CaCO}_3$$

Dans ce cas $TAC = [HCO_3^-]$ car les concentrations de $[OH^-]$ et $[HCO_3^-]$ ne sont pas disponibles, les résultats de calcul des titres alcalimétriques simple et complet sont présentés dans le tableau III.7.

Tableau III. 8: Valeurs calculées de l'alcalinité simple et complète des eaux de forage pour l'année 2006.

N°. Forages	TA(-)	TAC (°F)	TAC (mg/l CaCo3)
F2	0	10,012	100,116
F4	0	12,520	125,203
F6	0	10,578	105,779
F26	0	20,202	202,023
F27	0	21,435	214,347
F28	0	24,774	247,739
F34	0	33,553	335,533
F37	0	25,275	252,748
F38	0	14,408	144,076

F40	0	19,600	196,001
F41	0	27,060	270,602
F43	0	22,090	220,902
F54	0	19,340	193,405
F55	0	17,619	176,187
F56	0	14,242	142,420
F58	0	8,978	89,776
F59	0	12,094	120,941

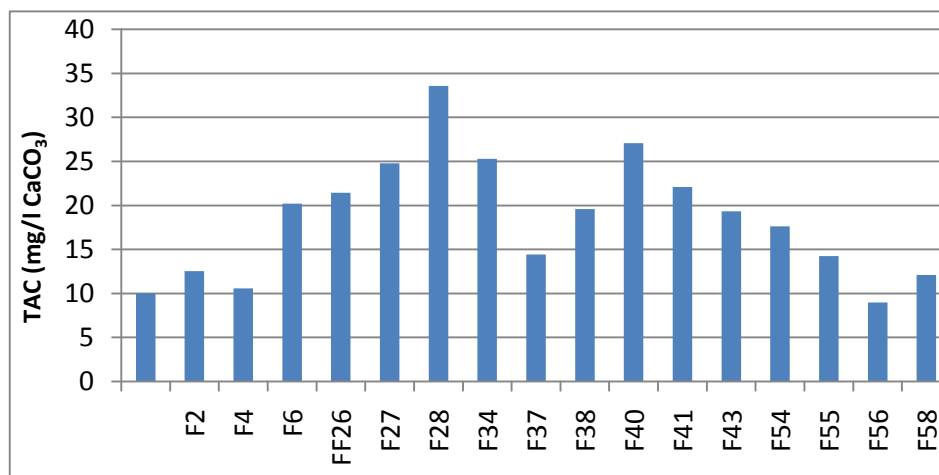


Figure III. 2: Variation de l'alcalinité complète (TAC) pour l'année 2006.

Les valeurs calculées de l'alcalinité des eaux de forages de la région de Bouira varient entre la valeur maximale de 33,553 mg/l CaCO₃ qui est enregistrée au forage F34 et la valeur minimale de 8,978 mg/l CaCO₃ enregistrée au forage F58, selon la norme Algérienne des eaux des eaux potables la valeur du TAC est de l'ordre de 500mg/l CaCO₃, les valeurs sont conformes.

III.3.2 Titre hydrométrique (Dureté) :

Le titre hydrométrique ou dureté de l'eau, est l'indicateur de la minéralisation de l'eau. Elle est due uniquement aux ions calcium et magnésium. Une eau à titre hydrométrie élevée est dite « dure » dans le cas contraire il s'agit d'une eau « douce »

III.3.2.1 Dureté totale :

La dureté totale est égale à la somme de la dureté calcique et la dureté magnésienne, pour effectuer ce calcul, il faut d'abord calculer le titre calcique et le titre magnésien (Voir tableau III.9).

La dureté totale exprimée en degré français (°F) et donnée par la formule suivante :

$$TH = TH_{Ca} + TH_{Mg}$$

TH(°F) : Titre hydrométrique (Dureté).

TH_{Ca} : Dureté calcique.

TH_{Mg} : Dureté magnésienne.

III.3.2.2 Dureté calcique :

La dureté calcique donnée par l'équation :

$$TH_{Ca} = [Ca]$$

TH_{Ca} : Dureté calcique.

[Ca] : Titre calcique.

III.3.2.3 Dureté magnésienne :

La dureté magnésienne est donnée par l'équation suivante :

$$TH_{Mg} = [Mg]$$

[TH] : Dureté magnésienne.

[Mg] : Titre magnésien.

1°F=10mg/l de CaCO₃ 4mg/l de Ca, 2,4 mg/l de Mg

Tableau III. 9: Classes des eaux en °F selon W.THEOBALD et A.GAMA, 1969.

D.H.T(°F)	0-7	7-22	22-32	32-54	> 54
Qualification de l'eau	Douce	Modérément douce	Assez douce	Dure	Très dure

Les résultats de calcul de la dureté (totale, calcique et magnésienne) sont présentés ci-dessous dans le tableau III.9.

Tableau III. 10: Valeurs calculées de la dureté des eaux des forages de l'année 2006

N°. Forages	TH _{Ca2+} (°F)	TH _{Mg2+} (°F)	TH (F°)	TH (ppm CaCO ₃)	N°. Forages	TH _{Ca2+} (°F)	TH _{Mg2+} (°F)	TH (F°)	TH (ppm CaCO ₃)
F2	13,726	4,132	17,858	178,578	F38	0,505	17,686	18,191	181,912
F4	23,484	10,585	34,069	340,694	F40	25,821	19,890	45,712	457,117
F6	17,457	6,788	24,245	242,455	F41	27,687	28,932	56,618	566,182
F26	33,706	22,286	55,992	559,920	F43	27,175	28,396	55,570	555,701
F27	35,172	26,480	61,651	616,513	F54	29,180	8,504	37,684	376,837
F28	39,996	33,507	73,504	735,035	F55	14,429	9,305	23,734	237,336
F34	45,088	25,906	70,994	709,936	F56	29,111	5,254	34,364	343,643
F37	33,000	27,514	60,514	605,140	F58	47,629	26,873	74,502	745,017

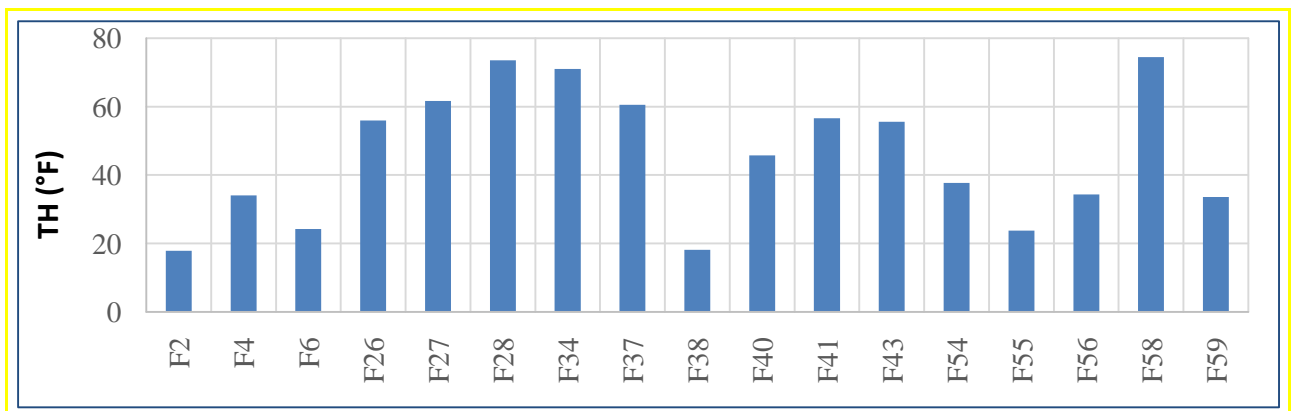


Figure III. 3: Variation de la dureté pour l'année 2006.

Les résultats de calcul de la dureté totale varient entre 17,858(°F) et 74,502(°F).

D'après la classification de (W.THEOBALD et GAMA,1969) de la dureté des eaux :

- Les eaux des forages (F2, F38) ont un caractère modérément doux.
- Les eaux des forages (F6, F55) ont un caractère assez doux.
- Les eaux des forages (F4, F40, F54, F56, F59) et (F26, F27, F28, F34, F37, F41, F58) ont un caractère dur à très dur, ces eaux peuvent provenir des aquifères riches en calcium et magnésium.

Selon les normes algériennes qui sont limité à 50°F, toutes les eaux des forages étudiés sont conformes, à l'exception des forages suivants (F26, F27, F28, F34, F37, F41, F58).

III.3.3 Comparaison entre TH et TAC :

La comparaison entre la dureté et l'alcalinité permet le classement des eaux comme suit :

Si $TAC < TH$: dureté carbonatée

Si $TAC = TH$: l'eau renferme HCO_3^- , (Na^+ ou K^+) et la dureté carbonatée = TH.

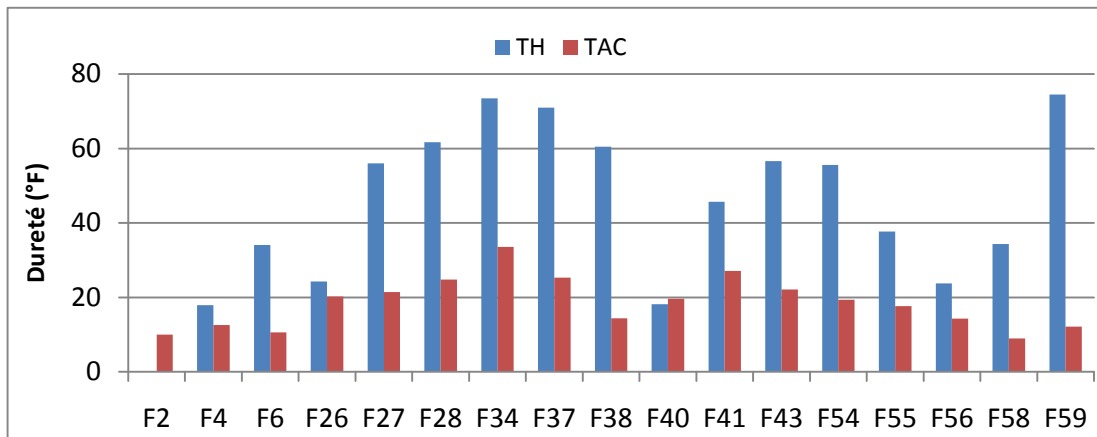


Figure III. 4: Comparaison du TH par rapport au TAC.

D'après l'histogramme, la dureté de tous les forages est supérieure à l'alcalinité donc les eaux étudiées ont une dureté carbonatée.

III.4 Etude de l'équilibre calco- carbonique de l'eau (indice de saturation) :

III.4.1 Logiciel Equil1F :

Logiciel Equil1F permet de calculer les indices d'équilibre calco-carbonique, tel que l'indice de Langelier, l'indice de Ryznar, l'indice de Larson et l'indice de Leroy. Le principe de fonctionnement de ce logiciel est basé sur l'insertion des données des différents paramètres tels que la température, pH, TAC, TH, conductivité, chlorures, sulfates. Après avoir obtenu des résultats, le logiciel Equil1F donne une classification de l'eau selon Ryznar.



Interface de logiciel Equil1F

III.4.2 Indice de Langelier :

L'indice de Langelier (IL) appelé aussi indice de saturation qui permet de définir la tendance agressive ou incrustante d'une eau. Il est calculé selon la formule suivante :

$$IL = pH - pHs$$

Avec :

pH : Potentiel en hydrogène.

pHs : Potentiel en hydrogène de saturation.

L'échelle de classification des eaux selon Langelier :

IL < 0 l'eau est agressive.

IL=0 l'eau est à l'équilibre.

IL > 0 l'eau est incrustante (entartrante).

La formule proposée par Langelier pour déterminer le pH d'équilibre (pHs).

$$pHs = Pk_2 - pKs - \log [Ca^{2+}] - \log [HCO_3]$$

Dans cette formule Pk₂ et pKs dépendent de la température de l'eau.

Tableau III. 11 : Variation des constantes thermodynamiques en fonction de la température.

Température (°C)	Pk ₂	pKs	Température (°C)	Pk ₂	PKs
0	10,63	8,02	40	10,22	8,51
10	10,49	8,15	50	10,17	8,62
18	10,4	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	8,38			

Tableau III. 12 : Valeurs de pHs des eaux des forages de l'année 2006.

N° de forage	T (°C)	Pk ₂	PKs	pHs	N° de forage	T (°C)	Pk ₂	PKs	pHs
F2	19,5	10,39	8,27	7,78	F40	17,7	10,41	8,25	7,11
F4	20,3	10,38	8,29	7,45	F41	17,6	10,41	8,25	7,11
F6	20	10,41	8,25	7,64	F43	17,8	10,40	8,32	7,20
F26	17,5	10,41	8,25	7,15	F54	23	10,33	8,32	7,11
F27	17,2	10,40	8,25	7,12	F55	15,2	10,40	8,26	7,63
F28	17,8	10,38	8,28	6,94	F56	15,4	10,41	8,26	7,41
F34	19,8	10,41	8,25	6,76	F58	14,8	10,44	8,21	7,42
F37	17,6	10,42	8,23	7,06	F59	16,4	10,42	8,23	7,55
F38	16,4	10,42	8,23	9,14					

Tableau III. 13: Variation de l'indice de Langelier IL pour l'année 2006.

N° de forage	IL	N° de forage	IL
F2	-0,91	F40	-0,13
F4	-0,63	F41	-0,25
F6	-0,76	F43	-0,28
F26	-0,35	F54	-0,59
F27	-0,36	F55	-0,57
F28	-0,19	F56	-0,25
F34	0,37	F58	-0,66
F37	-0,26	F59	-0,65
F38	-2,19		

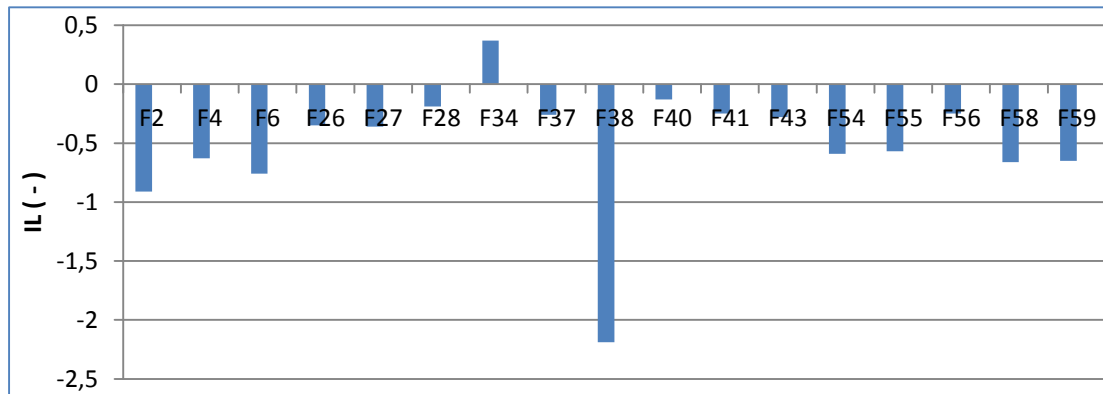


Figure III. 5 : Variation de l'indice de Langelier pour l'année 2006.

L'indice de Langelier varie entre -2,19 et 0,37, les valeurs de l'indice de Langelier de toutes les eaux de forages sont inférieures à 0, excepté le forage F34 sa valeur est supérieure à 0. Donc, selon Langelier toutes les eaux souterraines de la région de Bouira sont agressives.

III.4.3 Indice de saturation de RYZNAR (indice de stabilité) :

L'indice de Ryznar ou indice de stabilité de Ryznar, il permet de définir une tendance agressive ou entartrante de l'eau.

$$IR = pH_s - pH$$

Tableau III. 14: Classification de l'indice de saturation de RYZNAR

I_R	$IR > 8,7$	$6,9 < IR < 8,7$	$5,8 < IR < 6,9$	$3,7 < IR < 5,8$	$IR < 3,7$
Tendance	Eaux très agressives	Eaux moyennement agressives	Eaux stables	Eaux entartrantes	Eaux très entartrantes

Tableau III. 15 : Calcul de l'indice de RYZNAR pour l'année 2006.

N° de forage	IR	N° de forage	IR
F2	8,69	F40	7,24
F4	8,07	F41	7,36
F6	8,4	F43	7,48
F26	7,5	F54	7,7
F27	7,47	F55	8,2
F28	7,13	F56	7,67
F34	6,38	F58	8,08

F37	7,33	F59	8,2
F38	11,32		

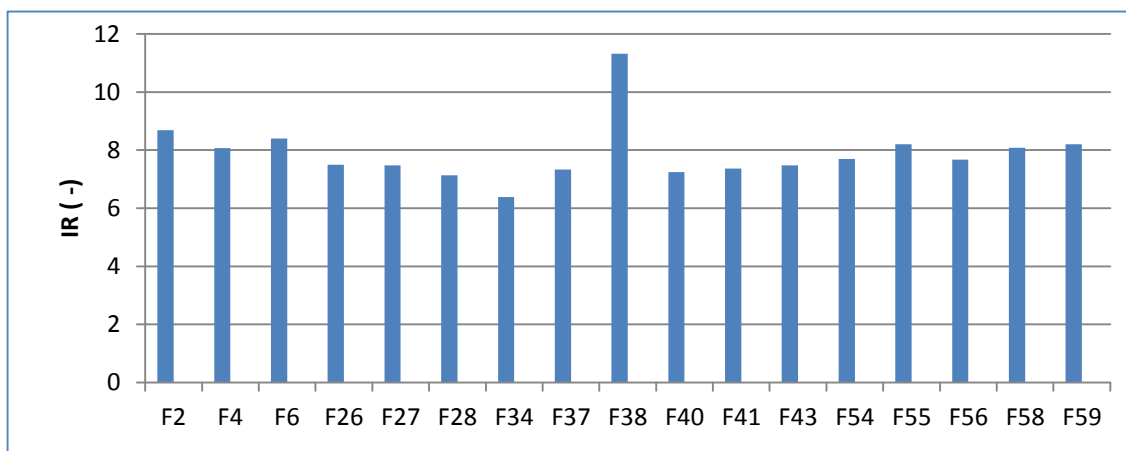


Figure III. 6 : Variation de l'indice de RYZNAR pour l'année 2006.

Les valeurs calculées de l'indice de RYZNAR varient entre 6,38 et 11,32, d'après Ryznar, la majorité des eaux souterraines de la région de Bouira sont moyennement agressives.

III.4.4 Indice de saturation de LARSON ; IC (indice de corrosion) :

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

$$I_C = \frac{2.[SO_4^{2-}] + [Cl^-]}{\text{Alcalinité(TAC)}} = \frac{2.[SO_4^{2-}] + [Cl^-]}{[HCO_3^-]}$$

Tableau III. 16 : Classification de l'indice de Larson :

I_C	$I_C < 0,2$	$0,2 \leq I_C < 0,4$	$0,4 \leq I_C < 0,5$	$0,5 \leq I_C < 1,1$	$I_C \geq 1,1$
Tendance	Pas de tendance à la corrosion	Faible tendance à la corrosion	Légère tendance à la corrosion	Tendance moyenne à la corrosion	Nette tendance à la corrosion

Tableau III. 17 : Calcul de l'indice de corrosivité pour l'année 2006.

Points d'eau	I_C	Points d'eau	I_C
F2	0,78	F40	2,17
F4	1,86	F41	2,6

F6	1,42	F43	3,14
F26	2,73	F54	1,95
F27	2,99	F55	1,49
F28	3,43	F56	2,41
F34	3,05	F58	9,08
F37	2,94	F59	2,4
F38	1,55		

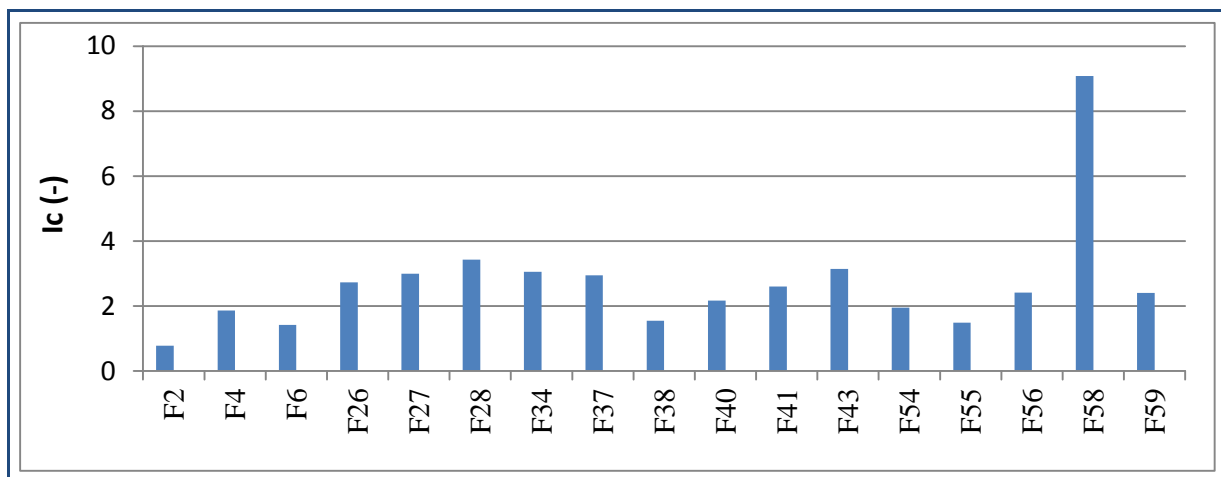


Figure III. 7 : Variation de l'indice de LARSON pour l'année 2006.

Selon l'indice de LARSON, la majorité des eaux de forages étudiées possèdent une nette tendance à la corrosion à l'exception du forage (F2).

III.4.5 Indice de saturation de Leroy :

L'indice de Leroy est égal au rapport du TAC sur le TH. Il permet de confirmer ou non la tendance à la corrosion d'une eau. Avec des concentrations exprimées en méq/l.

$$\text{Indice de Leroy} = \text{TAC} / \text{TH}$$

- Si l'indice de Leroy est compris $0,7 < I < 1,3$: il s'agit d'une eau à faible risque de corrosivité.
- Si l'indice de Leroy $I > 1,3$: il s'agit d'une eau sans risque de corrosivité.
- Si l'indice de Leroy $I < 0,7$: il s'agit d'une eau à forte risque de corrosivité.

T

Tableau III.18 : Calcul de l'indice de Leroy pour l'année 2006.

N° de forage	Indice de Leroy	N° de forage	Indice de Leroy
F2	0,55	F40	0,42
F4	0,36	F41	0,47
F6	0,43	F43	0,39
F26	0,36	F45	0,51
F27	0,34	F54	0,74
F28	0,33	F56	0,41
F34	0,47	F58	0,12
F37	0,41	F59	0,35
F38	0,79		

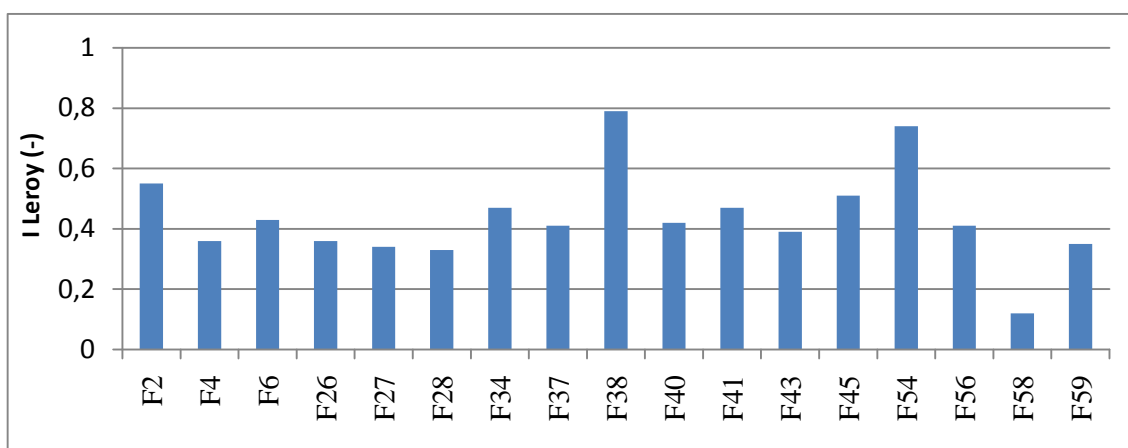


Figure III. 8 : Variation de l'indice de Leroy pour l'année 2006.

D'après l'indice de Leroy, la majorité des forages possèdent des eaux à forte risque de corrosivité à l'exception des forages (F38, F54) ont une eau à faible risque de corrosivité.

III.5 Classification des eaux :

La classification des eaux minérales basées sur une combinaison des propriétés géologiques, hydrochimiques, et l'aspect thérapeutique (A.Hazzab, 2012).

III. 5.1 Salinité :

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

Salinité = \sum sels dissous minéraux et organiques (ions minéraux et non minéraux)

Tableau III. 19 : Valeurs de salinité pour l'année 2006.

N°. forage	Salinité (ppm)	N°. forage	Salinité (ppm)
F2	331,954	F40	951,276
F4	609,262	F41	1217,615
F6	432,052	F43	1137,615
F26	969,425	F54	755,647
F27	1093,425	F55	665,259
F28	1294,265	F56	722,418
F34	1543,511	F58	1095,439
F37	1268,639	F59	572,132
F38	474,719		

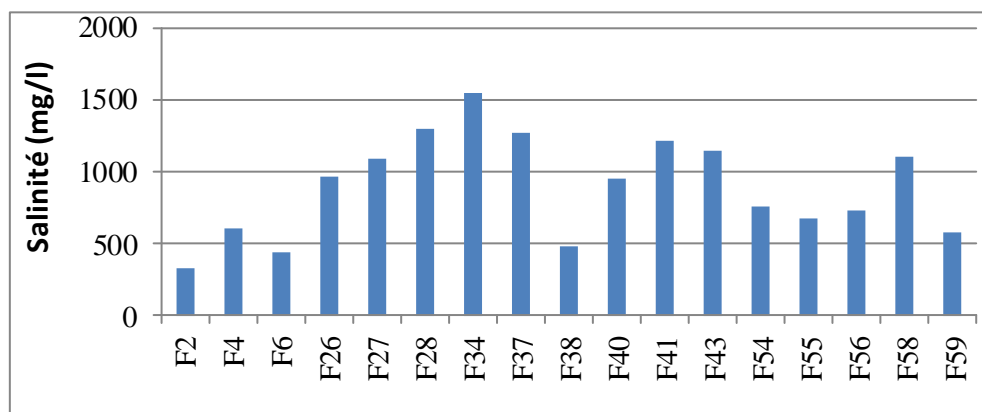


Figure III. 9: Variation de la salinité des eaux des forages de l'année 2006.

La salinité des eaux de la région de Bouira est comprise entre 331,954 à 1294,265(ppm)

III.5.2 Total des solides dissous (TDS) :

Le TDS est la quantité totale de solides dissous dans l'eau, et représente la concentration totale des substances dissoutes dans l'eau.

Les formules de calcul du TDS max et TDS min sont données ci-dessous :

$$\text{TDS max (ppm)} = \sum C_i \text{ (mg/l)}$$

$$\text{TDS min (ppm)} = \sum C_i \text{ (mg/l)} - 31[\text{HCO}_3 - \text{(meq/l)}]$$

Tableau III. 20 : Valeurs de la TDS max et TDS min pour l'année 2006.

N°. forage	TDS max	TDS min	N°. forage	TDS max	TDS min
F2	331,954	269,87	F40	951,276	829,72
F4	609,262	531,62	F41	2304,263	2136,45
F6	432,052	366,45	F43	1137,57	1000,58
F26	969,425	844,14	F54	755,647	635,70
F27	1029,548	896,62	F55	665,259	555,99
F28	1294,548	1140,63	F56	627,544	539,22
F34	1543,511	1335,43	F58	1063,875	523,22
F37	1268,639	1111,89	F59	572,132	497,13
F38	474,719	385,36			

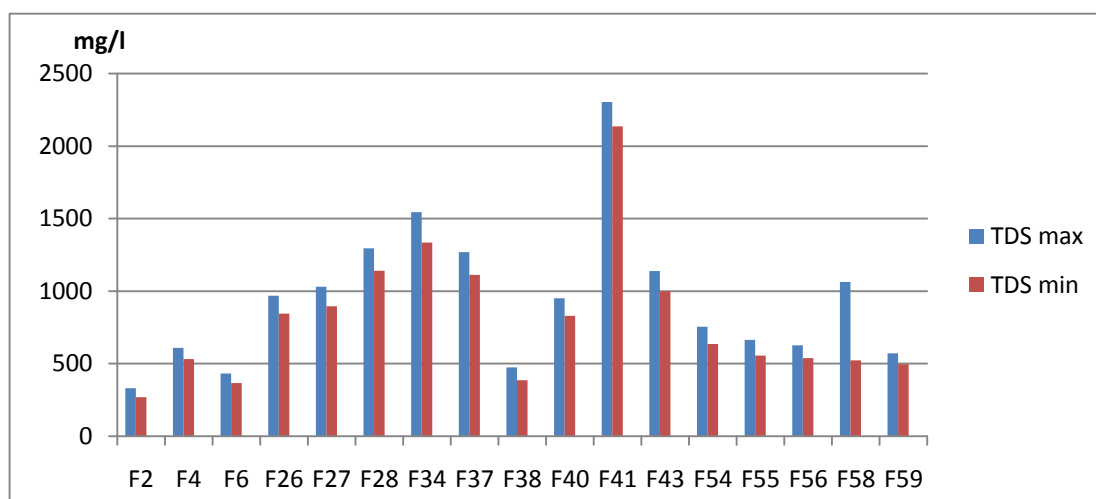


Figure III. 10 : Variation de la TDS max et TDS min pour l'année 2006.

III.5.3 Conductivité :

La conductivité électrique de l'eau est caractérisée par son aptitude à laisser les charges électriques se déplacer librement. Cette capacité dépend de la quantité d'ions présents en solution, alors du degré de minéralisation globale de l'eau. L'unité de mesure est le Siemens (S/cm), exprimé souvent en ($\mu\text{S}/\text{cm}$ ou millisiemens (mS/cm)).

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

$$\sigma_t (\mu\text{S}/\text{cm}) = 100 \cdot (\sum \text{Activité ionique des cations (még/l)} + \sum \text{Activité ionique des anions (még/l)}) / 2$$

$$\sigma_{25} = \sigma_t \cdot [1 + 0,023 \cdot (25 - t)]$$

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

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

Tableau III. 21 : Classification des eaux en fonction de la conductivité.

Conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$) 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

Tableau III. 22 : Valeurs de la conductivité pour l'année 2006.

N°. forage	Conductivité théorique par l'activité ionique 25°C ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Conversion de la conductivité mesurée à 25°C	N°. forage	Conductivité théorique par l'activité ionique 25°C ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Conversion de la conductivité mesurée à 25°C
F2	511,92	718,70	F40	3964,93	2217,18
F4	986,08	1286,50	F41	2209,74	2644,65
F6	556,70	1004,61	F43	3430,31	2447,76
F26	3846,35	2310,99	F54	1218,72	1692,42
F27	2052,28	2349,36	F55	1240,44	1700,85
F28	2460,76	2890,68	F56	1257,8	1535,76
F34	2672,67	3224,44	F58	2325,41	2777,85
F37	2383,5	2621,24	F59	1050,26	1250,03
F38	871,04	1169,73			

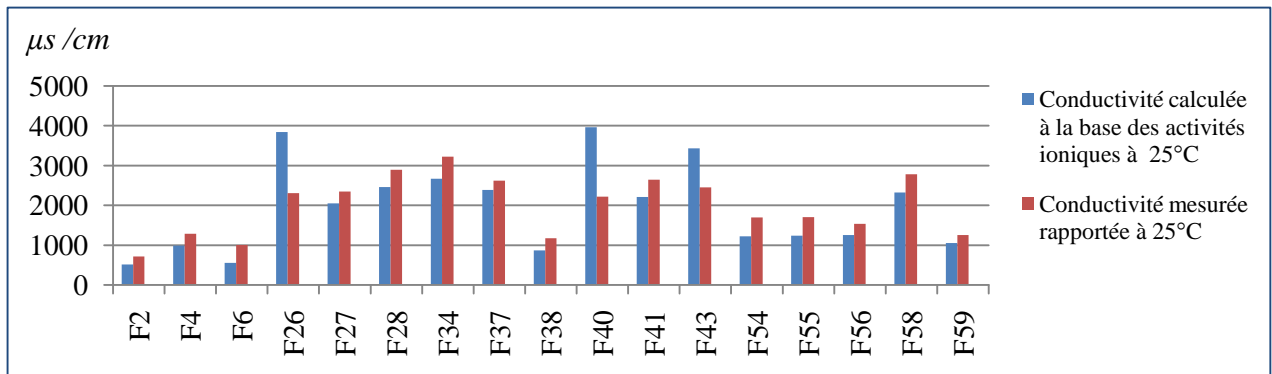


Figure III.11 : Variation de la conductivité mesurée et calculée à 25°C pour l'année 2006.

La variation de conductivité est induite par la présence dans le milieu d'ions qui sont mobiles dans un champ électrique. Cette mobilité dépend de la nature des ions dissous et de leur concentration, tels que les ions de calcium (Ca^{2+}), de sodium (Na^+), de chlorure (Cl^-), des carbonates (HCO_3^-)...etc. (Rodier, al 2009). Généralement, la conductivité électrique augmente avec la concentration des ions en solution et la température (Dib, 2009).

Les résultats de calcul de la conductivité des eaux de forages étudiés varient entre la valeur maximale 3964,93($\mu\text{S} / \text{cm}$) et la valeur minimale

511,92 ($\mu\text{S}/\text{cm}$),il y a une différence entre la conductivité mesurée et calculée ceci veut dire que les valeurs mesurées ne sont pas précises. La classification des eaux en fonction de la conductivité montre que :

*les forages (F2, F6) ont une minéralité faible.

*Pour les forages (F4, F38, F54, F55, F56, 59) leur minéralité est moyenne.

*Par contre les forages (F27, F34, F41) ont une minéralité moyennement élevée.

*Les forages (F58, F28) et (F26, F37, F43, F40) ont une minéralité élevée jusqu'à très élevée, ceci est due à la présence élevée des minéraux dans ces forages.

III.5.4 Selon la réglementation européenne :

La classification des eaux selon la réglementation européenne tient compte de la teneur des constituants ionique (Calcium [Ca^{2+}], Magnésium [Mg^{2+}], Chlorure [Cl^-], Sulfate [SO_4^-] ...). Le tableau ci-dessous représente la classification des eaux selon les normes européennes :

Tableau III. 23 : Classification des eaux.

Teneur (mg/l)	Caractéristique
TDS ≤ 500	Faiblement minéralisée
TDS ≤ 50	Très faiblement minéralisée
TDS > 1500	Riche en sels minéraux
[HCO ₃] > 600	Bicarbonatée
[SO ₄] > 200	Sulfatée
[Cl] > 200	Chlorurée
[Ca] > 150	Calcique
[Mg] > 50	Magnésienne
[F] > 1	Fluorée ou contient du Fluore
[Fer bivalent] >	Ferrugineuse ou contient du Fer
[CO ₂ libre] > 250	Acidulée
[Na] > 200	Sodique
[Na] < 20	Convient pour régime pauvre en sodium
[F] > 1,5	Ne convient pas pour l'alimentation des bébés et la consommation régulière des jeunes enfants [réglementation Algérienne : Arrêté interministériel du 23 Février 2008]

Selon cette réglementation ; TDS : teneur en sels minéraux calculée comme résidu fixe.

Les résultats obtenus montrent que :

*Ces forages (F2, F6, F38) ont un caractère faiblement minéralisé, et deux forages (F34, F41) ont une eau riche en sels minéraux. (Voir tableau III.22).

*Toutes les valeurs de [HCO₃] ne dépassent pas 600mg/l, donc toutes les eaux des forages étudiées ne sont pas bicarbonatées (voir tableau III.22).

*Toutes les valeurs de [SO₄] ne dépassent pas 200 mg/l, alors toutes les eaux de forage étudiées ne sont pas sulfatées.

*Les eaux de forages (F6, F26, F27, F28, F34, F37, F40, F41, F43, F54, F58) sont chlorurées.

*Il y a trois forages (F28 :160,297mg/l) ; (F34 :180,703mg/l) ;(F58 :190,888 mg/l) qui ont une eau calcique.

*Les forages (F26, F27, F28, F34, F37, F41, F43, F58) ont une eau magnésienne.

*Tous les forages étudiés ont une eau sodique.

III.5.5 Selon VORONOV 2000 :

La classification selon VORONOV basée sur la concentration totale des solides dissous (TDS) qui correspond à la valeur des résidus secs (A.Hazzab).

Tableau III. 24: Classification des eaux selon VORONOV.

Eaux faiblement minéralisées	Résidu sec $\leq 50\text{mg/l}$
Eaux oligo-minérales	$50\text{mg/l} < \text{Résidu sec} \leq 500\text{mg/l}$
Eaux modérément minéralisées	$500\text{mg/l} < \text{Résidu sec} \leq 1500\text{mg/l}$
Eaux riches en sels minéraux	Résidu sec $> 1500\text{mg/l}$

- Les forages (F2, F6, F38) ont une eau oligo-minérale. (Voir tableau III.23).
- Les forages qui ont des eaux modérément minéralisées sont cités comme suit : (F4, F26, F43, F28, F37, F40, F43, F54, F55, F56, F58, F59)
- Seulement deux forages (F34, F41) qui ont des eaux riches en sels minéraux.

Donc, la majorité des eaux étudiées sont modérément minéralisées.

III.6 Vérification aux normes Algériennes :

Tableau III. 25 : Normes de potabilité des eaux (JORDA, 2011).

Paramètres	Unités	Valeurs indicatives
Alcalinité (TAC)	mg/l CaCO ₃	500
Dureté	°F	200
Conductivité à 20°C	μS/cm	2800
Résidu sec	mg/l	1500
Ph	Unité	$\geq 6,5$ et ≤ 9
Température	°C	25
Turbidité	NTU	5
Calcium	mg/l	200
Magnésium	mg/l	150
Potassium	mg/l	12
Sodium	mg/l	200
Bicarbonate	mg/l	600

Chlorure	mg/l	500
Sulfate	mg/l	400
Nitrate	mg/l	50

III.6.1. Température (T) :

D'une façon générale, la température des eaux est influencée essentiellement par les variations climatiques (Dib, 2009) et par l'origine dont elles proviennent (superficielles ou profondes) (Rodier et al, 2005). Elle joue un rôle primordial dans la solubilité des sels et des gaz et par conséquent sur la conductibilité (Dib, 2009).

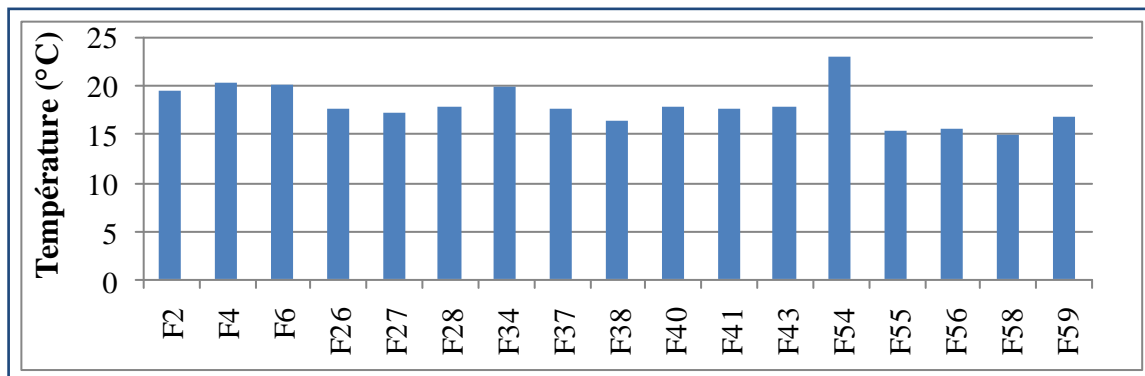


Figure III. 12 : Variation de la température dans les eaux des forages de l'année 2006.

Les résultats obtenus pour la région d'étude, montrent que les degrés de température varient entre 14,8°C et 23°C, ceci est due au changement climatique. Ces valeurs obtenues sont conformes aux normes algériennes recommandée qui est inférieure à 25°C (JORDA, 2011).

III.6.2 Potentiel hydrogène (pH) :

Le pH d'une eau naturelle dépend de l'origine de celle-ci et de la nature des terrains traversés (Saadali, 2007, Gouaidia, 2008). C'est un élément important pour définir le caractère agressif ou incrustant de l'eau. Les législations algériennes et européennes précisent comme niveau guide du pH est de 6,5 à 9.

L'échelle du pH varie de 0 à 14 :

- $\text{pH} > 7$: L'eau est basique.
- $\text{pH} < 7$: L'eau est acide.
- $\text{pH} = 7$: L'eau est neutre.

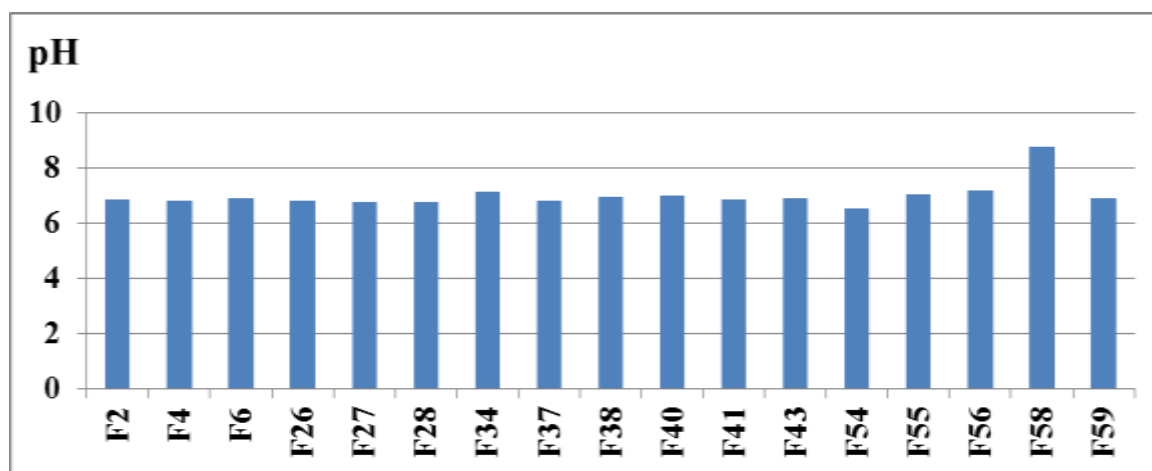


Figure III. 13 : Variation du pH des eaux des forages de l'année 2006.

Pour cette étude, les valeurs pH enregistrées varient entre la valeur minimale 6,52 et la valeur maximale 7,9, ce qui reflète un caractère légèrement alcalin. Ces valeurs de pH se situent dans la fourchette des normes de potabilité ($6,5 < \text{pH} < 9$).

III.6.3 Turbidité :

La turbidité d'une eau est causée par la présence des matières en suspension ou par des substances en solution comme les substances minérales (sable, argiles ou limons), des matières organiques (matières mortes ou des végétaux en décomposition, du plancton suspendu) (Rodier et al ,2500 ; Hade 2007). Les normes algériennes (JORDA, 2011), recommandent comme valeur limite de turbidité : 5 NTU.

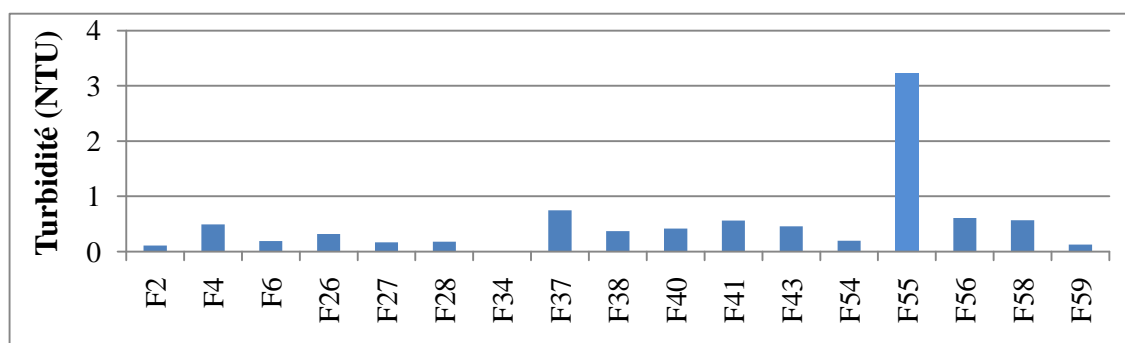


Figure III. 14 : Variation de la turbidité des eaux des forages de l'année 2006.

Dans ce cas, toutes, les résultats obtenus varient entre la valeur minimale 0 NTU (F34) et la valeur maximale 0,75 NTU, alors les eaux de forages ont une turbidité conforme à la norme algérienne.

III.6.4 Conductivité électrique :

La conductivité électrique (CE) (Rodier et al, 2009), signalent que la variation de la conductivité est induite par la présence dans le milieu d'ions qui sont mobiles dans un champ électrique. Cette mobilité dépend de la nature des ions dissous et de leur concentration, tels que les ions de calcium (Ca^{2+}), de sodium (Na^+), de chlorure (Cl^-), des bicarbonates (HCO_3^-) ...etc. Généralement, la conductivité électrique augmente avec la concentration des ions en solution et la température (Dib, 2009).

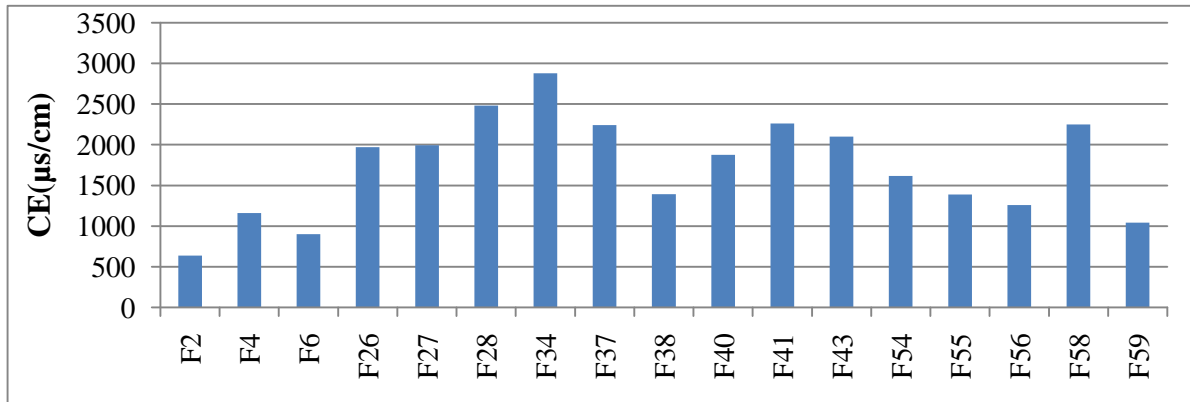


Figure III. 15 : Variation de la conductivité électrique des eaux des forages de l'année 2006.

Les résultats des mesures montrent une variation de la conductivité électrique, elle varie entre 638 µs/cm (F2) et 2880 µs/cm (F34). Toutes les valeurs sont conformes à la norme algérienne de potabilité fixée à 2800 µs/cm (JORDA, 2011), excepté l'eau du forage (F34) qui affiche une valeur très élevée, ceci est due au phénomène d'évaporation qui concentre les sels dans l'eau.

III.6.5 La dureté totale :

La dureté totale a un caractère naturel au lessivage des terrains traversés et correspond à la teneur en calcium et en magnésium (Hakmi, 2006).

Ce paramètre présente une grande variation qui serait liée à la nature lithologique de la formation aquifère (Ghazali et Zaid, 2013). Les eaux provenant des terrains calcaires ou surtout des terrains gypseux, peuvent avoir des duretés très élevées susceptibles d'atteindre 1g de CaCO_3 .l⁻¹. (Rodier et al, 2005 ; Figrella et Leyral, 2002).

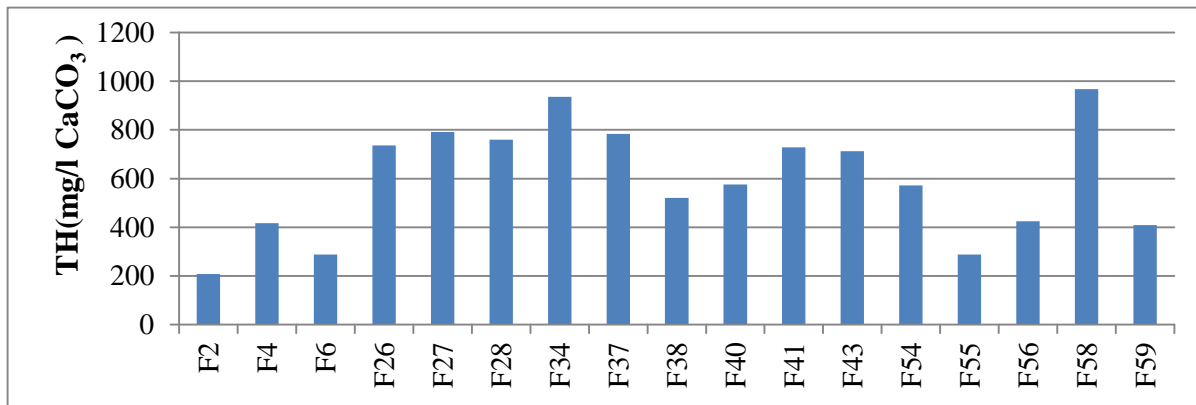


Figure III. 16 : Variation de la dureté des eaux des forages de l'année 2006.

La dureté des eaux de forages étudiés ne sont pas conformes à la norme Algérienne (200 mg/l) (JORDA, 2011). Ces eaux sont dures à très dures. Ces eaux très dures proviennent de la formation de l'aquifère ainsi du cheminement des eaux qui traversent successivement la nappe superficielle et ensuite la nappe profonde ; ce qui donne une concentration supplémentaire à cette dernière.

III.6.6. Calcium Ca²⁺ :

C'est un composant majeur de la dureté de l'eau. Il est généralement l'élément dominant des eaux potables. Sa teneur varie essentiellement suivant la nature du terrain traversé (Queneau et Hubert, 2009). Le calcium peut provenir soit de la dissolution des formations carbonatées ou de la dissolution des formations gypsifères (CaSO₄, 2H₂O).

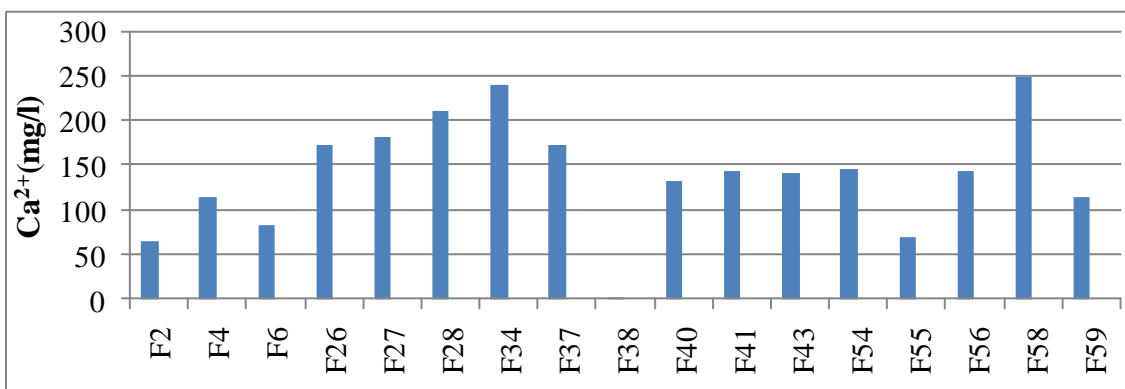


Figure III. 17 : Variation de la teneur en calcium des eaux des forages de l'année 2006.

La variation de la teneur en calcium dans les eaux de forages étudiés est entre la valeur minimale 2,4 (F38) et la valeur maximale 249,6 (F58), d'après la norme algérienne des eaux potables qui est à l'ordre de 200mg/l, la majorité des forages sont conformes à la norme exceptée pour les forages (f28, F34, F58) qui ne sont conformes.

III.6.7. Magnésium (Mg^{2+}) :

C'est l'un des éléments les plus répandus dans la nature, il donne un goût désagréable à l'eau (Rodier et al., 2009). La source du magnésium semble être liée au contact des eaux avec les roches calcaires et dolomitiques.

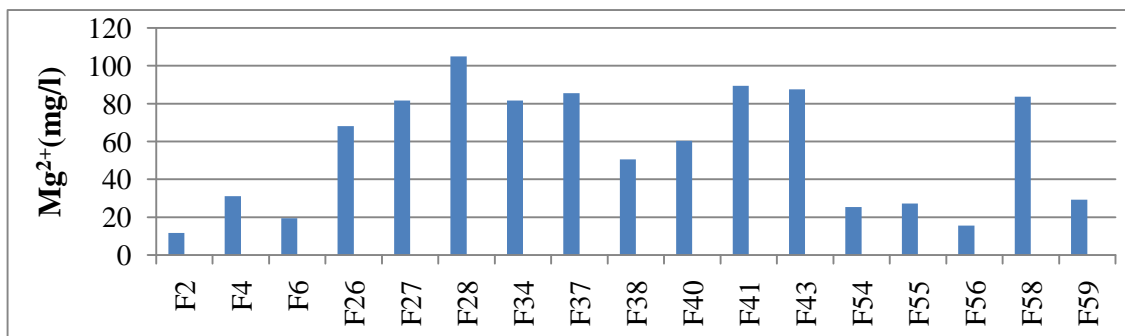


Figure III. 18: Variation de la teneur en magnésium des eaux des forages de l'année 2006.

La teneur du magnésium des eaux de forages étudiées varie entre la valeur minimale 11,6mg/l (F2) et la valeur maximale 104,9mg/l (F28). Donc toutes les valeurs sont conformes aux normes Algériennes (150mg/l).

III.6.8. Sodium (Na^+) :

Le sodium est un élément dont la concentration dans l'eau varie d'une région à une autre. Son origine peut être naturelle (mer, terrain salé), humaine ou industrielle. Les eaux très riches en sodium deviennent saumâtres, prennent un goût agréable et ne peuvent pas être consommées (Rodier et al, 2015).

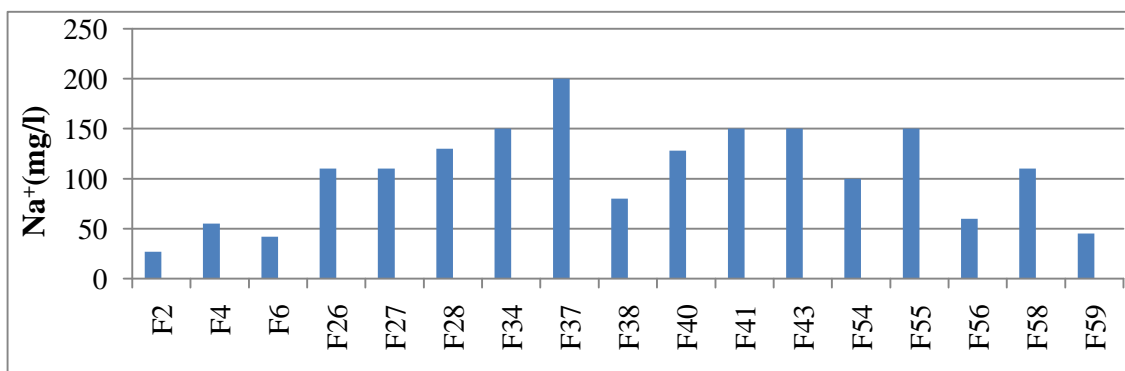


Figure III. 19 : Variation de la teneur en sodium des eaux des forages de l'année 2006.

La teneur de sodium des eaux de forages étudiées varie entre la valeur minimale 27mg/l qui est enregistré au forage (F2) et la valeur maximale 200 mg/l pour le forage

F37. Alors, toutes les eaux des forages sont conformes à la norme Algérienne qui est à l'ordre de 200mg/l.

III.6.9. Potassium K^+ :

Le potassium peut avoir plusieurs sources tels que l'hydrolyse des minéraux silicatés, intrusion marine (l'eau de mer en contient près de 300mg/l ou bien causée par la pollution (les engrais, les effluents animaux et végétaux, les rejets de STEP).

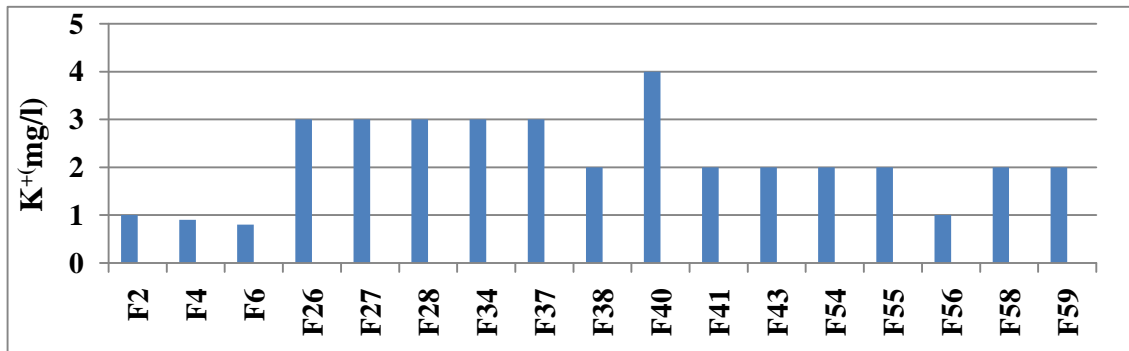


Figure III. 20 : Variation de la teneur en potassium des eaux des forages de l'année 2006.

La teneur en potassium des eaux de forages étudiées varie entre la valeur minimale 0,8mg/l (F4) et la valeur maximale 4mg/l (F40), selon les normes Algériennes de l'eau potable, les eaux de ces forages étudiées sont conformes.

III.6.10. Bicarbonates (HCO_3^-) :

La présence des carbonates dans l'eau est due à la dissolution des formations (cipolin, calcaire) par des eaux chargées en gaz carbonique.

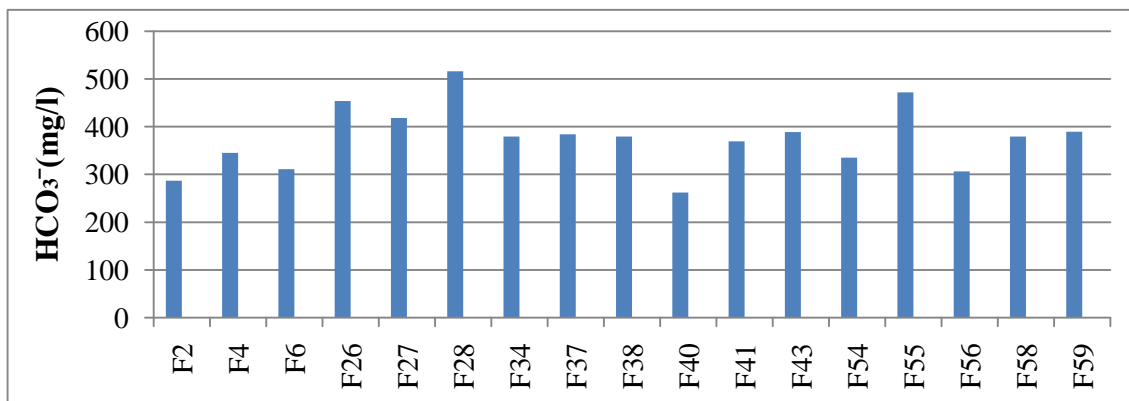


Figure III. 21 : Variation de la teneur des bicarbonates dans les eaux des forages de l'année 2006.

Les résultats montrent que toutes les eaux de forages étudiées présentent des valeurs qui répondent aux normes Algériennes (à l'ordre de 600mg/l).

III.6.11 Chlorures (Cl^-) :

Les chlorures sont toujours présents dans les eaux naturelles en proportions très variables. La présence de chlorures dans les eaux est due, le plus souvent, à la nature des terrains traversés. Peut être due aussi aux rejets des égouts, et infiltration, d'eaux marines dans les nappes phréatiques. Une présence excessive des chlorures dans l'eau d'alimentation, la rend corrosive et nocive pour la santé.

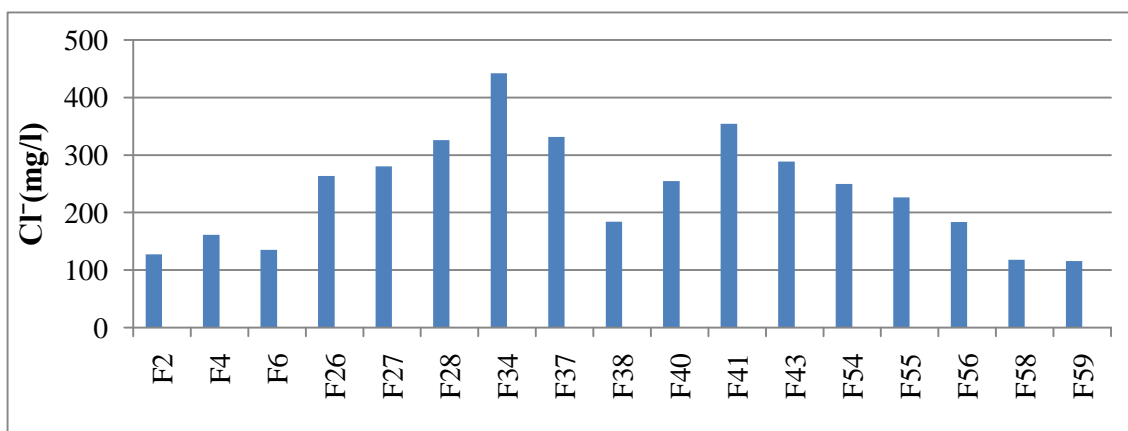


Figure III. 22 : Variation de la teneur en chlorure des eaux des forages de l'année 2006.

Les résultats montrent que toutes les eaux de forages étudiées présentent des valeurs qui répondent à la norme Algérienne de l'eau potable qui à l'ordre de 500mg/l.

III.6.12. Sulfate (SO_4^{2-}) :

La teneur en sulfate est très variable dépend essentiellement à l'interaction de l'eau avec des dépôts des substances dans l'aquifère de la nappe phréatique, du fait de la solubilité du gypse, ou apparait à partir de l'oxydation de minéraux sulfureux (Bariere, 2000). Selon l'intolérance des consommateurs, l'excès de sulfate dans l'eau peut entraîner des troubles intestinaux (Peck, 1970).

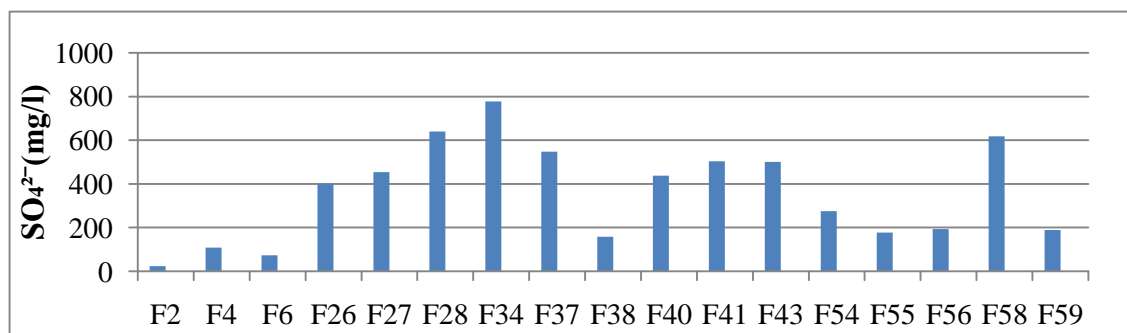


Figure III. 23 : Variation de la teneur en sulfates des eaux des forages de l'année 2006.

La teneur en sulfate des eaux de forages étudiées varie entre la valeur minimale 23,8mg/l (F2) et la valeur maximale 640,25mg/l(F28), la majorité des valeurs sont conformes à la norme Algérienne recommandée qui est de 400mg/l, à l'exception de ces forages (F27, F28, F34, F37, F40, F41, F43, F58).

III.6.13. Nitrates (NO₃⁻) :

Les nitrates sont des ions présents de façon naturelle dans l'environnement, ils résultent de l'oxydation de l'azote organique. L'augmentation du taux de nitrates dans les eaux superficielles et souterraines est due pour une large part à l'enrichissement des sols par des engrais chimiques ou organiques, ainsi qu'aux rejets d'eaux usées ou mal traitées dans les cours d'eau.

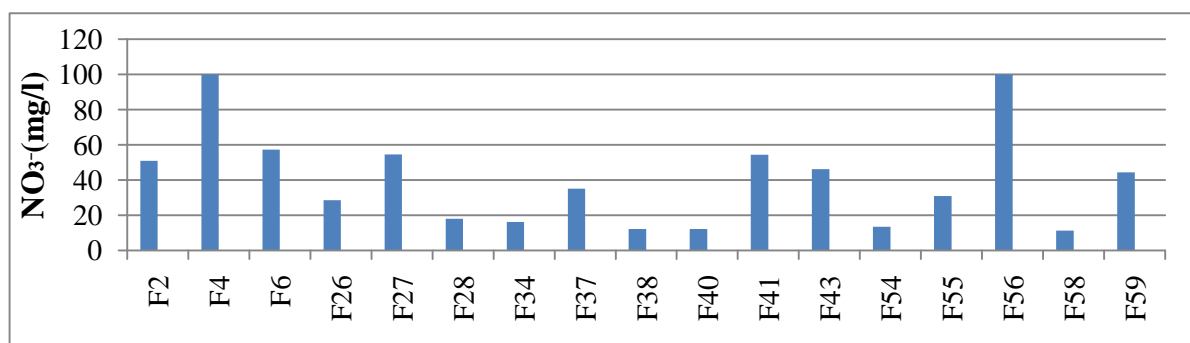


Figure III. 24 : Variation de la teneur en nitrates des eaux des forages de l'année 2006.

Les résultats montrent que les eaux de forages étudiées présentent des teneurs en nitrates répondues à la norme Algérienne (50mg/l), sauf pour les eaux de ces forages (F4, F6, F27, F41, F56) qui présentent des teneurs en nitrates élevées par rapport à la norme.

III.7 Etude de l'aptitude des eaux à l'irrigation :

Pour voir l'aptitude des eaux souterraines de notre région d'étude à l'irrigation nous avons utilisé la méthode de l'alcalinité SAR (taux d'absorption du sodium). Pour mieux connaître l'aptitude des eaux à l'irrigation, on calcule la quantité de sodium absorbée (SAR) par l'équation suivante :

$$SAR = Na^+ / [(Ca^{2+} + Mg^{2+})/2]^{1/2}$$

Les concentrations de Na^+ , Ca^{2+} et Mg^{2+} sont exprimées en méq/l.

Quatre classes de risque alcalin ont été définies :

- *Si le SAR est supérieur à 26 le risque d'alcalinité est très élevé.
- *Si le SAR est compris entre 18 et 26 le risque d'alcalinité est élevé.
- *Si le SAR est compris entre 10 et 18 le risque d'alcalinité est moyen.
- *Si le SAR est inférieur à **10** le risque d'alcalinité est faible.

Les résultats sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau III. 26 : Résultats de calcul du SAR pour les eaux de forages de l'année 2006

N°. forage	Na^+ (méq/l)	Ca^{2+} (méq/l)	Mg^{2+} (méq/l)	SAR	N°. forage	Na^+ (méq/l)	Ca^{2+} (méq/l)	Mg^{2+} (méq/l)	SAR
F2	1,12	2,74	0,82	0,84	F40	5,22	5,16	3,97	2,24
F4	2,26	4,69	2,11	1,22	F41	6,08	5,53	5,78	2,56
F6	1,74	3,49	1,35	1,12	F43	6,08	5,43	5,67	2,58
F26	4,47	6,74	4,45	1,89	F54	4,10	5,83	1,70	2,11
F27	4,46	7,03	5,29	1,79	F55	6,19	2,88	1,86	4,04
F28	5,24	7,99	6,70	1,93	F56	2,46	5,8	1,05	1,32
F34	6,04	9,01	5,18	0,85	F58	4,44	9,52	5,37	1,63
F37	8,09	6,59	5,50	3,30	F59	1,85	4,71	1,99	1,01
F38	3,32	0,10	3,53	2,47					

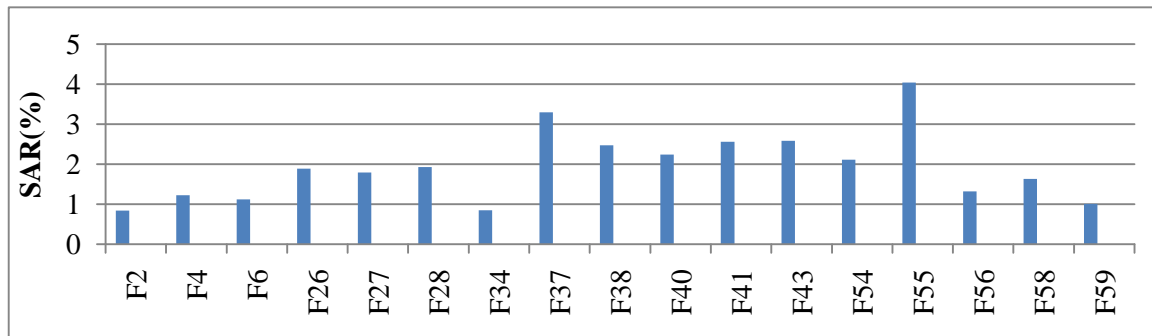


Figure III. 25: Variation des valeurs de SAR pour les eaux des forages de l'année 2006.

D'après les résultats, on remarque que le **SAR** pour toutes les eaux des forages de l'année **2006** est inférieur à **10 méq/l**, le risque d'alcalinité est faible, on conclut que les eaux de la région étudiées ne représentent aucun danger pour l'irrigation.

Conclusion :

Dans ce chapitre, on a présenté les calculs et l'interprétation des résultats.

Pour la vérification de la fiabilité des données d'analyse, a permis l'élimination de 42 forages puisque leur balance ionique dépasse la norme, alors, il reste 17 forages à étudier pour l'année 2006. Par contre, les eaux de forages de la période (2003-2013) excepté les deux années 2004 et 2010 ne sont pas prises en considération car elles sont indisponibles.

D'après les calculs des titres de l'eau, on peut dire que la dureté des eaux de forage de la région étudiée est conforme selon les normes algériennes qui est à l'ordre de 50°F.

En ce qui concerne, l'étude de l'équilibre calco-carbonique de l'eau montre selon l'indice de Langelier, certaines eaux des forages étudiées de la région de Bouira sont agressives et d'autres sont entartrantes. D'après, l'indice de stabilité de Ryznar la majorité des eaux analysées sont moyennement agressives. Pour l'indice de saturation de Larson, la majorité des eaux de forage possèdent une nette tendance à la corrosion. Pour l'indice de Leroy, la majorité des forages possèdent des eaux à forte risque de corrosivité à l'exception des forages (F38, F54) ont une eau à faible risque de corrosivité.

La classification des eaux de forage de la région étudiée montre que la majorité de ces dernières sont modérément minéralisées excepté les forages (F3, F41) qui ont des eaux riches en sels minéraux.

A partir des valeurs du SAR qui sont inférieures à 10 méq/l, le risque d'alcalinité est faible, on conclut que les eaux des forages étudiées conviennent à l'irrigation.

Conclusion Générale

Conclusion générale :

Cette étude a été menée dans l'objectif de déterminer la qualité physico-chimique des eaux souterraines de la région de Bouira. La présente étude nous a permis de tirer des conclusions suivantes :

*D'après les données climatologiques et les résultats obtenus par différentes méthodes permettent d'attribuer à la région d'étude un climat semi-aride, caractérisé par une saison sèche qui s'étend du mois de mi-mai au mois de mi-octobre, et une saison humide, qui s'étend du mois mi-octobre au mois de mi-mai.

*La zone d'étude renferme des séries autochtones, des séries allochtones et enfin des formations récentes post-nappes.

Les principales réserves d'eaux souterraines de la région sont contenues dans la nappe des oueds et leurs affluents.

*Sur l'aspect qualitatif des eaux souterraines, dans notre étude nous nous sommes intéressées sur toute la région de Bouira. A l'aide des données d'analyse physico-chimiques des eaux souterraines de la région d'étude qui sont prélevées dans plusieurs forages et après avoir vérifié leur fiabilité, nous avons procédé aux différents calculs qui montrent :

-Les eaux souterraines de la région d'étude ne sont pas majoritairement dures, certaines d'entre elles sont douces. Presque la totalité de ces eaux sont moyennement agressives et entartrantes.

-La majorité de ces eaux sont modérément minéralisées à l'exception des forages F3, F41 qui ont des eaux riches en sels minéraux.

-Pour les nitrates, il y a cinq forages (F4, F6, F27, F41, F56) dont leurs valeurs ne sont conformes aux normes algériennes, ainsi pour les sulfates (F27, F28, F34, F40, F41, F43, F58) qui présentent des valeurs élevées par rapport aux normes algériennes, pour cela ils doivent être contrôlés et les traiter avant de les utiliser pour la consommation.

*Selon la valeur moyenne du SAR qui est inférieure à 10 méq/l, les eaux souterraines de la région d'étude présentent un faible danger d'alcalinisation et pourraient donc être utilisées en irrigation.

Références bibliographiques :

- **Musy, 2005**, selon **KADA HAKIM et ARAB KAMEL**, « Caractérisation des eaux souterraines de la région de Bouira » mémoire master université Akli Mohand Oulhadj de Bouira.
- **Remini, 2010** selon **BRAKNI BOUTHAINA**, « Etude de la qualité des eaux souterraines de la région El Malabiod wilaya de Tébessa (S-E Algérien) », mémoire de master, Université de Labi Ben M'Hidi Oum El Bouaghi, 22 juin 2017.
- **Guergazi et Achour ,2005**, selon **SAMIA ACHOUR, LEILA YUCEF, SAADIA GUERGAZI**, « Qualité physicochimique des eaux souterraines et superficielles du Sahara Septentrional oriental algérien », Laboratoire de recherche en hydraulique souterraine et de surface, Larhys, Université de Biskra (Algérie).
- **GUILLEMIN. C.et ROUX J.C. (1992)**, « La pollution des eaux souterraines », Manuels et Méthodes n° 23, éd BRGM, journal officiel du 4 janvier 1989 et du juin 10 juin 1989. -**BREMOND. R et VUICHARD .R (1973)**, « Paramètre de la qualité des eaux, Ministère de la protection de la nature et de l'environnement, SPEPE, Paris ,179p.
- **Bouziani, 2000, Savary 2010**, selon **HADEF DJIHAD et HASNI MALIKA**, « Etude de la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux de l'oued de Boutane de la région de Khemis Miliana Wilaya de Ain Defla »,2016/2017, Université Djilali Bounaâma de Khemis Miliana.
- **Chaker et Slimani, 2014**, selon **MAHAMAT.B, BESKRIA**, « Caractérisation physico-chimique des eaux souterraines dans la plaine de Khemis Miliana, Mémoire de master .Centre universitaire de Khemis Miliana (2010).
- **DOCTEUR BEN MOUSSA**, « cours de chimie des eaux désigné aux étudiants de Master 1 Génie des procédés de l'environnement .Université des sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf Faculté de Chimie.
- **Barriere, 2000**, selon **BAALI .F, et al., 2007**, « Qualité des eaux souterraines en milieu semi-aride, cas de la cuvette de Chéria (NE Algérien).Thèse de magister, université ISSN : 0367-0449-133p.
- **Rodier et al. 2005, Sevesc**, selon **TALEB MAHMOUD et BADAOUI SAID**, « Etude qualitative des eaux souterraines de la région de Bouira.mémoire de master, Université Akli Mohand Oulhadj de Bouira, 19/10/2019.
- **HAFSA TOURAB**, « Contribution à l'étude de la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux souterraines dans la plaine du Haouz », mémoire de fin d'étude, Université Cadi Ayad, Marrakech, 20/02/2013.
- **Chekroud, 2007, Dégremonts, 2015, Hakmi ,2006** selon **AYAD WISSEM**, « Evaluation de la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux souterraines : cas des puits de la région d'El-Harrouch (Wilaya de Skikda) », thèse de Doctorat 3 ème cycle LMD, Université Badj Mokhtar, Annaba, 2016/2017.

- **Site Internet**, « Qualité et pollution des eaux souterraines », Université de Picardie Jules Verne/Jacques Beauchamp. Références bibliographiques -Manuels Ramsar, Pour l'utilisation rationnelle des zones humides, 4ème édition « »Gestion des eaux souterraines ».
- **Figrella et Leyral, 2002**, selon **ZERDANE DOUNIAZAD**, « Etude hydrologique et hydrogéologique de la région de Bouira », mémoire de Magister 03/03/2013, Université des Sciences et de la Technologie, Houari Boumediene.
- **AOUISSI LAMAA et MERABTI WIDED**, « Eau : Etude physico-chimique et bactériologique et développement d'un système de traitement membrane à base de charbon actif »,2018/2019, Université 8 mai 1945, mémoire de fin d'étude.
- **Saadali, 2007, Gouaidia, 2008**, selon **AOUISSI AMINA**, « Microbiologie et physico-chimique de l'eau des puits et des sources de la région de Guelma (Nord-est de l'Algérie) 2009/2010, Université du 8 mai 1945 de Guelma.
- **CHERIFI YASMINE**, « Caractérisation physico-chimique des eaux traitées : cas de la station de Hammam Debagh-Guelma », 2018, Université 8 mai 1945 Guelma. Mémoire de fin d'étude.
- **BOUDJELLAL RANIA**, « Contribution à la connaissance des caractéristiques physicochimiques des eaux d'irrigation (les eaux souterraines) de la région de M'Sila-Wilaya de M'Sila, mémoire de master, Université Mohamed Boudiaf-M'Sila.
- **Emilie César, 2011,2012**, selon **NAIMA EL HAMMOUMI, MOHAMED SINAN, BRAHIM LEKHLIF et LAKHDAR EL MAHJOUB**, « Evaluation de la qualité des eaux souterraines pour l'utilisation dans l'eau potable et l'agriculture : plaine de Tadla, Maroc, Afrique Science 08(1) (2012 54-66).

Annexes

A1: Analyses des paramètres physico-chimiques pour les années 2003 & 2005

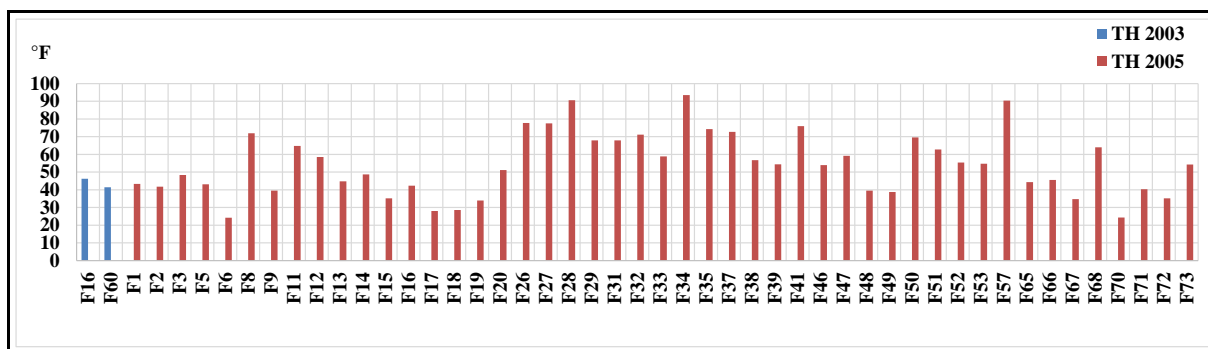


Figure A1.1 : Variation de la duresté TH - (2003 & 2005)

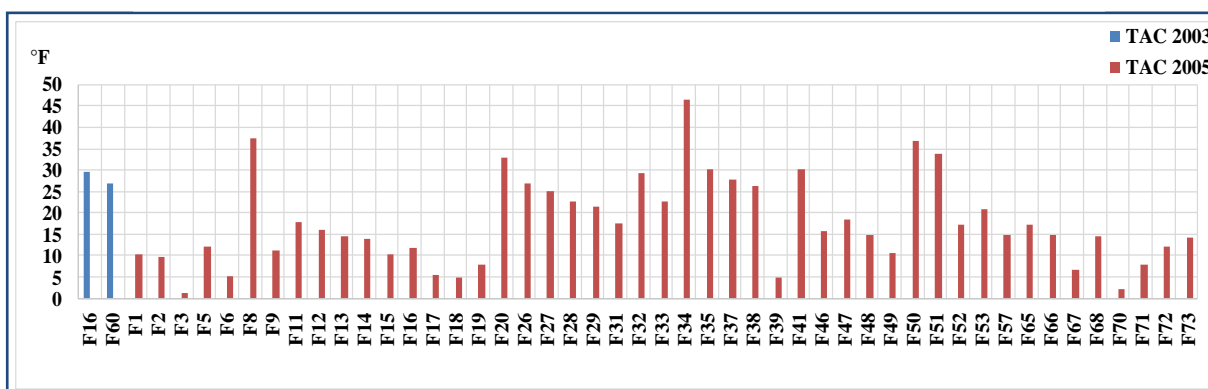


Figure A1.2 : Variation de l'alcalinité complète TAC - (2003 & 2005)

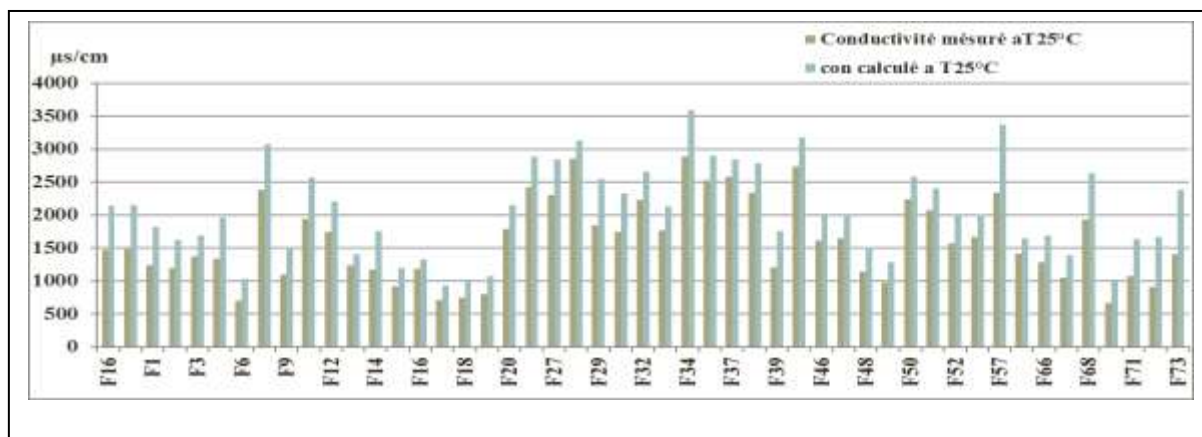


Figure A1.3 : Variation de la conductivité pour les années 2003 & 2005

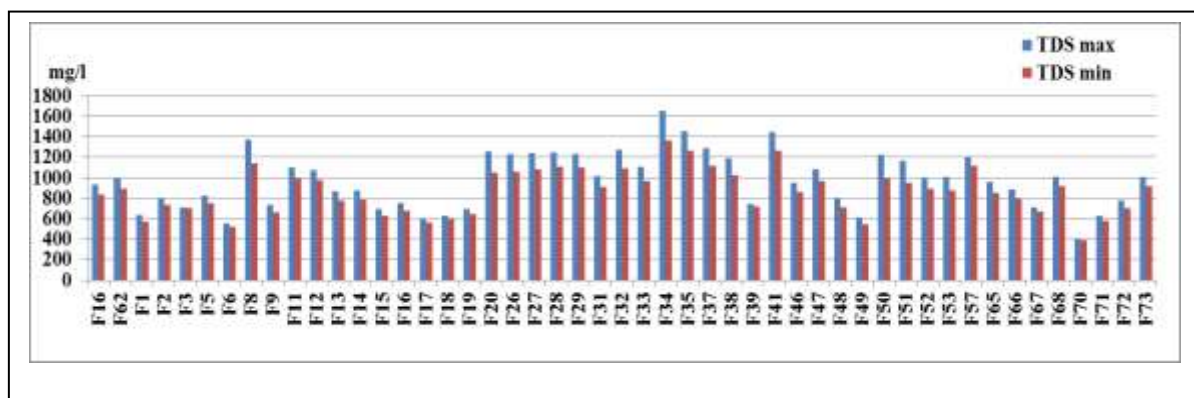


Figure A1.4 : Variation du TDS max et TDS min - 2003 & 2005

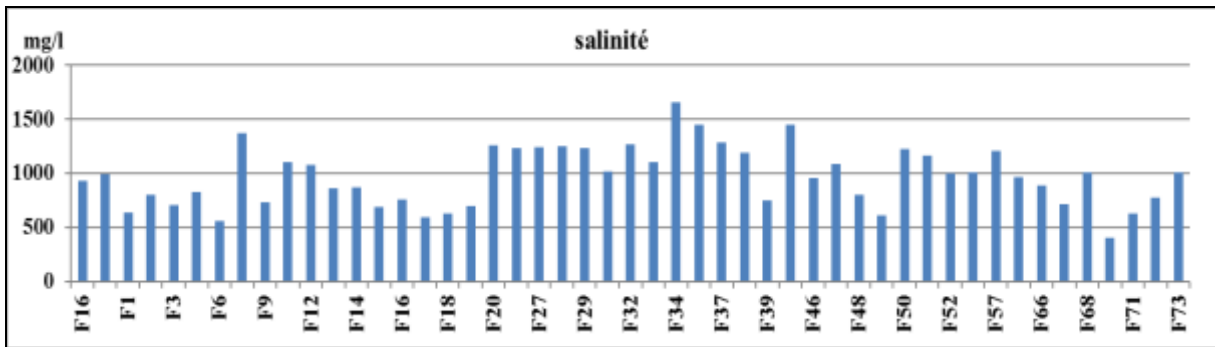


Figure A1.5 : Variation de la salinité - 2003 & 2005

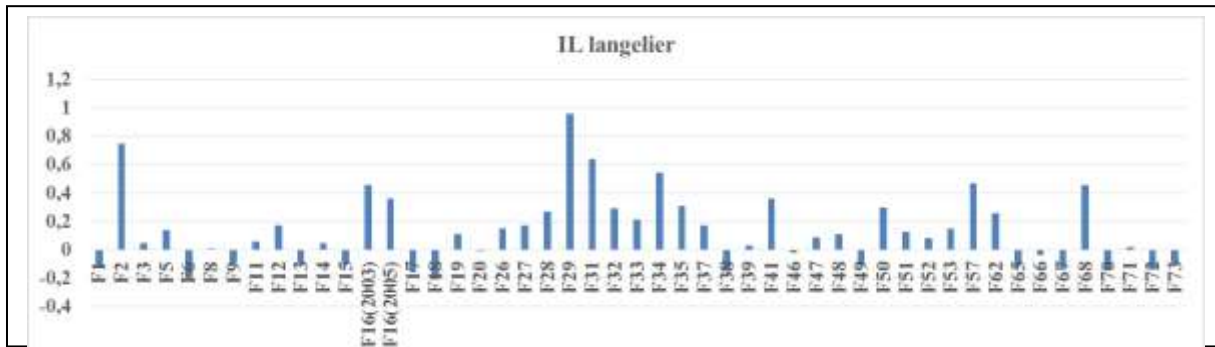


Figure A1.6 : Variation de l'indice de Langelier - 2003 & 2005

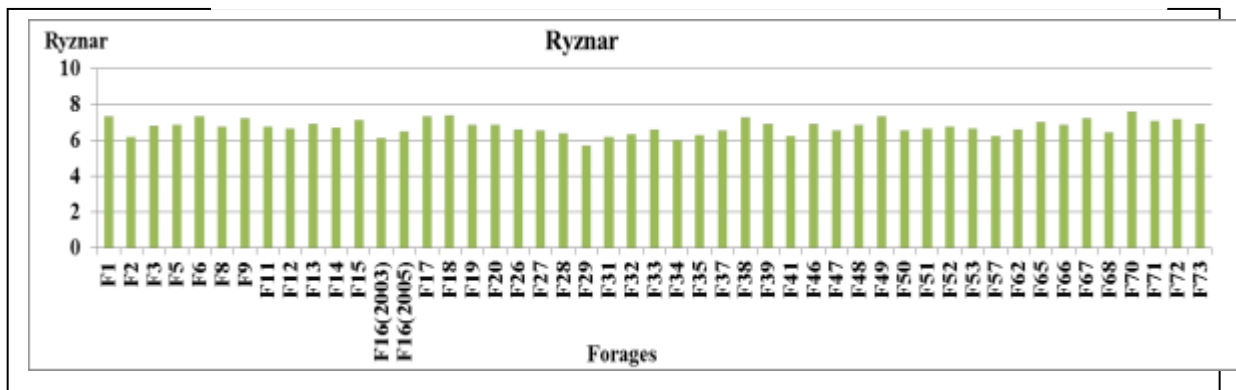


Figure A1.7: Variation de l'indice de Ryznar - 2003 & 2005

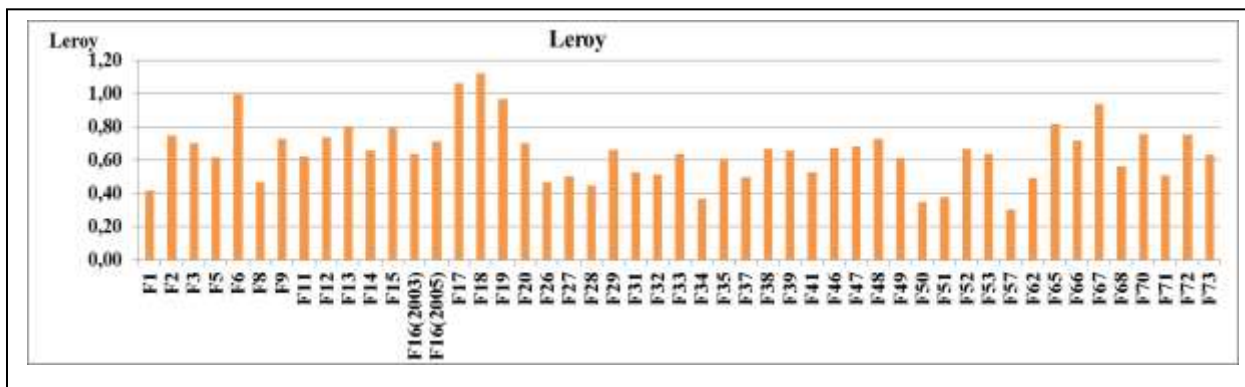


Figure A1.8: Variation de l'indice de Leroy - 2003 & 2005

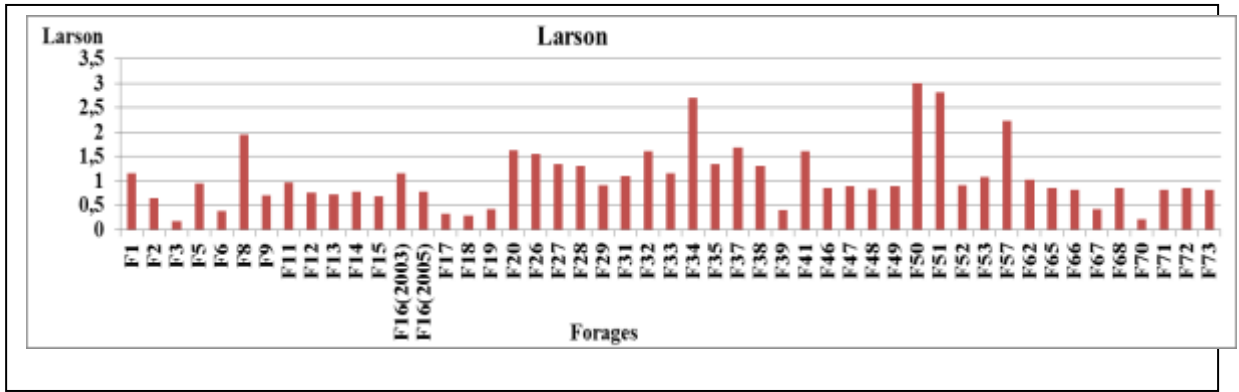


Figure A1.8: Variation de l'indice de Larson - 2003 & 2005

A2 : Analyse des paramètres physico-chimique des eaux des forages pour l'année 2007

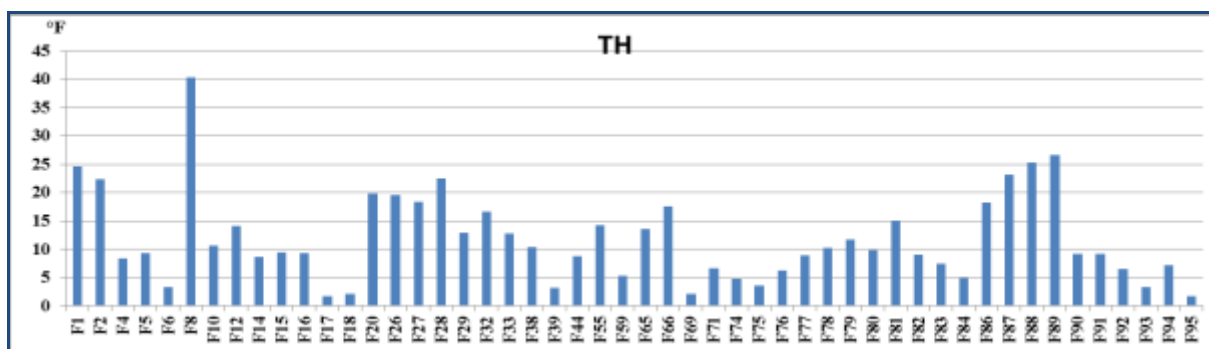


Figure A2.1 : Variation de la dureté (TH) - 2007

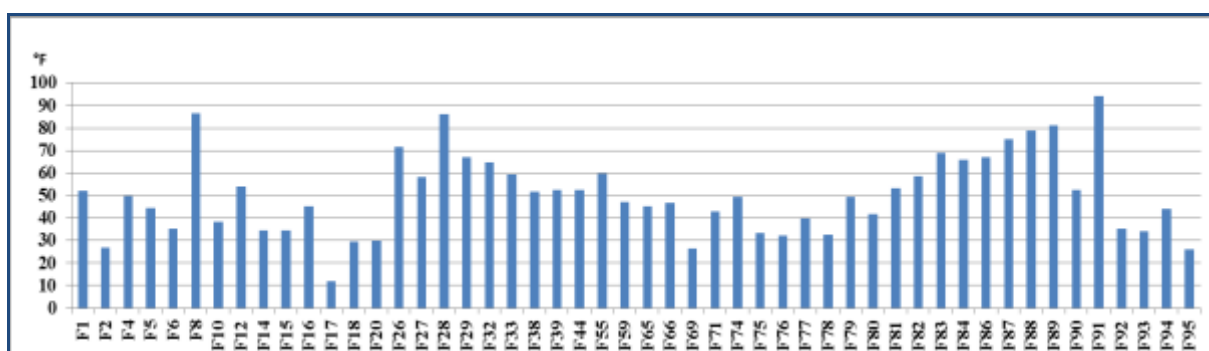


Figure A2.2: Variation de l'alcalinité complète (TAC) - 2007

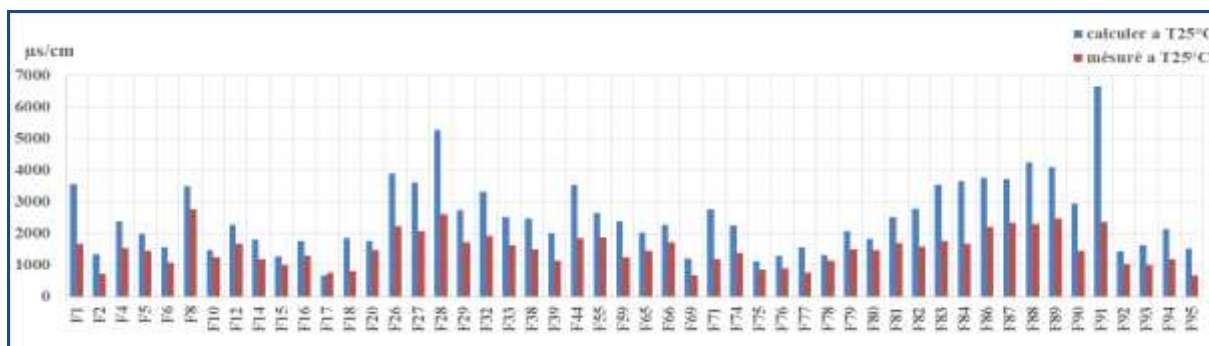


Figure A2.3 : Variation de la conductivité mesurée et calculée à (25°C) pour l'année 2007

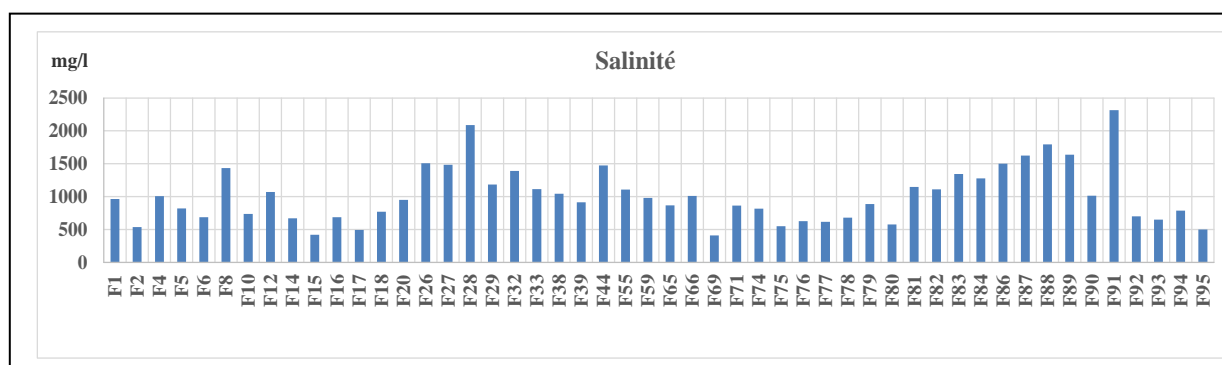


Figure A2.4 : Variation de la Salinité des eaux étudiées pour l'année 2007

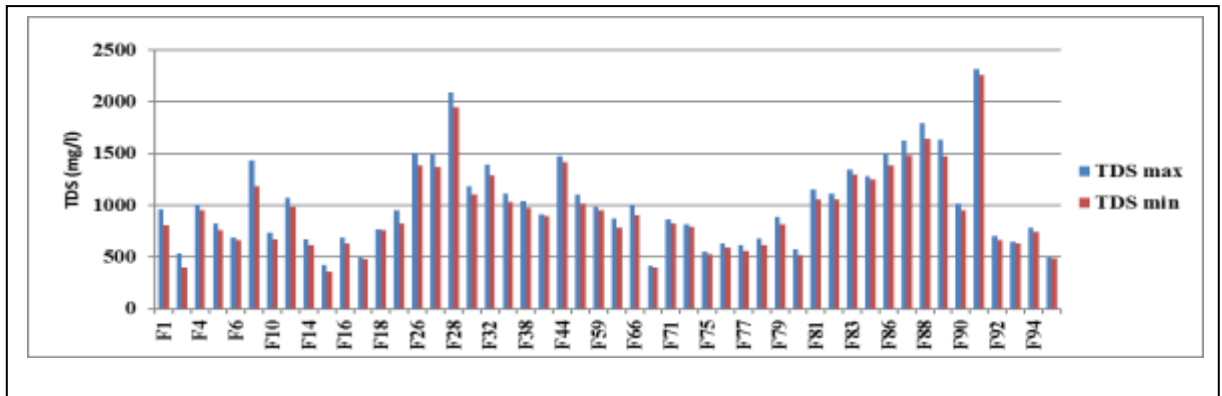


Figure A2.5 : Variation du TDS max et TDS min des eaux étudiées pour l'année 2007

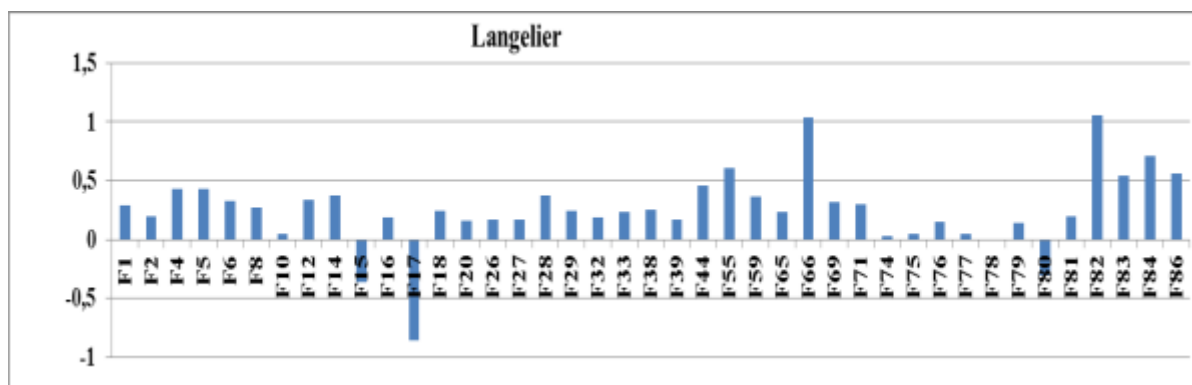


Figure A2.6 : Variation de l'indice de Langelier - 2007

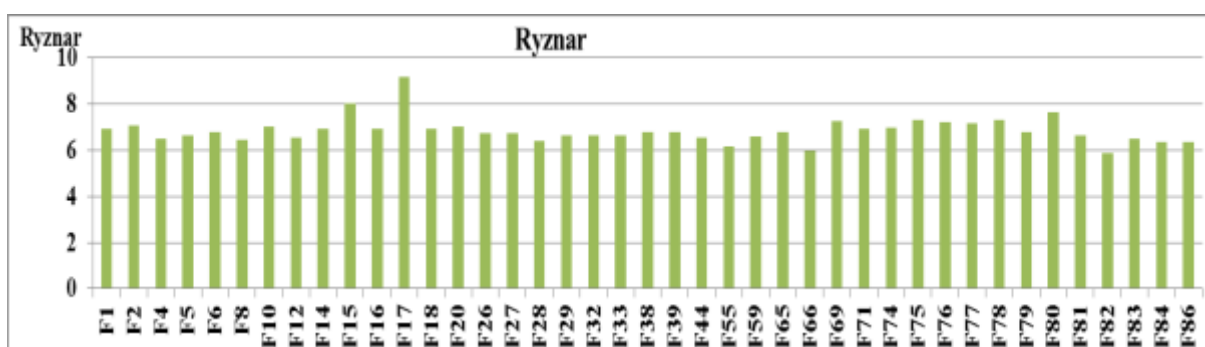


Figure A2.7 : Variation de l'indice de Ryznar - 2007

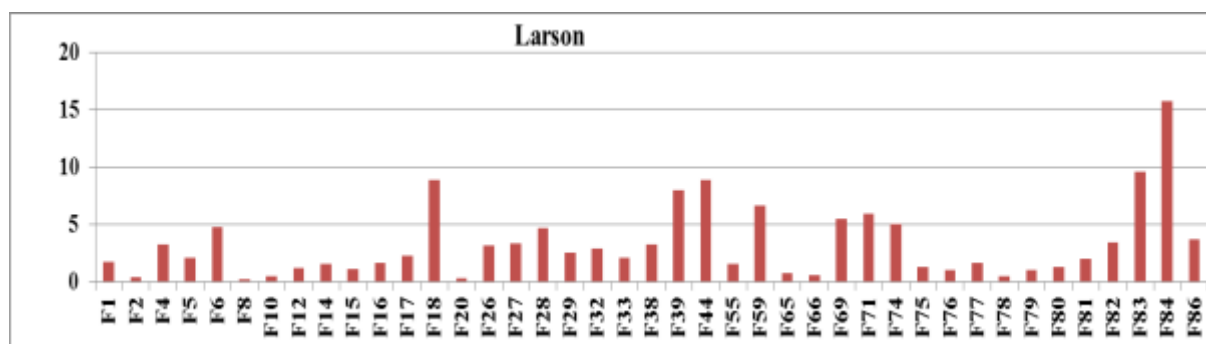


Figure A2.8 : Variation de l'indice de Larson - 2007

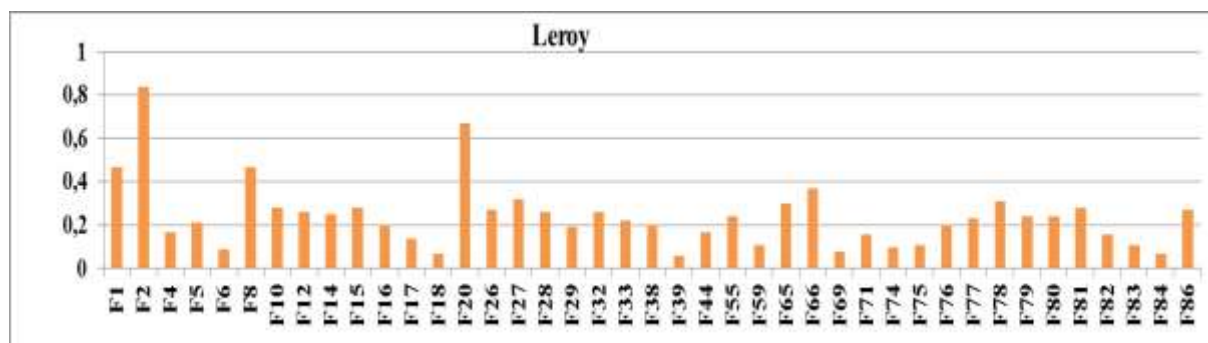


Figure A2.9 : Variation de l'indice de LEROY - 2007

A3 : Analyse des paramètres physico-chimique des eaux de forages pour l'année 2008

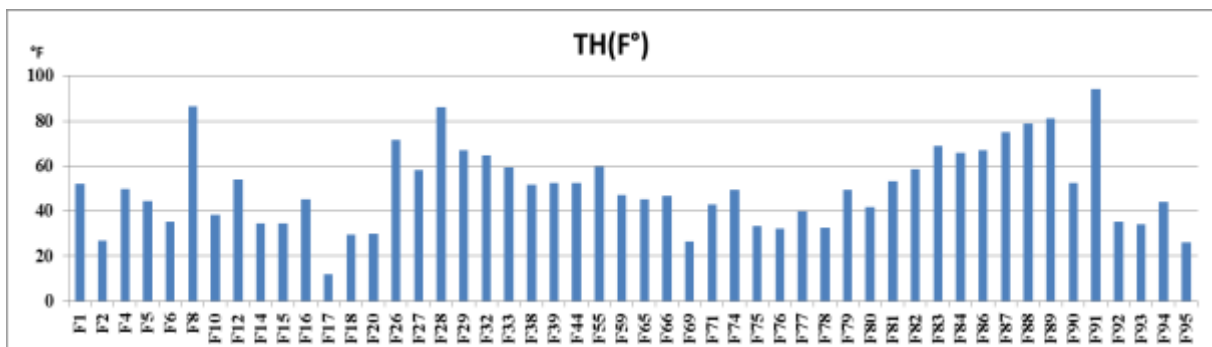


Figure A3.1 : Variation de la dureté (TH) pour l'année 2008

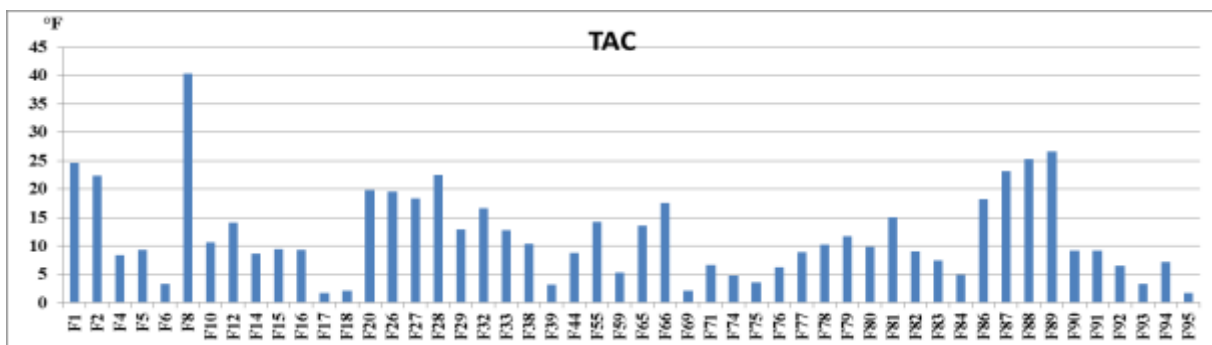


Figure A3.2 : Variation de l'alcalinité complète (TAC) - 2008

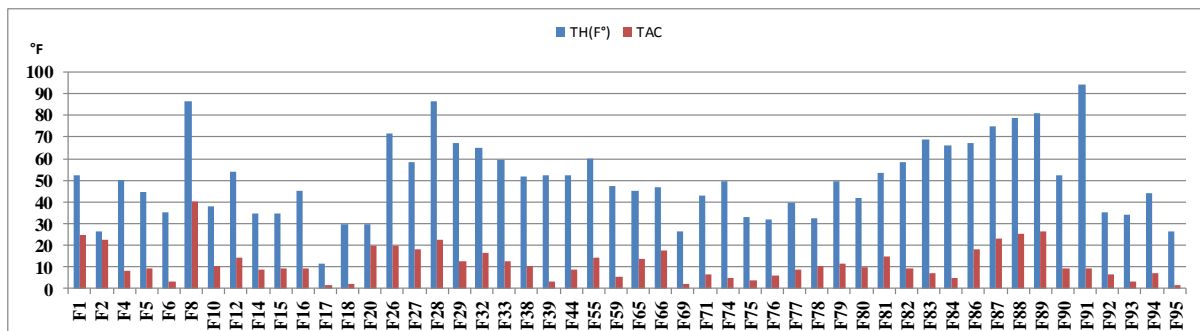


Figure A3.3 : Comparaison du TH par rapport au TAC-

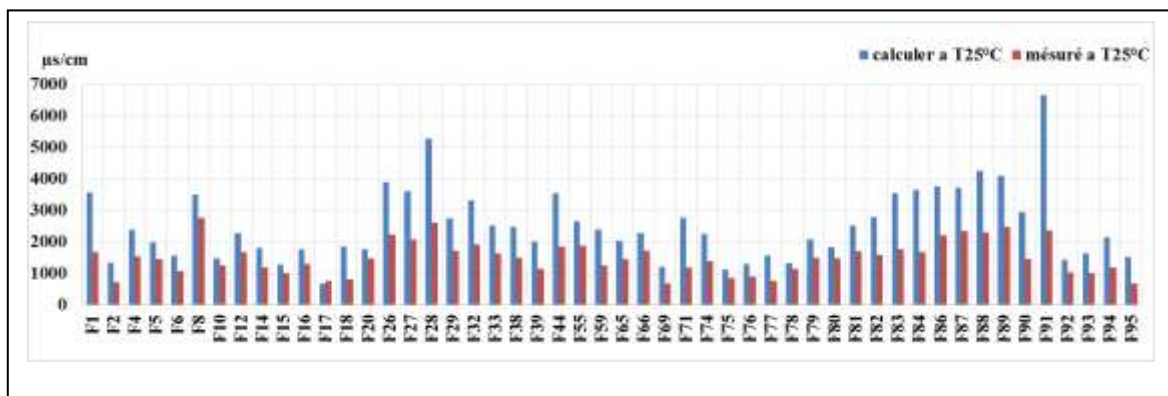


Figure A3.4 : Variation de la conductivité mesurée et calculée à (25°C) pour l'année 2008

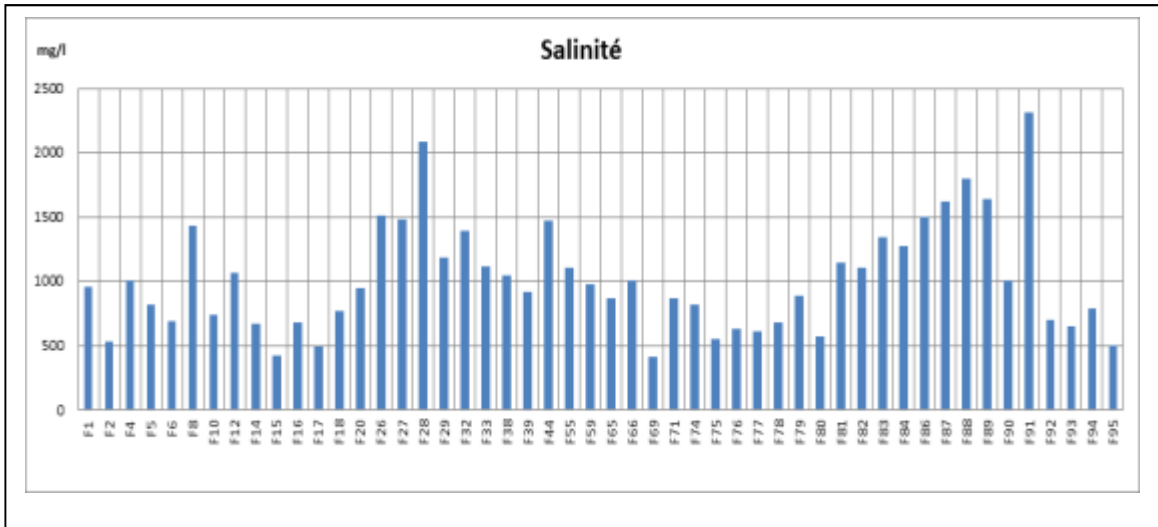


Figure A3.5:Variation de la salinité des eaux - 2008

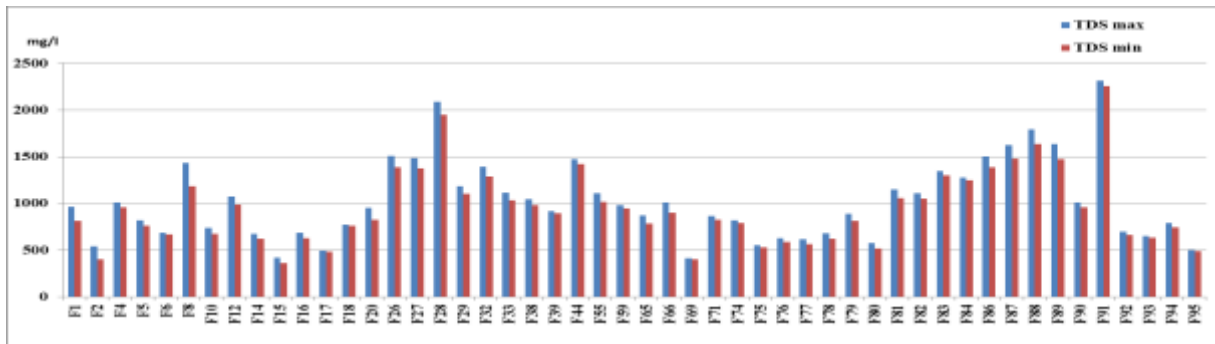


Figure A3.6: Variation du TDS max et TDS min -2008

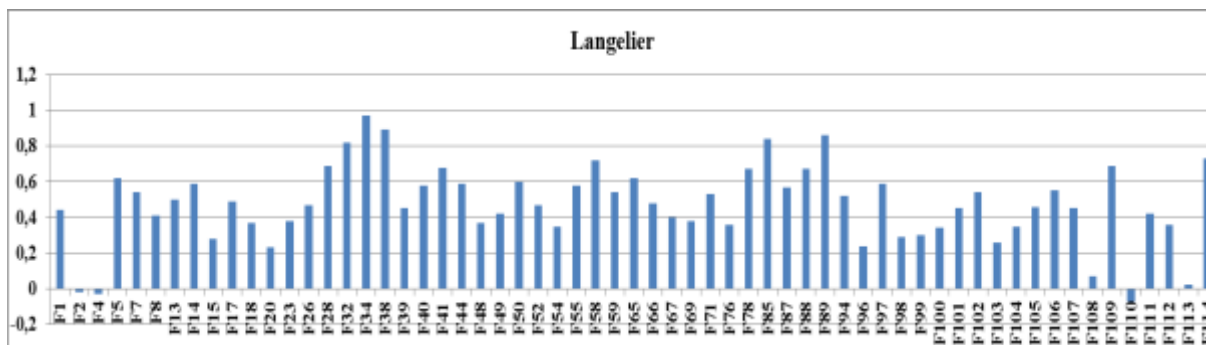


Figure A3.7 : Variation de l'indice de Langelier – 2008

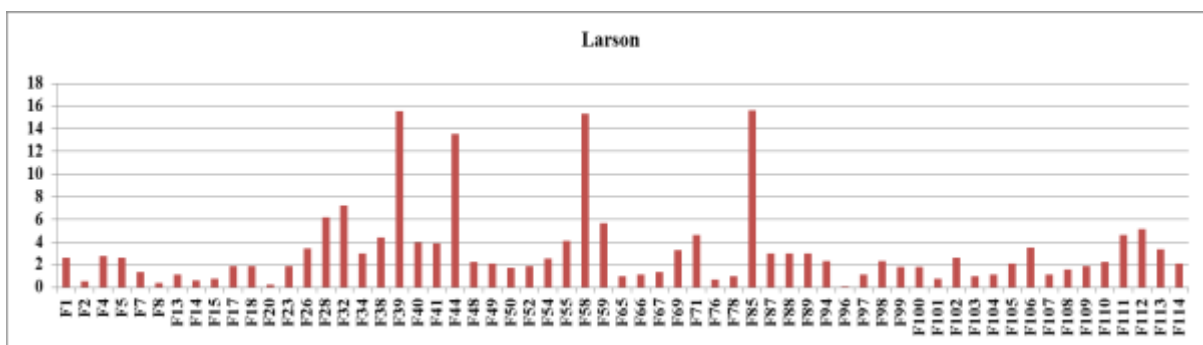


Figure A3.8 : Variation de l'indice de Larson -2008

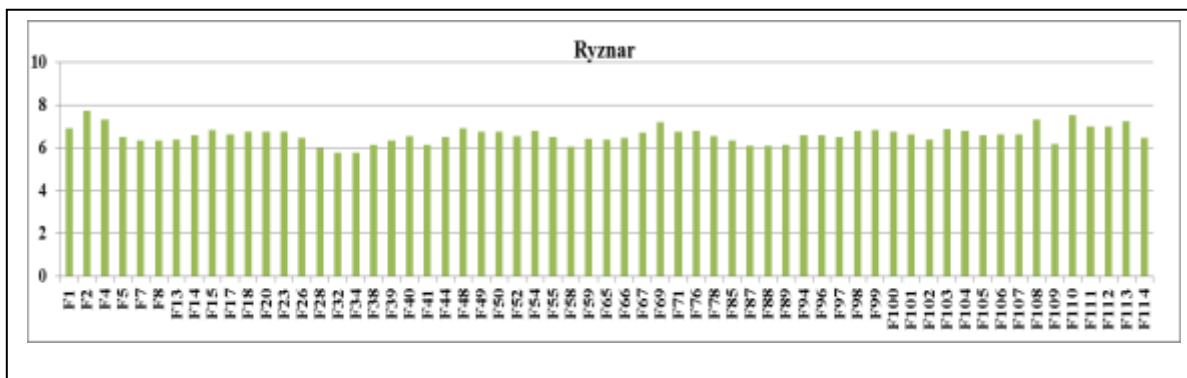


Figure A3.9 : Variation de l'indice de Ryznar -2008

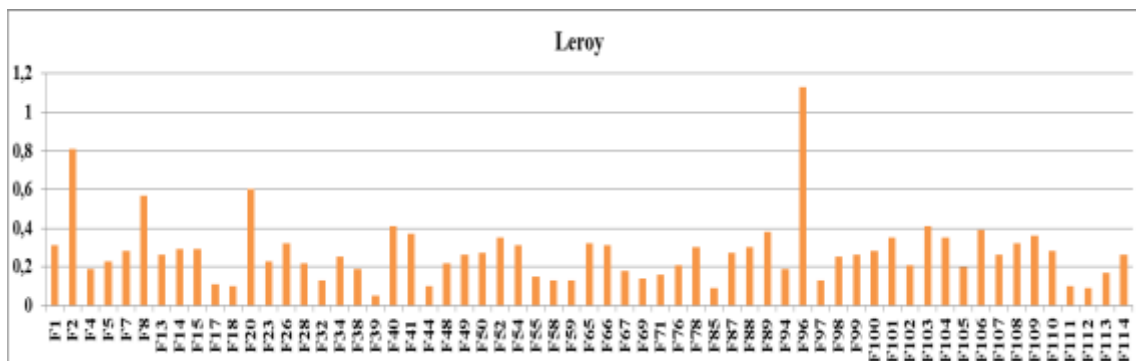


Figure A3.10 : Variation de l'indice de Leroy -2008

A4 : Analyse des paramètres physico-chimiques pour l'année 2009

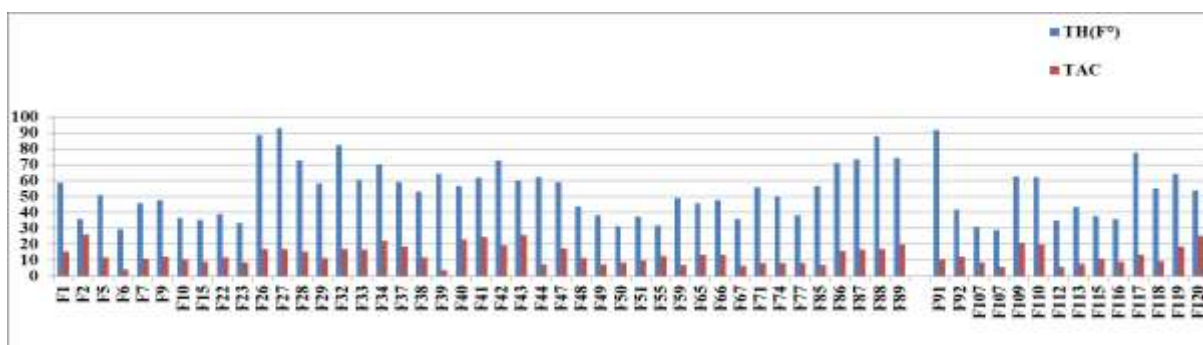


Figure A4.1 : Comparaison du TH par rapport à TAC- 2009

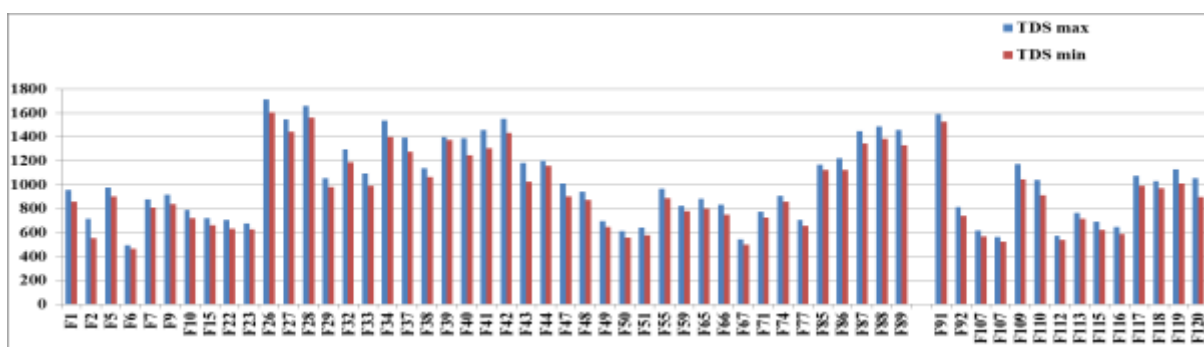


Figure A4.2 : Variation du TDS max et TDS min -2009

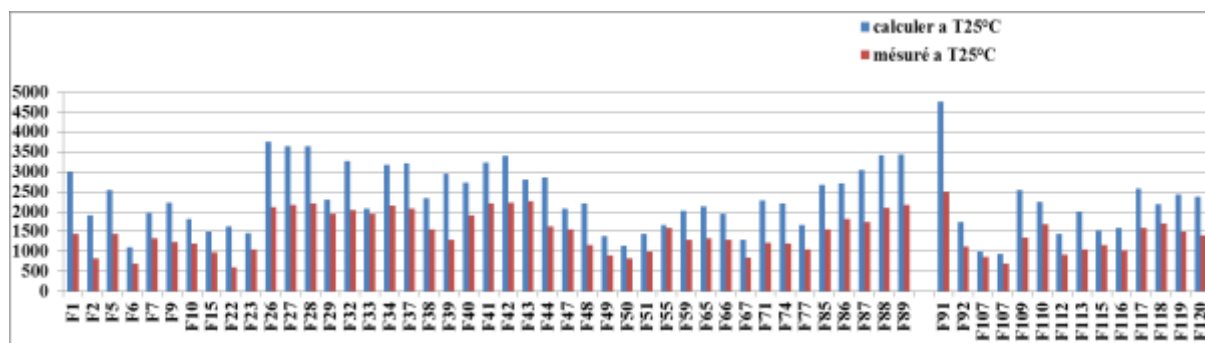


Figure A4.3 : Variation de la conductivité mesurée & calculée à 25°C -2009

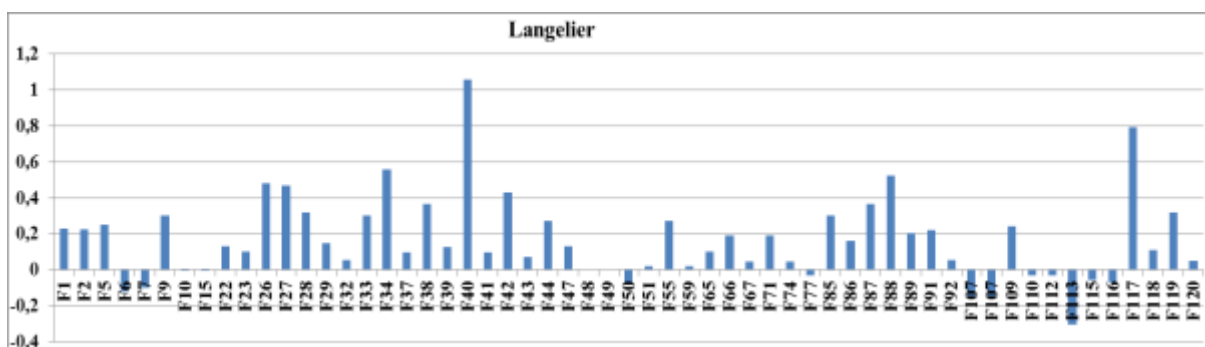


Figure A4.5 : Variation de l'indice de Langelier -2009

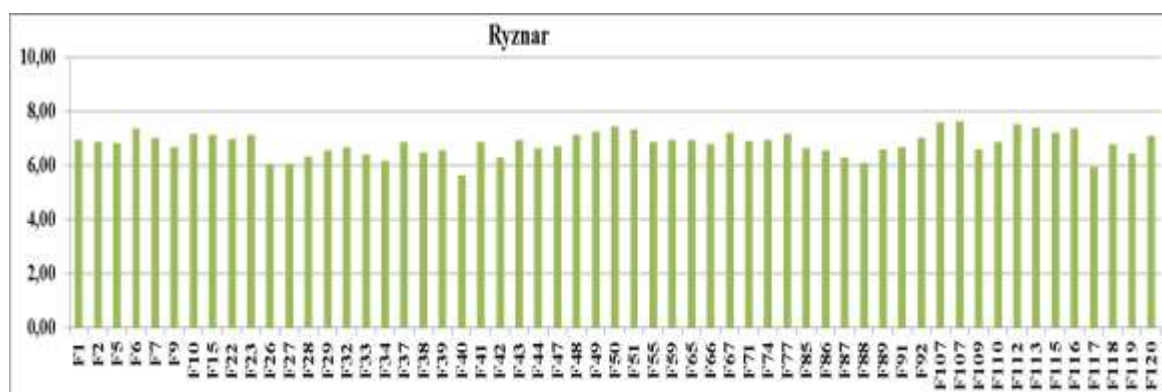


Figure A4.6 : Variation de l'indice de Ryznar -2009

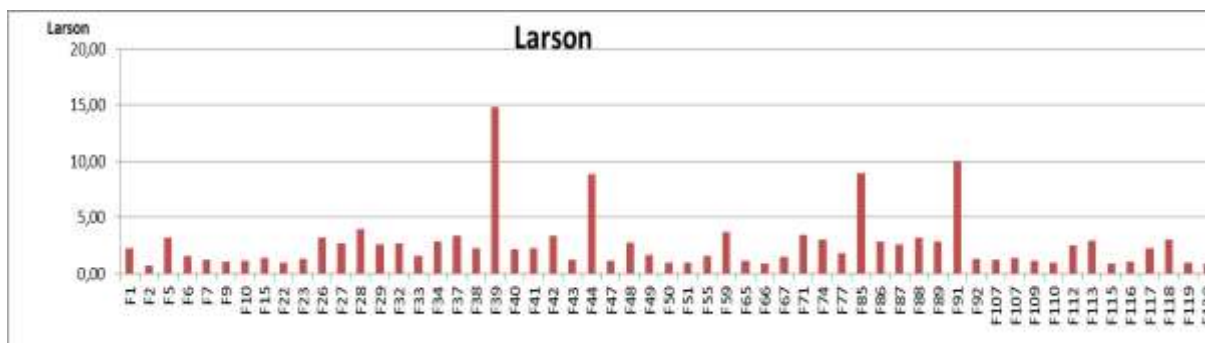


Figure A4.7 : Variation de l'indice de Larson -2009

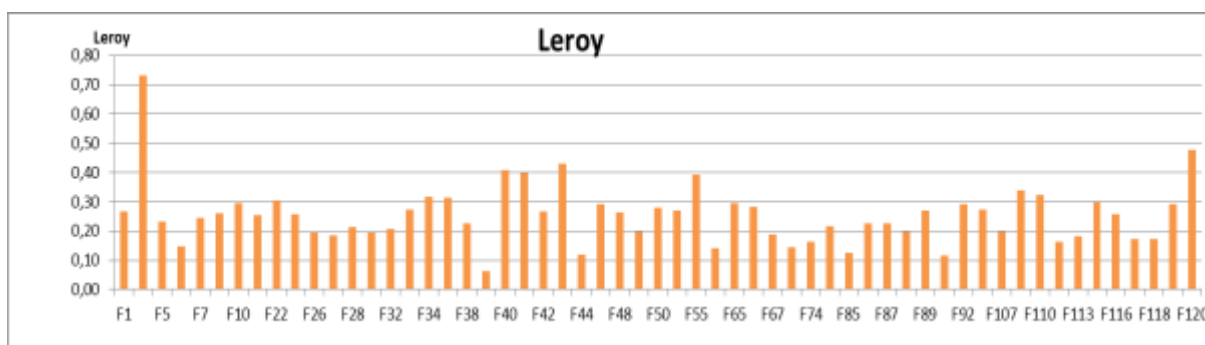


Figure A4.8 : Variation de l'indice de Leroy - 2009

A5 : Analyse des paramètres physico-chimique pour les eaux de forages 2011.

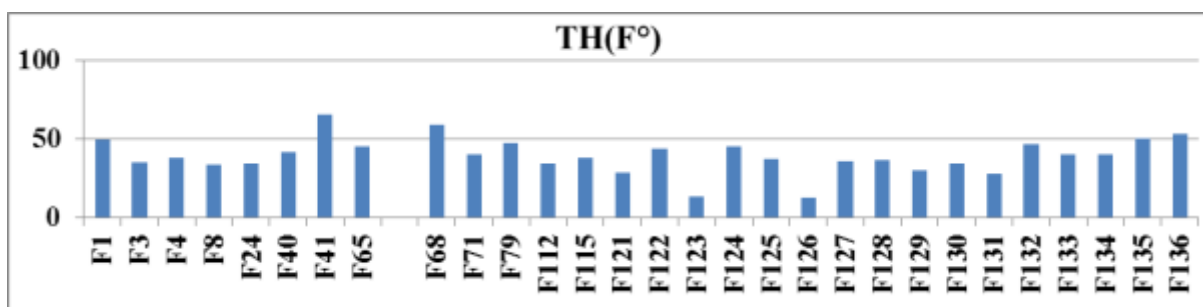


Figure A5.1 : Variation de la dureté - 2011

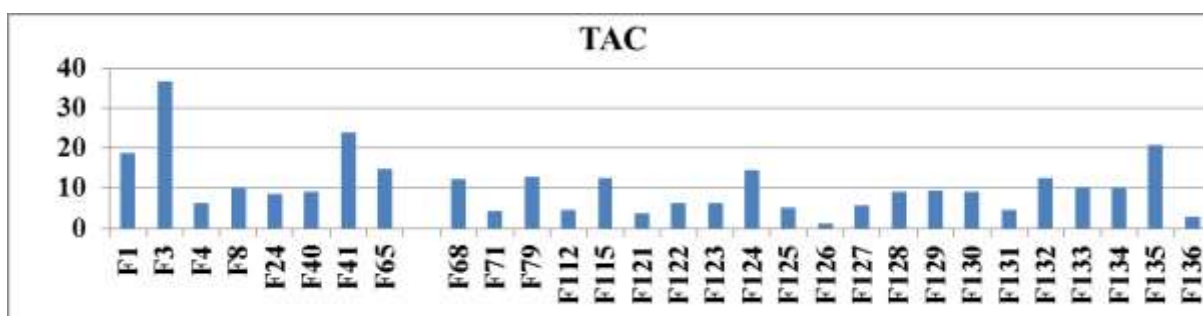


Figure A5.2 : Variation de l'alcalinité complet TAC - 2011

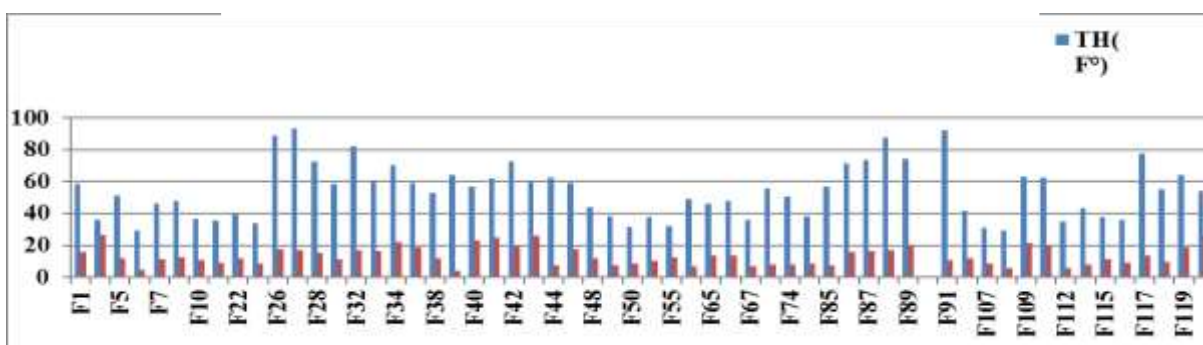


Figure A5.3 : Comparaison du TH et TAC - 2011

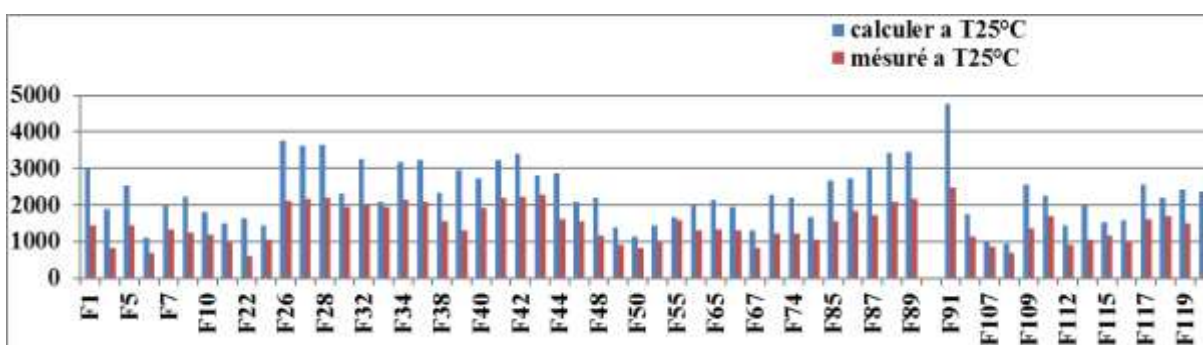


Figure A5.4 : Variation de la conductivité mesurée & calculée à 25°C - 2011

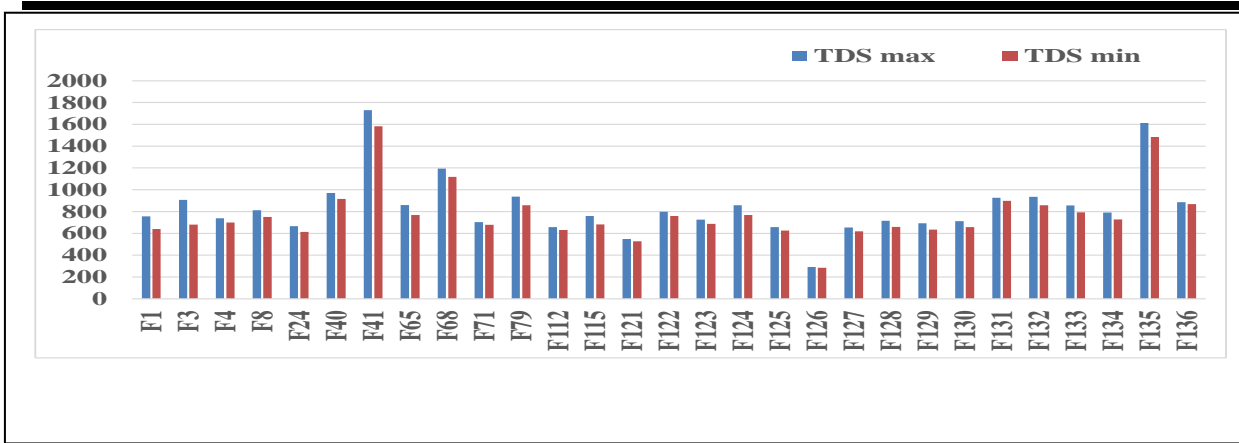


Figure A5.6 : Variation du TDS max et TDS min - 2011

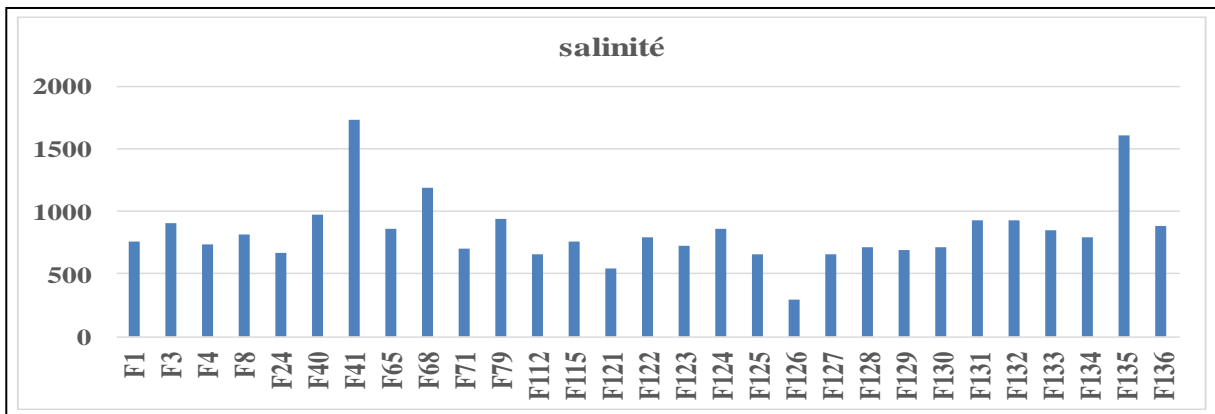


Figure A5.7 : Variation des valeurs de salinité - 2011

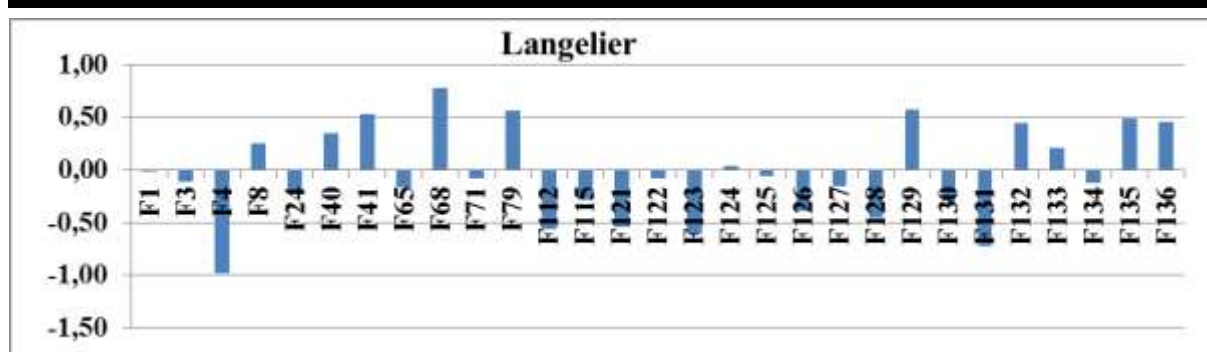


Figure A5.8 : Variation de l'indice de Langelier - 2011

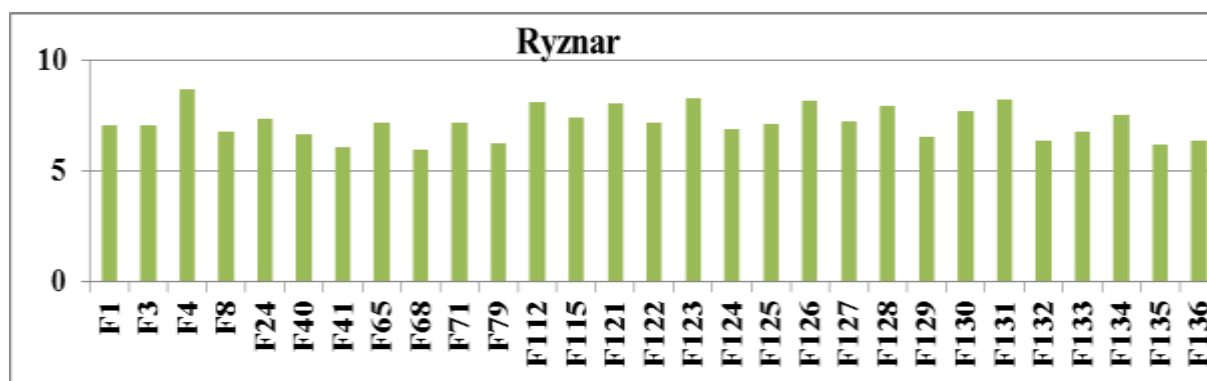


Figure A5.9 : Variation de l'indice de Ryznar - 2011

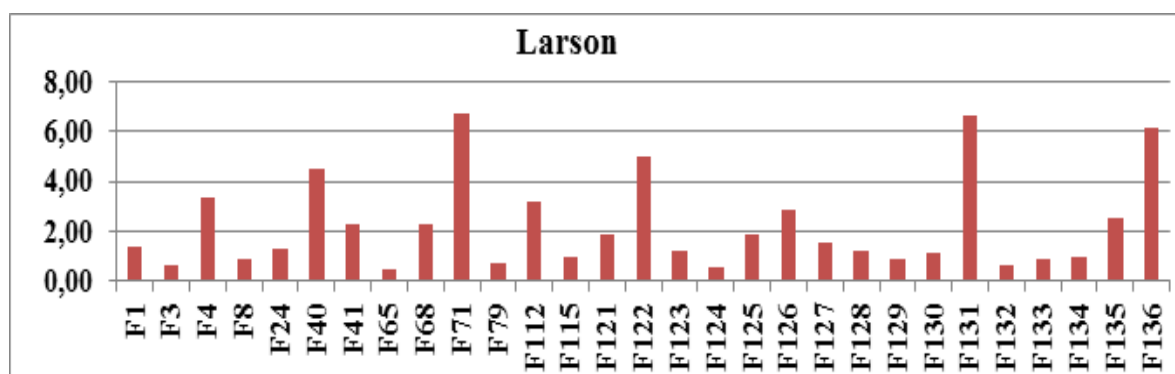


Figure A5.10 : Variation de l'indice de Larson - 2011

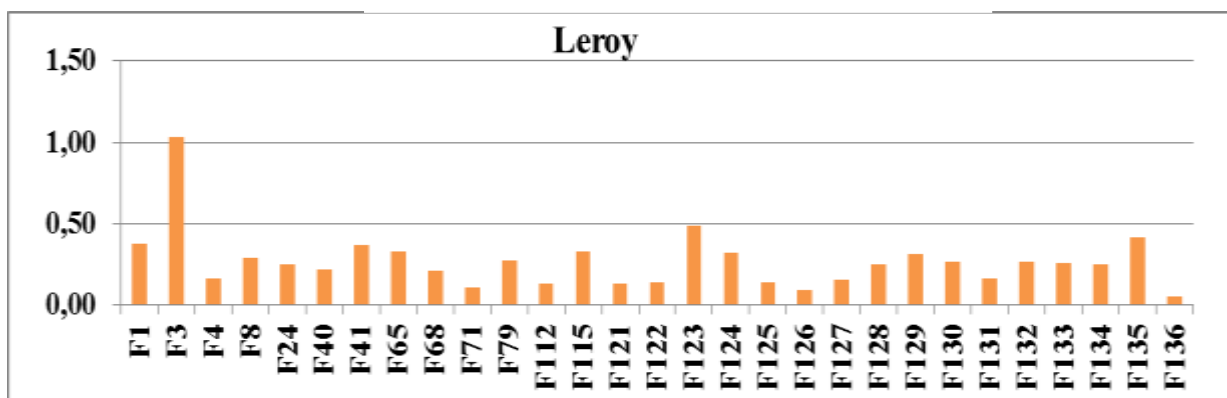


Figure A5.11 : Variation de l'indice de Leroy - 2011

A6 : Analyse des paramètres Physico-chimique pour les eaux de forages 2012

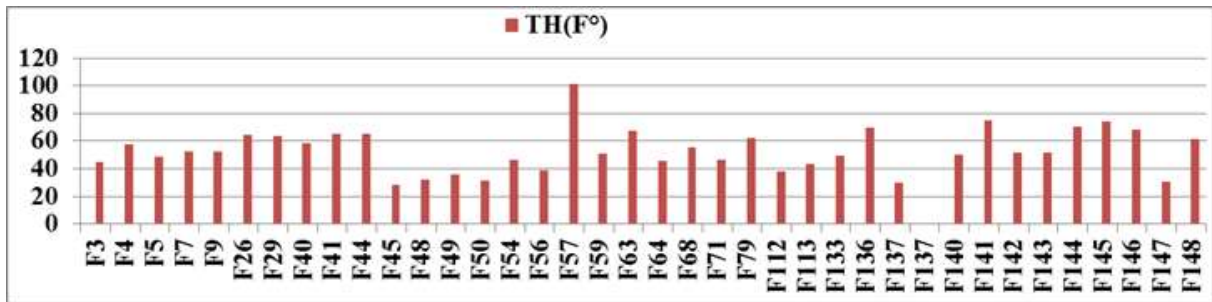


Figure A6.1 : Variation de la dureté - 2012

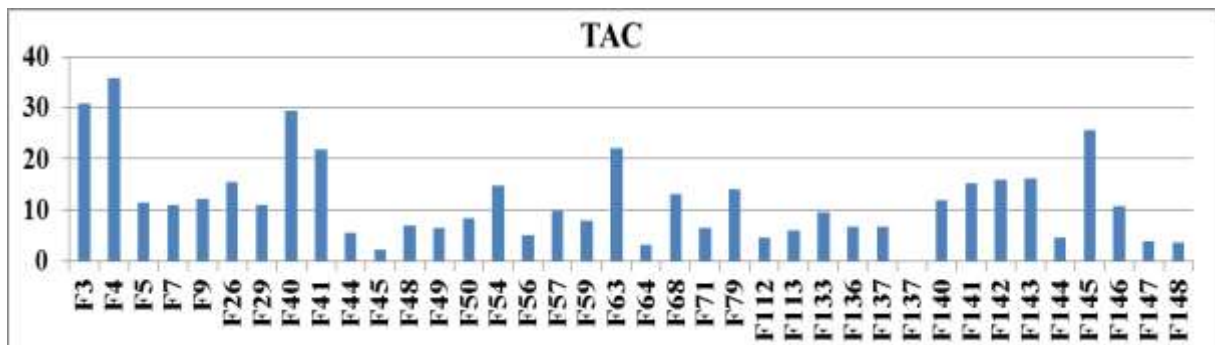


Figure A6.2: Variation de l'alcalinité complet- 2012

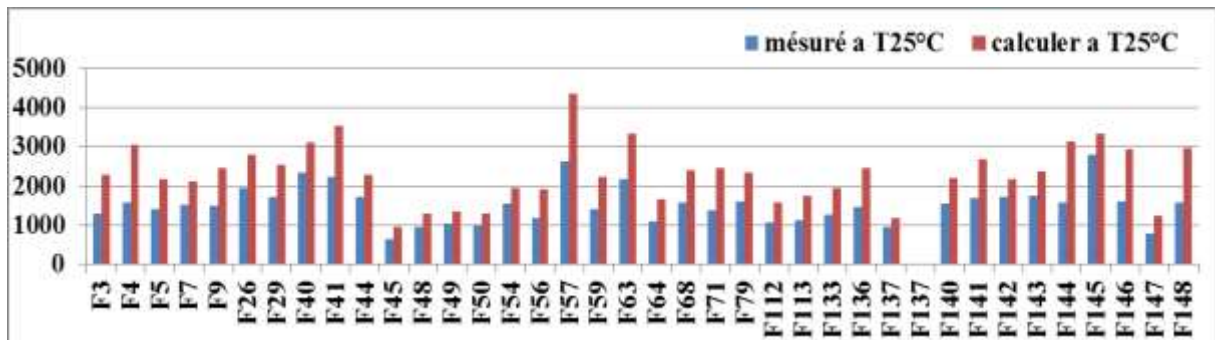


Figure A6.3 : Variation de la conductivité mesurée & calculée à 25°C - 2012

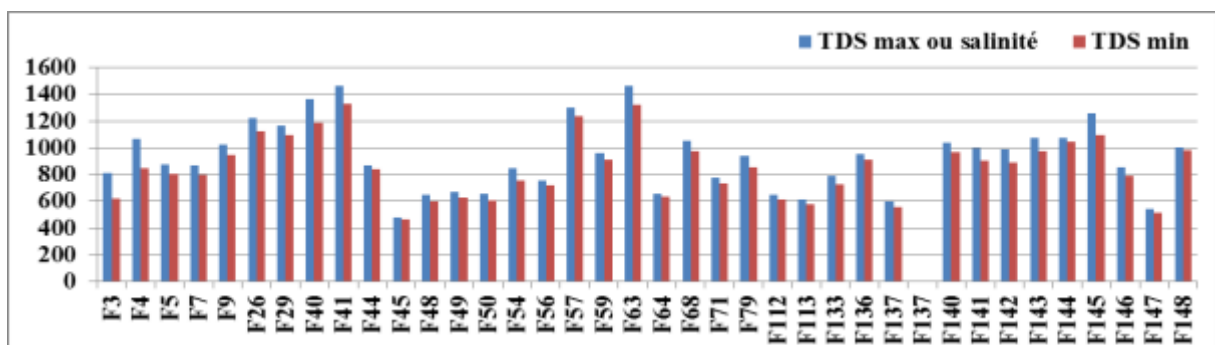


Figure A6.4 : Variation du TDS max et TDS min - 2012

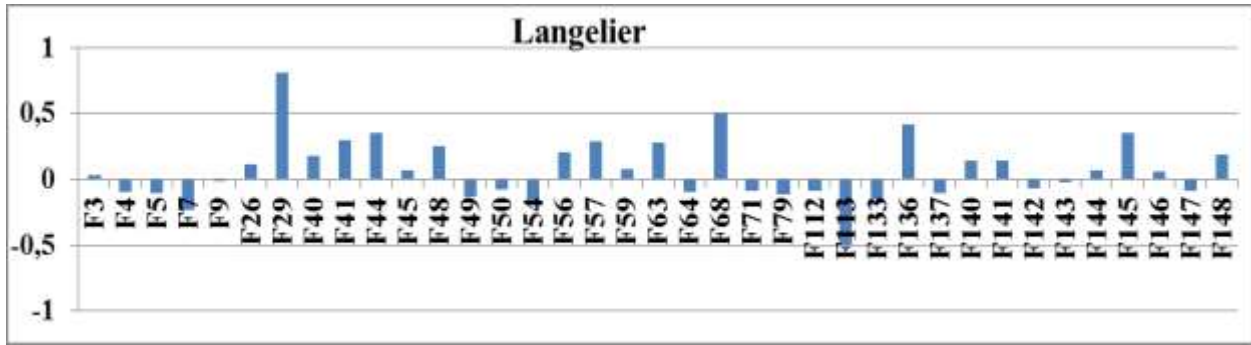


Figure A6.5 : Variation de l'indice de Langelier - 2012

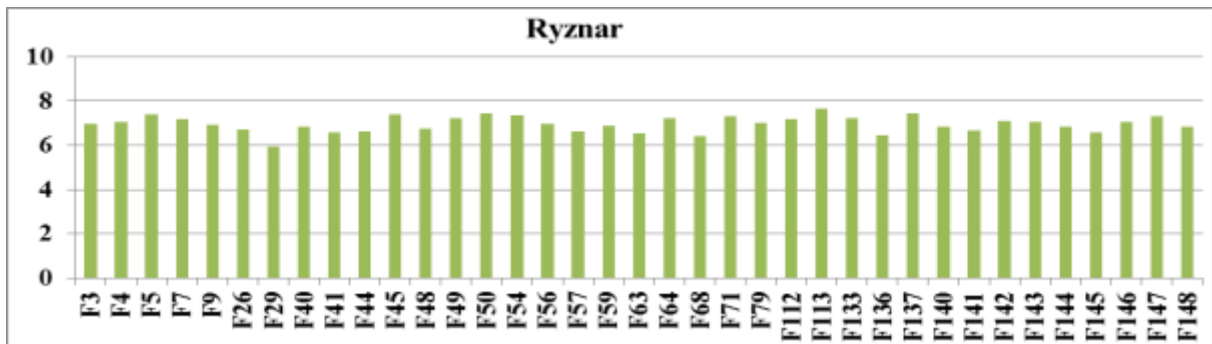


Figure A6.6 : Variation de l'indice de Ryznar - 2012

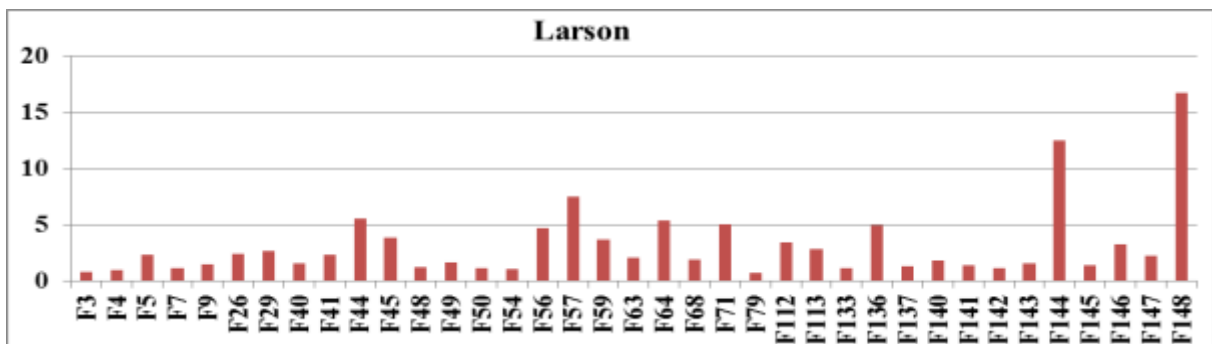


Figure A6.7 : Variation de l'indice de Larson - 2012

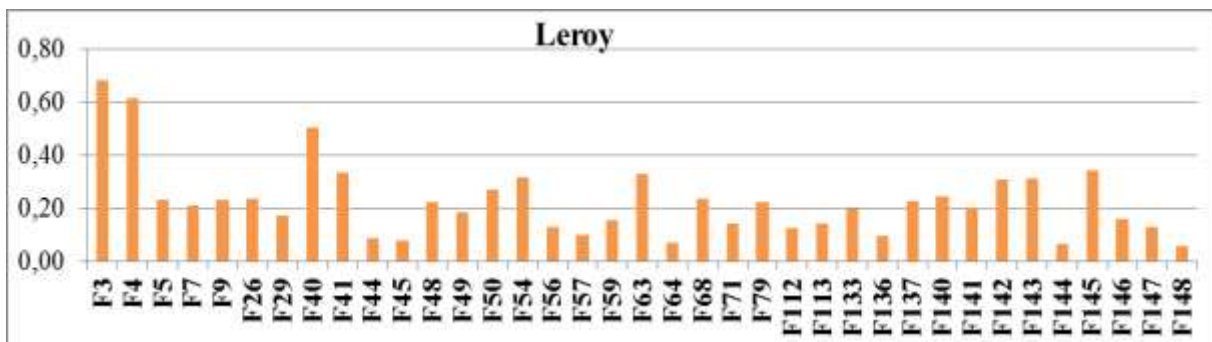


Figure A6.8 : Variation de l'indice de Leroy - 2012

A7 : Analyse des paramètres physico-chimique des eaux de forages pour l'année 2013

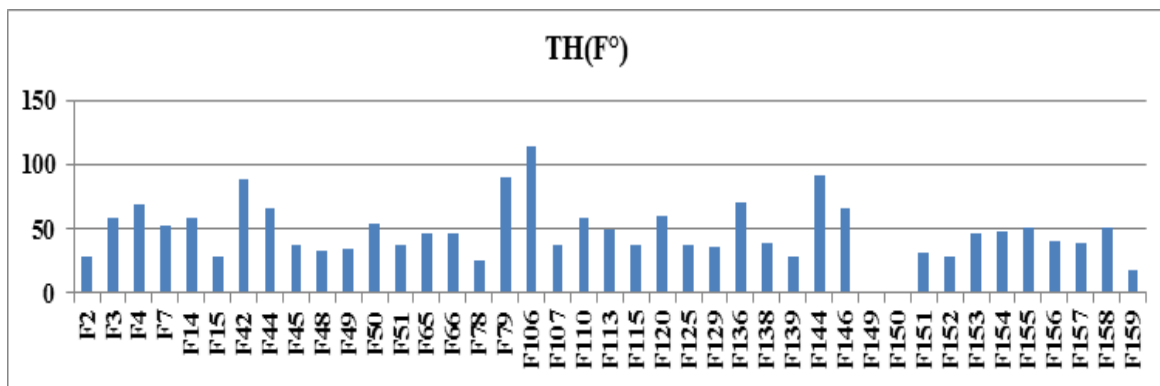


Figure A7. 1 : Variation de La duetét TH - 2013

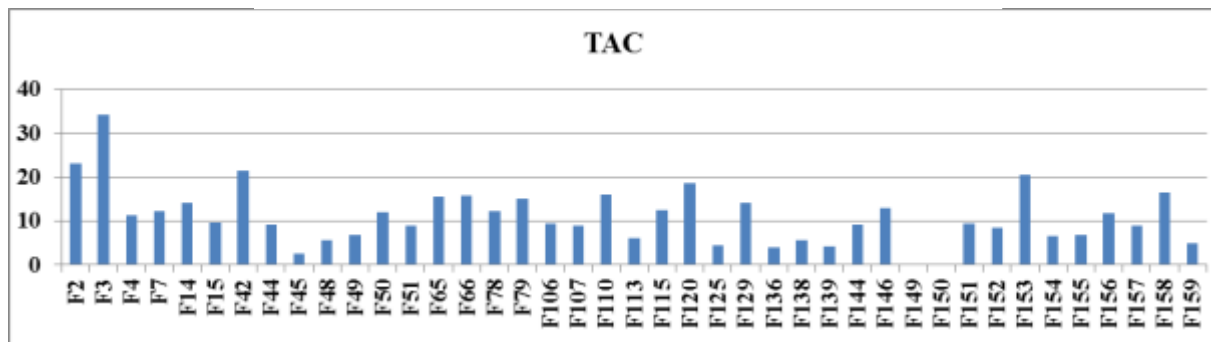


Figure A7. 2 : Variation de l'alcalinité complet TAC - 2013

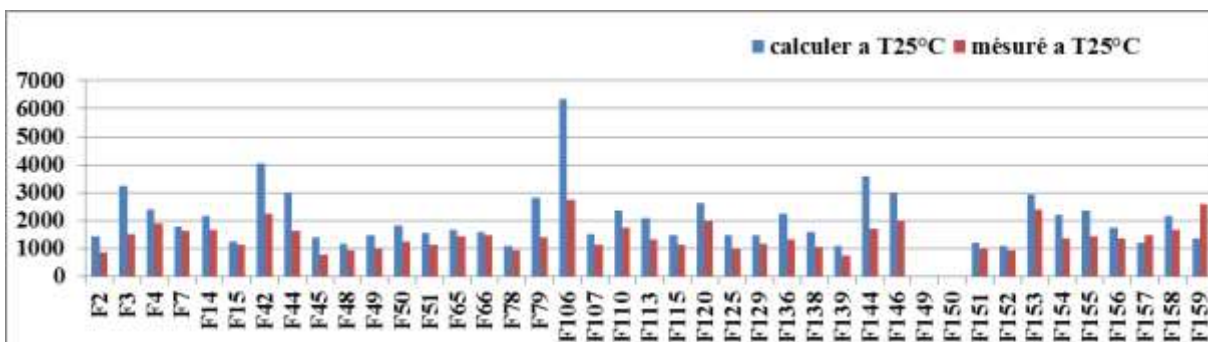


Figure A7. 3 : Variation de la conductivité mesurée & calculée à 25°C - 2013

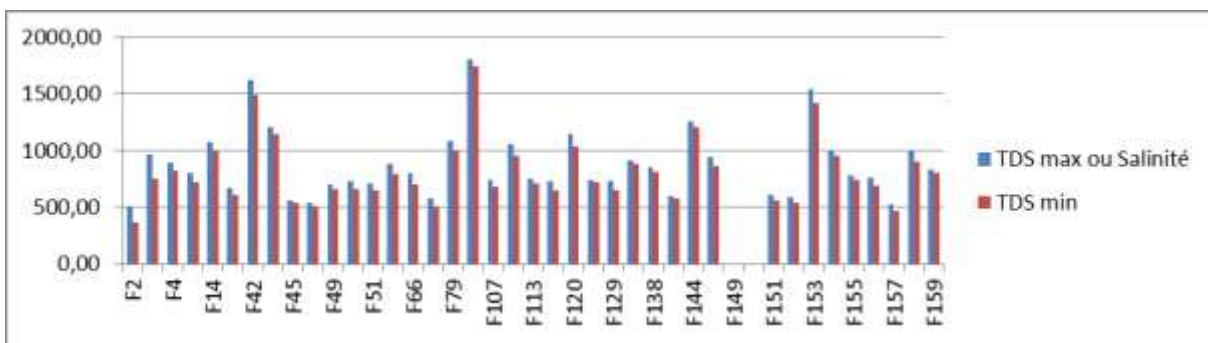


Figure A7. 4 : Variation du TDS max et TDS min - 2013

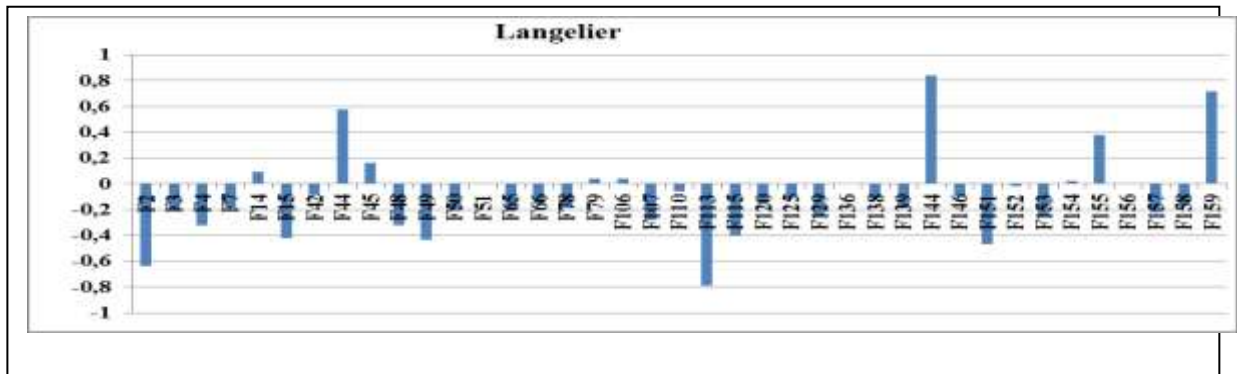


Figure A6.5 : Variation de l'indice de Langelier – 2013

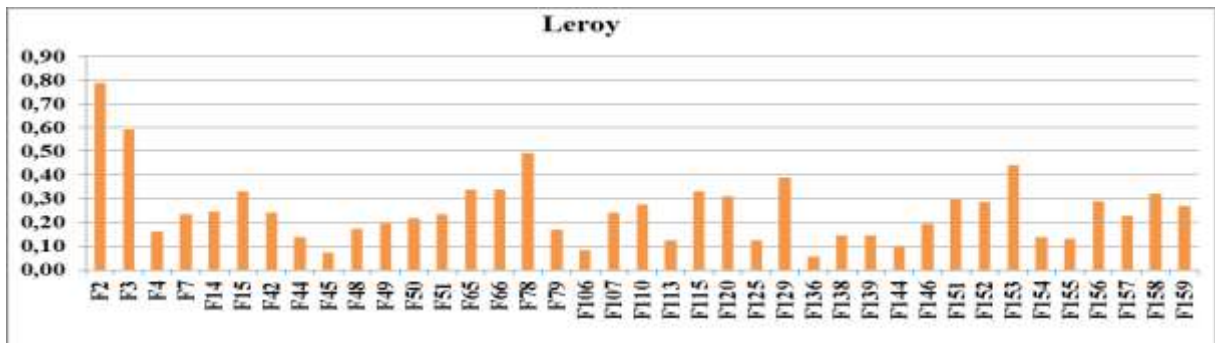


Figure A7.6 : Variation de l'indice de Leroy - 2013

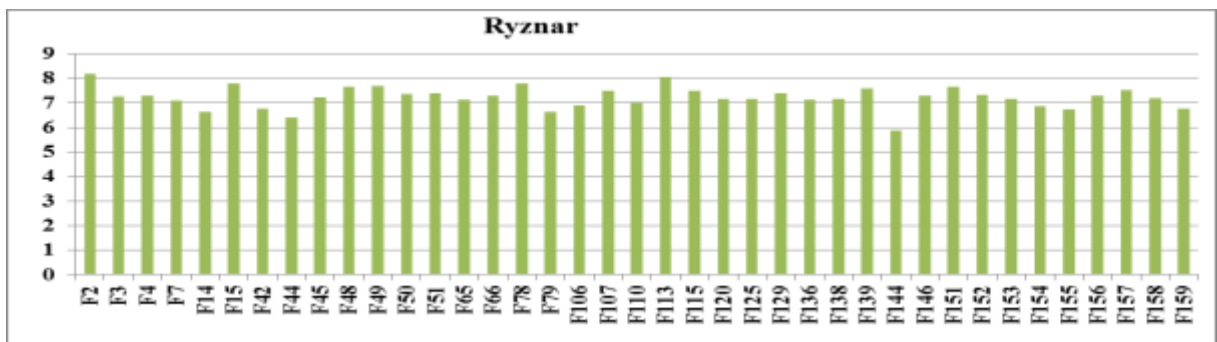


Figure A7.7 : Variation de l'indice de Ryznar - 2013

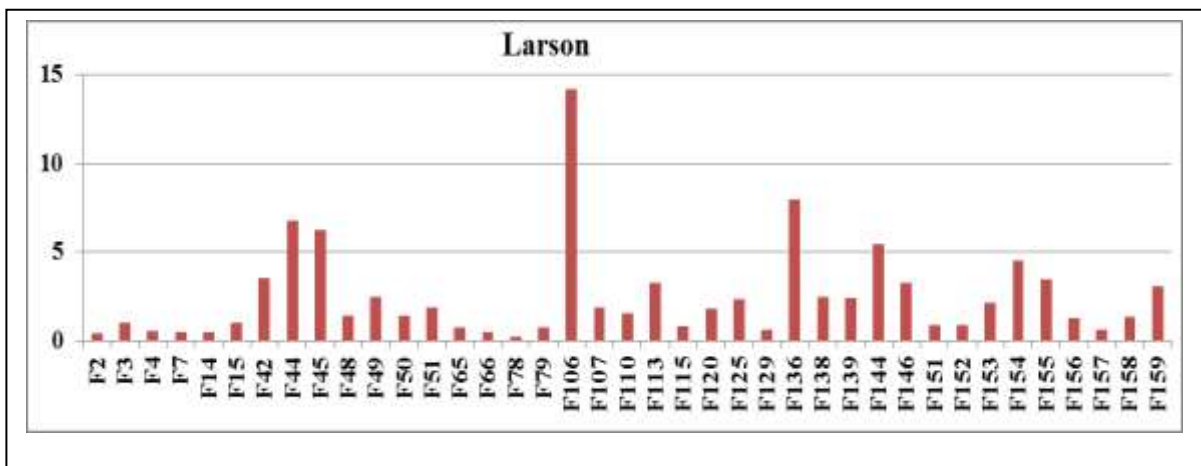


Figure A7.8 : Variation de l'indice de Larson - 2013

Cartes géographiques de localisation des forages

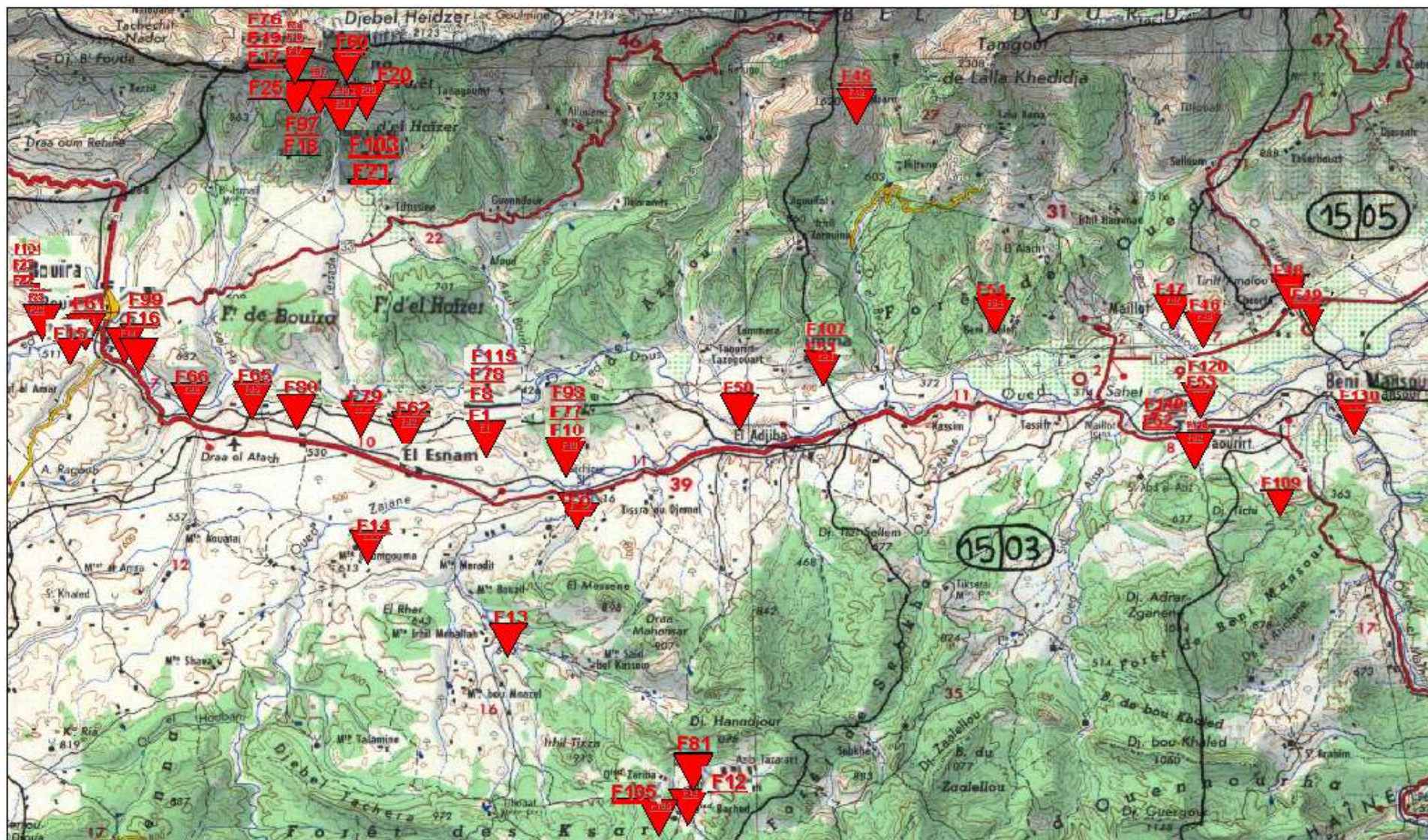


Figure. A : Carte de localisation des forages de la région de Bouira

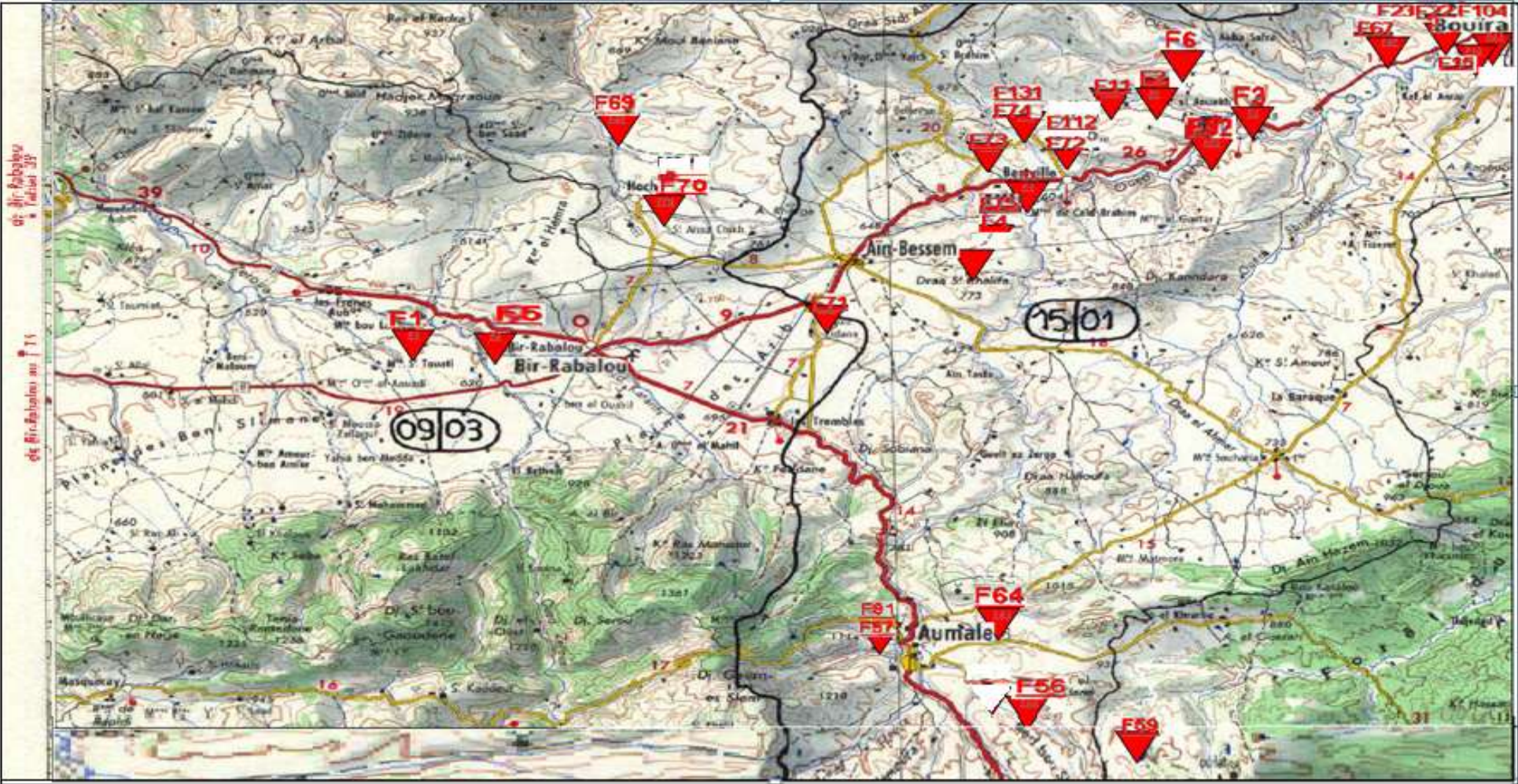


Figure. B : Carte de localisation des forages de la région de Bouira

