

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE de TLEMCCEN
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie et Sciences de la Terre et de
l'Univers

Département Sciences de la Terre et de l'Univers

Laboratoire n°25

MEMOIRE

Présenté par

**Doulla Nouhou Youssoufa
Laminou Oumarou Yaou**

En vue de l'obtention du

Diplôme de MASTER

En Hydrogéologie

Thème

Etude qualitative et vulnérabilité à la pollution des eaux
souterraines de la région d'El Bayadh

Soutenu le 27/09/2020, devant le jury composé de :

Président	Mr BOUDJEMA.A	MCA	Université de Tlemcen
Encadreur	Mr KERZABI.R	MAA	Université de Tlemcen
Co-Encadreur	Mme KERZABI YOUSFIS	MCB	Université de Tlemcen
Examineur	Mme DJELAD.R	MAA	Université de Tlemcen

ملخص

هدف هذه الدراسة يتعلق بتقييم جودة المياه الجوفية بوادي البيض واهليتها للاستهلاك والري، ورسم خريطة الهشاشة الخزان الجوفي للتلوث. تعرف هذه المنطقة مناخ شبه قاحل حيث لا تتعدى الامطار السنوية 279.5 ملمتر معدل الحرارة 15.61 درجة مئوية.

تمت دراسة الخصائص الكيميائية للمياه الجوفية الخاصة ب 18بئر عميقة لسنتي 2018 و 2019. اظهر تحليل البيانات الفرق الضعيف بين الخصائص الرئيسية، عكس العناصر المدلة على التلوث (النترات، النتريت و الفوسفات) التي عرفت تطور بين السنتين 2018 و 2019، حيث يسجل الفوسفات في اغلب الابار فقط خلال سنة 2019. دراسة تقييمية لحالة المياه الجوفية اعتمادا على مقارنة البيانات بمعايير الجودة الجزائرية (2011) و العالمية (2017). اثبتت هذه الدراسة توافق خصائص المياه الجوفية مع معايير الجودة ماعدا البئرين "الحضنة 4 و 5" إضافة الى "اوزيد1" الذي يحوي على نسبة فوسفات عالية تفوق معايير الجودة.

تعتبر دراسة ورسم خريطة قابلية المياه الجوفية للتلوث من الوسائل المعتمدة لحماية المياه الجوفية، خاصة في المناطق ذات الموارد المائية مهمة. في هذا النطاق، قمنا بتطبيق طريقة GOD على خزان المياه الجوفية للبيض، وهي عبارة عن طريقة حساب مؤشر الاهلية للتلوث. تتميز منطقة الدراسة بطبقات ذات نفاذية الانكسار والمختلطة، إضافة الى ان عمق المياه الجوفية متوسط الى ضعيف. تستعمل طريقة GOD درجة حبس الذي يمثل نوع الخزان الجوفي (G)، خصائص الصخور (O) و عمق سطح المياه الجوفية (D). تعتبر هذه العوامل في الطريقة المستعملة، كمعامل تخفض الحماية الطبيعية الخزانات الجوفية.

لتحقيق هدف الدراسة، قمنا باستعمال نظام المعلومات الجغرافية (SIG) لرسم خريطة القابلية للتلوث لمنطقة الحوض وادي البيض. أظهرت هذه الأخيرة عدد من المناطق ذات درجة متفاوتة القابلية للتلوث. في الأخير، مثلت 61.88 بالمئة من المساحة الاجمالية مناطق ذات قابلية ضعيفة الى متوسطة، في حين 38.12 بالمئة مناطق ذات قابلية قوية الى جد قوية للتلوث. انطبقت هذه الأخيرة مع مناطق ذات نفاذية عالية وعمق ضعيف لسطح المياه جوفية مما أدى بنا لقول ان هذه العوامل لها تأثير كبير في تدهور نوعية المياه الجوفية.

الكلمات المفتاحية : المياه جوفية ، خاصية المياه، معايير الجودة، القابلية للتلوث، طريقة GOD، حوض البيض

Résumé :

L'objectif de cette étude sur l'aquifère multicouche du bassin versant de l'oued El Bayadh porte sur l'évaluation de la qualité des eaux en vue de connaître son aptitude pour la consommation et pour l'irrigation et réaliser une cartographie de l'aquifère pour estimer sa vulnérabilité à la pollution. C'est une région semi-aride, avec une précipitation moyenne interannuelle est de 279.50 mm et une température de 15.61 °C.

L'étude hydrochimique a été réalisée sur les données des forages datée de 2018 (18 forages) et de 2019 (20 forages). Le traitement des données physico-chimiques des deux séries de prélèvement montre une faible variation des éléments majeurs, par contre l'élément indicateur de pollution (NO_2^- , NO_3^- , PO_4^{3-}) connaît une évolution de 2018 à 2019, l'ion de phosphate n'est présent dans la majorité des forages quand 2019. L'étude sur l'évaluation de la qualité des eaux souterraine est basée sur la comparaison des données physico-chimiques avec les normes de potabilité algériennes (JORA 2011) et celle de l'OMS 2017. Cette étude montre une conformité des analyses avec les normes de potabilité à l'exception des analyses des forages Hodhna (F4, F5) en 2018-2019 et Ozied 1, qui présentent des valeurs en phosphate dépassant les normes.

L'étude de la cartographie à la vulnérabilité est un moyen efficace à utiliser pour la protection à la pollution des zones à fort potentiel des ressources hydriques souterraines vis-à-vis de ses caractéristiques hydrogéologiques. En ce sens, dans ce présent travail nous avons appliqué la méthode GOD aux aquifères du bassin versant d'El Bayadh qui est une méthode de calcul de l'indice de vulnérabilité des aquifères. Notre zone d'étude présente en grande partie des formations à perméabilité de fissures et/ou mixte et la nappe se situe de moyenne à faible profondeur. La méthode GOD utilise le degré de confinement qui définit le type d'aquifère (facteur G), la lithologie (facteur O) et la profondeur de la nappe (facteur D). Ces facteurs sont considérés par GOD comme des facteurs atténuant la protection naturelle des aquifères fournis par les couches sus-jacentes. Pour se faire, à l'aide de l'outil du Système d'Information Géographique (SIG), la carte de vulnérabilité a été élaborée, désignant les différents degrés de vulnérabilité du bassin versant d'El

Bayadh. A la fin de calcul des cartes des facteurs GOD, nous avons obtenu 61.88% de la surface totale du bassin versant présente une vulnérabilité comprise entre faible et modérée alors que 38.12% présente une vulnérabilité allant de forte à très forte. Ces pourcentages montrent que les faibles et moyennes profondeurs de la nappe libre du bassin versant d'El Bayadh et sa lithologie peuvent inclure dans l'altération de la qualité des eaux de ce bassin versant.

Mots clés : Eau souterraines, Qualité des eaux, Normes de potabilité, Vulnérabilité, Méthode GOD, Bassin versant d'El Bayadh,

Abstract :

The objective of this study on the multilayer aquifer of the El Bayadh wadi watershed is to assess water quality in order to determine its suitability for consumption and irrigation and to map the aquifer to determine its vulnerability to pollution. It is a semi-arid region, with an annual rainfall of 279.50 mm and an average temperature of 15.61 °C.

The hydro-chemical study was carried out on borehole data dated 2018 (18 boreholes) and 2019 (20 boreholes). The treatment of the chemical data of the two series of sampling shows a small variation of the major elements, on the other hand the pollution indicator element (NO₂⁻, NO₃⁻, PO₄³⁻) knows an evolution from 2018 to 2019, the phosphate ion is present in the majority of the drillings when 2019. The study on the evaluation of groundwater quality is based on the comparison of physico-chemical data with the Algerian potability standards (JORA 2011) and that of WHO 2017, this study shows a conformity of the analyses with the potability standards except for Hodhna (F4, F5) in 2018 and 2019 and Ozied 1 which present phosphate values exceeding the standards.

The study of vulnerability mapping is an effective means to be used for the protection of areas with high potential of groundwater resources from pollution due to its hydrogeological characteristics. In this sense, in this work we have applied the GOD method to the aquifers of the El Bayadh watershed, which is a method of calculating vulnerability to aquifers whose saturated zone is inaccessible in the sense of pollutant penetration and the attenuation capacity of the layer overlying the saturated zone. Our study area where a large part of the aquifer is cracked and the water table is from medium to shallow depth. The GOD method uses the degree of containment which defines the type of aquifer (G factor), lithology (O factor) and depth of the aquifer (D factor). These factors are considered by GOD as mitigating factors for the natural protection of the aquifers provided by the overlying layers. To do so, using the Geographic Information System (GIS) tool, vulnerability maps were developed, indicating the different degrees of vulnerability of the El Bayadh watershed. At the end of the calculation of the GOD factor maps, we obtained 61.88% of the total surface area of the watershed presents a vulnerability ranging from low to moderate, while 38.12% presents a vulnerability ranging from high to very high. These percentages show that the low and medium depths of the free water table of the El Bayadh catchment area and its cracked structure may include in the alteration of the water quality of this catchment area.

Keywords: Groundwater, Water quality, Drinking water standards, Vulnerability, GOD method, El Bayadh watershed

Translated with www.DeepL.com/Translator (free version)

INTRODUCTION GENERALE.....	1
PARTIE I : GENERALITES	3
CHAPITRE 1 : SITUATION GEOGRAPHIQUE.....	3
I. Aspect climatique	7
I-1- Précipitation	7
I-1-Précipitations interannuelles	7
I-1-3. Précipitations saisonnière	9
I-2- Températures	10
I-2-1 Températures annuelles.....	10
I-2-2 Températures mensuelles	11
I-3- Synthèse climatique.....	12
I-3-1 Méthode graphique de Bagnouls et Gaussien	12
I-3-2 Méthodes des indices	14
I-3-3 Bilan hydrique	18
II- Aspect hydrologique	22
II -1 Caractéristiques géométriques et de forme	22
II -1-1 Indice de compacité de Gravelius	22
II -1-2 Rectangle équivalent	23
II -2 Etude du relief	25
II -3 Altitudes caractéristiques du bassin versant.....	27
II -3-1 Altitudes maximale et minimale	27
II -3-2 Altitude moyenne.....	27
II -3-3 Altitude médiane	28
II -4 Etude des pentes	28
II -4-1 Indice de pente globale I_g	28
II -4-2 Dénivelée spécifique (D_s).....	29
II -4-3 La pente moyenne des bassins versants	30
II-5 Etude du réseau hydrographique	32
II-5-1 Classification du réseau hydrographique	33
II-5-2- Rapport de confluence (R_c).....	34
II-5-3-Rapport des longueurs	35

II-5-4- Densité de drainage.....	36
II-5-5- Densité hydrographique.....	36
PARTIE I : GENERALITES	38
CHAPITRE 3 : ASPECT GEO-STRUCTURAL ET HYDROGEOLOGIQUE	38
I-Introduction	39
II-Contexte géologique :.....	39
II.1. Description lithostratigraphique :	39
III-Contexte structural :.....	44
PARTIE II :	53
ETUDE QUALITATIVE DES EAUX SOUTERRAINES DE LA REGION D'EL BAYADH ..	53
I- Introduction	54
II. Présentation des données :	56
II.1 Moyens et méthodologie	56
III Fiabilité des analyses physico-chimiques.....	57
IV- Caractérisation physico-chimiques.....	60
IV-1. Paramètres physico-chimiques	60
IV-1-2. Potentiel d'hydrogène pH.....	61
IV-1-3. Conductivité électrique C.E.....	62
IV-1-4. Minéralisation.....	62
IV-1-5. Dureté Totale	65
IV-2. Ions majeurs.....	66
IV-2-1. Calcium (Ca^{+2}).....	66
IV-2-2. Magnésium (Mg^{+2})	66
IV-2-3. Chlorure (Cl^-)	67
IV-2-4. Sulfates (SO_4^{-2}).....	68
IV-3. Ions indicateurs de pollution.....	69
IV-3-1. Ammonium (NH_4^+)	69
IV-3-2. Nitrates (NO_3^-)	70
IV-3-3. Nitrites (NO_2^-)	70
IV-3-4. Phosphates (PO_4^-)	71
V- Qualité des eaux souterraines de la région d'El Bayadh.....	72
V-1 Potabilité	72

V-2 Qualité des eaux d'irrigation selon les directives du FAO	75
V-2-2-Autres indicateurs de qualité	76
PARTIE III : CARTOGRAPHIE DE LA VULNERABILITE A LA POLLUTION DU BASSIN VERSANT DE L'OUED EL BAYADH	79
CHAPITRE 1 : METHODE ET OUTIL.....	79
II Ressources souterraines et risque de pollution :	80
III-SIG et vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution.....	81
III-1-Système d'information géographique (SIG) :	81
III-2. Vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution	82
IV-2. Moyens et outils :	95
PARTIE III : CARTOGRAPHIE DE LA VULNERABILITE A LA POLLUTION DU BASSIN VERSANT DE L'OUED EL BAYADH	97
CHAPITRE 2 : RESULTATS ET DISCUSSIONS	97
I-Facteur G :	99
II-Facteur O :	99
III-Facteur D :	100
IV-Carte de vulnérabilité GOD:	101
CONCLUSION GENERALE	103
Bibliographie.....	106
Annexes.....	110

Listes des figures

Figure 1: Situation géographique de la wilaya d'El Bayadh.....	5
Figure 2: Variations des moyennes annuelles des précipitations de la station d'El Bayadh (1988/2018).....	8
Figure 3: Variations des précipitations moyennes mensuelles interannuelles d'El Bayadh (1988/2018).....	9
Figure 4 : Variation de la température annuelle de la station d'El Bayadh	11
Figure 5 : Variations des Températures mensuelles minimales, maximales et moyennes (1988/2018).....	12
Figure 6: La station d'El Bayadh sur l'Abaque de l'indice d'aridité annuelle de Martonne.	15
Figure 7 : Station d'El Bayadh sur l'abaque de Wundt	21
Figure 8 : Exemple de forme de bassin versant (Andre Musy et al, 2003).....	23
Figure 9 : Rectangle équivalent du bassin versant d'El Bayadh.....	24
Figure 10 : Courbe hypsométrique et histogrammes des fréquences altimétriques du bassin d'El Bayadh.....	26
Figure 11: Carte hypsométrique du bassin versant d'El Bayadh	27
Figure 12: Carte des pentes du bassin versant d'El Bayadh	31
Figure 13 : Réseau hydrographique du bassin versant d'El Bayadh	32
Figure 14 : Ordre des cours d'eau selon la classification de Strahler et Schum (Bassin d'ordre 4) (Morell M et al, 1999).....	33
Figure 15: Classification du réseau hydrographique du bassin versant d'El Bayadh selon Strahler	34
Figure 16 : Log stratigraphique de la région d'El Bayadh	43
Figure 17 : Carte géologique de la région d'El Bayadh (Cornet, 1952).	44
Figure 18 : Coupe transversale de haute plaine au niveau de la région d'El Bayadh (Cornet, 1952).	46
Figure 19 : Carte Géo-structurale de la région d'El Bayadh (Cornet, 1952)	47
Figure 201 : Carte structurale de la région d'El Bayadh (ANRH, 2008).....	48
Figure 212 : log hydrogéologique de la région d'El Bayadh	50
Figure 22 : CE = f (Σ anions) et validation des données 2018.....	58
Figure 23 : CE = f (Σ anions) et validation des données 2019.....	59
Figure 24: Variation spatio-temporelle de la température	61
Figure 25: Variation spatio-temporelle du pH	61
Figure 26 : Variation spatio- temporelle de la conductivité.....	62
Figure 27: Variation spatio- temporelle de la minéralisation.....	64
Figure 28: Variation spatio- temporelle de la dureté TH	65
Figure 29: Variation spatio- temporelle de l'ion calcium	66
Figure 30: Variation spatio- temporelle de l'ion magnésium	67
Figure 31 : Variation spatio-temporelle de l'ion chlorure	68
Figure 32: Variation spatio- temporelle de l'ion sulfate	68
Figure 33: Variation spatio- temporelle de l'ammonium	69

Figure 34: Variation spatio- temporelle des nitrates	70
Figure 35: Variation spatio-temporelle du nitrite.....	71
Figure 36: Variation spatio- temporelle du phosphate	72
Figure 37 : Modèle «origine – écoulements – cible» (Cazau, 2007).	83
Figure 38 : Différentes sources de pollution d'eau souterraine (Datry, 2003).....	83
Figure 39 : Système empirique GOD pour une estimation rapide de vulnérabilité d'un aquifère d'après Foster (1987)	87
Figure 40 : Couche G : type de l'aquifère.....	99
Figure 41 : Couche O : lithologie.....	100
Figure 42 : Couche D : de profondeur de la nappe	101
Figure 43 : Carte de vulnérabilité du bassin versant d'El Bayadh.	102

Liste des tableaux

Tableau 1: caractéristique de la station d'El Bayadh	7
Tableau 2 : Précipitations moyennes mensuelles de la période 1988/2018	9
Tableau 3: Variations des températures mensuelles minimales maximales, de la période 1988/2018	12
Tableau 4: Valeurs des I et le type de climat Interprétation.....	15
Tableau 5: valeurs des indices d'aridité de De Martonne « i ».....	16
Tableau 6: les différentes valeurs de l'Indice mensuel de Moral et le type de climat	18
Tableau 7: Valeur d'ETP mensuelle	20
Tableau 8: du Bilan hydrique de la station d'El Bayadh.....	22
Tableau 9: Caractéristique de forme du Bassin Versant d'El Bayadh	24
Tableau 10: Répartition hypsométrique du bassin versant d'El Bayadh.....	25
Tableau 11: Donnée pour le calcul de l'altitude moyenne du bassin versant	28
Tableau 12 : Classification du relief selon I_g par l'ORSTOM. (Bouanani, 2004)	29
Tableau 13 : Classification du relief selon D_s par l'ORSTOM (Bouanani, 2004).....	30
Tableau 14 : Indices de pentes et reliefs du bassin versant	31
Tableau 15: Principaux paramètres du bassin versant d'El Bayadh	31
Tableau 16 : Classification du chevelu hydrographique selon le système de Strahler, bassin versant d'El Bayadh.....	35
Tableau 17 : Rapport des longueurs du bassin versant d'El Bayadh	35
Tableau 18: Classification des données physico-chimiques de la région d'El Bayadh	60
Tableau 19: Classification des eaux selon la conductivité (Rodier.2009)	62
Tableau 20: Détermination de la minéralisation à partir de la conductivité (Rodier J.2009)	63
Tableau 21 : Détermination de la minéralisation à partir de la conductivité de la commune d'El Bayadh (2018).....	63
Tableau 22: Détermination de la minéralisation à partir de la conductivité de la commune d'El Bayadh (2019).....	64
Tableau 23: Classification des eaux selon leur dureté totale en F° (OMS, 1994).....	65
Tableau 24: Classification des eaux selon les normes algérienne et de l'OM.....	74
Tableau 25 : Conductivité aptitude de l'eau à l'irrigation (d'après US SALINITY LABORATORY, 1955).....	75
Tableau 26: Qualité de l'eau en fonction de la conductivité électrique. (Touhari, 2015).....	76
Tableau 27: Classification des eaux d'irrigation de la région d'étude selon directives du FAO (Ayers et Westcot 1985, FAO).....	77
Tableau 28: Critères de vulnérabilité (Zewahlen ,2004).....	85
Tableau 29 : Indices de vulnérabilité utilisé par la méthode GOD (Murat, 2000).....	86
Tableau 30: Systèmes de pondération "Normal" et "Pesticides" de la méthode DRASTIC (Dörfliger, et al, 2004).....	88
Tableau 31 : Critères d'évaluation des de la vulnérabilité dans la méthode DRASTIC selon Engel et al. (1996) (in Daboussi, 2009).....	89

Tableau 32 : Poids attribués aux paramètres SINTACS dans les différents scénarios de la méthode (Civita, 1994 in Hamza in Daboussi, 2009)	90
Tableau 33 : Critères d'évaluation de la vulnérabilité dans la méthode SINTACS (Civita, 1994, in Hamza, 2007 in Daboussi, 2009)	90
Tableau 34 : Relation entre Indice de Vulnérabilité de l'Aquifère (AVI) et résistance Hydraulique (Murat, 2000).	91
Tableau 35 : Légende de la carte de vulnérabilité de la méthode PI (COST620 in Dörfliger et al, 2004).....	92
Tableau 36 : Couverture protectrice liée à la vulnérabilité et classe de temps de transit estimatif (COST 620, in Dörfliger et al, 2004).	93
Tableau 37 : Récapitulatif des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité.....	94
Tableau 38 : Valeurs attribuées aux facteurs de la méthode GOD et les variables du bassin d'El Bayadh.....	98
Tableau 39 : Répartitions des degrés de vulnérabilité dans le bassin versant d'El Bayadh.....	102

INTRODUCTION GENERALE

L'eau bleue semble l'élément le plus abondant de la surface du globe, ces 97% forment les océans (les glaciers et les eaux emprisonnées dans la calotte polaire), le reste 3% tel que les fleuves, les lacs et les eaux souterraines constituent les eaux douces dont toute vie en dépend. Cette ressource est plus essentielle à la vie, elle est la vie. Elle contribue aux activités humaines telles que les travaux domestiques, l'agriculture, l'industrie et les écosystèmes. Mis à part les eaux de la calotte polaire, les eaux souterraines représentent le réservoir le plus important d'eau douce de la planète, constituant plus de 97 % des ressources mondiales d'eau douce disponible (Quevauviller, 2010).

Aujourd'hui, dans le sens de mobilité hydrique, les eaux souterraines représentent la ressource la plus importante à exploiter. L'eau souterraine joue un rôle très important au développement socio-économique et est indispensable à l'alimentation en eau potable de la population mondiale.

En Algérie l'irrigation occupe une place importante dans la consommation d'eau (62 % de la demande totale du pays). La demande en eau potable, représente quant à elle 35 % de la demande totale. Le secteur industriel ne s'élève qu'à 3 %.

La région d'El Bayadh présente des ressources en eau souterraine moyennes correspondant à 42,72 hm³/an localisées en grande majorité dans la chaîne de l'Atlas Saharien. Par contre il y a très peu de ressources de surface, soit 14,37 hm³/an (ANAT, 2003).

La région d'El Bayadh par sa variabilité climatique est caractérisée d'une zone semi-aride. La ressource en eau de cette zone est soumise à des répercussions directes par les activités anthropiques et naturelles, ces phénomènes sont les conditions de la qualité des eaux souterraines et son risque d'être vulnérable.

Notre présent travail consiste entre autre, une synthèse hydrogéologique de l'aquifère multicouche du bassin versant de l'oued El Bayadh, par une étude hydrochimique afin d'identifier la qualité des eaux et son aptitude à l'irrigation de la région d'El Bayadh et l'élaboration de la carte de vulnérabilité des aquifères du bassin versant d'El Bayadh, en utilisant les données des forages et les mesures piézométriques pour une cartographie de l'aquifère pour évaluer sa vulnérabilité.

Il existe plusieurs méthodes pour l'évaluation de vulnérabilité des eaux souterraines qui vont de plus complexes au plus simples, de plus coûteux au moins coûteux. A notre niveau, nous avons choisi la méthode GOD.

Pour répondre à cette problématique, le travail a été subdivisé en trois parties comme suite :

- ❖ La première partie est consacrée à une présentation générale de la zone d'étude. Cette partie comporte :
 - Dans un premier chapitre de la présentation géographique de la région d'El Bayadh
 - Le second chapitre étudie l'aspect climatique et hydrologique
 - Et le chapitre trois décrit la géologie et l'hydrogéologie du bassin versant d'El Bayadh.
- ❖ La deuxième partie est composée de l'étude de qualité des eaux souterraines de la région d'El Bayadh, elle est constituée :
 - En premier lieu d'un aperçu de la méthodologie
 - Le second lieu est destiné à la présentation des résultats et des données
 - Le troisième lieu pour l'interprétation des différents résultats
- ❖ Et la troisième partie qui est constituée de deux chapitres :
 - Un premier chapitre de la méthodologie et outils
 - Et pour les résultats et discussions.

PARTIE I : GENERALITES
CHAPITRE 1 : SITUATION GEOGRAPHIQUE

La wilaya d'El Bayadh est située dans le Sud-Ouest Algérien à 600 Km d'Alger et est comprise entre les parallèles 30° 42' et 34° 28' de l'altitude Nord et entre les méridiens de longitude 0° 24' à l'Ouest fuseau 30 et 2° 16' à l'Est fuseau 31. Elle est d'une superficie de 71 697 Km², soit 3 % du territoire national et se situe dans l'Atlas Sud Oranais (Bousseemghoun, 2010). Sur le plan administratif, la wilaya d'El Bayadh est limitée :

Au Nord, par les wilayas de Saïda et de Tiaret

À l'Est, par les wilayas de Laghouat et de Ghardaïa

Au Sud-est, par la wilaya d'Adrar

Au Sud-Ouest, par la wilaya de Béchar

À l'Ouest, par la wilaya de Naâma

Au Nord-Ouest, par la wilaya de Sidi Bel Abbés.

Notre zone d'étude fait partie de l'Atlas saharien central (Djebel Amour), entre les hautes plaines et la plate-forme saharienne. Il s'agit d'une dépression orientée NE-SO et limitée au Nord-Ouest par les Djebel El-Beiod, Djebel Mekter et Djebel Zouiret ne dépassent pas les 1400m d'altitude. Au Sud-Est par Djebel Boudergua (1873m), Djebel Oustani (1878 m) et Djebel Ksel (2008m). La ville d'El Bayadh fait sensiblement face à la gorge de l'oued El Bayadh qui entaille profondément la cuvette.

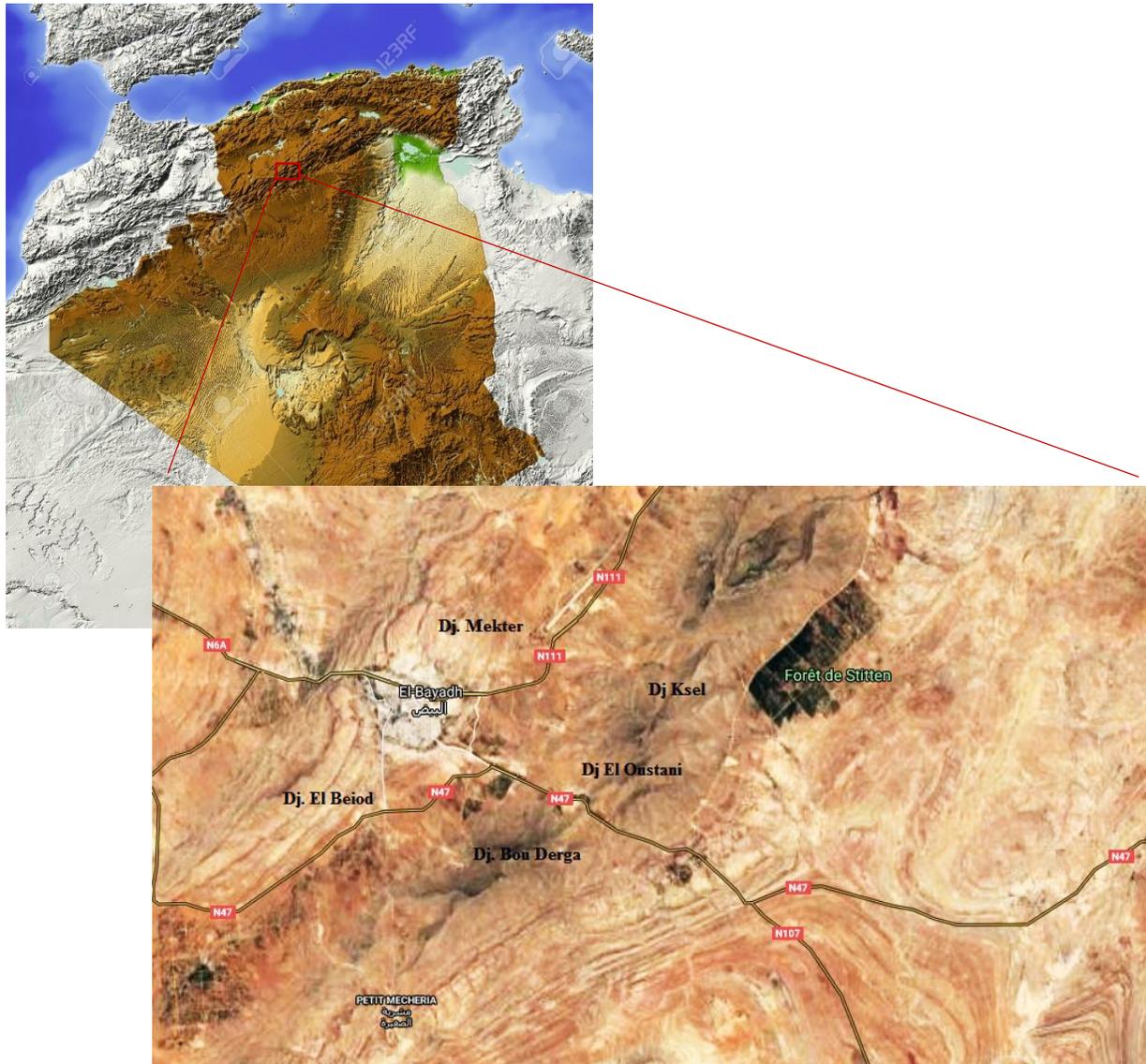


Figure 1: Situation géographique de la wilaya d'El Bayadh

PARTIE I : GENERALITES

CHAPITRE 2 : ASPECT CLIMATIQUE ET HYDROLOGIQUE

I. Aspect climatique

Le climat désigne l'ensemble des paramètres météorologique (précipitation, température, humidité de l'air, vitesses des vents, ensoleillement) régnant dans une région géographique donnée pendant une période donnée. En un sens plus restreint, c'est le temps moyen qu'il fait.

Nous étudions le climat afin de définir le type de climat régnant dans la région. Les données climatiques nous permettront également d'interpréter le comportement hydrologique et hydrogéologique durant la période d'étude.

Dans le but de définir le type de climat qui régné dans notre zone d'étude, nous avons utilisés des données météorologiques (Précipitation, Température) sur une chronique de 30 ans (période classique définis par l'OMM, l'organisation météorologique mondiale) allant de 1988 à 2018. Elles ont été enregistrés au niveau de la station météorologique d'El Bayadh (Tableau 1), ces données ont été prises du site : www.tutiempo.net et complétée par les données du site : www.infoclimat.fr

Tableau 1: caractéristique de la station d'El Bayadh

Station	Coordonnées UTM (m)		Altitude (m)	Période D'observation
	X	Y		
El Bayadh	684 463.21	3 776 617.94	1347	1988/2018

I-1- Précipitation

Les précipitations constituent la principale source d'alimentation de notre bassin versant, c'est l'un des paramètres hydrologiques les plus importants. Elles représentent l'un des facteurs primordiaux qui détermine le type de climat. Elles sont constituées par la pluie, la neige, les grêles qui tombent sur la surface de la terre.

Les données des précipitations durant 30 ans qui ont été récolter nous ont permis d'effectuer une étude de l'évaluation pluviométrique, en faisant une variabilité des données des précipitations annuelles, mensuelles.

I-1-Précipitations interannuelles

La variation des précipitations moyennes interannuelles sur la chronique de 30 ans sont représentées dans la figure 2.

L'analyse de l'histogramme montre :

- Une variation de la pluviométrie au cours des 30 années, assez constante durant trois ans (1988-1990) avec une pluviométrie ne dépassant pas les 200 mm
- La pluviosité moyenne annuelle est faible avec une moyenne interannuelle égale à 309,69 mm.
- Les années 1999 et 2001 présentent des valeurs inférieures à 100 mm, celle de 1999 est la plus sèche avec une pluviométrie annuelle de 59.91 mm
- L'année la plus pluvieuse reste celle de 2011 avec une valeur de 546.57 mm

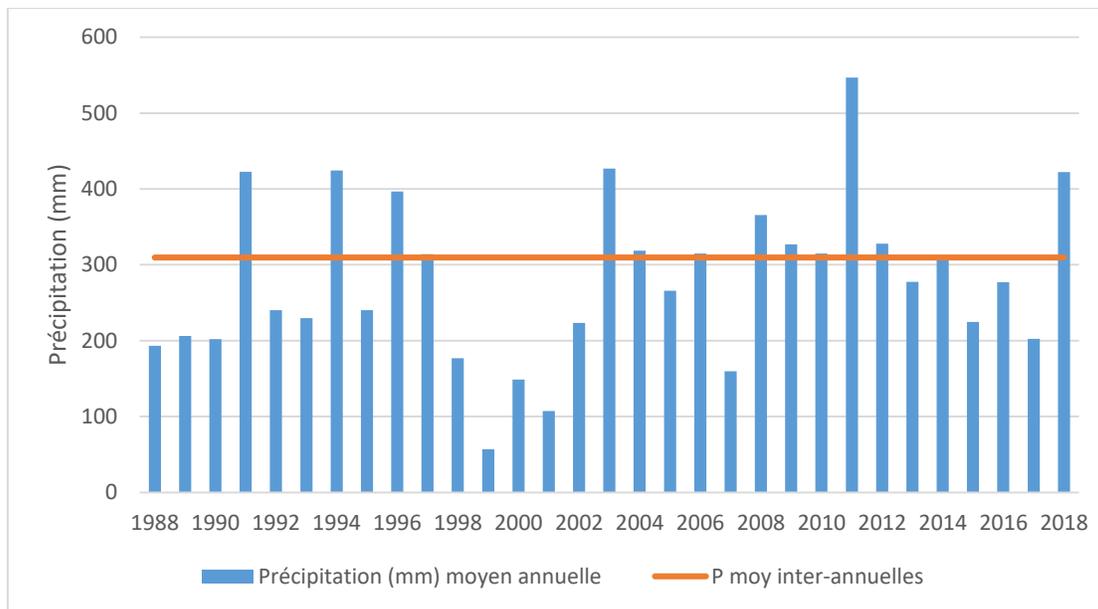


Figure 2: Variations des moyennes annuelles des précipitations de la station d'El Bayadh (1988/2018)

I-1-2. Précipitations Mensuelles

Les variations moyennes des précipitations durant les 30 années sont représentées dans le tableau 2 et la figure 3 ci-dessous.

La représentation des données moyennes mensuelles sur la figure 3 montre une pluviométrie maximale enregistrée au mois d'octobre avec une valeur de 39.21mm, et une minimale de 12.77mm enregistrée au mois de juillet. Les périodes avec une pluviométrie minimale (Juin, Juillet, Aout) ne dépassent pas les 17 mm.

Tableau 2 : Précipitations moyennes mensuelles de la période 1988/2018

Mois	jan	fév.	Mars	Avr	Mai	Juin	Juill	Aout	Sept	Oct	Nov	Déc
P (mm)	24,05	16,81	30,24	27,20	22,35	16,11	12,77	15,53	25,34	39,21	27,81	22,03

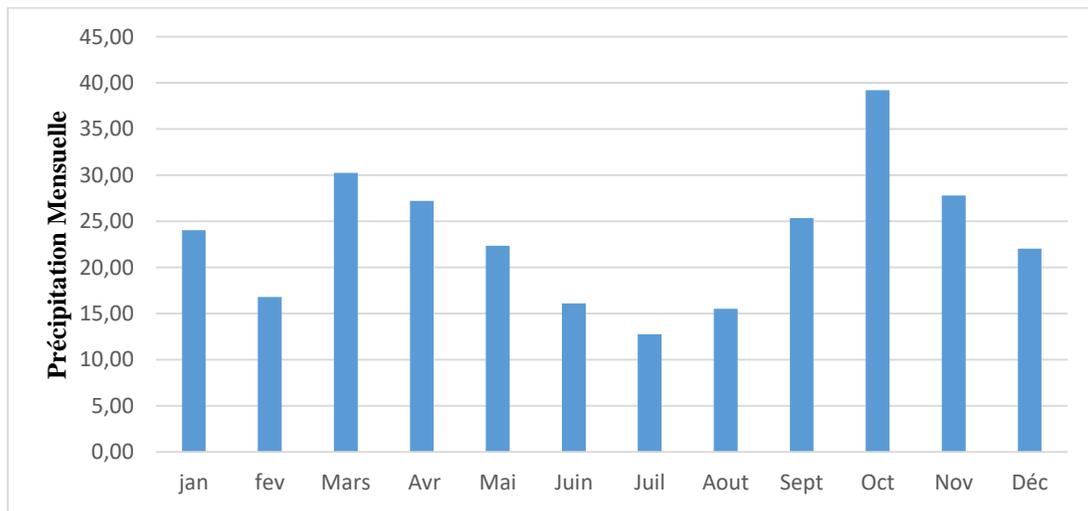


Figure 3: Variations des précipitations moyennes mensuelles interannuelles d'El Bayadh (1988/2018)

I-1-3. Précipitations saisonnière

L'histogramme des variations des précipitations saisonnières (figure 4) de la période d'étude indique que l'automne constitue la saison la plus pluvieuse ($P= 92,36$ mm), ainsi que le printemps et l'hivers avec des valeurs moyennes respectives de 79,80 et 62,80 mm, avec un été chaud présentant une valeur moyenne de 44,41.

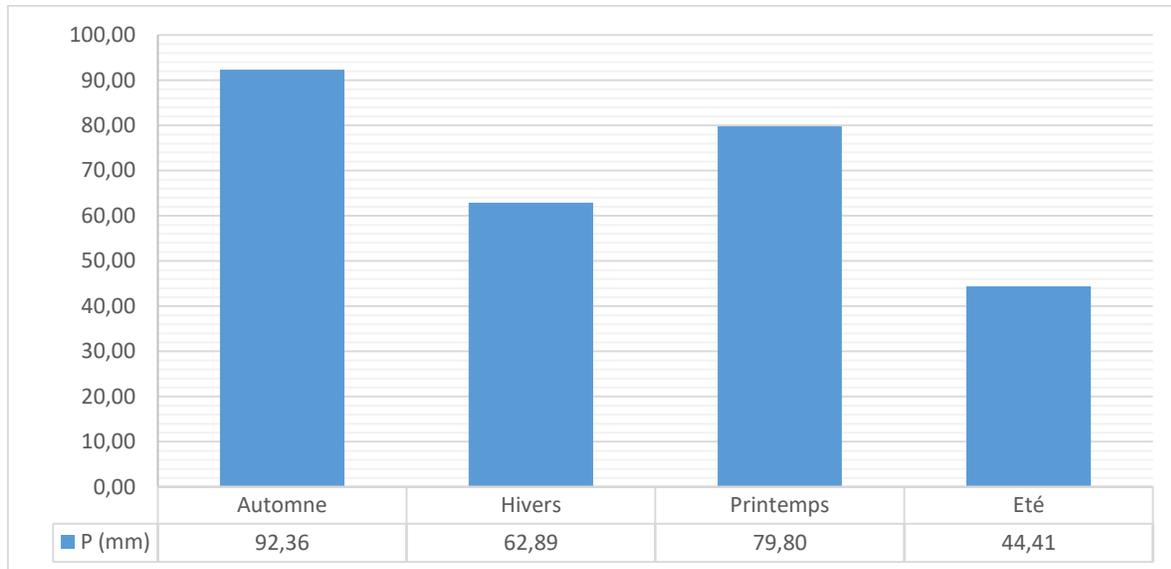


Figure 4: Variations des précipitations saisonnières

I-2- Températures

C'est l'un des facteurs les plus importants en hydrologie, la température joue un rôle très important dans le cycle de l'eau et la détermination du climat d'une région, influe sur l'évapotranspiration et dans le bilan hydrique. C'est une grandeur physique mesurable à l'aide d'un thermomètre.

I-2-1 Températures annuelles

Les variations moyennes annuelles de la température sont représentées dans la figure 4. Durant la période des 30 années, la température moyenne annuelle ne montre pas une grande variation des données, elle affiche une valeur minimale de 13.59 °C en 1992 avec son maximale en 2001 qui est à 17.96 °C et présente une température moyenne interannuelle de 15.61 °C.

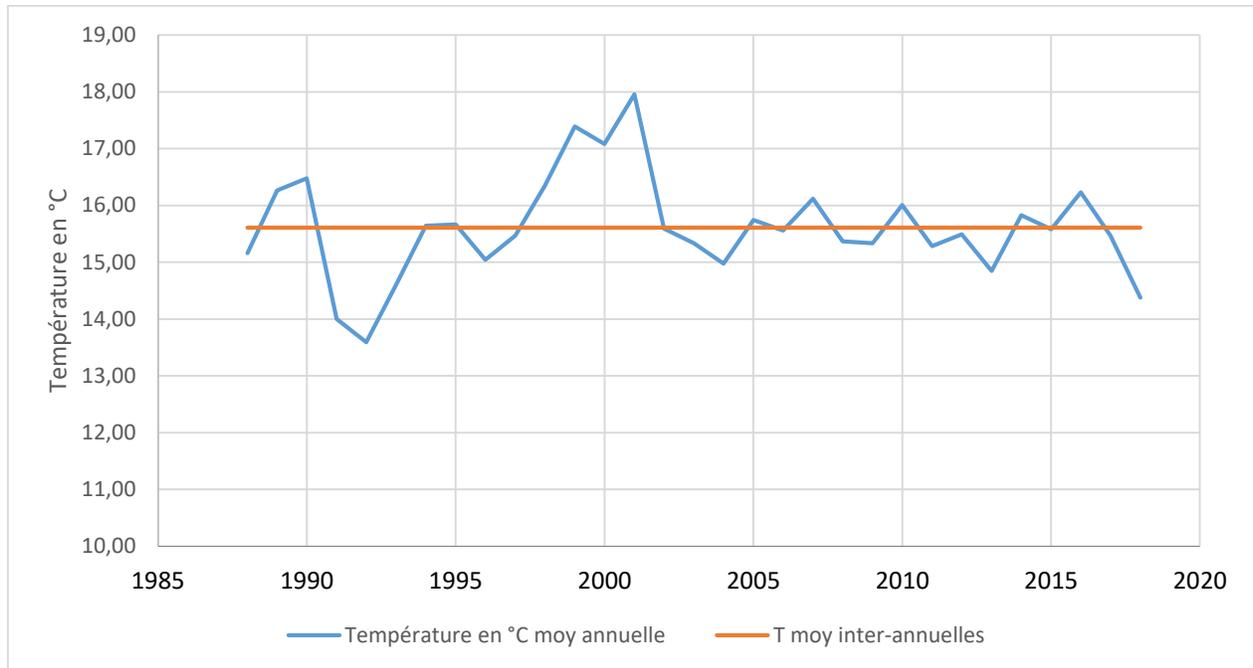


Figure 5 : Variation de la température annuelle de la station d'El Bayadh

I-2-2 Températures mensuelles

La figure 5 et le tableau 3 représentent les températures mensuelles (valeurs moyennes, valeurs minimales et maximales).

L'analyse des données des températures mensuelles indique :

- Un minimale compris entre 2 °C enregistrés en février et 24.2°C en juillet
- Un maxima compris entre le mois de janvier avec 7.9°C et 30.7 °C en juillet
- Les températures moyennes varient eux en janvier (5°C) et atteint un pic en mois de juillet avec 27.47°C

Les températures mensuelles présentent des variations considérables avec un écart de température important, elle est élevée en juillet et Aout et faible en janvier.

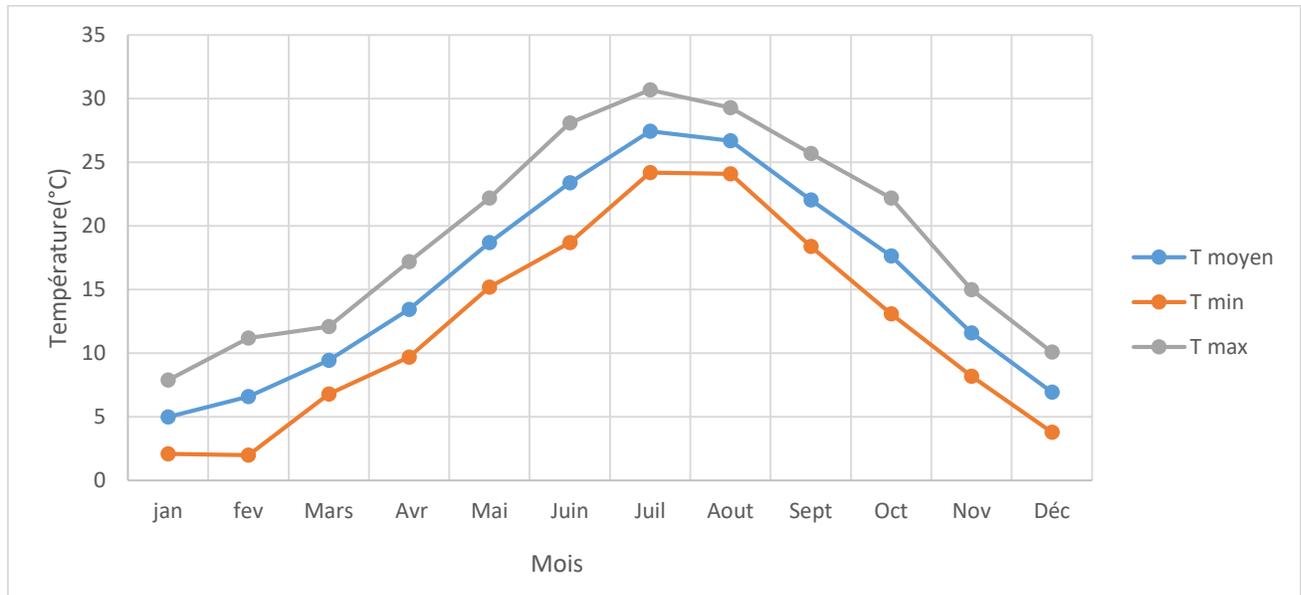


Figure 6 : Variations des Températures mensuelles minimales, maximales et moyennes (1988/2018)

Tableau 3: Variations des températures mensuelles minimales maximales, de la période 1988/2018

Mois	jan	fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Oct	Nov	Déc
T min (°C)	2,1	2	6,8	9,7	15,2	18,7	24,2	24,1	18,4	13,1	8,2	3,8
T max (°C)	7,9	11,2	12,1	17,2	22,2	28,1	30,7	29,3	25,7	22,2	15	10,1
T Moyenne (°C)	5	6,6	9,45	13,45	18,7	23,4	27,45	26,7	22,05	17,65	11,6	6,95

I-3- Synthèse climatique

La synthèse climatique permet de déduire le type de climat qui règne dans notre zone et également de connaître les périodes sèches et humides, en utilisant plusieurs méthodes graphique (Ombrothermique) et empirique (indice de Martonne, de Moral).

I-3-1 Méthode graphique de Bagnouls et Gaussen

Le diagramme Ombrothermique permet de représenter les variations mensuelles des précipitations et des températures, elle met en relation les précipitations et les températures : avec $P=2T$. Ce

diagramme a été mis au point par H. Gaussen et F. Bagnouls afin de déterminer les périodes sèches et humides, son interprétation est la suivante :

- Lorsque la courbe des précipitations se trouve au-dessus de celle des températures alors la période correspondante est humide.
- C'est une période de sécheresse lorsque la courbe des températures passe au-dessus de celle des précipitations.

D'après la courbe Ombrothermique établit à partir des données pluviométriques et thermiques sur une période de 30 ans (1988 à 2018), la station d'El Bayadh est caractérisée par une période sèche qui s'étend sur cinq mois (figure 6). La période sèche débute en mi-avril jusqu'en mi-octobre, durant cette saison les précipitations sont inférieure à 40 mm et la température moyenne varie de 4.94°C à 28.43°C pour un maximal de 28.43 °C en mois de juillet. La période humide correspond aux mois restants, durant cette période la température maximale observé est de 16.47 °C avec une précipitation de 39.21 au même mois d'octobre, avec une température minimale de 4.94°C enregistré en janvier. D'après l'analyse du diagramme, on remarque également que la période sèche coïncide avec la saison chaude et que la période froide correspond à la période humide ; la période sèche s'étale sur une courte saison dans l'année.

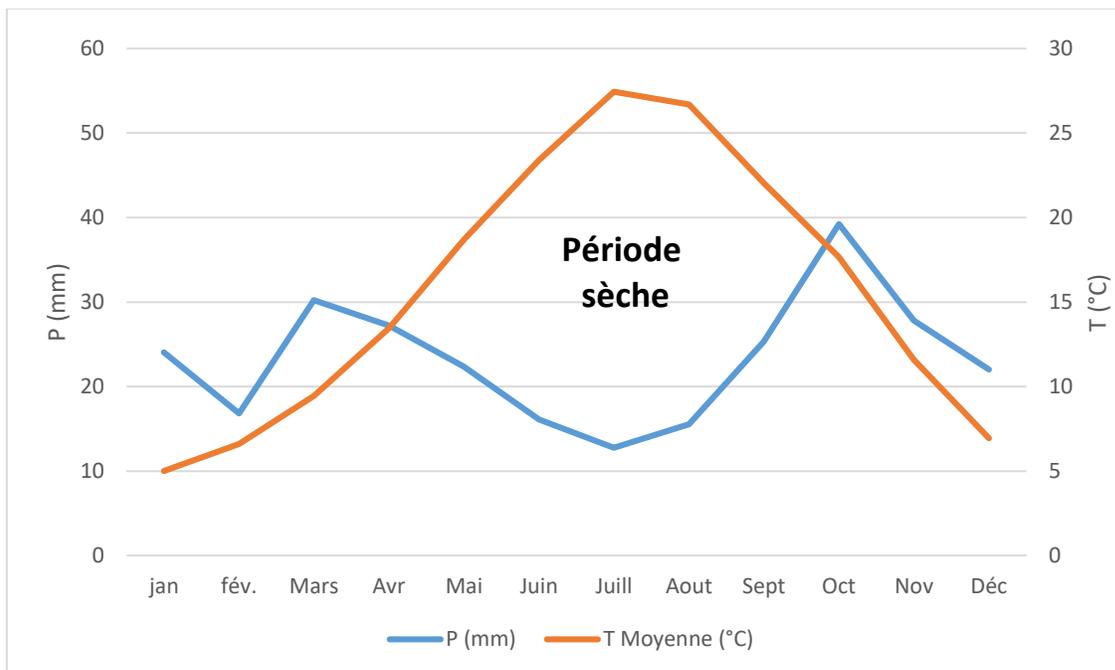


Figure 6 : Diagramme de Bagnouls et Gaussen de la station d'El Bayadh (1988/2018)

I-3-2 Méthodes des indices

Les indices d'aridité représentent des indicateurs quantitatifs du degré du manque d'eau à un endroit donné. Elles servent à caractériser le climat, parmi les indices, nous allons utiliser :

1. Indice d'aridité annuel de Martonne

Ce dernier est fonction des précipitations et des températures. L'indice d'aridité de Martonne, permet de déduire le degré d'aridité d'une région et noté I, il se calcule par la relation suivante :

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

Avec

P : précipitation moyennes annuelle (mm) = 279,50

T : température annuelle (°C) = 15,61

I : indice d'aridité annuel de Martonne = 10,91

Les données de précipitation et de température annuelle calculées et utilisées au niveau de la station d'El Bayadh pour déterminer l'indice d'aridité de Martonne sont reportées sur l'abaque de Martonne (figure 7) et indique un climat semi-aride à écoulement temporaire.

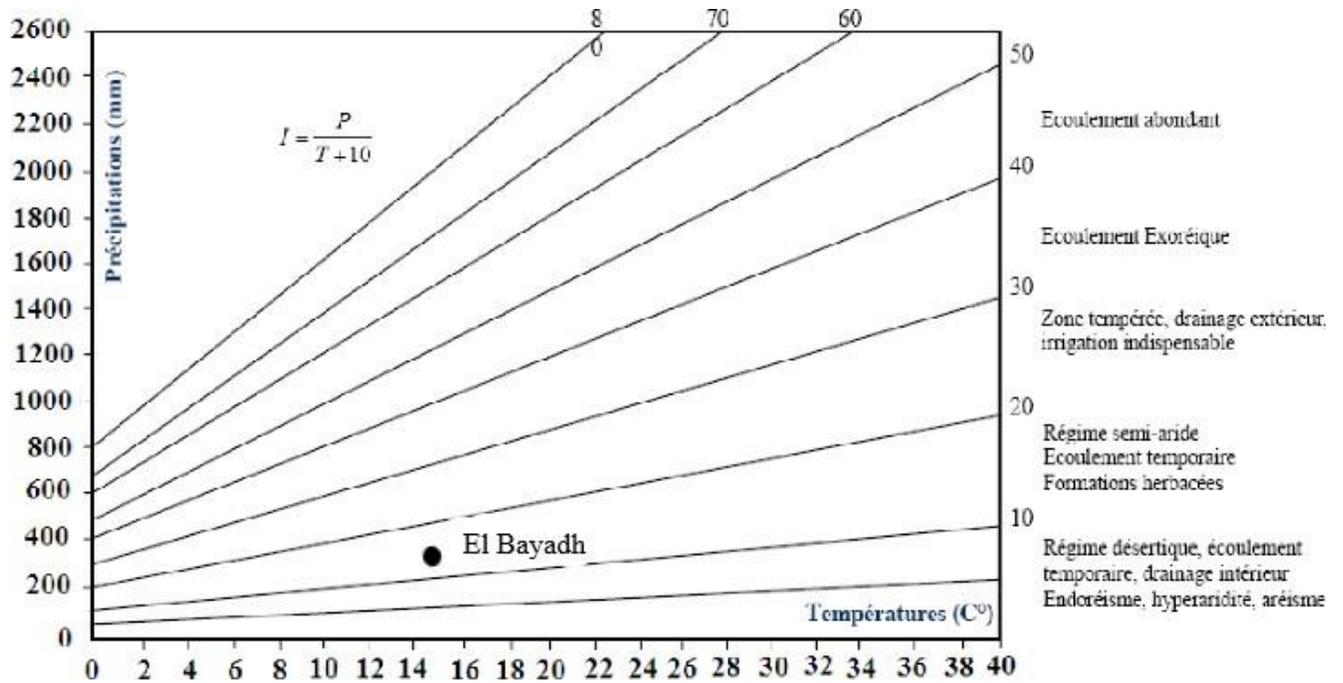


Figure 7: La station d'El Bayadh sur l'Abaque de l'indice d'aridité annuelle de Martonne.

2. Indice d'aridité mensuel de De Martonne

Cet indice est déterminé par la relation entre les précipitations totales mensuelles et les températures mensuelles, la formule est la suivante et l'interprétation dépend de la valeur de i (tableau 4) :

$$i = \frac{12p}{t+10}$$

Tableau 4: Valeurs des I et le type de climat Interprétation

Valeur de I	Type de climat
0 à 5	Hyper-arides (HA)
5 à 10	Aride, Désertique (D)
10 à 20	Semi- aride (SA)
20 à 30	Semi-humide ou Tempéré (T)
30 à 40	Humide (H)

Les résultats des différents indices d'aridité mensuelles « i » de De Martonne sont représentées dans le tableau suivant :

Tableau 5: valeurs des indices d'aridité de De Martonne « i »

Mois	jan	fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Oct	Nov	Déc
P (mm)	24,05	16,81	30,24	27,20	22,35	16,11	12,77	15,53	25,34	39,21	27,81	22,03
T (°C)	4,94	6,53	10,08	13,32	18,34	23,95	28,43	27,25	22,07	16,47	9,81	5,90
i	19,31	12,20	18,07	14,00	9,47	5,69	3,99	5,00	9,48	17,77	16,84	16,63
Type de Climat	SA	SA	SA	SA	D	D	HA	HA	D	SA	SA	SA

D'après les résultats :

- Les mois de mai, juin et septembre sont du type désertique présentant un indice compris entre 5 et 10 ;
- Les mois de juillet et août sont hyper-arides.
- Le reste des mois présentent un indice compris entre 10 et 20 : ce sont des mois semi-arides ;

3. Indice de Moral

Il est obtenu par la relation suivante :

$$IM = \frac{P}{T^2 - 10T + 200}$$

Avec :

P : précipitations moyennes annuelles (mm) = 279,50

T : températures moyennes annuelles (°C) = 15,61

IM : indice de Moral indique le type de climat d'une région, ainsi

Si **IM est < 1** nous avons un climat sec ; lorsque **IM est >1** nous avons un climat humide

Pour notre station **IM= 0,97**. Il est inférieur à **1** donc la région est caractérisée par un climat Sec.

4. Indice mensuel de Moral

Cet indice est obtenu par la relation entre les précipitations et les températures mensuelles :

$$Im = \frac{P}{0.1t^2 - t + 20}$$

Où P : précipitation moyenne mensuelle (mm)

t : température moyenne mensuelle (°C)

Les différentes valeurs de l'indice de Moral sont représentées dans le tableau 6 :

L'interprétation de l'indice se fait selon les conditions suivantes :

- Mois Aride (A) : lorsque $0.05 t^2 - t + 10 > P$
- Mois Sec (S) : lorsque $0,1t^2 - t + 20 > P > 0.05t^2 - t + 10$
- Mois Humide (H) : lorsque $0,1t^2 - t + 30 > P > 0,1t^2 - t + 20$
- Mois Pluvieuse (P) : lorsque $P > 0,1 t^2 - t + 30$

Les résultats des différents indices mensuels de Moral dans le tableau 6 montre que :

- Les mois de juin et juillet sont les plus Arides
- La région est humide en octobre, novembre, décembre, janvier et avril
- le climat est pluvieux uniquement en mois de mars
- Et il est sec en mois de février, mai, juin et septembre.

Tableau 6: les différentes valeurs de l'Indice mensuel de Moral et le type de climat

Mois	jan	fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Oct	Nov	Déc
P (mm)	24,05	16,81	30,24	27,20	22,35	16,11	12,77	15,53	25,34	39,21	27,81	22,03
T (°C)	4,94	6,53	10,08	13,32	18,34	23,95	28,43	27,25	22,07	16,47	9,81	5,90
im	1,37	0,95	1,51	1,11	0,63	0,30	0,18	0,23	0,54	1,28	1,40	1,25
(0,1t²-t+30)	27,50	27,73	30,08	34,43	45,28	63,40	82,38	77,01	56,64	40,67	29,82	27,58
(0,1t²-t+20)	17,50	17,73	20,08	24,43	35,28	53,40	72,38	67,01	46,64	30,67	19,82	17,58
(0,05t²-t+10)	6,28	5,60	5,00	5,55	8,47	14,73	21,98	19,88	12,29	7,10	5,00	5,84
Type	H	S	P	H	S	S	A	A	S	H	H	H

I-3-3 Bilan hydrique

Le bilan hydrique ou bilan hydrologique permet une bonne description de l'année hydrologique, c'est le suivi de l'ensemble des sorties et des entrées d'un bassin versant donnée.

Il est important d'établir le bilan hydrologique d'un système pour obtenir des informations sur la relation entre la quantité d'eau précipitée, l'évapotranspiration, le déficit dans le sol et le débit observé au niveau de l'exutoire. La méthode de Thornthwaite permet d'établir un bilan hydrologique mensuel et donne pour chaque mois : L'évapotranspiration réelle (ETR), la variation de la réserve, la réserve utilisable (RFU), le déficit agricole (Da), l'excédent (le ruissellement à l'échelle du bassin versant) (EX).

Nous avons estimé le bilan hydrologique pour la période de 1988-2018.

1. Evapotranspiration potentielle (ETP)

L'évaporation correspond au changement d'état, c'est le passage de l'état liquide à l'état gazeux il s'agit de l'évaporation physique. L'évapotranspiration ou l'évaporation totale regroupe les processus d'évaporation et de transpiration de la végétation, c'est l'une des étapes importantes du cycle de l'eau. Cependant l'évapotranspiration potentielle ou de référence est défini comme étant la quantité maximale d'eau susceptible d'être évaporée par une surface d'eau libre ou un couvert végétale pour lequel l'eau n'est pas un facteur limitant.

Selon Thornthwaite (1954), sa formule ne permet qu'une approche mensuelle de l'ETP, dépendant des températures mensuelles. La marche à suivre est la suivante : à partir des températures moyennes mensuelles, on calcule les indices thermiques mensuelle, la somme des 12 indices thermique permet de connaître I (indice thermique annuel).

Ainsi :

$$ETP = 16 \left(\frac{10t}{I} \right)^a$$

$$a = \left(\frac{1.6I}{100} \right) + 0.5$$

$$I = \sum i$$

$$i = \left(\frac{t}{5} \right)^{1.514}$$

Avec :

ETP : évapotranspiration potentielle non corrigé en mm ;

T : température moyenne mensuelle ;

I : indice thermique annuel, somme des 12 indices mensuels ;

K : coefficient d'ajustement mensuel est donné par une table dépend de la latitude

Les résultats de l'évapotranspiration potentielle ETP établit sur les 12 mois de l'année sont reportés dans le tableau 7, sachant que la station se trouve à la latitude 33N.

Tableau 7: Valeur d'ETP mensuelle

Mois	Jan	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Dec	Année
T en °C	4,94	6,53	10,08	13,32	18,34	23,95	28,43	27,25	22,07	16,47	9,81	5,90	16,60
i	0,98	1,50	2,89	4,41	7,15	10,71	13,89	13,03	9,47	6,08	2,78	1,28	54,57
ETP non corrigé (mm)	13,96	20,47	37,18	54,50	84,50	121,93	154,28	145,60	109,00	72,95	35,82	17,81	632,43
K	0,88	0,86	1,03	1,09	1,19	1,20	1,22	1,15	1,03	0,97	0,88	0,86	/
ETP Corrigé (mm)	12,29	17,61	38,29	59,41	100,55	146,31	188,22	167,44	112,27	70,76	31,52	15,32	730,13

2. Déficit d'écoulement (Selon la méthode de Wundt)

La méthode de Wundt met en fonction deux paramètres, la précipitation et la température moyenne annuelle. Selon l'abaque de Wundt notre bassin versant présente un déficit de 300 à 400 mm en dessous de 10% du quotient d'écoulement (figure 8).

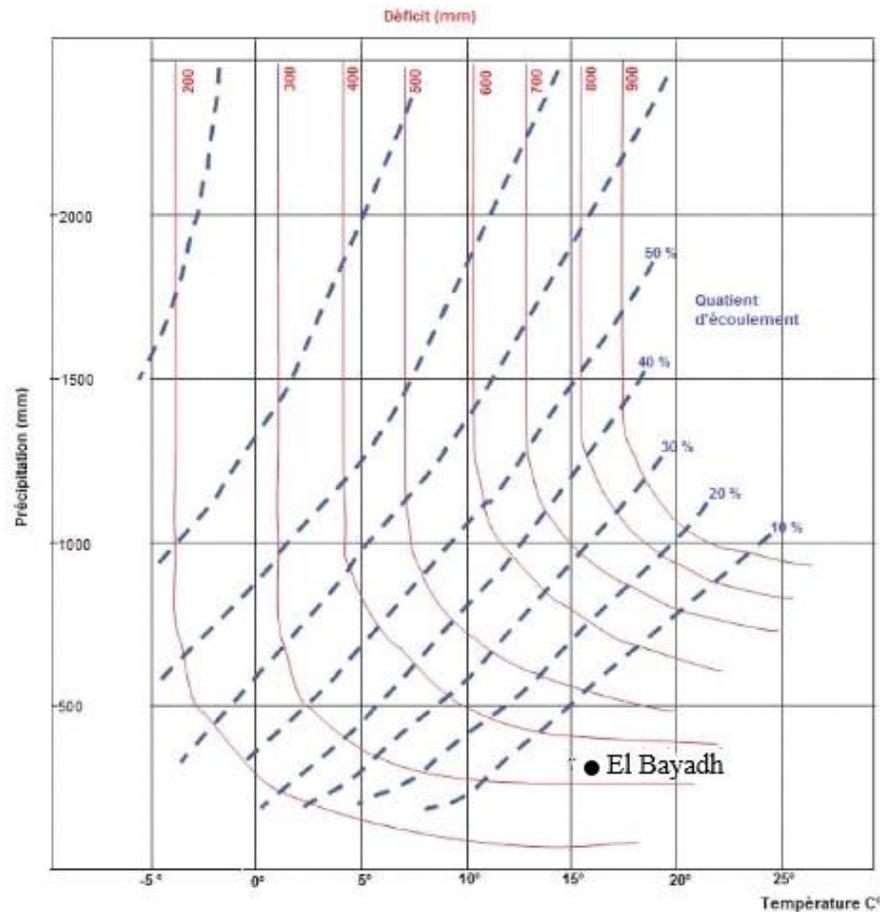


Figure 8 : Station d'El Bayadh sur l'abaque de Wundt

3. Bilan annuel

L'estimation du bilan hydrologique annuel selon la méthode de Thornthwaite est représentée dans le tableau 8 ci-dessous, dont nous avons calculé les différents paramètres en supposant, par manque de données détaillées sur la nature du sol, que la réserve utile est à 90 mm.

Le tableau montre que l'évapotranspiration annuelle est à 867,64 mm bien plus important que la précipitation (309,69mm) avec un déficit agricole de 588,19 mm.

Tableau 8: du Bilan hydrique de la station d'El Bayadh

Mois	Sept	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Année
P (mm)	25,34	39,21	27,81	22,03	24,05	16,81	30,24	27,20	22,35	16,11	12,77	15,53	309,69
ETP (mm)	103,69	59,63	22,57	9,35	7,10	11,10	27,66	46,83	87,62	138,65	188,21	165,23	867,64
RFU (90)(mm)	0,00	0,00	5,24	17,91	34,87	40,58	43,16	23,53	0,00	0,00	0,00	0,00	
ETR (mm)	25,34	39,21	22,57	9,35	7,10	11,10	27,66	46,83	45,88	16,11	12,77	15,53	279,45
DA (mm)	78,35	20,42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	41,74	122,54	175,44	149,70	588,19
Exc du mois (mm)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
R (mm)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
E (mm)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

P : Précipitation en mm, T : Température en °C, ETP : Evapotranspiration potentielle en mm, P-ETP : Variation de la réserve (ΔU), RFU : Réserve utile en mm, ETR : Evapotranspiration réelle en mm, DA : Déficit Agricole, Exc du Mois : Excédent du mois en mm, E : l'écoulement en mm

II- Aspect hydrologique

Dans le cadre de cette étude, nous avons utilisé le modèle numérique de terrain MNT, qui nous a permis de limiter le bassin d'étude et l'extraction automatique des paramètres caractérisant le relief à l'aide du logiciel Arcgis et de ses différents outils. Le logiciel Arcgis, nous a également permis d'établir les différentes carte (carte des pentes, du réseau hydrographique, carte hypsométrique) et déterminer la surface et le périmètre du bassin qui sont des paramètres important pour la poursuite de notre travail.

II -1 Caractéristiques géométriques et de forme

L'écoulement des eaux au sein d'un bassin versant est étroitement lié aux caractéristiques physiques du bassin et des conditions climatiques, ainsi le cheminement des eaux diffère des bassins versants. Les bassins versants de forme compacte drainent l'eau plus rapidement que ceux de forme plus allongées. Parmi les caractéristiques géométriques les plus importantes qui jouent un rôle pour déterminer et analyser le comportement hydrologique d'un bassin versant sont : la forme, le relief et la surface (Andre Musy et al, 2003).

II -1-1 Indice de compacité de Gravelius

L'indice de compacité est utilisé pour caractériser la forme d'un bassin versant, ce coefficient de compacité est en fonction du périmètre (P) et de la surface (A). Lorsque le coefficient de Gravelius

est supérieur à 1, la forme du bassin est allongée, si elle proche de 1 la forme du bassin est de type circulaire (figure 9).

Si A est la surface de notre bassin versant est égale à 209,69 Km² et P le périmètre est 81,46 Km, alors le coefficient KG est égal :

$$KG = \frac{P}{2\sqrt{A}} = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}} = \mathbf{1.59}$$

Pour le cas de notre bassin, l'indice de compacité est de **1.59**, donc la forme est de type allongée ou chène.

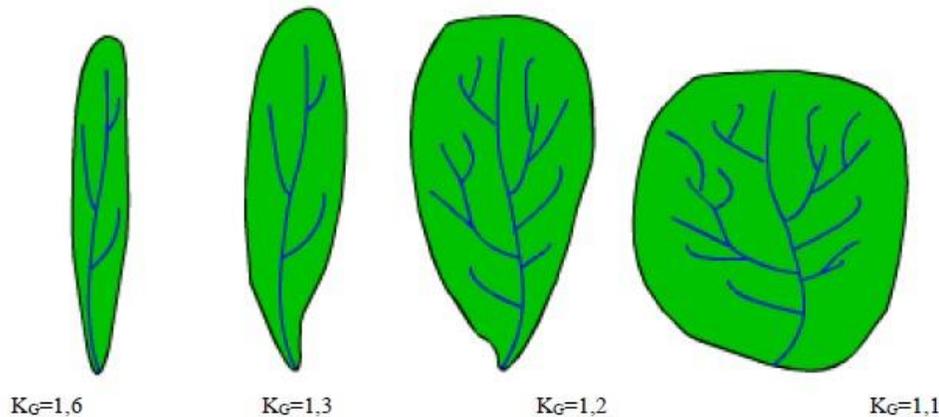


Figure 9 : Exemple de forme de bassin versant (Andre Musy et al, 2003)

II -1-2 Rectangle équivalent

Le rectangle équivalent est le résultat d'une transformation géométrique d'un bassin réel dans laquelle on conserve les surfaces, le périmètre et également de l'indice de compacité. Elle a été établit par M. Roche (1963) pour pouvoir comparer les bassins entre eux du point de vue de l'influence de leurs caractéristiques géométriques sur l'écoulement.

$$L = \frac{Kc \times \sqrt{A}}{1.12} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{Kc} \right)^2} \right]$$

$$l = \frac{Kc \times \sqrt{A}}{1.12} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{Kc} \right)^2} \right]$$

L : la longueur du rectangle

l : la largeur du rectangle

K_G est l'indice de compacité de Gravelius= **1.59**

Le bassin versant d'El Bayadh a un indice de compacité de Gravelius de 1.59, il présente donc une longueur $L= 35.07$ Km qui est 7 fois plus importante que la largeur $l= 5.98$ Km. Les valeurs des courbes de niveau sont comprises entre 1251m à l'exutoire et 1949m en amont. On distingue également que les courbes de niveaux sont trop serrées vers l'amont jusqu'à 1550 m, ce qui favorise un écoulement grâce à la pente.



Figure 10 : Rectangle équivalent du bassin versant d'El Bayadh

Tableau 9: Caractéristique de forme du Bassin Versant d'El Bayadh

Bassin versant	Superficie (Km ²)	Périmètre (Km)	Indice de Gravelius KG	Rectangle équivalent	
				Longueur (Km)	Largeur (Km)
El Bayadh	209,69	81,46	1.59	35,07	5.98

II -2 Etude du relief

Le relief influence aisément certains paramètres climatiques (température, précipitation.) d'une région et l'écoulement des eaux. Le ruissellement, l'infiltration et l'évaporation dépendent aussi du relief. Le relief est caractérisé par la courbe hypsométrique.

Cette courbe représente la répartition de la surface du bassin versant en fonction de son altitude, elle donne des indications quant au comportement hydrologique et hydraulique du bassin et de son système de drainage, plus les différentiels entre les élévations maximales et minimales sont élevés plus le drainage sera rapide. On peut déduire plusieurs paramètres à partir de la courbe, notamment les altitudes médianes et moyennes, ainsi qu'une vue de la pente du bassin, l'allure du relief (André Musy et al, 2003). La courbe hypsométrique porte en abscisse la surface (ou le pourcentage de surface) du bassin qui se trouve au-dessus de l'altitude représentée en ordonnée.

La répartition de la surface par tranche d'altitude, nous permet d'établir la courbe hypsométrique et le diagramme de fréquences altimétriques du bassin versant (tableau 10, figure 11.). La courbe hypsométrique présente des variations de pendage vers le bas à plusieurs niveaux. Entre 1949 m et 1550 m, la courbe présente un pendage fort, puis le pendage devient constant dans sa descente de 1550 à 1450 m. La courbe présente un état plutôt de vieillesse avec la présence des plaines où les altitudes varient très peu.

Tableau 10: Répartition hypsométrique du bassin versant d'El Bayadh

Elévation courbe de niveau (m)	Surface Partielles		Surface Cumulées		Pourcentage au-dessus limite l'intérieur en (%)
	Surface entre les courbes A (Km ²)	Pourcentage de chaque surface partielle Ai (%)	Surface cumulée (Km ²)	Surface cumulée (%)	
1251-1350	28,25	13,47	28,25	13,47	100,00
1350-1450	130,34	62,16	158,59	75,64	86,53
1450-1550	25,84	12,33	184,44	87,96	24,36
1550-1650	12,22	5,83	196,66	93,79	12,04
1650-1750	7,86	3,75	204,52	97,54	6,21
1750-1850	4,22	2,01	208,74	99,55	2,46
1850-1949	0,94	0,45	209,68	100,00	0,45

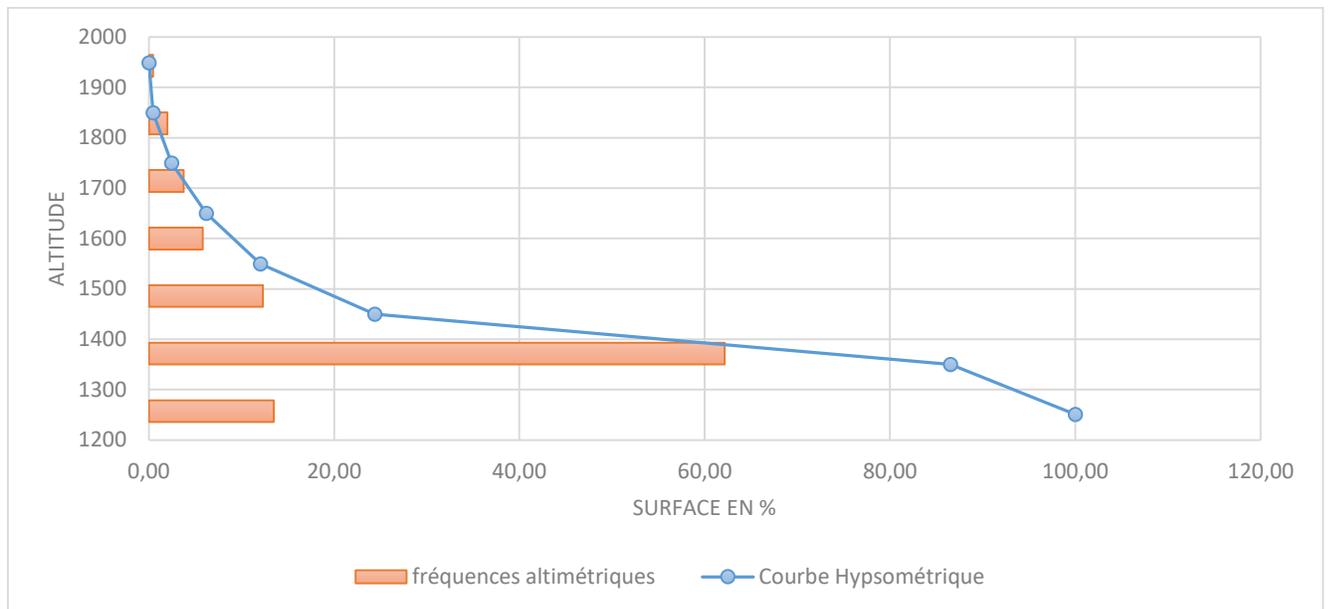


Figure 11 : Courbe hypsométrique et histogrammes des fréquences altimétriques du bassin d'El Bayadh

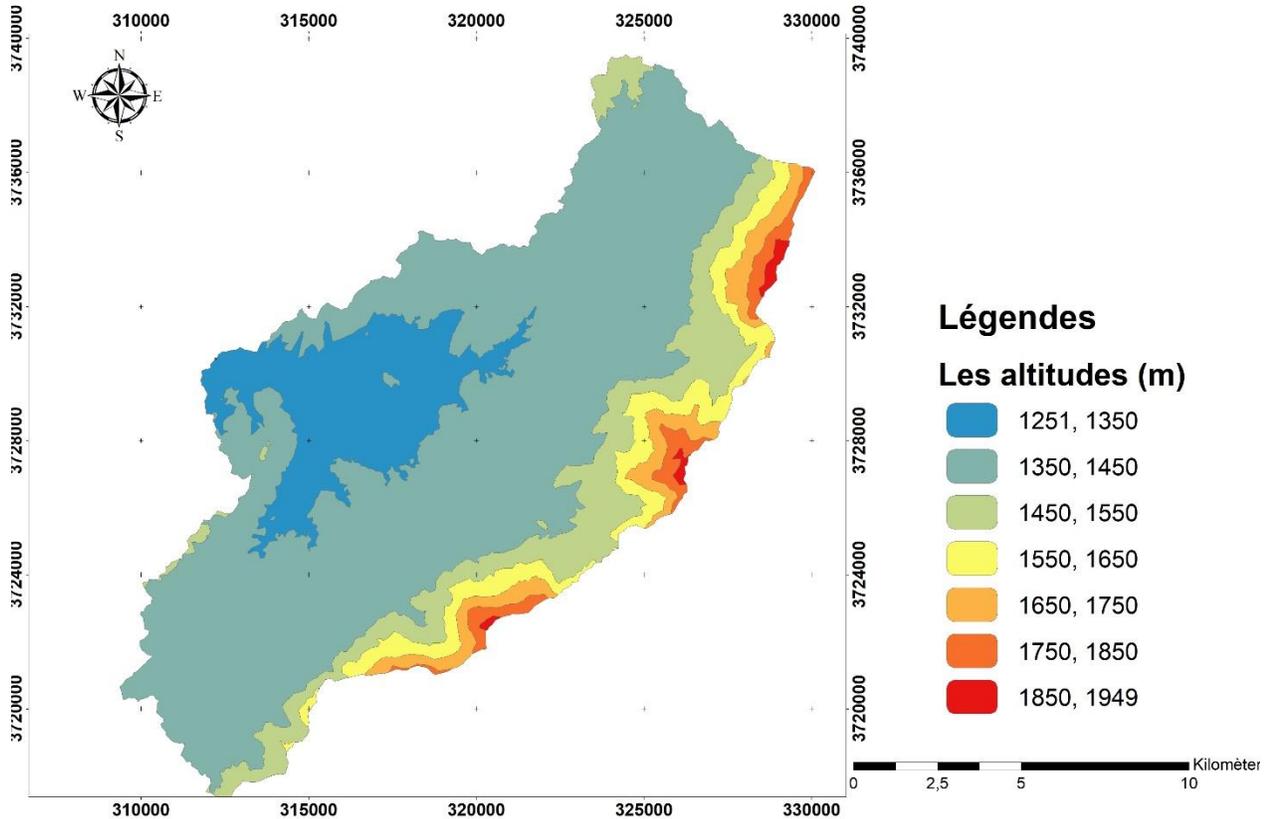


Figure 12: Carte hypsométrique du bassin versant d'El Bayadh (sous arcgis)

II -3 Altitudes caractéristiques du bassin versant

II -3-1 Altitudes maximale et minimale

Les altitudes maximale et minimale déterminent l'amplitude altimétrique du bassin versant, elles interviennent également dans le calcul de la pente. Dans notre bassin, les altitudes maximale et minimale sont respectivement de 1850 et 1251m.

II -3-2 Altitude moyenne

Elle est décrite à partir de la relation suivante :

$$H_{moy} = \frac{1}{A_t} \sum A_i \left(\frac{h_i + h_{i+1}}{2} \right)$$

Avec :

A_t : l'aire totale du bassin versant (Km²) 209,69 Km²

A_i : la surface (Km²) entre deux élévations h_i et h_{i+1} (m)

L'altitude moyenne pour notre bassin versant est de 1432,06 m.

Tableau 11: Donnée pour le calcul de l'altitude moyenne du bassin versant

Altitude	A en Km ²	$\sum A_i \left(\frac{h_i + h_{i+1}}{2} \right)$
1251-1350	28,25	36738,7192
1350-1450	130,34	182482,918
1450-1550	25,84	38767,3859
1550-1650	12,22	19555,6293
1650-1750	7,86	13363,834
1750-1850	4,22	7587,00444
1850-1949	0,94	1792,43889
Somme	209,68	300287,93

II -3-3 Altitude médiane

L'altitude médiane (h_{med}) correspond à l'altitude incluant 50% de la surface du bassin versant, elle correspond donc au point 50% de la courbe hypsométrique. Dans notre cas l'altitude médiane est de 1400m.

II -4 Etude des pentes

II -4-1 Indice de pente globale I_g

A partir de la courbe hypsométrique déjà tracée, on prend les points supérieure ou inférieure soit égale à 5 % de la surface totale, les altitudes H_5 et H_{95} sont déduit sur la courbe. Cet indice permet de connaître le type de relief caractérisant une région, il est décrit par la relation suivante :

$$I_g = \frac{D}{L}$$

Avec :

D : dénivelée H5 % - H95 %, définie sur la courbe hypsométrique (m). Où H_{5%} correspond à l'altitude élevée supérieur qui représente 5% de la surface du bassin et H_{95%} correspond l'altitude base supérieur qui représente 95% de la surface du bassin.

L : longueur du rectangle équivalent (m).

L'application de cette équation sur notre bassin donne :

H_{5%} = 1700m et H_{95%} = 1300m, **D = 1700-1300 = 400m**

L = 35.07 Km

Ig : Indice de pente globale = 11.41

Après comparaison de la valeur d'Ig (11.41) avec les valeurs du tableau 12, nous constatons que le relief de notre bassin versant est de type modéré.

Tableau 12 : Classification du relief selon Ig par l'ORSTOM. (Bouanani, 2004)

Type de relief	Indice de pente Globale
Relief très faible	$Ig < 2$
Relief faible	$2 < Ig < 5$
Relief assez faible	$5 < Ig < 10$
Relief modéré	$10 < Ig < 20$
Relief assez fort	$20 < Ig < 50$
Relief fort	$50 < Ig < 500$
Relief très fort	$500 < Ig$

II -4-2 Dénivelée spécifique (Ds)

La dénivelée spécifique est dérivée à partir de l'indice de pente globale, à la différence avec Ig, elle est indépendante de la surface ainsi elle permet la comparaison entre plusieurs bassins versants de taille différente. Elle dépende de la longueur du bassin et de l'hypsométrie ($D = H_{5\%} - H_{95\%}$), ainsi elle peut être obtenue par les relations :

$$Ds = \frac{D}{L} \sqrt{L^3} = D \sqrt{\frac{1}{L}}$$

$$Ds = Ig \sqrt{A}$$

Avec :

D_s : dénivelée spécifique

I_g : Indice de pente globale

A : La surface totale du bassin= 209,69Km²

$$D_s = 11.41 \sqrt{(209,69)} = 165.22$$

Selon la classification du tableau on constate que la dénivelée spécifique donne un relief assez fort.

Tableau 13 : Classification du relief selon D_s par l'ORSTOM (Bouanani, 2004)

$D_s < 10$ m	Relief très faible
$10 \text{ m} < D_s < 25 \text{ m}$	Relief faible
$25 \text{ m} < D_s < 50 \text{ m}$	Relief assez faible
$50 \text{ m} < D_s < 100 \text{ m}$	Relief modéré
$100 \text{ m} < D_s < 250 \text{ m}$	Relief assez fort
$250 \text{ m} < D_s < 500 \text{ m}$	Relief fort
$D_s > 500 \text{ m}$	Relief très fort

II -4-3 La pente moyenne des bassins versants

Elle est donnée par la formule suivante :

$$I_{moy} = \frac{Dt}{L}$$

Avec :

D_t : Dénivelée totale du rectangle équivalent (m), $D_t = H_{max} - H_{min}$; et $H_{max} = 1850 \text{ m}$; $H_{min} = 1251 \text{ m}$;

L : Longueur du rectangle équivalent (Km) $L = 35.07 \text{ Km}$.

Pour notre bassin, la pente moyenne est égale à 17,08% indiquant une pente modérée qui favorise l'infiltration.

Tableau 14 : Indices de pentes et reliefs du bassin versant

Bassin versant	Ds	Relief selon Ds	Ig	Relief selon Ig	Imoy %
El Bayadh	67,54	modéré	0.01	modéré	17,08

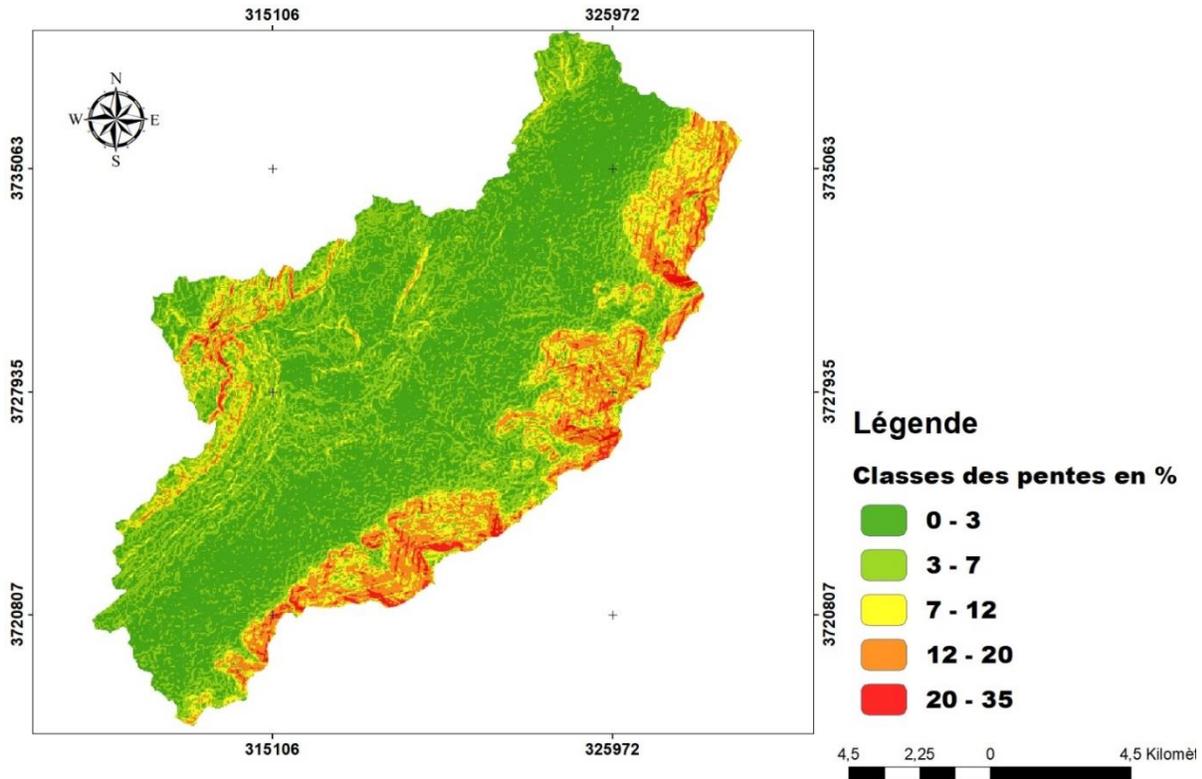


Figure 13: Carte des pentes du bassin versant d'El Bayadh

Le tableau 15 représente un récapitulatif des paramètres de notre bassin versant, les résultats indiquent que la région présente un rectangle avec la longueur 7 fois plus important que la largeur. Nous avons un relief assez fort à modéré, avec une pente qui favorise l'infiltration.

Tableau 15: Principaux paramètres du bassin versant d'El Bayadh

Surface A (Km ²)	Périmètre P (Km)	KG	Rectangle équivalent		Ig		DS	Altitude moyenne (m)	Altitude médiane (m)
			Longueur (Km)	Largeur (Km)	H _{5%} (m)	H _{95%} (m)			
					1700	1300			
209,69	81.46	1.59	35.07	5.98	11.41		165.22	1432.06	1400

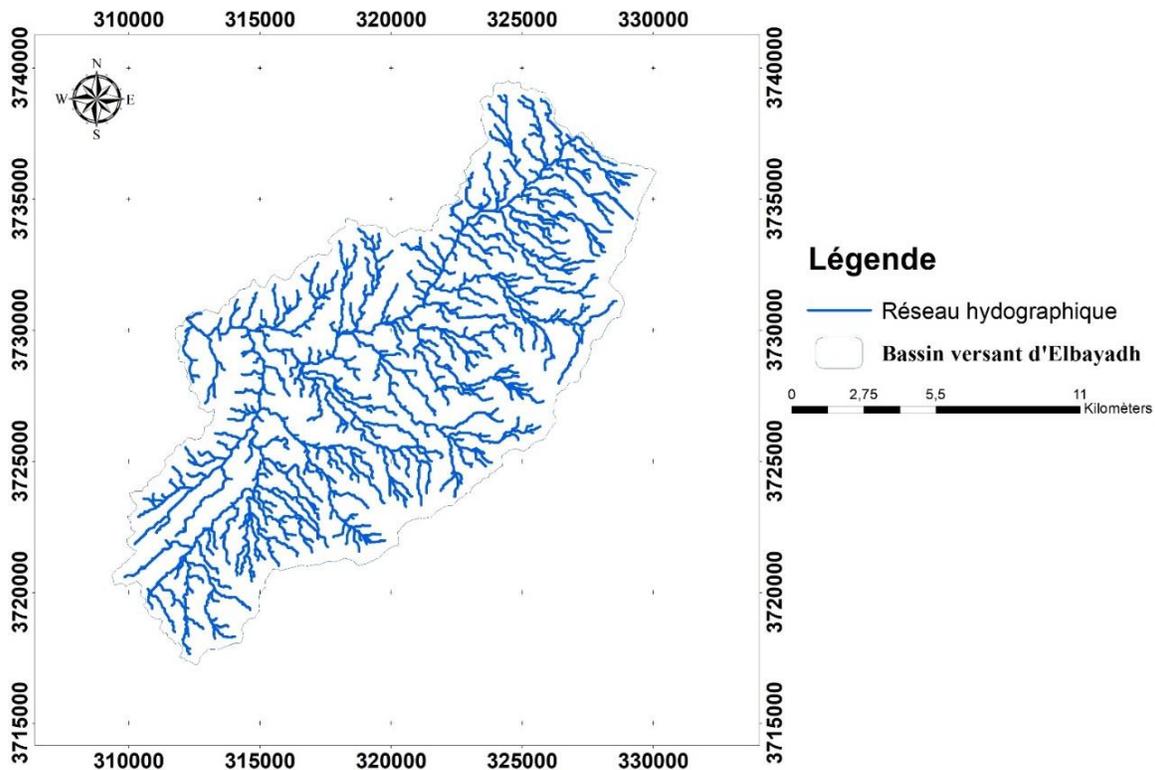
II-5 Etude du réseau hydrographique

Le réseau hydrographique est défini comme l'ensemble des canaux de drainage naturel où s'écoulent les eaux provenant du ruissellement ou venant des nappes, soit sous formes de sources, soit par restitution continue le long du lit du cours d'eau.

Le profil de la rivière, la densité de drainage et l'ordre des cours d'eau sont des caractéristiques qui servent à décrire ce réseau. La forme du réseau hydrographique dépend de certains facteurs comme :

- La géologie : elle oriente les cours d'eau et agit sur la structure du réseau ;
- Le climat : par les précipitations elle détermine la densité du réseau et agit également sur la couverture végétale qui influence sur le ruissellement et régule le débit des cours d'eau ;
- L'activité humaine : au différent aménagement peut modifier le débit et aussi le tracé du réseau hydrographique

La carte du réseau hydrographique du bassin versant a été établie (figure 14), par le modèle MNT de bassin en utilisant le logiciel Arcgis 10.6.



II-5-1 Classification du réseau hydrographique

Plusieurs auteurs ont proposé des types de classification, celle de Strahler (1957) est parmi les plus répandues, elle est basée sur la méthode définie par Horton (1945) modifiée par Strahler et Schum (1957) dans laquelle il est indiqué que tout cours d'eau sans affluents est d'Ordre 1. Cette classification permet de décrire sans ambiguïté le développement du réseau de drainage d'un bassin de l'amont vers l'aval (figure 15). Elle se base sur les règles suivantes :

Tout cours d'eau dépourvu de tributaires est d'ordre un. Si le cours d'eau formé par la confluence de deux cours d'eau d'ordre différent prend l'ordre du plus élevé des deux. Le cours d'eau formé par la confluence de deux cours d'eau du même ordre est augmenté de un.

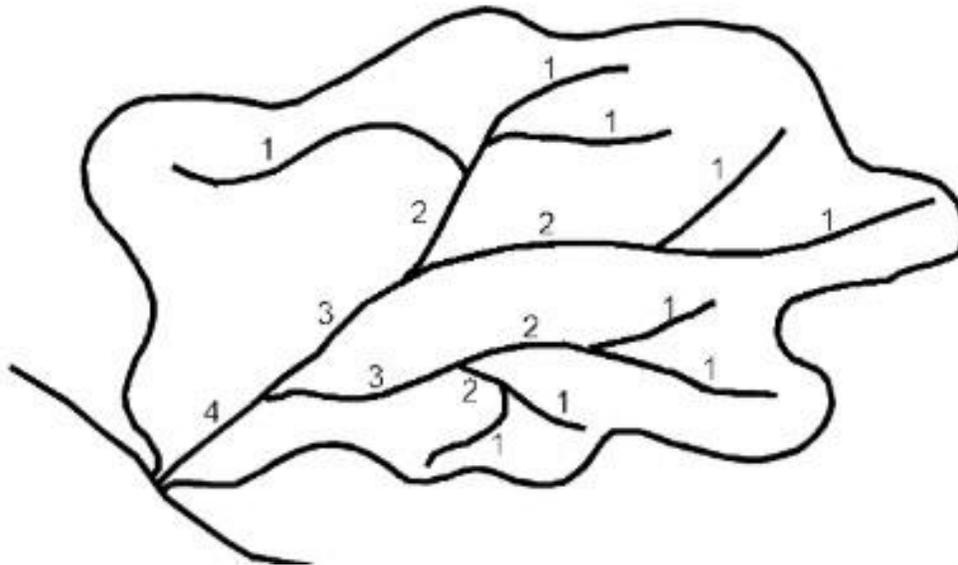


Figure 15 : Ordre des cours d'eau selon la classification de Strahler et Schum (Bassin d'ordre 4)
(Morell M et al, 1999)

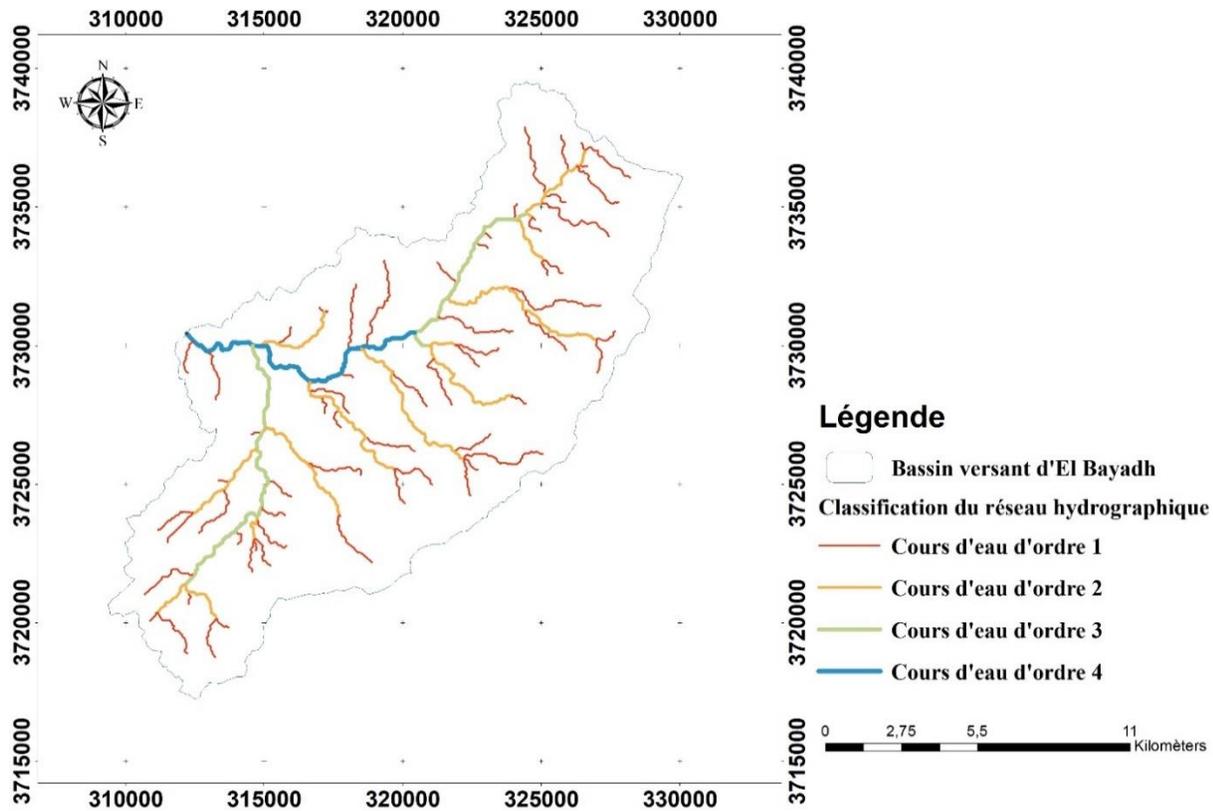


Figure 16: Classification du réseau hydrographique du bassin versant d'El Bayadh selon Strahler (sous Arcgis)

II-5-2- Rapport de confluence (Rc)

Le rapport de confluence R_c est le quotient du nombre de talwegs d'ordre n par celui du talweg d'ordre supérieur d'ordre $n+1$. Elle exprime le développement du réseau de drainage

$$R_c = \frac{N_n}{N_{n+1}}$$

R_c : Rapport de confluence

N_n : Nombre de cours d'eau d'ordre n .

N_{n+1} : Nombre de cours d'eau d'ordre $n+1$.

Le rapport de confluence est inférieur à 5 (tableau 16), ces valeurs signifient que le réseau hydrographique du bassin a une ramification bien développée avec un espacement régulier des confluences ; ils sont de type Chêne.

Tableau 16 : Classification du chevelu hydrographique selon le système de Strahler, bassin versant d'El Bayadh

Ordre	Nombre	longueur (Km)	Longueur moyenne LU= (Longueur totale)/le nombre)	Rapport de confluence Rc
1	124	95,6163	0,771099194	1,7
2	75	47,7053	0,636070667	2,5
3	30	19,1558	0,638526667	1,3
4	23	11,2641	0,489743478	

II-5-3-Rapport des longueurs

Le rapport de confluence Rc est le quotient de la longueur moyenne des cours d'eau d'ordre n à la longueur moyenne des cours d'eau d'ordre n-1. Elle est décrite par la formule :

$$Rl = \frac{Ln}{L_{n-1}}$$

Avec :

Ln : Longueur moyenne des cours d'eau d'ordre n.

L (n-1) : Longueur moyenne des cours d'eau d'ordre n-1.

n : Ordre d'un cours d'eau.

Tableau 17 : Rapport des longueurs du bassin versant d'El Bayadh

Ordre	longueur cumulée Li (Km)	Rapport des longueurs RL
4	11,2641	0,588025559
3	19,1558	0,401544482
2	47,7053	0,498924347
1	95,6163	

II-5-4- Densité de drainage

La densité de drainage permet d'identifier le chevelu hydrographique d'un bassin versant. Elle est définie comme étant le quotient de la somme des longueurs des talwegs drainant sur la surface du bassin versant, elle est obtenue par la formule suivant :

$$Dd = \frac{\sum L}{A}$$

Avec

Dd : densité de drainage en Km/Km².

L : longueur cumulée de tous les talwegs du bassin en Km.

A : Surface du bassin en Km². 209.69 Km².

La densité de drainage dépend principalement de la géologie (structure et lithologie), des caractéristiques topographiques du bassin versant et, dans une certaine mesure, des conditions climatologiques et anthropiques. Pratiquement, les valeurs de la densité de drainage varient de 3 à 4 pour des régions où l'écoulement est très limité et se trouve centralisé ; elles dépassent 1000 pour certaines zones où l'écoulement est très ramifié avec peu d'infiltration (N. Bentekhici 2006). Pour notre bassin versant, la longueur cumulée de tous les talwegs est de 173.74 Km, ce qui donne une faible densité de drainage (égale à 0,83 Km/Km²), ce qui signifie que le bassin présente dans son ensemble une formation géologique perméable qui favorise l'infiltration, et un écoulement plutôt limité et centralisé.

II-5-5- Densité hydrographique

La fréquence "F" des cours d'eau (densité hydrographique) est obtenue par le rapport entre le nombre des cours d'eau et la surface totale du bassin versant.

$$F = \frac{\sum Ni}{A}$$

Avec :

F : Densité hydrographique (Km⁻²)

Σ Ni : Nombre des cours d'eau.

A : Surface du bassin (Km²).

Le bassin versant d'El Bayadh a une faible densité hydrographique (égale à 1.2 Km⁻²), indique que le bassin d'étude présente un substratum perméable et à relief peu accidenté.

Conclusion

Nous pouvons conclure avec un récapitulatif des résultats de l'analyse des données récoltées au niveau de la station météorologie d'El Bayadh durant 30 ans (1988 à 2018) basée sur les températures et les précipitations, que le climat de la région est semi-aride. La période sèche s'étale sur une période de six mois de l'année avec des précipitations inférieures à 40 mm. L'établissement du bilan hydrique de notre zone d'étude montre une évapotranspiration annuelle de 867.64 mm avec un déficit agricole de 451.35mm, l'excédent est calculé à 98.6 mm et un écoulement de 68.32 mm. En fonction de ces valeurs de l'ETP, on peut conclure que le bilan de cette période (1988-2018) est déficitaire.

Le traitement du MNT nous a renseigné sur la morphologie du bassin versant de notre zone d'étude ; c'est un bassin de forme allongée ayant une caractéristique montagneuse dans un relief modéré favorisant un écoulement important. Le réseau hydrographique du bassin présente une ramification bien développée avec un ordre d'écoulement d'ordre 4. La densité de drainage et hydrographique nous renseigne que notre zone d'étude présente un relief peu accidenté avec une formation géologique perméable favorisant l'infiltration à un écoulement limité.

PARTIE I : GENERALITES

CHAPITRE 3 : ASPECT GEO-STRUCTURAL ET HYDROGEOLOGIQUE

I-Introduction

La région d'El Bayadh se situe au centre de l'Atlas saharien, plusieurs auteurs ont fait auparavant l'objet de recherche géologique détaillée. Les travaux effectués dans cette partie sont ceux de Flamand (1911), Cornet (1949-1950), Abed (1982), Regagba (2006), Borsali et Fira (2012), Ghezal et Saidi (2013), Boukholkhal (2013), Kheloufi et Riahi (2015).

Dans ce chapitre, l'extrait de carte géologique d'El Bayadh (ancienne nomination Géryville) de Cornet (1952) nous permet de décrire les formations géologiques qui affleurent dans le bassin versant d'El Bayadh allant du Callovien inférieur aux Quaternaires. Les principaux aspects morphologiques sont constitués par des anticlinaux formés de deux séries gréseuses d'âge Jurassique et crétacé, les dépressions correspondent à des synclinaux à fond plat et aux affleurements Crétacé inférieur marins ou continentaux et tertiaire continental.

II-Contexte géologique :

II.1. Description lithostratigraphique :

La lithostratigraphie décrite est inspirée du détail de l'étude de Cornet (1952) et a montré des ensembles lithologiques telles que ;

Les marno-calcaires du Callovien inférieur et du Valanginien, les Grès du Lusitanien-Kimméridgien et Crétacé inférieur, ainsi que celle de l'Hauterivien- Barrémo-Apto-Albien, les calcaires du Kimméridgien, et de l'Hauterivien, les argiles sableuse du Tertiaire continental et les Alluvions anciennes et récentes du Quaternaire.

En ce qui concerne le log litho-stratigraphique, nous nous sommes basés sur les formations décrites par Cornet (1952).

Nous présentons une description lithostratigraphique qui va de la formation la plus ancienne à la formation la plus récente :

1. Jurassique :

➤ Callovien inférieur (J¹) :

Cette série des bancs schisteux et marno-calcaire généralement apparait bien avant la série gréseuse de Lusitanien dont la base n'étant pas visible, d'une épaisseur de 30 m.

➤ **Lusitanien (J⁵⁻²) :**

Sur la carte d'El Bayadh, cette série gréseuse de 800 à 1000 m de puissance est coiffée par les bancs calcaires du Kimméridgien. Elle correspond donc à la plus grosse partie du Callovien, et de l'Oxfordien, la série est essentiellement gréseuse au niveau du synclinal d'El Bayadh, à l'Ouest de la carte elle comprend essentiellement des grés schisteux Psammétique intercalés de bancs calcaro-dolomitique d'un à quelques mètres, à patine rousse.

Dans l'ensemble, il s'agit évidemment d'une série marine, mais peu profonde et à niveaux grossiers ; les ripple-marks sont abondants dans les grés les mieux lités, de même que les traces de plages et autres manifestations généralement en liaison avec une sédimentation sub-côtière.

➤ **Kimméridgien et Lusitanien sup. indifférenciées (J⁶⁻⁵) :**

C'est des grés qu'il n'est pas possible de distinguer de grés de Lusitanien sous-jacents lorsque les calcaires Kimméridgiens tendent à disparaître.

➤ **Kimméridgien (J⁶) :**

Ce Kimméridgien est constitué par des calcaires bleu-foncés de puissance très variable 50 m au niveau d'El Bayadh.

2. Crétacé inférieur :

➤ **Série gréseuse infra-crétacé (C_v) :**

Les derniers bancs de calcaires du Kimméridgien sont surmontés partout par de puissants bancs gréseux azoïques supportant eux-mêmes un Néocomien mal daté. Ce niveau dit, série gréseuse infra-crétacé, est formé en général de grés assez durs, de teinte claire à l'intérieur, patinés en brun foncé ou noir luisant à l'extérieur (patine saharienne), il est très difficile de les distinguer de la série gréseuse du Jurassique supérieure, lorsqu'ils sont intercalés comme cela arrive parfois vers le bas, de calcaires dur jaunes, en petit bancs ou lorsque au contraire la série jurassique est formée de grés massifs sans intercalations calcaires. Leur épaisseur est de 400 à 500 m.

On peut distinguer au Djebel El Béiod (El Bayadh) :

1. Masse principale de grés massifs, 400m à peu près.
2. Grés en dalles minces, clairs, portant le plus souvent des niveaux à ripple-marks, 30m.

3. Intercalation argilo-gréseuse tendre, 40 à 50m.
4. Grés en général plus tendre que la masse principale, 60 à 100m.

➤ **Valanginien (C_{IV}) :**

Le valanginien développé dans les environs d'El Bayadh est décrit par les formations ci-dessous, sur les grés infra-crétacés :

200m environ de marne gris-bleuâtre avec deux dalles de lumachelle à petites huitres ; 200 m environ de d'argile versicolores à gypse ; 150 m à peu près de calcaire gris ou jaune, scoriacé, vacuolaire, à aspect cargneule, qui deviennent plutôt gréseuses à dominance argileuse au centre du synclinal dont l'épaisseur de l'ensemble n'est pas connu.

➤ **Hauterivien (C_{III}) :**

- **Hauterivien gréseux :**

Correspond à des assises gréseuses de 150 m d'épaisseur très constante au-dessous des argiles et calcaires de l'Hauterivien ;

Aux environs d'El Bayadh, représenté par une alternance argilo-gréseuse à dominance des grès (5 à 10 m) claires chenalisés plus au moins tendres à litages obliques et horizontales.

- **Hauterivien calcaires**

Les calcaires de l'Hauterivien sont peu développés au niveau de la plaine d'El Bayadh ils n'ont que quelques dizaines de mètres d'épaisseur.

➤ **Barrémo-Apto-Albien (C³⁻¹) :**

Cette série puissante de 800 à 1000m d'épaisseur correspond à une sédimentation continentale (bois fossiles abondants, stratifications croisées). La région d'El Bayadh placée vers la limite du domaine continental et celui du marin montre une variation assez grande dans le mode de passage de l'Hauterivien marin et Barrémien continental. Ce passage est d'ailleurs mal daté et il est plus probable qu'il ne s'est pas fait partout en même temps.

La masse principale des grés Barrémo-albiens présente un faciès assez caractéristique, quoique pas toujours différenciable des autres étages gréseux. Ce sont de gros bancs de grés tendres gris ou

rosés, à dragées ou à sphéroïdes gréseux, occupant les plaines et les dépressions où ils affleurent en petits dômes amygdaloïde très surbaissées.

3. Tertiaire :

C'est un remplissage sédimentaire qui recouvre vers le Sud-Est toutes les formations jusqu'aux affleurements du Kimméridgien du faisceau moyen constituant les djebels de la bordure opposée.

➤ Tertiaire continental (Tc) :

Le Tertiaire continental est constitué des argiles sableuses rougeâtres où s'intercalent des niveaux de calcaires lacustres et des niveaux aux graviers ou galets plus ou moins lenticulaires.

La base de ce remplissage est souvent formée, au contact de massifs Jurassique et Crétacé, sur toute l'épaisseur, par des poudingues plus ou moins cimenté et des cailloutis mal roulés et calibrés (Azzaz H., 1992).

Il atteint 30 à 40 m d'épaisseur au-dessus de Sénonien de Skhouna à la bordure du bassin ce niveau grossier se rattache aux éboulis de pente. Son épaisseur maximale au centre du synclinal n'est pas connue.

➤ Carapace calcaire (Cc) :

Dans la partie supérieure de ce remplissage, on peut observer une carapace calcaire constituée de calcaires lacustres, de calcaires, de marno-calcaires noduleux et des calcaires zonés. Elle peut atteindre 10 à 20 m d'épaisseur en bordure de Chott Ech Chergui et forme souvent de petite falaise.

4. Quaternaire

➤ Alluvions anciennes (q) :

Ces alluvions sont le remplissage du synclinal du El Bayadh et forme des terrasses en bordure du Chott, on le retrouve sous forme de limons plus ou moins sableux recouvrant la carapace calcaire ainsi dans les vallées et les dayas.

➤ Alluvions récentes

Formée d'alluvions calcaires limono-sableuses, situées à 1 mètre au-dessus des thalwegs.

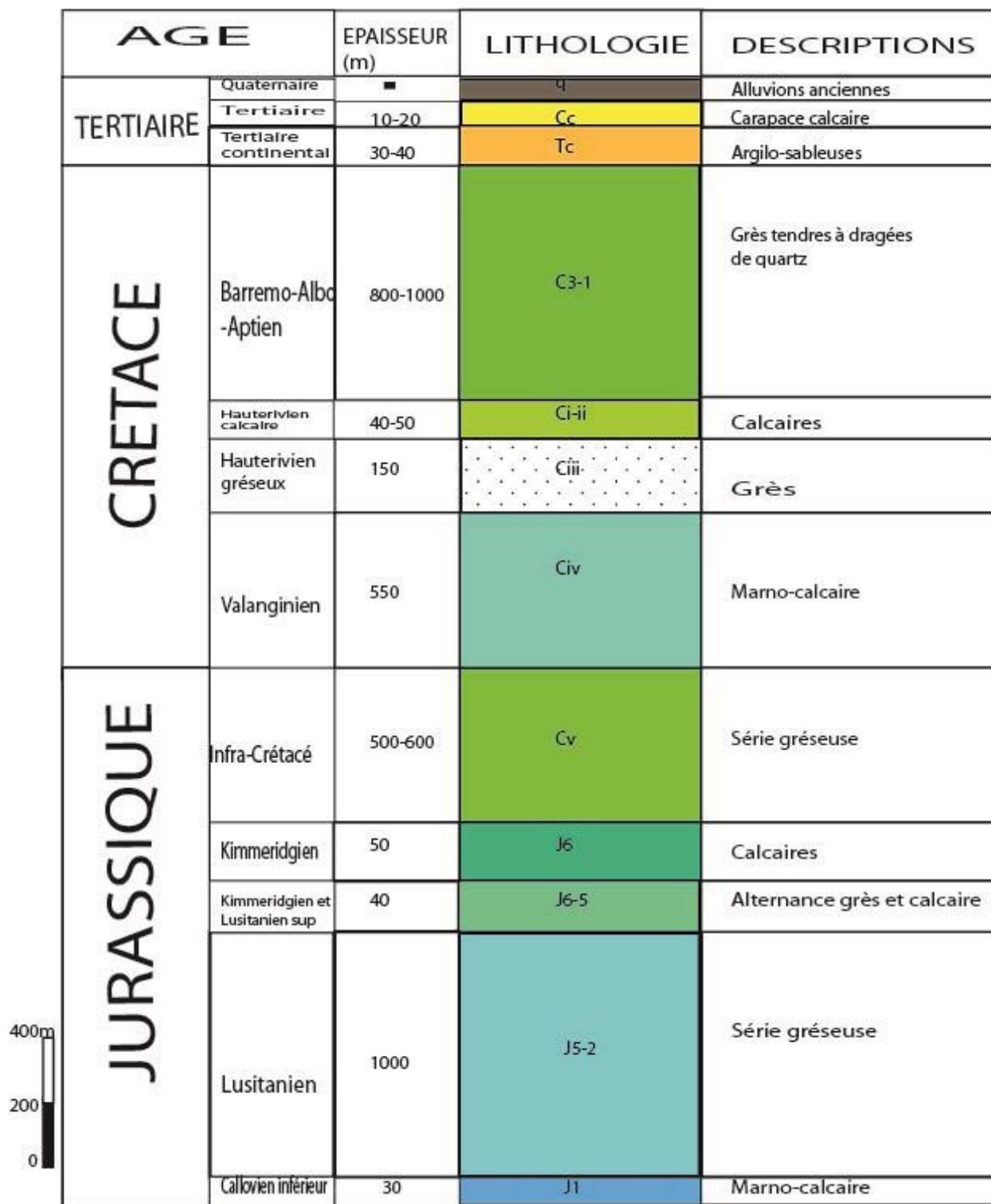


Figure 17 : Log stratigraphique de la région d'El Bayadh

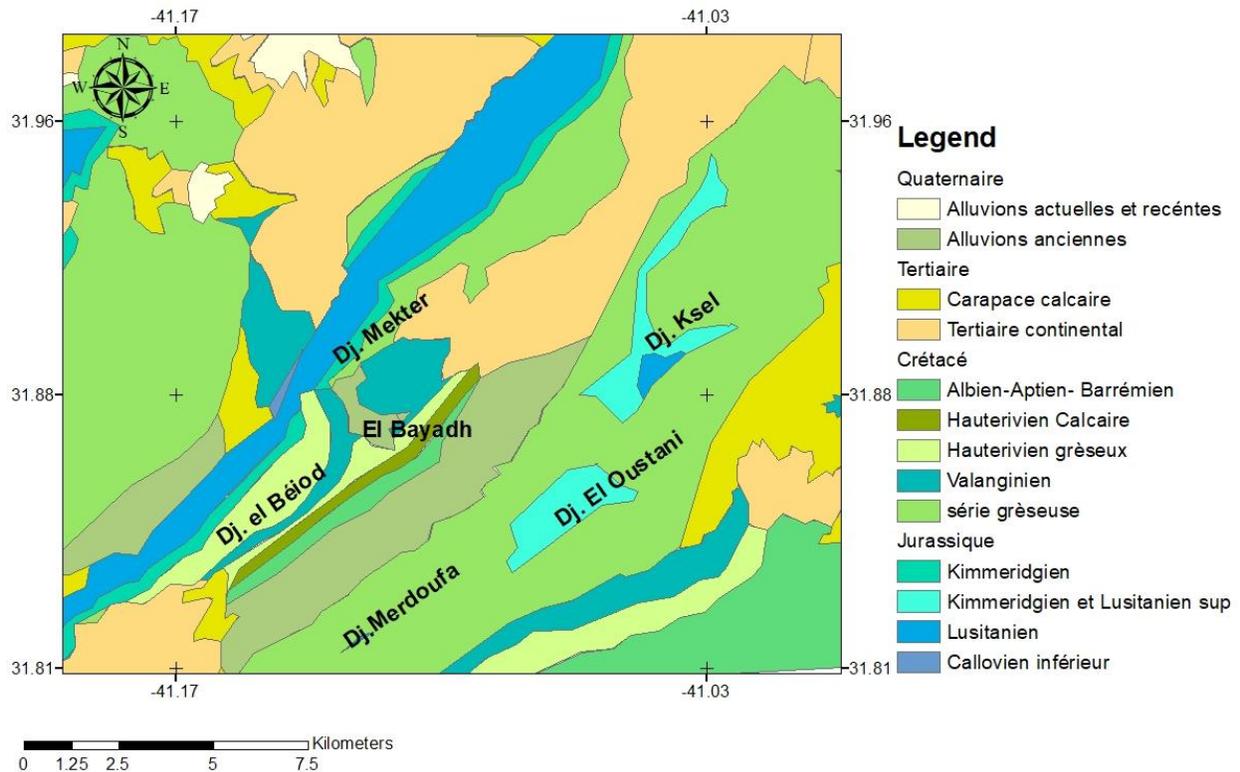


Figure 18 : Carte géologique de la région d'El Bayadh (Cornet, 1952).

III-Contexte structural :

La description structurale est principalement inspirée de l'étude de Cornet (1952) et est complétée avec celle de Maizi (2007). La dépression d'El Bayadh correspond à un synclinal d'âge Jurassique supérieur et Crétacé inférieur.

La carte structurale présentée ci-dessous, nous l'avons élaborée à partir de la carte géologique de Cornet (1952) à l'échelle 1/200000 et la carte géologique d'Algérie 1/200000 (Feuille NI-31-VIII, El Bayadh) de l'ARNH où sont extraites les plus importantes failles.

La description structurale de la région d'El Bayadh a montré que les anticlinaux amygdaloïdes se relayant en chenilles processionnaires décrit plus à l'Est ne sont pas aussi simples de forme dans le périmètre de la feuille d'El Bayadh et que les failles et les décrochements, parfois très importants troublent la régularité des plis atlasiques. Les synclinaux sont plus larges mais souvent plus longs

aussi que les anticlinaux, les synclinaux forment souvent de longues gouttières plus ou moins sinueuses courant sans interruption entre plusieurs séries d'anticlinaux.

En coupes transversales (fig.19) les synclinaux sont évasés, avec un fond horizontal ou sub-horizontal très étalé. Le relèvement des bords, qui suit évidemment celui des flancs des anticlinaux encaissants est progressif mais devient très vite extrêmement énergétique.

Les terrains marins du Callovien inférieur au Turonien sont concordants sur l'ensemble de la carte d'El Bayadh. Les anticlinaux présentent des flancs très redressés, parfois verticaux, formant un genou assez brutal avec une voute plane, horizontale, parfois même légèrement incurvé.

En général, les plus importantes failles sont parallèles à l'axe du plissement (SO-NE). Des décrochements de direction plus aberrante et trop nombreux pour être représentés à l'échelle du 200.000^e hachant les bancs, en particulier dans la région de El Bayadh et dans le Sud-Est de la feuille.

Les failles visibles, notamment le long de la gorge de l'oued El Bayadh de plus que le grand nombre de formations qui affleurent dans le synclinal grâce à des pendages très forts laissent deviner une tectonique intense. En effet, des failles apparaissent dans la gorge de l'oued El Bayadh par surélévation du Kimméridgien qui paraît être repoussé vers le Nord-Ouest (fig. 20). Enfin, sans tectonique intense au niveau de la dépression du synclinal, il paraît impossible que les formations qui affleurent du côté Nord-Ouest puissent constituer une bande de moins de 2 Km de large environ.

Le toit du Kimméridgien semble indiqué que le synclinal a subi des poussées latérales et obliques et s'est faillé longitudinalement avec une surélévation de la lèvre Sud-Est. Par suite deux poussées profondes verticales, au Sud-Ouest et au Nord-Est de la ville se sont manifestées essentiellement sous la lèvre Nord-Ouest, en position basse. Ces deux poussées ont pu provoquer les bombements du Kimméridgien gréseux avec étirement et diminution de puissance.

Selon Maizi (2007), le comportement des différentes familles de fracturation dépend essentiellement de la constitution lithologique des différentes formations et de l'épaisseur par exemple :

- Dans les grès, les fractures sont souvent ouvertes et donnent à la roche un aspect haché.
- Dans les niveaux marneux et argileux, la fracturation est généralement confondue avec un débit schisteux de la roche.

- Dans les formations calcaires et dolomies, les fractures sont assez fines et souvent occupées par la calcite.

Les formations gréseuses du Jurassique et les calcaires du Jurassique-Crétacé présentent une dense fracturation avec une même direction de Nord 80° Est à 100° Est. Ces fracturations assurent une bonne alimentation des nappes du synclinal en particulier du Jurassique.

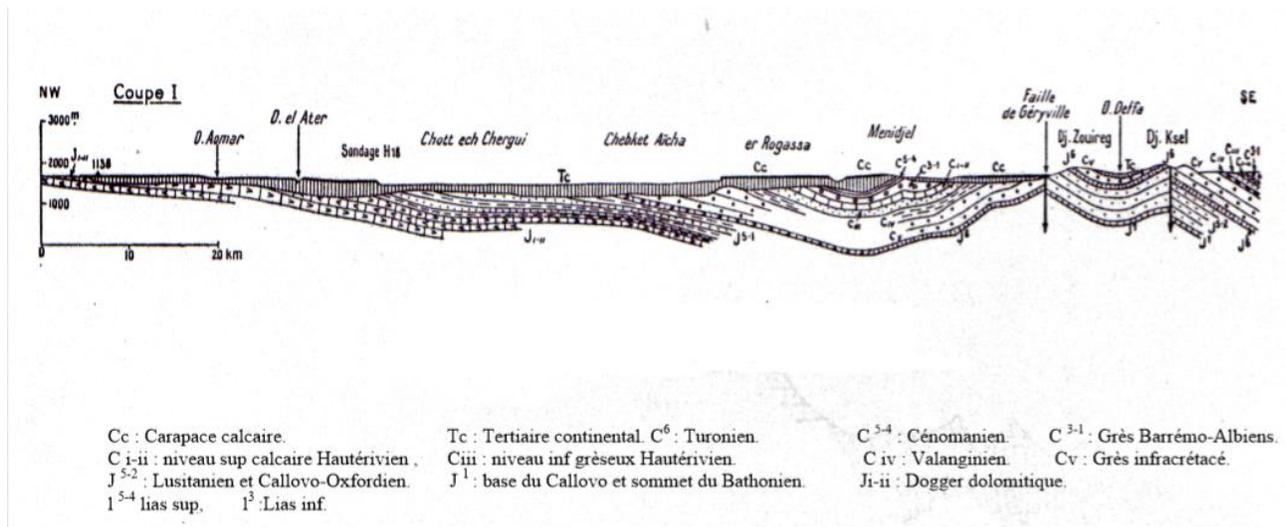


Figure 19 : Coupe transversale de haute plaine au niveau de la région d'El Bayadh (Cornet, 1952).

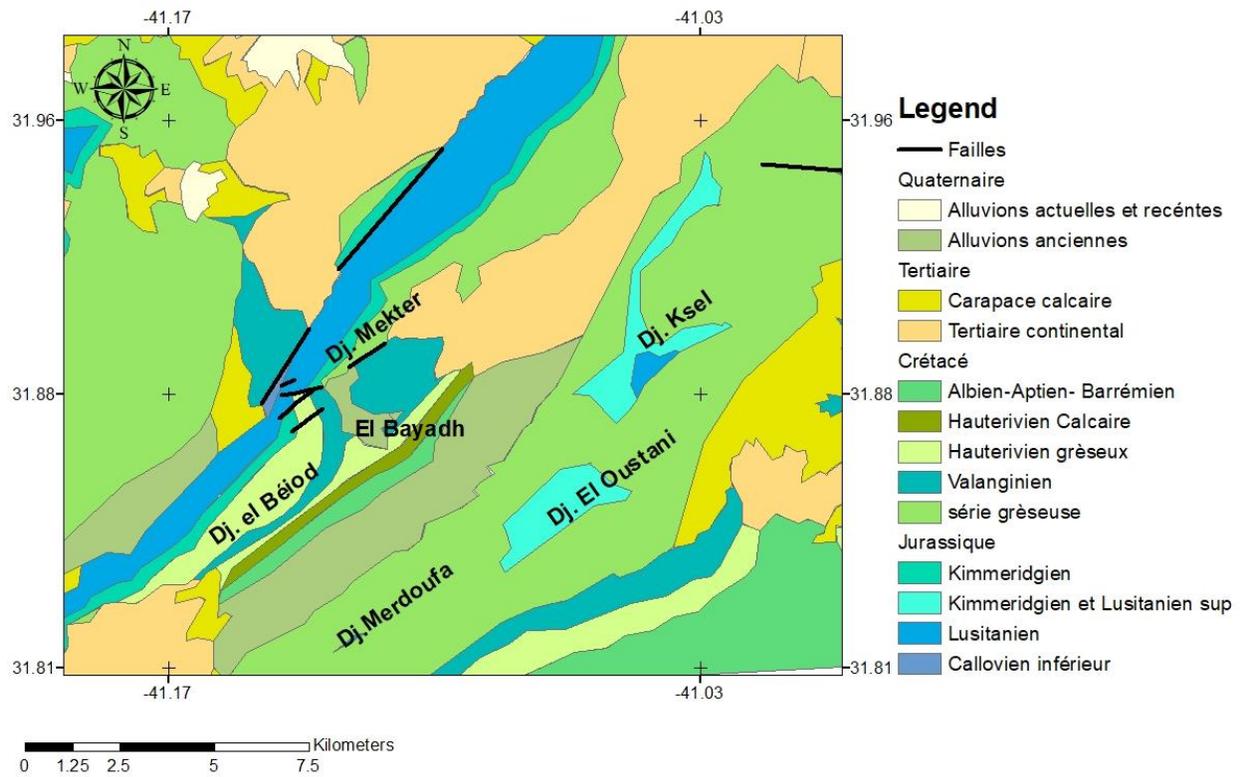


Figure 20 : Carte Géo-structurale de la région d'El Bayadh (Cornet, 1952)

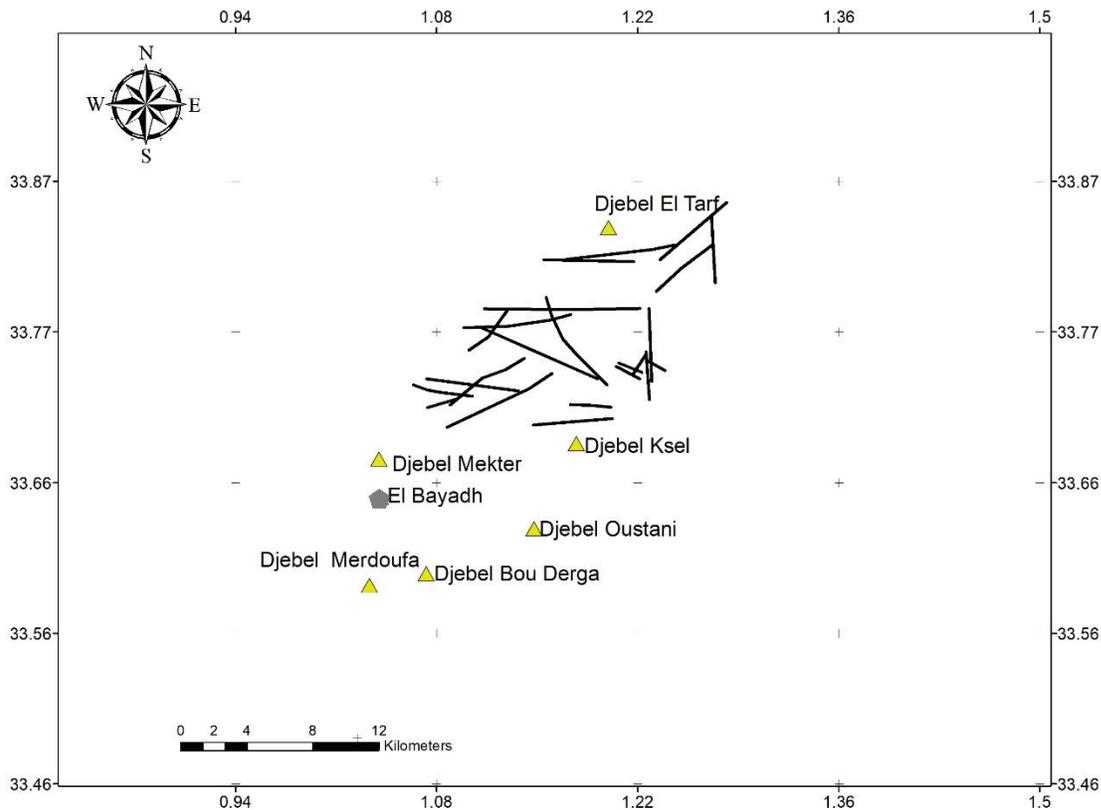


Figure 211 : Carte structurale de la région d'El Bayadh (ANRH, 2008)

IV-Identification des aquifères de la région d'El Bayadh :

Dans ce chapitre nous proposons d'identifier les principales formations aquifères de la région d'El Bayadh qui présentent un grand intérêt hydrogéologique. En se basant sur la synthèse géologique du chapitre précédent.

Les terrains constituant la région d'El Bayadh ont des perméabilités très variables qui vont de perméabilité d'interstice, de la perméabilité de fissure et à celle de mixte et jouent aussi un rôle hydrogéologiques important dans la ressource hydriques souterraines donnant ainsi un système d'aquifère complexe multicouche.

Dans cette partie, nous nous sommes basés sur le travail de Maziz (2007) pour représenter les formations aquifères de la région d'El Bayadh et à l'aide de la carte de Cornet (1952) à l'échelle

1/200000 qui nous permet de présenter ces formations à intérêts hydrogéologiques de la région d'El Bayadh.

La région d'El Bayadh distingue des formations potentiellement aquifères de bas en haut (fig. 22) :

1. Le réservoir de Grés du Jurassique (Lusitanien) (J^{5-1}) à perméabilité mixte.
2. Le réservoir des grés et des calcaires jurassiques (Lusitanien et Kimméridgien indifférenciés) (J^{6-5}) à perméabilité mixte et de fissure et les calcaires du Kimméridgien (J^6) à perméabilité de fissure.
3. Le réservoir de grés de l'infra Crétacé (Cv) à perméabilité mixte.
4. Le réservoir des grés de l'Hauteriviens (C_{III}) à perméabilité mixte. .
5. Le réservoir des calcaires de l'Hauteriviens (C_{III}) à perméabilité de fissure. .
6. Le réservoir de grés à dragées du Barrémo-Apto-Albien (C^{3-1}) à perméabilité mixte.
7. Le réservoir du Tertiaire continental (Tc) à perméabilité d'interstice.
8. Le réservoir des alluvions quaternaire (q) à perméabilité d'interstice, moins important point de vue épaisseur et perméabilité que celui du tertiaire.

La présentation ci-dessus des différents réservoirs dans la région d'El Bayadh dans le sens vertical, permet l'identification des formations non réservoirs ou imperméables qui se présentent comme suit ;

1. Les formations marno-calcaires du callovien inférieur
2. Les formations marneuses, argileuses et calcaires du Valanginien qui sont dans l'ensemble imperméables ; leurs bancs calcaires lorsque l'épaisseur est importante sont réservoirs et exploités par les agriculteurs.

AGE		EPAISSEUR (m)	LITHOLOGIE	DESCRIPTIONS
TERTIAIRE	Quaternaire	■	q	peu perméable
	Tertiaire	10-20	Cc	Perméabilité de fissure
	Tertiaire continental	30-40	Tc	Perméabilité d'interstice
CRETACE	Barremo-Albc -Aptien	800-1000	C3-1	Perméabilité d'interstice et de fissure
	Hauterivien calcaire	40-50	Ci-ii	Perméabilité de fissure
	Hauterivien gréseux	150	Ciii	Perméabilité d'interstice et de fissure
	Valanginien	550	Civ	Imperméable dans l'ensemble mais présente une ressource limitée par localité quand l'épaisseur des calcaires le permet.
JURASSIQUE	Infra-Crétacé	500-600	Cv	Perméabilité d'interstice et de fissure
	Kimmeridgien	50	J6	Perméabilité de fissure
	Kimmeridgien et Lusitanien sup	40	J6-5	Perméabilité d'interstice et de fissure
	Lusitanien	1000	J5-2	Perméabilité d'interstice et de fissure
	Callovien inférieur	30	J1	Imperméable



Figure 222 : log hydrogéologique de la région d'El Bayadh

V-Carte piézométrique du bassin versant de l'oued El Bayadh :

La réalisation de la carte piézométrique est établie à la base des données fournies par le bureau d'étude Géo-water en 2003 de près de 400 points d'eau (fig. 23). Elle nous révèle deux axes de drainages principaux ;

Un premier axe de drainage principal qui va du centre du bassin versant avec une orientation SO-NE et un deuxième axe de drainage principal qui va en sens presque opposé du premier axe avec

une direction ENE-OSO, les deux axes de drainages empruntent la partie axiale du synclinal dans notre bassin versant.

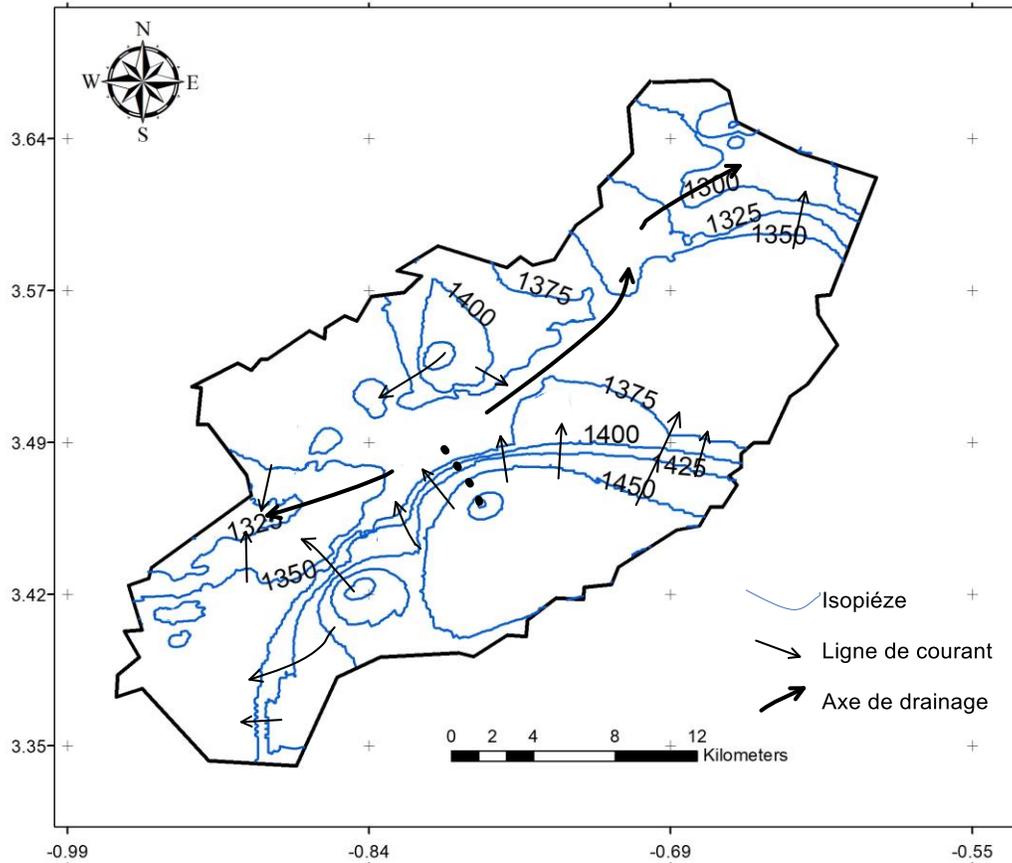


Figure 23 : Carte piézométrique du bassin versant de l'oued El Bayadh

Conclusion

Nous concluons concernant l'aperçu géo-structural et hydrogéologique, que la région d'El Bayadh présente un ensemble de formation géologique, qui débute par : les marno-calcaires du Callovien inférieur, les Grès du Lusitanien, les Grès et calcaires du Lusitanien sup- Kimméridgien, les calcaires du Kimméridgien, les Grès de l'infra-crétacé, les marno-calcaires du Valanginien, les Grès de l'Hauterivien, les calcaires de l'Hauterivien, les Grès du Barrémo-Apto-Albien, les argiles

sableuse du Tertiaire. Elle se termine par les argiles sableuses des alluvions anciennes et récentes du Quaternaire.

Les formations gréseuses du Jurassique et les calcaires du Jurassique-Crétacé présentent une dense fracturation avec une même direction de Nord 80° Est à 100° Est. Ces fracturations assurent une bonne alimentation des nappes du synclinal en particulier du Jurassique.

La région d'El Bayadh distingue des formations potentiellement aquifères de bas en haut ;

- Le réservoir de Grés du Jurassique (Lusitanien) (J^{5-1}) à perméabilité mixte.
- Le réservoir des grés et des calcaires jurassiques (Lusitanien et Kimméridgien indifférenciés) (J^{6-5}) à perméabilité mixte et de fissure et les calcaires du Kimméridgien (J^6) à perméabilité de fissure.
- Le réservoir de grés de l'infra Crétacé (C_V) à perméabilité mixte.
- Le réservoir des grés de l'Hauteriviens (C_{III}) à perméabilité mixte. .
- Le réservoir des calcaires de l'Hauteriviens (C_{III}) à perméabilité de fissure. .
- Le réservoir de grés à dragées du Barrémo-Apto-Albien (C^{3-1}) à perméabilité mixte.
- Le réservoir du Tertiaire continental (T_c) à perméabilité d'interstice.
- Le réservoir des alluvions quaternaire (q) à perméabilité d'interstice, moins important point de vue épaisseur et perméabilité que celui du tertiaire

Nous concluons aussi que les formations imperméables dans l'ensemble comme les marno-calcaires du Valanginien diffèrent de celle du callovien inférieur par leurs bancs calcaires qui peuvent être aquifères par localité lorsque la consistance de leurs épaisseurs le permet.

PARTIE II :

**ETUDE QUALITATIVE DES EAUX SOUTERRAINES DE LA REGION
D'EL BAYADH**

I- Introduction

« *Nous buvons 90% de nos maladies* », disait Louis PASTEUR.

L'eau est aujourd'hui l'aliment le plus contrôlé aux exigences les plus sévères au monde, en effet bien que l'élément le plus convoité par l'humanité, cette molécule présente néanmoins des défauts. Elle se trouve être le siège de nombreux agents infectieux, des produits chimiques toxiques causant la mort des millions d'individus chaque année. D'après l'Organisation Mondiale de la Santé cinq millions de nourrissons et d'enfants meurent chaque année des maladies diarrhéiques dues à la contamination des aliments ou de l'eau de boisson, de ce fait l'eau doit être conforme vis-à-vis d'un ensemble de normes de potabilité. Ce chapitre sera concret à l'évaluation des eaux souterraines pour leurs aptitudes à la consommation et à l'irrigation et leurs évolutions dans le temps.

Dans un premier temps, nous présenterons la méthodologie adoptée dans notre travail, présentation du traitement des analyses physico-chimiques (Bonnes Analyses) et pour en finir nous avons effectué une comparaison des analyses avec les normes de potabilité algériennes (2011) et de l'OMS(2017).

Les normes de qualité : L'appréciation de la qualité des eaux de surface se base sur la mesure de paramètres physico chimiques et chimiques ainsi que sur la présence ou l'absence d'organismes et de microorganismes aquatiques (Devillers et al, 2005). La qualité d'une eau se définit par des paramètres physiques, chimiques et biologiques, mais également par son usage. Aussi, une eau impropre à la consommation peut être adaptée à l'irrigation ou à la pisciculture. La qualité physico-chimique de l'eau informe sur la localisation et l'évaluation d'un niveau de pollution, en fonction d'un ensemble de paramètres. Basée sur des valeurs de référence, elle s'apprécie à l'aide de plusieurs paramètres :

- **Qualité physique :** turbidité, couleur, odeur, température, conductivité et salinité
- **Qualité chimique :** pH, sels minéraux, matière organique (Demande Biologique en Oxygène en 5 jours), oxygène dissous, nutriments (nitrites, nitrates, ammonium, phosphate, silice), pesticides, etc.

Les eaux destinées à la consommation humaine, qu'elle soit distribuée par un réseau public ou en bouteille, doit donc être conforme à des normes très strictes, élaborées par les autorités compétentes, qui fixent en particulier pour un grand nombre de paramètres microbiologiques,

physiques et chimiques. Un paramètre est un élément dont on va rechercher la présence et la quantité.

Qu'est-ce qu'une norme : La norme est représentée par un chiffre qui fixe une limite supérieure à ne pas dépasser, ou une limite inférieure à respecter. CMA est Concentration maximale admissible (maximale autorisée pour un élément). (Aubril Carhon, L.2013). Les normes de l'eau diffèrent selon les pays car elles dépendent de plusieurs facteurs. Cependant, l'OMS, en publiant ses directives de qualité pour l'eau de boisson, laisse aux autorités compétentes des pays le soin d'établir des normes nationales en fonction des facteurs environnementaux économique, socio-culturel et écologique. Mise à part les normes internationales de l'OMS qui sont prise en considération par de multiple pays, ils existent également des normes de potabilité de l'eau pour l'union européenne qui sont également utilisées.

Les indicateurs de qualité : La qualité de l'eau est caractérisée du point de vue physico-chimique, biologique, au sein des programmes humanitaires le terme de qualité se pose essentiellement en termes de consommation humaine et d'irrigation. L'étude du chimisme des eaux permet d'identifier les faciès chimiques des eaux, leur qualité de potabilité, ainsi que leur aptitude à l'irrigation. Elle permet de suivre aussi l'évolution spatiale des paramètres physico-chimiques et d'estimer leur origine en les corrélant avec la géologie et la piézométrie (Bahir et al, 2003), On note bien que l'hétérogénéité lithologique de l'aquifère joue un rôle très important, sans doute, sur les variations des caractéristiques chimiques de ces eaux.

Les moyens pour estimer la qualité des eaux sont les suivants :

- Les analyses physico-chimiques
- L'enquête sanitaire, et les analyses bactériologiques

Pour la caractérisation du milieu des eaux souterraines, les indicateurs sont les suivants :

- pH
- La Température
- La conductivité
- Les Cations et Anions
- Et les éléments en traces

Pour l'aptitude en vue de caractériser à l'irrigation, il y a :

- La conductivité

- Les cations

La contamination et la pollution des eaux souterraines sont liées à la présence d'un altéragène dans le milieu, causant une altération de la qualité de l'eau souterraine. La contamination ne devient pollution que lorsque cette altération présente des effets de nuisance ou de gêne envers l'utilisateur, et provoque un risque pour sa santé, et compromet ainsi l'utilisation de cette eau (Simard *et al.* 1977 in Duchaine, 1998). C'est l'ensemble des actions directes ou indirectes susceptibles d'apporter une dégradation des paramètres caractéristiques de l'eau. Cette mauvaise qualité de l'eau peut être due majoritairement par les activités anthropiques ou par des phénomènes naturels où certains éléments dépassent les normes. La pollution peut être fonction de sa répartition :

- Elle est diffuse, lorsqu'elle se présente de faible intensité mais sur une grande surface c'est le type de pollution le plus courant et provient le plus souvent dans les activités agricoles (l'utilisation des herbicides, insecticides).
- Elle peut être également locale, lorsqu'elle se concentre en un seul lieu.

Ainsi on distingue différentes natures de polluants sont : les polluants chimiques minéraux (tous les éléments solubles) ou organiques (matière organique, hydrocarbures, organochlorés...); les polluants biologiques (bactéries, virus et champignons); et les polluants physiques (matières en suspension, la température, la radioactivité...).

II. Présentation des données :

II.1 Moyens et méthodologie

Cette partie de notre étude est basée sur l'interprétation des analyses chimiques effectuée par le laboratoire d'analyse Laboratoire ADE de la wilaya d'El Bayadh. Les prélèvements ont été effectués au niveau des forages répartis sur la commune d'El Bayadh, à des fins de consommation humaine. Pour mieux appréhender et atteindre notre objectif sur le suivi qualitatif, deux séries temporelles ont été choisies ; la première est datée de 2018 sur 18 forages, la seconde est en 2019 et elle concerne 20 forages :

Les analyses physico-chimiques sont pour les éléments majeurs : les cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} , NH_4^+) et des anions (Cl^- , SO_4^{2-} , NH_4^- , NO_2^- , NO_3^- , PO_4^{-3}), le pH, température, la conductivité et la turbidité.

Ces analyses présentent un manque de deux éléments ; l'élément de sodium (Na^+) et celui du potassium (K^+) au niveau des cations et ceux-ci pour les analyses effectuées en 2018 et 2019, il s'avère donc que l'étude hydrochimique est impossible donc une étude qualitative est établie.

Pour l'interprétation et la vérification des analyses physico-chimiques, nous avons utilisé la méthode du rapport de Conductivité (CE/100), elle donnera dans la plupart des cas, une bonne estimation de la qualité de l'analyse (Appelo et Postma, 2005).

Notre travail consistera en premier lieu à présenter l'évolution temporelle et la variation spatiale des paramètres physico-chimiques, et en second lieu nous effectuerons une comparaison des données avec les normes de potabilité algériennes pour évaluer l'aptitude à la consommation et à l'irrigation. Dans notre travail, nous n'avons pas la possibilité de calculer les indices d'irrigation (tel que le SAR, le Kelly's Ratio (KR)), ni de déterminer les différents faciès hydro-chimique de ces eaux.

III Fiabilité des analyses physico-chimiques

La vérification de la fiabilité de l'analyse a été vérifiée en utilisant la méthode du rapport de conductivité. Cette méthode étant la seule dont nous pouvons utiliser pour vérifier la pertinence des analyses et éliminer les mauvaises analyses pour une bonne évaluation du traitement.

Elle consiste à effectuer le rapport de la Conductivité Electrique (CE) par 100, selon les résultats on peut en déduire de l'état des analyses :

- Cond/100 égale à la somme des anions ou à la somme des cations= Bonne analyse
- $\text{Cond}/100 <$ à la somme des anions ou à la somme des cations nous avons une sur estimation des concentrations des éléments majeurs.

Les données physicochimiques sont étudiées dans un graphe elle permet de mieux apprécier la fiabilité des analyses pour toute utilisation. Cette méthode est appliquée pour les deux séries de campagne (2018-2019).

Pour valider les analyser et la réalisation des graphes, on procède par :

- La présentation du rapport CE/100 sur l'axe des Y en fonction de la somme des anions (vue qu'il y a un manque dans les cations) sur l'axe des X, cela nous permet de visualiser la dispersion du nuage de points au tour de la droite $\text{CE}=\Sigma\text{anions}$.

- La réalisation des droites $(CE/100 = (\sum r^-) + 1.5)$ et $(CE/100 = (\sum r^-) - 1.5)$, ces deux droites comportes en ordonné le rapport CE/100 et en abscisse la somme des anions ± 1.5 .
- L'obtention de l'intervalle où le rapport CE/100 et la somme des anions sont bien corrélés ce qui signifie que l'analyse est bonne, en dehors de ces deux droites, les analyses sont inacceptables.

Ainsi les analyses acceptables retenues pour l'année 2018 des forages sont (figure 23) : Hayat, F5, Mouley AEK, Mouilha 2, Hodhna (F1), Hodhna (F3), Hodhna (F4), Hodhna (F5).

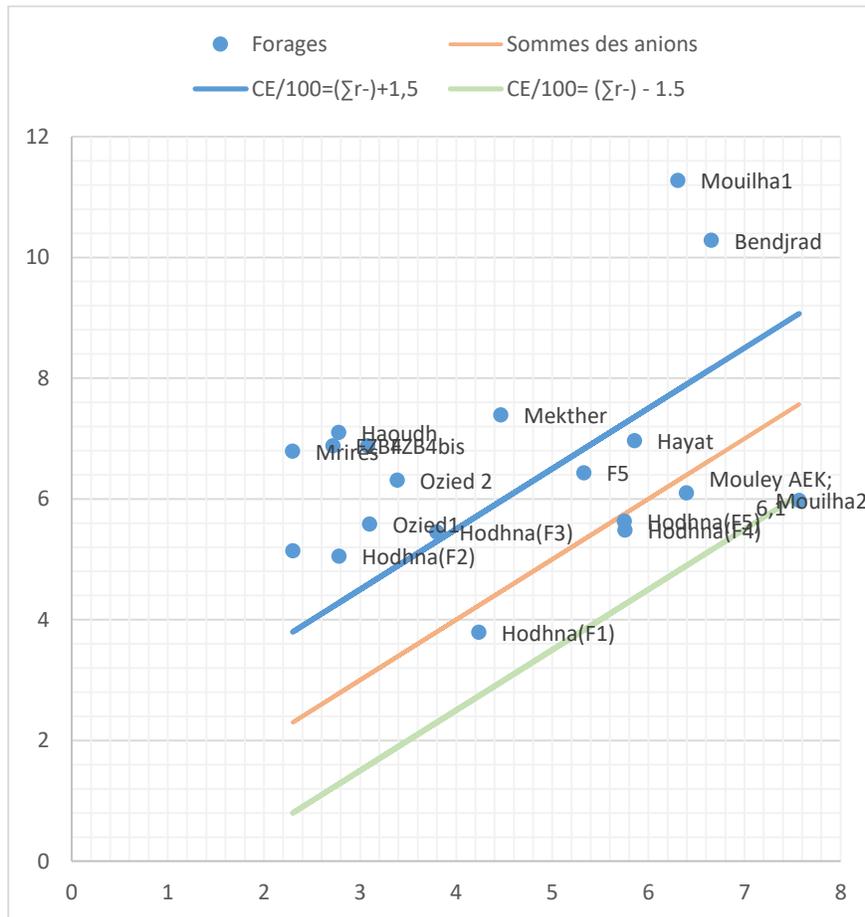


Figure 23 : CE = f (Σ anions) et validation des données 2018

Les analyses acceptables retenues pour l'année 2019 des forages sont (figure 24) : F5, Mouley AEK, Mouilha 2, Ozied 2, Ozied 1, Bendjrad, FZB4 bis, Hodhna (F1), Hodhna (F2), Hodhna (F3), Hodhna (F4), Hodhna (F5), Haoudh.

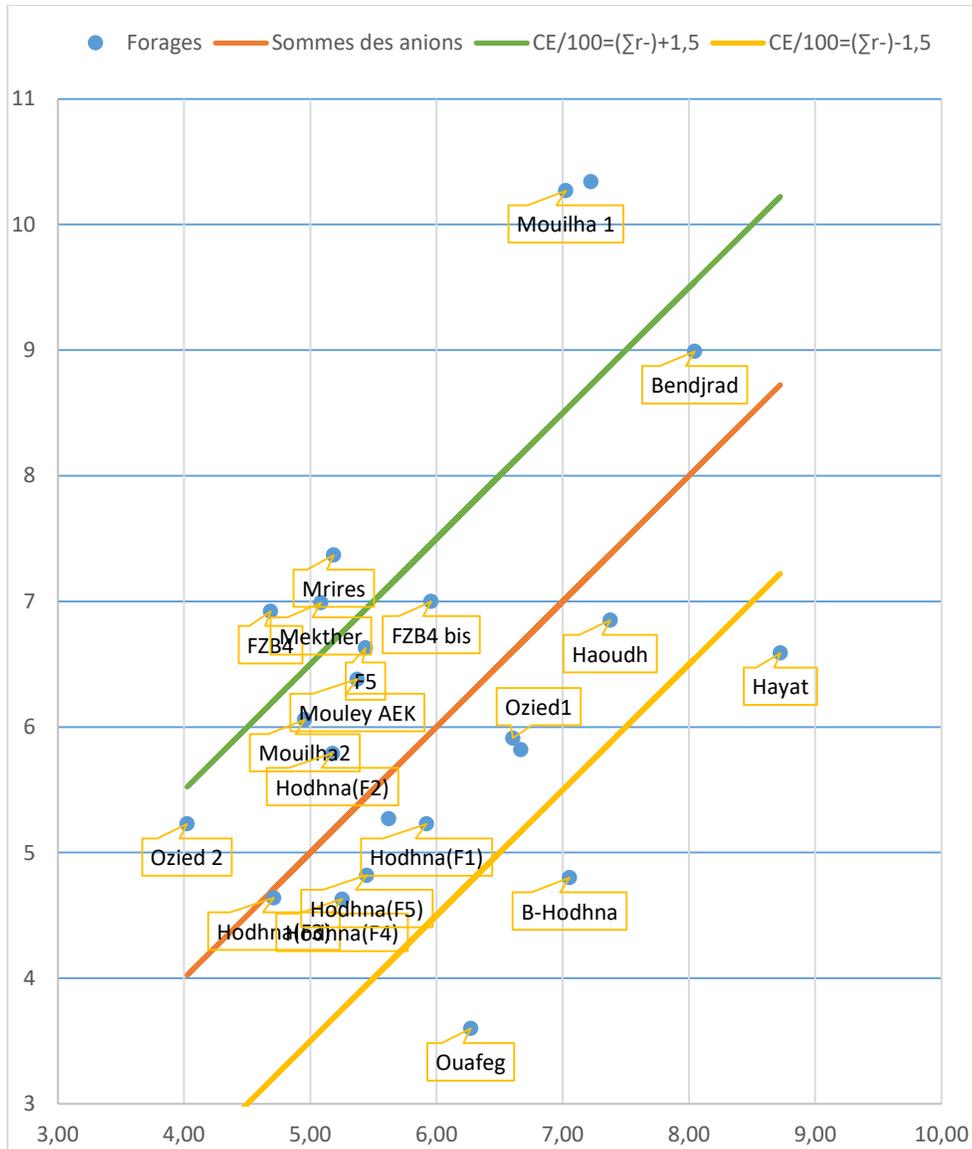


Figure 24 : CE = f(Σ anions) et validation des données 2019

Les résultats des calculs des rapports de conductivité CE/100 (tableau 18) montrent que les analyses de la campagne de 2019, sont majoritaires par rapport à celle de 2018 qui sont moins nombreux

Tableau 18: Classification des données physico-chimiques de la région d'El Bayadh

CE/100	Analyses acceptables	Mauvaises Analyses
2018	Hayat, F5, Mouley AEK, Mouilha 2, Hodhna (F1), Hodhna (F3), Hodhna(F4), Hodhna(F5)	Mrires, Mouilha 1, Ozied 1, Ozied 2, Bendjrad, FZB4, FZB4bis, Hodhna (F2)
2019	F5, Mouley AEK, Mouilha 2, Ozied 2, Ozied 1, Bendjrad, FZB4 bis, Hodhna (F1), Hodhna(F2), Hodhna (F3), Hodhna (F4), Hodhna (F5), Haoudh.	Mrires, Hayat, Mouilla1, FZB4, B-Hodhna, Mekther, Ouafeg

Après vérification de la fiabilité des données des deux séries par cette méthode, nous avons procédé à une présentation des éléments pour évaluer la qualité des eaux souterraines.

IV- Caractérisation physico-chimiques des eaux souterraines

Les différents histogrammes représentent l'évolution spatio-temporelle des éléments chimiques des eaux souterraine de la commune d'El Bayadh des deux années :

IV-1. Paramètres physico-chimiques

IV-1-1. Température

Il est important de connaître la température de l'eau avec une bonne précision. En effet, celle-ci joue un rôle dans l'augmentation de l'activité chimique dans la solubilité des sels et surtout des gaz, dans la dissociation des sels dissous donc sur la conductivité électrique, dans la détermination du pH, et des activités bactériennes et de l'évaporation de l'eau. (Rodier J., 2009).

Les valeurs de la température varient entre 13.5 et 23.9°C.

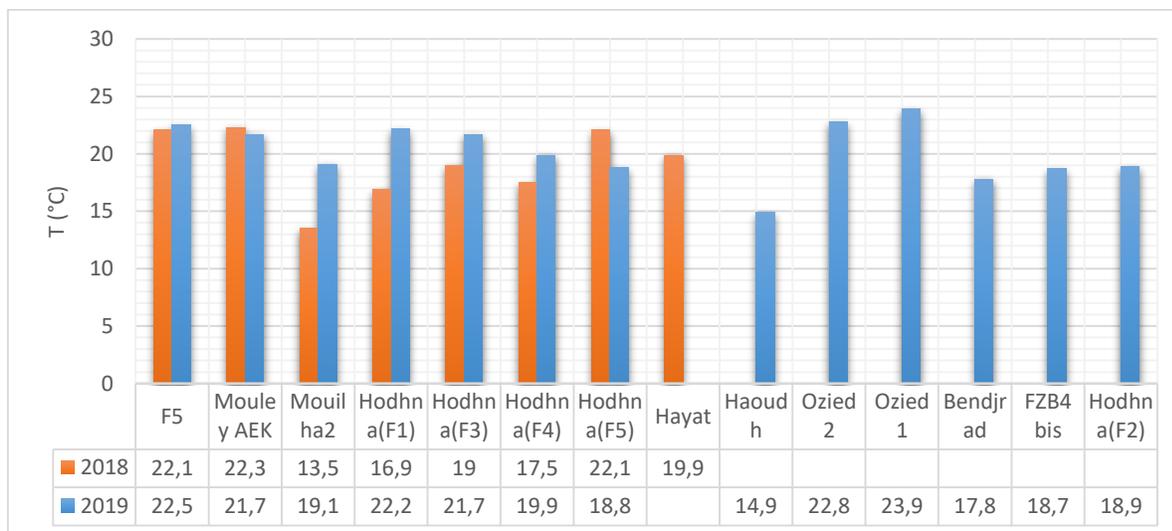


Figure 25: Variation spatio-temporelle de la température

IV-1-2. Potentiel d'hydrogène pH

Le pH se situe entre 6 et 8,5 dans les eaux naturelles (Chapman et al, 1996). Les valeurs de pH mesuré égales ou légèrement supérieures à 7 en 2018, en revanche il varie entre 6.73 (Ozied2) et 8.22 (Ozied 1) durant l'année 2019.

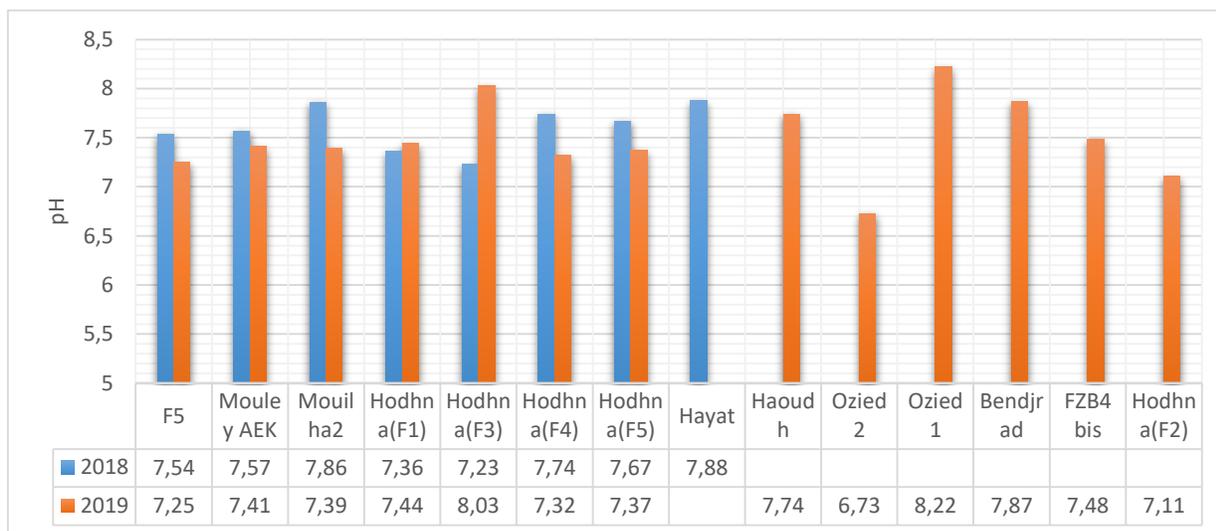


Figure 26: Variation spatio-temporelle du pH

IV-1-3. Conductivité électrique C.E

Avec des valeurs comprises entre 379 et 696 ($\mu\text{s/cm}$) en 2018 et en 2019 des valeurs de 463 et 899. Le maximum de la conductivité est enregistré en 2019, elle est de 899 $\mu\text{s/cm}$ au niveau de Bendjrad. Cette conductivité comprise entre 400 à 750($\mu\text{s/cm}$) traduit une concentration en sel dissoute. La conductivité au sein des forages connait un faible changement au cours des années.

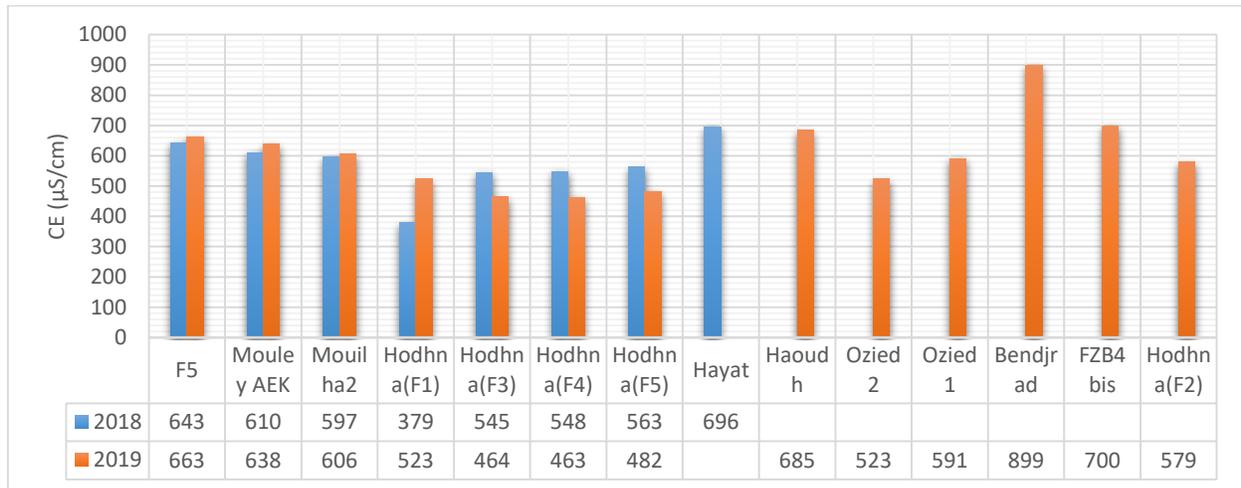


Figure 27 : Variation spatio- temporelle de la conductivité

IV-1-4. Minéralisation

Elle est liée de la géologie des terrains traversés. En générale, elle est plus élevée dans les eaux souterraines que dans les eaux superficielles. La mesure de la conductivité permet d'évaluer rapidement mais approximativement la minéralisation globale (Rodier J., 2009).

Tableau 19: Classification des eaux selon la conductivité (Rodier.2009)

Conductivité électrique	Minéralisation
Si la conductivité < 100	Minéralisation très faible
100 < Conductivité < 200	Minéralisation faible
200 < Conductivité < 330	Minéralisation moyenne
330 < Conductivité < 660	Minéralisation moyenne accentuée
660 < Conductivité < 1000	Minéralisation importante
Si la conductivité > 1000	Minéralisation excessive

Tableau 20: Détermination de la minéralisation à partir de la conductivité (Rodier J.2009)

Conductivité (µs/cm)	Minéralisation
Conductivité < 50	1,365079 x Conductivité à 20°C
50 < Conductivité < 166	0,947658 x Conductivité à 20°C
166 < Conductivité < 333	0,769574 x Conductivité à 20°C
333 < Conductivité < 833	0,71592 x Conductivité à 20°C
833 < Conductivité < 1000	0,758544 x Conductivité à 20°C
Conductivité > 1000	0,850432 x Conductivité à 20°C

Les valeurs de la conductivité montrent que les eaux de la commune d'El Bayadh sont caractérisées par une minéralisation moyenne accentuée ou importante (tableau 21, 22 et figure 28). Les concentrations les plus élevées sont estimées aux niveaux des forages de Bendjrad, FZB4bis et Hayat.

Tableau 21 : Détermination de la minéralisation à partir de la conductivité de la commune d'El Bayadh (2018)

Conductivité (µs/cm)	Minéralisation calculée (mg/L)	Forages
643	460,33656	F5
610	436,7112	Mouley AEK
597	427,40424	Mouilha2
379	271,33368	Hodhna(F1)
545	390,1764	Hodhna(F3)
548	392,32416	Hodhna(F4)
563	403,06296	Hodhna(F5)
696	498,28032	Hayat

Tableau 22: Détermination de la minéralisation à partir de la conductivité de la commune d'El Bayadh (2019)

Conductivité (µs/cm)	Minéralisation calculée (mg/l)	Forages
663	474,65496	F5
638	456,75696	Mouley AEK
606	433,84752	Mouilha2
523	374,42616	Hodhna(F1)
464	332,18688	Hodhna(F3)
463	331,47096	Hodhna(F4)
482	345,07344	Hodhna(F5)
685	490,4052	Haoudh
523	374,42616	Ozied 2
591	423,10872	Ozied 1
899	681,931056	Bendjrad
700	501,144	FZB4 bis
579	414,51768	Hodhna(F2)

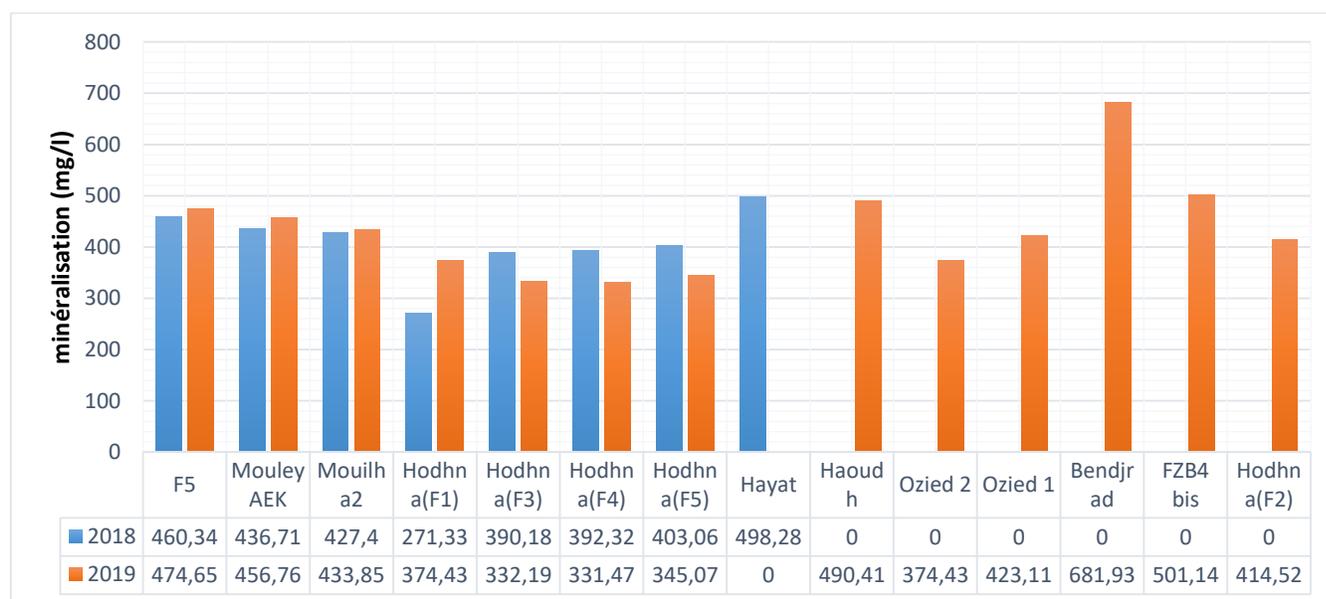


Figure 28: Variation spatio- temporelle de la minéralisation

IV-1-5. Dureté Totale

C'est est la concentration totale en ions calcium Ca²⁺, magnésium Mg²⁺ et autres cations bivalents et trivalents de cette eau. Elle est mesurée par la somme des concentrations en degré de calcium et de magnésium et s'exprime par le titre hydrométrique (TH) (WHO, 1994). Elle est donnée en degré français avec 1°F= 10mg/L CaCO₃.

Tableau 23: Classification des eaux selon leur dureté totale en F° (OMS, 1994)

Dureté totale en (°F)	0 à 5	5 à 15	15 à 25	25 à 35	≥ 35
Type de l'eau	Très douce	Douce	Moyennement douce	Dure	Très dure

Les résultats des analyses présentent une dureté allant de 28°F (Mouley AEK) à 36°F (Hayat) enregistre en 2018 et de 28 (Hodhna (F1)) à 50°F (Bendjrad) pour les résultats en 2019. Selon ces valeurs de la dureté totale (ou titre hydrométrique TH) des eaux, les eaux souterraines de la commune d'El Bayadh présentent des eaux dures à très dure. On constate une nette et légère variation de la dureté de l'eau entre les deux périodes. Le forage de Bendjrad comporte des eaux les plus dures dans notre sélection (figure 29).

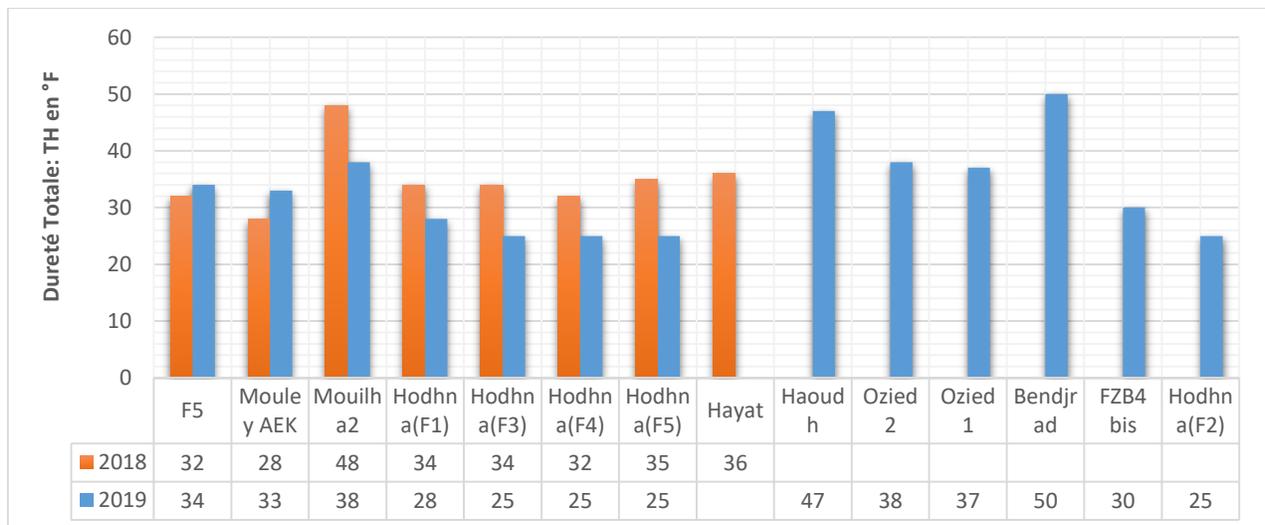


Figure 29: Variation spatio- temporelle de la dureté TH

IV-2. Ions majeurs

IV-2-1. Calcium (Ca⁺²)

C'est un métal alcalino-terreux extrêmement répandu dans la nature et en particulier dans les roches calcaires sous forme de carbonates. Il est le composant majeur de la dureté de l'eau, et est généralement l'élément dominant des eaux potables (Rodier, 2009). Le calcium provient en générale de la dissolution des carbonates ou gypses.

Les concentrations en calcium des eaux souterraines d'El Bayadh varient en 2018 entre 40.08 (Hodhna (F5)) et 112.22mg/L (Mouilha 2), en 2019 elle est comprise entre 48.096 mg/L (Hodhna (F5)) et 100.2mg/L (Haoudh et Ozied 1) (figure 30).

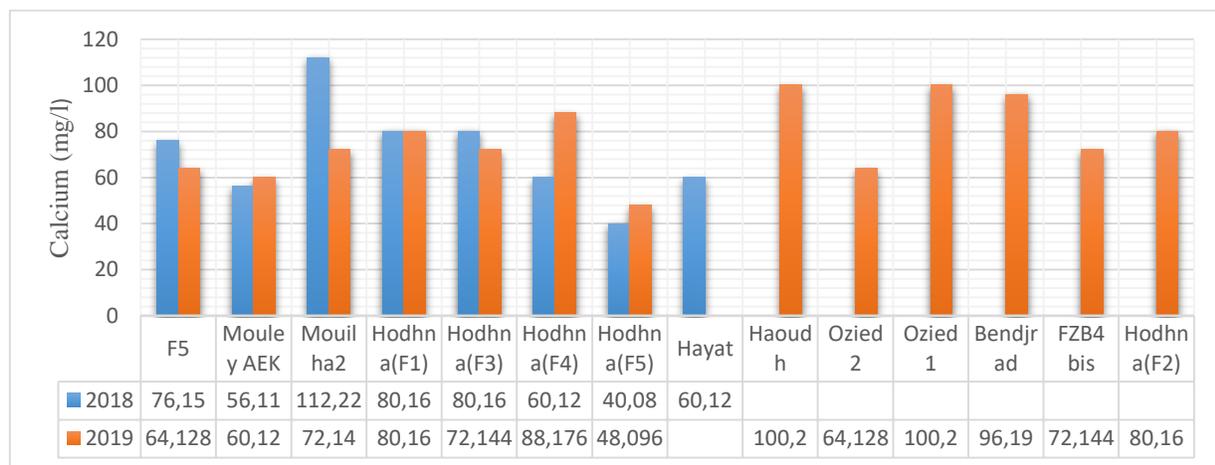


Figure 30: Variation spatio- temporelle de l'ion calcium

IV-2-2. Magnésium (Mg⁺²)

Egalement métaux alcalino-terreux, avec le calcium elles constituent la dureté d'une eau, représente le tiers de la dureté totale. Le magnésium provient de la dissolution des roches à forte teneurs en magnésium (des calcaires dolomitiques, magnésite), en eau douce, les concentrations en magnésium sont inférieurs au calcium (Ganjous, 1995). La commune d'El Bayadh présente des eaux avec des teneurs en magnésium en 2018 avec un minimum enregistré de 31.59mg/L sur le forage (F5) et un maximum de 60.75mg/L sur le forage (Hodhna (F5)), en 2019 elle est comprise entre 7.29mg/L sur le forage (Hodhna (F4)) et un maximum de 53.46mg/L sur le forage (Haoudh) (figure 31).

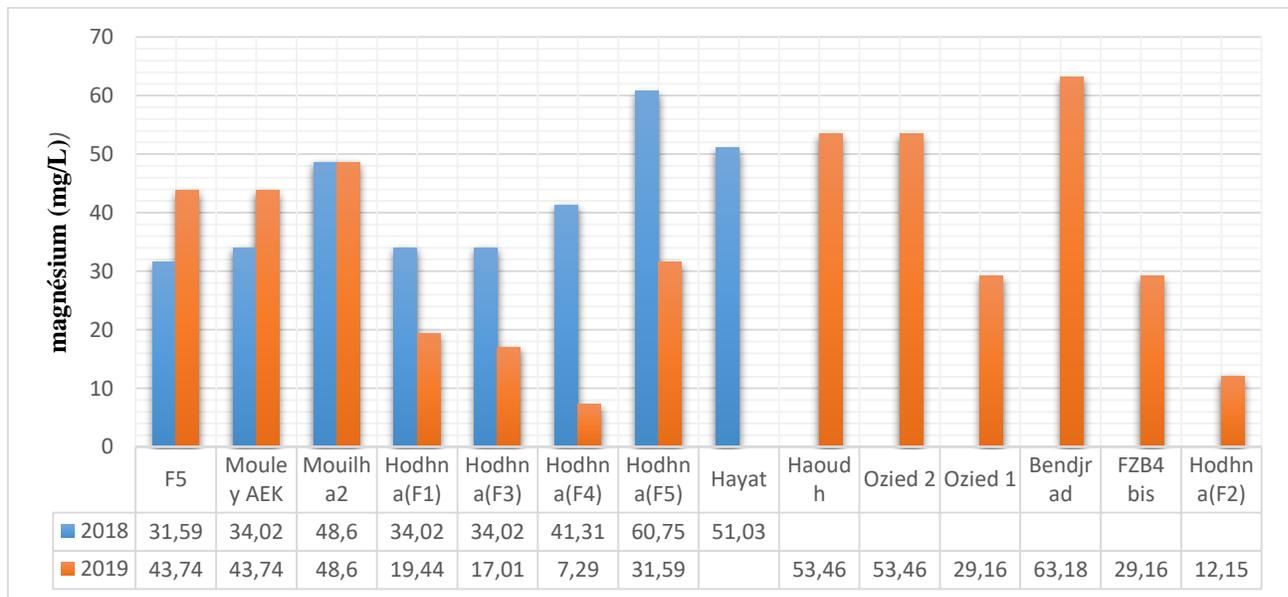


Figure 31: Variation spatio- temporelle de l'ion magnésium

IV-2-3. Chlorure (Cl⁻)

L'ion Cl⁻ est présent en petite quantité sur la Terre, il provient suite à la dissolution de roches sédimentaires qui se sont déposées en milieu marin et qui n'ont pas été complètement lessivées, et à la présence d'évaporites.

Les valeurs des teneurs en chlorures des eaux de la commune d'El Bayadh sont relativement basses pour la plus parts des forages. La teneur maximale est enregistrée au niveau du forage de Mouillah2 avec une valeur de 110.05mg/L en 2018 mais en 2019 les teneurs en chlorures présentent un maximum de 159.75mg/L au niveau du forage de Bendjrad. Il est à noter une importante augmentation des teneurs du Cl⁻ au niveau du Hodnah F1 et Hodnah F3 (figure 31).

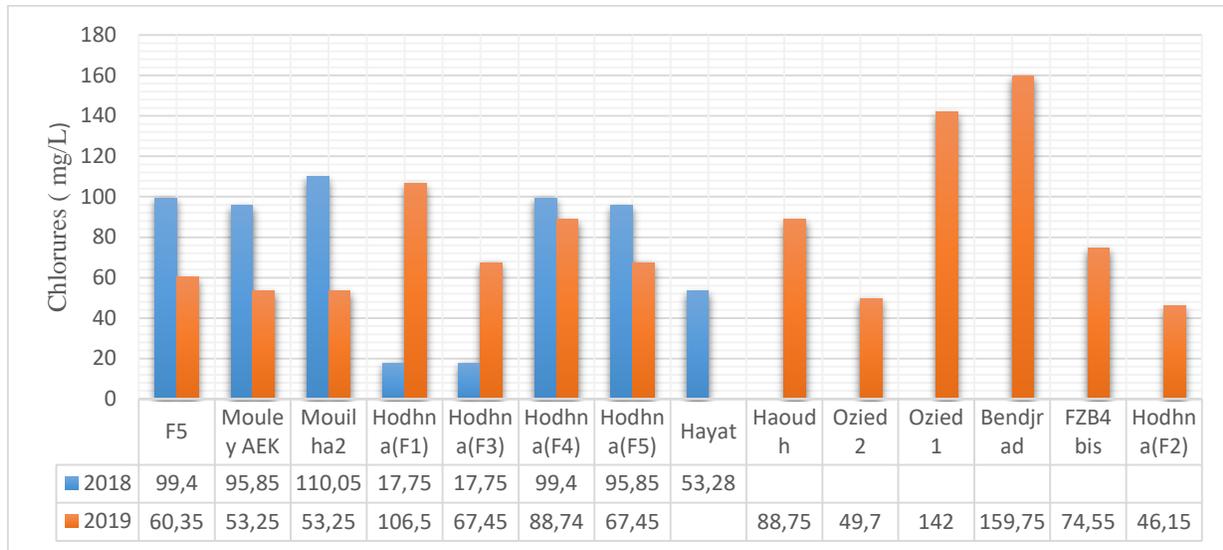


Figure 32 : Variation spatio-temporelle de l'ion chlorure

IV-2-4. Sulfates (SO₄⁻²)

Elle est présente dans l'eau suite à la dissolution de certains minéraux en particulier du gypse, où apparaît à partir de l'oxydation de minéraux sulfureux. Contrairement aux ions chlorures, les teneurs en sulfates sont relativement élevées dans les eaux de la commune d'El Bayadh. Pour l'année 2018 le minimum enregistré est de 116.24 mg/L sur le forage (F5) et un maximum de 209.4mg/L sur le forage (Mouillah 2), les concentrations en 2019 sont également élevées pour la majorité des forages, elles varient entre 119.04mg/L sur le forage (Hodhna (F4)) et 214.83mg/L sur le forage (Haoudh) (figure 33).

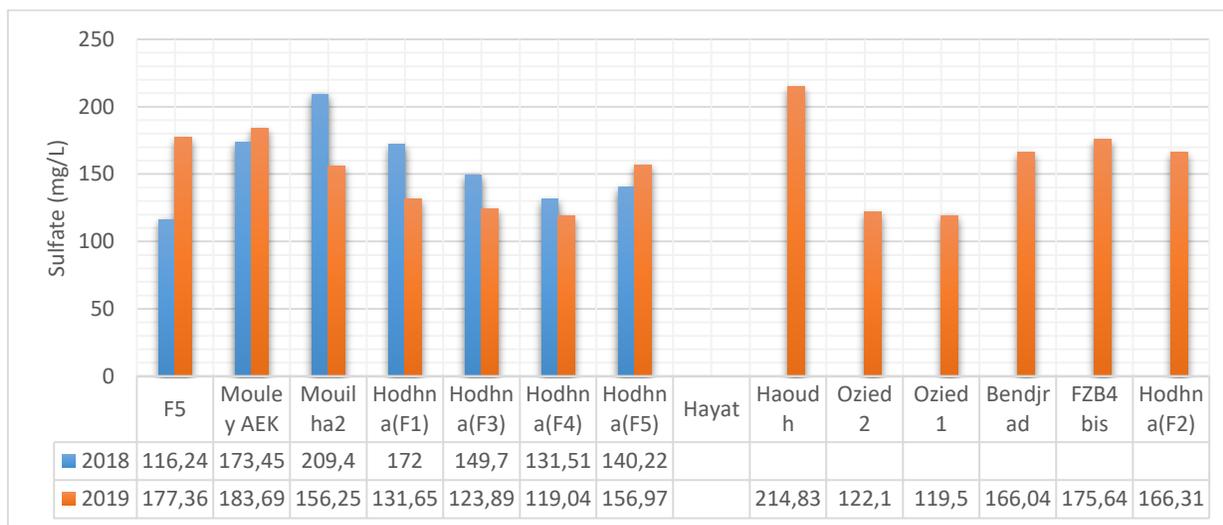


Figure 33: Variation spatio-temporelle de l'ion sulfate

IV-3. Ions indicateurs de pollution

IV-3-1. Ammonium (NH₄⁺)

L'ammonium n'a pas un effet appréciable sur la santé du consommateur mais sa présence dans les eaux est un indicateur de pollution, son origine primordiale est l'azote élément important dans la vie végétale C'est un cation qui provient de la dissolution de l'ammoniac (NH₃) dans l'eau (WHO, 1994).

Il doit être éliminé dans les eaux de boisson car c'est un élément qui favorise la prolifération des bactéries dans les réseaux de distribution (Jean J-C, 2002).

Il est important d'éliminer l'ammonium avant l'introduction de l'eau dans le réseau car l'ammonium réagit avec le chlore pour produire des chloramines qui sont des désinfectants moins efficaces et peuvent provoquer des goûts désagréables (Paquin ; Blok et Haudidier, 1992).

C'est un excellent indicateur de la pollution de l'eau par des rejets organiques d'origine agricole, domestique ou industriel (Lenntech, 2000).

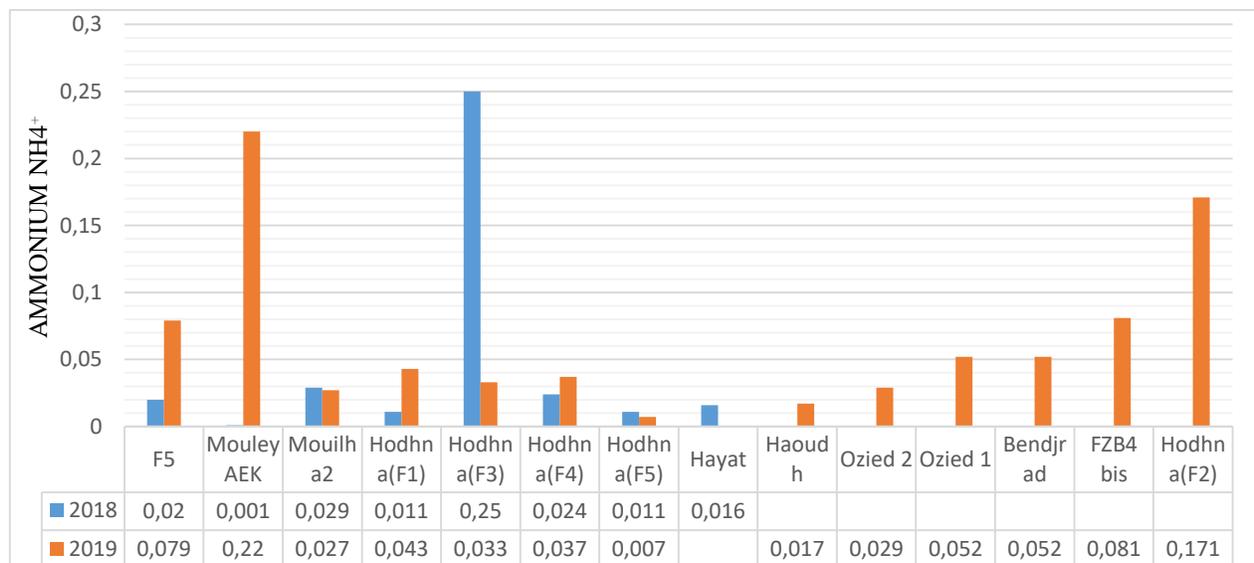


Figure 34: Variation spatio- temporelle de l'ammonium

Dans les eaux souterraines de la commune d'El Bayadh, les teneurs en ammonium sont faibles voir nul 0.007mg/L sur le forage (Hodhna (F5)) pour les deux années, sauf les forages Hodhna (F3) qui

présente la teneur la plus élevée de 0.25mg/L en 2018 et le forage Mouley AEK avec une teneur de 0.22 mg/L et forage Hodhna (F2) avec une teneur de 0.17 mg/L, valeurs élevées en 2019.

IV-3-2. Nitrates (NO₃⁻)

En général la présence dans les eaux souterraines est liée à l'utilisation des engrais chimiques dans l'agriculture et au rejet des eaux usées. Durant les deux périodes, des concentrations en Nitrates s'étalent entre des valeurs comprises 5.1mg/L sur le forage (Mouley AEK) et 11.81 mg/L sur le forage (Hodhna (F4)) en 2018 et entre 1.77mg/L sur le forage (Mouley AEK) et 24.68mg/L sur le forage (Haoudh et Hodnah F2) en 2019. On remarque que l'année 2019 la concentration en nitrate augmente davantage (figure 35).

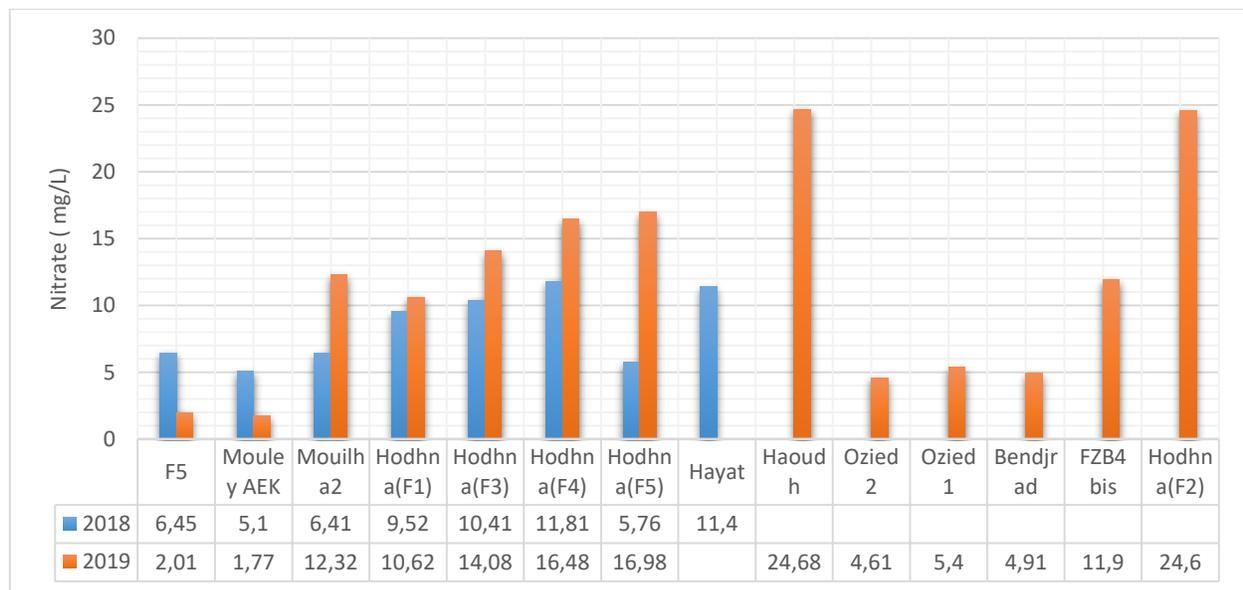


Figure 35: Variation spatio- temporelle des nitrates

IV-3-3. Nitrites (NO₂⁻)

Les nitrites sont des ions présents de façon naturelle dans l'environnement. Ils sont le résultat d'une nitrification de l'ion ammonium (NH₄⁺) (Gaujour, 1995). Elles font partie du cycle de l'azote. Dans les eaux de la commune d'El Bayadh, elles sont très faibles à nulle ou inexistant pour la majorité forages (FZB4 bis) avec 0 mg/l presque égale entre les deux périodes. En 2019 Les valeurs maximales enregistrés sont au niveau du forage (Mouley AEK) avec une teneur de 0.073 mg/L et au niveau du forage (Mouilha2) avec une teneur de 0.066 mg/L, ces deux forages présentaient des concentrations faibles en 2018, pour le forage (Mouley AEK) avec une teneur de 0.011 mg/L et

forage (Mouilha2) une teneur de 0.066 mg/L, pour l'année 2018 seul le forage Hayat présente un maximum important 0.076 mg/L. l'élément nitrite a augmenté pour la majorité des forages en 2019.

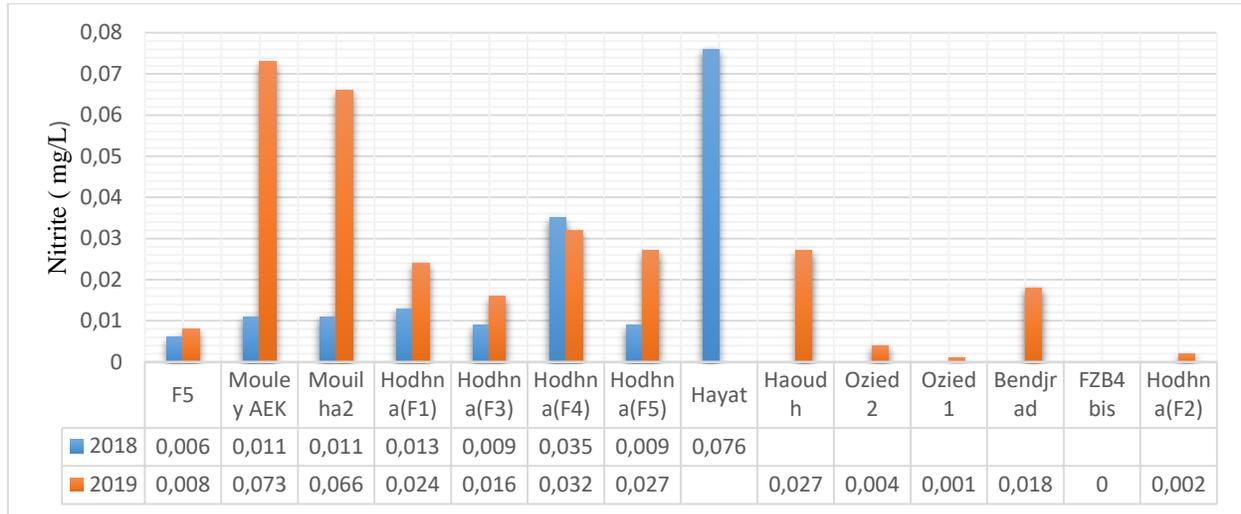


Figure 36: Variation spatio-temporelle du nitrite

IV-3-4. Phosphates (PO_4^-)

Les phosphates sont généralement responsables de l'accélération du phénomène d'eutrophisation dans les lacs ou les rivières. S'ils dépassent les normes, ceux-ci sont considérés comme indice de contamination fécale entraînant une prolifération des germes, goût et coloration (Rodier, 2005).

Leurs concentrations varient de 0.712 et 1.04mg/L pour les forages Hodhna (F4) et Hodhna (F5) en 2018, en revanche l'élément phosphate présente, en 2019, une faible concentration sauf le forage de Ozied1 qui présente une forte teneur de phosphate de 0.70mg/L.

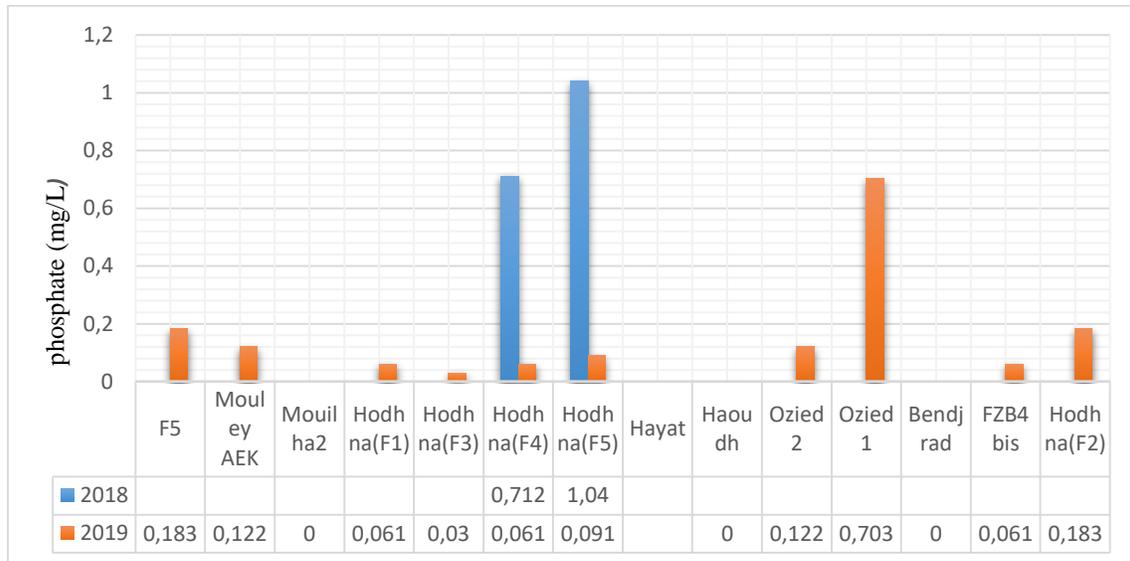


Figure 37: Variation spatio- temporelle du phosphate

V- Qualité des eaux souterraines de la région d'El Bayadh

V-1 Potabilité

L'eau potable doit satisfaire en quantité et en qualité chimique suffisante comprises entre le seuil de tolérance et une qualité microbiologique suffisante. Si un des éléments dépasse la concentration admissible, l'eau peut être considéré comme impropre à la consommation humaine

Les résultats des analyses physico-chimiques des eaux souterraines de la commune d'El Bayadh, de deux années (2018-2019) ont été comparés aux normes de potabilité algériennes (JORA 2011) également aux normes internationales de l'Organisation Mondiale de la Santé (2017).

Le tableau suivant présente les différentes données chimiques, les normes de potabilité et l'interprétation de la qualité de l'eau (potable ou non) selon les différents paramètres :

- Les teneurs en calcium sont comprises dans un intervalle entre 40.08 mg/L et 112.22 mg/L, la majorité des forages répondent aux normes de potabilité algériennes de 200mg/L concentration maximal admissible.
- Les valeurs de magnésium sont comprises entre 7.29 mg/L et 60.75 mg/L. les concentrations prélevées durant les deux années répondent aux normes algériennes.
- La concentration en sulfate présente des concentrations conformes à la norme de potabilité (400mg/l). Le maximum de pour le sulfate enregistre est de 214.83 mg/L.

- Les teneurs en chlorure varient entre 17.75 mg/L et 159.75 mg/L. Ces valeurs sont faibles et inférieures par rapport à la Concentration Maximal Admissible.
- Les concentrations d'ammonium enregistrées montrent des valeurs comprises entre 0.001mg/L et 0.25 mg/L. tous les points d'eau sont conformes aux normes.
- Les teneurs en nitrites et nitrates varient respectivement entre 0.001 mg/L et 0.076 mg/L et pour les nitrates elles sont de 1.77 mg/L et 24.68mg/L. Les valeurs des différents forages sont inférieures aux normes de potabilité pour les nitrites 01mg/L et les nitrates est de 50 mg/l.
- Les valeurs des phosphates sont d'autant faibles voire nulle pour la majorité des forages qui sont conformes aux normes de potabilité, à l'exception de certains forages tel que Hodhna (F4, F5) en 2018 et Ozied1 en 2019 qui présentent des valeurs supérieures aux normes exigées pour le phosphate.
- On peut également remarquer que les teneurs de certaines concentrations varient nettement entre les deux années et au niveau des forages, les concentrations augmentent en certains lieux ou diminuent au niveau de d'autres.

Tableau 24: Classification des eaux selon les normes algérienne et de l'OM

Nom des Forages	Année	pH	CE $\mu\text{s/cm}$	Dureté	Ca ²⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)	NH ₄ ⁺ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	NO ₂ ⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	PO ₄ ³⁻ (mg/l)
Normes de l'OMS		6,5- 9,5	Pas de Nomes	200	/	/	0,5	250	500	0,2	50	-
Normes Algériennes		6,5-8,5	2880	200	200	150	0,5	500	400	0,1	50	0,5
F5	2018	7,54	643	320	76,15	31,59	0,02	99,4	116,24	0,006	6,45	
	2019	7,25	663	340	64,128	43,74	0,079	60,35	177,36	0,008	2,01	0,183
Mouley AEK	2018	7,57	610	280	56,11	34,02	0,001	95,85	173,45	0,011	5,1	
	2019	7,41	638	330	60,12	43,74	0,22	53,25	183,69	0,073	1,77	0,122
Mouilha2	2018	7,86	597	480	112,22	48,6	0,029	110,05	209,4	0,011	6,41	
	2019	7,39	606	380	72,14	48,6	0,027	53,25	156,25	0,066	12,32	/
Hodhna(F1)	2018	7,36	379	340	80,16	34,02	0,011	17,75	172	0,013	9,52	
	2019	7,44	523	280	80,16	19,44	0,043	106,5	131,65	0,024	10,62	0,061
Hodhna(F3)	2018	7,23	545	340	80,16	34,02	0,25	17,75	149,7	0,009	10,41	
	2019	8,03	464	250	72,144	17,01	0,033	67,45	123,89	0,016	14,08	0,03
Hodhna(F4)	2018	7,74	548	320	60,12	41,31	0,024	99,4	131,51	0,035	11,81	0,712
	2019	7,32	463	250	88,176	7,29	0,037	88,74	119,04	0,032	16,48	0,061
Hodhna(F5)	2018	7,67	563	350	40,08	60,75	0,011	95,85	140,22	0,009	5,76	1,04
	2019	7,37	482	250	48,096	31,59	0,007	67,45	156,97	0,027	16,98	0,091
Hayat	2018	7,88	696	360	60,12	51,03	0,016	53,28	200,1	0,076	11,4	
	2019											
Haoudh	2018											
	2019	7,74	685	470	100,2	53,46	0,017	88,75	214,83	0,027	24,68	/
Ozied 2	2018											
	2019	6,73	523	380	64,128	53,46	0,029	49,7	122,1	0,004	4,61	0,122
Ozied 1	2018											
	2019	8,22	591	370	100,2	29,16	0,052	142	119,5	0,001	5,4	0,703
Bendjrad	2018											
	2019	7,87	899	500	96,19	63,18	0,052	159,75	166,04	0,018	4,91	/
FZB4 bis	2018											
	2019	7,48	700	300	72,144	29,16	0,081	74,55	175,64	0	11,9	0,061
Hodhna(F2)	2018											
	2019	7,11	579	250	80,16	12,15	0,171	46,15	166,31	0,002	24,6	0,183

V-2 Qualité des eaux d'irrigation selon les directives du FAO

V-2-1-La conductivité :

Les eaux destinées à l'irrigation comme les eaux destinées à l'alimentation doivent répondre à certains critères de qualité pour minimiser les risques de salinisation des terrains. La conductivité de l'eau permet de déterminer l'aptitude d'une eau pour l'irrigation, elle estime la minéralisation ainsi que la quantité de sels dissous.

Tableau 25 : Conductivité aptitude de l'eau à l'irrigation (d'après US SALINITY LABORATORY, 1955)

Classe	Conductivité $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 25°C	Interprétation
C1	$0 < C < 250$	<ul style="list-style-type: none"> • Faible minéralisation de l'eau • utilisation sur la plupart des cultures et des sols.
C2	$250 < C < 750$	<ul style="list-style-type: none"> • Minéralisation moyenne • Utilisation sur sol modérément lessivé et plantes moyennement tolérantes au sel
C3	$750 < C < 2250$	<ul style="list-style-type: none"> • Eau salée • Utilisations sur sol bien drainé et plantes tolérantes au sel • contrôle de l'évolution de la salinité obligatoire
C4	$2250 < C < 5000$	<ul style="list-style-type: none"> • Minéralisation forte • utilisation non souhaitable en agriculture

D'après le classement du tableau 26 suivant, les eaux souterraines de la commune d'El Bayadh présentent une bonne qualité, à l'exception du forage de Bendjrad qui a une importante conductivité, il donc classé dans la classe C3.

Tableau 26: Qualité de l'eau en fonction de la conductivité électrique. (Touhari, 2015)

Conductivité électrique (exprimée en $\mu\text{S}/\text{cm}$)	Qualité de l'eau	Forages	
		2018	2019
400 à 750	Bonne qualité	F5, Mouley AEK, Mouilha2, Hodhna(F1) ;(F3) ;(F4) ;(F5), Hayat	F5, Mouley AEK, Mouilha2, Hodhna(F1) ; (F2) ;(F3) ;(F4) ;(F5), Hayat Haoudh, Ozied2, Ozied 1, FZB4 bis
750 à 1500	Médiocre mais eau utilisable		Bendjrad

V-2-2-Autres indicateurs de qualité

Pour visualiser l'évaluation de la qualité de l'eau à irrigation, les résultats des paramètres chimiques ont été comparée au tableau de directive de la qualité des eaux d'irrigation FAO (Ayers et Westcot 1985) à laquelle on doit se référer pour juger si une eau convient ou non à l'irrigation.

La méthodologie préconisée par la FAO (1985) est adoptée par de nombreux pays. Elle est utilisée dans le cadre de l'agriculture californienne par le service de vulgarisation, la station expérimentale et le corps enseignant de l'université de Californie. Les directives devraient aider à situer les effets de la qualité de l'eau dans la perspective des autres facteurs influant sur la production agricole et permettre à l'homme de terrain de juger si l'eau utilisée convient ou non à l'irrigation.

La comparaison avec la classification de la FAO déduit que :

➤ Du point de vue salinité, les eaux souterraines de la région sont dans les eaux qui ne présentent aucun problème pour l'irrigation en 2018 ; l'année 2019 seul le forage de Bendjrad présente une mauvaise qualité pour l'irrigation.

➤ Sur le point de vue de la toxicité de certains ions, on a pris en compte uniquement l'ion chlorure (à défaut de l'ion sodium), les différents forages se présentent dans la catégorie « sans problème pour une irrigation » en 2018 ; le forage de Bendjrad est l'unique qui est classé dans la catégorie faible à modéré (en 2019).

➤ Concernant les effets divers sur les cultures sensibles, les forages se répartissent entre les deux classes : aucun (F5 : Mouley AEK) et faibles à modéré aux problèmes liés au nitrate pour la majorité des forages pour l'année 2019. Par contre en 2018 la totalité des forages sont classé dans la catégorie problème faible à modéré. Les eaux souterraines de la commune d'El Bayadh appartiennent au rang normal du pH

Tableau 27: Classification des eaux d'irrigation de la région d'étude selon directives du FAO (Ayers et Westcot 1985, FAO)

Problèmes Potentiels d'irrigation	Paramètre	Année	Degré de restriction imposé à l'utilisation		
			Aucun	Faible à Modéré	Important
Salinité	C.E (mS/cm)	2018	Tous		
		2019	Le reste	Bendjrad	
	TDS (mg/L)	2018			
		2019			
Ions toxiques	Sodium (meq/L)	2018			
		2019			
	Chlorure (cl-) (meq/L)	2018	Tous		
		2019	Le reste	Bendjrad	
Effets divers (Sur les cultures sensibles)	Nitrate (mg/L)	2018		Tous	
		2019	F5 ; Mouley AEK	Le reste	
	pH	2018	Tous		
		2019	Tous		

Conclusion

L'analyse des paramètres physico-chimiques, a permis de visualiser la variation de ces éléments durant les deux années. L'étude de la variation des éléments, nous a permis de visualiser l'évolution des différents paramètres dans le temps et dans l'espace, certains éléments important en 2018 diminuent d'ampleur en 2019 tel que l'ions phosphate qui est supérieur à 0.5 mg/L pour les forages de Hodhna (F4 et F5) chute en 2019 en étant inférieur à 0.05 mg/L. Le nitrate et le nitrite, présentent une évolution remarquable entre les deux années. En effet, nous avons constaté que pour les forages Mouley AEK et Mouilha2 qui présentent de faible teneurs en nitrite en 2018 à 0.011mg/L ont

augmenté de concentre pour l'année 2019 au niveau du forage Mouley AEK à 0.073mg/L et forage Mouilha2 à 0.066mg/L de même pour le nitrate qui est de faible concentration en 2018 a vue sa teneur augmenter en 2019 pour la majorité des forages. Le forage de Bendjrad, présente bien des concentrations plus élevées que les autres forages en certains éléments durant l'année 2019.

Du point de vue potabilité, le traitement des prélèvements des deux années (2018-2019), nous indique que la majorité des eaux souterraines de la commune d'El Bayadh se situe dans la zone de confort des valeurs seuils, à l'exception de quelque forage qui présentent des teneurs élevées en phosphates dépassant la limité des valeurs fixées par les normes de potabilité algériennes (2011) et celle de l'OMS (2017).

En comparant les éléments de l'eau aux normes de la FAO pour déduire l'aptitude des eaux à l'irrigation, les eaux souterraines de la commune d'El Bayadh présentent une minéralisation moyenne et la majorité des forages répondent aux normes sans problème décrite par la FAO (1976).

Même si la majorité des points d'eau présente une bonne qualité de potabilité et d'irrigation, certains éléments ont une concentration élevée ce qui permet de conclure que le risque de pollution des eaux souterraines, par des activités anthropiques est bien existant. Cela rend l'étude de vulnérabilité des eaux souterraines du bassin versant de l'oued El Bayadh à la pollution primordiale.

**PARTIE III : CARTOGRAPHIE DE LA VULNERABILITE A LA
POLLUTION DU BASSIN VERSANT DE L'OUED EL BAYADH**

CHAPITRE 1 : METHODE ET OUTIL

I Introduction :

Cette partie du travail est consacrée à l'étude de vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines du bassin versant d'El Bayadh. L'étude de cette vulnérabilité à la pollution a été déterminée en utilisant la méthode GOD qui se base sur les trois paramètres : type d'aquifère (G), lithologie d'aquifère (O) et profondeur d'aquifère (D). Le SIG nous a permis la cartographie de ces différents paramètres, après la multiplication et la superposition. L'établissement de la carte de vulnérabilité et son interprétation sera un outil de la gestion qualitative de l'importante ressource souterraine dans une région semi-aride.

II Ressources souterraines et risque de pollution :

II-1. Définitions :

La pollution est une modification défavorable du milieu naturel qui apparaît en totalité ou en partie comme un sous-produit de l'action humaine, au travers d'effets directs ou indirects altérant les critères de répartition des flux de l'énergie, des niveaux de radiation, de la constitution physico-chimique du milieu naturel et de l'abondance des espèces vivantes. Ces modifications peuvent affecter l'homme directement ou à travers des ressources agricoles, en eau et autres produits biologiques. Elles peuvent aussi l'affecter en altérant les objets physiques qu'il possède, les possibilités récréatives du milieu ou encore en enlaidissant la nature (Ramade, 1984). Une eau est polluée lorsque, sous l'effet de l'activité humaine, elle devient impropre à satisfaire la demande d'utilisation ou qu'elle présente un danger pour l'environnement (Castany, 1982). L'eau souterraine est considérée comme polluée lorsqu'elle contient des substances autres que celles liées à la structure naturelle des terrains où elle a séjourné, en particulier, lorsque les concentrations des constituants dissous ou en suspension dépassent les concentrations maximales admissibles fixes par les standards nationaux ou internationaux (Lallemand et Jean, 1999).

II-2. Origine de la pollution :

La qualité naturelle des eaux souterraines peut être altérée par l'activité humaine et inhérente au développement de ces activités. Les sources de pollution des eaux souterraines (figure 39) se sont multipliées au cours du siècle dernier (Addad et Hamza, 2006) :

- **Origine urbaine et domestique** : eaux usées domestiques, eaux pluviales, eaux d'infiltration sous les dépôts d'ordures, etc. (Lallemand et Jean, 1999). Ce sont les rejets d'eaux usées domestiques et municipales (lavage des rues, arrosages et les eaux utilisées pour la climatisation des immeubles (Castany, 1982).
- **Origine industrielle** : eaux usées, eaux d'infiltration sous les stockages de déchets industriels, liquides dangereux tels que hydrocarbures et solvants (Lallemand et Jean, 1999). Elles sont provoquées par les rejets industriels, thermiques et chimiques. Il faut ajouter les effets des grands aménagements urbains, le développement des autoroutes (Castany, 1982).
- **Origine agricole** : eaux d'infiltration de drainage et de ruissellement sous aires cultivées, ou sous aires agricoles (élevages, stockages et épandages d'engrais et de produits phytosanitaires (Lallemand et Jean, 1999). Les pollutions agricoles sont causées principalement par l'utilisation irrationnelle des engrais chimiques et les pesticides ; aussi le traitement des plantes et les fuites de stockage des sous-produits de l'élevage (Castany, 1982).

III-SIG et vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution

III-1-Système d'information géographique (SIG) :

Un système d'information géographique (SIG) est un système informatisé d'acquisition, de gestion, d'analyse et de représentation de données à référence spatiale. Les SIG ont un impact important dans tous les domaines concernés par la gestion et l'analyse d'information à caractère spatial. Les personnes étrangères à cette technologie la considèrent souvent comme une boîte magique. La vitesse, la rigueur et la précision avec lesquelles elle opère sont impressionnantes et sa capacité de représentation graphique est attractive. Cependant, pour un utilisateur expérimenté, la philosophie des SIG est très différente. Les SIG ne sont qu'une simple extension de nos capacités d'analyse. Le système n'a pas de réponses propres, ce sont celles de l'analyste. C'est un outil au même titre que l'outil statistique, il aide à penser. Présentement, il existe une grande variété de logiciels qui proposent ce type de traitements et qui se dénomment des SIG. Cependant, leur façon de gérer et de représenter l'information spatiale ainsi que la palette d'opérations proposées diffère grandement d'un logiciel à l'autre. Bien qu'un SIG soit souvent présenté comme un seul logiciel, il intègre plusieurs composantes (Eastman, 1995). Ces composantes sont le système de saisie numérique, le

système de gestion de la base de données (SGBD), le système de traitement d'images, le système d'analyse statistique, le système de représentation cartographique, le système d'analyse spatiale, le tout en interaction avec la base de données spatiales et thématiques.

III-2. Vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution

III-2-1. Définition :

Le concept vulnérabilité est le caractère de ce qui peut être attaqué ou endommagé. Le terme "vulnérabilité" traduit la fragilité ou la sensibilité d'un système aquifère face à une menace externe : pollution, évènements socio-économiques, aléas climatiques, etc.

Ce terme est introduit en hydrogéologie par Margat dans les années 60 (Margat, 1968). Le concept de vulnérabilité de l'eau souterraine est généralement défini comme « la capacité d'un système hydrogéologique à transmettre un contaminant potentiel depuis la surface du sol jusqu'à atteindre la zone saturée » (Rahman, 2008). Véhiculé depuis l'eau des précipitations qui s'infilte à la surface du sol, le contaminant percole ainsi à travers la zone vadose jusqu'à atteindre la zone saturée.

On résume que la vulnérabilité est une évaluation qualitative des mécanismes de transfert d'un polluant qui repose sur une conceptualisation multicouche du milieu traversé (Charikh, 2014). En effet, la vulnérabilité d'une eau souterraine à la pollution est une notion relative sans dimension et non mesurable (Vrba et Zaporozec, 1994).

D'après Cazaux (2007), le concept de vulnérabilité des eaux souterraines est basé sur un modèle «origine – écoulements – cible» (figure 38).

- **L'origine de la contamination** : c'est le lieu d'infiltration du polluant au niveau de la surface du sol.
- **L'écoulement** : c'est le trajet du contaminant à travers le milieu naturel, c'est à dire sa composante verticale au sein de la zone non saturée.
- **La cible** : est l'eau souterraine faisant l'objet d'une protection. Il peut s'agir soit du toit de la nappe, soit du captage d'eau.

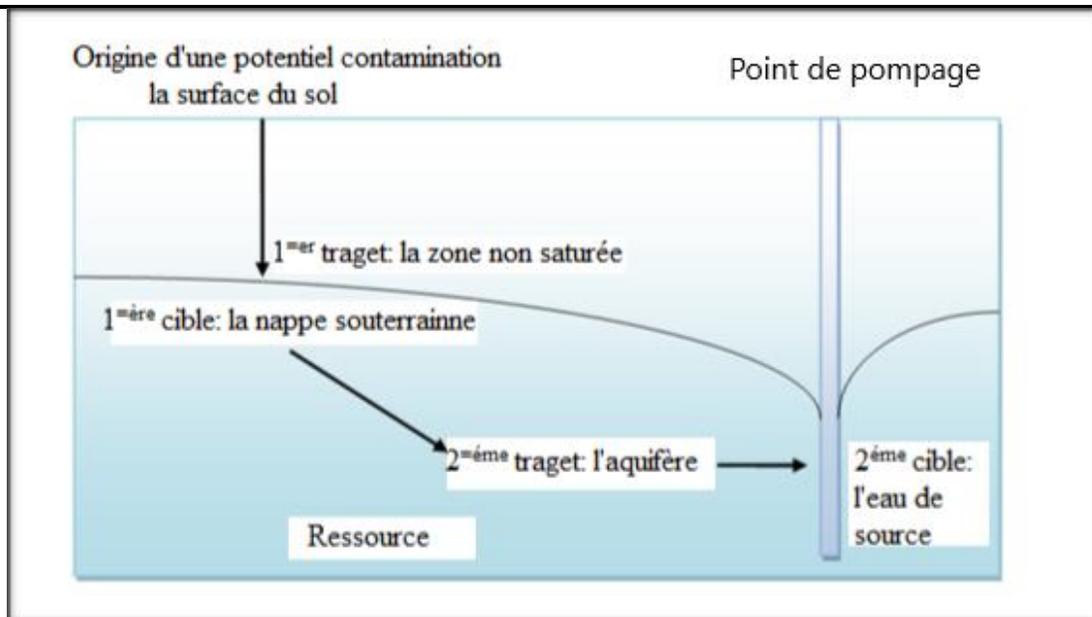


Figure 38 : Modèle «origine – écoulements – cible» (Cazau, 2007).

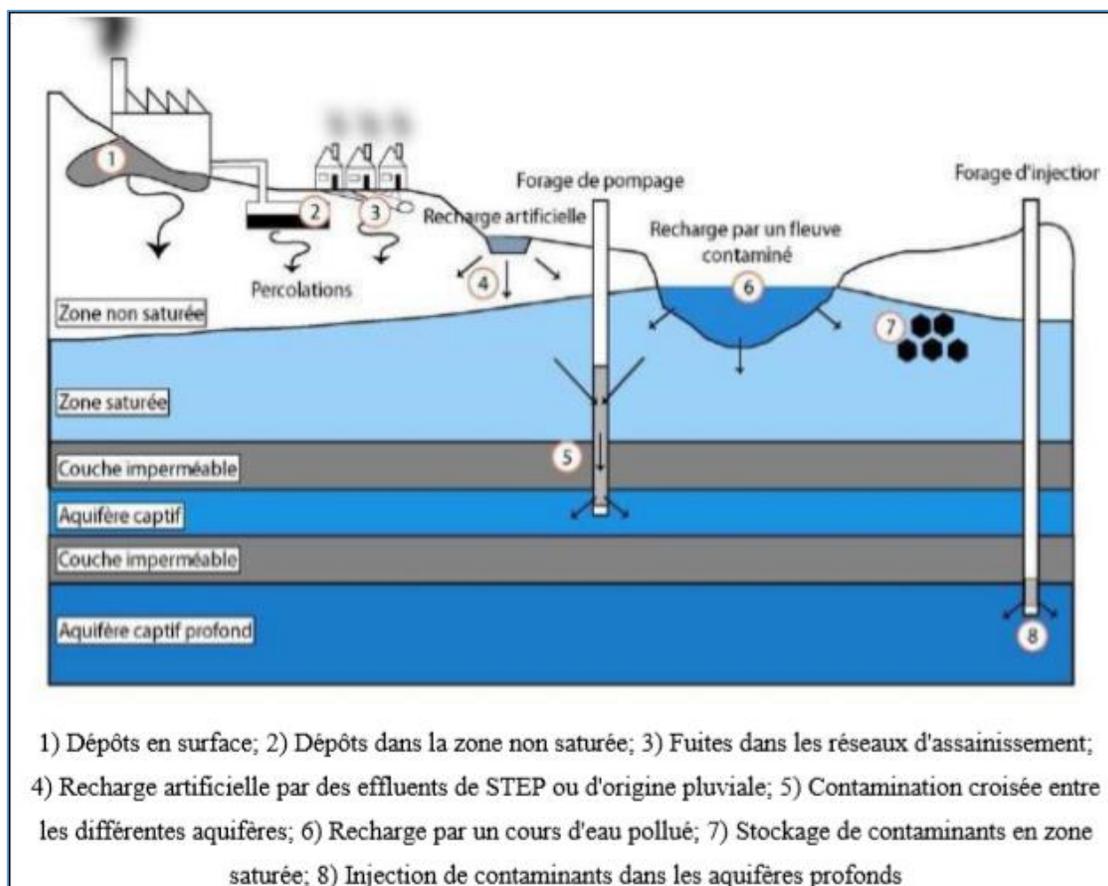


Figure 39 : Différentes sources de pollution d'eau souterraine (Datry, 2003)

III-2-2. Différents types de vulnérabilité

Les études de la vulnérabilité font généralement la distinction entre deux notions : vulnérabilité intrinsèque et la vulnérabilité spécifique. La distinction des deux types de vulnérabilité est nécessaire car, d'une façon générale, elles ne se placent pas sur la même échelle d'investigation : la vulnérabilité intrinsèque peut être considérée comme invariante dans le temps alors que la vulnérabilité spécifique (directement liée aux polluants éventuels) est évolutive et ne caractérise qu'un instant précis (Mardhel et al. 2005).

- **La vulnérabilité intrinsèque** : est le terme utilisé pour représenter les caractéristiques du milieu naturel (nature géologique, hydrogéologique du sous-sol, profondeur de la surface libre et drainage de surface) qui déterminent la sensibilité des eaux souterraines à la pollution par les activités humaines (industrielle, urbain, agricole) (Albinet et Margat, 1970 ; Mardhel et al. 2005).
- **La vulnérabilité spécifique** : est le terme utilisé pour définir la vulnérabilité d'une eau souterraine à un polluant particulier ou à un groupe de polluants. Elle prend en compte les propriétés des polluants et leurs relations avec les divers composants de la vulnérabilité intrinsèque (Mardhel et al. 2005).

III-2-3. Critères de vulnérabilité :

La vulnérabilité d'une nappe dépend de multiples facteurs intervenant soit sur la nature et/ou la concentration de la contamination, soit sur son temps de transfert. Elle est évaluée en prenant en compte les caractéristiques du sol, de la zone non saturée et de la zone saturée qui contrôlent le comportement des polluants (Charikh, 2014).

Les critères sont récapitulés dans le tableau suivant :

Tableau 28: Critères de vulnérabilité (Zewahlen ,2004)

Sol	Zone non saturée (ZNS)	Zone saturée
Topographie (pente)	Profondeur de la nappe libre ou épaisseur de la ZNS	Type de nappe (Libre ou captive)
Pédologie (perméabilité vertical des sols, nature et texture des sols)	Temps de transfert (perméabilité verticale)	Temps de résidence (dépend de l'hydrodynamisme des formations aquifères)
Bilan hydrique (ruissellement et infiltration efficace)		Relation eau souterraine /eau superficielles
	Structure de la ZNS (variation de faciès, épaisseur des discontinuités de faciès, position dans le profil vertical, texture, teneur en matière organique et argile)	Piézométrie (sens et direction d'écoulement et évolution selon la période du cycle hydrique)
	Présence ou non d'un horizon moins perméable et position de celui-ci	Epaisseur de l'aquifère (quantité de réserve)
		La recharge (recharge annuelle nette)
		Type de système hydrogéologique (caractère plus ou moins capacitif et transmissif)
	Battement de nappe	
	Fracturation (direction et densité)	

III-2-4. Méthodes de l'estimation de la vulnérabilité :

Les premières cartes de vulnérabilité à la pollution sont connues dans les années soixante-dix (Albinet et Margat, 1970). Elles ont été par la suite expérimentées dans d'autres pays du monde ; leur objectif principal est de représenter les différents niveaux de la vulnérabilité des eaux souterraines sur un support cartographique. La littérature afférente au sujet montre l'existence de plusieurs méthodes d'évaluation et de cartographie de la vulnérabilité des nappes aux risques de pollution (tableau 28).

III-2-4-1. Description et comparaison des méthodes :

Nous présentons ici quelques méthodes courantes :

III-2-4-2. Méthode GOD :

Développée en Angleterre par Foster en 1987 (Murat, 2000). La vulnérabilité des aquifères est définie en fonction de l'inaccessibilité de la zone saturée, au sens de la pénétration du polluant, et de la capacité d'atténuation que présente la couche sus-jacente à la zone saturée. L'approche employée pour ce modèle a recours à trois paramètres :

- Le premier : Groundwater occurrence (G) ; réside dans l'identification du type d'aquifère en fonction de son degré de confinement.
- Le deuxième : Overall lithology of aquifer (O) ; est défini par la lithologie de l'aquifère
- Le troisième : Depth to groundwater (D) ; correspond à la profondeur de la nappe (Murat et al, 2003 in Ake et al, 2009 in Daboussi, 2009).

L'indice de vulnérabilité GOD (IG) (tableau), est déterminé par cotation numérique pour chaque paramètre (Ii) puis leur multiplication. L'équation est la suivante : $Iv = IG * IO * ID$.

Tableau 29 : Indices de vulnérabilité utilisé par la méthode GOD (Murat, 2000).

Indice de vulnérabilité	Degré de vulnérabilité	Définition du degré
0	Aucune vulnérabilité	
0-0.1	Vulnérabilité négligeable	Couches confinantes présentes sans écoulement vertical significatif
0.1-0.3	Faible vulnérabilité	Seulement vulnérable à long terme aux polluants conservateurs lorsque la décharge es fait en continu
0.3-0.5	Vulnérabilité modérée	Vulnérable à certains polluants mais seulement lorsque la décharge est continue
0.5-0.7	Vulnérabilité élevée	Vulnérable à beaucoup de polluants excepté ceux hautement absorbés ou transformés
0.7-1	Vulnérabilité extrême	Vulnérable à beaucoup de polluants de l'eau avec un impact rapide sur la pollution

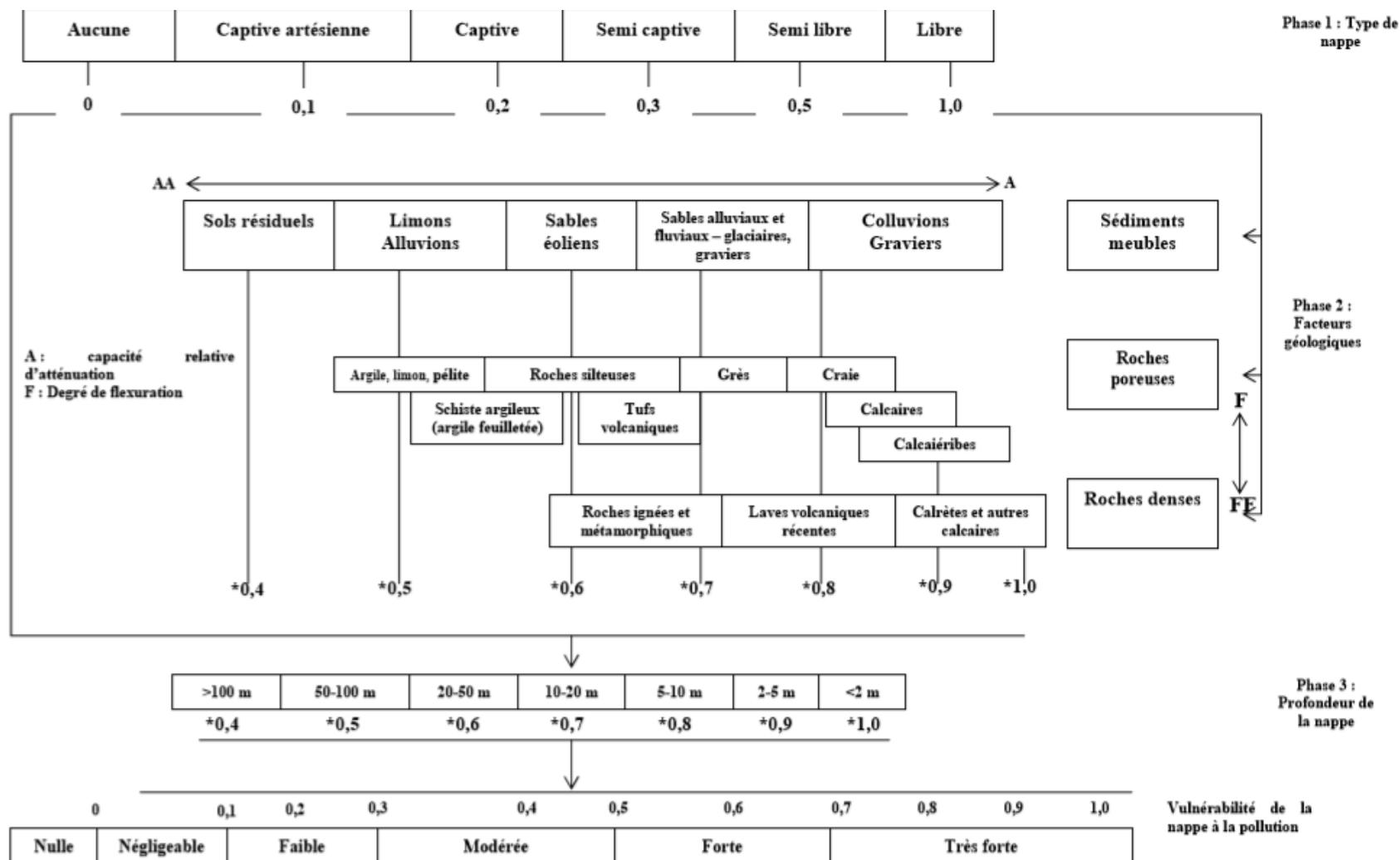


Figure 40 : Système empirique GOD pour une estimation rapide de vulnérabilité d'un aquifère d'après Foster (1987)

III-2-4-3. Méthode DRASTIC :

Elle est l'une des méthodes les plus utilisées dans le monde. Cette méthode a été développée aux Etats-Unis en 1987, par Aller et al, 1987 et par L'EPA (Environmental Protection Agency). Afin de déterminer la vulnérabilité verticale à la pollution des eaux souterraines. L'acronyme DRASTIC, représente les 7 paramètres d'évaluation que constitue la méthode ; D : profondeur à la nappe, R : recharge, A : type d'aquifère, S : type de sol, T : topographie, I : impact de la zone vadose, C : conductivité hydraulique (Dörfliger, et al, 2004).

On quantifie la vulnérabilité de chaque paramètre, en lui attribuant un indice de vulnérabilité allant de 1 à 10. Un facteur de pondération (poids paramétrique) variant entre 1 et 5, est ensuite appliqué aux différents paramètres afin de relativiser leur importance respective en termes de vulnérabilité (Dörfliger, et al, 2004). L'indice de vulnérabilité final de DRASTIC (ID) est la somme pondérée des 7 paramètres :

$$ID = \sum_{j=1}^{j=7}(W_j R_j)$$

Avec ID : indice de vulnérabilité global

Wj : facteur de pondération du paramètre j

Rj : indice de paramètre j.

Il existe deux versions de la méthode DRASTIC, avec deux systèmes de pondération (tableau 30). Suivant les conditions d'utilisation du sol on distingue ; DRASTIC STANDARD (normal), utilisation normale et DRASTIC PESTICIDES, avec une activité agricole importante (Dörfliger, et al, 2004 ; Daboussi, 2009).

Tableau 30: Systèmes de pondération "Normal" et "Pesticides" de la méthode DRASTIC (Dörfliger, et al, 2004)

Paramètre	Facteur de pondération "normal"	Facteur de pondération "pesticides"
Profondeur jusqu'à la nappe phréatique	5	5
Recharge nette	4	4
Type d'aquifères	3	3
Type de sol	2	5
Topographie)	1	3
Impact de la zone non saturée	5	4
Conductivité hydraulique	3	2

L'indice de vulnérabilité final, est un nombre compris entre 23 et 226 pour la DRASTIC normal. L'indice final de la vulnérabilité DRASTIC, est classé en quatre niveaux de vulnérabilité (tab

Tableau 31 : Critères d'évaluation des de la vulnérabilité dans la méthode DRASTIC selon Engel et al. (1996) (in Daboussi, 2009)

Degré de Vulnérabilité	Indice de Vulnérabilité
Faible	< 101
Moyen	101-140
Fort	141-200
Très fort	>200

III-2-4-4. Méthode de SINTACS :

Cette méthode a été développer en Italie vers les années 1990, de manière à s'adapter à la cartographie à plus grande échelle compte tenu de la grande diversité hydrogéologique de l'Italie (Petelet et al, 2000 in Mardhel et al, 2005) .Elle a été développer à partir de la méthode DRASTIC ,et utilise les même paramètres.

La particularité de cette méthode par rapport à DRASTIC, est qu'elle propose 5 scénarios de situation de vulnérabilité, « Impact Sévère » : correspond aux zones d'activité industriel importante, avec des rejets liquide et de déchets solides, ou l'occupation des sols sont intense, constituées de terres cultivées a fort utilisation de pesticides et fertilisants. Ensuite, scénario « Impact Normale », de milieu pas très transformé, avec existence ou non de terres cultivées, et une utilisation très faible de pesticides et fertilisant. Les trois autres scénarios ; « drainage important », relatif aux aires ou il y a une forte infiltration vers l'aquifère à partir d'un réseau superficiel d'eau, le scénario « terrain karstifié », concernant les aires caractérisées par une forte karstification, et le scénario « terrain fissuré », correspondant aux zones caractérisées par une forte fracturation (Daboussi, 2009) (tableau 32).

Tableau 32 : Poids attribués aux paramètres SINTACS dans les différents scénarios de la méthode (Civita, 1994 in Hamza in Daboussi, 2009)

Scénario paramètre	Impact normal	Impact sévère	Drainage important	Karst	Terrains fissurés
S	5	5	4	2	3
I	4	5	4	5	3
N	5	4	4	1	3
T	4	5	2	3	4
A	3	3	5	5	4
C	3	2	5	5	5
S	2	2	2	5	4

L'indice de vulnérabilité SINTACS est donné par la formule suivante :

$$IS = \sum P(1,7) \times W(1,7)$$

Avec

P (1,7) : indice des paramètres 1 à 7

W (1, n) : poids correspondant à chaque classe, varie de 1 à n

La vulnérabilité de SINTACS est évaluée à partir de 4 degré de vulnérabilité (tableau 33).

Tableau 33 : Critères d'évaluation de la vulnérabilité dans la méthode SINTACS (Civita, 1994, in Hamza, 2007 in Daboussi, 2009)

Degré de vulnérabilité	Indice de vulnérabilité
Faible	<106
Moyen	106-186
Elevé	187-210
Très élevé	>210

III-2-4-5. Méthode AVI :

Cette méthode évalue la vulnérabilité des eaux souterraines à partir de la résistance hydraulique. C'est un facteur théorique utilisé pour décrire la résistance d'un aquitard au flux vertical (Kruseman et de Ridder, 1990 ; D. Van Stempvoort et al, 1992 in Murat 2000), en utilisant deux

paramètres : d = épaisseur de chaque couche de sédiment au-dessus de l'aquifère saturé de surface, K : conductivité hydraulique estimée de chacune de ces couches.

La résistance hydraulique est calculée à partir de la formule suivante :

$$C = \sum_{1}^i di/ki$$

L'indice de vulnérabilité AVI est obtenu en calculant le logarithme décimal de la résistance hydraulique (C) (tableau 34).

Tableau 34 : Relation entre Indice de Vulnérabilité de l'Aquifère (AVI) et résistance Hydraulique (Murat, 2000).

Résistance hydraulique (C) (années)	Log (C)	Vulnérabilité(AVI)
0 à 10 ans	< 1	Extrêmement fort
10 à 100 ans	1 à 2	Fort
100 à 1000 ans	2 à 3	Modéré
1000 à 10000 ans	3 à 4	Faible
>1000 ans	> 4	Extrêmement faible

III-2-4-6. Méthode COP :

La méthode COP a été élaborée dans le cadre du programme COST620 de l'union européenne. Le principale but de ce programme était d'élaborer, une approche générale permettant d'évaluer la vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines en zone européenne. L'étude, a ressortie quatre facteurs permettant cette évaluation ; C : concentrations de flux, O : couches sus-jacentes a la zone saturée, P : régimes des précipitations, K : développement réseau karstique. Ce dernier facteur, est considéré pour l'évaluation d'un de la vulnérabilité d'un puits ou une source en zone karstique.

En effet, la méthode COP a été conçue, à partir des trois facteurs C, O, P. D'où L'acronyme COP. Dans le but, d'évaluer la vulnérabilité intrinsèque des aquifères carbonatés. Ces trois facteurs C, O et P de cartographie de la vulnérabilité ont été caractérisés, classifiés considérant les résultats des réflexions des groupes de travail et leur combinaison et pondération déterminées (Dörfliger et al, 2004). La base conceptuelle de cette méthode, en fonction de l'approche européenne est d'évaluer la protection naturelle des eaux souterraines, déterminé par

les propriétés des couches situées au-dessus de l'aquifère (Vias et al, 2006 in Daboussi, 2009). Elle a été élaborée par le groupe d'hydrogéologue de l'université de Malaga, avec le soutien financier du ministère espagnol de la recherche et de la science, ainsi que des groupes de recherche d'Andalousie (Dörfliger et al, 2004).

L'équation permettant l'évaluation de la vulnérabilité par la méthode COP est la suivante :

$$ICOP = (C \text{ résultat}) * (O \text{ résultat}) * (P \text{ résultat}).$$

III-2-4-7. Méthode PI :

C'est dans le cadre de l'action COST620, que la méthode PI a été aussi conçue, à l'université de Karlsruhe (Allemagne) et cofinancée par le BGR. Elle est basée sur un concept suivant « origine -écoulement-cible », dont la cible est la surface piézométrique. Cette méthode est constituée de deux paramètres, P : pour la couverture Protectrice et I : pour les conditions d'infiltrations (Dörfliger et al, 2004). Elle est composée de cinq classes de vulnérabilité (tableau 35).

Tableau 35 : Légende de la carte de vulnérabilité de la méthode PI (COST620 in Dörfliger et al, 2004).

	Carte de vulnérabilité		Carte P		Carte I	
	Description	PI-facteur	Description	P-facteur	Description	I-facteur
Rouge	Extrême	0-1	Très faible	1	Très élevée	0-0.02
Orange	Haute	>1-2	Faible	2	Élevée	0.4
Jaune	Modérée	>2-3	Modérée	3	Modérée	06
Vert	Faible	>3-4	Elevée	4	Faible	0.8
Bleu	Très Faible	>4-5	Très élevée	5	Très faible	0.1

III-2-4-8. Méthode LEA :

Cette méthode utilise deux paramètres, la couverture protectrice et les conditions d'infiltration. Elle n'a pas recours à l'usage d'indice numérique, contrairement à la méthode PI (tableau 36) (Dörfliger et al, 2004).

Tableau 36 : Couverture protectrice liée à la vulnérabilité et classe de temps de transit estimatif (COST 620, in Dörfliger et al, 2004).

Couverture protectrice	Vulnérabilité	Temps de transfert estimé
Roche calcaire karstique dénudée ou sol très fin, pelliculaire	Extrême	Instantanée-quelques heures
Sol, dépôt < 3 m épaisseur	Très élevée	Quelques heures, <1 jour
Limons 1-3 m épaisseurs, dépôts fins	Élevée	Jours-<1 mois
Argiles > 1 m, limons > 4 m	Modérée	>1mois
Argiles > 2 m, limons > 40 m	Faible	>1 an
Argiles > 12 m épaisseur	Très faible	10 ans

III-2-4-9. Méthode EPIK :

Méthode élaborée, pour la cartographie de la vulnérabilité des aquifères karstique de la Suisse, dans l'objectif de délimiter des périmètres de protection. Elle sert à traduire la sensibilité des eaux souterraines vis-à-vis de tout type de contaminants. Elle est composée de 4 paramètres (Dörfliger et al, 2004) : Epi-karst, Protective cover (couverture protectrice sol), Infiltration conditions (Conditions d'infiltration), Karst network development (développement de la karstification).

Un résumé des paramètres pris en compte par chacune des méthodes sont cités dans le tableau ci-après.

Tableau 37 : Récapitulatif des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité.

Méthodes	Auteurs	Critères
GOD	Foster, 1987	G : Type de nappe O : Lithologie de la zone non saturée de l'aquifère D: Profondeur de la nappe
DRASTIC	Aller et al, 1987	D : Profondeur de la nappe R : Recharge nette A : Nature lithologique de l'aquifère S: Type de sol T: Topographie des terrains I : Impact de la zone non saturée C : Conductivité hydraulique
EPIK	Zwahlen et al, 1996	E: Développement de l'Epikarst, P: Epaisseur de la couverture Protectrice I: Conditions d'Infiltration K : Développement du réseau Karstique
RISKE	Petelet-G et al, 2000	R: Roche aquifère I: Conditions d'infiltrations S: Sol et couverture protectrice K : karstification E : Epikarst
PI	Goldsheider et al, 2002	P : Couverture Protectrice I : Conditions d'Infiltration
SINTACS	Citiva, 1994	S : Profondeur de la nappe I : Recharge efficace N : Lithologie de la zone non saturée T : Type de sol A : Type de l'aquifère C : Conductivité hydraulique S : Topographie

IV-Application de la méthode GOD sur le bassin versant d'oued El Bayadh

IV-1. Choix de la méthode :

Pour choisir une méthode d'évaluation de la vulnérabilité, quelques critères à tenir en compte :

- L'objectif de l'évaluation de la vulnérabilité, (exemple : estimation de la vulnérabilité intrinsèque, ou spécifique).
- Les données nécessaires pour l'utilisation de la méthode, et les données disponibles.
- Les conditions d'utilisation de la méthode. Il faut que la méthode soit utilisée dans les conditions hydrogéologiques et selon les modalités pour lesquelles elle a été conçue (Aller et al, 1987 in Murat, 2000).
- Les moyens financiers, humains et matériels.

- L'échelle : les modèles analytiques complexes s'utilisent à grand échelle, de 1/25 000 à 1/100 000. Les méthodes paramétriques avec des échelles moyennes, les méthodes cartographiques quant à eux, avec de petite échelle, allant jusqu'à 1/500 000 (Murat, 2000).

Les études de vulnérabilité des eaux souterraines, servent à contribuer à la gestion durable de la ressource en eau souterraines. Elles Interviennent aussi, dans la prise de décision en matière d'aménagement de territoire. Cependant, il est important de bien choisir la méthode, qui dépend généralement des objectifs à atteindre et de la zone d'étude.

Notre terrain est constitué majoritairement des grès fissurées et quelques formations calcaires et présente des nappes libres à des faibles profondeurs. En ces conditions des caractéristiques physiques, géologiques et hydrogéologiques du bassin versant d'El Bayadh et les données dont nous disposons nous nous somme orienté vers la méthode GOD qui est plus simple à l'application dans ce type du terrain.

IV-2. Moyens et outils :

Les outils utilisés pour le calcul de l'indice de la vulnérabilité GOD sont :

- **Arc gis :** ArcGis est une suite de logiciel d'information géographique développé par la société américaine Esri (Environmental Systems Research Institute, Inc). C'est un logiciel composé de différentes plates-formes qui permet aux utilisateurs SIG de collaborer et de partager les informations géographiques. A notre niveau, c'est un outil visant à évaluer la vulnérabilité des ressources d'eau souterraine face à des diverses sources de contaminations diffuses.

Nous avons utilisé cet outil pour concevoir les différentes cartes telles que la carte de profondeur de la nappe (couche D), la carte lithologique (couche O), la carte du degré de confinement (couche G) et la carte d'indice GOD de vulnérabilité.

- **La carte géologique d'El Bayadh :** C'est la carte géologique réalisée par Cornet (1952) à l'échelle 1/200 000, ALGERIE, (territoire du Sud) F^{lle} N° 66. Nous avons utilisé cette carte pour digitaliser la lithologie et le réseau de faille, qui vont nous servir comme un support pour la réalisation de la couche « O ».
- **La carte géologique El Bayadh de l'ARNH :** C'est une carte géologique interprétative de la région d'El Bayadh réalisée par l'ARNH à l'échelle 1/200000 (Algérie, Feuille NI-31-VIII). Cet outil nous a permis d'extraire les failles dans le but de réaliser la carte structurale du synclinal d'El Bayadh.

- **Le MNT (Modèle Numérique du Terrain) :** Il s'agit d'une représentation numérique du relief donc des valeurs d'altitude d'une zone donnée. On peut en dériver des indications sur les valeurs de pentes et d'exposition et sur les formes de la surface topographique d'une zone géographique donnée. Nous avons utilisé le MNT pour délimiter le bassin et établir la carte de réseau hydrographique, carte des pentes et carte hypsométrique.

**PARTIE III : CARTOGRAPHIE DE LA VULNERABILITE A LA
POLLUTION DU BASSIN VERSANT DE L'OUED EL BAYADH**

CHAPITRE 2 : RESULTATS ET DISCUSSIONS

Introduction :

Nous présenterons dans ce chapitre les différentes couches qui nous ont servi à calculer l'indice GOD. Le document cartographique que nous avons obtenu par l'application de la méthode GOD au bassin versant d'El Bayadh présente l'indice de vulnérabilité à la pollution des aquifères de ce bassin. Ce résultat a été établi par l'opération de multiplication des trois facteurs de vulnérabilité GOD. En se basant sur les valeurs standards fournies par la méthode, les valeurs des cotes obtenues par chaque facteur sont présentées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 38 : Valeurs attribuées aux facteurs de la méthode GOD et les variables du bassin d'El Bayadh.

Facteur	Variables	Cotes
G	Libre	1
O	Alluvions	0.5
	Grès	0.7
	Calcaire	0.9
D	50-100m	0.5
	20-50m	0.6
	10-20m	0.7
	5-10 m	0.8
	2-5m	0.9
	< 2m	1

I-Facteur G :

En fonction de son degré de confinement, les aquifères du bassin versant d'El Bayadh sont identifiés et qualifiés libres d'où ils sont attribués à la valeur d'ordre 1.

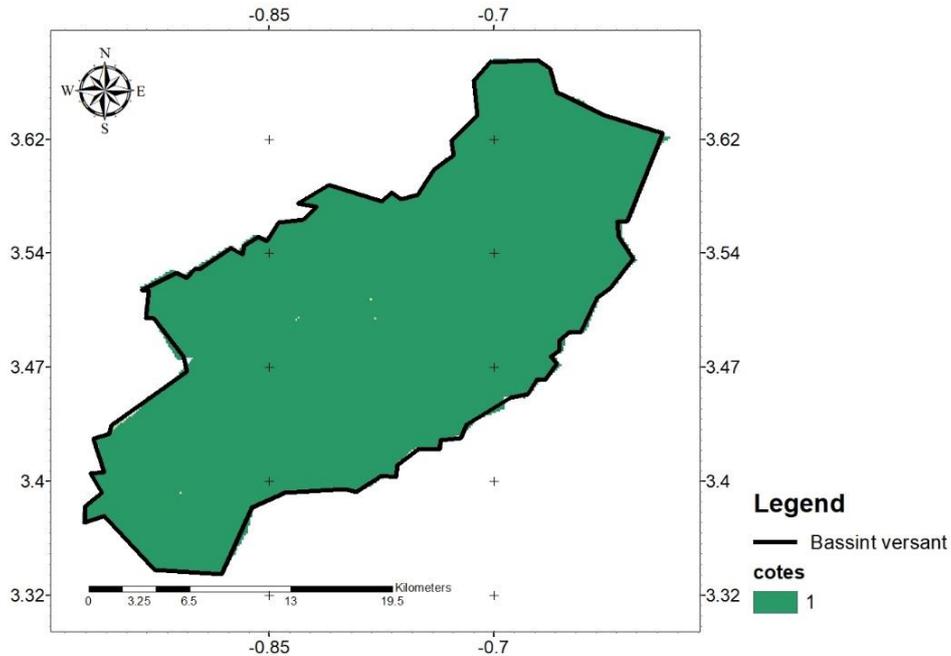


Figure 41 : Couche G : type de l'aquifère

II-Facteur O :

En termes de formations géologiques, le paramètre de la lithologie du bassin versant d'El Bayadh nous a fait ressortir trois unités de formations allant d'une série des formations gréseuses très répandues, du Jurassique au Crétacé inférieur d'ordre 0.7 ; des formations Calcaires (Kimméridgien du Jurassique, Hautérivien calcaire et carapace calcaire du Tertiaire) d'ordre 0.9 et les formations superficielles du Quaternaires notamment les alluvions anciennes d'ordre 0.5.

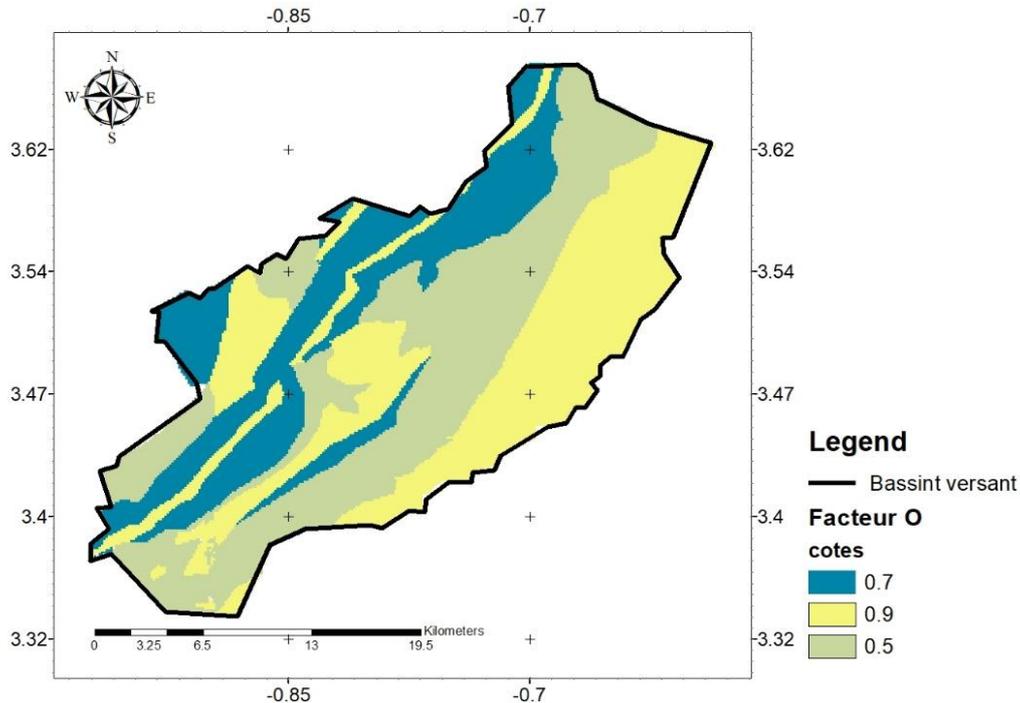


Figure 42 : Couche O : lithologie

III-Facteur D :

La carte de profondeur d'eau de la nappe du bassin versant d'El Bayadh a été élaborée à partir du niveau statique de 628 points d'eau (forages et puits) répartis dans tout le synclinal d'El Bayadh. Le calcul de raster nous a fait ressortir six (6) cotes en fonction de la profondeur.

Sur la carte, les zones dans lesquelles la nappe est plus profonde (en gris clair) dont les niveaux statiques se trouvent à l'intervalle de 50-100 mètre, se situent au Sud-Est et au Nord du bassin et sont attribuées d'ordre 0.5. Les parties où la nappe est moyennement profonde (en vert) s'étendent au centre d'un impluvium tout le long du bassin du Sud au Nord d'ordre 0.6. L'extension de la nappe du bassin d'El Bayadh dont les profondeurs ne sont pas importantes (en rouge et violet) se trouve à l'Ouest, à l'Est et au Nord du bassin d'El Bayadh et se sont attribuées respectivement aux cotes d'ordre 0.8 et 0.7. Les zones où la nappe se trouve plus proche de la surface du sol (en bleu et jaune) se situent au Nord du bassin avec l'ordre de 1 et 0.9 respectivement.

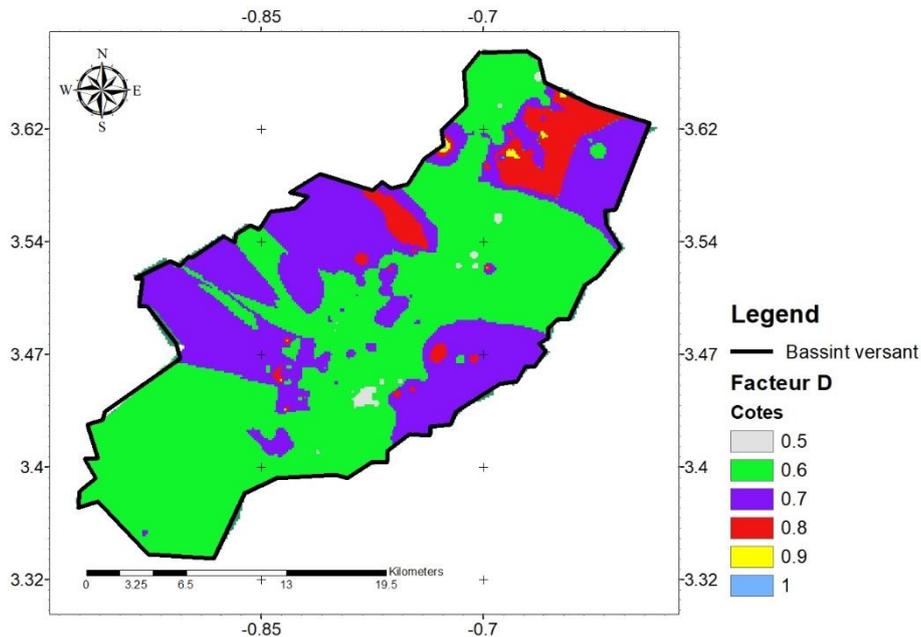


Figure 43 : Couche D : de profondeur de la nappe

IV-Carte de vulnérabilité GOD:

Nous avons pu réaliser la carte de vulnérabilité à la pollution du bassin versant d'El Bayadh directement par la multiplication des trois rasters des facteurs GOD comme nous avons mentionné précédemment, par le logiciel Arc Gis (version 10.6.1). Le résultat de cette opération est l'élaboration de la carte de vulnérabilité du bassin versant d'El Bayadh.

L'examen de cette carte nous a montré que la nappe libre d'El Bayadh a une vulnérabilité classée en quatre degrés allant du faible à très forte avec des indices de 0.25-0.81. Une vulnérabilité faible ayant un indice d'intervalle de 0.25-0.3 qui occupe 33.73% du bassin versant ; 28.15% de la superficie du bassin est caractérisé par une vulnérabilité modérée à l'intervalle de 0.3-0.5 d'indice ; une grande partie de la nappe libre estimée à 36.57% de la surface est menacée par une forte pollution, tandis que seulement une petite partie du bassin qui ne représente que 1.51% possède une très forte vulnérabilité à la pollution (fig. 44).

Tableau 39 : Répartitions des degrés de vulnérabilité dans le bassin versant d'El Bayadh

Intervalle	Classe de vulnérabilité
0.25-0.3	Faible
0.3-0.5	Modérée
0.5-0.7	Forte
0.7-0.81	Très forte

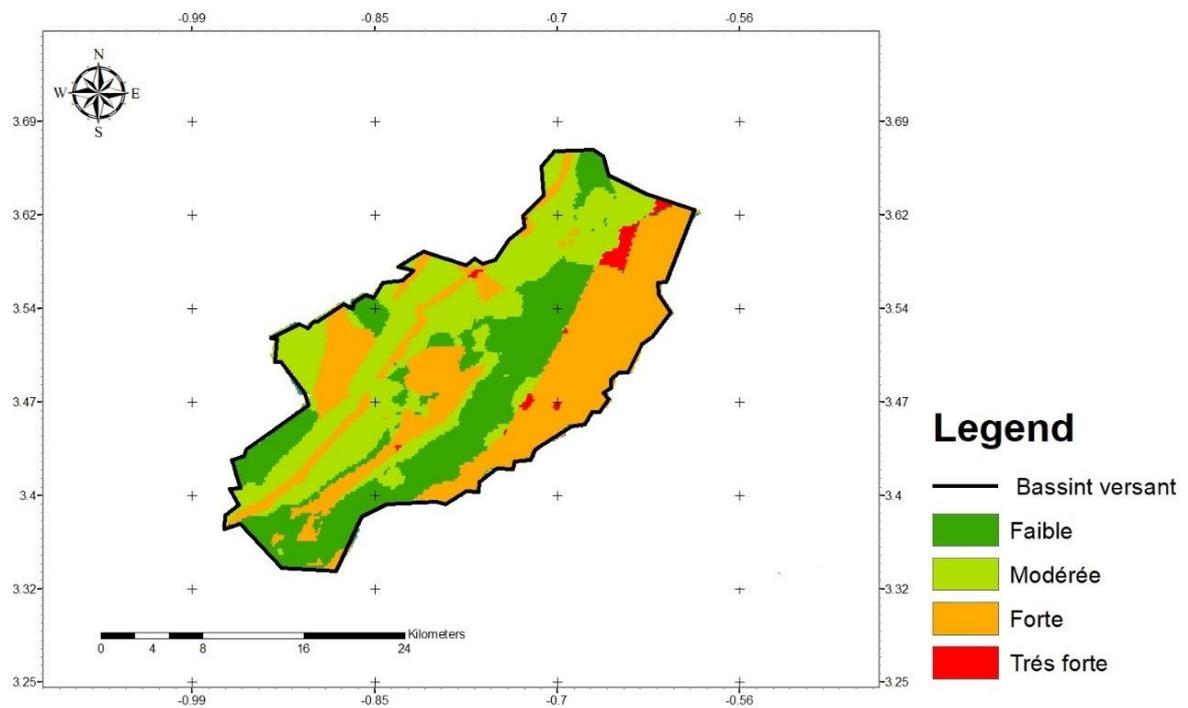


Figure 44 : Carte de vulnérabilité du bassin versant d'El Bayadh.

CONCLUSION GENERALE

Ce travail avait pour objectifs d'évaluer la qualité des eaux souterraines et l'élaboration de la carte de vulnérabilité à la pollution des aquifères du bassin versant d'El Bayadh, qui se situe au centre du synclinal d'El Bayadh localisé dans la partie occidentale de l'Atlas saharien central (Djebel Amour).

La région d'El Bayadh est caractérisée par un climat semi-aride avec un été chaud et sec et un hiver froid. Notre zone se caractérise par une irrégularité de précipitation. Durant les 30 années s'étalant de 1998 à 2018 la précipitation moyenne interannuelle est de 279.50 mm avec le mois le plus pluvieux est le mois d'octobre. La température moyenne interannuelle est de 15.61° C avec un maximum de 30.7°C en mois de juillet et un minimum de 2°C en mois de février. La formule de Thornthwaite nous a permis d'estimer l'évapotranspiration potentielle à 867.64 mm et une évapotranspiration réelle à 416.29 mm pour la période des 30 années. La valeur de l'évapotranspiration potentielle est largement supérieure à celle des précipitations de cette période : le bilan de cette période est déficitaire.

L'utilisation des images satellitaires modèle numérique de terrain (MNT), nous a permis de réaliser les cartes de pentes, du réseau hydrographique. Egalement le traitement de MNT nous ont permis d'établir les différentes caractéristiques du bassin versant. En effet le bassin versant d'El Bayadh est de type allongée avec un indice de Gravelius égal à 1.59, la transformation du bassin versant en un rectangle équivalent montre qu'une longueur (35.07 Km) plus important que la largeur (5.98 Km) avec un périmètre de 81.46 Km et une superficie de 209.69 Km² et des courbes de niveau concentrique en amont du bassin favorisant ainsi un bon écoulement.

Le tracé de la courbe hypsométrique et de la carte des pentes a permis de mettre en évidence le relief du bassin, notre bassin versant présente un relief modéré avec un $I_g = 11.41$ et une dénivelée spécifique de 165.22452206 qui traduit un relief assez fort selon la classification d'Orstom, l'indice des pentes moyenne est de 17.08 ce qui montre le caractère rocheux du bassin.

La carte du réseau hydrographique montre un cours d'eau assez développé, selon la classification de Strahler (1957) est de l'ordre 4 à l'exutoire. Notre bassin versant présente une densité de drainage très faible ce qui traduit que le bassin comporte une formation géologique perméable favorisant l'infiltration avec un écoulement limité et centralisé.

Du point de vue géologie, nous avons décrit principalement les formations qui affleurent dans le bassin versant : Les marno-calcaires du Callovien inférieur et du Valanginien, les Grès du Lusitanien, Kimméridgien et Crétacé inférieur, ainsi que celle de l'Hauterivien, et le Barrémo-Apto-Albien, les alternances grés-marneuses du Lusitanien sup-Kimméridgien, les calcaires du Kimméridgien, et de l'Hauterivien, les argiles sableuses du Tertiaire continental et les Alluvions anciennes et récentes du Quaternaire. Les formations gréseuses du Jurassique et les calcaires du Jurassique-Crétacé présentent une dense fracturation avec une même direction de Nord 80° Est à 100° Est. Ces fracturations assurent une bonne alimentation des nappes du synclinal en particulier du Jurassique.

Dans le contexte hydrogéologique, nous concluons que la région d'El Bayadh présente des formations aquifères identifiées de bas en haut ;

- Le réservoir de Grés du Jurassique (Lusitanien) (J^{5-1}) à perméabilité mixte.
- Le réservoir des grés et des calcaires jurassiques (Lusitanien et Kimméridgien indifférenciés) (J^{6-5}) à perméabilité mixte et de fissure et les calcaires du Kimméridgien (J^6) à perméabilité de fissure.
- Le réservoir de grés de l'infra Crétacé (C_v) à perméabilité mixte.
- Le réservoir des grés de l'Hauteriviens (C_{III}) à perméabilité mixte.
- Le réservoir des calcaires de l'Hauterivien (C_{I-II}) à perméabilité de fissure.
- Le réservoir de grés à dragées du Barrémo-Apto-Albien (C^{3-1}) à perméabilité mixte.
- Le réservoir du Tertiaire (T_c) à perméabilité d'interstice.
- Le réservoir moins important des alluvions quaternaire (q) à perméabilité d'interstice,

Les formations marneuses, argileuses et calcaires du Valanginien qui sont dans l'ensemble imperméables, leurs bancs calcaires peuvent être réservoirs par localité lorsque la consistance de leurs épaisseurs le permet.

L'étude qualitative des eaux souterraines de la région d'El Bayadh a été réalisée en utilisant deux séries de données, de 2018 et celle de 2019 relevées toutes les deux au niveau de l'ADE. Ces séries de données comportent un manque de teneur en sodium et potassium. Notre étude se base sur la comparaison des données physico-chimiques disponibles avec les normes de potabilité algériennes et celle de l'OMS. Le traitement de ces résultats a démontré que :

Du point de vue minéralisation, les eaux souterraines présentent une minéralisation moyenne avec un maximum récolté au niveau du forage de Bendjrad (681.93) et un minimum de 271.33

(Hodhna (A1)). La dureté des eaux sont dures à très dures. Les éléments polluants (nitrite, nitrate et phosphate) se trouvent en faible teneur voire nulle au niveau de certains forages, à l'exception des trois forages (Ozied 1, Hodhna (F4, F5)) où la teneur en phosphate dépasse les normes de potabilité prescrites. Cela est lié, probablement à l'utilisation excessive des produits agricoles.

Les éléments indicateurs de pollution s'avère être plus important au cours de l'année 2019, la pollution en phosphate est également détecté qu'en 2019 dans la majorité des forages et on constate également une baisse de cette pollution dans deux forages (Hodhna (F4, F5) dans lesquelles elle était importante en 2019. Les éléments nitrites et nitrates ne font pas également exception, en effet on remarque qu'ils sont plus important en 2019 qu'en 2018.

Pour l'usage agricole, le directif de la FAO estime que les eaux de notre zone d'étude ne présentent aucun problème lié à la salinité ni pour les ions toxiques. Pour les effets divers liés aux nitrates elles sont classées dans la classe « problème croissant ». Les eaux souterraines peuvent être classées dans la catégorie admissible pour l'irrigation.

La cartographie des zones de vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines du bassin versant d'El Bayadh par l'application de la méthode GOD a révélé quatre zones de vulnérabilité différente de degré faible, modérée, forte et très forte.

- La zone à vulnérabilité faible qui est définie par la nappe moyennement profonde entre 0.25-0.3 de côtes.
- La zone à vulnérabilité modérée représente une extension de la nappe dont la profondeur n'est pas importante aux cotes 0.3-0.5.
- La zone à vulnérabilité forte représente les nappes proches du sol (0.5-0.7).
- La zone à vulnérabilité très forte définie par les formations assez fissurées et se localise au Nord et à l'Est du bassin versant principalement (0.7-0.81).

La cartographie de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines est une méthodologie qui est devenue nécessaire afin d'assurer la gestion qualitative des ressources en eau souterraine en relation avec les diverses activités anthropiques. Elle apparait donc nécessaire et incontournable car ce type de carte permet d'identifier très facilement les zones à risques de pollutions potentielles. Elle servira donc comme un outil d'aide à la décision aux gestionnaires des ressources en eau et permettra également d'orienter l'aménagement du territoire.

Bibliographie

- Added, A. Hamza, M.H. (2006).** Evaluation of the vulnerability in Metline aquifer (Northeast of Tunisia). ESRI user conference. San Diego, États-Unis.
- Albinet, M. Margat, J. (1970).** Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraines. Bull BRGM (2) 1970; Section III (4): 13-22. Algeria. Wilaya de Bejaia .28p.
- André, M., Christophe H. (2003)** Hydrologie, une science de la nature.
- Aubril Carhon, L.2013.** Eau potable : Normes, Disponible en ligne : www.wikiterritorial.cnfpt.fr/xwiki/wiki/econnaissances/view/Notions-Cles. >. consulté le mai 2020.
- Ayers R.S., Westcot D.W (1976).** La qualité de l'eau en agriculture. Bulletin F.A.O. Irrigation Drainage, n.29, 97p.
- Azzaz. H., (1992).** Mémoire " Etude hydrogéologique du synclinal d'El Bayadh" 1992 par Azzaz Habib. Univ. Oran.
- Bahir M., Blavoux B., Menani M., Oloveira Da Silva M.** "Impact de la sécheresse sur la ressource en eau en zone semi-aride : cas de l'aquifère Barrémien –Aptien de la zone côtière d'Essaouira (Maroc) ". Ecnologia de l'intrusion d'agua de mar en acuiferos costeros : paises mediterraneos.
- Ben Yazza Abd elmalek (2014),** evaluation des faciés hydro-chimique des eaux souterraines de la region d'In Salah (wilaya de Tamnasset), mémoire de Master professionnel, Université Kasdi Merbah Ouargla.
- Benaouda, W.,** Étude qualitative physico-chimiques de l'eau de la ville de TLEMCEM destinée à la consommation humaine et aux nourrissons, mémoire de Master en Agronomie, Option : Technologies des Industries Agroalimentaires – TIAA.
- Bouanani, R. (2004).** Hydrologie, transport solide et modélisation étude de quelques sous bassins de la Tafna (NW– Algérie). Thèse de doctorat : Géologie appliquée : Option hydrogéologie. Tlemcen : Université Abou Bekr Belkaid, 250p.
- Bousseghoun, (2010).** Rapport "Invest in algeria (EL bayedh)" fait par "Ksar de Bousseghoun".
- Castany, G. (1982).** Principes et méthodes de l'hydrogéologie. BORDAS, Paris. P 223-225
- Cazaux, M. (2007).** Les eaux souterraines en Gironde. Cartographie de la vulnérabilité aux pollutions des nappes éocènes dans le secteur du Blayais. Faculté des sciences de la terre et de l'Environnement de Montpellier. Rapport de stage Master II. Cedex 4, 5p.
- Chapman D., Kimstach V. (1996).** Selection of water quality variables. Water quality assessments: a guide to the use of biota, sediments and water in environment monitoring, Chapmanediton, 2nd ed. E & FN Spon, London,
- Charikh, M. (2014).** Estimation et cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines en milieu aride: application à la cuvette de Ouargla. P87.

- Chetouane S., Taleb H. (2019).** Evaluation de la qualité des eaux souterraines de la plaine de Remchi (NW Algérien) : Approche Statistique, mémoire de Master en Géologie Option : Hydrogéologie
- Claude Cosandey, Mark Robinson,** Hydrologie continentale, 2^eédition, p413.
- Coulais J. M., (2002).** Qualité des eaux et normes de potabilité en deux serves. Édition Des ateliers.
- Devillers J., Squilbin M., Yourassowsky C. (2005).** Qualité physicochimique et chimique des eaux de surface. Institut bruxellois pour la gestion de l'environnement, observation des données de l'environnement L'IBGE : "l'eau à Bruxelles. Fiche2.
- Duchaine, D. (1998).** Cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution (par l'intégration d'un SIG, de la télédétection et d'un modèle mathématique). Mémoire de Baccalauréat : Géographie. Québec : Université du Québec.95 p
- Eastman, J.R (1995).** Idrisi, un SIG en mode image. Clark labs for cartographic technology. Edition : DUNOD. Paris.1383p
- ES Saouini, H. (2015).** Vulnérabilité a la pollution des eaux souterraines : Aspect dynamique et application à l'aquifère de R'MEL (Larache, MAROC). Faculté des sciences et techniques Tanger. Université Abdelmalek Essaadi. Thèse doctorat. p153.
- FAO N° 29 (1976),** La qualité de l'eau en agriculture, Disponible en ligne : <http://www.fao.org/3/T0234E/T0234E00.htm>
- Charfi, C., Masmoudi, M. M., & Ben Mechlia, N. (2004).** Irrigation de l'olivier: Cas des jeunes plantations intensives. Revue Ezzaitouna, 10(1-2), 37-51.
- Fatima Zohra C., Imene.B. (2018).** Mémoire '' Contribution à l'étude de la variabilité climatique dans la steppe algérienne : Cas de la région d'El Bayadh '' 2018 par Fatima Zohra Chouireb et Imene Belahcen. Univ. Mostaganeme.
- Foster, S. (1987).** Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. In: Van Duijvenbooden, W. & Van Waegeningh, H. (eds) Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollution. TNO Committee on Hydrological Research, The Hague, 69–86.
- Ganjous D., (1995)** La pollution des milieux aquatiques, 2eme Edition : Lavoisier.
- Gaujour, D., (1995).** La pollution des milieux aquatiques : Aide-mémoire. 2eme édition Lavoisier.
- Géographic analysis.** Publication du CRIF, 500 p.
- Ghazali D, Zaid A. (2013).** Etude de la qualité physicochimique et bactériologique des eaux de la source Ain Salama-Jerri (région de Mekine-Maroc).
- Hubert P., Marin M. (2001).** Quelle eau boirons-nous demain ? Edition: Fabienne Travers. P64-124.
- Jean J.C., (2002).** La dégradation de la qualité de l'eau dans le réseau, Paris.
- Jean R., Bernard L., Nicole M., et coll. (2009).** L'analyse de l'eau - 9^{ème} édition, - Eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer: Analyse de l'eau, 9^{ème} édition, Paris, Dunod. 1579
- JOURNAL OFFICIEL DE LA REPUBLIQUE ALGERIENNE N°18, (2011),** Décret exécutif n 11-125 du 17 Rabie Ethani 1432 correspondant au 22 mars 2011 relatif la qualité de l'eau de consommation humain.18 Rabie Ethani 1432, 23 mars 2011.

- Khattou A., Kouar B. (2014)** : Méthodes d'extraction de la roche en carrière à ciel ouvert. Mémoire de master université de Tlemcen.
- Lallemand, B. Jean, C.R. (1999)** : Pollution des eaux souterraines, in BRGM, BP, 6009,45060 Orléans Cedex 2, Périmètre de protection des captages d'eau souterraine destinée à la consommation humaine. P: 24-27.
- Lenntech.** Normes de l'OMS sur l'eau potable - Lenntech. [En ligne]. Disponible sur <https://www.lenntech.fr/francais/ammonium-environnement.htm#ixzz6Px7IC662>).
- Maizi, D. (2007)** : Etude hydrogéologique du bassin versant du chott Ech Chergui : cas du synclinal d'El Bayadh, Mémoire magister Univ. Houari Boumédién, Alger. 255p.
- Marc M., Bernard T. et Yann L'hôte (1999)** : Acquisition et constitution d'une information hydrologique de base. p 205.
- Mardhel, V. Pinson, S et Gravier, A. (2005)** : Cartographie de la vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines en région Nord-Pas-de-Calais. Etude réalisée dans le cadre des opérations de service public du BRGM/RP – 54238 - FR
- Margat, J. (1968)** : Vulnérabilité des nappes des eaux souterraines à la pollution. Base de la cartographie, Doc. BRGM, 68 SGL 198 HYD. Orléans, France.
- Mouaz N., Bentchich (2017)** : Khedidja Caractérisation physico-chimiques et bactériologiques de l'eau de l'oued de Cheliff, Mémoire de Master, Université de Khemis-Miliana
- Nadjla B., (2006)** : Utilisation d'un SIG pour l'évaluation des caractéristiques physiques d'un bassin versant et leurs influences sur l'écoulement des eaux (bassin versant d'Oued El Maleh, Nord-Ouest d'Algérie). Mémoire de magister, université d'Oran.
- OMS, (1994)** : Directives de qualité pour les eaux de boissons. Volume 1. 2ème Ed.
- OMS, (2017)** : Directives de qualité pour l'eau de boisson : 4e éd. Intégrant le premier additif, 564p
- Paquin J.L., Blok J.C., Haudidier K. (1992)** : Effet du chlore sur la colonisation bactérienne d'un réseau expérimental de distribution d'eau, Edition : Revue de sciences de l'eau, N°4.
- Pitau G. (1973)** : Etude hydrogéologique d'El Bayadh. ANRH.
- Quevauviller Ph. (2010)** : Protection des Eaux Souterraines : Législation Européenne et Avancées Scientifiques. Paris: Lavoisier.433p.
- Rahman A. (2008)**: A Gis DRASTIC model for assessing groundwater vulnerability in shallow aquifer in Aligarh, India. Applied Geography. Vol. 28(1), pp. 32-53.
- Ramade F. (1984)** : Eléments d'écologie- écologie fondamentale. Edition Marc Graw-Hill, Paris. 397p.
- Regagba Z. (2012)** : Dynamique des populations végétales halophytes dans la région sud-est de Tlemcen, aspects phytoécologiques et cartographiques par Mme REGAGBA Zineb 2012.
- Rodier, J., (2005)** : L'analyse de l'eau. 8ème édition.
- Touhari F., (2015)** : Etude de la Qualité des Eaux de la vallée du Haut Cheliff, Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Hydraulique.

Vrba, J. et Zaporozec, A. (1994) : Guide book on mapping groundwater vulnerability. IAH, Vol. 1, pp131.

Zwahlen, F. (2004) : Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (Karst) aquifers COST action 620. European commission, EUR 20912 : 297 p, Université Neuchâtel.

Annexes

Annexe 1: Précipitations moyennes mensuelles (mm) de la station d'El Bayadh

Année	jan	fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Oct	Nov	Déc
1988	30,48	5,58	21,08	8,13	14,73	27,43	2,28	11,43	6,09	40,89	14,97	10,17
1989	15,75	4,07	51,31	25,66	1,27	20,06	5,84	20,57	10,92	33,27	7,12	10,17
1990	41,92	0	16,01	33,79	60,44	9,14	2,29	10,41	4,82	11,94	9,39	1,77
1991	12,45	27,42	140,23	22,85	34,05	9,15	3,81	8,14	17,28	112,53	3,3	31,26
1992	20,06	14,73	44,46	28,71	60,96	4,57	13,97	10,67	22,35	0	9,91	9,65
1993	3,06	14,48	25,4	14,23	18,54	50,3	7,12	22,35	12,45	10,92	37,58	13,22
1994	11,18	11,94	35,56	4,07	1,02	7,12	215,15	5,34	67,33	49,27	14,24	2,03
1995	11,18	20,07	32,25	20,06	5,08	35,82	1,02	7,11	36,07	18,04	4,07	49,28
1996	31,51	42,43	85,1	38,87	1,78	88,66	3,56	2,55	51,05	16,01	0	35,06
1997	62,25	0,51	3,05	54,36	10,16	0	0,76	44,44	42,68	37,09	27,94	30,74
1998	7,11	6,61	76,19	16,01	45,97	6,09	1,02	3,06	5,09	5,08	2,28	2,28
1999	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5,84	18,8	32,27
2000	0	0	5,84	6,1	8,13	4,82	8,89	10,92	29,97	28,7	36,07	9,39
2001	19,56	11,94	1,02	9,14	4,82	0,51	1,27	8,88	11,94	12,7	4,83	20,81
2002	1,02	7,62	20,58	42,17	3,05	1,53	9,4	30,49	9,14	29,21	52,58	16,52
2003	26,16	27,18	4,07	20,32	15,24	4,82	3,81	19,06	5,08	179,07	86,86	35,31
2004	103,6	18,8	6,86	44,21	54,61	13,72	9,9	7,1	4,07	9,39	23,37	23,11
2005	9,9	5,33	17,54	1,02	3,3	33,28	20,33	6,1	78,48	65,79	2,03	22,87
2006	33,79	62,48	2,28	19,3	74,67	22,61	4,57	3,05	14,98	0	38,34	38,86
2007	8,4	18,5	20,4	0,5	30,3	25,6	3,3	9,9	10,6	18,1	8,2	4,7
2008	9,66	14,72	24,13	0,76	30,74	35,56	5,6	12,44	38,86	114,75	27,17	51,32
2009	43,69	24,14	75,18	29,46	8,38	7,11	6,35	15,23	81,79	2,03	16,25	17,28
2010	24,38	48,77	19,31	27,18	46,47	8,89	7,62	23,81	38,35	40,14	11,69	18,03
2011	10,67	9,13	20,31	109,2	39,87	36,06	3,05	63,24	32,51	115,82	73,42	33,28
2012	6,09	17,26	47,24	36,07	0,51	3,81	0,51	2,04	27,69	59,18	117,1	10,41
2013	33,02	11,69	17,03	69,6	3,81	7,11	36,58	6,35	15,74	33,78	5,32	37,33
2014	26,94	30,74	32,26	8,13	35,81	11,68	2,54	13,47	15,24	6,09	83,05	45,46
2015	19,56	31,25	13,47	1,02	24,64	6,61	0,25	30,74	38,86	49,28	8,63	0,25
2016	1,53	7,11	12,71	50,04	9,13	4,31	5,59	17,52	45,48	20,58	65,28	37,84
2017	103,4	6,09	0,5	18,54	5,58	6,84	6,35	7,36	5,33	7,11	7,11	28,19
2018	17,27	20,55	66,05	83,82	39,86	6,35	3,05	47,75	5,34	82,8	45,22	4,06

Annexe 2 : Températures moyennes mensuelles (°C) de la station d'El Bayadh

Année	jan	fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Oct	Nov	Déc
1988	5,8	6,4	8,6	13,8	18,1	21,9	28,1	27,6	21,3	16	10,5	3,8
1989	3,9	7,3	11,4	12,1	19,2	20,1	28,6	27,6	24,2	18,1	12,6	10,1
1990	4	11,2	12,1	12,4	16,3	27,1	28,2	27,2	25,7	17,9	9,9	5,7
1991	5,2	5,2	9,3	10,7	14	22,7	27,6	25,7	21,8	13,1	8,3	4,4
1992	3,2	5,9	6,8	10,9	16,2	18,7	24,2	25,6	22,5	14,8	8,6	5,7
1993	4,1	4,6	8,5	11,5	17,2	24,5	27,8	26,7	19,8	16,1	9,1	5,4
1994	4,6	7,6	10,7	10,7	20,4	25,5	28,4	28,4	20,8	15	10,3	5,3
1995	4,1	8,3	8,5	10,7	20	22,4	28,1	27,7	21,2	16,6	12	8,4
1996	7,7	5,4	10,3	13,3	19	20,7	26,4	27	19,5	14,3	10,1	6,8
1997	5,9	8,3	9,9	12,1	18,8	24,6	28,1	25,4	20,9	15,6	9,8	6,2
1998	5,7	7,4	10,2	13,5	15,9	26,4	30,7	28,5	25,5	15,2	11,2	6
1999	5,1	4,8	10,2	17,2	22,2	28,1	30	31,1	24,8	20,4	9	5,8
2000	4,3	9,3	12,7	15,1	20,9	25,7	30,1	28,1	23,5	14,6	11,7	9
2001	6,7	7,3	15,5	15,2	20,1	28,1	30,4	29,3	24,1	22,2	9,4	7,2
2002	6,2	9,2	10,8	12,5	17,4	24,4	27,4	25,4	21,1	16,4	9,3	7
2003	3,8	4,7	10,7	13,3	18,1	25,3	29,6	26,7	21,6	16,7	8,8	4,7
2004	5,1	8,1	10,4	12,1	13,3	23,6	27,3	27,6	21,7	18,3	7,7	4,5
2005	2,1	2,8	10,8	14,4	21,9	24,3	29,4	26,9	20,5	16,7	15	4,1
2006	2,2	4,5	10,6	15,9	19,8	24,7	28,1	26,6	20,1	18,5	10,8	4,9
2007	6,3	8,5		12,3	17,8	24,9	28,2	27,2	23	15,7	8,7	4,7
2008	6,4	8,7	10	14,8	17,5	23	29	28,2	22,3	14	6,7	3,8
2009	4	5,8	10,1	9,7	19	24,8	29,1	27,7	18,4	16,2	10,8	8,4
2010	6,7	9	11,3	15,2	16	23	29	27,5	21,4	15,5	9,6	7,9
2011	6,6	4,8	9	15,7	17,7	22,2	27,7	27,7	23,9	14,5	8,9	4,7
2012	4	2	9,4	11,2	19,9	26,7	29,3	28,5	22,3	16,5	10,3	5,8
2013	4,5	4,6	10,1	13	15,5	22,3	27,3	26,1	21,5	20,3	8,2	4,8
2014	5,6	7,1	8	15,3	19,7	22,3	27,7	27,9	23,3	17,8	10,8	4,4
2015	4	3,7	9	16,9	20,8	22,1	28,3	26,4	22,1	16,5	9,7	7,5
2016	7,9	8	8,6	15,4	19,2	24,5	28,8	26,8	21,9	18,4	9,2	6,1
2017	2,5	8,04	10,2	13,8	21,3	24,9	28,3	27,6	21,4	15,1	8,7	3,8
2018	5	3,9	8,8	12,3	15,2	22,9	30	24,1	22,1	13,7	8,5	6

Annexe 3: Qualité de l'eau servant à l'irrigation selon FAO

Paramètre	Unité	Degré de restriction imposé à l'utilisation		
		Aucun	Faible à modéré	Important
Salinité, EC _w	dS/m	<0.7	0.7-3.0	>3.0
TDS	mg/l	<450	450-2000	>2000
TSS	mg/l	<50	50-100	>100
SAR ¹	0-3	meq/l >0.7 EC _w	0.7-0.23 EC _w	<0.23 EC _w
SAR	3-6	meq/l >1.2 EC _w	1.2-0.3 EC _w	<0.3 EC _w
SAR	6-12	meq/l >1.9 EC _w	1.9-0.5 EC _w	<0.5 EC _w
SAR	12-20	meq/l >2.9 EC _w	2.9-1.3 EC _w	<1.3 EC _w
SAR	20-40	meq/l >5.0 EC _w	5.0-2.9 EC _w	<2.9 EC _w
Sodium (Na ⁺) Irrigation par aspersion	meq/l	<3	>3	
Sodium (Na ⁺) Irrigation superficielle	meq/l	<3	3-9	>9
Chlorure (Cl ⁻) Irrigation par aspersion	meq/l	<3	>3	
Chlorure (Cl ⁻) Irrigation superficielle	meq/l	<4	4-10	>10
Chlore Cl ₂ Total résiduel	mg/l	<1	1-5	>5
Bicarbonate (HCO ₃ ⁻)	mg/l	<90	90-500	>500
Bore (B)	mg/l	<0.7	0.7-3.0	>3.0
Sulfure d'hydrogène (H ₂ S)	mg/l	<0.5	0.5-2.0	>2.0
Fer (Fe) Irrigation par goutte-à-goutte	mg/l	<0.1	0.1-1.5	>1.5
Manganèse (Mn) Irrigation par goutte-à-goutte	mg/l	<0.1	0.1-1.5	>1.5
Azote total (AT) et Nitrate (NO ₃ ⁻)	mg/l	<5	5-30	>30
pH		Plage normale 6.5-8		
	mg/l			

TDS : matières solides dissoutes totales ; TSS : matières solides en suspension totales.
¹ EC_w : conductivité électrique moyenne en déciSiemens par mètre à 25°C.
² SAR : taux d'adsorption moyen du sodium ([meq/l²])

Sources: Ayers & Westcot (1985); Pescod (1992); Asamo & Levine (1998).

Annexe 4: Les données piézométriques des puits

n°	prof	N-S	N-Piézo
Forages			
1	150	10	1485
2	70	25	1371
3	70	23	1372
4	70	12	1322
5	70	20	1318
6	70	27	1359
7	70	36	1335
8	70	11	1376
9	68	45	1073
10	70	32	1310
11	130	44,6	1279,4
12	130	60	1282
13	125	20	1305
14	100	40	1300
15	110	35	1289
16	80	40	1284
17	200	24	1310
18	80	10	1362
19	100	10	1360
20	150	30	1345
21	150	53	1342
22	120	6	1260
23	60	50	1193
24	130	8	1255
25	100	45	1251
26	140	40	1254
27	140	40	1265
28	150	40	1256
29	150	30	1245
30	62	5,4	1256,6
31	97	10	1259
32	110	0	1267
33	100	7	1272
34	120	22	1242
35	140	100	1200
36	100	25	1258
37	100	7,9	1271,1
38	140	7	1273
39	150	30	1252
40	116	30	1370
41	70	25	1371
42	70	25	1363
43	70	25	1359
44	75	40	1364
45	70	28	1343
46	100	28	1326
47	50	30	1377

48	80	49	1396
49	70	40	1359
50	70	39,4	1358,6
51	70	55	1344
52	70	57	1355
53	70	41	1357
54	70	30	1361
55	70	30	1372
56	70	30	1385
57	70	30	1367
58	70	30	1367
59	70	30	1365
60	70	30	1366
61	72	30	1381
62	67	57	1347
63	70	40,7	1351,3
64	70	45	1373
65	350	30	1373
66	95	30	1391
67	100	50	1352
68	70	35	1352
69	85	47,3	1362,7
70	100	42	1367
71	72	55	1344
72	62	56	1380
73	70	40	1363
74	70	40	1361
75	82	30	1363
76	85	30	1375
77	70	69	1341
78	80	35	1375
79	96	60	1361
80	70	23	1356
81	40	12	1338
82	70	40	1329
83	120	40	1328
84	70	48	1344
85	70	45	1344
86	70	50	1342
87	70	55	1337
88	70	56	1336
89	40	25	1371
90	80	30	1372
91	116	55	1341
92	113	57	1340

93	106	53	1333
94	85	51	1338
95	80	50	1335
96	100	40	1338
97	70	50	1342
98	70	37	1343
99	70	38	1337
100	100	35	1338
101	100	36	1339
102	70	40	1341
103	110	40	1347
104	70	25	1343
105	70	37	1337
106	70	30	1338
107	62	30	1327
108	70	35	1321
109	100	50	1298
110	70	27	1319
111	44	34	1301
112	72	18,5	1318,5
113	70	20	1319
114	70	40	1328
115	90	40	1320
116	70	40	1328
117	70	40	1322
118	64	60	1313
119	70	40	1340
120	70	60	1335
121	70	60	1335
122	80	70	1310
123	90	30	1344
124	70	56	1319
125	80	60	1328
126	100	39	1352
127	90	45	1348
128	38	37	1354
129	70	35	1345
130	75	40	1334
131	70	45	1328
132	70	45	1331
133	70	40	1330
134	64	51	1330
135	70	25	1343
136	70	32	1331
137	70	15	1339

138	98	40	1335
139	70	40	1295
140	192	20	1315
141	42	30	1305
142	70	30	1317
143	70	30	1315
144	70	37	1346
145	40	10	1352
146	600	42	1333
147	252	35	1384
148	79	34	1373
149	70	30	1387
150	70	16	1383
151	70	25	1386
152	70	35	1341
153	100	80	1289
154	70	45	1368
155	60	35	1372
156	70	20	1344
157	70	37	1359
158	70	30	1349
159	56	55,8	1313,2
160	115	55	1319
161	70	50	1316
162	70	30	1335
163	70	43	1334
164	70	36	1328
165	90	56	1334
166	65	25	1335
167	75	25	1334
168	70	25	1328
169	60	30	1316
170	248	20	1286
171	70	20,8	1371,2
172	70	19	1365
173	70	20	1369
174	70	18	1366
175	350	35	1349
176	70	30	1369
177	70	30	1368
178	115,5	20	1370
179	100	30	1350
180	70	20	1358
181	85	24,4	1354,6
182	70	36	1357

183	70	12	1373
184	70	17	1354
185	70	15	1354
186	131,7	11	1369
187	310	40	1346
188	210	40	1338
189	75	40	1452
190	75	15	1480
191	70	15	1464
192	70	35	1354
193	95	24	1356
194	70	28	1352
195	70	45	1359
196	70	20	1355
197	70	30	1355
198	70	40	1359
199	340	20	1381
200	34	6	1354
201	34	6,6	1342,4
202	34	6	1352
203	100	25	1366
204	82	26	1363
205	200	45	1370
206	301	25	1375
207	70	20	1381
208	70	35	1357
209	70	35	1355
210	65	53	1340
211	70	21	1388
212	301	25	1353
213	70	35	1367
214	70	55	1350
215	70	53	1349
216	70	52	1343
217	80	65	1343
218	85	68	1339
219	70	30	1349
220	70	30	1367
221	70	30	1355
222	70	27	1355
223	70	24	1351
224	70	30	1352
225	100	30	1387
226	70	35	1383
227	70	35	1386

228	70	38	1365
229	70	33	1367
230	70	30	1362
231	52	30	1391
232	70	45	1375
233	80	52	1361
234	70	50	1381
235	70	50	1350
236	70	40	1359
237	70	40	1360
238	70	40	1357
239	70	35	1354
240	70	30	1359
241	70	40	1353
242	70	45	1345
243	70	35	1366
244	65	61	1338
245	200	44	1330
246	70	20	1357
247	70	30	1339
248	70	40	1339
249	70	30	1351
250	80	21	1356
251	70	23	1356
252	70	19	1353
253	70	20	1357
254	50	23	1354
255	70	30	1367
256	100	30	1360
257	70	25	1355
258	70	17,7	1363,3
259	70	25	1349
260	76	33,7	1367,3
261	69	32,8	1374,2
262	60	35,7	1377,3
263	70	23	1359
264	70	25	1358
265	69	23	1362
266	70	20	1376
267	65	32	1347
268	70	32	1338
269	70	20	1355
270	70	20	1352
271	70	20	1354
272	66	20	1359

273	70	19,9	1358,1
274	70	25	1355
275	70	25	1365
276	70	25	1352
277	70	25	1355
278	70	24	1356
279	72	30	1350
280	70	30	1355
281	70	30	1356
282	100	25	1357
283	192	38	1294
284	60	12,9	1301,1
285	46	14,8	1298,2
286	80	15	1308
287	192	20	1290
288	150	20	1353
289	426	26	1343
290	200	44	1378
291	100	20	1459
292	70	35	1306
293	50	25	1335
294	60	25	1333
295	60	35	1301
296	350	30	1324
297	70	13	1336
298	70	20	1345
299	70	15	1333
300	100	18	1327
301	50	25	1323
302	70	19,4	1324,6
303	70	20	1323
304	70	35	1322
305	50	35	1316
306	70	30	1318
307	70	25	1312
308	100	22	1313
309	80	30	1310
310	70	30,7	1319,3
311	70	18,5	1345,5
312	70	20	1342
313	70	16,9	1341,1
314	270	20	1345
315	116	51	1317
316	116	45	1313
317	55	23	1341

318	67	16	1321
319	192	38	1327
320	70	28	1335
321	60	28	1335
322	70	25	1333
323	70	25	1329
324	70	25	1321
325	70	25	1321
326	72	27	1403
327	70	35	1342
328	55	20	1311
329	70	35	1306
330	40	15	1329
331	70	20	1300
332	100	30	1301
333	60	25	1319