

République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
جامعة أبو بكر بلقايد - تلمسان  
Université ABOUBEKR BELKAID – TLEMEN  
كلية علوم الطبيعة والحياة وعلوم الأرض والكون  
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, et des Sciences de la Terre et de l'Univers  
Département des Sciences de la Terre et de l'Univers.

*Laboratoire N°25: « Promotion des ressources hydriques, minières et pédologiques :  
législation de l'environnement et choix technologique ».*



MÉMOIRE

Présenté par

**SEBAIHI TANI Hiba & YAZID Meriem**

*En vue de l'obtention du*

**Diplôme de MASTER**

En Hydrogéologie.

**Thème**

**CARACTERISATION PHYSICO-CHIMIQUE DES EAUX DE LA NAPPE SUPERFICIELLE DE  
LA PLAINE D'ANNABA (NORD-EST ALGERIEN).**

Soutenu le 29/06/2025, devant le jury composé de :

Président	Mr CHIKH .M	M.A.A	Université de Tlemcen.
Encadrant	Mr BENCHAI.B	M.C.B	Université de Tlemcen.
Examineur	Mr BOUDJEMA.A	M.C.A	Université de Tlemcen.

Année universitaire 2024 /2025.

# الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات

## ملخص

يقع سهل عنابة في شمال شرق الجزائر، حيث يفتح على خليج عنابة المطلّ على ساحل البحر الأبيض المتوسط، ويتميز بمناخ البحر الأبيض المتوسط المعتدل.

تتواجد المياه الجوفية تحت هذا السهل داخل تكوينات طميية نفاذة، مما يسمح بحركتها بشكل حر نسبياً، ويجعلها عرضة لتأثيرات متعددة، سواء كانت طبيعية أو ناتجة عن النشاط البشري.

الهدف الرئيسي من عملنا هو الدراسة الهيدروكيميائية للمياه الجوفية في سهل عنابة، وذلك عبر فترتين زمنيّتين مختلفتين. وقد شمل التحليل مجموعة من المؤشرات الفيزيائية والكيميائية مثل درجة الحموضة (pH)، ودرجة الحرارة، والتوصيلية الكهربائية، وتركيزات الأيونات الرئيسية.

وقد تم تفسير البيانات باستخدام مخطط باير لتحديد الأوجه الكيميائية المختلفة، بالإضافة إلى تطبيق منهجية النسبة المميزة لتحديد المصدر المحتمل للعناصر الكيميائية المشاركة في زيادة تمعدن المياه.

تكشف النتائج عن تغيّر واضح في النوعية الكيميائية للمياه، حيث تم رصد انتقال من نمط الكلوريد الكلسي في شهر ديسمبر من سنة 2011 إلى نمط بيكربونات الصوديوم في شهر نوفمبر من سنة 2016، وهذان النمطان يُعدّان السائدان في المياه الجوفية للمنطقة المدروسة. كما لوحظ ارتفاع ملحوظ في التوصيلية الكهربائية، مما يدل على مستوى عالٍ من التمعدن، والذي يُحتمل أن يكون ناتجاً عن تأثيرات من مصادر صخرية، أو بحرية، أو بشرية المنشأ.

**الكلمات المفتاحية:** سهل عنابة، طبقة المياه الجوفية الساحلية، القياسات الفيزيائية الكيميائية، التوازن الأيوني، مخطط باير، الأوجه الكيميائية.

## Abstract

The Annaba plain, located in the northeastern part of Algeria, opens extensively onto the Gulf of Annaba, along the Mediterranean coastline, benefiting from its climate.

The groundwater beneath this plain is found in permeable alluvial formations. Water flows relatively freely, exposing it to various natural and human-induced influences.

The primary objective of our study is the hydrochemical analysis of the groundwater in the Annaba plain over two distinct periods. The analysis covered several physico-chemical parameters, including pH, temperature, electrical conductivity, and the concentrations of major ions. Data interpretation was carried out using the Piper diagram to identify the different chemical facies and by applying the characteristic ratios method to determine the potential origin of the chemical elements contributing to the increase in mineralization.

The results show a clear change in water quality, with a shift from a calcium chloride facies in December 2011 to a sodium bicarbonate facies in November 2016. These latter facies now dominate the groundwater in the studied area. A significant rise in electrical conductivity was also observed, indicating a high level of mineralization, which is likely influenced by lithological, marine, or anthropogenic inputs.

**Keywords:** Annaba Plain, coastal aquifer, physico-chemical parameters, ion balance, Piper diagram, chemical facies.

## Résumé

La plaine d'Annaba, située au nord-est de l'Algérie, où elle s'ouvre largement sur le golfe d'Annaba, au bord de la Méditerranée, où elle jouisse avec le climat de cette dernière.

La nappe phréatique sous cette plaine est contenue dans des formations alluviales perméables. L'eau y circule relativement librement, ce qui l'expose à diverses influences naturelles et anthropiques.

L'objectif principal de notre travail est l'étude hydrochimique des eaux souterraines de la plaine d'Annaba entre deux périodes distinctes. L'analyse a porté sur un ensemble de paramètres physicochimiques, notamment le pH, la température, la conductivité électrique et les concentrations en ions majeurs. L'interprétation des données a été effectuée à l'aide du diagramme de Piper pour déterminer les différents faciès chimiques existants et l'utilisation de la méthode des rapports caractéristiques, afin de savoir l'origine potentielle des éléments chimiques participant à l'augmentation de la minéralisation.

Les résultats révèlent un changement bien évident de la qualité chimique de l'eau où on a décelé un transfert d'un faciès chloruré calcique en mois de Décembre 2011 à un faciès bicarbonaté sodique en mois de Novembre 2016, ces derniers dominent les eaux souterraines de la zone étudiée. Ainsi qu'une élévation significative de la conductivité électrique, témoignant d'un niveau de minéralisation élevé, souvent influencée probablement par des apports d'origine lithologique, marine ou anthropique.

**Mots clés :** Plaine d'Annaba, aquifère cotier, paramètres physico-chimiques, Balance ionique, Diagramme de Piper, Faciès chimiques.

## *Remerciements*

Nous remercions avant tout **ALLAH**, le Tout-Puissant, pour la force de volonté et le courage qu'Il nous a accordés pour l'achèvement de ce mémoire. Il a été et restera toujours à nos côtés, pour nous aider à accomplir le travail et réaliser les rêves que nous nous sommes fixés dans la vie.

La finalisation de cette étude n'aurait pu être atteinte sans l'assistance ininterrompue de notre superviseur, Mr le docteur **BENCHAI.B. A.** Nous lui exprimons notre profonde gratitude pour ses commentaires avisés et ses conseils éclairés, qui se sont avérés d'une valeur inestimable pour le développement et la conclusion de cette étude.

Nous tenons à adresser nos respects et remerciements à **Mr.CHIKH.M**, enseignant à l'université de Tlemcen, d'avoir accepté de juger et commenter ce travail, et qui a eu l'honneur de présider le jury de soutenance.

Nous adressons nos plus sincères remerciements à **Mr le docteur BOUDJEMA. A**, éminent enseignant à l'université de Tlemcen, pour avoir accepté d'examiner et d'enrichir ce travail, de ses remarques éclairées, qu'il trouve ici l'expression de notre profonde reconnaissance et de notre respect.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude et remerciement à Monsieur le Docteur **BENSEFIA.K.** Chef du Département de Géologie à l'université de Tlemcen, pour son engagement et sa disponibilité. Ainsi qu'à l'ensemble des enseignants et du personnel administratif du département pour leur soutien et leur accompagnement tout au long de notre parcours.

Enfin, nous souhaitons remercier toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.

## *Dédicace*

*Nous dédions ce mémoire à nos parents, à nos chères mamans et à nos chers papas, pour leur amour inconditionnel, leurs sacrifices et leur soutien indéfectible, sans lesquels ce parcours n'aurait jamais été possible.*

*À nos frères, les piliers de nos vies, pour leur affection, leur humour et leur présence réconfortante.*

*À nos belles-sœurs, pour leur tendresse et leurs encouragements sincères.*

*À leurs enfants, nos neveux et nièces, qui apportent tant de joie et de lumière dans nos vies.*

*À notre encadrant, pour ses conseils avisés, sa disponibilité et son accompagnement rigoureux, qui ont grandement contribué à la réalisation de ce mémoire.*

*Enfin, à tous les enseignants qui nous ont guidés et formés durant notre parcours universitaire. Merci pour votre engagement, votre patience, et pour avoir partagé généreusement votre savoir.*

*Merci à vous tous.*

*Meriem & Hiba*

## TABLE DES MATIERES

ملخص .....	
Abstract .....	
Résumé .....	
Remerciements .....	
Dédicace .....	
LISTE DES ABREVIATIONS .....	
LISTE DES FIGURES .....	
LISTE DES TABLEAUX .....	
INTRODUCTION GENERALE .....	1
<b>CHAPITRE I : CADRE GEOGRAPHIQUE ET APERÇUS GEOLOGIQUE</b>	
1.Cadre géographique .....	5
1.1. Présentation de site d'étude .....	5
1.2. Géomorphologie de la zone d'étude .....	6
1.3.Le réseau hydrographique .....	6
2. Aperçu géologique .....	7
2.1. Introduction .....	7
2.2. Massif de l'Edough .....	8
2.3. Plaines littorales .....	10
2.4. Formation sédimentaire (figure 05) .....	10
2.4.1. Le secondaire .....	10
2.4.2. Le Tertiaire .....	11
2.4.3. Le Quaternaire .....	11
2.4.3.2. Quaternaire moyen .....	11
2.4.3.3. Quaternaire récent .....	11
2.4.3.4. Quaternaire actuel .....	11
2.5. Tectonique .....	12
2.6. Paléogéographie.....	13
<b>CHAPITRE II :HYDROCLIMATOLOGIE</b>	
1.Introduction .....	16
2.Étude des caractéristiques climatiques .....	16
2.1. Choix de la station de mesure :.....	16
2.2. Paramètres climatiques .....	17
2.2.1. Précipitations.....	17

2.2.2. Température .....	22
2.2.2.1. Phénomène de changement climatique dans la zone d'étude .....	23
2.2.3. Les indices climatiques .....	25
2.2.3.1. Indice d'Aridité (De Martonne 1925) .....	25
2.2.3.2. L'indice Ombrothermique de Gaussen .....	26
2.2.4. L'Humidité.....	27
2.2.5. Le vent .....	28
2.2.6. Le bilan hydrique .....	29
2.2.6.1. Estimation de l'évapotranspiration réelle par la Méthode de Turc :.....	30
2.2.6.2. Estimation de l'évapotranspiration potentielle et réelle par la Méthode de THORNTHWAITE.....	31
2.2.6.3. Le ruissellement .....	34
2.2.6.4. L'infiltration .....	35
3. Conclusion .....	36

### **CHAPITRE III : SYNTHESE HYDROGÉOLOGIQUE**

1.Introduction .....	39
2. Les aquifères identifiés au niveau de la zone d'étude .....	39
3.Quelques indications sur les caractéristiques hydrogéologiques des aquifères .....	39
3.1.La nappe superficielle d'Annaba (N.S.A) .....	39
3.2. La nappe des graviers : .....	40
4. Descriptions des nappes de la zone d'étude .....	41
5. Aperçu sur la situation piézométrique.....	41
5.1. Historique de la piézométrie de la nappe superficielle d'Annaba.....	42
5.2.Etats piézométriques réalisés en (Décembre 2011, Avril 2016, Novembre 2016, Avril 2017, Juillet 2017).....	42
5.2.1. Carte piézométrique de (Décembre 2011) .....	42
5.2.2. Carte piézométrique de (Avril 2016) .....	43
5.2.3. Carte piézométrique de (Novembre 2016) .....	44
5.2.4. Carte piézométrique de (Avril 2017) .....	46
5.2.5. Carte piézométrique de (Juillet 2017).....	47
5.3.Relation Oued-nappe .....	48
6.Conclusion.....	49

### **CHAPITRE IV: HYDROCHIMIE**

1.Introduction .....	52
2.Échantillonnage et analyse physicochimique.....	52

3. Caractéristiques physicochimiques des eaux de la nappe étudiée .....	<b>53</b>
3.1. Paramètres physiques .....	54
3.2. Paramètres chimiques .....	59
3.2.1. Balance Ionique : .....	59
3.2.2. Les éléments majeurs .....	59
3.2.2.1. Les cations .....	60
3.2.2.2. Les anions .....	65
4. Les faciès chimiques .....	<b>72</b>
4.1. Digramme de PIPER .....	72
4.2. Comparaison entre les deux périodes (Décembre 2011, Novembre 2016) .....	75
6. Les rapports caractéristiques .....	<b>76</b>
6.1. Mois de Décembre 2011 .....	76
6.1.1. Le rapport ( $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$ ) .....	76
6.2. Mois de Novembre 2016 .....	81
7. Adéquation des eaux à un usage agricole .....	<b>85</b>
7.1. L'indice du rapport de Kelly ou Kelly's Ratio (KR) .....	85
7.2. Classification de Wilcox .....	87
8. Conclusion .....	<b>91</b>
<b>CONCLUSION GENERALE</b>	
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....</b>	<b>94</b>
<b>ANNEXES .....</b>	

## LISTE DES ABREVIATIONS

- **P** : Précipitations.
- **mm** : Millimètre.
- **T** : Température.
- **°C** : Degré Celsius.
- **CE**: Conductivité électrique.
- **μS/cm**: Micro-siemens par centimètre.
- **pH** : Potentielle Hydrogène.
- **BI** : Balance Ionique.
- **%** : Pourcentage.
- **mg/l** : Milligramme par litre.
- **meq/l** : milli équivalent par litre.
- **KR**: Kelly's Ratio.
- **ADE** : Algérienne des eaux.
- **ANRH** : Agence Nationale des Ressources Hydrique.
- **OMS** : Organisation mondiale de santé.

## LISTE DES FIGURES

Figure 1: Situation géographique de la plaine d'Annaba.....	5
Figure 2: Carte géologique et géomorphologique de la plaine d'Annaba (Habes, 2012).....	8
Figure 3: Carte géo-structurale du massif de l'Edough (D'après Hily, 1962 modifiée).....	9
Figure 4: Extension des plaines littorales (In, Debieche, 2002), modifiée).....	10
Figure 5: Carte hydrogéologique montrant les aquifères qui existent au niveau de la zone d'étude (D'après Gaud, 1976, in Hani 2003, modifiée par BENCHAIIB, 2021).....	12
Figure 6: Coupe géologique illustrant les fausses de Ben-Mhidi et de Ben-Ahmed, et la butte de Daroussa au sud de la région d'étude (in Hani 2003, modifiée).....	13
Figure 7: Variation des précipitations moyennes mensuelles, période (1999-2020).....	18
Figure 8: Variation des précipitations moyennes annuelles, période (1999-2020).....	19
Figure 9: Portions des répartitions saisonnières des précipitations en (%)......	20
Figure 10: Variations des coefficients pluviométriques calculés aux niveaux de station des salines (1999-2020)......	22
Figure 11: Variations des moyennes annuelles des températures. ....	23
Figure 12: La variation de la température entre les trois décennies. ....	24
Figure 13: Courbe Ombro-thermique de la station des salines (1999-2020). ....	27
Figure 14: Histogramme d'humidité relative de l'air à la station des Salines (1991-2021). ....	28
Figure 15: Histogramme de vitesse des vents à la station des Salines (1984-2015). ....	29
Figure 16: Représentation graphique du bilan hydrique de Thornthwaite de la station des Salines (1999-2020). ....	34
Figure 17: Coupe schématique montrant la superposition des nappes souterraines dans la plaine d'Annaba (in BENCHAIIB, 2021). ....	40
Figure 18: Carte piézométrique de la Plaine d'Annaba (Décembre 2011). ....	43
Figure 19: Carte piézométrique de la Plaine d'Annaba (Avril 2016). ....	44
Figure 20: Carte piézométrique de la Plaine d'Annaba (Novembre 2016). ....	46
Figure 21: Carte piézométrique de la Plaine d'Annaba (Avril 2017). ....	47
Figure 22: Carte piézométrique de la Plaine d'Annaba (Juillet 2017). ....	48
Figure 23: Schéma illustrant le drainage d'une nappe par l'oued (site web, eadyssee).....	49
Figure 24: Carte d'inventaire des puits (a) de Décembre 2011, et (b) Novembre 2016. ....	53
Figure 25: Variations de la température (C°) des eaux souterraines (A, Décembre 2011) et (B, Novembre 2016). ....	55
Figure 26: Variations du pH des eaux souterraines (A, Décembre 2011) et (B, Novembre 2016). ....	56
Figure 27: Variations de la Conductivité CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) des eaux souterraines, (A) Décembre 2011 et (B) Novembre 2016. ....	57
Figure 28: Variations du Calcium ( $\text{mg}/\text{l}$ ), (A, Décembre 2011, et (B, Novembre 2016). ....	61
Figure 29: Variation du Magnésium ( $\text{mg}/\text{l}$ ), (A, Décembre 2011, et (B, Novembre 2016). ....	62
Figure 30: Variations du sodium ( $\text{mg}/\text{l}$ ), (A, Décembre 2011, et (B, Novembre 2016). ....	63
Figure 31: Variations du potassium $\text{k}$ ( $\text{mg}/\text{l}$ ) des eaux souterraines (A, Décembre 2011, et (B, Novembre 2016). ....	65
Figure 32: Variations des chlorures ( $\text{mg}/\text{l}$ ), (A, Décembre 2011, et (B, Novembre 2016). ....	66
Figure 33: Variations des sulfates ( $\text{mg}/\text{l}$ ), (A, Décembre 2011, et (B, Novembre 2016). ....	67

Figure 34:Variations des bicarbonates (mg/l), (A, Décembre 2011, et B, Novembre 2016)...	68
Figure 35:le cycle de l'azote dans l'environnement (site web, cycle d'azote).....	70
Figure 36:Variations des nitrates (mg/l), (A, Décembre 2011, et, B, Novembre 2016). ....	71
Figure 37:(A) Diagramme de Piper ; (B) carte de distribution des faciès chimiques (mois de Décembre 2011). ....	74
Figure 38:(A) Diagramme de Piper ; (B) carte de distribution des faciès chimiques (mois de Novembre 2016).....	75
Figure 39:La relation Na vs Cl, (mois de Décembre 2011). ....	77
Figure 40:La relation Ca vs Mg de mois de Décembre 2011.....	78
Figure 41:La relation Ca vs HCO <sub>3</sub> , (mois de Décembre 2011).....	79
Figure 42:La relation Ca vs SO <sub>4</sub> , (mois de Décembre 2011). ....	80
Figure 43:La relation K vs NO <sub>3</sub> , (mois de Décembre 2011). ....	81
Figure 44:Relation Na vs Cl, (mois de Novembre 2016).....	82
Figure 45:Relation Ca vs Mg, (mois de Novembre 2016). ....	83
Figure 46:Relation Ca vs HCO <sub>3</sub> , (mois de Novembre 2016). ....	84
Figure 47:Relation Mg vs SO <sub>4</sub> , (mois de Novembre 2016). ....	85
Figure 48:Diagramme de Wilcox (mois de Décembre 2011).....	89
Figure 49:Diagramme de Wilcox (mois de Novembre 2016).....	90

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1:Caractéristiques de la station météorologique des salines. ....	17
Tableau 2:Variations des moyennes mensuelles des précipitations, période (1999-2020).....	17
Tableau 3:Répartition saisonnière des précipitations.....	20
Tableau 4:Récapitulation des années excédentaires et déficitaires selon les valeurs du coefficient pluviométrique calculé. ....	21
Tableau 5:Température moyenne mensuelle (°C), période (1990-2020).....	23
Tableau 6:Moyennes de la température de chaque décennie. ....	24
Tableau 7:Type de climat selon l'indice d'aridité.....	25
Tableau 8:Résultats de l'indice d'Aridité d'Emmanuel De Martonne (IA).....	26
Tableau 9:Moyenne mensuelle de l'humidité relative en (%) à la station des Salines (1991-2021).....	27
Tableau 10:Moyenne mensuelle de la vitesse des vents à la station des Salines (1984-2015).28	
Tableau 11:Estimation des valeurs de la RFU selon la formule d'Hallaire. ....	30
Tableau 12: L'évapotranspiration réelle selon la formule de Turc (1999-2020).....	31
Tableau 13:Bilan hydrologique selon Thornthwaite, station des salines (1999-2020).....	33
Tableau 14:Détermination du ruissellement, période (1999-2020). ....	35
Tableau 15:Estimation de l'infiltration par ETR de la méthode de Thornthwaite. ....	36
Tableau 16:Description géologique et hydrogéologique du site (Debieche, 2002, Modifié) .	41
Tableau 17:Variations de la température(C°) des eaux souterraines. ....	54
Tableau 18:Variations du pH des eaux souterraines. ....	56
Tableau 19:Relation entre la conductivité (CE) et la minéralisation (Rodier.J.2009). ....	57
Tableau 20:Classification des eaux en fonction du titre hydrotimétrique.....	58
Tableau 21:Classification des eaux de 24 puits, selon l'indice de KR, (mois de Décembre 2011).....	86



## **INTRODUCTION GENERALE**

### Introduction générale

L'eau est l'une des ressources les plus précieuses pour la vie sur Terre. Elle est indispensable non seulement à la survie des êtres vivants, mais aussi au développement des sociétés humaines dans tous les domaines, que ce soit l'agriculture, l'industrie, l'alimentation en eau potable, ou même la production énergétique. Si l'eau recouvre près de 70 % de la surface de la Terre, seulement environ 2,5 % de cette eau est douce, et une infime proportion est réellement accessible pour l'utilisation humaine. En raison de cette rareté relative, l'eau est devenue une ressource stratégique, de plus en plus sollicitée et menacée, notamment dans les régions où la disponibilité est limitée. Face à cette pression croissante, il est primordial de gérer cette ressource avec soin et de surveiller sa qualité afin de prévenir les risques de pénurie et de pollution.

La plaine d'Annaba, située dans le nord-est de l'Algérie dans un golfe, constitue un exemple typique des enjeux hydriques dans ce pays. Cette région est une plaine côtière, bénéficiant d'une situation géographique stratégique entre mer Méditerranée et montagnes. La proximité de la mer a un impact direct sur le climat local et les ressources en eau de la plaine. En effet, l'irrigation des terres agricoles et la consommation domestique et industrielle dépendent en grande partie des nappes phréatiques et des ressources superficielles de la région. Cependant, la plaine d'Annaba est soumise à une pression croissante en raison de l'explosion démographique. Les eaux souterraines et superficielles de cette région sont ainsi mises à rude épreuve, ce qui soulève des préoccupations quant à leur durabilité et à leur qualité.

Dans ce contexte, l'étude hydrochimique des ressources en eau de cette région apparaît comme une démarche incontournable. En étudiant les caractéristiques physico-chimiques de la nappe telles que la concentration en ions majeurs, le pH, la température et la conductivité, il est possible de suivre l'état qualitatif de l'eau dans le sous-sol tout en comprenant leur origine, leur évolution et de détecter les éventuelles sources de pollution.

Ce mémoire a pour objectif d'évaluer l'état qualitatif des eaux souterraines de la nappe superficielle de la plaine d'Annaba à travers une analyse hydrochimique. Le travail se divise en quatre (04) chapitres principaux :

- ❖ **Chapitre I** : le cadre géographique et géologique, qui décrit la région, sa géomorphologie, ses formations géologiques et la répartition des ressources en eau.

- ❖ **Chapitre II** : l'analyse hydroclimatique, basée sur des données météorologiques récentes, incluant les températures et les précipitations, pour comprendre les dynamiques hydrologiques locales.
- ❖ **Chapitre III** : le contexte hydrogéologique, qui détaille les caractéristiques des nappes et des cours d'eau, leur fonctionnement, leur recharge et leur vulnérabilité.
- ❖ **Chapitre V** : une étude hydrochimie, qui représente le cœur de cette recherche, et qui analyse la composition chimique des eaux, leur qualité et leurs aptitudes aux différents usages.
- ❖ En fin de compte, la conclusion viendra résumer les principaux résultats obtenus, formuler des observations sur l'état actuel des ressources en eau dans la plaine d'Annaba, et proposer quelques recommandations en faveur d'une gestion durable et intégrée de cette ressource vitale.

A decorative horizontal scroll-like border with rounded ends and a slight shadow, containing the chapter title.

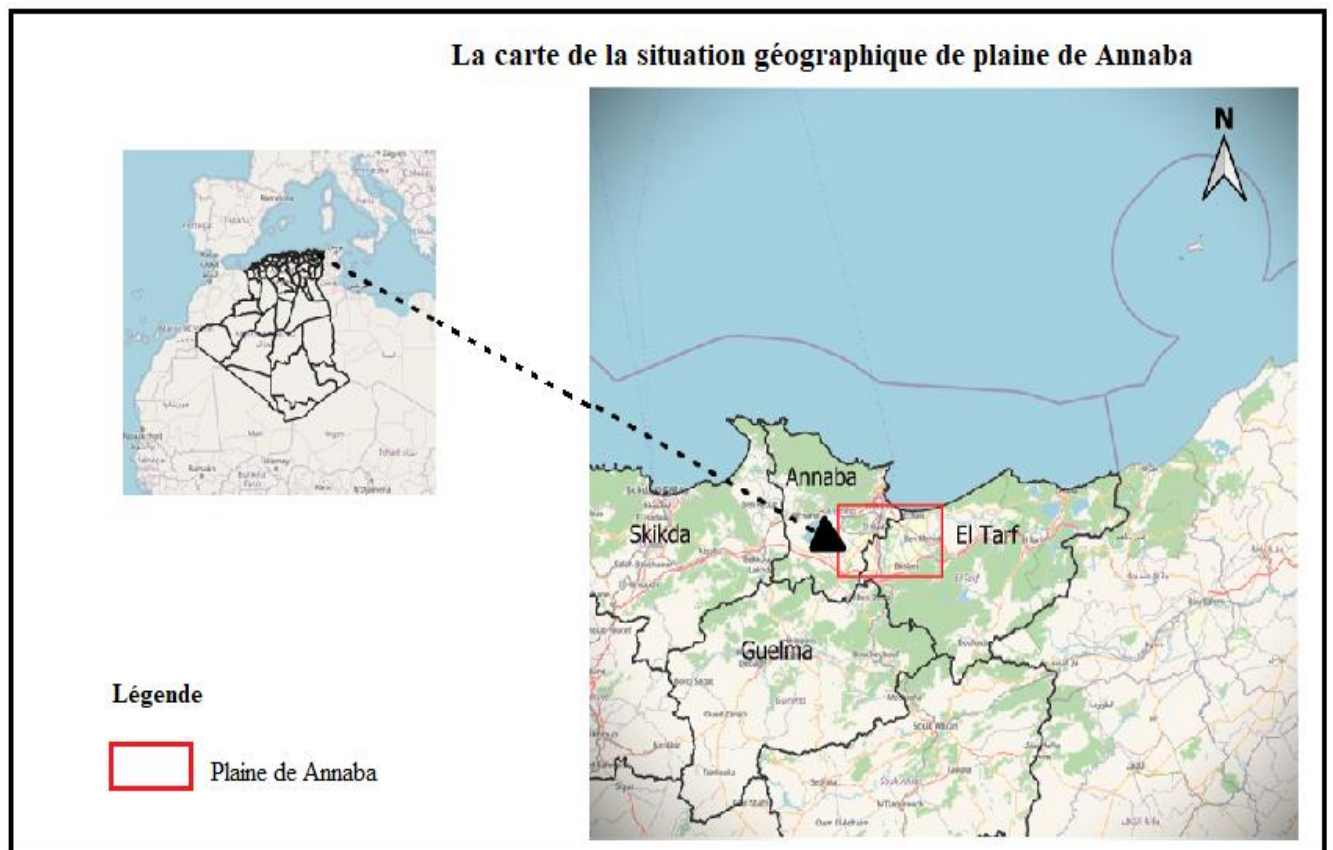
**CHAPITRE I**  
**CADRE GEOGRAPHIQUE ET APERÇUS**  
**GEOLOGIQUE**

## 1. Cadre géographique

### 1.1. Présentation de site d'étude

La plaine d'Annaba est située au Nord-est de l'Algérie, entre les latitudes 36°30' Nord et 37°30' Nord et longitudes 7°20' Est et 8°40' Est, avec une superficie d'environ 1411 .98 km<sup>2</sup>, elle est distante de 600 km de la capitale (Alger) et 106 km la séparent de la frontière tunisienne (Figure 1). La plaine d'Annaba est limitée par :

- La mer Méditerranée au nord ;
- Le massif de Belelieta (287 m) et de Bouhamra (152 m) à l'ouest qui sont séparés du massif principal de l'Edough (1008 m) ;
- La chaîne numidique orientale plus au sud (1411 m) ;
- Enfin, le prolongement oriental du système aquifère Annaba – Bouteldja.



**Figure 1 : Situation géographique da la plaine d'Annaba**

## 1.2. Géomorphologie de la zone d'étude

L'analyse territoriale a identifié trois formes morphologiques distinctes au niveau de la région d'Annaba. Ces formes comprennent la plaine d'Annaba, le cordon dunaire et la présence de reliefs montagneux, correspondant à la retombée des djebels Edough au nord et des massifs de Belleleita au sud-ouest et de Bouhammra au sud, (Boulakoud.Z.2009).

Une analyse approfondie de la géomorphologie du site révèle une topographie essentiellement plane sur l'ensemble de la plaine, des inclinaisons marquées sont observées aux abords de la plaine, dans sa partie ouest et sud. Ces inclinaisons sont clairement dues à l'anticlinal du massif métamorphique, de l'Edough et de Belelieta, ainsi qu'à celui de la chaîne Numidienne (Debieche, 2002).

## 1.3.Le réseau hydrographique

Le réseau hydrographique se distingue par la présence de deux principaux cours d'eau qui parcourent la plaine sont les suivants :

- L'oued Seybouse qui occupe la troisième place quant à sa superficie après l'Oued El Kébir du Rhumel et l'oued Medjerda Mellègue en territoire algérien, draine un bassin versant de 6570 Km<sup>2</sup>. L'oued Seybouse dont l'embouchure se trouve près de la ville de Annaba s'étend vers le Sud sur une distance de 160 Km jusqu'aux confins de l'Atlas Saharien.
- L'oued Meboudja, le dernier affluent de l'oued Seybouse, draine le lac Fetzara (l'exutoire d'un bassin versant endoréique de 515 Km<sup>2</sup>) par un canal d'assèchement de 14 Km.

## 1.4.Aperçu socioéconomique

La région d'Annaba est un territoire à forte dynamique industrielle et agricole. Cette double vocations et ces activités requièrent une gestion optimisée de la ressource en eau, un enjeu particulièrement crucial ces dernières années, en raison de la croissance démographique. Le secteur de l'eau potable est confronté à des défis majeurs, notamment en raison de l'augmentation constante de la demande. L'exploitation de la nappe superficielle et de la nappe profonde entraîne une forte variabilité dans la gestion des ressources en eau dans cette région.

### ▪ L'industrie :

Il s'agit de l'un des pôles industriels du pays. La ville est un centre industriel majeur de la sidérurgie mondiale. Elle abrite en effet le complexe sidérurgique d'El Hadjar, qui est le plus grand d'Afrique. On remarque trois catégories d'industries sont présentées dans cette région :

- ✓ Les industries lourdes travaillent avec SIDER (Société Nationale de Sidérurgie) ;
- ✓ L'industrie chimique avec le complexe des engrais phosphatés et azotés (ASMIDAL) ;
- ✓ Enfin, il y a l'industrie agroalimentaire, avec de petites entreprises.

Tous les rejets des villes et des usines se déversent directement dans les rivières, à l'exception de celui de l'usine ASMIDAL qui transmet ses rejets directement au niveau de la mer.

#### ▪ **L'Agriculture :**

L'agriculture est un pilier de la région. La plaine, dans toute sa splendeur, est le théâtre d'une diversité remarquable de cultures : céréalières, maraîchères et arboricoles.

#### ▪ **La population :**

La population de la région étudiée, tout comme la population du reste du territoire algérien, est située dans le nord du pays. On observe une densité démographique significative, principalement concentrée dans les zones urbaines d'Annaba, d'El Hadjar, de Sidi Amar et d'El Bouni. (Ferroum.A.2015).

## **2. Aperçu géologique**

### **2.1. Introduction**

Dans le cadre d'une étude hydrogéologique, l'élaboration d'un aperçu géologique s'avère une étape primordiale, cette analyse permet en effet de déterminer la capacité des formations géologiques à contenir des nappes d'eau souterraines. L'étude géologique, qui se concentre sur l'analyse des caractéristiques physiques et hydrologiques du milieu, permet d'identifier avec précision les différents matériaux constitutifs du sol et du sous-sol, ainsi que le type d'aquifère présent.

La région d'Annaba a fait l'objet de plusieurs études géologiques, dont celles de (H. Joleaud, 1936, J. Hilly, 1962, J. M. Vila, 1980, J.C. Lahondere, 1987, Gleizes, 1988, Hammor, 1992). L'affleurement de terrains métamorphiques et éruptifs occupe la partie nord et nord-ouest du massif de l'Edough, Belelieta et Bouhamra, et le reste de la zone d'étude est constitué de terrains sédimentaires (BENCHEAIB ; 2021), (figure 2).

Les roches sédimentaires, métamorphiques et volcaniques sont attribuées aux périodes géologiques du Paléozoïque, Cénozoïque, et Quaternaire qui correspondent à quatre grands ensembles tectoniques et structuraux : Le massif Cristalloyphyllien d'Annaba, l'Edough, marque la fin de la ligne des crêtes des massifs kabyles à l'est. Aujourd'hui, il forme un dôme qui

ressemble à une amygdale et dont l'axe, orienté sud-ouest – nord-est, continue au-dessus du lac Fetzara par les collines de Berrahal. Au fabuleux relief principal s'ajoutent à l'est, le djebel Bougantes, le Kef N'Sour et le Bouhamra, les sublimes coteaux de Annaba et enfin le spectaculaire promontoire du Cap de Garde, tranché brusquement par l'impressionnant affaissement méditerranéen.

Dans cette partie de notre travail, nous mentionnerons les formations et les composantes géologiques les plus importantes qui caractérisent la plaine d'Annaba.

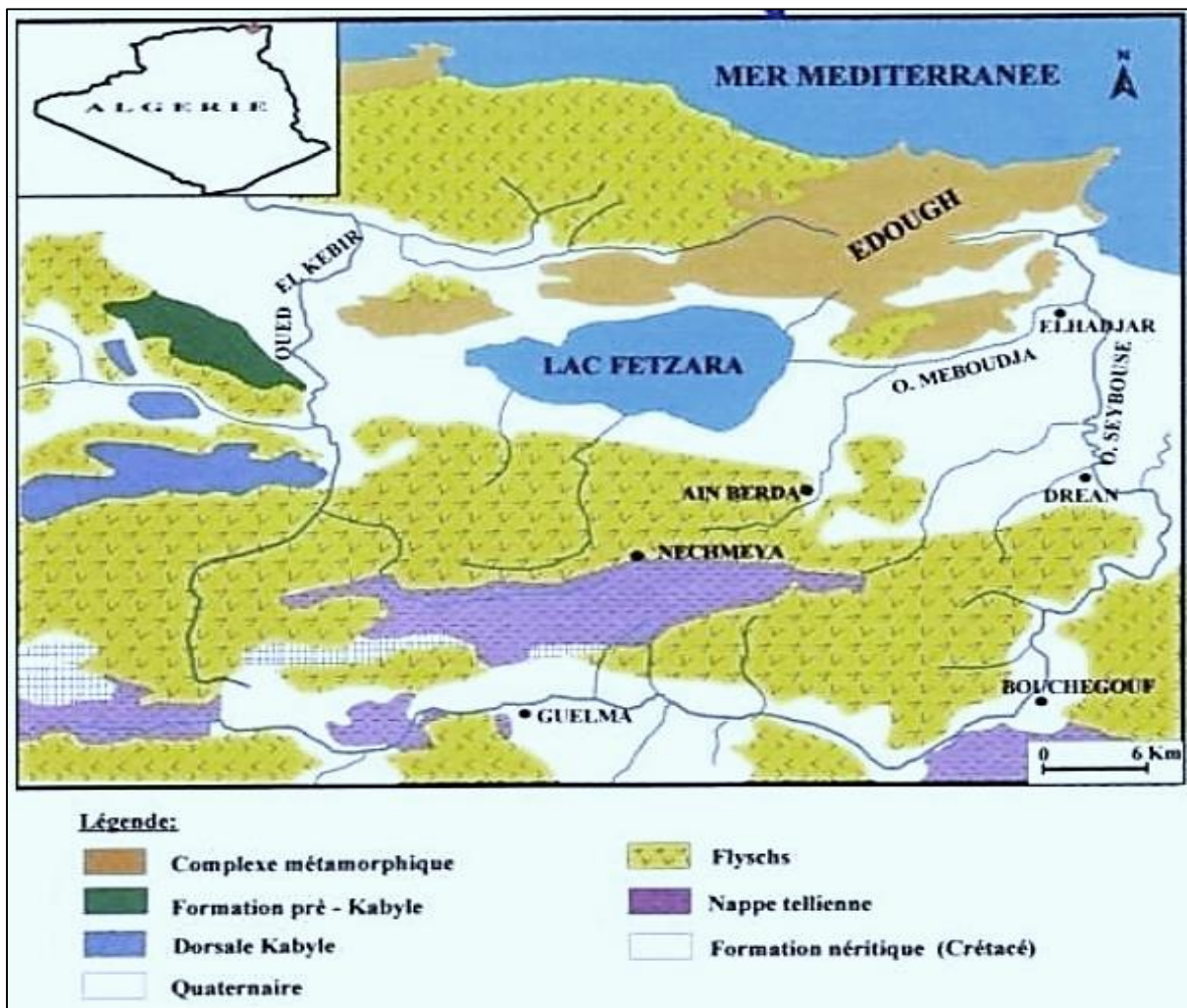


Figure 2: Carte géologique et géomorphologique de la plaine d'Annaba (Habes, 2012).

## 2.2. Massif de l'Edough

Le massif de l'Edough est un massif cristallophyllien, situé à l'extrémité orientale de la côte algérienne, se distingue par une antiforme composée de gneiss et de micaschistes, s'étendant sur une longueur de 50 km et une largeur de 20 km. Cette antiforme présente une orientation

axiale N 60, avec des intercalations de marbre-amphibolite et de schiste satiné, comme l'a rapporté (J. M. Vila en 1980). Le massif de l'Edough se distingue par une lithologie variée avec la présence de plusieurs types de roches. Le complexe cristallophyllien représente la composante principale du massif, des formations magmatiques et sédimentaires, principalement localisées dans la partie est du territoire.

Ce site a fait l'objet de plusieurs études géologiques (Hilly, 1962; Vila, 1970; Gleizes et al., 1988; Marignac et Zimmermann, 1983; Marignac, 1985; Bouguerra, 1990 ; Monié et al., 1992; Hammor, 1992; Aissa et al., 1995; Hammor et Lancelot, 1998; Laouar et al., 2002), Il est classé dans la catégorie des zones internes de la chaîne alpine de l'Afrique du Nord, associée à la collision de la plaque africaine et européenne durant la période Oligo-Miocène (Hilly, 1962; Vila, 1970; Gleizes et al., 1988; Marignac et Zimmermann, 1983; Marignac, 1985; Bouguerra, 1990 ; Monié et al., 1992; Hammor, 1992; Aissa et al., 1995; Hammor et Lancelot, 1998; Laouar et al., 2002).

Le complexe de l'Edough se distingue par la présence d'une diversité de roches métamorphiques d'âge Précambrien à Paléozoïque; l'ensemble de ces roches forme une antiforme d'axe NE-SW, (figure 3).

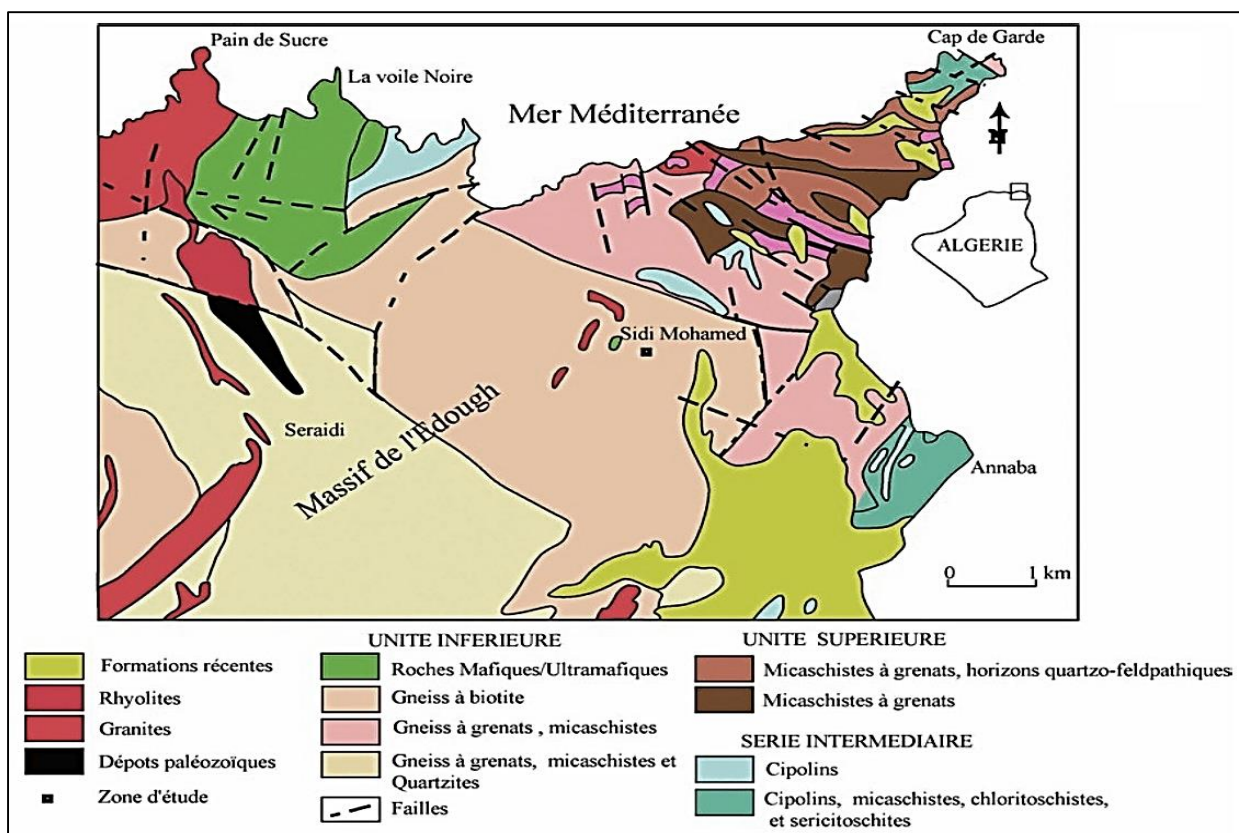


Figure 3: Carte géo-structurale du massif de l'Edough (D'après Hily, 1962modifiée).

### 2.3. Plaines littorales

L'étendue des plaines en question s'étend de la vallée de la Seybouse jusqu'à la frontière tunisienne, présentant une largeur d'environ 15 km et une longueur de 110 km. Elles ne forment pas un ensemble homogène. En effet, on y trouve des dunes sableuses, des espaces marécageux, des plaines fertiles et de petits reliefs. Ces caractéristiques d'Ouest en Est comprennent la plaine de Guerbes, la dépression du lac Fetzara, la plaine d'El Hadjar et la plaine d'Annaba. Elles sont constituées de sédiments quaternaires récents, qui forment le fond de cette dépression tectonique, les grès numidiens représentent les points culminants, dont les plus notables sont situés aux abords du village de Daghoussa (figure 4).

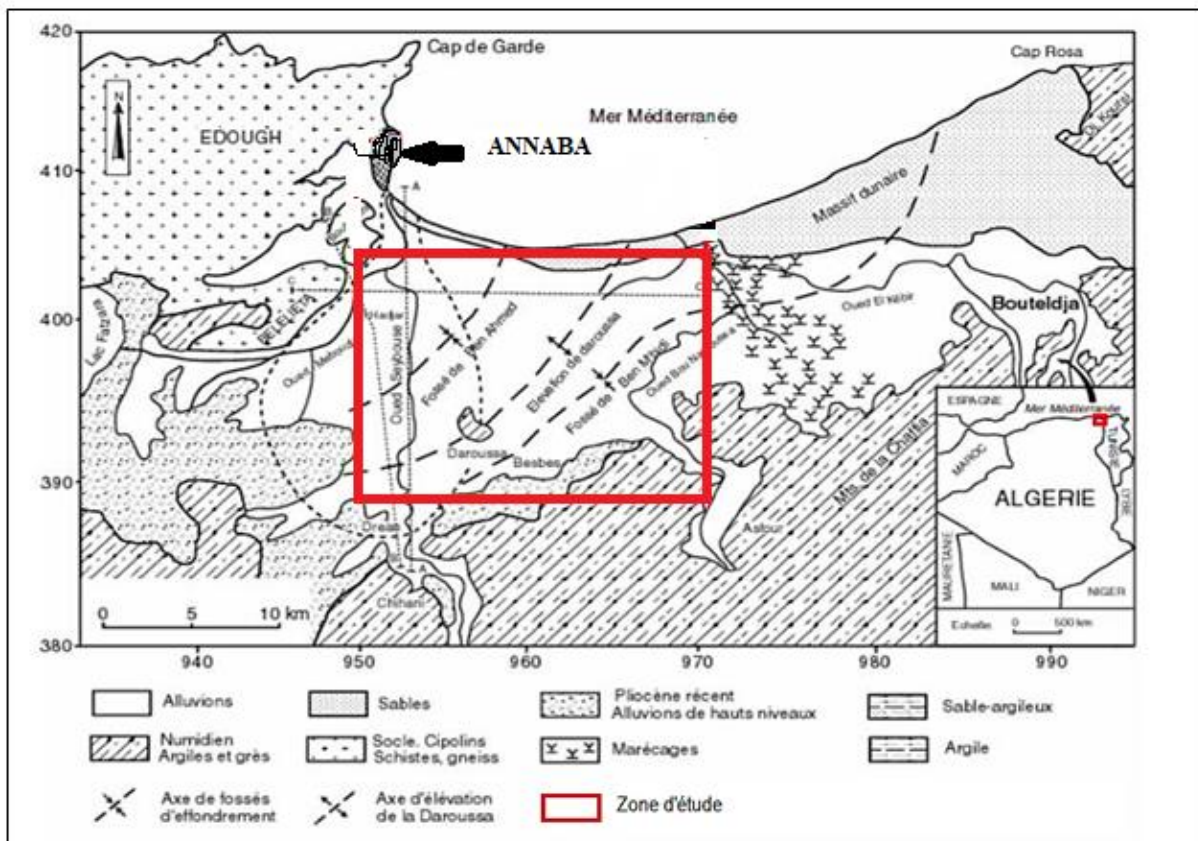


Figure 4 : Extension des plaines littorales (In, Debieche, 2002), modifiée)

### 2.4. Formation sédimentaire (figure 5)

#### 2.4.1. Le secondaire

Le site présente des terrains allochtones constitués de calcaires à silex du Jurassique et de flysch du Crétacé.

### **2.4.2. Le Tertiaire**

Présente une épaisseur importante dans la région d'étude avec trois (3) systèmes sont comme suite :

- L'éocène inférieur se présente sous la forme d'une série transgressée composée de calcaires massifs à faciès épinéritiques ;
- L'Oligocène se caractérise par la présence de couches argilo-gréseuses numidiens qui ont contribué à la formation du relief montagneux dans la partie sud de la plaine ;
- Le Mio-pliocène représente le segment de remplissage graveleux de sablo-argileux du bassin.

### **2.4.3. Le Quaternaire**

Il se compose des formations continentales, alluvionnaires, colluviales, éoliennes et marines (L. Jaleaud, (1936). Les études géologiques approfondies sur le Quaternaire dans la plaine d'Annaba révèlent quatre caractéristiques principales dans cette région :

#### **2.4.3.1. Quaternaire ancien**

Ce site est caractérisé par des formations alluviales (argiles, limon, sables, graviers et galets), qui forment un réservoir d'eau superficielle. Cette zone, située entre 75 et 150 m d'altitude, correspond à la haute terrasse.

#### **2.4.3.2. Quaternaire moyen**

Ce segment correspond à la basse terrasse, dont la hauteur varie entre 20 et 50 m. Cette zone est composée d'un mélange d'argiles et de sables. Elle est adaptée à l'exploitation agricole et à l'utilisation sur des terres cultivées, et elle se développe sur toute la région.

#### **2.4.3.3. Quaternaire récent**

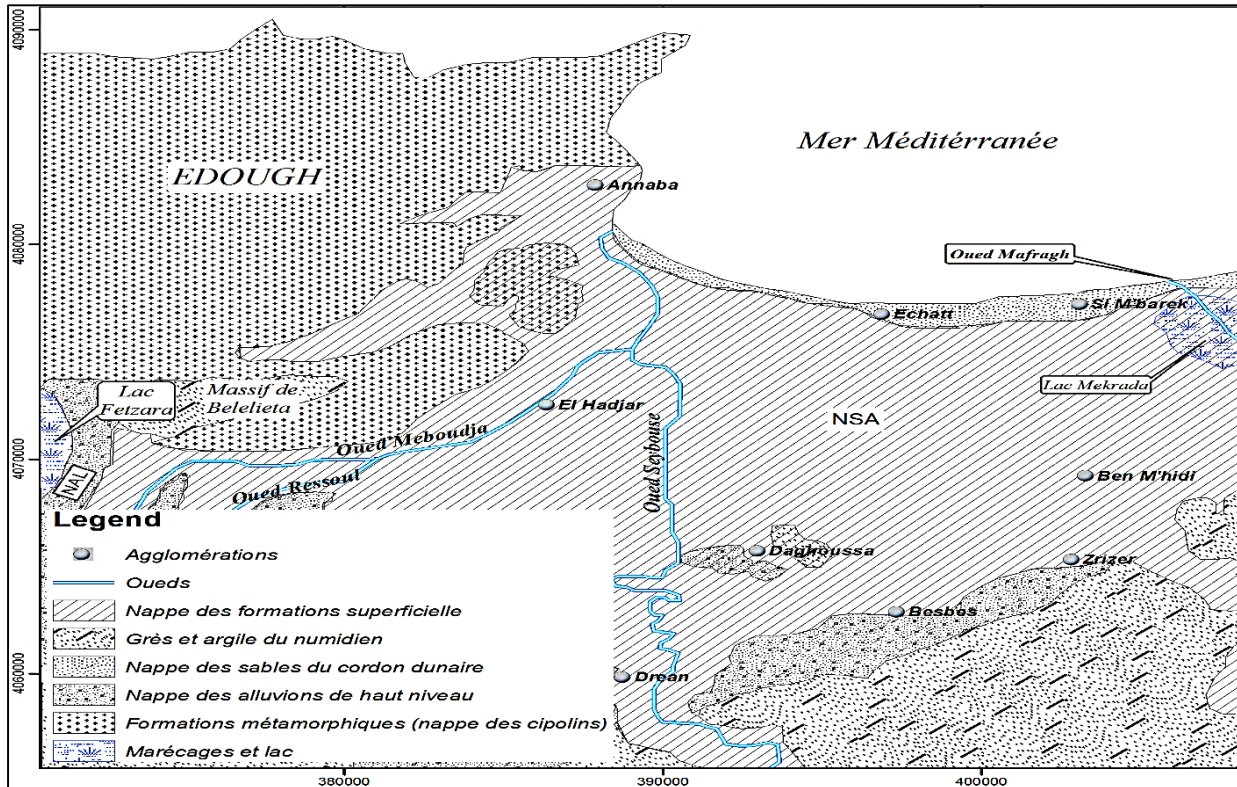
Le site est caractérisé par des dépôts alluvionnaires limoneux très fins, à prédominance argileuse, qui couvrent homogènement l'ensemble de la plaine (S. E. Cherrad, 1979 in N. Kherici, 1993). Cette couche correspond à la basse et à la moyenne terrasse.

#### **2.4.3.4. Quaternaire actuel**

Les alluvions sont représentées par des dépôts constitués des lits actuels des oueds. Il s'agit de matériaux divers (argiles, sables, cailloux) qui sont le résultat de l'érosion des formations traversées par l'Oued.

**Remarque :**

Il ressort de cette description géologique que, dans la région étudiée, les sédiments du Mio-Pliocène et du Quaternaire présentent des capacités de stockage en eau qui pourraient être considérées comme significatives. En revanche, les formations du Primaire et du Tertiaire (Numidien). Il semblerait que ces éléments apparaissent à l'entourage du site, qu'ils sont rarement exploités.



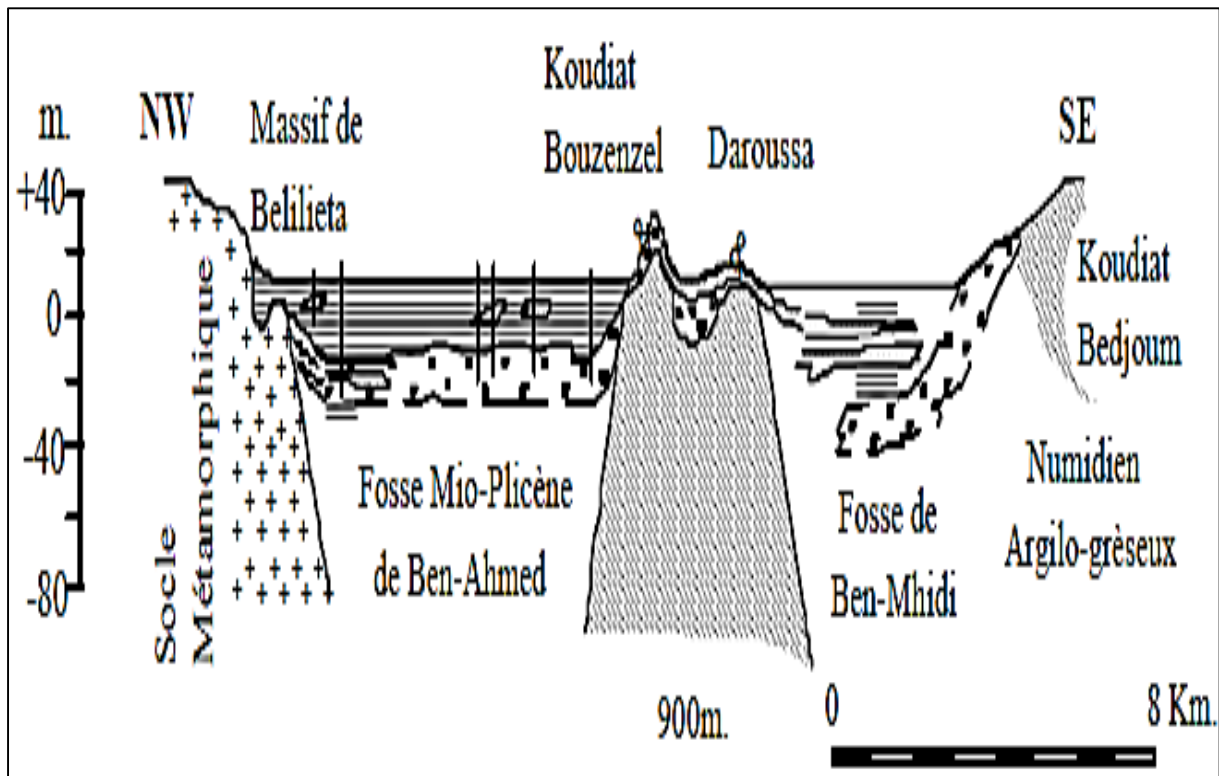
**Figure 5 : Carte hydrogéologique maquant les aquifères qui existent au niveau de la zone d'étude (D'après Gaud, 1976, in Hani 2003, modifiée par BENCHAIB, 2021).**

**2.5. Tectonique**

La plaine d'Annaba est marquée par deux événements tectoniques clairement identifiables. Depuis le Miocène inférieur jusqu'au Miocène supérieur, les mouvements tectoniques ont provoqué l'enfoncement progressif du grès numidien. Par la suite, il s'agit d'un remplissage d'âge Plio-Quaternaire initié par des matériaux détritiques. Durant Le Miocène inférieur, toute la région a été touchée par des phénomènes orogéniques, des mouvements de la croûte terrestre qui ont isolé complètement le massif de l'Edough.

La plaine est donc située au centre d'un bassin circonscrit, d'une part au nord par l'anticlinal du massif de l'Edough et d'autre part au sud par les nappes de la chaîne tellienne.

Depuis le Pliocène et durant le Quaternaire, un effondrement initie des processus de formation et de comblement des deux fossés de Ben Ahmed et de Ben M'Hidi (figure 6). L'orientation des axes de ces dernières est du sud-ouest vers le nord-est, séparés par un relief nommé (l'élévation de Daroussa).



**Figure 6 : Coupe géologique illustrant les fossés de Ben-Mhidi et de Ben-Ahmed, et la butte de Daroussa au sud de la région d'étude (in Hani 2003, modifiée).**

## 2.6. Paléogéographie

La paléogéographie, en tant que discipline scientifique, est une intersection entre la géologie, la géographie et la paléontologie. Son champ d'étude se concentre sur la reconstruction, en théorie, de la géographie passée à la surface du globe. Il s'agit de la répartition des continents et des océans selon les différentes périodes géologiques.

Quand nous parlerons de la paléogéographie de notre zone d'étude, nous mentionnerons les formations plus importants de la région.

- Durant l'ère secondaire, une période géologique s'étendant de la période permienne à l'ère mésozoïque, la mer a envahi au moins en partie le massif de l'Edough. La présence de calcaires datant du Jurassique et affleurant à la base du socle géologique permet de confirmer cette transgression marine.
- À la fin du Crétacé et durant le Paléogène, se déposées des formations Flyschoides schisteuses et gréseuses, notons que le schiste et le grès sont des roches métamorphiques et sédimentaires respectivement.
- Au Miocène, une phase tectonique majeure, communément désignée sous le nom de phase alpine, a été à l'œuvre marquant ainsi une période de forte activité orogénique et sédimentaire, les flysch sont charriés sur le socle. Par ailleurs, la région est sujette à de nombreux accidents tectoniques, qui conduisent à l'effondrement de la plaine orientale du Massif de l'Edough.

Les bassins formés présentent une tendance à l'approfondissement au cours des périodes géologiques désignées comme le Pliocène et le Quaternaire. En parallèle, ces bassins se remplissent de formations continentales.

### 3. Conclusion

La plaine d'Annaba est située au Nord-est de l'Algérie, Elle est caractérisée par trois formes morphologiques distinctes, il s'agit de la plaine d'Annaba, le cordon dunaire et les reliefs montagneux qui correspondent à la retombée des djebels Edough au Nord et les massifs de Belleleita au Sud-ouest et Bouhamra au Sud.

L'étude historique de la géologie de la plaine d'Annaba commence au début du primaire au Quaternaire, se distingue par une lithologie extrêmement diversifiée, composée principalement d'alluvions (sable, graviers, cailloux, etc.), de grès, d'argiles, de flysch et de calcaires. Ainsi que les analyses géologiques approfondies menées sur la région ont révélé avec certitude deux types de terrain distincts, l'un des massifs est métamorphique qu'il s'agit du massif de l'Edough, ce dernier occupe la majeure partie du terrain d'étude, est formé d'un socle cristalloyllien et d'une couverture sédimentaire, et pour l'autre massif est sédimentaire, qu'il occupe la quasi-totalité de la plaine d'Annaba.

A decorative horizontal banner with a light gray gradient background and a dark blue border. The banner has a scroll-like appearance with rounded ends and small circular details at the corners. The text is centered within the banner.

**CHAPITRE II**  
**HYDROCLIMATOLOGIE**

## 1. Introduction

L'Hydroclimatologie repose sur l'interprétation des données des paramètres climatiques mesurés durant une période bien définie, permettant ainsi d'estimer les différentes composantes du bilan hydrique, ce dernier est nécessaire pour comprendre le fonctionnement d'un système hydraulique de surface.

L'Algérie, du fait de sa situation géographique, se trouve répartie en trois zones climatiques distinctes : Au nord, le climat est méditerranéen, vers l'intérieur du pays, sur les hauts plateaux, il est semi-aride et enfin, le grand Sahara est caractérisé par un climat aride.

Au fait, le domaine méditerranéen bénéficie d'un climat tempéré, avec des hivers doux et ses étés chauds et secs en font des régions très attractives pour l'Homme. Les régions côtières, telles que la plaine d'Annaba, jouissent de ce dernier, agréable en hiver (12 °C à Alger) et supportable en été (25 °C dans la même ville). L'humidité y est forte et les précipitations relativement abondantes, avec une moyenne annuelle de 762 mm, concentrés entre les saisons d'automne et d'hiver particulièrement. La plaine d'Annaba, en tant que zone côtière, est soumise aux aléas climatiques caractéristiques de ces régions.

Dans ce chapitre et afin d'effectuer notre mission, nous procéderons par un aperçu sur l'évolution du climat dans cette région, et à une analyse approfondie des différents paramètres climatiques, tels que : les précipitations, la température, l'humidité et le vent. Cette analyse nous permettra de déterminer les composantes du bilan hydrique, avec un focus particulier sur l'infiltration, l'évapotranspiration et le ruissellement. Ce qui nous permettra de mieux comprendre les processus ayant lieu entre les eaux superficielles, le sol et les eaux souterraines de la plaine étudiée.

## 2. Étude des caractéristiques climatiques

### 2.1. Choix de la station de mesure :

Pour l'étude et l'analyse climatologique de la zone étudiée, nous avons pris en considération la station météorologique des **Salines** située au niveau de l'aéroport Rabah Bitât d'Annaba, qui appartient à notre secteur d'étude, où nous avons recueilli les données climatiques mensuelles des températures allant de 1990 à 2020, et pour les précipitations, on a obtenu les données allant de 1999 à 2020, (Tableau 1).

**Tableau 1 : Caractéristiques de la station météorologique des salines.**

Station	Longitude	Latitude	Altitude (m)	T (°C)	T (°C)	P (mm)
				1990-2020	1999-2020	1999-2020
Les Salines	07°45' E	37° N	03	18.23	18.29	678.84

## 2.2. Paramètres climatiques

Les paramètres climatiques jouent un rôle important dans le comportement hydrologique des cours d'eaux. De ce fait, il est important de connaître leurs comportement spatio-temporel, nous nous intéresserons en premier aux variations des précipitations enregistrées au niveau de la station des salines.

### 2.2.1. Précipitations

La pluviométrie joue un rôle crucial dans le fonctionnement et la répartition des écosystèmes. Elle constitue même un facteur déterminant dans l'étude climatologique, selon (Hirche.2007). Ce paramètre conditionne l'écoulement saisonnier et par conséquent, le régime des cours d'eau ainsi que celui des nappes.

À l'échelle mondiale, il est possible de classer les précipitations selon plusieurs régimes pluviométriques, ces régimes sont définis à partir des précipitations moyennes annuelles ou moyennes mensuelles, selon (Musy.2005).

#### A. Variations mensuelles des pluies

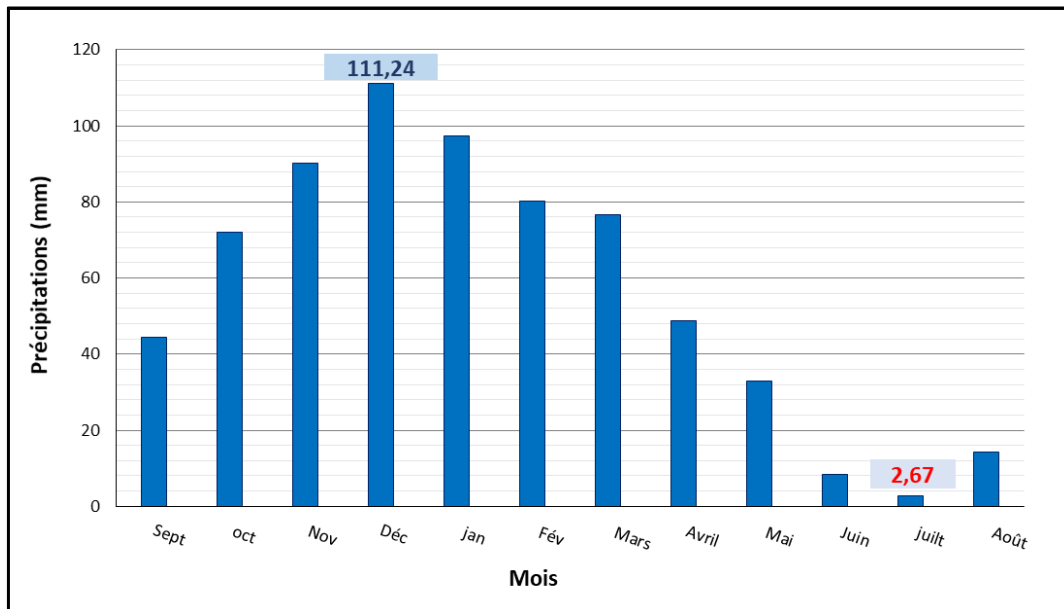
Les variations des moyennes mensuelles des précipitations sur une période d'observation de 21 ans, entre 1999 et 2020, sont résumées dans le tableau 2, et elles sont représentées en graphique dans un histogramme, voir la (Figure 7).

**Tableau 2 : Variations des moyennes mensuelles des précipitations, période (1999-2020).**

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aout	Annuel
P (mm)	44.50	72.04	90.07	<b>111.24</b>	97.35	80.28	76.58	48.65	32.83	8.39	<b>2.67</b>	14.25	678.84

Nous remarquons dans le tableau précédent, que la précipitation moyenne dépasse les 670 mm/an dans la période entre 1999 et 2020. Les mois les plus pluvieux sont novembre, décembre, janvier et février, montrant que les plus fortes précipitations sont enregistrées entre l'automne et l'hiver. En revanche, Les mois de juin, Juillet et Aout, caractérisant la saison estivale sont particulièrement secs.

L'histogramme des précipitations moyennes mensuelles (figure 7) montre la variation des précipitations d'un mois à un autre. Le maximum des précipitations est enregistré au mois de décembre avec une moyenne de 111.24 mm, Par contre, le minimum est remarqué au mois de juillet avec une moyenne de 2.67 mm. De là, nous concluons que les mois de décembre et janvier sont les plus humides, et le mois de juillet est le plus sec.

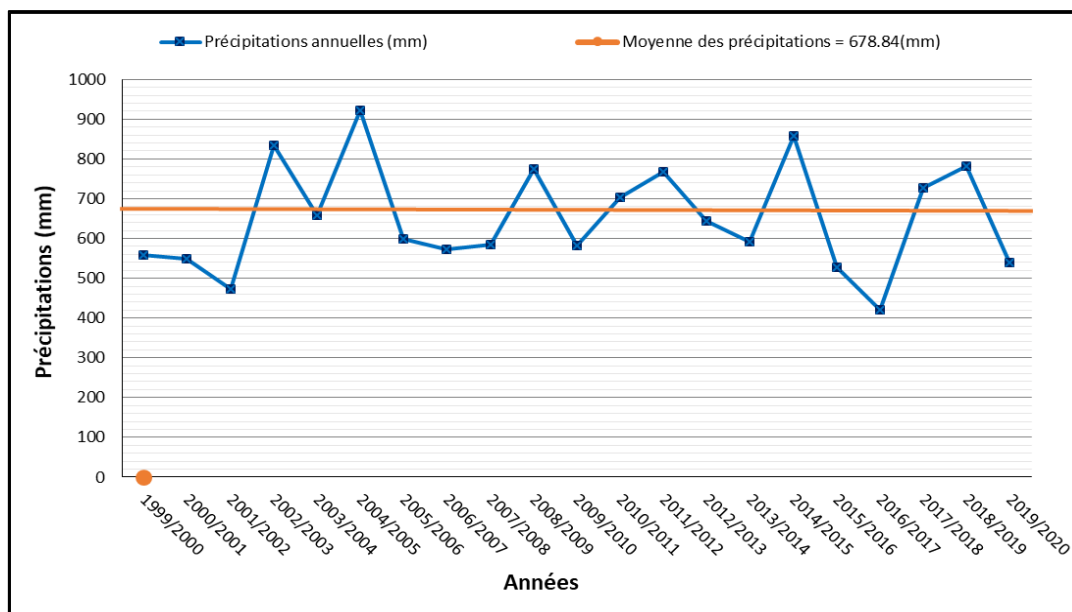


**Figure 7 : Variation des précipitations moyennes mensuelles, période (1999-2020).**

### **B. Précipitations moyennes annuelles :**

Malgré son insuffisance et sa limite, la pluviosité moyenne annuelle demeure la donnée la plus utilisée pour caractériser la quantité de pluie tombée en un lieu donné. De plus, cette quantité d'eau reçue annuellement est un élément essentiel pour la vie végétale (Djellouli, 1981).

Pour connaître les années les plus pluvieuses durant la période d'observation, nous avons calculé la précipitation moyenne annuelle entre (1999-2020). À partir des constats précédents, nous avons réalisé la (figure 8), qui montre les variations annuelles des précipitations par rapport aux moyennes calculées.



**Figure 8 : Variation des précipitations moyennes annuelles, période (1999-2020).**

D’après la courbe des variations des précipitations moyennes annuelles, nous remarquons que :

- ✓ La valeur maximale est enregistrée en 2004-2005 avec 987.7 mm.
- ✓ La valeur minimale est enregistrée en 2016-2017 avec 436.33 mm.
- ✓ La valeur moyenne annuelle des précipitations est de 678.84 mm/an.

Nous constatons aussi, en matière de périodicité, que les années les plus arrosées (supérieures à la moyenne 678.84 mm, sont moins importantes que celles en dessous de la moyenne mais dépassent les 900 mm/an en 2004-2005. Ceci se traduit par un gain pour les nappes et les barrages.

**C. Répartition saisonnière des précipitations :**

La subdivision saisonnière des pluies annuelles est faite selon quatre saisons agricoles, lesquelles : L’automne, l’hiver, le printemps et l’été. À partir du tableau 3 ci-dessous de la répartition saisonnière des précipitations, nous remarquons que le taux des précipitations est comme suit :

- ✓ Au cours de la saison automnale il tombe 206.61 mm ;
- ✓ En hiver, la saison la plus humide, avec une précipitation atteignant les 288.87 mm ;
- ✓ Lors du printemps il tombe 158.06 mm ;
- ✓ En fin, en été les précipitations sont faibles avec 25.30 mm.

Tableau 3 : Répartition saisonnière des précipitations.

Saisons	Automne	Hiver	Printemps	Eté	Totale
P (mm)	206.61	<b>288.87</b>	158.06	<b>25.30</b>	678.84
P (%)	30.44	42.55	23.28	3.73	100

À partir des constats précédents, nous avons réalisé la figure 9 ci-dessous, qui montre la répartition saisonnière des précipitations en fonction des pourcentages calculés.

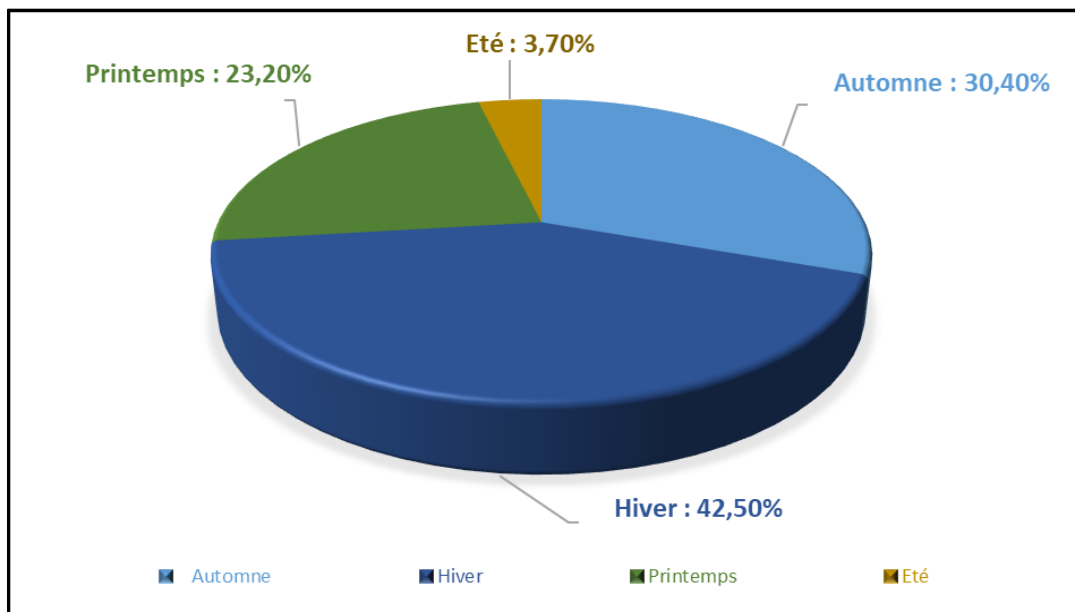


Figure 9 : Portions des répartitions saisonnières des précipitations en (%).

D'après la figure précédente, nous remarquons que l'hiver est la saison la plus humide et la plus pluvieuse avec (42.55 %), suivie par le printemps avec (23.28 %), après l'automne avec (30.44%), en fin l'été avec (3.73 %) qui est la saison la plus sèche.

#### D. Le coefficient pluviométrique

Le coefficient pluviométrique annuel **H** est un paramètre très important pour la détermination des années excédentaires et des années déficitaires. Il est déterminé par la formule suivante :

$$H = \frac{P_i}{P}$$

Avec :

**H** : le coefficient pluviométrique.

**P<sub>i</sub>** : pluviométrie annuelle d'une année donnée en mm.

**P** : moyenne de la pluviométrie annuelle d'une période donnée en mm.

- ✓ Si **H** > 1 : l'année correspondante est excédentaire.
- ✓ Si **H** < 1 : l'année correspondante est déficitaire.

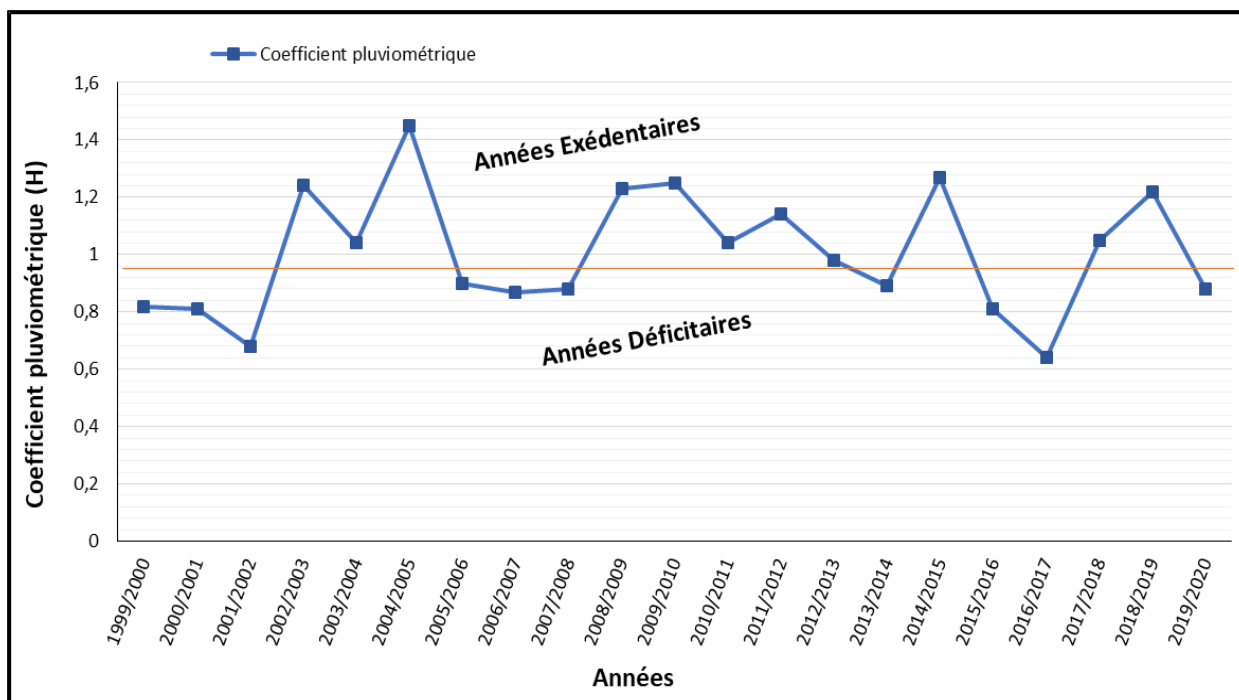
Les résultats du coefficient pluviométrique obtenus durant la période (1999-2020) sont récapitulés dans le tableau 4 ci-dessous :

**Tableau 4 : Récapitulation des années excédentaires et déficitaires selon les valeurs du coefficient pluviométrique calculé.**

<b>Période (1999-2020)</b>	<b>Excédentaires &gt; 1</b>	<b>Déficitaires &lt; 1</b>	<b>Moyenne</b>
<b>Nombre des années</b>	10	11	678.84 mm

Nous remarquons, dans le tableau précédent, un équilibre entre les années excédentaires et déficitaires, dont il n'y a qu'une différence d'une année entre 10 et 11 respectivement.

D'après la courbe ci-dessous (figure 10) qui expose les variations annuelles des indices pluviométriques au niveau de la station référence, nous observons qu'il y a une alternance entre les années déficitaires et les années excédentaires.



**Figure 10 : Variations des coefficients pluviométriques calculés aux niveaux de station des salines (1999-2020).**

Dans le détail, nous nous remarquons que pendant les dix (10) années considérées comme excédentaires le coefficient pluviométrique est supérieur à 1.4 avec un taux de précipitations enregistré dépasse les 900 mm. En revanche, au cours des onze (11) années déficitaires le coefficient pluviométrique est inférieur à 0.8 avec une précipitation inférieure à 500 mm.

### 2.2.2. Température

La température est un facteur limitant essentiel qui contrôle l'ensemble des phénomènes métaboliques, c'est elle qui régit et qui conditionne. De ce fait, la réparation de la totalité des espèces et des communautés d'êtres vivants dans la biosphère, (Ramade, 1984).

La température est considérée comme étant une grandeur physique liée à la notion immédiate de chaud et froid. La température change en fonction de plusieurs facteurs, notamment les saisons, la proximité de la mer et la latitude, (Vincent, 2010).

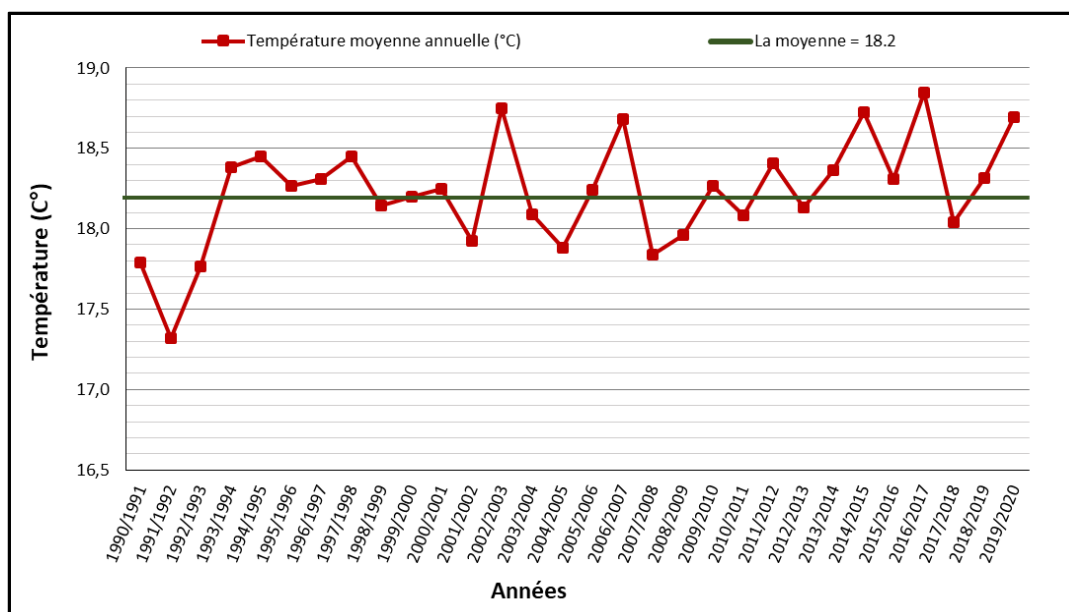
Pour réaliser notre travail, nous disposons des mesures enregistrées au niveau de la station des Salines, elles s'étalent sur la période allant de 1990 jusqu'à 2020. Elles sont répertoriées dans le tableau 5.

**Tableau 5 : Température moyenne mensuelle (°C), période (1990-2020)**

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jav	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juit	Aout	Annuel
<b>T max</b>	25.8	23.1	18.5	14.8	14	14	16.5	16.9	20.6	24.9	27.6	28.7	20.45
<b>T min</b>	21.8	18.5	14.2	11.1	9.4	9	12.2	14	15.7	20.2	22.9	24.2	16.1
<b>T moy</b>	23.87	20.84	16.22	12.91	11.82	<b>11.71</b>	13.59	15.58	18.73	22.35	25.10	<b>26.05</b>	18.23

Nous remarquons dans le tableau ci-dessus que les mois les plus froids sont compris entre Décembre et Mars. Au cours de ces quatre mois la température moyenne ne dépasse pas 14°C, et le mois de février est le plus froid (11.71°C). La saison estivale reste la plus chaude, à partir du mois de Juin, les températures moyennes augmentent et atteignent le maximum avec 26.05°C au mois d’Aout.

D'après l'observation de la courbe des températures moyennes annuelles (figure 11), nous remarquons que les variations de la température par rapport à la valeur moyenne calculée 18.2 °C, montrent une succession d'années chaudes et d'années froides.



**Figure 11 : Variations des moyennes annuelles des températures.**

**2.2.2.1. Phénomène de changement climatique dans la zone d’étude**

Le changement climatique correspond à un changement du temps moyen observé dans une région donnée (Glossaire 2009.Tabet, 2008).

Afin de mettre en exergue un impact potentiel des changements climatiques sur la région, nous avons procédé à l'analyse des variations des températures moyennes sur trois périodes (décennies) distinctes, réparties de la manière suivante :

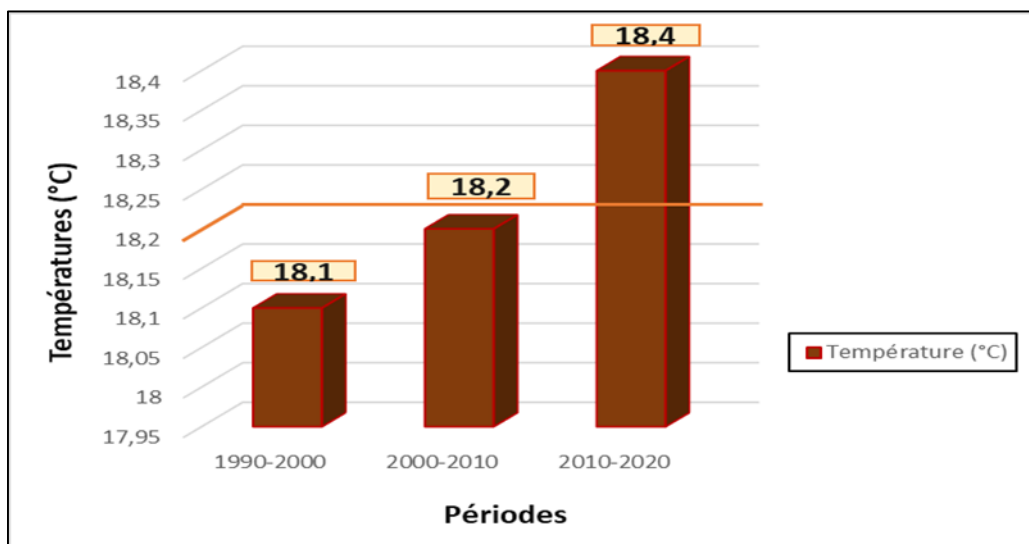
- La première période s'étale de 1990-2000.
- La seconde va de 2000-2010.
- La dernière période couvre les années allant de 2010-2020.

Les valeurs moyennes calculées pour chaque dix ans sont présentées dans le tableau suivant (tableau 6) :

**Tableau 6 : Moyennes de la température de chaque décennie.**

Période	1990-2000	2000-2010	2010-2020
Moyenne	18.1	18.2	18.4

La figure 12 présente clairement les variations décrites à partir du précédent tableau. L'observation de cette figure montre une légère augmentation de la température avec 1°C entre la première et la deuxième décennie. Cependant, le changement est bien remarquable entre les deux dernières avec 2°C, ce qui laisse supposer une variation climatique avérée. Ce changement des températures aura un impact sur les quantités d'eau qui seront emmagasinées.



**Figure 12 : La variation de la température entre les trois décennies.**

### 2.2.3. Les indices climatiques

Il s'agit de définir des seuils pertinents à partir desquels on passe d'un climat à l'autre. C'est l'objet du calcul des indices climatiques. Les indices climatiques permettent d'étudier les combinaisons arithmétiques des différents éléments du climat. Ils se basent, généralement, sur les moyennes des différents paramètres météorologiques, comme la température, la pluviométrie, l'humidité, l'évaporation.

#### 2.2.3.1. Indice d'Aridité (De Martonne 1925)

L'aridité traduit des conditions climatiques caractérisées par la faiblesse des précipitations moyennes annuelles (moins de 250 mm d'eau par an), et par le fort déficit de celles-ci par rapport à l'évapotranspiration potentielle.

En 1925 Emmanuel De Martonne a proposé une formule climatologique permettant le calcul d'un indice dit indice d'aridité ( $I_a$ ). Ce dernier est un indicateur quantitatif du degré du manque d'eau, présent à un endroit donné (John E. Oliver, 1925).

Cet indice est défini comme étant un rapport entre la hauteur moyenne des précipitations annuelles ( $P$  en mm) et la moyenne des températures annuelles ( $T$  en °C), et permet de déterminer le type de climat (tableau 7) qui caractérise la zone d'étude (Gaagrai, 2009) selon la formule suivante :

$$I_a = \frac{P}{(T + 10)}$$

Avec :

$I_a$  : indice d'aridité.

$P$  : les hauteurs annuelles des précipitations en mm.

$T$  : les températures moyennes annuelles en °C.

10 : constante, utilisée pour éviter les valeurs négatives lorsque la température moyenne de l'air est inférieure à 0°C (Boughrira, 2015).

**Tableau 7 : Type de climat selon l'indice d'aridité.**

Indice d'aridité	$I_a < 5$	$05 < I_a < 7.5$	$7.5 < I_a < 10$	$10 < I_a < 20$	$20 < I_a < 30$	$I_a > 30$
Climat	Hyperaride	Désertique	Steppique	Semi-aride	Tempéré	Humide

Pour notre cas, nous n'obtenons que l'indice d'aridité égal à 24 (tableau 8). Donc, le type de climat de la zone d'étude est **tempéré**.

**Tableau 8 : Résultats de l'indice d'Aridité d'Emmanuel De Martonne (IA).**

Station	P (mm)	T (°C)	I <sub>a</sub>	Climat
Les salines	678.84	18.29	<b>24</b>	Tempéré

### 2.2.3.2. L'indice Ombrothermique de Gaussen

L'indice ombrothermique a été proposé par Gaussen en 1952. Il est largement utilisé pour sa simplicité et son efficacité. Cet indice s'exprime par un diagramme ombrothermique qui permet la combinaison entre les paramètres pluviométriques (P) et les paramètres thermiques (T) dans le but de nous mettre les deux périodes sèches et humides, selon la formule suivante :

$$P = 2T$$

Avec :

**P** : précipitations mensuelles en mm.

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

La figure 13 ci-dessous présente le diagramme Ombrothermique de Gaussen qui a été réalisé à partir des moyennes des températures et des précipitations durant la période 1999-2020.

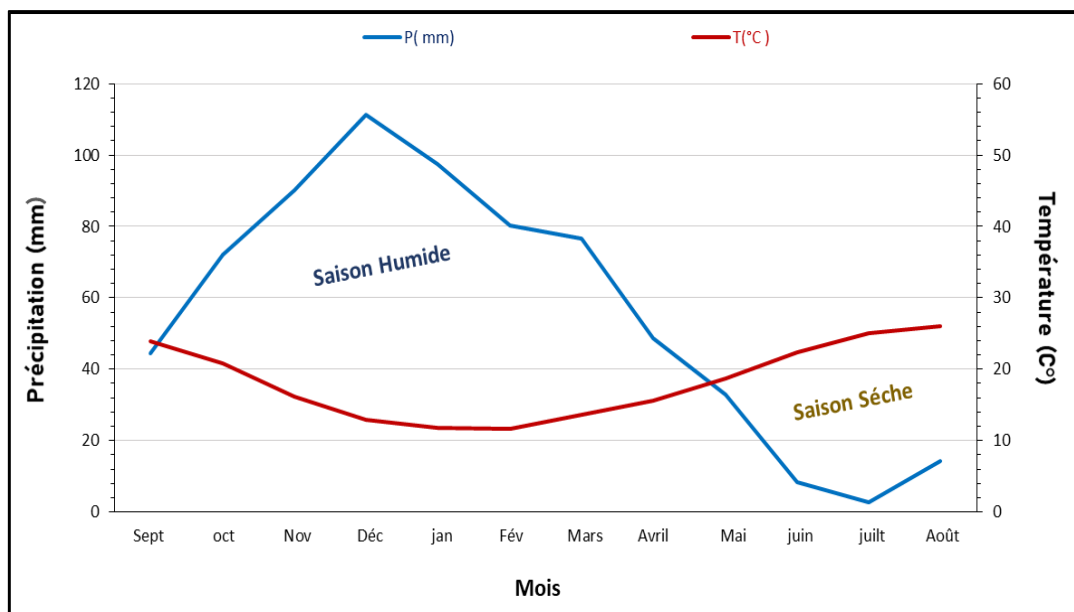


Figure 13 : Courbe Ombro-thermique de la station des salines (1999-2020).

D’après le précédent diagramme, on a constaté que l’année hydrologique de la zone d’étude est caractérisée par deux saisons bien distinctes :

- ✓ Une saison Humide : s’étale du mois de septembre jusqu’au début de mois de mai.
- ✓ Une saison sèche : s'étale de la fin du mois de mai au mois d'août.

**2.2.4. L’Humidité**

L’humidité est définie comme le rapport, exprimé en pourcentage (%), entre la tension de vapeur d'eau et la tension de vapeur d'eau saturante. Elle constitue un paramètre atmosphérique majeur, car elle permet de déterminer le taux de condensation de l'atmosphère. Elle est la source de toutes les précipitations et l’un des principaux facteurs du cycle hydrologique.

Les valeurs des moyennes mensuelles de l’humidité relative sur une période d’observation de 30 ans (1991-2021) enregistrées dans la station des salines sont résumées dans le tableau 9.

**Tableau 9 : Moyenne mensuelle de l’humidité relative en (%) à la station des Salines (1991-2021).**

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aout	Annuel
Humidité (%)	65	69	73	76	77	76	75	73	68	59	55	57	69

D’après l’histogramme ci-dessous (figure 14) qui expose la variation de l’humidité relative de la période (1991-2021), nous observons que l’humidité de l’air est relativement élevée du mois de décembre jusqu’au mois de mars, caractérisant la saison humide avec un maximum de 77 %

en mois de janvier. Par contre, nous observons que les moyennes de l'humidité sont diminuées du mois de juin jusqu'au mois d'août avec un minimum de 55 %.

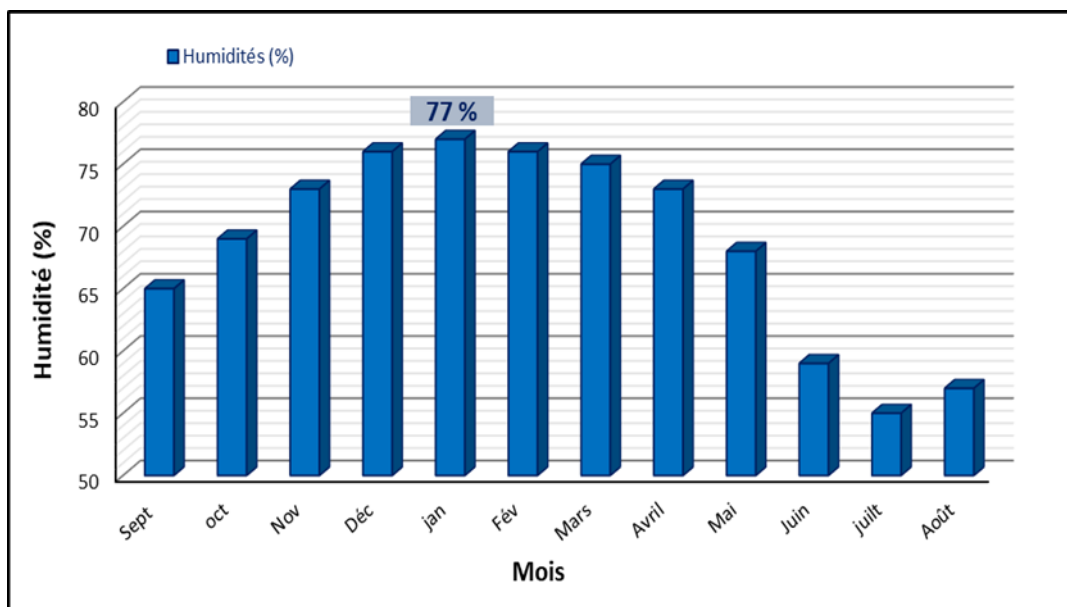


Figure 14 : Histogramme d’humidité relative de l’air à la station des Salines (1991-2021).

**2.2.5. Le vent**

Le vent est l’un des éléments les plus déterminants des régimes pluvieux, de l’évaporation et par conséquent du climat. C’est le résultat de la différence de pression entre deux zones voisines. Il provoque le déplacement d’air et transporte ainsi les caractères climatiques (Roger et al, 2006).

D’après la station météorologique des salines et durant la période (1984-2015), les vents prédominants sont de direction Nord-Ouest et Sud-Est, avec une vitesse moyenne de l'ordre de 3,54 m/s (tableau 10).

Tableau 10 : Moyenne mensuelle de la vitesse des vents à la station des Salines (1984-2015).

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aout	Annuel
Vent (m/s)	3.44	<b>3.03</b>	3.37	3.18	3.83	3.77	<b>3.87</b>	3.66	3.18	3.67	3.83	3.76	<b>3.54</b>

L'observation de l'histogramme (figure 15), montre que la vitesse des vents est légèrement variable d'un mois à l'autre où les vitesses élevées caractérisent la saison d'hiver (Janvier et février), le printemps (mars et avril) et l'été avec un maximum de 3.87 m/s au mois de mars. Nous observons que la vitesse minimale est enregistrée au mois d'octobre avec une moyenne de 3.03 m/s.

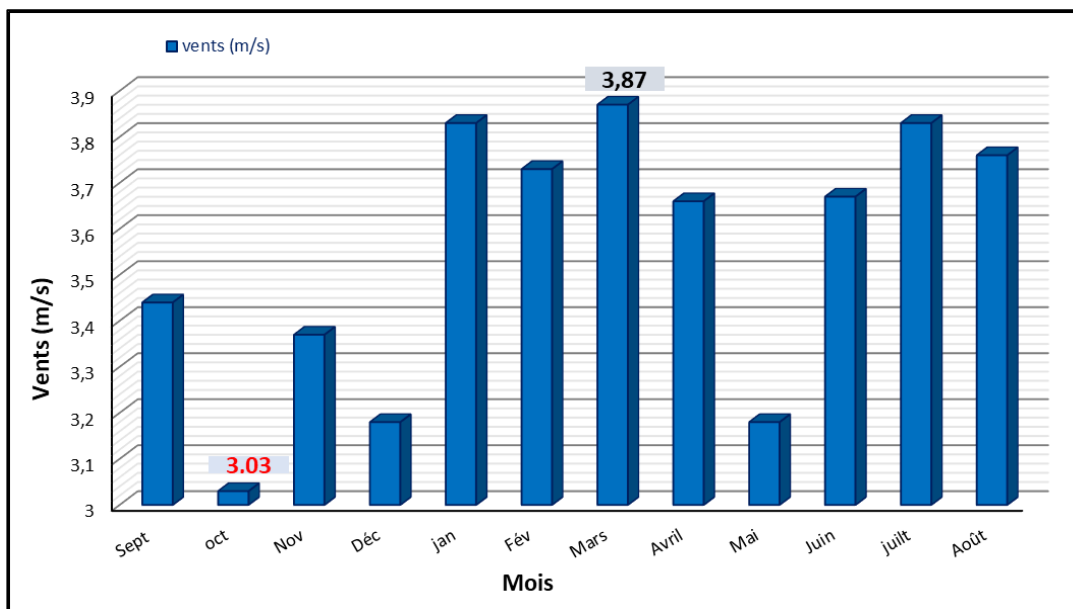


Figure 15 : Histogramme de vitesse des vents à la station des Salines, (1984-2015).

### 2.2.6. Le bilan hydrique

Le bilan hydrique est une méthode importante climatologique permettant d'évaluer les apports et les sorties en eau sur une période définie. L'évaluation du bilan hydrique est nécessaire à la compréhension des paramètres physiques du milieu. Ces paramètres incluent notamment les éléments climatologiques et pédologiques qui interviennent dans le cycle de l'eau.

Le calcul de ce bilan est indispensable pour évaluer le volume des ressources en eau souterraine (infiltration) et de surface (ruissellement). Le bilan hydrologique d'un bassin peut se traduire par l'équation suivante :

$$P = ETR + I + R + \Delta RFU$$

Avec :

**P** : Lame moyenne mensuelle précipitée en mm.

**ETR** : Evapotranspiration réelle en mm.

**I** : L'infiltration efficace atteignant les eaux souterraines en (mm).

**R** : Ruissellement en mm.

**ΔRFU** : Variation de la réserve facilement utilisable correspond à la lame d'eau stockée dans le sol, laquelle est utilisée par les plantes. La RFU commence à alimenter l'ETR lorsque les précipitations deviennent inférieures à l'ETP (Hani, 2011).

Il est à noter que la RFU est égal à (100 mm) pour la station des salines (tableau 11).

**Tableau 11 : Estimation des valeurs de la RFU selon la formule d'Hallaire.**

Secteur	Caractéristiques de sol et profondeur d'enracinement	RFU (mm)
La plaine d'Annaba	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sols argilo-limoneux : C-f = 15 %</li> <li>• Profondeur moyenne d'enracinement : 450 mm</li> </ul>	100

### A. Evapotranspiration

Dans le cadre des études hydrologiques, les deux éléments principaux du bilan hydrique, l'évaporation et la transpiration, sont réunis en un seul : "l'évapotranspiration". L'évapotranspiration désigne l'ensemble des phénomènes d'évaporation qui est un processus de transfert de l'eau de l'état liquide à l'état gazeux, et de transpiration qui correspond à la perte d'eau par les organismes vivants sous forme de vapeur d'eau, dont on distingue :

- L'évapotranspiration réelle (E.T.R).
- L'évapotranspiration potentielle (E.T.P).

#### A.a. L'évapotranspiration réelle (ETR) :

L'évapotranspiration réelle correspond à la quantité d'eau effectivement évaporée et transpirée au-dessus de la surface étudiée. Cette quantité est fonction de la lame d'eau stockée dans le sol et de la pluviosité. Pour l'estimation de l'évapotranspiration réelle (ETR), nous avons utilisé les deux formules du TURC et du THORNTHWAITE.

#### A.b. L'évapotranspiration potentielle (ETP) :

L'évapotranspiration potentielle (ETP) exprimée en hauteur de la lame ou tranche d'eau évaporée, la somme des volumes d'eau pouvant s'évaporer et transpirer sur une surface donnée et durant une période bien définie, en considérant des apports d'eau suffisants (Zerrouki, 2007).

#### 2.2.6.1. Estimation de l'évapotranspiration réelle par la Méthode de Turc :

La formule du Turc (1954) : Cette méthode est applicable à tous les climats, et elle consiste à évaluer directement l'évapotranspiration réelle à partir de la hauteur moyenne de la pluie et de la température moyenne annuelle en appliquant la formule suivante :

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

On a :

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

Avec :

**ETR** : Evapotranspiration réelle annuelle en mm.

**P** : Précipitation moyenne annuelle de la période en mm.

**T** : Température moyenne annuelle de la période °C.

**L** : Pouvoir évaporant, est une limite vers laquelle tend l'ETR lorsque P devient grand.

Les résultats sont consignés dans le (tableau 12).

**Tableau 12 : L'évapotranspiration réelle selon la formule de Turc (1999-2020).**

<b>Station des salines (1999-2020)</b>	
<b>PA</b>	678.84
<b>TA</b>	18.29
<b>ETR</b>	593,62
<b>PA</b> : précipitation annuelle (mm). <b>TA</b> : Température annuelle (mm). <b>ETR</b> : Evapotranspiration Réelle (mm).	

### 2.2.6.2. Estimation de l'évapotranspiration potentielle et réelle par la Méthode de THORNTHWAITE

La Méthode de THORNTHWAITE est utilisée dans le cadre des climats subhumides et semi-arides. Compte tenu des caractéristiques intermédiaires du climat méditerranéen, cette formule a été mise en œuvre. Elle est basée sur la notion de réserve d'eau facilement utilisable (RFU). On admet que la hauteur d'eau stockée dans le sol qui est repris par l'évapotranspiration

est de 100 mm au maximum (Gaud 1976). Afin d'évaluer l'évapotranspiration potentielle, nous avons appliqué la formule de THORNTHWAITE, qui permet de corriger le lien entre la température moyenne mensuelle et l'évapotranspiration mensuelle. En effet, cet auteur a établi un indice thermique mensuel ( $i$ ), où :

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

On a :

$$a = 0.016I + 0.5$$

Et

$$I = \sum i = \sum \left( \frac{T}{5} \right)^{1.514}$$

Avec :

**T** : Température moyenne annuelle de la période (° C).

**i** : Indice thermique mensuel.

**I** : Somme des indices thermique mensuels.

**ETP** : Evapotranspiration potentiel mensuelle (mm).

**K** : Terme correctif dépend du mois et de la latitude.

Le calcul du bilan hydrologique de THORNTHWAITE s'effectue selon la méthode suivante :

- ✓ 1er cas : si pour un mois  $P \geq ETP$  on admit que l' $ETP = ETR$ , la quantité d'eau qui reste ( $P - ETR$ ) va alimenter la RFU jusqu'à son maximum (100 mm) et si elle dépasse cette valeur il y aura un excès (EXC) qui va partir soit sous forme d'infiltration efficace vers la nappe, soit sous la forme de ruissellement.
- ✓ 2ème cas : si  $P < ETP$ , la valeur de  $ETR = P + RFU$ , jusqu'à égalisation avec ETP.
- ✓ 3ème cas : Si  $P < ETP$  et la RFU est nulle, il va se produire un déficit agricole :
- ✓  $Da = ETP - ETR$ , ce dernier paramètre représente alors le besoin des cultures à l'irrigation (Hamzaoui cité par BENCAHIB, 2021, p.32).

Les résultats de calcul de ces paramètres sont présentés dans le (Tableau 13).

**Tableau 13 : Bilan hydrologique selon THORNTHWAITE, station des salines  
(1999-2020).**

Mois	P (mm)	T (°C)	i	K	ETP (mm)	ETR (mm)	RFU (mm)	DÉF (mm)	EXC (mm)
Sep	44.50	23.77	10.59	1.03	108.91	44.50	0	64.41	0
Oct	72.04	21.08	8.83	0.97	81.64	72.04	0	9.60	0
Nov	90.07	16.28	5.97	0.86	44.30	44.30	45.77	0	0
Déc	<b>111.24</b>	12.95	4.22	0.81	27.01	27.01	<b>100</b>	0	30
Jav	97.35	11.75	3.64	0.87	<b>24.12</b>	24.12	<b>100</b>	0	73.23
Fév	80.28	11.66	3.60	0.85	23.22	23.22	<b>100</b>	0	57.06
Mar	76.58	13.64	4.56	1.03	37.91	37.91	<b>100</b>	0	38.67
Avl	48.65	15.83	5.72	1.1	53.72	53.72	94.93	0	0
Mai	32.83	18.74	7.39	1.21	81.44	<b>81.44</b>	46.32	0	0
Jui	8.39	22.40	9.68	1.22	115.24	54.71	0	60.53	0
Juil	<b>2.67</b>	25.38	11.69	1.24	<b>148.50</b>	<b>2.67</b>	0	145.83	0
Aout	14.25	25.95	12.09	1.16	144.91	14.25	0	130.66	0
<b>Total</b>	<b>678.84</b>	<b>18.29</b>	<b>87.98</b>	/	<b>890.92</b>	<b>479.89</b>	/	<b>411.03</b>	<b>198.96</b>

Les résultats obtenus au cours d'une période de 21 ans (1999-2020), dans la station des salines, illustrés dans le tableau précédent (tableau 13), révèlent les observations suivantes :

- ✓ L'évapotranspiration potentielle (ETP) : atteint le maximum au mois de juillet avec 148.50 mm, et le minimum au mois de janvier avec 24.12 mm, avec un total de l'ordre de 890.92 mm.
- ✓ L'évapotranspiration réelle (ETR) : atteint le maximum au mois de mai avec 81.44 mm, et le minimum au mois de Juillet avec 2.67 mm, avec un total de l'ordre de 479.89 mm.
- ✓ La reconstitution de la réserve facilement utilisable (RFU) : commence à partir du mois de novembre avec 45.77mm, pour atteindre son maximum 100 mm à partir de mois décembre jusqu'à le mois de mars. Durant cette période, un excédent est constaté, qui va se traduire par un ruissellement ou une infiltration qui alimente les nappes.
- ✓ À partir du mois d'avril, le niveau de la réserve commence à diminuer jusqu'au mois de juin, où elle devient nulle, cette période de déficit agricole, l'irrigation est indispensable.

La (figure 16) ci-dessous est une représentation graphique du tableau précédent. L'observation de cette figure montre que l'évapotranspiration maximale a été observée pendant les mois de

juillet et août avec des valeurs qui varient entre 148.50 et 144.91 mm. Cela produit un déficit agricole et rend une irrigation nécessaire pour les zones agricoles. Cependant, durant les mois de décembre, janvier et février, une alimentation de la nappe est enregistrée, avec des valeurs allant de 111.24, 97.35, et 80.28mm par mois respectivement. Quand la recharge dépasse la RFU, le surplus d'eau s'infiltre vers la nappe ou s'écoule sous forme de ruissellement.

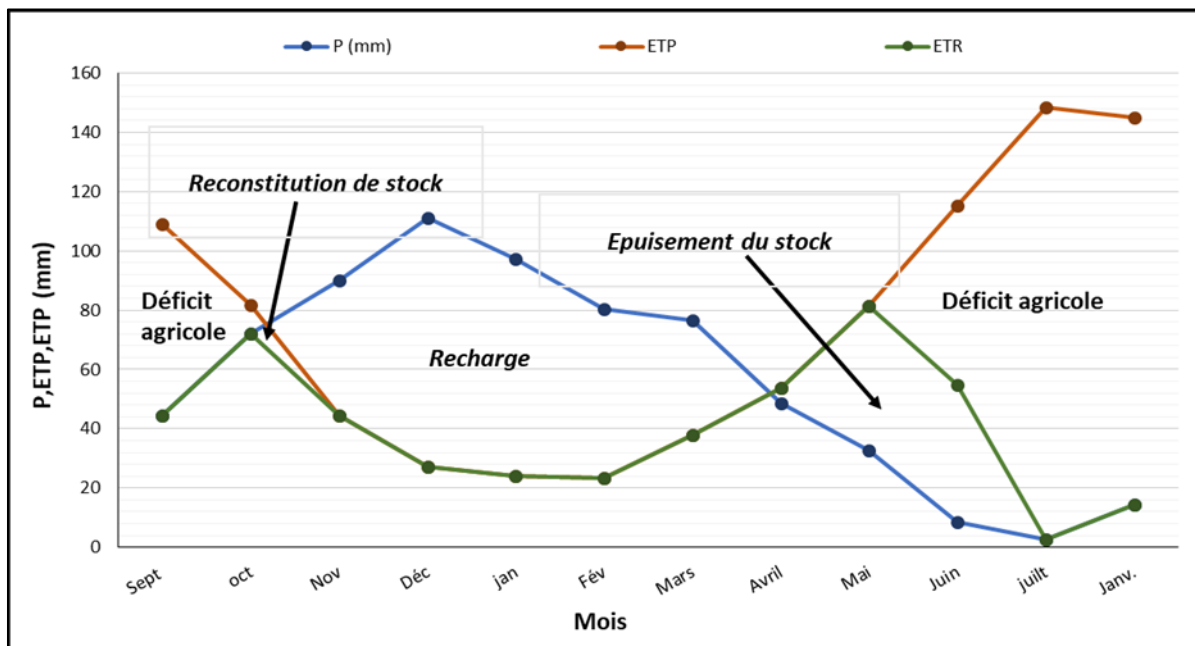


Figure 16 : Représentation graphique du bilan hydrique de Thornthwaite de la station des Salines (1999-2020).

### 2.2.6.3. Le ruissellement

Le ruissellement de surface correspond à la quantité d'eau qui s'écoule au cours d'une précipitation et qui n'est pas retenue par l'infiltration ou l'évaporation.

Pour calculer le coefficient de ruissellement R, on a utilisé la formule de (Tixeront Berkaloff), (Atoui 2014).

On utilise :  $R = \frac{P^3}{3ETP^2}$  Si :  $P < 600$

Et :  $R = \frac{P^3}{3}$  Si :  $P > 600$

Avec :

**R** : Ruissellement (mm).

**P** : Précipitation moyenne annuelle de la période (mm).

**ETP** : Evapotranspiration potentielle de la période (mm).

Dans notre cas, on a :  $P > 600$  et le résultat du coefficient de ruissellement sont notés dans le tableau 14 suivant :

**Tableau 14 : Détermination du ruissellement, période (1999-2020).**

Station	P (mm)	R (mm)
Les salines (1999-2020)	678.84	104.26

Le tableau précédent montre que la valeur de R est égale à 104.26 mm/an, ce qui représente 15.4 % de la précipitation. Cependant, la partie restante de la hauteur des précipitations se désintègrera sous forme d'infiltration.

#### 2.2.6.4. L'infiltration

L'infiltration désigne le mouvement de l'eau pénétrant dans les couches superficielles du sol et l'écoulement de cette eau dans le sol et le sous-sol, sous l'action de la gravité et des effets de pression. C'est un paramètre très important dans le bilan hydrique, elle dépend de plusieurs facteurs, les plus importants sont :

- La nature du sol.
- La perméabilité et la porosité du terrain.
- La couverture végétale.
- L'intensité de la pluie.
- Topographie du terrain.

L'infiltration peut être calculée par la formule du bilan globale suivant :

On a :

$$P = R + I + ETR$$

Et :

$$I = P - R - ETR$$

Avec :

**P** : Précipitations (mm).

**R** : Ruissellement (mm).

**I** : Infiltration (mm).

**ETR** : Evapotranspiration réelle de Thornthwaite (mm).

- ✓ **Si  $I > 0$**  : Les entrées sont supérieures aux sorties.
- ✓ **Si  $I < 0$**  : Les entrées sont inférieures aux sorties.

**Tableau 15 : Estimation de l'infiltration par ETR de la méthode de Thornthwaite.**

Station	P (mm)	ETR (mm)	R (mm)	I (mm)
Salines (1999-2020)	678.84	479.89	104.26	94.69

L'observation du tableau précédent (tableau15), montre que sur une précipitation annuelle moyenne de 678,84 mm, environ 104,26 mm sont perdus par ruissellement, tandis que 479,89 mm sont consommées par évapotranspiration réelle (ETR). Nous remarquons aussi que l'infiltration effective est estimée à 94,69 mm, soit environ 14% du total des précipitations enregistrées à la station des Salines.

### 3. Conclusion

La zone d'étude se distingue par son climat particulièrement pluvieux, se classant parmi les zones les plus arrosées de l'Algérie. Elle est caractérisée par un climat de type méditerranéen, avec des températures douces et humides en hiver et chaudes et sèches en été.

Par suite d'analyse des données climatiques issues de nos observations au niveau de la station des salines, nous avons constaté que : les précipitations moyennes annuelles est de l'ordre 674.84 mm sur une période de 21 ans (1999-2020). Et la température moyenne annuelle est de l'ordre de 18 °C sur une période de 30 ans (1990-2020) est enregistrée à la station. Nous avons conclu aussi que l'humidité relative dans la station est élevée avec une moyenne annuelle d'environ 69 % sur une période de 30 ans (1991-2021), et la moyenne mensuelle de la vitesse des vents varie entre 3.03 et 3.83 m/s à la station entre (1984-2015).

Nous avons passé à calculer le coefficient pluviométrique qui nous montre une alternance entre les années déficitaires (11), et les années excédentaires (10), l'indice d'aridité est égal à 24, ce qui nous explique que le climat de la zone d'étude est tempéré. Le diagramme Ombrothermique nous a permis de constater que l'année hydrologique de la zone d'étude est caractérisée par deux saisons bien distinctes : une saison Humide (septembre jusqu'au début de mois de mai), et ne saison sèche (la fin du mois de mai au mois d'août).

Les calculs de bilan hydrique nous donnent les résultats suivants :

- L'évapotranspiration réelle (ETR) a une valeur de 479.89 mm à la station étudié, et l'évapotranspiration potentielle (ETP) à une valeur de 890.92 mm à la station étudiée.
- La reconstitution de la réserve facilement utilisable (RFU) : commence à partir du mois de novembre avec 45.77mm, pour atteindre son maximum 100 mm à partir de mois décembre jusqu'à le mois de mars.
- Le ruissellement et l'infiltration enregistrent une valeur de 104.26 et 94.69 mm respectivement, et les deux (2) représentent l'ensemble d'excédent qui est estimé à 198.96 mm.
- Le déficit des précipitations pour satisfaire l'évapotranspiration réelle serait de 411.03 mm à La station, réparti du mois de Juin à Octobre.



**CHAPITRE III**  
**SYNTHESE HYDROGÉOLOGIQUE**

## 1. Introduction

La région d'étude se distingue par une forte activité agricole et industrielle, de ce fait ses ressources souterraines et superficielles sont très sollicitées et souvent ne suffisent pas aux besoins affichés par l'agriculture et l'industrie.

Pour optimiser la compréhension, la description et l'explication du comportement d'une nappe et de son interaction avec son environnement, il est impératif de posséder une connaissance approfondie des caractéristiques hydrogéologiques et hydrodynamiques de cette nappe. Une fois ces caractéristiques terminées, nous pourrions mener à bien tout projet de recherche, qu'il soit appliqué ou fondamental.

Nous consacrerons ce chapitre à la description des aquifères recensés au niveau de la plaine et à la mise en évidence des liens hydrauliques entre les différentes nappes.

## 2. Les aquifères identifiés au niveau de la zone d'étude

La plaine d'Annaba plus connue comme étant la basse plaine de la Seybouse, repose sur trois nappes souterraines avec des potentialités hydrauliques différentes dont on dénombre :

- Deux nappes sont dites superficielles, c'est le cas de la nappe du cordon dunaire et la nappe sablo-argileuse peu profonde, occupant la partie sud.
- Une nappe profonde et captive, connue sous l'appellation de la nappe des graviers (*In* Debièche, 2002).

Les deux aquifères, libre et captif, se superposent sous la plaine séparés par une couche semi perméable d'argiles ou d'argiles sableuses et coïncidentes dans sa partie sud à Drean, où la nappe captive devient libre.

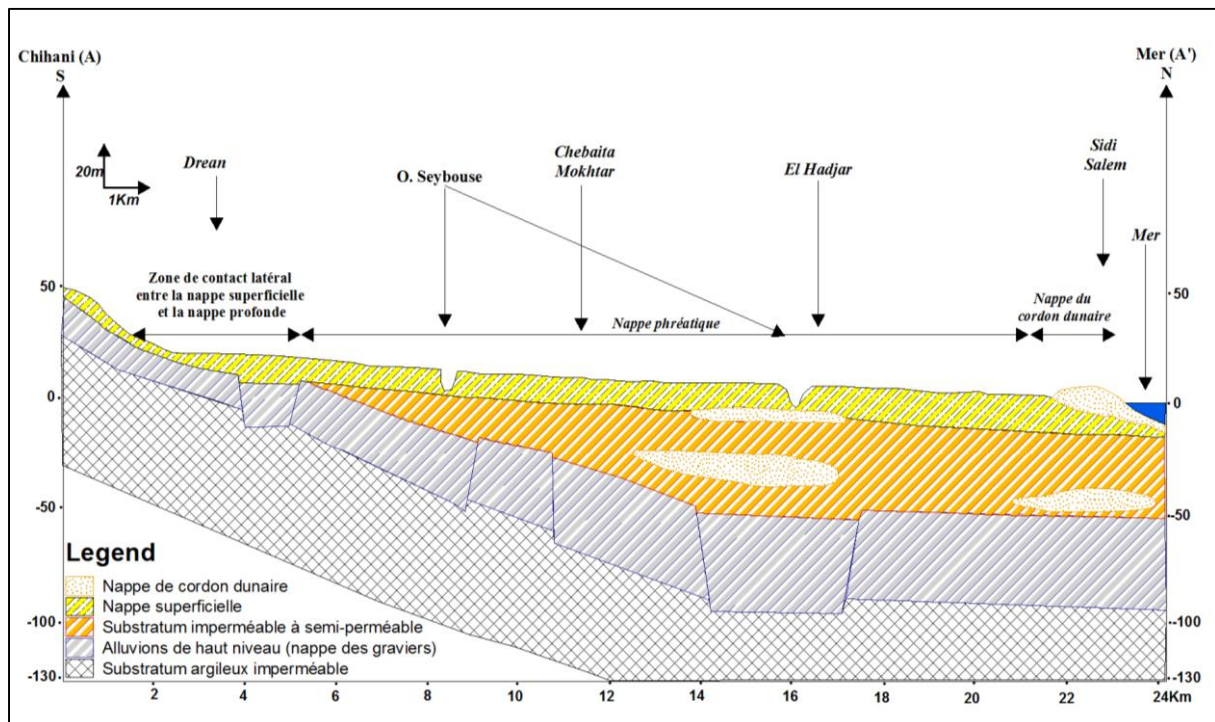
## 3. Quelques indications sur les caractéristiques hydrogéologiques des aquifères

### 3.1. La nappe superficielle d'Annaba (N.S.A)

La nappe est contenue dans des formations sablo-argileuses incluant des lentilles de sable, des argiles grises compactes constituent le substratum. Ces lentilles sont plus fréquentes dans la région de l'Oued Seybouse et à la périphérie des affleurements des grès numidiens. Il est à noter que la nappe est libre dans la majeure partie de son étendue, à l'exception de quelques points où elle est captive sous des niveaux d'argile.

L'analyse cartographique révèle que la nappe est circonscrite au nord par la mer Méditerranée, ce qui la soumet à un risque d'intrusion d'eaux marines. L'épaisseur de la nappe

libre peut atteindre 18 mètres. Cette nappe est captée par des forages dans (sa partie profonde) et par des puits dans (sa partie libre). Il est à noter que ces ouvrages sont en exploitation continue.



**Figure 17 : Coupe schématique montre la superposition des nappes souterraines dans la plaine d'Annaba (in BENCHAIIB, 2021).**

### 3.2. La nappe des graviers :

Cette nappe est considérée comme la plus remarquable et la plus intéressante, elle est localisée en dessous de l'aquifère superficiel. Elle est captive dans sa partie nord vers les Salines, et elle devient libre dans sa partie sud vers Dréan. Elle présente de bonnes qualités hydrauliques. La nappe des graviers présente des limites définies :

- Au Nord : une limite à potentiel imposé par la mer.
- Au Sud : une limite d'alimentation par la nappe des terrasses et les grès numidiens.
- A l'Ouest : une limitation de l'approvisionnement en eau par les nappes secondaires des cipolins fissurés et des gneiss altérés des massifs de Bouhamra et de Belieleta.
- A l'Est : des incertitudes subsistent concernant la nature de la limite Est à cause de l'absence de sondage au niveau des marécages de Mekrada. Néanmoins, cette dernière reste toujours supposée étanche.

La nature semi-perméable de la couche d'argiles sableuses ou d'argiles qui sépare la nappe superficielle de celle captive permet l'occurrence du phénomène de drainance. Le tableau 16, extrait de la thèse de (Debieche, 2002), offre un aperçu des formations géologiques qui contiennent ou forment les aquifères de la zone étudiée.

**Tableau 16 : Description géologique et hydrogéologique du site (Debieche, 2002, Modifié).**

Ere	Système	Lithologie	Epaisseur (m)	Hydrogéologie	
				Perméabilité	Type de nappe
Quaternaire	Récent	Sable	5-15	Perméable	Nappe du Cordon dunaire
	Moyen	Sablo-argileuse	0-20	Semi-perméable	Nappe phréatique
	Ancien	Argile avec des lentilles sableuses	250	Imperméable	Substratum
Tertiaire	Pliocène	Alluvions	10-250	Perméable	Nappe des graviers
	Miocène	Argiles	250	Imperméable	Substratum

#### 4. Descriptions des nappes de la zone d'étude

##### ➤ La nappe étudiée

Notre étude se concentrera sur la nappe superficielle. Il semble que cette nappe soit confondue avec la nappe des graviers (profond) dans la zone de Dréan, comme indiqué sur la (figure 17), qui montre une coupe schématique Sud-Nord, selon le trait de coupe (A-A') tracé dans la carte de la (figure 18). Cette coupe schématique permet de visualiser la superposition des nappes dans la basse plaine de la Seybouse.

#### 5. Aperçu sur la situation piézométrique

Par conséquent, le lancement de cette section débutera par la réévaluation des différents états piézométriques, qui ont été préparés à diverses échéances.

Le processus d'intrusion marine dans les aquifères côtiers, le cas de notre zone d'étude, est une conséquence directe de l'importance du processus d'alimentation et d'exploitation dans ces aquifères. Autrement dit, il s'agit d'une question d'hydrodynamique de la nappe. Il est impératif de déterminer la charge d'eau dans la nappe et ses fluctuations, les directions d'écoulement, les zones d'alimentation et/ou les dépressions, ainsi que les différentes communications entre les nappes (nappe superficielle, nappe profonde), oued-nappe, nappe-mer.

### **5.1. Historique de la piézométrie de la nappe superficielle d'Annaba**

Les anciennes études piézométriques à notre disposition permettent de retracer l'historique de la piézométrie de l'aquifère superficiel réalisée par différents auteurs. En 2002, Debieche a mené des mesures en août et décembre 1999 (Boumaiza, 2003). En avril 2003, il a établi une carte piézométrique pour la nappe de cordon dunaire. En juillet 2007, Khadri a réalisé une piézométrie de la zone entourant l'oued Seybouse, dans la région de Bouchegouf, jusqu'à l'exutoire vers la mer, avec un intérêt particulier pour la partie aval, la plaine d'Annaba.

### **5.2. Etats piézométriques réalisés en (Décembre 2011, Avril 2016, Novembre 2016, Avril 2017, Juillet 2017)**

Afin de saisir avec précision les fluctuations du niveau des plans d'eau de la nappe superficielle et de ses échanges dans l'espace et dans le temps au sein de cette formation côtière, une campagne de mesure a été conduite. Cette étude s'est concentrée sur les niveaux statiques, obtenus à partir de puits domestiques stratégiquement situés dans la plaine. Cependant, les pompes difficiles à contrôler nous empêchent de lever le niveau statique réel dans certains puits et c'est pour cette raison, nous allons observer des dépressions dans certaines cartes piézométriques. L'analyse des données recueillies a permis de produire cinq cartes piézométriques dans les périodes de décembre 2011, avril 2016, novembre 2016, avril 2017 et juillet 2017.

Chaque carte est assortie d'un réseau de mesures spécifique, qui est utilisé pour l'analyse des données. Dans le cadre de la démarche expérimentale, les mesures sont effectuées à l'aide d'une sonde piézométrique de 100 mètres, dotée d'un système de double signalisation sonore et lumineuse.

#### **5.2.1. Carte piézométrique de (Décembre 2011)**

La carte piézométrique du mois de décembre 2011 (figure 18) révèle une dynamique d'écoulement souterrain orientée globalement en direction sud-nord vers la mer Méditerranée. Cette dynamique est confirmée par l'orientation des flèches représentant les lignes de courant, tout dépend de la répartition décroissante des courbes piézométriques au sud, notamment autour de la région de Besbes et au centre de la région Hellala Aissa près de la côte.

Les zones côtières, où se trouvent des agglomérations comme El Bouni, Sidi Salem, Echatt et Sidi M'barek, jouent un rôle important en formant une bande de drainage des eaux souterraines vers la mer.

Un dôme piézométrique est observable au sud de la plaine, indiquant une zone de recharge probable alimentant la nappe, particulièrement à l'est de la région de Besbes. Contrairement, des dépressions observées en trois zones lesquelles la cité Seybouse, bordj smar et Sidi M'Barek, illustrent une exploitation excessive de la nappe ; cet acte irrationnel engendre un écoulement inverse nord-sud provoquant le risque d'intrusion marine.

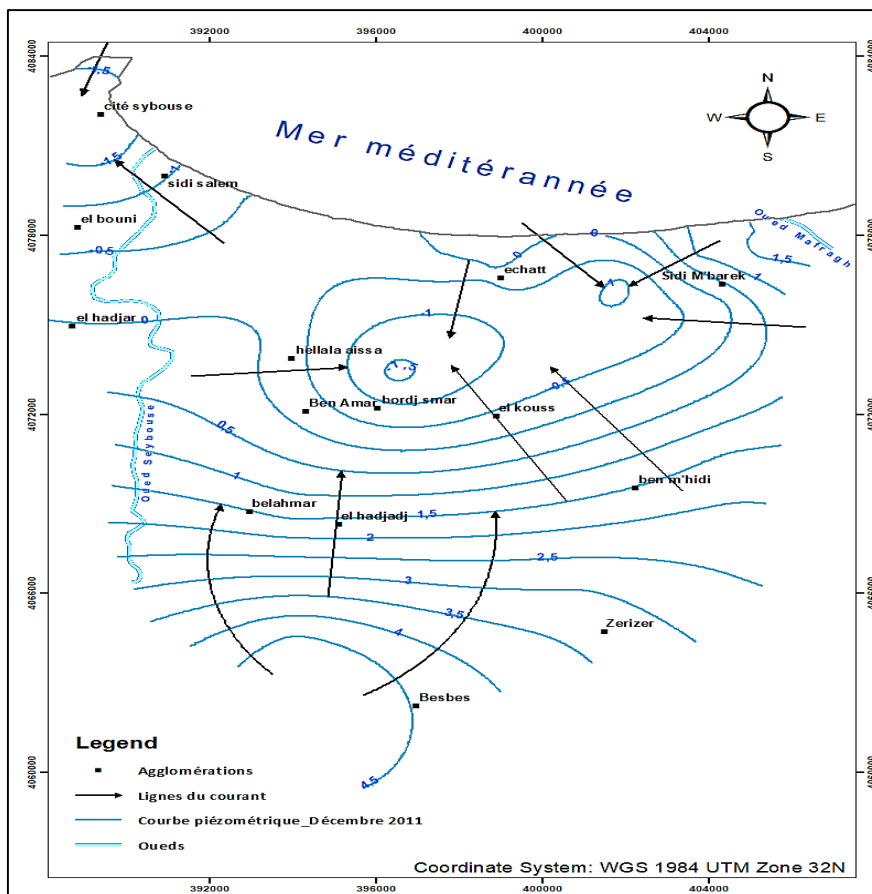


Figure 18 : Carte piézométrique de la Plaine d'Annaba (Décembre 2011).

5.2.2. Carte piézométrique de (Avril 2016)

L'analyse de la carte piézométrique pour le mois d'avril 2016, (figure 19) met en évidence le fonctionnement hydrodynamique général de la nappe phréatique de la région où l'orientation des lignes de courant révèle un écoulement général des eaux souterraines du sud vers le nord, en direction de la mer Méditerranée, traduisant un gradient hydraulique cohérent avec la topographie de la plaine. Ainsi, on observe un écoulement de direction Sud-ouest Nord-est au niveau des régions d'Elbouni et El hadjar.

Un dôme piézométrique notable est observé autour de la région de Besbes, suggérant une zone de recharge importante, probablement alimentée par infiltration des eaux de surface. Par ailleurs, la carte montre une convergence nette des lignes de courant vers la côte, indiquant que la nappe s'évacue naturellement dans la mer.

Le resserrement des courbes piézométriques dans certaines zones, notamment entre Belahmar et Besbes, indique l'existence de gradients hydrauliques marqués interprétant un écoulement rapide, en raison de la confusion des deux nappes superficielle et profonde. À l'inverse, les zones où les courbes sont plus espacées traduisent un écoulement plus lent.

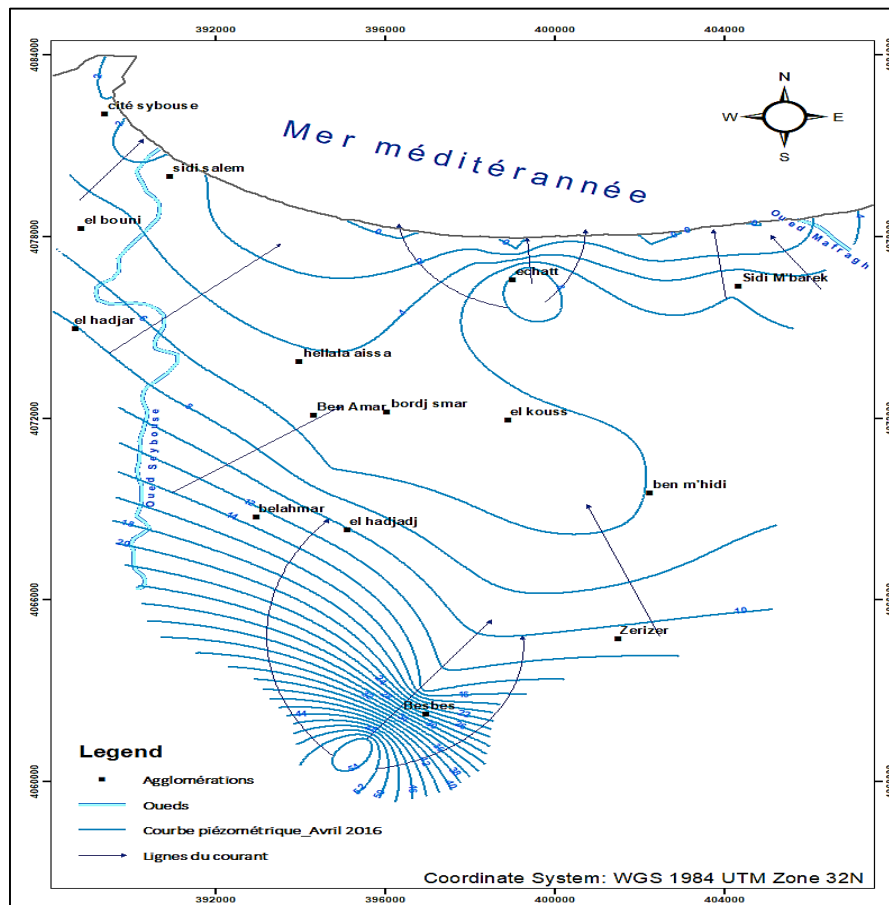


Figure 19 : Carte piézométrique de la Plaine d'Annaba (Avril 2016).

### 5.2.3. Carte piézométrique de (Novembre 2016)

La carte piézométrique pour le mois de novembre 2016, (figure 20) met en évidence une direction générale d'écoulement des eaux souterraines orientée du sud vers le nord, en direction de la mer Méditerranée. Cette dynamique est clairement indiquée par les lignes de courant qui sont globalement perpendiculaires aux courbes piézométriques, conformément aux principes de l'hydraulique souterraine. On remarque aussi des lignes de courant qui se dirigent vers la mer venant du Sud-ouest au niveau d'Elhadjar et Elbouni.

Les zones situées autour de Besbes, Belahmar et Zerizer présentent des courbes piézométriques très resserrées, traduisant une forte pente hydraulique, en raison aussi que la nappe superficielle et profonde sont confondues au niveau de cette zone, et donc un écoulement plus rapide des eaux. En revanche, dans les régions de El Kouss et Ben M'hidi, les courbes plus espacées indiquent une pente plus faible et un écoulement plus lent. Par ailleurs, une zone de rassemblement des eaux souterraines observées notamment entre Hellala aïssa, Bordj Smar et El kouss, suggèrent un pompage a eu lieu.

Enfin, la proximité de la nappe avec la côte méditerranéenne pourrait provoquer un risque d'intrusion saline si le gradient piézométrique venait à s'inverser, notamment en cas de surexploitation de la nappe en aval.

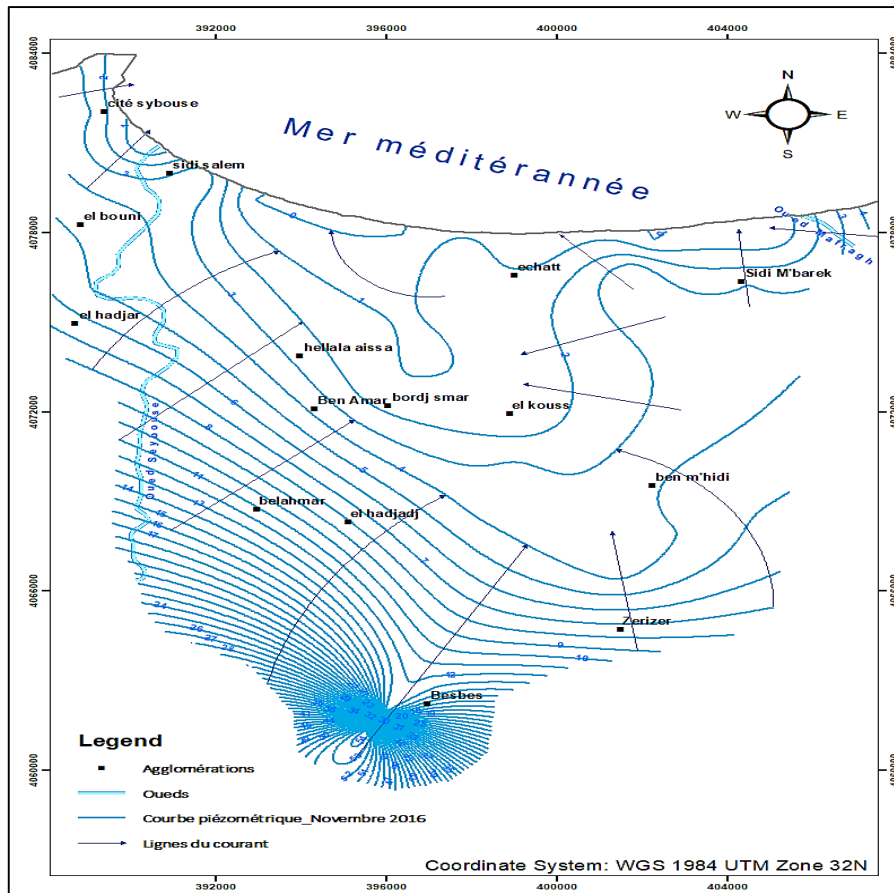


Figure 20: Carte piézométrique de la Plaine d'Annaba (Novembre 2016).

#### 5.2.4. Carte piézométrique de (Avril 2017)

La carte piézométrique de la plaine d'Annaba pour le mois d'avril 2017, (figure 21) montre des lignes isopièzes avec deux pentes générales orientée sud-nord et nord-sud à partir du centre de la zone d'étude. Cette configuration indique probablement, à cause de l'insuffisance des levés piézométriques, un pompage intensif au niveau des zones au sud de la plaine, notamment dans les régions autour de Belahmar, Elhadjaj, Zerizer et Besbes, qui sont considérées comme zones à vocation agricole. À l'inverse, les zones proches du littoral tel que Echatt, Sidi Mbarek, Sidi Salem et Cité seyouse jouent un rôle de zones de décharge, où la nappe tend à se vider naturellement vers la mer. Plus à l'Ouest, on voit un écoulement Ouest-est dans la région d'Elhadjar où on trouve que la nappe alimente l'oued.

L'écartement régulier des isopièzes traduit globalement un gradient hydraulique modéré, témoignant d'un écoulement stable dans l'ensemble du système aquifère.

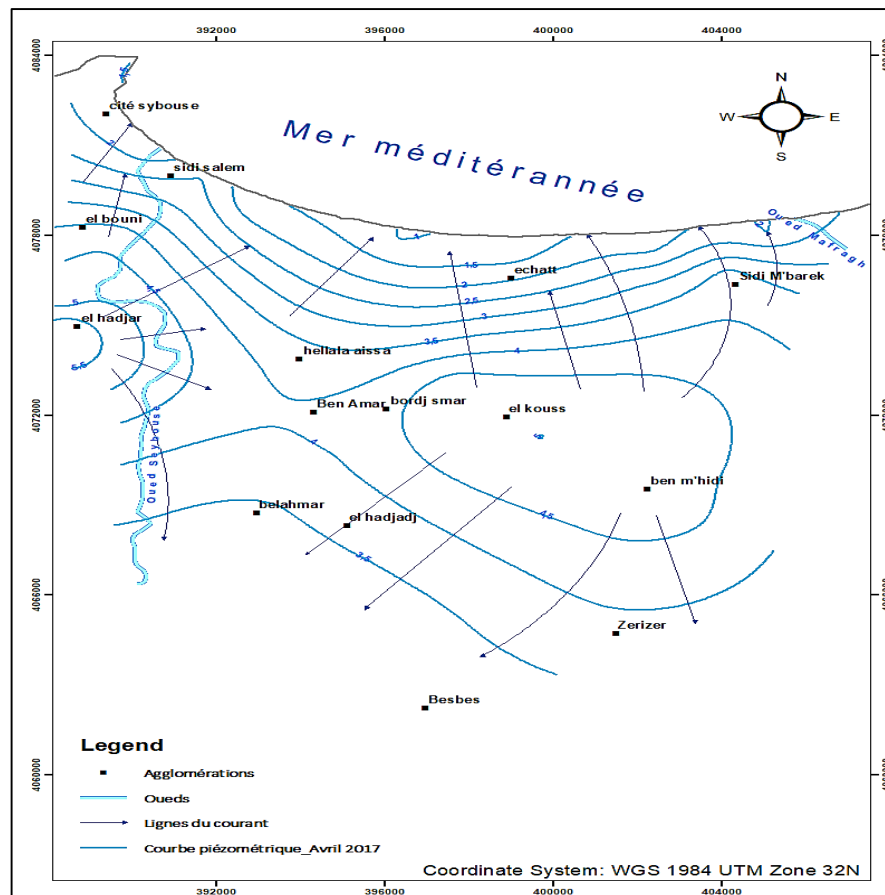


Figure 21: Carte piézométrique de la Plaine d'Annaba (Avril 2017).

### 5.2.5. Carte piézométrique de (Juillet 2017)

La carte piézométrique de la plaine d'Annaba, réalisée en juillet 2017, (figure 22), met en évidence la configuration du niveau piézométrique de la nappe phréatique durant la période estivale.

Les courbes isopiézométriques permettent de visualiser les variations de la surface libre de la nappe, montrant l'existence de plusieurs cônes de dépression piézométriques, notamment au niveau de l'agglomération d'Elkouss, nord-ouest Belahmar, Sidi M'barek, Echatt et nord-est Elhadjar, traduisant une surexploitation des eaux souterraines destinées à l'irrigation. Ces dépressions affectent l'équilibre hydraulique et peuvent favoriser l'intrusion marine dans les zones côtières.

On remarque notamment que la région au sud de Besbes présente une concentration marquée des courbes piézométriques. Cela traduit un gradient hydraulique fort, par l'effet des pompages excessifs dans le nord de la plaine et aussi le jumelage entre les deux nappes (superficielle et profonde). La carte révèle aussi une alimentation de la nappe par les deux oueds, la Seybouse et la Mafragh, suite du rabattement du niveau piézométrique.

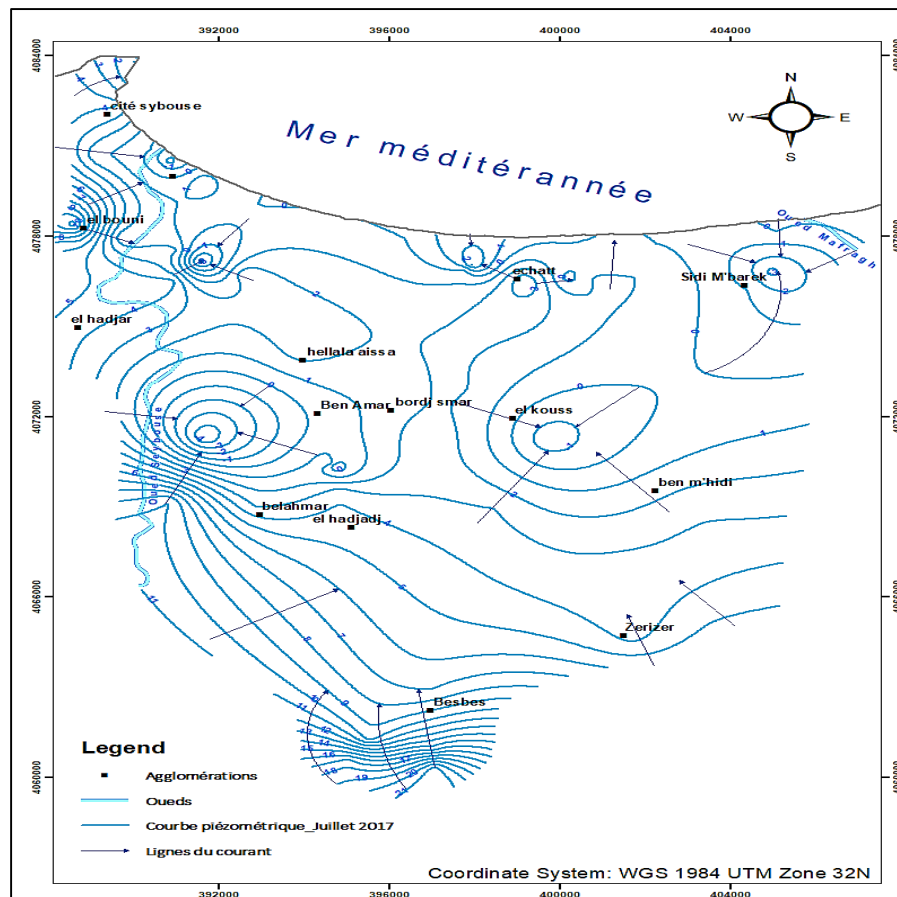


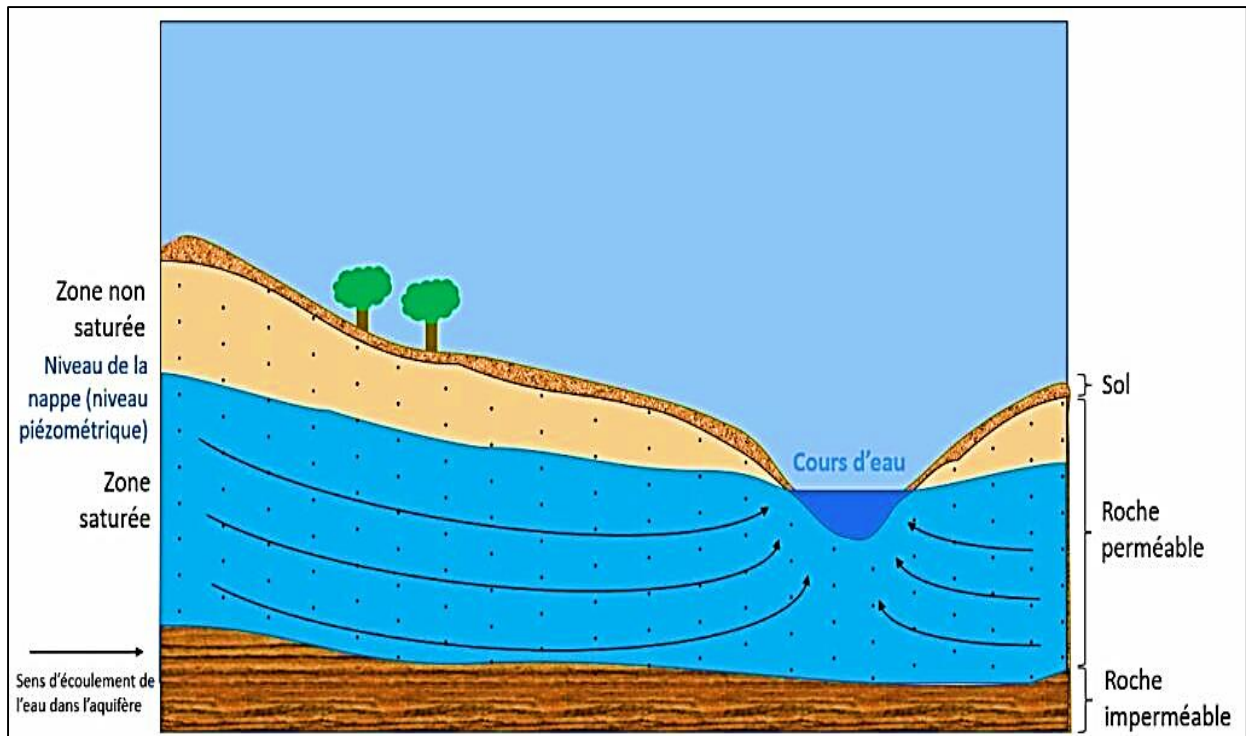
Figure 22: Carte piézométrique de la Plaine d'Annaba (Juillet 2017).

L'interprétation des cartes piézométriques montre que le niveau d'eau dans les puits varie fortement en fonction de la période de mesure. Ainsi, nous avons constaté une différence très marquée entre les mesures effectuées pendant la saison des pluies et celles réalisées durant l'été. Ceci montre que la nappe reste très vulnérable aux variations saisonnières.

### 5.3.Relation Oued-nappe

L'interprétation des cartes piézométriques met en évidence une relation de drainage entre l'oued et la nappe superficielle. Les oueds principaux, à savoir oued Seybouse à l'ouest et oued Mafragh à l'extrême nord-est, interagissent avec la nappe en agissant soit comme exutoires, soit comme zones de recharge en fonction du gradient hydraulique local.

Enfin, les interactions potentielles entre la nappe et les cours d'eau, tels que l'oued Seybouse ou l'oued Mafragh, doivent être considérées : ces cours d'eau peuvent jouer un rôle d'alimentation ou de drainage en fonction du niveau relatif de la nappe.



**Figure 23 : Schéma illustrant le drainage d'une nappe par l'oued (site web, eaudyssee).**

## 6. Conclusion

La plaine d'Annaba se caractérise par une formation géologique composée de sédiments mio-plio-quaternaires, qui ont été déposés suite à un effondrement de la zone. Les travaux réalisés dans la région ont permis de mettre en évidence l'existence de deux fosses séparées par un haut-fond portant la butte de Daroussa.

Dans le cadre de l'étude menée sur le site, il a été constaté que le remplissage était Hétérogène. Cette observation a permis de distinguer deux nappes principales dans la zone d'étude. La première nappe, objet de l'étude, est la nappe superficielle. Elle est contenue dans les sables argileuses. La seconde nappe est la nappe profonde et captive des graviers. Ces deux nappes sont l'objet d'une exploitation intensive par de nombreux ouvrages de captage. Ces derniers sont destinés à l'alimentation des populations, ainsi qu'à satisfaire aux besoins de l'industrie et de l'agriculture.

La cartographie piézométrique réalisée lors des cinq campagnes met en évidence un écoulement global des eaux souterraines orienté du sud vers le nord. La dynamique des eaux souterraines traduit une interaction entre le système aquifère et l'oued : durant les hautes eaux, la nappe est drainée par l'oued, tandis qu'en période de basses eaux, l'oued contribue à l'alimentation de la nappe. Ce comportement met également en évidence l'existence de zones de partage des eaux,

témoignant une alimentation de la nappe. En revanche, la présence de zones dépressives, souvent liées à des pompages excessifs, caractérise davantage la période des basses eaux, où l'on observe un gradient hydraulique particulièrement élevé.



**CHAPITRE IV**  
**HYDROCHIMIE**

## 1. Introduction

La composition chimique de l'eau est un facteur très important qui influence directement sa qualité et sa potabilité. En effet, c'est grâce à une analyse rigoureuse de sa composition que l'on peut garantir l'utilisation de cette eau pour l'alimentation en eau potable ou d'autres usages (irrigation, industrie...etc..).

Dans le cadre des activités de surveillance des aquifères côtiers, l'utilisation de l'outil hydrochimique s'avère être une démarche essentielle pour la compréhension des mécanismes régissant la qualité des zones concernées.

La plaine d'Annaba est caractérisée par une interaction de multiples sources de pollution, parmi ces sources, on peut citer la présence de la mer, qui est exposée à de nombreux rejets liquides en provenance des différents quartiers de la ville. Le sous-sol de la plaine présente des nappes d'eau qui sont soumises aux aléas climatiques et aux activités anthropiques. Cette situation nous conduit à rechercher les différentes sources de pollution pour déterminer la contribution de chaque facteur dans la dégradation de la qualité des eaux souterraines de la plaine. Afin de mener à bien notre étude, nous avons exploité des données d'analyses physicochimiques de deux périodes distinctes, la première en décembre 2011 et la deuxième en novembre 2016.

## 2. Échantillonnage et analyse physicochimique

Le processus d'échantillonnage et de prélèvement est essentiel pour garantir l'exactitude des résultats analytiques. Dans le cadre de notre travail, nous allons d'abord définir les démarches suivies pour la collecte des données du terrain étudié. Donc, tout d'abord, on doit collecter des informations suffisantes sur les puits existants au niveau de la zone d'étude, ainsi que la possibilité de l'accès et du prélèvement. Cette procédure est accompagnée d'un enregistrement de la localisation (coordonnées cartésiennes) et le nom de l'endroit.

Une fois qu'on garantit que le réseau des puits sélectionné offre une couverture optimale sur l'ensemble de la plaine, comme indiqué sur les cartes d'inventaire des puits (figures 24), on commence par faire une campagne de mesure du niveau statique et de prélèvement des échantillons d'eau. À ce moment-là, on mesure sur place les paramètres physiques (température, pH, conductivité). Cette opération de mesure est répétée à chaque déplacement sur le terrain.

Les résultats des analyses chimiques utilisés, proviennent des deux campagnes suivantes :

- La première campagne en Décembre 2011 fournées par l'ANRH, contient les analyses des eaux de 24 puits (figure 24.A).
- La seconde campagne en Novembre 2016 réalisée par (BENCHAIB. 2021), et porte sur les analyses des eaux de 16 puits (figure 24.B).

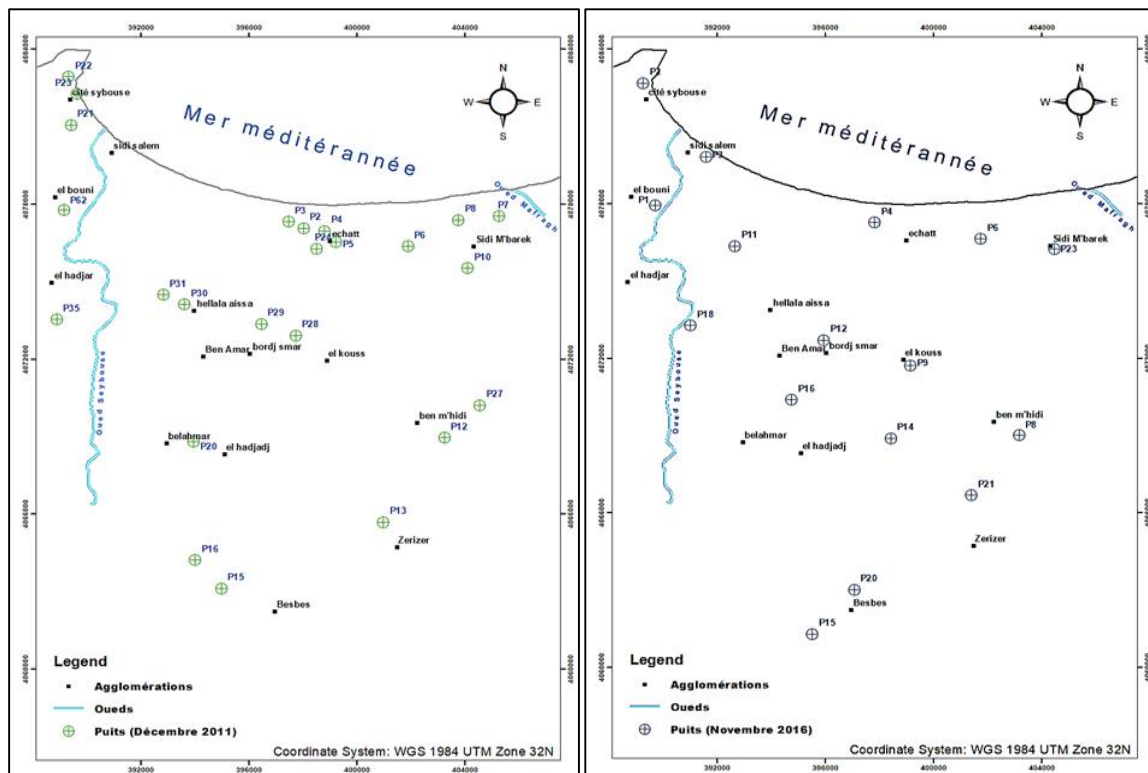


Figure 24: Carte d'inventaire des puits (a) de Décembre 2011, et (b) Novembre 2016.

### 3. Caractéristiques physicochimiques des eaux de la nappe étudiée

Les analyses physico-chimiques sont déterminées par les paramètres suivants :

- ↪ **Les paramètres physiques** : sont des mesures in situ comprennent la température ( $T^{\circ}$ ), le PH, et la conductivité électrique (CE), les mesures sont réalisées immédiatement après le prélèvement de l'échantillon et durant les mesures piézométriques à l'aide d'un pH mètre et d'un conductimètre.
- ↪ **Les paramètres chimiques** : une analyse exhaustive des éléments chimiques a été réalisée pour cette étude, comprennent les éléments majeurs qui sont :
  - Les cations : qui compte le calcium ( $Ca^{+2}$ ), le magnésium ( $Mg^{+2}$ ), le sodium ( $Na^{+}$ ) et le potassium ( $K^{+}$ ) ;

- Les anions : qui comptent les bicarbonates ( $\text{HCO}_3^-$ ), les chlorures ( $\text{Cl}^-$ ), les sulfates ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) et les éléments d'origine biologique les nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ), c'est un indicateur de pollution anthropique.

### 3.1. Paramètres physiques

#### a. La Température

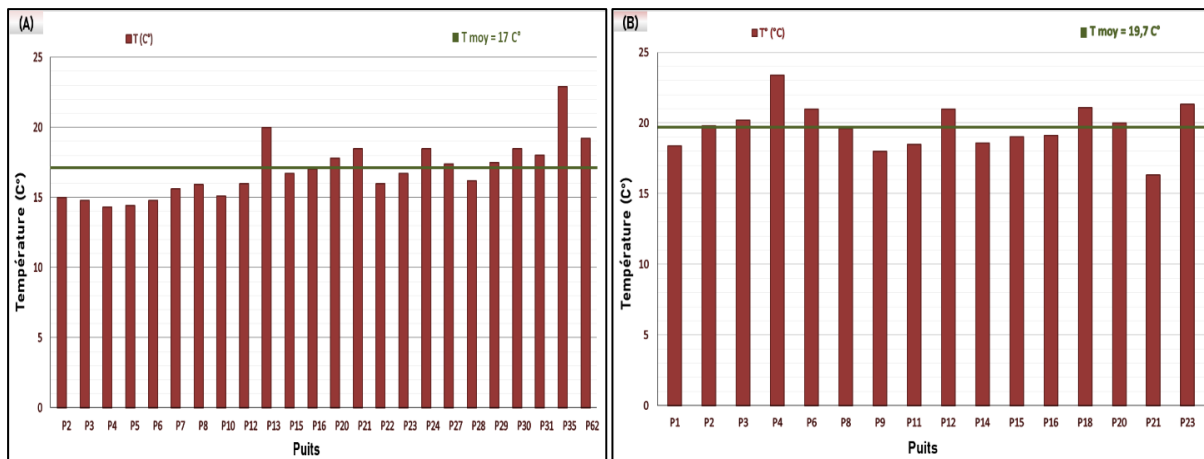
Il est essentiel de connaître avec précision la température de l'eau. Il ne fait aucun doute que cette substance joue un rôle crucial dans la solubilité des gaz, la dissociation des sels et la détermination du pH. Elle est essentielle à la compréhension de l'origine de l'eau et des mélanges, ce qui en fait un sujet d'une importance capitale. Cette mesure s'avère d'ailleurs extrêmement utile pour les études limnologiques (Rodier et al, 2005).

Les analyses menées sur les échantillons prélevés dans les eaux du système aquifère étudié révèlent une stabilité relative des températures varie entre 17 en (décembre 2011), et 19.71 en (novembre 2016), et elles sont supérieures à la température de l'air. Comme indiqué dans le (tableau 17).

**Tableau 17 : Variations de la température( $^{\circ}\text{C}$ ) des eaux souterraines.**

Période	Min	Max	Moy (eau)	Moy (air)
Décembre 2011	14.3	22.9	17	13.4
Novembre 2016	16.3	23.4	19.7	17.3

A partir de données précédentes des variations saisonnières de la température( $^{\circ}\text{C}$ ) des eaux souterraines, nous avons réalisé les histogrammes ci-dessous (figure 25).



**Figure 25: Variations de la température (C°) des eaux souterraines (A, Décembre 2011) et (B, Novembre 2016).**

L'analyse des deux histogrammes précédents des variations de la température des eaux souterraines, présenté dans la (figure 25) révèle que les températures moyennes enregistrées oscillent entre 17 °C et 19 °C, pendant les mois de décembre 2011, et novembre 2016. Cette observation indique une faible variabilité des températures entre les deux mois. Cela suggère l'absence de variation significative, ce qui indique une faible variabilité de la température dans l'espace et dans le temps. En conséquence, l'impact des variations climatiques est minimisé.

Nous constatons que la valeur maximale est enregistrée au mois Décembre 2011 au niveau de puit 35 est égale à 22.9 C°, et la valeur minimale est enregistrée au niveau de puit 4 est égale à 14.3 C°. Par contre le mois Novembre enregistre la valeur maximale au niveau de puit 4, qui est égale à 23.4 C°, ou la valeur minimale est marquée au niveau de puit 21 est égale à 16.3 C°.

#### **b. Le potentiel d'hydrogène (pH)**

Le pH est un paramètre qui permet la détermination de l'acidité ou l'alcalinité d'une eau par la concentration en ions (H<sup>+</sup>). Il a généralement une valeur entre 7,2 et 7,6 ; (Degremont, 2005).

Les échelles de classification selon la valeur du pH sont les suivantes :

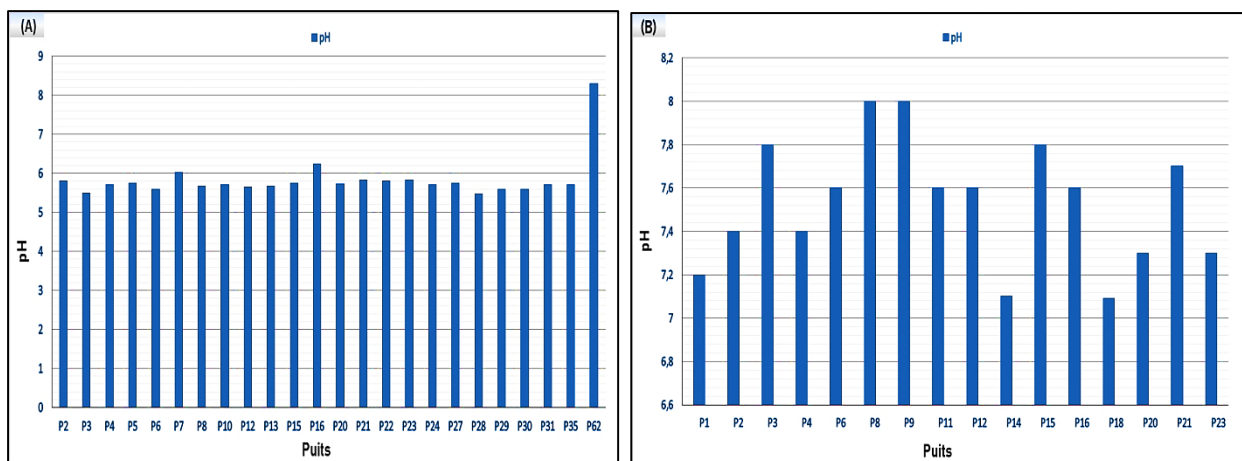
- ✓ Une eau de pH = 7 est dite neutre.
- ✓ Une eau de pH < 7 est dite acide.
- ✓ Une eau de pH > 7 est dite basique (ou alcaline).

**Tableau 18 : Variations du pH des eaux souterraines.**

Période	Min	Max	Moyenne
Décembre 2011	5,48	8.03	5.84
Novembre 2016	7.09	8	7.53

D'après ce tableau, les résultats des analyses révèlent que les valeurs moyennes de pH enregistrées durant les deux campagnes d'échantillonnage (Décembre 2011, novembre 2016), présentent une variation de 5.84 et 7.53 respectivement, et nous avons obtenu les deux graphiques ci-dessous (figure 26).

Les résultats indiquent que le pH en Décembre 2011 est inférieur à la norme définie par la réglementation algérienne, qui est comprise entre 6.5 et 9, ce qui conclue que les eaux de cette nappe sont légèrement acides. Par contre, en mois de Novembre 2016, les valeurs du pH sont autour de la neutralité ( $\approx 7$ ).

**Figure 26: Variations du pH des eaux souterraines (A, Décembre 2011) et (B, Novembre 2016).**

### c. Conductivité électrique (CE)

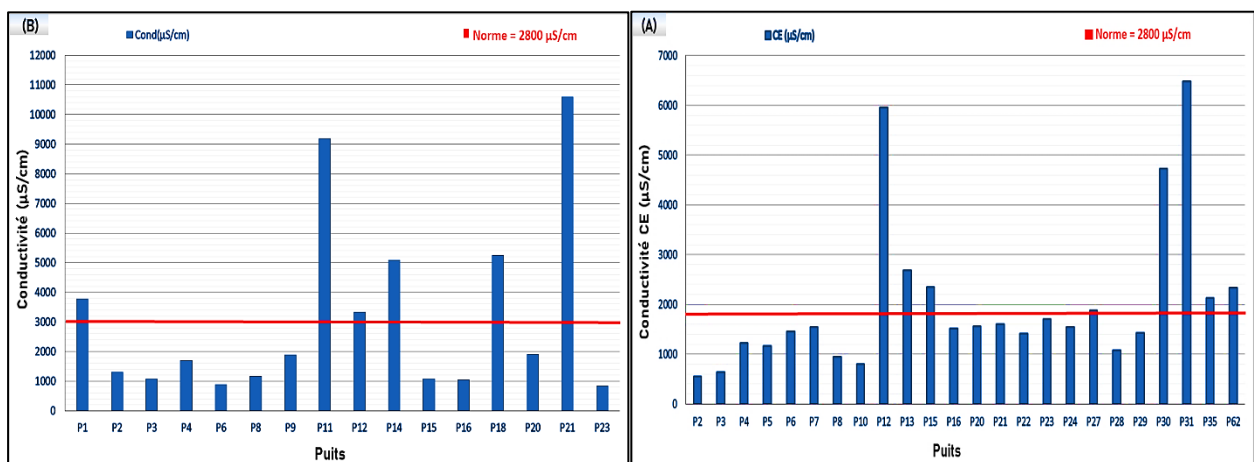
La conductivité, qui s'oppose à la résistivité, est la capacité de l'eau à permettre la circulation du courant électrique. La mesure de la conductivité électrique est une méthode permettant une évaluation rapide de la minéralisation (Hounslow, 1995).

Pour mesurer la conductivité électrique de l'eau, on utilise un conductimètre ou un multi-paramètre. Elle est exprimée en  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , ou  $\mu\text{S}/\text{cm}$  et normalisée pour une température de  $25\text{ }^\circ\text{C}$ .

**Tableau 19 : Relation entre la conductivité (CE) et la minéralisation (Rodier.J.2009).**

Conductivité électrique ( $\mu\text{S/cm}$ )	Minéralisation (mg/l)
CE < 100	Très faible
100 < CE < 200	Faible
200 < CE < 333	Moyenne
333 < CE < 666	Moyenne à accentuée
666 < CE < 1000	Importante
CE > 1000	Elevée

En exploitant les résultats de mesure de la conductivité électrique des eaux de la zone étudiée, nous avons réalisé les deux graphiques ci-dessous (figure 27). Ces graphes représentent des variations de la conductivité électrique des eaux souterraines pour le mois de Décembre 2011 et Novembre 2016.



**Figure 27: Variations de la Conductivité CE ( $\mu\text{S/cm}$ ) des eaux souterraines, (A) Décembre 2011 et (B) Novembre 2016.**

#### ➤ Mois de Décembre 2011

La conductivité électrique en décembre 2011, (figure 27.A), révèle des valeurs significatives relativement élevées qui dépassent 2800  $\mu\text{S/cm}$  (La norme définie par la réglementation algérienne). Ces valeurs s'étendent entre 5950 et 6480  $\mu\text{S/cm}$ , avec une moyenne qui dépasse 2028  $\mu\text{S/cm}$ .

L'analyse de la distribution spatiale de la conductivité électrique en se basant sur la carte d'inventaire des puits (figure 27), montre que les fortes valeurs se localisent dans la zone Est de la plaine, particulièrement au niveau de trois puits p12, p30 et p31. Le puits 31 est celui qui

présente la valeur maximale qui est égale à 6480  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , ce puits se trouve au bord de la côte qui borde la ville d'Hellala Aissa, ce qui nous concerne probablement, c'est qu'il y a une influence marine. Cependant, la conductivité électrique est moins élevée sur le reste de la plaine presque tous les autres puits, avec une fourchette allant de 551 à 2680  $\mu\text{S}/\text{cm}$

#### ➤ Mois de Novembre 2016

La conductivité électrique en novembre 2016, (figure 27.B), révèle ainsi des valeurs significatives relativement élevées, qui varient entre 5250 et 10600  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , avec une moyenne de 3129  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Les fortes valeurs qui dépassent la norme se localisent dans la zone Est de la plaine particulièrement entre Sidi salem et Hellala Aissa au niveau des puits p1, p11, p12, p14, p18 et p21. Ce dernier puits présente la valeur maximale avec 10600  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , qui se trouve dans la ville de Zerizer. Par contre, la conductivité électrique est moins élevée sur le reste de la plaine, oscille entre 838 et 880  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

#### d. La dureté totale (TH)

La dureté de l'eau, connue également sous le nom de titre hydrotimétrique, désigne la teneur en calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) et magnésium ( $\text{Mg}^{2+}$ ) dissous dans l'eau. Elle se mesure en milléquivalents par litre (meq/L) ou en degrés français ( $^{\circ}\text{F}$ ). Cette caractéristique permet de classer l'eau en douce, moyennement dure ou dure, selon la concentration cumulée de ces deux éléments (Boucenna, F., 2022).

Le TH s'exprime aussi par,  $1^{\circ}\text{f}$  correspond à 10 mg/L de  $\text{CaCO}_3$ . La dureté totale est représentée par la formule suivante :

$$\text{TH} = [\text{Ca}^{2+}] + [\text{Mg}^{2+}]$$

**Tableau 20 : Classification des eaux en fonction du titre hydrotimétrique.**

TH ( $^{\circ}\text{F}$ )	0-7	7-15	15-25	25-35	$\geq 35$
Eau	Très douce	Douce	Moyennement Dure	Très dure	Dure

Après avoir effectué les calculs de la dureté totale pour chacun des deux mois de décembre 2011 et novembre 2016, nous avons mis les résultats dans les annexes (02, et 03) respectivement. D'après ces calculs, nous constatons en mois de décembre 2011, que les valeurs montrent une variation allant d'eau moyennement dure à très dure, avec des

concentrations comprises entre 81,08 mg/L et 238,9 mg/L en équivalent CaCO<sub>3</sub>. Par contre, les résultats obtenus en novembre 2016 révèlent une variabilité plus marquée, avec des valeurs allant de 52,45 mg/L à 438,71 mg/L. Cela indique que les eaux analysées en 2016 varient entre eaux douces et très dures, traduisant une hétérogénéité importante du niveau de minéralisation d'un puits à l'autre.

### 3.2. Paramètres chimiques

#### 3.2.1. Balance Ionique :

La balance ionique ou l'équilibre ionique repose sur le principe de neutralité électrique, ce qui implique que la concentration équivalente d'ions chargés positivement, « cations », est égale à la concentration équivalente d'ions chargés négativement, « anions ». Donc, elle représente l'équilibre entre les cations et les anions exprimés en méq/L, (Komlan FAMBI et al,2022).

Afin de garantir la fiabilité des données, nous avons calculé la balance ionique qui nous permet de contrôler le pourcentage d'erreur analytique. Pour ce faire, nous avons appliqué l'équation suivante :

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

Avec :

**BI** : la balance ionique en %.

Si :

- ✓  $-2\% \leq BI \leq 2\%$  : c'est une bonne analyse ;
- ✓  $2\% < BI < 5\%$  ou  $-5\% < BI < -2\%$  : c'est une analyse acceptable ;
- ✓  $BI > 5\%$  ou  $BI < -5\%$  : c'est une mauvaise analyse.

Après avoir effectué les calculs de la balance ionique pour chacun des deux mois de décembre 2011 et novembre 2016, nous avons mis les résultats dans les annexes 04 et 05 respectivement. D'après ces calculs, nous constatons que plus de 95% des analyses sont variées entre bonnes et acceptables pour les deux mois.

#### 3.2.2. Les éléments majeurs

Notre analyse se concentrera sur les variations temporelles des éléments majeurs contribuant dans la composition chimique des eaux naturelles. D'après les analyses des données étudiées,

nous avons réalisé les histogrammes de chaque élément chimiques majeurs pour les deux mois décembre 2011, et novembre 2016.

### 3.2.2.1. Les cations

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

Le calcium est un composant essentiel à la dureté de l'eau. Il s'agit de l'élément prédominant dans les eaux potables. La teneur en éléments nutritifs varie principalement en fonction de la nature du terrain traversé. (Queneau et Hubert, 2009). La présence d'ions  $\text{Ca}_2^+$  dans l'eau trouve son origine dans deux processus naturels distincts, soit par la dissolution des formations carbonatées ( $\text{CaCO}_3$ ), soit la dissolution des formations gypseuses  $\text{CaSO}_4(\text{H}_2\text{O})_2$ , conformément aux équations suivantes :



#### ➤ Mois de Décembre 2011

L'analyse de l'histogramme des variations du Calcium (figure 28-A), montre que les concentrations en calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ), présentaient une variation entre 68.11 (p28) et 702,1 mg/l (p24), avec une moyenne s'établissant à 203.77 mg/l. Les valeurs les plus élevées qui dépassent 200 mg/l, (La norme définie par la réglementation algérienne), sont observées au niveau de cinq (05) puits (p6, p12, p24, p30, p31), c'est à dire 25 % de l'ensemble des puits dépassent la norme, et 75 % des puits sont conformes à la norme. Ces teneurs élevées sont attribuables à la dissolution des formations carbonatées ou l'échange cationique résultant de l'envahissement de l'eau de mer.

#### ➤ Mois de Novembre 2016

En comparaison avec les concentrations mesurées au mois de décembre 2011 selon la figure suivante, nous observons dans ce mois comme nous indiquons la figure des variations du Calcium (B), (figure 28-B), que les concentrations révèlent une diminution statistiquement très significative. Le puits P21 est le seul à présenter une concentration de l'ordre de 250 mg/l, c'est la valeur la plus élevée, qui dépassent 200 mg/l, (La norme définie par la réglementation algérienne). Cette diminution des concentrations est vraisemblablement attribuable à la dilution des eaux, en raison des précipitations pluvieuses enregistrées au cours du mois de novembre,

dont le volume est estimé à environ 114.4 mm. La valeur minimale enregistrée est présentée dans le puit (P15) avec 21.95 mg/l.

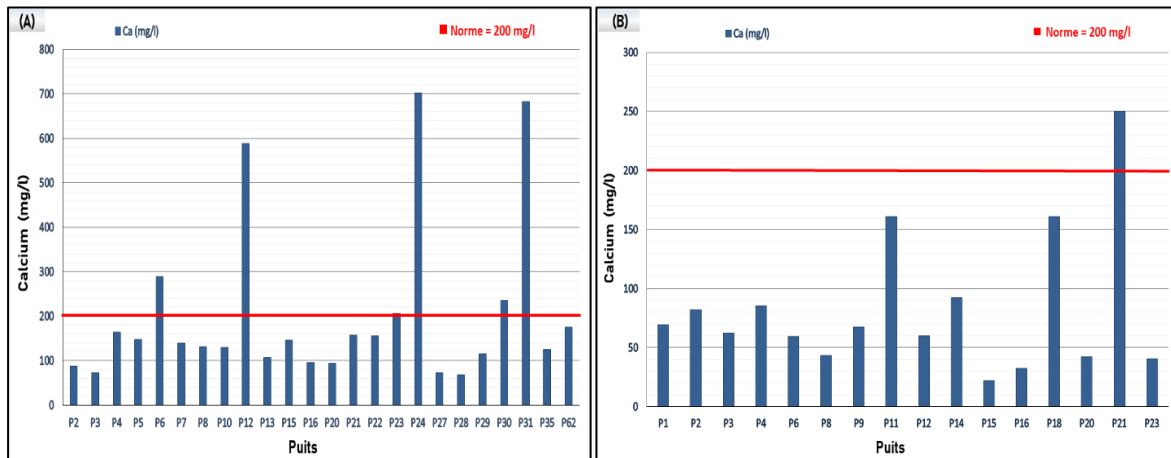
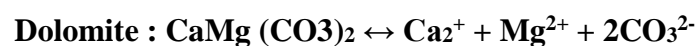


Figure 28 : Variations du Calcium (mg/l), (A, Décembre 2011, et (B, Novembre 2016).

### b. Magnésium ( $Mg^{2+}$ )

Il représente un aspect crucial de la dureté de l'eau, aux côtés des ions calcium, et se distingue par sa prévalence dans l'environnement naturel (Rodier et al, 2009). La variation du magnésium dans les eaux souterraines était due à l'influence des formations carbonatées, telles que les calcaires, d'une part, et les formations salifères d'autre part comme les argiles et les marnes qui sont riche en  $Mg^{2+}$ , (Dib, 2009). La relation est exprimée par les équations suivantes :



#### ➤ Mois de Décembre 2011

L'histogramme de variation du Magnésium (figure 29-A), montre que les résultats des analyses font état de concentrations en magnésium relativement faibles, avec des valeurs comprises entre 6.95 mg/l (p2), et 340 mg/l (p24), et une moyenne de 64.88 mg/l. Les valeurs les plus élevées, qui dépassent 50 mg/l, (La norme définie par la réglementation algérienne) sont observées au niveau de sept (07) puits (p12, p13, p24, p30, p31, p35, p62)). Cela représente 29,17 % des

puits indiquant un dépassement notable dans près d'un tiers des échantillons. Les 70,83 % restants respectent les limites réglementaires.

#### ➤ Mois de Novembre 2016

D'après l'histogramme des Variations du Magnésium (figure 29-B), nous constatons une augmentation des concentrations, qui dépassent 50 mg/l, (La norme définie par la réglementation algérienne), particulièrement au niveau des puits P1, P11, P12, P14, P18 et P21, avec des valeurs qui se situent dans une gamme allant de 90 mg/l (P1) à 200 mg/l (P18). Parmi les 16 puits analysés, (06) présentent une concentration supérieure à la norme, soit 37,5 % des échantillons. Les 62,5 % restants sont conformes aux exigences réglementaires.

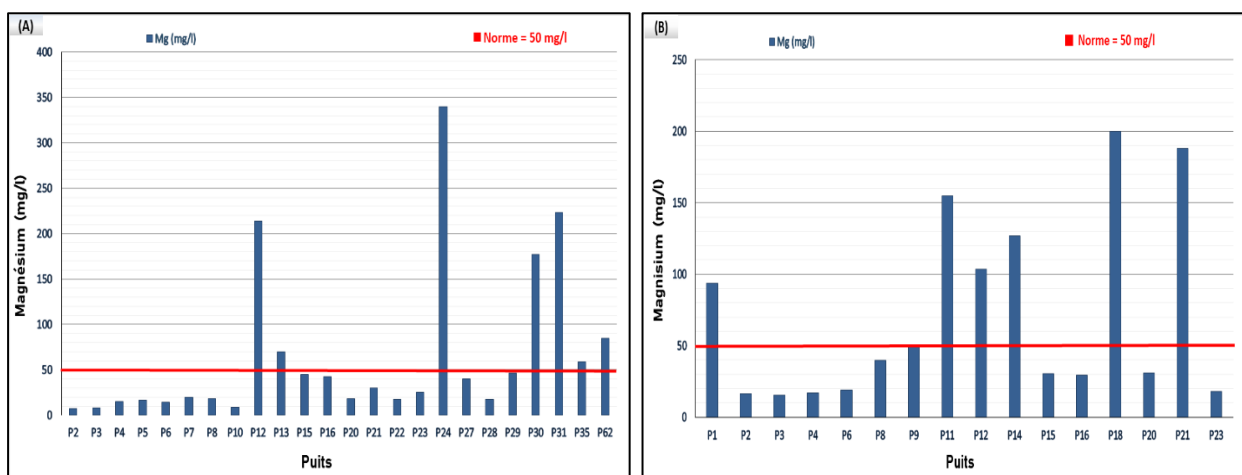
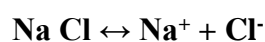


Figure 29 : Variation du Magnésium (mg/l), (A, Décembre 2011, et B, Novembre 2016).

#### c. Sodium (Na<sup>+</sup>)

La concentration en nitrates dans l'eau peut varier significativement d'une région à une autre, comme l'ont souligné plusieurs études (Bouziyani, 2000). L'origine de ce phénomène peut être naturelle, comme dans le cas d'une exposition à la mer ou à un terrain salé, humaine (10 à 15 g Na Cl dans les urines /jour) ou industrielle (potasse, industrie pétrolière). Les eaux très riches en sodium sont sujettes à une saumâtisation, ce qui a pour conséquence de leur conférer un goût désagréable, ces éléments ne peuvent être consommés Selon (Rodier et al. 2005).

La dissolution des minéraux salifères est représentée par la relation suivante :



#### ➤ Mois de Décembre 2011

L'histogramme des concentrations en sodium dans les différents puits relevés en décembre 2011 (figure 30-A), révèle des disparités notables. Bien que la plupart des puits présentent des valeurs inférieures à la limite recommandée de 200 mg/l, indiquant une eau conforme aux normes, certains dépassent ce seuil de manière significative. Le puits P24, en particulier, montre une concentration exceptionnellement élevée, supérieure à 2000 mg/l, traduisant un phénomène de salinisation accentuée. Ce pic anormal pourrait résulter d'influences géologiques locales, d'une intrusion d'eau salée ou d'activités anthropiques. D'autres puits, tels que P12, P13, P15, P27, P30, P31, P35 et P62, franchissent également le seuil, bien que de manière moins extrême, ce qui appelle à des mesures de surveillance et à des analyses plus approfondies.

#### ➤ Mois de Novembre 2016

Par contre le mois de novembre 2016 (figure 30-B), met en évidence une variabilité importante entre les différents puits échantillonnés. La norme de potabilité fixée à 200 mg/l est dépassée dans plusieurs puits, notamment P1, P9, P11, P12, P14, P20 et P21, ce qui indique un enrichissement significatif de ces eaux souterraines en sodium. Le puits P11 affiche la concentration la plus élevée, atteignant environ 550 mg/l, ce qui pourrait compromettre son usage pour la consommation humaine et même pour certaines cultures sensibles au sel. En revanche, d'autres puits comme P4, P6, P8 ou P23 présentent des valeurs nettement inférieures au seuil critique, suggérant la potabilité de l'eau sur ces sites.

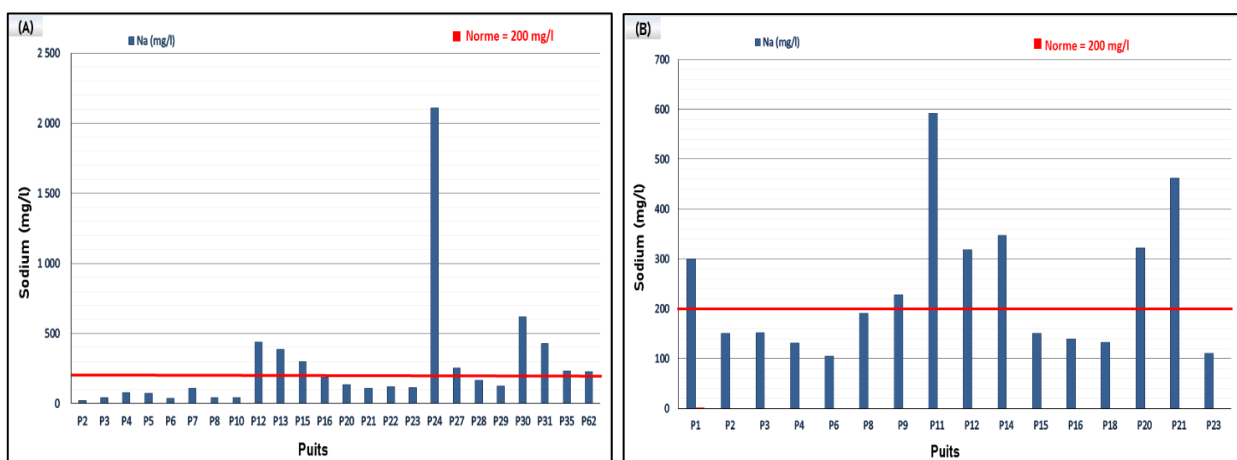


Figure 30 : Variations du sodium (mg/l), (A, Décembre 2011, et B, Novembre 2016).

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

D'après (Ayad et Kahoul, 2017), Le potassium joue un rôle essentiel chez l'homme (transmission de l'influx nerveux) dont les besoins de l'organisme sont de l'ordre de 3 à 4 grammes par jour et une déficience peut induire une faiblesse musculaire.

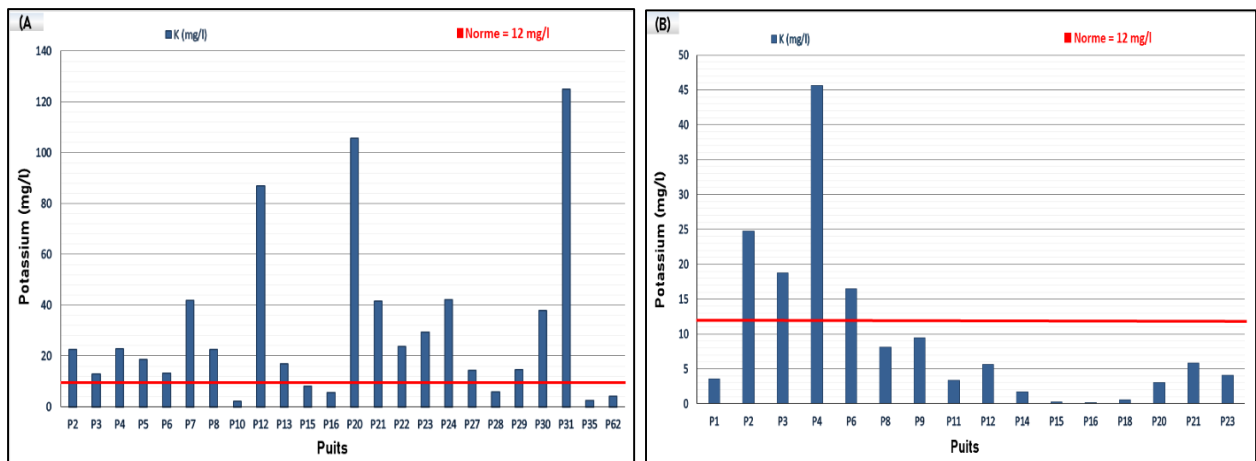
La présence de potassium est liée avec l'utilisation en agriculture et en industrie et surtout à la nature géologique. (Rodier J, Legube B, Merlet N. Paris : Dunod ; 2009) (Touhari F, Mehaiguen M. 2017).

**➤ Mois de Décembre 2011**

La figure (31-A), représente les variations des concentrations en potassium ( $K^+$ ) mesurées au mois de décembre 2011. La norme de qualité fixée à 12 mg/l est largement dépassée dans la quasi-totalité des sites échantillonnés. Plusieurs puits présentent des concentrations particulièrement élevées, notamment P7, P12, P20 et P31, avec des valeurs atteignant ou dépassant les 100 mg/l. Ces dépassements massifs indiquent une contamination marquée, probablement d'origine anthropique, liée à des activités agricoles (engrais potassiques), domestiques ou industrielles. Certains puits tels que P10, P16, P28 et P35 montrent toutefois des teneurs relativement faibles.

**➤ Mois de Novembre 2016**

Contrairement à l'observation pour le mois de novembre 2016 (figure 31-B). Il ressort que plusieurs puits dépassent largement la norme fixée à 12 mg/l (indiquée par une ligne rouge). Les concentrations les plus élevées sont observées dans les puits P2, P3, P6 et surtout P4, ce dernier atteignant les 47 mg/l, soit près de quatre fois la norme admise. En revanche, les puits restants présentent des teneurs nettement plus faibles, inférieures à la norme, ce qui suggère une hétérogénéité spatiale marquée dans la distribution du potassium, et c'est probablement dû à la différence d'intensité des activités anthropiques d'un endroit à l'autre.



**Figure 31 : Variations du potassium k (mg/l) des eaux souterraines (A, Décembre 2011, et B, Novembre 2016).**

### 3.2.2.2. Les anions

#### a. Chlorures (Cl<sup>-</sup>)

Les chlorures sont une composante inhérente aux eaux naturelles, avec des proportions qui varient considérablement. Leur présence dans l'eau souterraine découle directement de la dissolution des sels naturels, notamment de la sylvite (K-Cl) et de l'halite (Na-Cl), (Saoud, 2014).

#### ✓ L'origine de chlorure :

- Dissolution des dépôts de sel dans les régions sédimentaires.
- Intrusion de l'eau de mer dans les zones côtières.
- Infiltration des eaux usées vanes.
- Rejets industriels, exemple : HCl.
- Entretien des routes par le sel gemme.

#### ➤ Mois de Décembre 2011

Les concentrations en chlorures au niveau des puits pour le mois de décembre 2011 sont représentées dans l'histogramme, (figure 32-A). Il en ressort que la majorité des puits présentent des teneurs en chlorures inférieures à la norme de potabilité fixée à 500 mg/L, ce qui témoigne d'une eau souterraine globalement peu minéralisée.

Mais certains puits, comme les puits P12, P24, P30 et P31, ont des concentrations plus élevées. Le puits P24 a un pic très marqué qui dépasse largement 5000 mg/L. Cette valeur exceptionnellement élevée indique une forte contamination, probablement liée à une intrusion

des eaux de mer à cause d'un pompage excessive dans ce puits ou à une pollution d'origine anthropique.

### ➤ Mois de Novembre 2016

L'observation de l'histogramme pour le mois de novembre 2016, (figure 32-B). Il ressort que certains puits dépassent la norme, notamment les puits P11, P14, P18 et P21 avec des concentrations atteignant ou dépassant les 1400 mg/L pour P11 et P21. Ces valeurs élevées traduisent une contamination significative en chlorures, pouvant résulter d'une intrusion saline, de rejets anthropiques ou d'une mauvaise qualité naturelle du réservoir aquifère. En revanche, une majorité de puits, notamment P2 à P8, présentent des concentrations faibles, généralement inférieures à 200 mg/L, ce qui indique une bonne qualité chimique de l'eau à ces emplacements.

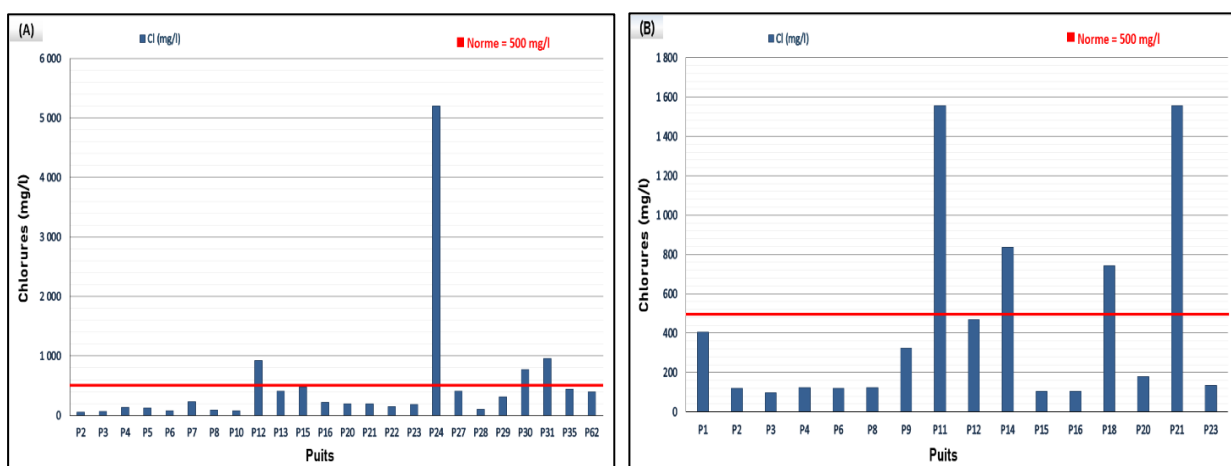


Figure 32 : variations des chlorures (mg/l), (A, Décembre 2011, et B, Novembre 2016).

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

Les chlorures se rencontrent fréquemment dans la nature, où ils se présentent le plus souvent sous forme de sels, la substance se compose de sodium (Na-Cl), de potassium (K-Cl) et de calcium ( $\text{Ca-Cl}_2$ ), (SEVESC ,2013). L'ion chlorure ne subit pas d'adsorption au niveau des formations géologiques, il conserve une grande mobilité et ne présente qu'une faible capacité de combinaison avec les éléments chimiques. Il s'agit d'un indicateur pertinent de la pollution atmosphérique. Comme l'ont démontré (Chaker et Slimani en 2014).

Les sulfates sont représentés par la relation suivante :



### ➤ Mois de Décembre 2011

La (figure 33-A), illustre les variations des concentrations en sulfates dans les eaux souterraines dans le mois de décembre 2011. L'observation de l'histogramme révèle que cinq puits dépassent la limite de potabilité, en particulier les puits P6, P12, P24, P30 et P31, avec des concentrations très élevées, où on trouve un pic significatif au niveau du puits P12 dépassant les 1200 mg/L. Ces valeurs suggèrent une contamination importante, possiblement liée à des activités anthropiques ou à la dissolution des formations gypsifères. À l'inverse, certains puits comme P2, P5, P7, et P8 présentent des concentrations bien inférieures à la norme, traduisant une bonne qualité de l'eau à ces emplacements.

### ➤ Mois de Novembre 2016

Les concentrations des sulfates du mois de novembre 2016, (figure 33-B) comparativement aux résultats acquis dans de la période de décembre 2011, on observe une hétérogénéité marquée des teneurs en sulfates selon les sites. Le puits P1 enregistre la concentration la plus élevée, avoisinant les 300 mg/l, ce qui pourrait être le signe d'un début d'une contamination locale par une dissolution accrue des minéraux sulfatés ou d'activités anthropiques à proximité (agriculture, industrie, etc.). À l'inverse, le puits P2 affiche la plus faible concentration, inférieure à 50 mg/l, traduisant une moindre minéralisation de l'eau souterraine à cet endroit. D'autres puits comme P9, P14, P20 et P21 montrent également des concentrations relativement élevées (entre 150 et 200 mg/l), suggérant des zones où la présence naturelle de sulfates ou leur apport externe est plus significatif.

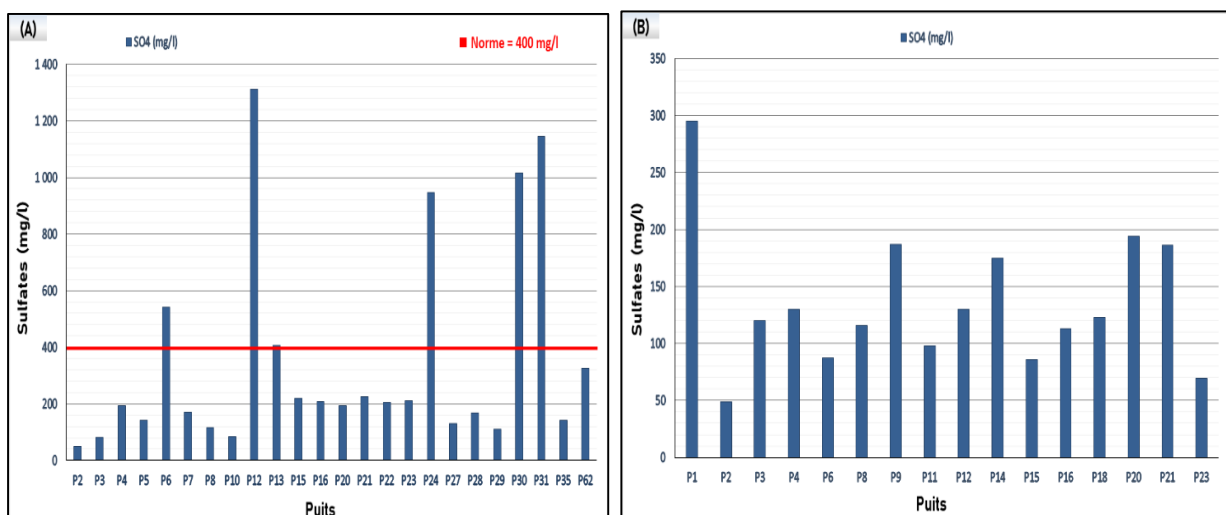
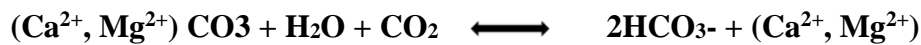


Figure 33 : Variations des sulfates (mg/l), (A, Décembre 2011, et B, Novembre 2016).

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

Les bicarbonates sont le résultat de la dissolution des roches carbonatées et gypsifères, un processus clé dans notre chaîne de production. Cette dissolution peut être calculée selon l'équation suivante :

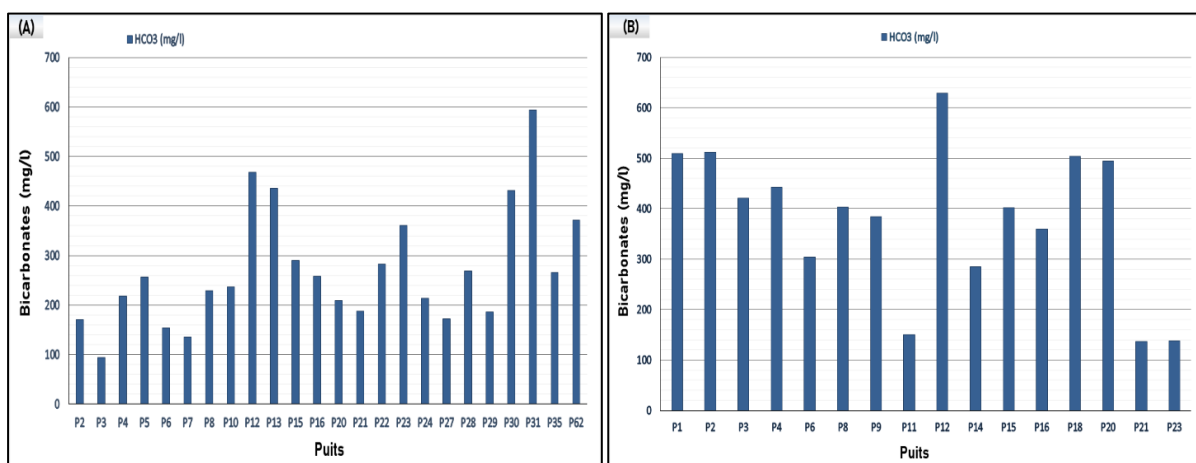


#### ➤ Mois de Décembre 2011

La (figure 34-A), présente les variations des concentrations en bicarbonates ( $\text{HCO}_3^-$ ) dans les eaux souterraines dans le mois de décembre 2011. Les teneurs mesurées montrent une variabilité importante d'un site à l'autre, traduisant des conditions géochimiques contrastées. Les puits P12, P13 et P31 enregistrent les concentrations les plus élevées, dépassant les 450 mg/l, avec un maximum observé au niveau du puits P31 (environ 600 mg/l). À l'inverse, des puits comme P3, P6 ou P7 présentent des concentrations nettement plus faibles (inférieures à 150 mg/l).

#### ➤ Mois de Novembre 2016

L'observation de l'histogramme du mois de novembre 2016, (figure 34-B) montre une diversité notable dans les valeurs relevées, allant d'environ 100 mg/l (P11 et P23) à plus de 550 mg/l (P12). Les puits P1, P2, P12, P18 et P20 présentent les teneurs les plus élevées, témoignant d'une forte minéralisation, probablement liée à une interaction prolongée entre l'eau et les roches carbonatées présentes dans le sous-sol. À l'inverse, des puits comme P11, P21 et P23 affichent des valeurs nettement inférieures, traduisant soit une moindre dissolution des minéraux carbonatés, soit une recharge récente par des eaux faiblement minéralisées.



**Figure 34 : Variations des bicarbonates (mg/l), (A, Décembre 2011, et B, Novembre 2016).**

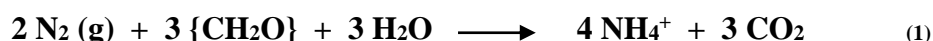
**d.Nitrates (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)**

L'ion nitrate, correspond à la forme oxydée de l'azote. Les sources naturelles de nitrate sont essentiellement la pluie et les interactions avec le sol et la végétation, (Jacques.B, 2008).

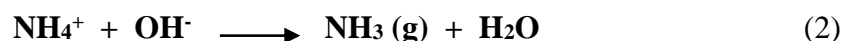
La concentration naturelle de nitrates est de 20 mg/l. Il a été constaté que ces éléments sont fréquents dans les eaux. Cependant, dans le cas d'une pollution aiguë, il a été observé un accroissement des teneurs pouvant dépasser les normes requises. La détection des nitrates, dont la présence dans l'eau est un indicateur de pollution, est fonction du milieu réducteur oxydé. Ce composé chimique figure parmi les polluants les plus fréquents des eaux, les sources sont localisées dans des zones souterraines à faibles profondeurs. L'origine artificielle des nitrates est liée à la contamination par des engrais et aux rejets domestiques.

Dans l'écosystème naturel, la transformation de l'azote, que ce soit dans l'atmosphère ou dans le sol, s'opère selon trois processus fondamentaux qui participent au recyclage de cet élément chimique, qui sont : **la fixation de l'azote diatomique N<sub>2</sub>, la nitrification, et la dénitrification.**

- **La fixation de l'azote :** Ce processus est essentiel pour la nutrition des plantes et des animaux, car il permet la conversion de l'azote présent dans l'atmosphère en forme utilisable par ces organismes. Cette transformation est effectuée par des bactéries spécifiques qui se développent dans les sols ou les milieux aquatiques et qui possèdent l'aptitude à métaboliser l'azote diatomique N<sub>2</sub>. Plus spécifiquement, les cyanobactéries et les bactéries vivant en symbiose avec les plantes, notamment les légumineuses, sont des exemples pertinents à considérer. La réaction chimique type est :



Dans les sols où le pH est élevé, il y a une transformation de l'ammonium en ammoniac gazeux :



La réaction en question requiert un apport d'énergie de la photosynthèse, émanant de cyanobactéries et de symbiotes de légumineuses. Cette réaction chimique aboutit à la formation de composés ammoniaqués, à savoir l'ammonium (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) et l'ammoniac (NH<sub>3</sub>), qui sont les formes conjuguées de l'ammonium et de l'acide. Cette réaction de réduction, illustrée par l'équation (1), est catalysée par des substances organiques notées {CH<sub>2</sub>O}.



Au fait, l'activité humaine a un impact significatif sur l'augmentation de la dénitrification, notamment par l'utilisation d'engrais qui introduisent des composés ammoniacaux ( $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NH}_3$ ) et des nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ) dans les sols.

#### ➤ Mois de Décembre 2011

Les variations des concentrations en nitrates des eaux souterraines pour le mois de décembre 2011 sont présentées en histogrammes (figure 36-A). La norme de potabilité de cet élément chimique est de 50 mg/l. Il ressort de cette figure que la majorité des puits présentent des concentrations supérieures ou égales à la norme, ce qui indique une qualité d'eau médiocre du point de vue de la teneur en nitrates. Mais certains puits, comme le puits P12 et surtout le puits P31, ont des concentrations beaucoup plus élevées que la norme, avec environ 400 mg/l et plus de 800 mg/l. Ces dépassements significatifs suggèrent une contamination probable par des sources anthropiques, telles que les engrais agricoles ou les rejets domestiques non contrôlés.

#### ➤ Mois de Novembre 2016

En revanche, l'observation de l'histogramme (figure 36-B) du mois de novembre 2016 montre des valeurs globalement faibles, toutes inférieures à 12 mg/l, ce qui reste largement en dessous de la norme. La majorité des puits montrent des concentrations en nitrates inférieures à 6 mg/l, ce qui témoigne d'une qualité d'eau relativement bonne. Toutefois, certains puits comme P1, P3, P14 et surtout P18 présentent des valeurs plus élevées, atteignant environ 6 mg/l pour P1 et dépassant 10 mg/l pour P18. Bien que ces niveaux restent acceptables, leur élévation pourrait indiquer une légère influence anthropique ou des apports diffus d'origine agricole.

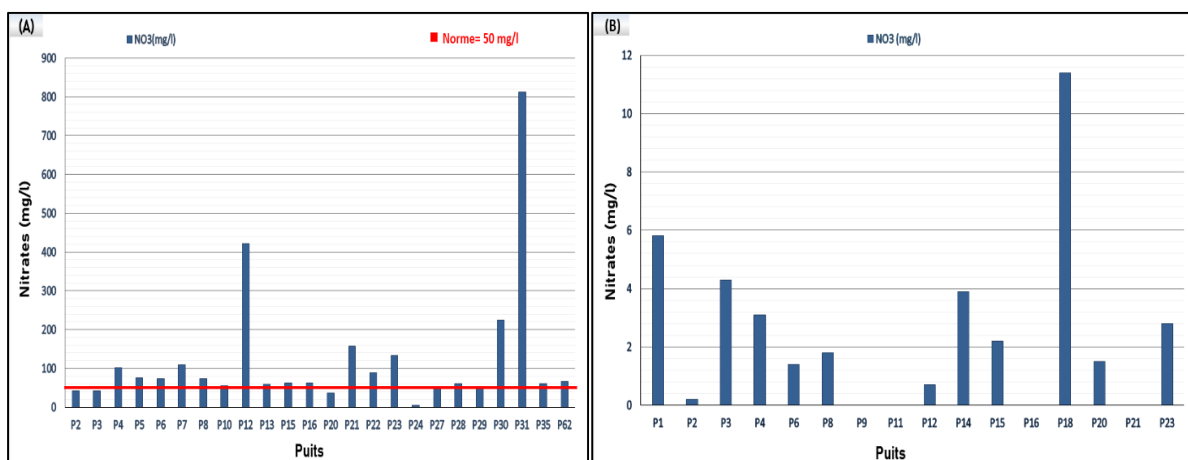


Figure 36 : Variations des nitrates (mg/l), (A, Décembre 2011, et, B, Novembre 2016).

#### 4. Les faciès chimiques

Afin d'assurer une représentation optimale des résultats d'analyses hydro chimiques, des diagrammes spécifiques ont été développés. Ces derniers permettent de fournir des informations plus claires et pertinentes pour une meilleure compréhension des données. L'utilisation de ces diagrammes s'avère particulièrement utile, car elle facilite l'interprétation des analyses complexes et rend les résultats plus accessibles.

Ces diagrammes sont souvent employés pour des objectifs spécifiques, tels que la reconnaissance du faciès d'une eau souterraine ou la détection des processus de salinisation (Site web ; techno-science).

Dans cette partie nous avons organisé notre travail par la réalisation de Diagramme de PIPER, afin de bien déterminer les faciès chimiques des eaux souterraines de notre zone étudiée, au cours de deux mois Décembre 2011 et Novembre 2016. Ensuite, nous avons réalisé un autre diagramme que l'on appelle STABLER (**en annexe 06 et 07**), afin de bien confirmer et préciser les résultats que nous avons obtenus à partir de diagramme de PIPER.

##### 4.1. Diagramme de PIPER

Le diagramme de Piper est une présentation cartographique la plus utilisée dans le domaine de la géochimie des eaux souterraines, s'appuie sur les éléments majeurs pour représenter les différents faciès des eaux souterraines. Ce dispositif permet en outre d'observer l'évolution d'une eau, qui passe d'un faciès à un autre, au moyen d'analyses réalisées à des intervalles de temps réguliers ou d'échantillons prélevés en des points distincts. Ce diagramme est un outil d'analyse performant qui permet de représenter efficacement divers types de groupes d'analyses. L'observation de remplissage des deux triangles (un triangle portant les cations et un autre les anions) sont d'abord remplis puis le losange (Site web ; techno-science). Les valeurs utilisées sont exprimées en pourcentage (%). L'examen des représentations graphiques (figure 37 et 38), des deux diagrammes obtenus permet de déduire les interprétations suivantes :

##### ➤ Mois de décembre 2011

L'analyse du diagramme de PIPER (figure 37-A), révèle la présence de trois faciès chimiques où on peut distinguer :

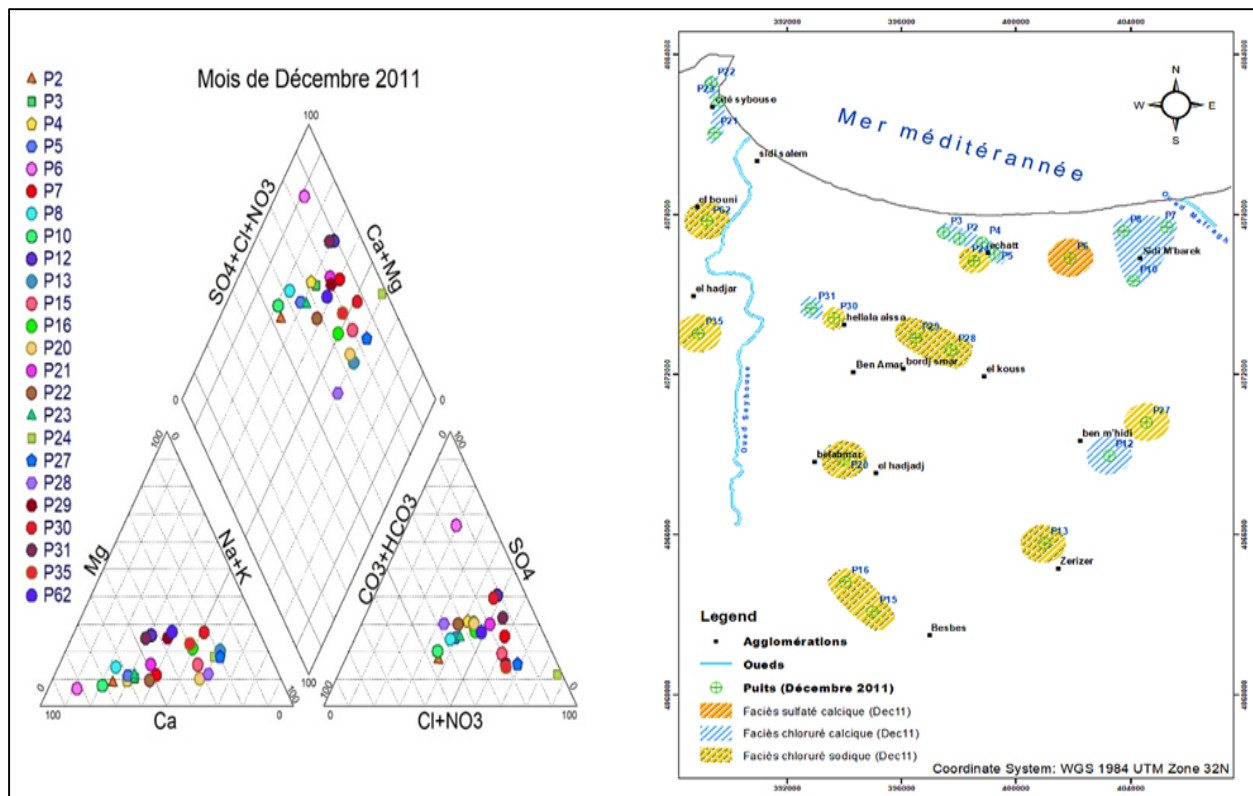
- ↳ Le premier faciès caractérise **les eaux chlorurées calciques**, qui représentent 50% de l'ensemble des puits. Ce faciès est le plus dominant, composé d'un groupe de douze (12) échantillons distribués dans la zone d'étude comme suit (figure 37-B) :

- P2, P3, P4 et P5 dans la zone d'Echatt au bord de la mer ;
- P7, P8 et P10 au niveau de Sidi m'barek localisés entre la mer et l'exutoire de l'oued Mafragh ;
- P12 au niveau de la zone agricole de Ben m'hidi ;
- P21, P22 et P23 près de l'embouchure de la Seybouse vers la mer à la cité Seybouse ;
- P31 entre la zone agricole Hellala aissa et oued Seybouse.

↪ Le deuxième faciès caractérise **les eaux chlorurées sodiques**, qui représentent 46% de l'ensemble des puits. Ce faciès est composé d'un groupe de onze (11) échantillons distribués dans la zone d'étude comme suit :

- P13 dans la zone agricole de Zerizer ;
- P15 et P16 à l'ouest de Besbes (zone agricole) ;
- P20 à Belahmar (zone agricole) ;
- P24 au bord de la mer à Echatt (zone agricole et industrielle) ;
- P27 au niveau de la zone agricole de Ben m'hidi ;
- P28 et P29 à Bordj smar (zone agricole) ;
- P30 à Hellala aissa
- P35 au niveau de la zone industrielle d'Elhadjar et près de la Seybouse ;
- P62 à Elbouni près d'oued Seybouse.

↪ Le troisième faciès caractérise **les eaux sulfatées calciques**, ce faciès se trouve dans l'échantillon P6 représentant 4% de l'ensemble des puits. Ce puits se localise entre Echatt et Sidi M'barek au rive de la mer



**Figure 37 : (A) Diagramme de Piper ; (B) carte de distribution des faciès chimiques (mois de Décembre 2011).**

### Mois de Novembre 2016

L'analyse du diagramme de PIPER (figure 38-A) permet de distinguer trois catégories distinctes d'eau :

↳ Le premier faciès caractérise **les eaux bicarbonatées sodiques**, qui représentent 50% de l'ensemble des puits (figure 38-B). Ce faciès est le plus dominant et composée d'un groupe de huit (08) échantillons distribués dans la zone d'étude comme suit :

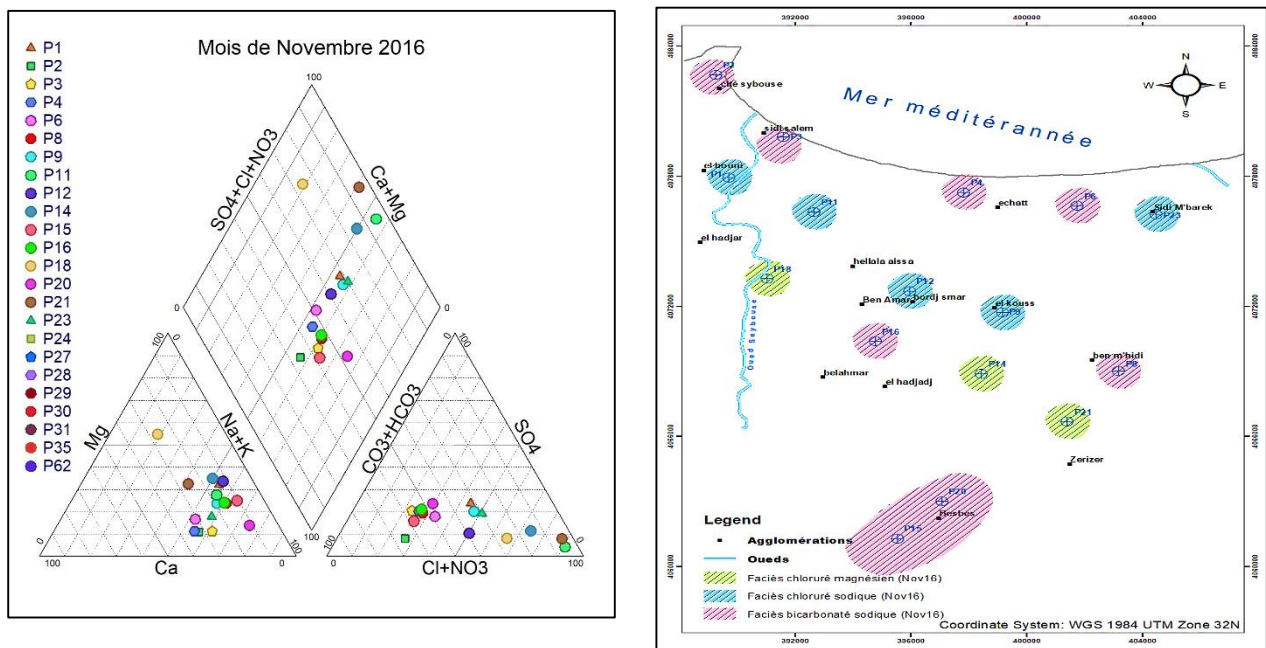
- P2 et P3 au bord de la mer à cité Seybouse et Sidi salem respectivement et près de l'exutoire de la Seybouse ;
- P4 dans la zone d'Echatt au bord de la mer ;
- P6 entre Echatt et Sidi m'barek au bord de la mer ;
- P8 au niveau de la zone agricole (Ben m'hidi) ;
- P15 et P20 au niveau zone agricole (Besbes) ;
- P16 entre Belahmar et Ben amar (zone agricole).

↪ Le deuxième faciès caractérise **les eaux chlorurées sodiques**, qui représentent 31% de l'ensemble des puits. Ce faciès est composé de cinq (05) échantillons distribués dans la zone d'étude comme suit :

- P1 près d'oued Seybouse à Elbouni ;
- P9 au niveau de la zone agricole d'Elkous ;
- P11 près de la Seybouse, au sud de l'aéroport d'Annaba ;
- P12 dans la zone agricole de Bordj smar ;
- P23 près de la Mafragh au niveau de Sidi m'barek.

↪ Le troisième faciès caractérise **les eaux chlorurées magnésiennes**, qui représentent 19% de l'ensemble des puits avec trois (03) échantillons distribués dans la zone d'étude comme suit :

- P14 dans la zone agricole entre El hadjaj et Benm'hidi ;
- P18 au sud-est d'Elhadjar, très proche de la Seybouse ;
- P21 au niveau d'une zone agricole entre Zerizer et Ben m'hidi.



**Figure 38 : (A) Diagramme de Piper ; (B) carte de distribution des faciès chimiques (mois de Novembre 2016).**

#### 4.2. Comparaison entre les deux périodes (Décembre 2011, Novembre 2016)

La comparaison entre les résultats des deux diagrammes, a mis en évidence que la qualité de l'eau a considérablement évolué entre les deux périodes. Pour la période de Décembre 2011, nous avons observé la dominance des deux faciès chlorurés calcique et sodique dans l'ensemble

de la plaine, indiquant une possibilité d'un envahissement des eaux de mer vers la nappe au niveau des zones proches de la mer, ou d'un apport d'eau provenant de la surface après un lessivage des formations salifères. Ces eaux peuvent provoquer un échange cationique entre le sodium et le calcium existant dans la roche aquifère. Ainsi, nous avons un faciès sulfaté calcique mais d'une manière très limitée (4%). Où on peut supposer que l'origine des sulfates est d'une contamination directe par un polluant dans le puits lui-même, ou par une infiltration d'une quantité significative des eaux d'irrigation riches en éléments fertilisants.

Pour le mois de Novembre 2016, nous avons remarqué l'existence de deux faciès qui dominent les eaux souterraines de plaine étudiée, lesquels, le faciès bicarbonaté sodique et chloruré sodique ; ces types d'eau représentent plus de 80% des puits échantillonnés. En comparant avec le mois de décembre 2011, nous allons constater une disparition du faciès chloruré calcique et l'apparition du faciès bicarbonaté calcique, indiquant que la nappe a reçu un apport d'eau riche en éléments carbonates et l'apparition aussi d'un faciès chloruré magnésien au niveau de trois puits éparpillés au centre de la plaine représentent 19% de l'ensemble des puits échantillonnés, et la persistance du faciès chloruré sodique mais avec un pourcentage diminué.

## **6. Les rapports caractéristiques**

De nombreux auteurs (Hsissou Y & all (1997), Aoun Badra S (2010) Djabri & all (2012), et plus récemment Bouderbala & all, ont utilisées les rapports caractéristiques pour mettre en évidence les sources probables des éléments chimiques dominantes. Nous avons appliqué cette méthode aux résultats obtenus sur les eaux analysées durant les deux périodes, Décembre 2011 et Novembre 2016.

### **6.1. Mois de Décembre 2011**

#### **6.1.1. Le rapport ( $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$ )**

L'examen de graphique de la relation  $\text{Na}^+$  vs  $\text{Cl}^-$  (figure 39), révèle plusieurs comportements hydro chimiques distincts :

- La majorité des puits sont localisés à proximité immédiate de la droite 1:1, ces analyses ont révélé une origine commune et naturelle des ions  $\text{Na}^+$  et  $\text{Cl}^-$  qui s'explique probablement par la dissolution de halite, l'infiltration saline ou la minéralisation homogène.
- Nous avons constaté que le puits (P28) présente une concentration en sodium significativement supérieure à celle du chlorure, ce qui constitue un élément notable de

notre analyse, C'est le signe qu'il y a un excès de sodium, à cause de processus secondaires comme l'altération silicatée, l'échange cationique ou un apport anthropique isolé.

- En revanche, le puits (P 24) présente une teneur en  $\text{Cl}^-$  significativement plus élevée que celle en  $\text{Na}^+$ , ce qui suggère, cela indique un déséquilibre inverse, probablement dû à une contamination chlorée ou à une source non sodique de chlorure ou bien d'un problème marin.

En résumé, ce graphique illustre un équilibre global du comportement des eaux par rapport au couple  $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$  avec deux anomalies notables (puits 28 et 24). Ces dernières nécessitent une surveillance ou une analyse complémentaire, notamment en ce qui concerne leur origine géologique locale ou l'activité humaine à proximité.

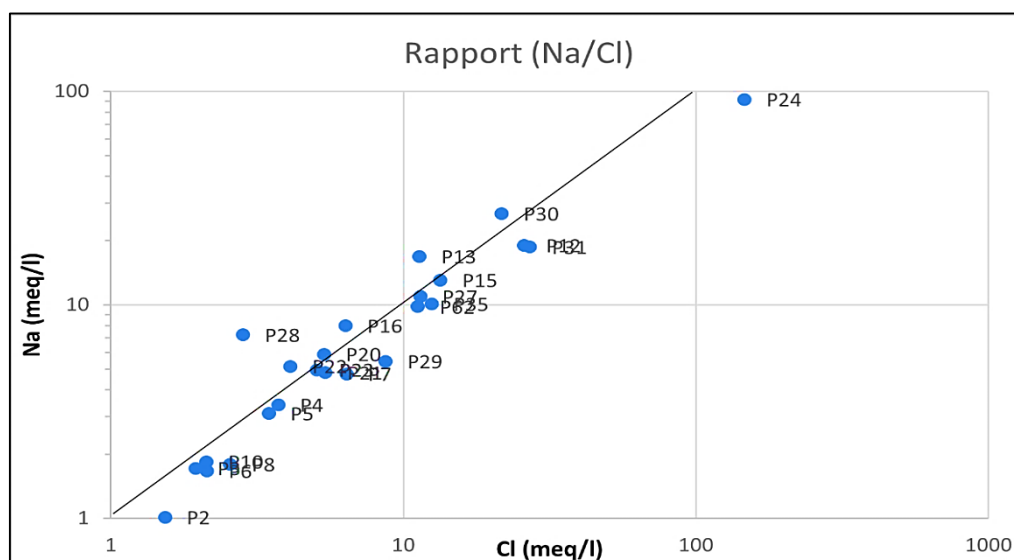


Figure 39 : La relation Na vs Cl, (mois de Décembre 2011).

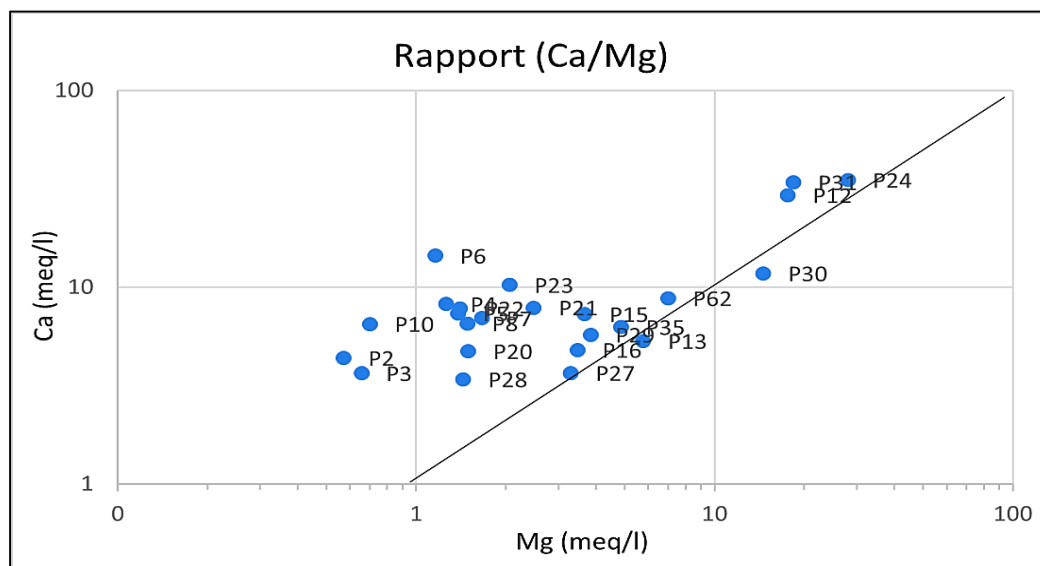
### 6.1.2. Le rapport ( $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ )

L'examen de graphique de la relation  $\text{Ca}^{2+}$  vs  $\text{Mg}^{2+}$  (figure 40), révèle une minéralisation marquée par une prédominance notable du calcium, se caractérisant par des propriétés distinctives :

- Nous constatons une présence de calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) est significative dans la quasi-totalité des cas, cette observation est corrélée à la dissolution préférentielle de la calcite.
- nous remarquons aussi un regroupement de plusieurs puits à proximité de la droite 1:1. Cette remarque suggère une tendance locale à l'équilibre, bien que sans parité réelle.

- Aucun puits de  $Mg^{2+}$  n'a été détecté, ce qui indique soit l'absence de sources importantes de magnésium, soit une faible réactivité des roches dolomitiques ou silicatées.

Ce comportement chimique est la preuve d'un contexte géologique calcaire, peu dolomitique, avec des eaux relativement jeunes ou peu évoluées, dans lesquelles le calcium est le cation alcalino-terreux dominant.



**Figure 40 : La relation Ca vs Mg de mois de Décembre 2011.**

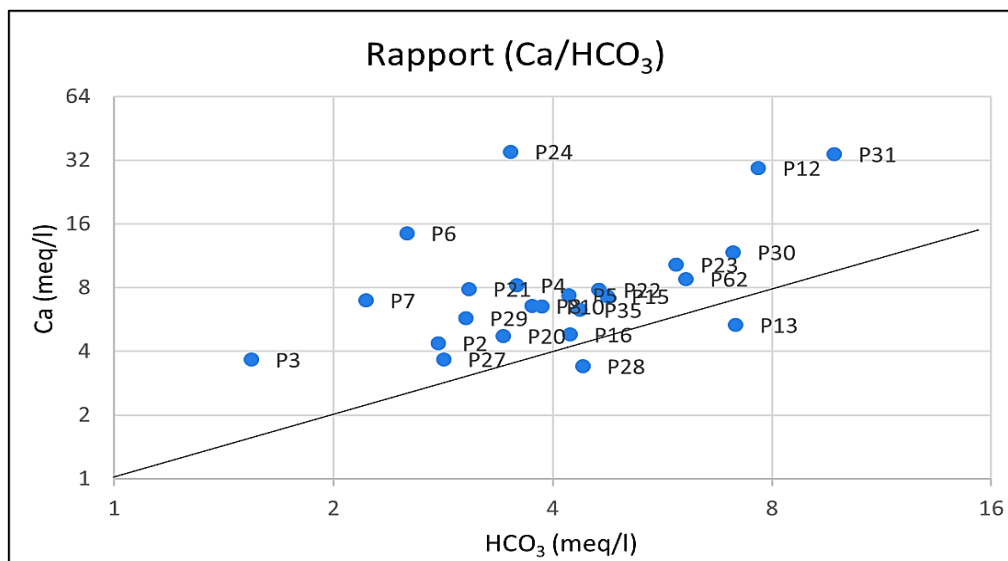
### 6.1.3. Le rapport ( $Ca^{2+}/HCO_3^-$ )

Après avoir analysé le graphique représentant la relation  $Ca^{2+}$  vs  $HCO_3^-$  (figure 41), nous constatons que la distribution est majoritairement orientée vers le calcium. C'est vraiment fascinant de voir que la plupart des points se trouvent à proximité de l'axe  $Ca^{2+}$ , ce qui suggère une présence prédominante de calcium par rapport aux bicarbonates dans ces eaux souterraines. Cette observation est indubitablement le signe d'une forte minéralisation en calcium, conséquence directe de la dissolution de roches carbonatées, telles que le calcaire ou la dolomie, un processus naturel et répandu dans les systèmes aquifères karstiques ou sédimentaires.

En outre, l'observation de la distribution des puits le long de la droite  $1=1$ , révèle une interaction entre les concentrations en  $Ca^{2+}$  et  $HCO_3^-$  qui semble indiquer une relation d'équilibre ou de compensation. Cette observation pourrait être interprétée comme une indication de dissolution de la calcite ( $CaCO_3$ ), un processus dans lequel la dissociation de chaque molécule de calcite entraîne la libération d'un ion calcium et d'un ion bicarbonate.

Les points P13 et P28 sont proches de l'axe  $\text{HCO}_3^-$ , ce qui montre que le bicarbonate est un peu plus présent. Ce comportement particulier pourrait être causé par différents processus géochimiques, tels que :

- ✓ Soit, une augmentation de  $\text{CO}_2$  d'origine organique ou biologique dans ces puits. Du coup, ça favorise la production de  $\text{HCO}_3^-$  sans augmentation équivalente de  $\text{Ca}^{2+}$ .
- ✓ Il peut s'agir aussi d'une source de bicarbonates non associée au calcium, comme la dissolution de minéraux silicatés, ou d'une influence humaine (activité agricole, infiltration d'eaux chargées en matière organique).



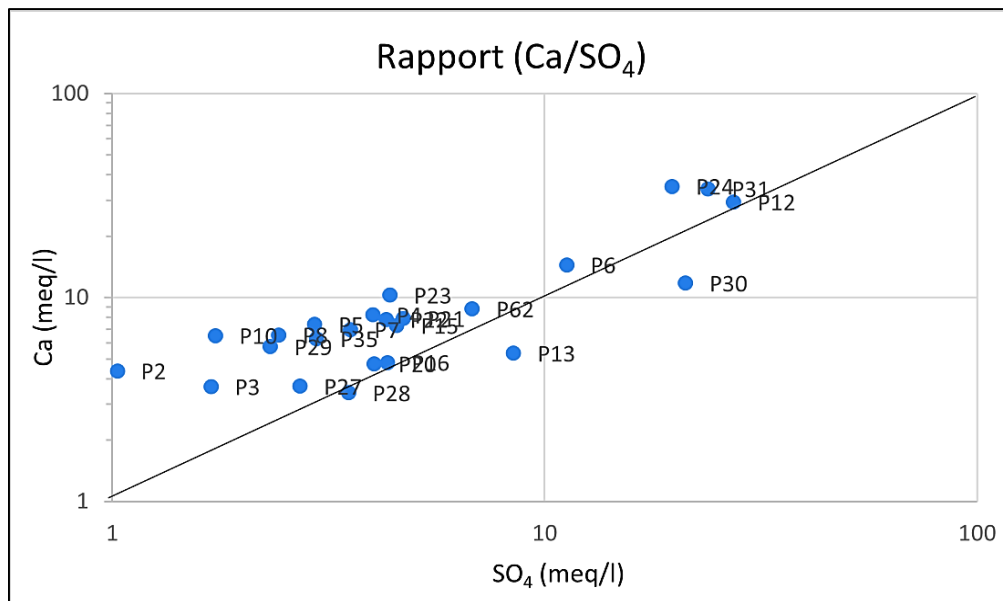
**Figure 41: La relation Ca vs HCO<sub>3</sub>, (mois de Décembre 2011).**

#### 6.1.4. Le rapport ( $\text{Ca}^{2+}/\text{SO}_4^{2-}$ )

L'analyse de graphique de relation  $\text{Ca}^{2+}$  vs  $\text{SO}_4^{2-}$  (figure 42), suggère une présence notable du calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) dans la plupart des puits, ce qui pourrait être attribuable à la dissolution de roches carbonatées. La présence d'échantillons alignés sur la droite  $1=1$ , représente un équilibre entre le  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{SO}_4^{2-}$ , et suggère également la dissolution de minéraux sulfatés tels que le gypse ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), dans certains puits.

Les puits (P13) et (P30) présentent des caractéristiques distinctes, avec une teneur élevée en sulfates ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), indiquant une source supplémentaire ou spécifique de  $\text{SO}_4^{2-}$ . Cette source peut avoir une origine géologique, anthropique ou agricole.

Cette distribution spatiale reflète la variabilité des conditions hydrogéologiques et des apports extérieurs dans la région étudiée.



**Figure 42 : La relation Ca vs SO<sub>4</sub>, (mois de Décembre 2011).**

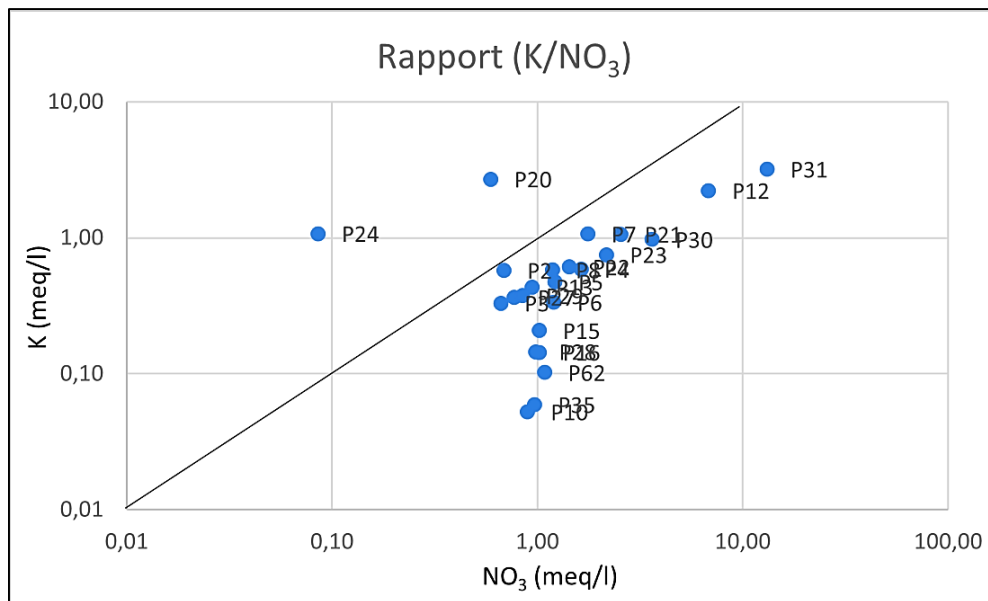
#### 6.1.5. Le rapport (K<sup>+</sup>/NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)

L'analyse de graphique de relation K<sup>+</sup> vs NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (figure 43), montre que la majorité des puits sont situés à proximité de l'ion NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, indiquant une présence significative de nitrates dans les eaux souterraines.

Nous constatons que seuls deux puits (P20 et P24) présentent une concentration plus marquée en potassium (K<sup>+</sup>). Cette présence occasionnelle de potassium dans certains puits valide l'hypothèse d'un phénomène NPK, c'est-à-dire un apport combiné d'azote, de phosphore et de potassium par les fertilisants chimiques. Il y'a aussi des autres probabilités qui montre la présence de potassium (K<sup>+</sup>) :

- ✓ Le potassium se retrouve naturellement dans le sol sous forme de minéraux comme le feldspath et le mica.
- ✓ La nappe s'est rechargée récemment, avant que le potassium ne soit absorbé par le sol (le potassium se déplace peu dans les sols argileux).

En outre, le regroupement spatial des puits est peu marqué, avec une distribution plutôt dispersée. Cette dispersion peut être attribuée à une variabilité locale des conditions de pollution ou des pratiques agricoles.



**Figure 43 : La relation K vs NO<sub>3</sub>, (mois de Décembre 2011).**

## 6.2. Mois de Novembre 2016

### 6.2.1. Le rapport (Na<sup>+</sup>/Cl<sup>-</sup>)

L'interprétation du graphique logarithmique Na<sup>+</sup> vs Cl<sup>-</sup> (figure 44), permet de distinguer clairement les tendances hydro chimiques des eaux des 16 puits analysés :

- Le croisement au point 10,10 correspond au point d'équilibre stœchiométrique. Ce point d'équilibre symbolise une situation idéale de référence.
- La plupart des points de mesure situés à proximité de la ligne de référence entre les ions sodium (Na<sup>+</sup>) et les ions chlorure (Cl<sup>-</sup>) indiquent une origine géochimique naturelle de la salinité. Cette dernière est due à la dissolution d'halite (Na-Cl) ou d'évaporites.
- Nous constatons que le puits (P20) constitue un cas particulier d'enrichissement sodique. Son positionnement atypique sur le graphique indique la présence d'une source de sodium qui ne semble pas être liée au chlorure, donc cette source pourrait être d'origine naturelle, géochimique ou anthropique. par contre le puit (P18) très riche en chlorure de sodium (Cl<sup>-</sup>) qui se détache du nuage général doit être étudié en détail. Cela peut indiquer une pollution locale, une intrusion marine ou une activité humaine.

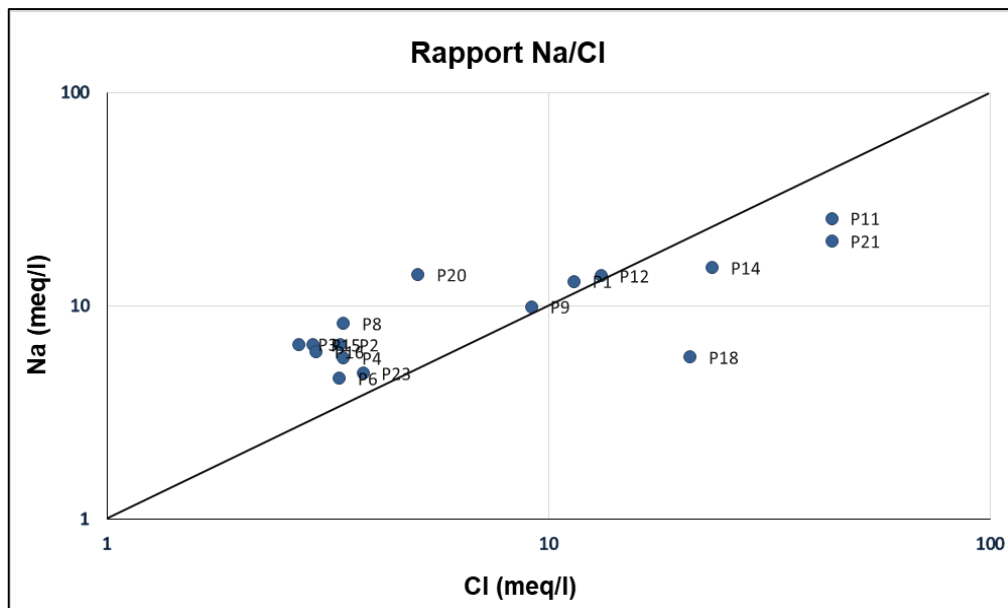


Figure 44 : Relation Na vs Cl, (mois de Novembre 2016).

### 6.2.2. Le rapport ( $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ )

L'analyse graphique de la relation  $\text{Ca}^{2+}$  vs  $\text{Mg}^{2+}$  (figure 45), qui croise les axes au point 10,10, révèle une diversité hydro chimique significative entre les 16 puits analysés :

- Le point de croisement 10,10 est une référence chimique qui représente une situation typique de dissolution de dolomite, où la présence de calcium et de magnésium est équilibrée, avec une proportion de  $\text{Ca}^{2+}$  et de  $\text{Mg}^{2+}$  qui se rencontrent à un taux constant.
- Il ressort de l'analyse que la majorité des points du côté  $\text{Mg}^{2+}$  traduisent une signature dolomitique ou magnésienne prédominante dans les aquifères.
- Nous remarquons aussi qu'il y'a des puits dominés par le calcium reflètent une influence calcaire ou gypsifère locale.
- Nous constatons aussi quelques échantillons de puits proches de la diagonale  $\text{Ca}^{2+} = \text{Mg}^{2+}$ . Ces puits présentent un rapport  $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$  proche de 1, traduisant une dissolution simultanée et équilibrée de calcium et de magnésium.

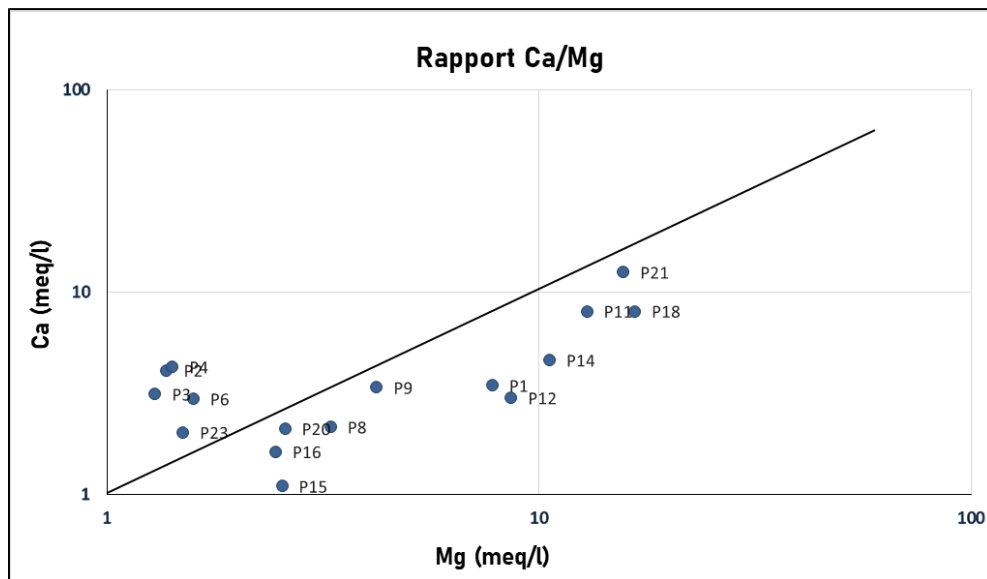


Figure 45 : Relation Ca vs Mg, (mois de Novembre 2016).

### 6.2.3. Le rapport ( $\text{Ca}^{2+}/\text{HCO}_3^-$ )

L'analyse graphique de la relation  $\text{Ca}^{2+}$  vs  $\text{HCO}_3^-$  (figure 46), montre une dynamique géochimique où le bicarbonate joue un rôle prépondérant. Cette observation suggère l'importance du dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) présent dans le sol et des processus biogéochimiques dans le processus de minéralisation des eaux.

- Le croisement au point (10,10) permet de fixer une relation stœchiométrique entre les deux ions.
- Nous remarquons que la majorité des puits présentent une teneur en  $\text{HCO}_3^-$ , indiquant des processus d'altération naturelle, une activité biologique ou des échanges complexes.
- Seuls deux puits riches en calcium (P11, P21) présentaient des caractéristiques suggestives de précipitations ou d'apports spécifiques, tels que le gypse.
- L'observation de trois puits alignés sur la diagonale permet de conclure à une dissolution stable de la calcite, sans perturbation majeure.

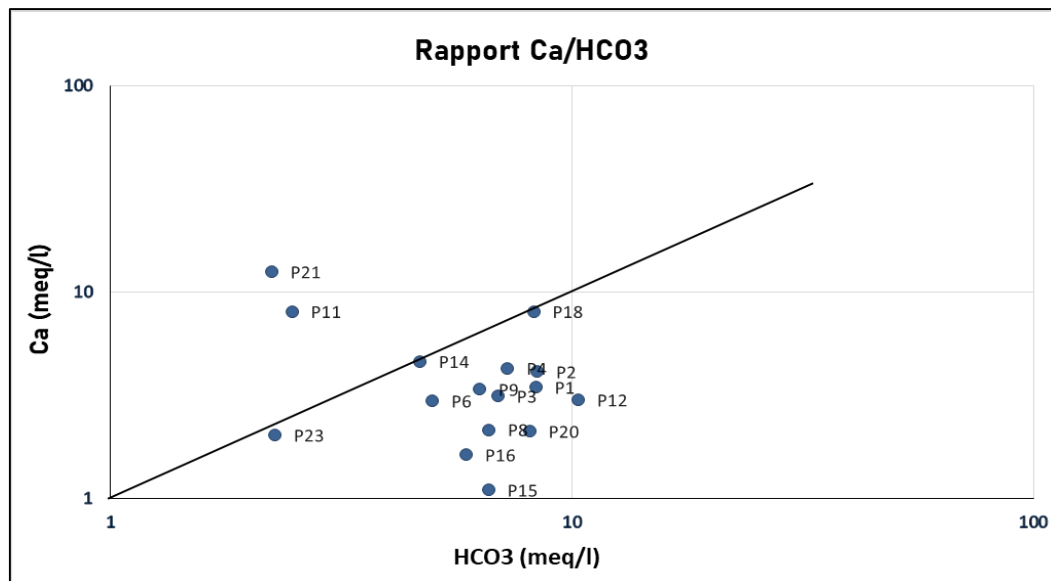


Figure 46 : Relation Ca vs HCO<sub>3</sub>, (mois de Novembre 2016).

#### 6.2.4. Le rapport (Mg<sup>2+</sup>/SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)

L'analyse des données, représentées par le graphique logarithmique Mg<sup>2+</sup> vs SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (figure 47), met en évidence une prépondérance significative du magnésium dans la plupart des puits étudiés. Cette approche met en exergue la diversité des sources de minéralisation, qui varient en fonction des contextes spécifiques.

- La majorité des puits présente un enrichissement en Mg<sup>2+</sup>, indiquant une origine dolomitique ou silicatée, sans corrélation significative avec le soufre.
- Nous constatons quelques puits qui présentent des concentrations élevées de sulfates (P3, P4, p20). Ces concentrations peuvent indiquer soit une dissolution de gypse, soit une influence anthropique, ce qui nécessite une investigation complémentaire pour déterminer les causes exactes.
- L'observation de puits alignés sur la droite 1,1 suggère l'existence d'une origine commune ou équilibrée. Cette hypothèse peut être attribuée à la présence d'évaporites contenant du magnésium Mg<sup>2+</sup> et du soufre SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, ou à l'équilibre chimique d'une eau.
- L'absence de croisement d'axes semble indiquer un déséquilibre structural entre les deux ions, ce qui tend à renforcer l'importance du magnésium dans la composition ionique de ces eaux.

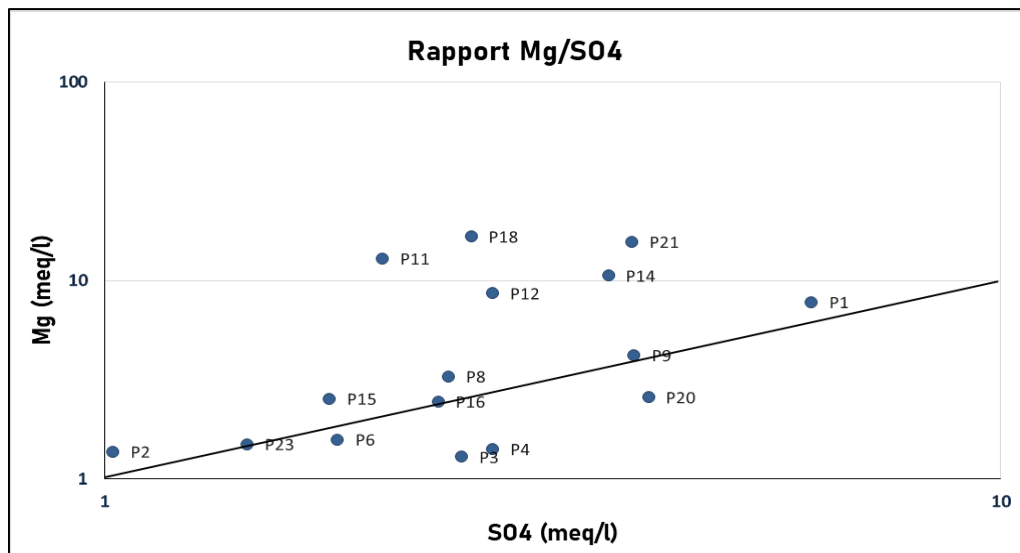


Figure 47 : Relation Mg vs SO4, (mois de Novembre 2016).

## 7. Adéquation des eaux à un usage agricole

L'évaluation de la qualité de l'eau destinée à l'irrigation compte sur des indices spécifiques de qualité ou bien des diagrammes, en utilisant certains paramètres physico-chimiques. Dans cette section, nous allons évaluer la qualité des eaux provenant des puits domestiques, tout en nous basant sur les données des mois de Décembre 2011 et Novembre 2016, afin de déterminer si ces eaux sont adaptées à un usage agricole. Alors, nous appuyons dans notre étude sur deux méthodes qui sont : l'indice de Kelley (KR) et le diagramme de Wilcox.

### 7.1. L'indice du rapport de Kelly ou Kelly's Ratio (KR)

Le rapport de Kelly, une méthode couramment employée dans l'évaluation de la qualité de l'eau destinée à l'irrigation, est un calcul qui prend en compte la concentration en sodium par rapport aux concentrations de calcium et de magnésium. Un indice de Kelly élevé peut être le signe d'une concentration excessive de sodium, ce qui peut conduire à des problèmes tels que la dégradation de la structure du sol. (Site web search answer).

La formule de base du rapport de Kelley est la suivante :

$$KR = \frac{(Na +)}{(Ca 2 +) + (Mg2+)}$$

Si:

✓ **KR < 1**: l'eau est bonne pour l'irrigation.

- ✓ **KR>1** : l'eau est mauvaise pour l'irrigation.
- ✓ Les concentrations de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}_2^+$ ,  $\text{Mg}_2^+$  sont en meq/L.

**Tableau 21: Classification des eaux de 24 puits, selon l'indice de KR, (mois de Décembre 2011).**

Puits	KR	Classe	Puits	KR	Classe
P2	0.20	Eau bonne	P20	0.94	Eau bonne
P3	0.40	Eau bonne	P21	0.46	Eau bonne
P4	0.36	Eau bonne	P22	0.56	Eau bonne
P5	0.35	Eau bonne	P23	0.40	Eau bonne
P6	0.11	Eau bonne	P24	1.45	Eau mauvaise
P7	0.55	Eau bonne	P27	1.57	Eau mauvaise
P8	0.22	Eau bonne	P28	1.49	Eau mauvaise
P10	0.26	Eau bonne	P29	0.57	Eau bonne
P12	0.40	Eau bonne	P30	1.02	Eau mauvaise
P13	1.52	Eau mauvaise	P31	0.35	Eau bonne
P15	1.19	Eau mauvaise	P35	0.91	Eau bonne
P16	0.96	Eau bonne	P62	0.62	Eau bonne

**Tableau 22: Classification des eaux de 16 puits, selon l'indice de KR, (mois de Novembre 2016).**

Puits	KR	Classe	Puits	KR	Classe
P1	1.16	Eau mauvaise	P12	1.19	Eau mauvaise
P2	1.20	Eau mauvaise	P14	0.99	Eau bonne

P3	1.49	Eau mauvaise	P15	1.80	Eau mauvaise
P4	1.00	Eau bonne	P16	1.49	Eau mauvaise
P6	1.00	Eau bonne	P18	0.23	Eau bonne
P8	1.52	Eau mauvaise	P20	2.98	Eau mauvaise
P9	1.31	Eau mauvaise	P21	0.71	Eau bonne
P11	1.23	Eau mauvaise	P23	1.37	Eau mauvaise

Les résultats des calculs de l'indice de Kelley (KR) présentés dans les tableaux (21 et 22) précédents révèlent que les six puits (P13, P15, P24, P27, P28 et P30) au mois de Décembre 2011, ne sont pas adaptés à l'irrigation, avec un indice KR supérieur à 1. Cela représente 25 % de l'ensemble des puits. En revanche, les 18 autres puits (soit 75 %) présentent un indice KR inférieur à 1, ce qui les classe comme aptes à l'irrigation.

Contrairement au mois de décembre, les résultats du mois de novembre montrent que seulement 4 puits sur 16 (soit 25 %) sont adaptés à l'irrigation, tandis que les 12 restants (75 %) présentent un indice KR supérieur à 1, indiquant une qualité d'eau inadéquate pour un usage agricole.

## 7.2. Classification de Wilcox

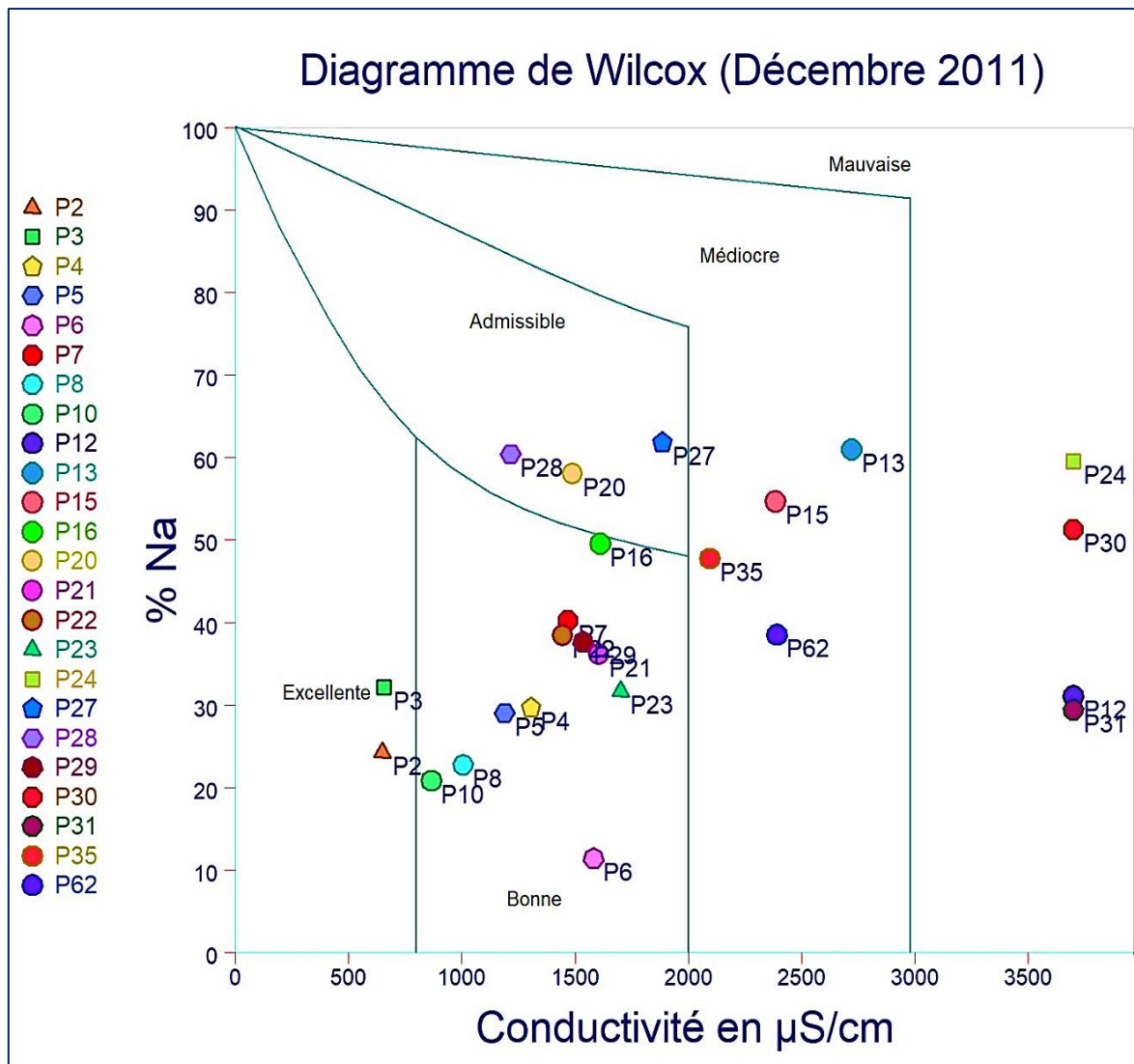
En 1954, Wilcox a élaboré un diagramme qui prend en compte le pourcentage de sodium et la conductivité électrique. Cette représentation schématique permet de diviser les eaux en cinq (05) classes distinctes : excellente, bonne, admissible, médiocre, (Medjahedi, N., et Keddah, K. 2018), c'est une méthode d'évaluation de la qualité de l'eau utilisée pour l'irrigation.

Pour faire cette étude nous réalisons les diagrammes de Wilcox pour les deux compagnes, (Décembre 2011, et novembre 2016).

### ➤ Mois de Décembre 2011

D'après le diagramme de Wilcox (figure 48), L'analyse graphique des eaux de 24 puits échantillonnés révèle une hétérogénéité marquée dans la qualité des eaux :

- ↪ Les puits P2 et P3 (Excellente à bonne) : sont des eaux de très bonne qualité, avec une faible salinité et un taux de sodium réduit. Elles sont parfaitement adaptées à l'irrigation, quel que soit le type de culture ou de sol.
- ↪ Les puits P4, P5, P6, P7, P8, P10, P21, P22, P23, et P29 (bonnes) : forment la majorité du groupe analysé. Leur eau est légèrement à modérément saline, mais reste adéquate pour l'irrigation.
- ↪ Les puits P20, P27 et P28 (admissible) : sont modérément salines, mais restent acceptables pour l'irrigation, notamment en sols bien drainés.
- ↪ Les puits P13, P15, P35 et P62 (Médiocre à mauvaise), sont des eaux présentent un risque élevé pour l'agriculture, en raison de leur teneur importante en sodium, ou salinité élevée. Leur usage peut entraîner une dégradation structurale des sols, une réduction de la perméabilité et une accumulation de sels en surface. Leur utilisation doit être très limitée et réservée aux cultures tolérantes au sel.
- ↪ Les puits P12, P24, P30 et P31 dépassent les limites du diagramme en matière de salinité ( $CE > 3500 \mu\text{S}/\text{cm}$ ). Ces eaux sont extrêmement salines et impropres à l'irrigation conventionnelle. Leur emploi pourrait gravement affecter la productivité des sols et accélérer la salinisation irrémédiable des terres agricoles.



**Figure 48 : Diagramme de Wilcox (mois de Décembre 2011).**

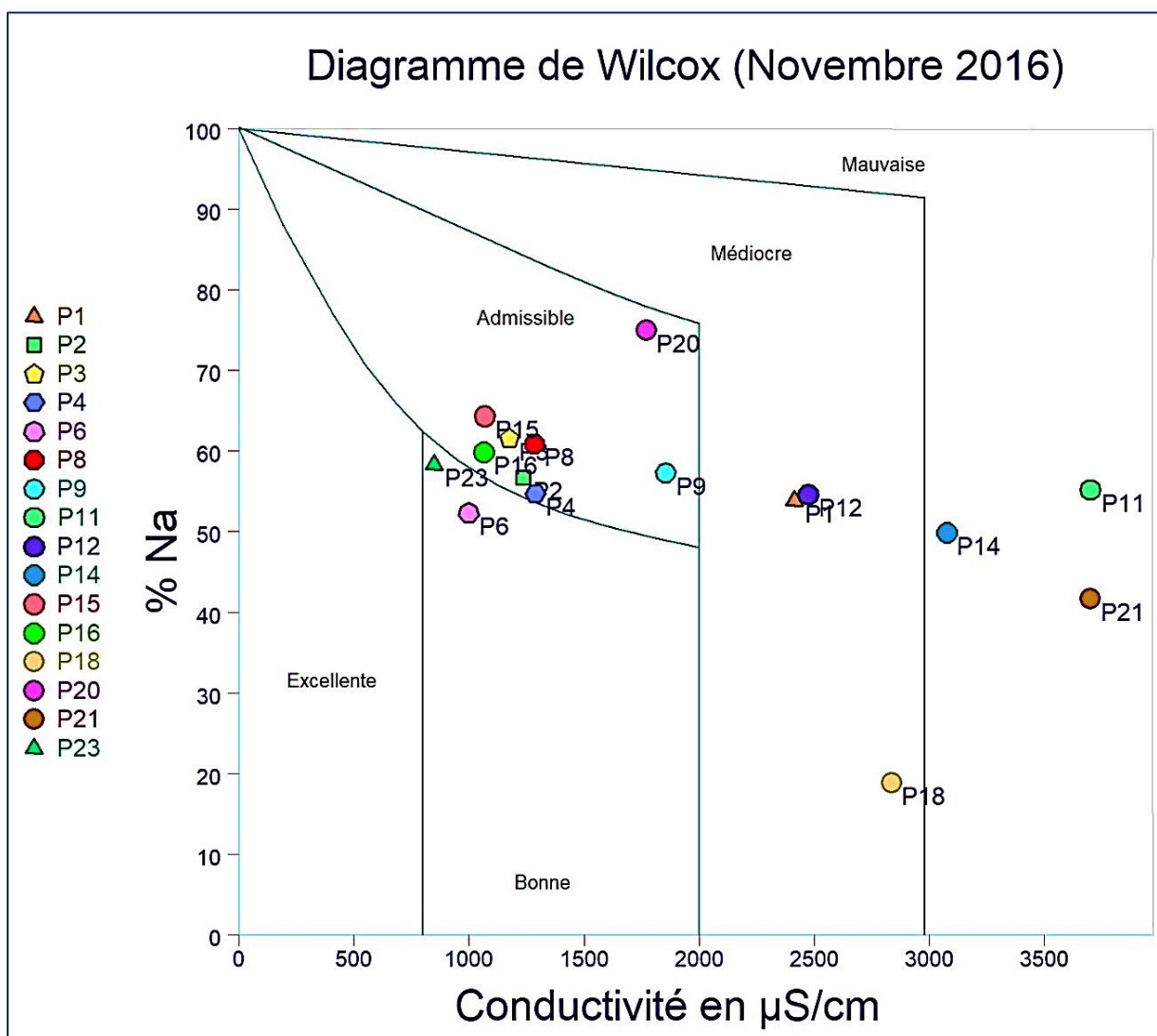
#### ➤ Mois de Novembre 2016

D'après le diagramme de Wilcox (figure 49), L'analyse graphique des eaux de 16 puits échantillonnés révèle les résultats suivants :

- ↪ Les puits P6, P23 présentent une bonne qualité d'eau. Ces eaux traduisant une faible salinité ainsi qu'un taux de sodium modéré. Ces caractéristiques rendent ces eaux adéquates pour l'irrigation de la plupart des cultures, sans risque majeur pour la structure et la perméabilité des sols.
- ↪ Les puits P2, P3, P4, P8, P9, P15, P16, P20 sont positionnés dans la zone admissible, correspondant à une qualité d'eau limitée pour l'irrigation. La salinité est modérément

élevée et le sodium suffisamment importante pour justifier une vigilance accrue. Ces eaux restent utilisables dans certaines conditions : sols bien drainés, cultures modérément tolérantes au sel, et gestion rigoureuse des apports hydriques.

- ↪ Les puits P1, P12 et P18 présentent une qualité d'eau classée comme médiocre. La salinité est élevée, accompagnée d'un taux de sodium relativement important, ce qui représente un risque significatif de détérioration des sols.
- ↪ Les puits P11, P14, P21 montrent une salinité très élevée ( $CE > 3500 \mu\text{S/cm}$ ). Elles sont impropres à l'irrigation agricole conventionnelle, car leur usage peut provoquer une salinisation rapide et irréversible des sols.



**Figure 49 : Diagramme de Wilcox (mois de Novembre 2016).**

## 8. Conclusion

L'analyse des résultats a permis de développer une compréhension approfondie de l'évolution chimique des eaux de la nappe et de mieux cerner les processus géochimiques qui influencent leur composition.

Les résultats de l'analyse hydrochimique mettent en évidence les tendances suivantes :

La conductivité électrique, révèle des valeurs significatives relativement élevées qui dépassent 2800  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (La norme définie par la réglementation algérienne) au cours des deux périodes surtout en mois de novembre 2016 qui dépasse 10600  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

Les faciès chimiques dominants : Les diagrammes de Piper ont révélé trois faciès chimiques principaux pour chaque période : les eaux chlorurées calciques, les eaux chlorurées sodiques, et les eaux sulfatées calciques en mois de décembre 2011, et les eaux bicarbonatées sodiques, les eaux chlorurées sodiques, et les eaux chlorurées magnésiennes en mois de novembre 2016.

L'analyse des rapports ioniques pour les deux campagnes de mesures montre une minéralisation marquée et une origine variée des éléments chimiques. La majorité des échantillons présentent une éventuelle influence marine, appuyée par la relation  $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$ . Des excès en sodium, calcium, magnésium ou sulfates indiquent des processus géochimiques comme l'échange d'ions, la dissolution de roches (carbonatées, silicatées), et des apports anthropiques (engrais, pollution). Ces résultats révèlent une évolution chimique notable entre les deux périodes et soulignent la nécessité d'une gestion durable de cette nappe.



## **CONCLUSION GENERALE**

Après avoir mené une étude hydrochimique des eaux souterraines de la plaine d'Annaba (Nord-Est de l'Algérie), en nous appuyant sur une approche qui intègre les aspects géographiques, climatologiques, hydrogéologiques et physico-chimiques, nous avons caractérisé la qualité des eaux souterraines et identifié les facteurs influençant leur composition, en tenant compte des données acquises durant deux périodes distinctes (décembre 2011 et novembre 2016). Voici une synthèse des résultats essentiels par chapitre :

- ↪ L'analyse des données climatiques montre que la région se distingue par un climat méditerranéen à tendance semi-aride, caractérisé par des étés chauds et secs et des hivers froids et humides. La pluviométrie moyenne annuelle est de 678,84 mm et une température moyenne mensuelle de 18,2 °C. Les mois les plus chauds sont juillet et août, tandis que les plus froids sont janvier et février.
- ↪ La piézométrie montre que la nappe présente une forte variabilité saisonnière, influencée par les précipitations et les pompages. Le niveau piézométrique diminue fortement durant l'été, indiquant une vulnérabilité accrue à la surexploitation et aux intrusions marines. La direction générale d'écoulement des eaux souterraines est orientée vers l'est et le nord-est, en direction de la mer Méditerranée.
- ↪ L'étude hydrochimique a montré une évolution significative des faciès chimiques où la dominance des faciès chloruré calcique (50%) et chloruré sodique (46%), témoins d'une intrusion marine ou salinisation d'origine anthropique. Une apparition des faciès bicarbonatés sodiques (50%) et chlorurés magnésiens (19%) en Novembre 2016, indiquant une possible recharge douce des eaux et une modification des interactions géochimiques.
- ❖ **À titre de recommandation** : la gestion durable de la plaine côtière d'Annaba doit impérativement prendre en compte l'influence marine, notamment l'intrusion saline qui menace les nappes phréatiques. Cette situation est aggravée par la surexploitation des eaux souterraines, l'usage excessif d'engrais agricoles, les rejets industriels et les pressions anthropiques croissantes. Il est donc essentiel de réguler les pompages, de maîtriser les apports en intrants chimiques, et de contrôler les rejets polluants. Le renforcement de la recharge des nappes, via la collecte des eaux pluviales et des pratiques agricoles durables, contribue à préserver l'équilibre hydrique. Une surveillance régulière de la qualité de l'eau est indispensable pour détecter toute augmentation de salinité ou de pollution. Enfin, la protection des zones sensibles lagunes, zones humides, cordons dunaires est primordiale pour atténuer les effets conjoints de la mer et des activités humaines.



**REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

**Atoui, B. (2014):** État de la vulnérabilité à la pollution des eaux des grands réservoirs d'eaux souterraines de la région d'Annaba-El-Tarf et identification des sites d'enfouissement de déchets (Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar Annaba). 134 p.

**Ayad. (2016):** Évaluation de la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux souterraines : cas des puits de la région d'El-Harrouch (Wilaya de Skikda) (Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar – Annaba), pp. 19–20.

**Benchaib, A. (2021):** Utilisation d'une approche multicritère pour l'analyse de l'eau dans le golfe d'Annaba (Thèse de doctorat 3e cycle, Hydrogéologie), 2020/2021.

**Bouderbala.A.(2015):** Contribution des méthodes hydrochimiques et géophysiques à l'acquisition de la minéralisation dans les zones côtières cas de la nappe alluviale de l'oued nador - Tipaza (Algérie). Thèse de Doctorat en sciences. Université Hassiba Benbouali de Chlef. 195p.

**Bouillin, J. P. (1979):** La transversale de Collo et d'El-Milia (Petite Kabylie). Mémoire de la Société Géologique de France, 57(135), 84 p.

**Boucenna, F (2022):** Cours d'hydrochimie et hydrogéochimie. Tamanrasset : Matière conférences, 63 p.

**Boulakoud, Z. (2009):** Variations quantitatives et qualitatives des ressources en eau des nappes superficielles de la région d'Annaba (Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar Annaba).

**Boumaiza, L. (2003):** Contribution à l'étude des caractéristiques hydrogéologiques et hydrochimiques des dépôts sableux d'Echatt (Nord-Est Algérien). Mémoire d'ingénieur.

**Castany, G. (1982):** Principes et méthodes de l'hydrogéologie. Paris : Éditions Dunod, 238 p.

**Debieche, T. H,(2002):** Évolution de la qualité des eaux sous l'effet de la pollution saline, agricole et industrielle (Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté). 199 p.

**Degremont (2005):** Mémento technique de l'eau, Tome I. 10e éd. Paris : Tec & Doc, pp. 3.38.

**Djabri, L., Bouhsina, S., Hani, A., Chaffai, H., Bougherira, N., Abdeslam, I. et al. (2019) :** Essai de cartographie du risque d'intrusion marine par une approche multicritères : cas de la nappe de Collo (N-E Algérien).

**Ferroum, A. (2015) :** Caractérisation des eaux superficielles de la plaine d'El Hadjar (Thèse de doctorat).

**Gaud, B. (1976) :** Étude hydrogéologique du système d'Annaba-Bouteldja : synthèse des connaissances et recherche des conditions de modélisation. Rapport A.N.R.H., Annaba, 2 vol., 230 p.

**Gaussen, H. (1952) :** L'indice xérothermique (Bagnouls-Gaussen). Méthode utilisée dans les climatologies méditerranéennes.

**Ghorbani, M. A. (2015) :** Use of artificial neural networks for electrical conductivity modeling in Asi River. Applied Water Science.

**Gleizes, G., Bouloton, J., Bossière, G., & Collomb, P. (1988) :** Données lithologiques et pétro-structurales sur le massif cristallophyllien de l'Edough (Est-Algérien). Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris, 306(II), 1001–1008.

**Glossaire (2009) :** Glossaire du Climat, par Christian Brodhag & Florent Breuil, Francophonie.

**Habes, S., Djabri, L., Hani, A., Bouhsina, S., & Mudry, J. (2012) :** Quantification des apports et des exutoires d'un lac : cas du lac Fetzara, région d'Annaba. Revue Synthèse, 24, 21–28.

**Hammor D & Lancelot J., (1998) :** Métamorphisme miocène de granites panafricains dans le massif de l'Edough (Nord-est de l'Algérie). Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Vol. 327, pp 391-396.

**Hammor D, (1992) :** Du Panafricain au Miocène : 600 millions d'années d'évolution polycyclique dans le massif de l'Edough (Algérie Nord Orientale). Retraces par la pétrologie, la tectonique et la géochronologie. Thèse de l'UST Langue doc, Univ. de Montpellier II, pp. 205.

**Hamzaoui, L. (2019) :** Gestion intégrée des ressources en eau dans le bassin versant de la Seybouse. Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar Annaba, 155 p.

**Hani, A. (2003)** : Analyse méthodologique de la structure et des processus anthropiques : application aux ressources en eau d'un bassin côtier méditerranéen (Thèse d'État, Université Badji Mokhtar Annaba), 214 p.

**Hilly, J. (1962)** : Étude géologique du massif de l'Edough et du Cap de Fer. Bulletin n°19, Carte géologique de l'Algérie, Alger, 339 p.

**Hsissou, Y., Bouchaou, L., & El Mandour, A. (1997)** : Dynamique et salinité de la nappe côtière d'Agadir (Maroc), influence du biseau salé et des faciès évaporitiques. IAHS Publication, 244, 73–82.

**JORA (2011)** : Journal Officiel de la République Algérienne. Décret exécutif n°11-125 du 22 mars 2011 relatif à la qualité de l'eau de consommation humaine. Alger : Imprimerie Officielle.

**Keddah, K., & Medjahdi, N. (2018)** : Contribution à l'étude physico-chimique de quelques sources dans le groupement urbain de Tlemcen (Mémoire de master), 78 p.

**Kherici, N. (1993)** : Vulnérabilité à la pollution chimique des eaux souterraines d'un système de nappes superposées (Annaba - La Mafragh).Thèse de doctorat, Université d'Annaba, 170 p.

**Laouar, R. (2002)** : Études pétrogénétiques et métallogénétiques des complexes ignés tertiaires du Nord-Est de l'Algérie (Thèse de doctorat, Université d'Annaba).

**Marignac C & Zimmermann J.L., (1983)** : Ages K-Ar de l'évènement hydrothermal et des intrusions associées dans le district minéralisé Miocène d'Aïn-Barbar (Est Constantinois, Algérie). Mineralium Deposita, 18, pp 457-467.

**Marignac C., (1985)** : Les minéralisations filoniennes d'Ain Barbar (Algérie). Un exemple d'hydrothermalisme lié à l'activité géothermique alpine en Afrique du nord. Thèse de Doctorat d'Etat (2 tomes), I.N.P. Lorraine, Nancy, France.

**Meddi, M., & Hubert, P. (2003)** : Étude sur la modification du régime pluviométrique et son impact sur les ressources en eau dans le nord-ouest de l'Algérie.

**Medjahedi, N., & Keddah, K. (2018)** : Analyse des diagrammes de Wilcox pour l'évaluation de la qualité des eaux. Étude incluse dans le mémoire de master.

**OMS (2003)** : Background document for preparation of WHO Guidelines for Drinking-water Quality. Genève : OMS.

**Oliver, J. E., & Hidore, J. J. (1984)** : Climatology: an Introduction. Columbus, OH : Merrill.

**Rodier J., 1996** : "Analyse de l'eau", DUNOD 8e édition, Dunod, paris, France, 1383p.

**Tabet (2008)** : Le changement climatique en Algérie orientale et ses conséquences sur la végétation forestière (1970–2005), via ResearchGate.

**Turc (1954)** : Le bilan d'eau des sols : relations entre les précipitations, l'évapotranspiration et l'écoulement. Annales Agronomiques.

**Vincent M., (2010)** : Evaluation du risque microbien dans l'eau : vers une meilleure gestion des ressources hydriques, revue francophone des laboratoires, N°459, p 27.

**Vila J.M., (1970)** : Le Djebel Edough un massif externe du Nord-Est de la Berbèrie. Bulletin, de la Société Géologique de France 7 (tome XII), pp 805–812.

**Zerrouki, H. (2007)** : Diagnostic pour une éventuelle réhabilitation des eaux de la Seybouse à la basse plaine d'Annaba (Mémoire de Magister, Université Badji Mokhtar Annaba), 86.

### **Webographie :**

- <https://support.google.com/websearch/answer>.
- <https://www.eaudyssee.org/serie-eaux-souterraines-article-2-les-nappes-et-les-processus/>.
- <https://www.google.com/search?q=Site-eb-%3B+techno-science-faciers+chimiques>.



**ANNEXES**

**Annexe n° 01 : Normes OMS et Algériennes des paramètres physicochimique pour l'eau potable (JORA, 2011) et (OMS, 2003).**

Paramètre	Unité	Normes algérienne	Normes OMS
PH	Unité PH	6.5 - 8.5	9
Température	°C	25	25
Conductivité	Us/cm	2800	2100
Résidu sec	Mg/l	2000	1500
Turbidité	NTU	2	2.5
Dureté total (TH)	Mg/l	500	500
Calcium	Mg/l	200	270
Magnésium	Mg/l	150	50
Sodium	Mg/l	200	150
Potassium	Mg/l	20	20
Sulfate	Mg/l	400	400
Chlorure	Mg/l	500	250
Nitrate	Mg/l	50	50
Nitrite	Mg/l	0.1	0.1
Aluminium	Mg/l	0.2	0.2
Ammonium	Mg/l	0.5	0.5
Matières organique	Mg/l	3	-
Métaux lourds	Mg/l	0.3	-
Fer	Mg/l	0.3	0.3
manganèse	Mg/l	0.5	0.4

**Annexe n° 02 : La dureté totale TH, (mois de Décembre 2011).**

<b>Puit</b>	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P10	P12
<b>TH</b>	94.35	<b>81.08</b>	179.40	164.32	303.32	159.43	149.17	138.71	802.10
<b>puit</b>	P13	P15	P16	P20	P21	P22	P23	P24	P27
<b>TH</b>	176.60	190.44	138.28	112.75	187.83	173.15	230.41	<b>1042.10</b>	113.46
<b>Puit</b>	P28	P29	P30	P31	P35	P62			
<b>TH</b>	85.60	161.45	412.20	905.90	184.60	260.80			

**Annexe n° 03 : La dureté totale TH, (mois de Novembre 2016).**

<b>Puit</b>	P1	P2	P3	P4	P6	P8	P9	P11	P12
<b>TH</b>	162.6	98.61	78.1	102.36	78.34	82.58	117.97	315.96	163.5
<b>Puit</b>	P14	P15	P16	P18	P20	P21	P23		
<b>TH</b>	219.17	<b>52.45</b>	62.02	360.94	73.28	<b>438.71</b>	58.52		

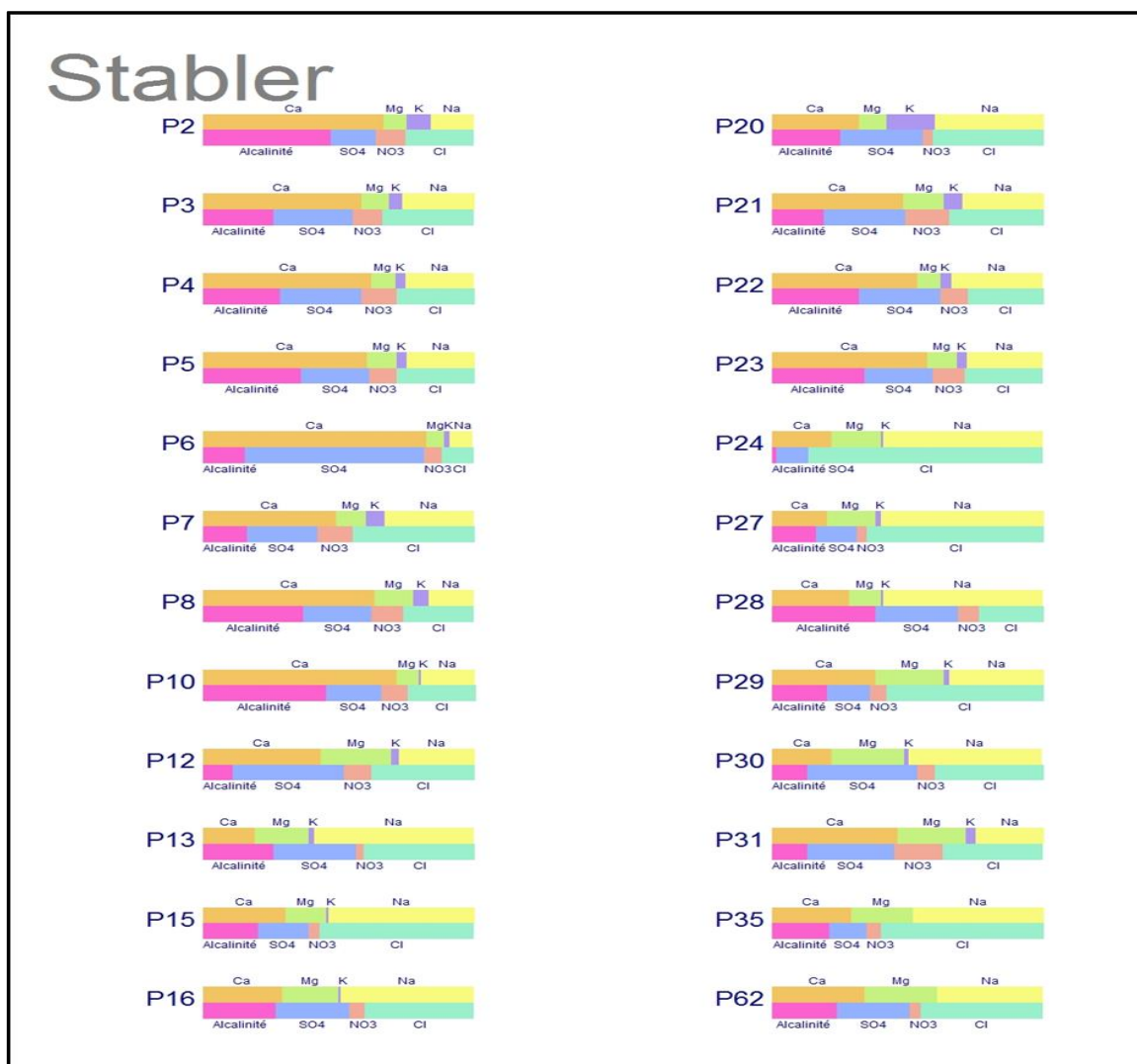
**Annexe n° 04 : La balance ionique (mois de Décembre 2011).**

<b>Puits</b>	<b>BI %</b>	<b>Analyse</b>	<b>Puits</b>	<b>BI %</b>	<b>Analyse</b>
P2	3.95	Acceptable	P20	4.95	Acceptable
P3	4.11	Acceptable	P21	1.57	Bonne
P4	1.93	Bonne	P22	1.74	Bonne
P5	2.07	Acceptable	P23	1.45	Bonne
P6	1.47	Bonne	P24	-4.25	Acceptable
P7	1.81	Bonne	P27	1.41	Bonne
P8	2.45	Acceptable	P28	2.08	Acceptable
P10	2.82	Acceptable	P29	1.68	Bonne
P12	0.42	Bonne	P30	0.48	Bonne
P13	0.91	Bonne	P31	0.39	Bonne
P15	1.09	Bonne	P35	1.23	Bonne
P16	1.55	Bonne	P62	1.03	Bonne

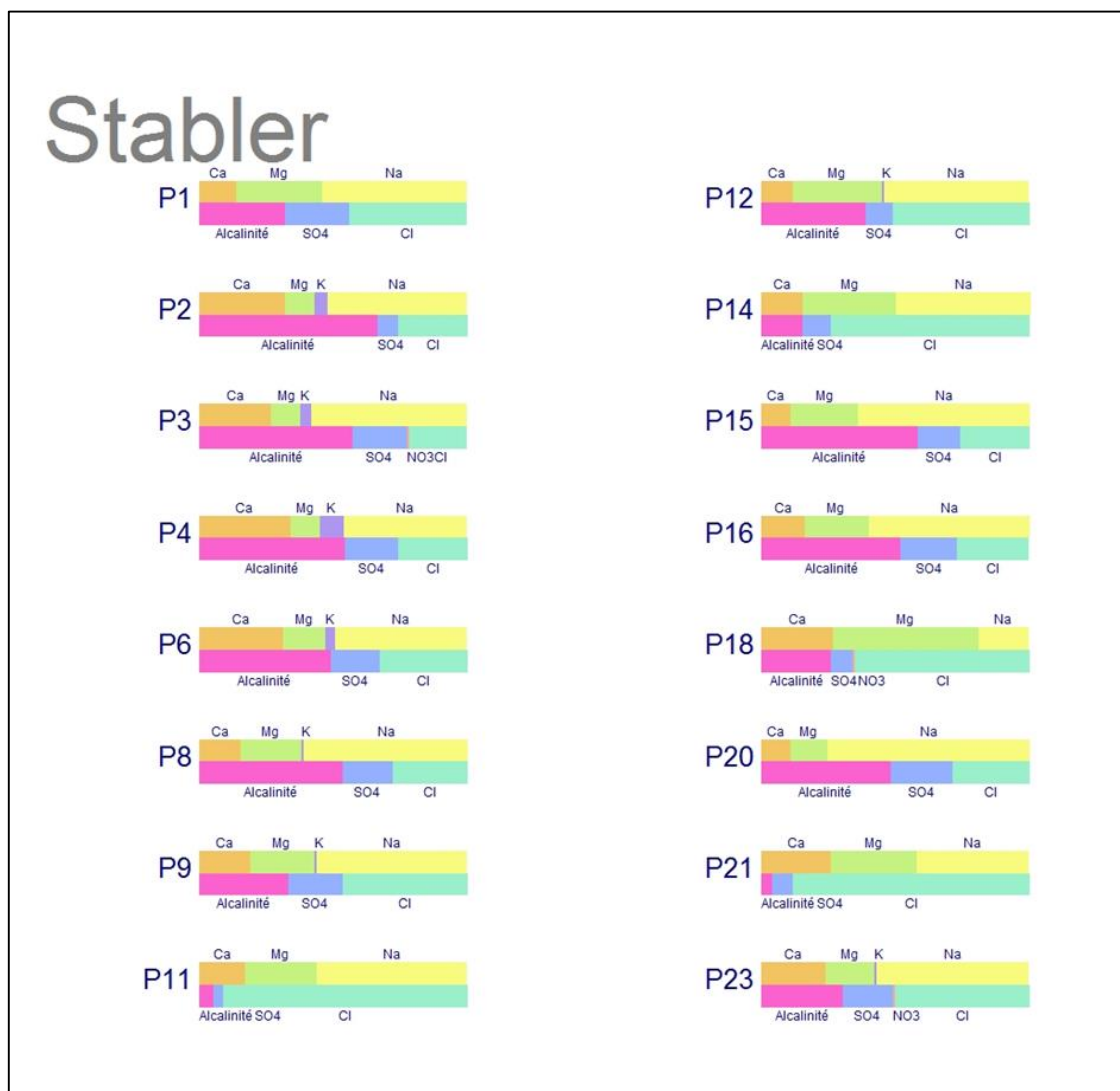
**Annexe 05 : La balance ionique (mois de Novembre 2016).**

<b>Puits</b>	<b>BI%</b>	<b>Analyse</b>	<b>Puits</b>	<b>BI %</b>	<b>Analyse</b>
<b>P1</b>	-3.18	Acceptable	P12	-1.15	Acceptable
<b>P2</b>	-0.49	Acceptable	P14	-2.52	Acceptable
<b>P3</b>	-2.89	Acceptable	P15	-5.21	Médiocre
<b>P4</b>	-3.41	Acceptable	P16	-4.92	Acceptable
<b>P6</b>	-3.25	Acceptable	P18	-2.39	Acceptable
<b>P8</b>	5.45	Médiocre	P20	4.27	Acceptable
<b>P9</b>	-4.35	Acceptable	P21	-1.53	Acceptable
<b>P11</b>	-1.62	Acceptable	P23	5.62	Médiocre

## Annexe n°06 : Diagramme de STABLER (mois de Décembre 2011).



## Annexe n°07 : Diagramme de STABLER (mois de Novembre 2016.)



## ملخص

يقع سهل عنابة في شمال شرق الجزائر، حيث يفتح على خليج عنابة المطل على ساحل البحر الأبيض المتوسط، ويتميز بمناخ البحر الأبيض المتوسط المعتدل. تتواجد المياه الجوفية تحت هذا السهل داخل تكوينات طميية نفاذة، مما يسمح بحركتها بشكل حر نسبياً، ويجعلها عرضة لتأثيرات متعددة، سواء كانت طبيعية أو ناتجة عن النشاط البشري.

الهدف الرئيسي من عملنا هو الدراسة الهيدروكيميائية للمياه الجوفية في سهل عنابة، وذلك عبر فترتين زمنيتين مختلفتين. وقد شمل التحليل مجموعة من المؤشرات الفيزيائية والكيميائية مثل درجة الحموضة (pH)، ودرجة الحرارة، والتوصيلية الكهربائية، وتركيزات الأيونات الرئيسية.

وقد تم تفسير البيانات باستخدام مخطط باير لتحديد الأوجه الكيميائية المختلفة، بالإضافة إلى تطبيق منهجية النسبة المميزة لتحديد المصدر المحتمل للعناصر الكيميائية المشاركة في زيادة تمعدن المياه.

تكشف النتائج عن تغير واضح في النوعية الكيميائية للمياه، حيث تم رصد انتقال من نمط الكلوريد الكلسي في شهر ديسمبر من سنة 2011 إلى نمط بيكربونات الصوديوم في شهر نوفمبر من سنة 2016، وهذان النمطان يُعدان السائدتين في المياه الجوفية للمنطقة المدروسة. كما لوحظ ارتفاع ملحوظ في التوصيلية الكهربائية، مما يدل على مستوى عالٍ من التمدن، والذي يُحتمل أن يكون ناتجاً عن تأثيرات من مصادر صخرية، أو بحرية، أو بشرية المنشأ.

الكلمات المفتاحية: سهل عنابة، طبقة المياه الجوفية الساحلية، القياسات الفيزيائية الكيميائية، التوازن الأيوني، مخطط باير، الأوجه الكيميائية.

## Abstract

The Annaba plain, located in the northeastern part of Algeria, opens extensively onto the Gulf of Annaba, along the Mediterranean coastline, benefiting from its climate. The groundwater beneath this plain is found in permeable alluvial formations. Water flows relatively freely, exposing it to various natural and human-induced influences. The primary objective of our study is the hydrochemical analysis of the groundwater in the Annaba plain over two distinct periods.

The analysis covered several physico-chemical parameters, including pH, temperature, electrical conductivity, and the concentrations of major ions. Data interpretation was carried out using the Piper diagram to identify the different chemical facies and by applying the characteristic ratios method to determine the potential origin of the chemical elements contributing to the increase in mineralization.

The results show a clear change in water quality, with a shift from a calcium chloride facies in December 2011 to a sodium bicarbonate facies in November 2016. These latter facies now dominate the groundwater in the studied area. A significant rise in electrical conductivity was also observed, indicating a high level of mineralization, which is likely influenced by lithological, marine, or anthropogenic inputs.

Keywords: Annaba Plain, coastal aquifer, physico-chemical parameters, ion balance, Piper diagram, chemical facies.

## Résumé

La plaine d'Annaba, située au nord-est de l'Algérie, où elle s'ouvre largement sur le golfe d'Annaba, au bord de la Méditerranée, où elle jouisse avec le climat de cette dernière. La nappe phréatique sous cette plaine est contenue dans des formations alluviales perméables. L'eau y circule relativement librement, ce qui l'expose à diverses influences naturelles et anthropiques. L'objectif principal de notre travail est l'étude hydrochimique des eaux souterraines de la plaine d'Annaba entre deux périodes distinctes. L'analyse a porté sur un ensemble de paramètres physicochimiques, notamment le pH, la température, la conductivité électrique et les concentrations en ions majeurs. L'interprétation des données a été effectuée à l'aide du diagramme de Piper pour déterminer les différents faciès chimiques existants et l'utilisation de la méthode des rapports caractéristiques, afin de savoir l'origine potentielle des éléments chimiques participant à l'augmentation de la minéralisation. Les résultats révèlent un changement bien évident de la qualité chimique de l'eau où on a décelé un transfert d'un faciès chloruré calcique en mois de Décembre 2011 à un faciès bicarbonaté sodique en mois de Novembre 2016, ces derniers dominent les eaux souterraines de la zone étudiée. Ainsi qu'une élévation significative de la conductivité électrique, témoignant d'un niveau de minéralisation élevé, souvent influencée probablement par des apports d'origine lithologique, marine ou anthropique.

Mots clés : Plaine d'Annaba, aquifère cotier, paramètres physico-chimiques, Balance ionique, Diagramme de Piper, Faciès chimiques.