



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
جامعة زيان عاشور-الجلفة

Université Ziane Achour -Djelfa

كلية علوم الطبيعة و الحياة

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie

قسم العلوم الفلاحة و البيطرية

Département des Sciences Agronomiques et Vétérinaires

## Projet de fin d'étude

En vue de l'obtention du Diplôme de Master académique

Filière : Sciences Agronomiques

Spécialité : Eau et Environnement

Thème :

**Evaluation qualitative des eaux souterraines de la  
nappe libre du massif dunaire de Bouteldja (Wilaya  
d'El Tarf).**

Présenté par : SAIHI Meriem.

Soutenu devant le jury :

M<sup>f</sup>

Président.

M<sup>f</sup> Haied Nadjib

M.C.A. Université de Djelfa

Promoteur.

M<sup>f</sup>

Examineur.

M<sup>f</sup>

Examineur.

Année Universitaire : 2021/2022

## الملخص:

يقع الخزان الجوفي الحر لكتلة كتبان بوتلجة في منطقة تتميز بمناخ شبه رطب مع تدفقات من الأمطار تبلغ حوالي 700 ملم في السنة على مدى السنوات العشر الماضية (2011-2021). مع كمية كبيرة من المياه المخزنة تقدر بـ 908.18  $\text{Hm}^3$ ، فإن خزاننا الجوفي يعتبر ذو أهمية حيوية لولايتي الطارف و عنابة ، الأمر الذي سيمارس ضغطاً كبيراً على جودة المياه التي يظهر خلالها هدف هذا العمل و المتمثل في التقييم النوعي لهذه المياه الجوفية. من وجهة النظر الهيدروكيميائية ، السحنة الكيميائية السائدة هي سحنات كلوريد الصوديوم مع تمعدن منخفض تم إثباته من خلال إنجاز مخطط ديروف (Durov) وتحليل المكونات الرئيسية (ACP). التصنيف وفقاً لمؤشر جودة المياه (WQI) أدى إلى الحصول على مياه ذات جودة ممتازة للاستهلاك البشري. هذه المياه مناسبة للري لأنها إما ذات جودة ممتازة أو جيدة وفقاً لطريقة معدل الامتصاص النوعي (SAR).

**الكلمات المفتاحية:** غشاء كتلة الكتبان الرملية لبوتلجة ، السحنة الكيميائية ، مخطط ديروف (Durov) ، تحليل المكونات الرئيسية (ACP) ، معدل الامتصاص النوعي (SAR).

## Abstract:

The Bouteldja unconfined dune aquifer is located in an area characterized by a sub-humid climate with rainfall inflows of around 700 mm/year for the last ten years (2011-2021). With a large volume of stored water estimated at 908.18  $\text{Hm}^3$ , our aquifer is of vital importance for the wilayas of El Tarf and Annaba, which will exert great pressure on the quality of their water from which individualizes the objective of this work which resides in the qualitative evaluation of these groundwater. From the hydrochemical point of view, the dominant chemical facies is the sodium chloride facies with low mineralization proven by the realization of the Durov diagram and the Principal Component Analysis (PCA). The classification according to the Water Quality Index (WQI) resulted in water of excellent quality for human consumption. These waters are suitable for irrigation since they are either of excellent or good quality according to the SAR method.

**Keywords:** The Bouteldja unconfined dune aquifer, Chemical facies, Durov diagram, ACP, WQI, SAR.

## Résumé :

La nappe libre du massif dunaire de Bouteldja se situe dans une zone qui se caractérise par un climat sub-humide avec des apports pluviométriques qui avoisine les 700 mm/an pendant les dix dernières années (2011-2021). Avec un volume d'eau emmagasiné important estimé à 908.18  $\text{Hm}^3$ , notre nappe est d'une importance vitale pour les wilayas d'El Tarf et de Annaba, ce qui va exercer une grande pression sur la qualité de leur eau d'où s'individualise l'objectif de ce travail qui réside dans l'évaluation qualitative des ces eaux souterraines. Du point de vu hydrochimique, le faciès chimique dominant est le faciès chloruré sodique à faible minéralisation prouvé par l'élaboration du diagramme de Durov et l'Analyse en Composante Principale (ACP). La classification selon l'indice de la qualité de l'eau (WQI) a donné une eau d'excellente qualité pour la consommation humaine. Ces eaux sont aptes à l'irrigation puisqu'elles sont soit d'excellente ou bien de bonne qualité selon la méthode du SAR.

**Mots clés :** La nappe libre du massif dunaire de Bouteldja, Faciès chimique, Diagramme de Durov, ACP, WQI, SAR.

# Remerciement

*Je tiens avant tout au terme de ce travail à exprimer ma profonde gratitude à **ALLAH** le tout puissant, le tout miséricordieux qui, grâce à sa protection et sa bienveillance, il m'a permis d'acquérir le savoir et m'a donné le courage pour mener à bien ce travail.*

*Merci à mes chers parents, ma famille **SAIHI** et tous mes proches pour leur patience et soutien de tous les jours.*

*Je voudrai exprimer un très chaleureux remerciement à mon encadreur : Dr. **HAIED Nadjib**, qui m'a guidé et suivi tout au long de ce travail. Ses critiques fructueuses ont été pour moi, une source d'enrichissement. Son aide et sa disponibilité et sa bienveillance, sa patience, ses conseils et ses remarques, et surtout pour sa confiance m'a permis d'avancer dans le travail et de finaliser cette étude.*

*Un grand merci à nos collègues et camarades de la promotion de la spécialité Eau et Environnement **2021/2022**.*

*J'adresse ma grande reconnaissance à tous **mes enseignants** du département des Sciences Agronomique, particulièrement mes enseignants de spécialité Eau et Environnement surtout Pr **ILAHCEN Omar**, Pr **AZOZI Bilal**, Dr **MOUSSA Habib**, Dr **RIBHI Abdegani Elmahdaoui** et mes enseignants Dr :**CHALABI Salim ALLAH yarhmah** , Dr : **CHIAB Taibe**, Dr : **GAZI Mèriem** ,Dr : **FOUFOU Atif** ,Dr :**AMRAOUI A** et Dr **BOUGATAYA Youcef** , Dr **SOUTOU Karim**, Dr **DAHYA** , que je tiens à les remercier solennellement.*

*Enfin tous ceux qui m'ont soutenu tout au long de ce travail directement ou indirectement, par leur amitié et leur sympathie, qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude.*

**Merci à tous**

# ***Dédicace***

**Louange à Allah le puissant, prière et salut sur le prophète Mohamed que  
le salut sur lui.**

*Je dédie ce modeste travail en signe de respect et de  
reconnaissance :*

*A ma très cher mère*

*A mon très chère père*

*A mes soeurs et frères*

*A mes amis*

*A ma famille.*

*Je dédie avec toute affection ce modeste travail  
à mon Prof*

*'HAIED Nadjib' qui m'a toujours mené le sentiment de la  
fierté et n'a jamais hésité de me supporter moralement.*

*Je le dédie aussi à tous les professeurs qui ont contribuées  
à ma formation.*

*A toutes les meilleures personnes qui m'aiment et qui  
m'aident dans ma vie.*

*A tous mes amies et à toute la promotion de  
l'eau et environnement 2021/2022.*

*A ceux qui se sont sacrifiés tant à mon égard pour que  
je réussisse.*

*A ceux à qui je dois énormément et que je ne remerciais  
jamais assez*

# SOMMAIRE

**Résumé.**

**Remerciement.**

**Dédicace.**

**Sommaire.**

**Liste des figures.**

**Liste des tableaux.**

**Liste des abréviations et des paramètres.**

**Introduction générale..... 01**

## **Chapitre I : Présentation de la zone d'étude.**

I. 1. Localisation.....	04
I. 1. 1. Situation géographique de la région d'étude .....	04
I. 2. Géomorphologie.....	06
I. 3. Couvert Végétale :.....	06
4. Aperçu Socio-économique.....	06
I. 4. 1. Population.....	06
I. 4. 2. Agriculture.....	06
I. 4. 3. La pêche.....	06
I. 5. Géologie.....	07
I. 6. Stratigraphie.....	08
I. 6. 1. Les formations Secondaires.....	09
I. 6. 2. Les formations Tertiaires.....	09
I. 6. 3. Quaternaire.....	10
I. 6. 3. 1. Quaternaire ancien.....	10
I. 6. 3. 2. Quaternaire moyen.....	11
I. 6. 3. 3. Quaternaire récent.....	11
I. 7. Pédologie.....	11
I. 8. Conclusion.....	12

## **Chapitre II : Hydroclimatologie.**

II. 1. Introduction.....	13
II. 2. Caractérisation du climat.....	13
II. 2. 1. Diagramme ombrothermique.....	13
II. 2. 2. Climagramme de Louis Emberger.....	15
II. 3. Les facteurs climatiques.....	16

II. 3. 1. Les précipitations.....	16
II. 3. 1. 1. Les précipitations moyennes mensuelles.....	17
II. 3. 1. 2. Répartition saisonnière des précipitations.....	18
II. 3. 1. 3. Les précipitations moyennes annuelles.....	20
II. 3. 2. La Température.....	22
II. 3. 2. 1. La température moyenne mensuelle.....	23
II. 3. 2. 2. La température moyenne annuelle.....	23
II. 4. Estimation des paramètres du bilan hydrique.....	24
II. 4. 1. Définition de l'évapotranspiration.....	25
II. 4. 2. Estimation de l'évapotranspiration réelle (ETR).....	25
II. 4. 3. Interprétation du bilan hydrique.....	26
II. 5. Estimation de la lame d'eau écoulée.....	32
II. 5. 1. Le ruissellement.....	32
II. 5. 2. Infiltration efficace.....	32
II. 6. Hydrologie.....	33
II. 6. 1. Le bassin versant de l'oued Kebir Est.....	33
II. 6. 2. Hydrographie.....	33
II. 7. Conclusion.....	35

## Chapitre III : Hydrogéologie.

III. 1. Introduction.....	36
III. 2. La répartition des forages dans le massif dunaire de Bouteldja.....	36
III. 3. Géométrie de la nappe libre du massif dunaire.....	37
III. 3. 1. Conditions aux limites de la nappe du massif dunaire.....	37
III. 3. 2. Caractéristiques hydrodynamiques de la nappe.....	37
III. 3. 2. 1. L'étude de la transmissivité (T) et du coefficient d'emmagasinement (S).....	37
III. 3. 3. Répartition spatiale des transmissivités.....	38
III. 3. 4. Détermination et répartition des perméabilités.....	39
III. 3. 5. Interprétation de la carte du substratum (carte isobathe).....	40
III. 3. 6. Interprétation de la carte d'égale épaisseur de la couche saturée (carte isopache).....	40
III. 3. 7. Interprétation de la carte piézométrique.....	41
III. 3. 8. Estimation des réserves.....	43
III. 4. Etat des ressources en eau dans la wilaya d'El Tarf.....	44
III. 4. 1. Ressources en eau superficielles.....	44
III. 4. 2. Ressources en eau souterraines.....	44
III. 4. 3. Mobilisation des ressources en eaux.....	44
III. 5. Conclusion.....	44

## Chapitre IV : Hydrochimie.

IV. 1. Introduction.....	46
IV. 2. Echantillonnage et analyses Hydro-chimiques.....	46
IV. 2. 1. Méthode de prélèvement.....	46
IV. 2. 2. Les méthodes d'analyse.....	47
IV. 3. Etude des paramètres physiques.....	47

IV. 3. 1. Le potentiel d'hydrogène (pH).....	47
IV. 3. 2. Conductivité électrique.....	47
IV. 4. Etude des paramètres chimiques.....	48
IV. 4. 1. Calcium ( $\text{Ca}^{++}$ ).....	49
IV. 4. 2. Magnésium ( $\text{Mg}^{++}$ ).....	49
IV. 4. 3. Sodium ( $\text{Na}^+$ ).....	50
IV. 4. 4. Potassium ( $\text{K}^+$ ).....	50
IV. 4. 5. Les chlorures ( $\text{Cl}^-$ ).....	51
IV. 4. 6. Bicarbonates ( $\text{HCO}_3^-$ ).....	51
IV. 4. 7. Sulfates ( $\text{SO}_4^{2-}$ ).....	52
IV. 4. 8. Nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ).....	52
IV. 5. Interprétation des analyses chimiques par les diagrammes de Stabler, Stiff, Piper et de Durov.....	53
IV. 5. 1. Diagrammes de Stabler et Stiff.....	53
IV. 5. 2. Diagramme de Piper.....	54
IV. 5. 3. Diagramme de Durov.....	55
IV. 6. Etude statistique des données chimiques.....	57
IV. 6. 1. Analyses en composantes principales (A.C.P.).....	57
IV. 6. 2. Matrice des corrélations (Pearson (n)).....	57
IV. 6. 3. Etude des variables et des individus.....	58
IV. 7. Qualité chimique des eaux.....	59
IV. 7. 1. La potabilité des eaux souterraines (AEP).....	59
IV. 7. 1. 1. Titre hydrotimétrique (dureté de l'eau) TH.....	60
IV. 7. 1. 2. Indice de la qualité de l'eau (WQI).....	61
IV. 7. 1. 2. 1. Estimation de l'indice de la qualité de l'eau.....	61
IV. 7. 2. Aptitude des eaux souterraines à l'irrigation (Diagramme de Richards).....	63
IV. 8. Conclusion.....	65
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>67</b>
<b>Références bibliographiques.....</b>	<b>69</b>

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure 1 :</b>	Situation géographique du massif dunaire de Bouteldja (Haied N., 2015).....	<b>05</b>
<b>Figure 2 :</b>	Carte schématique des unités géomorphologiques dans la région d'El Tarf, (A.B.H. Mouchara. N ;2004).....	<b>07</b>
<b>Figure 3 :</b>	Carte du couvert végétal dans la wilaya d'El Tarf (D'après le plan d'aménagement de la wilaya d'El Tarf, 2001 in Saadali B., 2007).....	<b>10</b>
<b>Figure 4 :</b>	Extrait de la carte géologique et structurale au 1/500 000 de la chaîne alpine de l'Algérie orientale et des confins Algéro-Tunisiens (J. M. Vila, 1978, modifiée par Haied N., 2015).....	<b>13</b>
<b>Figure 5 :</b>	Log stratigraphique.....	<b>13</b>
<b>Figure 6 :</b>	Diagramme ombrothermique de la station des Salines (2011-2021).....	<b>14</b>
<b>Figure 7 :</b>	Diagramme ombrothermique de la station de Ben M'hidi (2011-2021).....	<b>14</b>
<b>Figure 8 :</b>	Diagramme ombrothermique de la station de Bouteldja (2011-2021).....	<b>15</b>
<b>Figure 9 :</b>	Climagramme d'Emberger des stations des Salines, de Ben M'hidi et de Bouteldja.....	<b>16</b>
<b>Figure 10 :</b>	Histogramme des précipitations moyennes mensuelles aux stations des Salines, de Ben M'hidi et de Bouteldja (2011-2021).....	<b>17</b>
<b>Figure 11 :</b>	Répartition saisonnière des précipitations à la station des Salines(2011-2021)...	<b>19</b>
<b>Figure 12 :</b>	Répartition saisonnière des précipitations à la station de Ben M'hidi (2011-2021).....	<b>19</b>
<b>Figure 13 :</b>	Répartition saisonnière des précipitations à la station de Bouteldja (2011-2021).	<b>20</b>
<b>Figure 14 :</b>	Les variations du coefficient pluviométrique aux stations des Salines, de Ben M'hidi et de Bouteldja (2011-2021).....	<b>22</b>
<b>Figure 15 :</b>	Histogramme des températures moyennes mensuelles aux stations des Salines, de Bouteldja et de Ben M'hidi (2011-2021).....	<b>23</b>
<b>Figure 16 :</b>	Courbe de variation des températures moyennes annuelles aux stations des Salines, de Bouteldja et de Ben M'hidi (2011-2021).....	<b>24</b>
<b>Figure 17 :</b>	Moyennes pluriannuelles des éléments climatiques à la station des Salines pour la période (2011-2021).....	<b>28</b>
<b>Figure 18 :</b>	Diagramme de la variation de la RFU, du Déficit Agricole et de l'Excédent à la station des Salines (2011-2021).....	<b>28</b>
<b>Figure 19 :</b>	Moyennes pluriannuelles des éléments climatiques à la station de Ben M'hidi pour la période (2011-2021).....	<b>29</b>
<b>Figure 20 :</b>	Diagramme de la variation de la RFU, du Déficit Agricole et de l'Excédent à la station de Ben M'hidi (2011-2021).....	<b>30</b>
<b>Figure 21 :</b>	Moyennes pluriannuelles des éléments climatiques à la station de Bouteldja pour la période (2011-2021).....	<b>31</b>
<b>Figure 22 :</b>	Diagramme de la variation de la RFU, du Déficit Agricole et de l'Excédent à la station de Bouteldja (2011-2021).....	<b>31</b>
<b>Figure 23 :</b>	Carte du réseau hydrographique de la wilaya d'El Tarf, (A.B.H. Mouchara. N ; 2004).....	<b>34</b>
<b>Figure 24 :</b>	Carte de répartition des forages dans le massif dunaire de Bouteldja.....	<b>36</b>

<b>Figure 25 :</b>	Coupes hydrogéologiques schématiques dans le massif dunaire de Bouteldja.....	<b>37</b>
<b>Figure 26 :</b>	Carte de répartition des transmissivités en $10^{-3}m^2/s$ de la nappe du massif dunaire de Bouteldja (Ramdani A., 1996, modifiée).....	<b>38</b>
<b>Figure 27 :</b>	Carte de répartition des perméabilités en $10^{-5}m/s$ de la nappe du massif dunaire de Bouteldja (Ramdani A., 1996, modifiée).....	<b>39</b>
<b>Figure 28 :</b>	Carte du substratum de la nappe du massif dunaire de Bouteldja (d'après l'étude géophysique de Strojexport, 1975, modifiée).....	<b>40</b>
<b>Figure 29 :</b>	Carte d'égale épaisseur de la couche saturée de la nappe du massif dunaire de Bouteldja (Ramdani A., 1996, modifiée).....	<b>41</b>
<b>Figure 30 :</b>	Carte piézométrique de la nappe du massif dunaire de Bouteldja en Octobre 1994 (Ramdani A., 1996, modifiée).....	<b>42</b>
<b>Figure 31 :</b>	Histogramme de la variation du pH.....	<b>48</b>
<b>Figure 32 :</b>	Histogramme de la variation de la Conductivité Electrique.....	<b>48</b>
<b>Figure 33 :</b>	Histogramme de la variation de calcium ( $Ca^{2+}$ ).....	<b>49</b>
<b>Figure 34 :</b>	Histogramme de la variation de magnésium ( $Mg^{2+}$ ).....	<b>49</b>
<b>Figure 35 :</b>	Histogramme de la variation de sodium ( $Na^+$ ).....	<b>50</b>
<b>Figure 36 :</b>	Histogramme de la variation de potassium ( $K^+$ ).....	<b>50</b>
<b>Figure 37 :</b>	Histogramme de la variation de chlorure ( $Cl^-$ ).....	<b>51</b>
<b>Figure 38 :</b>	Histogramme de la variation des bicarbonates ( $HCO_3^-$ ).....	<b>52</b>
<b>Figure 39 :</b>	Histogramme de la variation des Sulfates ( $SO_4^{2-}$ ).....	<b>52</b>
<b>Figure 40 :</b>	Histogramme de la variation des Nitrates ( $NO_3^-$ ).....	<b>53</b>
<b>Figure 41 :</b>	Diagrammes de Stabler et Stiff.....	<b>54</b>
<b>Figure 42 :</b>	Diagramme de Piper.....	<b>55</b>
<b>Figure 43 :</b>	Diagramme de Durov.....	<b>57</b>
<b>Figure 44 :</b>	Totales des variances et pourcentages cumulés.....	<b>58</b>
<b>Figure 45 :</b>	Cercle de corrélation selon le plan F1F2.....	<b>59</b>
<b>Figure 46 :</b>	Répartition des individus selon le plan F1F2.....	<b>59</b>
<b>Figure 47 :</b>	Diagramme de Richards.....	<b>65</b>

## LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau 1 :</b>	Peuplements et formations forestières de la wilaya d'El Tarf.....	<b>04</b>
<b>Tableau 2 :</b>	Caractéristiques des stations de mesure.....	<b>12</b>
<b>Tableau 3 :</b>	Paramètres du climagramme d'Emberger.....	<b>15</b>
<b>Tableau 4 :</b>	Les précipitations moyennes mensuelles (mm).....	<b>17</b>
<b>Tableau 5 :</b>	Variation saisonnière des précipitations.....	<b>18</b>
<b>Tableau 6 :</b>	Précipitations moyennes annuelles et Coefficients pluviométriques de la station des Salines (2011-2021).....	<b>21</b>
<b>Tableau 7 :</b>	Précipitations moyennes annuelles et Coefficients pluviométriques de la station de Ben M'hidi (2011-2021).....	<b>21</b>
<b>Tableau 8 :</b>	Précipitations moyennes annuelles et Coefficients pluviométriques de la station de Bouteldja (2011-2021).....	<b>21</b>
<b>Tableau 9 :</b>	Températures moyennes mensuelles pour la période (2011-2021).....	<b>23</b>
<b>Tableau 10 :</b>	Températures moyen annuelles (C°).....	<b>24</b>
<b>Tableau 11 :</b>	ETR annuelle selon la méthode de Turc.....	<b>26</b>
<b>Tableau 12 :</b>	ETR selon la méthode de Coutagne.....	<b>26</b>
<b>Tableau 13 :</b>	Bilan hydrique à la station de Saline pour la période (2011-2021).....	<b>27</b>
<b>Tableau 14 :</b>	Bilan hydrique à la station de Ben M'hidi pour la période (2011-2021).....	<b>29</b>
<b>Tableau 15 :</b>	Bilan hydrique à la station de Bouteldja pour la période (2011-2021).....	<b>30</b>
<b>Tableau 16 :</b>	Ruissellement selon la formule de Tixerant-Berckaloff.....	<b>32</b>
<b>Tableau 17 :</b>	Les valeurs de l'infiltration efficace.....	<b>33</b>
<b>Tableau 18 :</b>	Données morphométriques de l'oued Kebir Est.....	<b>33</b>
<b>Tableau 19 :</b>	calcul du volume d'eau emmagasiné dans la nappe du massif dunaire.....	<b>43</b>
<b>Tableau 20 :</b>	calcul du volume d'eau emmagasiné dans la nappe du massif dunaire.....	<b>44</b>
<b>Tableau 21 :</b>	Normes et classification des eaux selon leur conductivité.....	<b>47</b>
<b>Tableau 22 :</b>	Relation entre conductivité et minéralisation (Detay, 1997).....	<b>48</b>
<b>Tableau 23 :</b>	Classification de l'eau de la nappe du massif dunaire de Bouteldja basée sur le diagramme de Durov (Lloyd et Heathcoat, 1985).....	<b>56</b>
<b>Tableau 24 :</b>	Matrice des corrélations des paramètres physicochimiques. ....	<b>57</b>
<b>Tableau 25 :</b>	Valeurs propres.....	<b>58</b>
<b>Tableau 26 :</b>	Normes de potabilité des eaux d'après l'OMS (2011).....	<b>60</b>
<b>Tableau 27 :</b>	Classification des eaux en fonction de leur dureté (d'après RODIER J. 1980)....	<b>60</b>
<b>Tableau 28 :</b>	Dureté des eaux souterraines de la zone d'étude.....	<b>60</b>
<b>Tableau 29 :</b>	Poids et poids relatif de chaque paramètre chimique (Ketata et al., 2011).....	<b>61</b>
<b>Tableau 30 :</b>	Classification des eaux souterraines selon le WQI.....	<b>63</b>
<b>Tableau 31 :</b>	Calcul et classification de la qualité de l'eau selon l'indice WQI.....	<b>63</b>
<b>Tableau 32 :</b>	Classification des eaux par degrés d'aptitude à l'irrigation (Méthode du SAR)...	<b>64</b>

## LISTE DES ABRÉVIATIONS

•C	Degré Celsius
$\Sigma$	La somme
$\mu s/cm$	Millisimense par centime
$\lambda$	Landa
%	Pourcentage
A	Avril
A	Aout
ABH	Agence des Bassins Hydrographiques
ADE	l'Algérienne des Eaux
an	Année
ans	Années
A.C.P	Analyse en Composantes principales
ANRH	Agence Nationale des Ressources Hydraulique
AEP	Alimentation en Eau Potable
Avr	Avril
(aq)	Aqeuse
BH	Banque de l'habitat
$Ca^{2+}, Ca^{++}$	Calcium
$CaMg(CO_3)_2$	Dolomite
$CaCO_3$	Carbonate de calcium
$CaSO_4$	Sulfate de calcium
CE	Conductivité Electrique
Cl	Chlorures
Cl	Chlorures
cm	Centimeter
$CO_3^{--}$	Trioxyde de carbone
CO2	Dioxyde de carbone
CP	Le coefficient pluviométrique
DA	Déficit Agricole
Déc.	Décembre
Def	Déficit Agricole
DHW	Direction de l'Hydraulique de la Wilaya
E	Epaisseur moyenne de la couche aquifère (m).
E	l'épaisseur de la nappe
Eh	Potentiel d'oxydo-réduction
ERT	Evapotranspiration réelle
ETP	Evaporation potentiel

<b><i>ETPC</i></b>	Evapotranspiration potentielle
<b><i>ETPR</i></b>	Evapotranspiration Réelle
<b><i>Exc</i></b>	Excident
<b><i>F</i></b>	Février
<b><i>Fév.</i></b>	Février
<b><i>ha</i></b>	héctare
<b><i>HAPE</i></b>	Hiver Automne Printemps Eté
<b><i>HCO<sub>3</sub><sup>-</sup></i></b>	Bicarbonate
<b><i>Hm<sup>3</sup></i></b>	Hectomètre cube
<b><i>H<sub>2</sub>O</i></b>	Eau
<b><i>I</i></b>	Infiltration
<b><i>I<sub>e</sub></i></b>	Porosité efficace des sables,
<b><i>Ie</i></b>	Infiltration efficace
<b><i>IQE</i></b>	Indice de la qualité de l'eau
<b><i>J</i></b>	Jour
<b><i>J</i></b>	Juillet
<b><i>J</i></b>	Juin
<b><i>Jan</i></b>	Janvier
<b><i>Juin</i></b>	Juin
<b><i>Juil.</i></b>	Juillet
<b><i>K</i></b>	la perméabilité est le rapport
<b><i>(K<sup>+</sup>)</i></b>	Potassium
<b><i>Km</i></b>	Kilomètre
<b><i>Km<sup>2</sup></i></b>	Kilomètre carré.
<b><i>(L)</i></b>	Liquide
<b><i>L :</i></b>	Pouvoir évaporant.
<b><i>M</i></b>	moyenne des minimas
<b><i>M</i></b>	Mètre
<b><i>Mm</i></b>	Millimètre maximale
<b><i>mm</i></b>	Millimètre minimale
<b><i>(mm/an)</i></b>	Millimètre par année
<b><i>M</i></b>	moyenne des maximas du mois le plus chaud (degrés/Kelvin)
<b><i>M</i></b>	Mai
<b><i>M</i></b>	Mars
<b><i>Moy</i></b>	Moyenne
<b><i>m<sup>3</sup></i></b>	Mètre cube.
<b><i>m<sup>2</sup>/s</i></b>	Mètre carré par seconde

<i>Méq</i>	Milliéquivalent
<i>mg/l</i>	Milligramme par litre
<i>Mg<sup>+</sup></i>	Magnésium
<i>MgCO<sub>3</sub></i>	Magnésite
<i>M (°K)</i>	Température Maximale par kelvin
<i>m (°K)</i>	Température minimale ou Kelvin
<i>n</i>	Pearson
<i>N</i>	November
<i>No</i>	Nomber
<i>Na<sup>+</sup></i>	Sodium
<i>Na Cl</i>	Chlore sodium
<i>NH<sub>4</sub><sup>+</sup></i>	Ammonium
<i>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></i>	Nitrates
<i>Nov</i>	Novembre
<i>NPK</i>	Azote, Phosphate, Potassium
<i>Oct.</i>	Octobre
<i>OMS</i>	L'organisation mondiale de la santé
<i>ONM</i>	Office Nationale de Météorologie.
<i>P (mm)</i>	précipitations
$(\bar{P})$	la pluviométrie annuelle moyenne
<i>pH</i>	potentiel Hydrogène
<i>Q</i>	quotient pluviométrique Q.
<i>(qi)</i>	l'évaluation de la qualité basée sur la concentration du paramètre ième
<i>R</i>	ruissellement
<i>R<sup>ces</sup></i>	<b>Ressources</b>
<i>r Ca</i>	<b>Concentration de Calcium</b>
<i>RFU</i>	RFU (réserve facilement utilisable)
<i>RGPH</i>	Recensement Général de la Population et de l'Habitat
<i>r Mg</i>	Concentration en magnésium en méq/l.
<i>RU</i>	Réserve utile
<i>S</i>	Surface de la zone (m <sup>2</sup> )
<i>S</i>	Solide
<i>S</i>	le coefficient d'emmagasinement
<i>S.</i>	Septembre
<i>SAR</i>	Taux d'adsorption de sodium
<i>(S.A.U)</i>	Superficie Agricole Utile

<b><i>SIi</i></b>	Sous indice du paramètre nième;
<b><i>SO<sub>4</sub><sup>-2</sup></i></b>	Sulfates
<b><i>T</i></b>	Transmissivité
<b><i>T</i></b>	Température moyenne annuelle en °C.
<b><i>TDS</i></b>	Total Dissolved Solids
<b><i>TH</i></b>	Titre hydrotimétrique (dureté de l'eau)
<b><i>TP</i></b>	Température
<b><i>UTM</i></b>	Coordonnées UTM
<b><i>VR</i></b>	
<b><i>W</i></b>	Volume d'eau emmagasiné (m <sup>3</sup> ).
<b><i>Wi</i></b>	Poids relatif
<b><i>WQI</i></b>	Indice de la qualité de l'eau –water Quality Index
<b><i>X (m)</i></b>	Les cordonné
<b><i>Y (m)</i></b>	Les cordonné



# *Introduction*

## *Générale*

### **Introduction générale :**

Sur notre planète Terre, l'eau douce accessible correspond à environ 10 % du volume total d'eau douce, soit environ 0,26 % de l'hydrosphère. L'eau souterraine représente la fraction de la ressource en eau la plus importante avec 96 % ; d'où l'intérêt majeur de la préserver contre toute menace de dégradation (Haied N., 2008).

"L'eau est essentielle à la vie et au bien-être. C'est pourquoi, elle a besoin d'être protégée, traitée et économisée". Aujourd'hui, la qualité de l'eau et de l'environnement nous concerne tous. La qualité de l'eau est donc prioritairement une exigence de santé (Khelaifa S., 2015). L'eau est considérée comme un facteur primordial de développement (Mansouri S., 2016).

La qualité des eaux dans le monde a connu ces dernières années une grande détérioration, à cause des rejets industriels non contrôlés, de l'utilisation intensive des engrais chimiques dans l'agriculture ainsi que l'exploitation irrationnelle des ressources en eau. Ces derniers ont produit une modification chimique de l'eau en la rendant impropre aux usages souhaités (Belksir M.S. et al. 2016).

L'Algérie se trouve dans une région du monde la plus défavorisée en matière de disponibilité hydrique, pour cela la pénurie d'eau est devenue un problème décisif vécu par toutes les sociétés. En effet, l'accroissement des populations et le développement des agglomérations, des unités industrielles et des terres cultivées ont eu pour corollaire une dégradation de la qualité des eaux souterraines et une baisse très significative des réserves qui représentent parfois les seules ressources d'eau pour l'alimentation des populations (Sadoune A., 2012).

La nappe libre du massif dunaire de Bouteldja est considérée comme l'un des principaux aquifères de la région ce qui nous a conduit à focaliser notre étude sur l'évaluation qualitative des eaux souterraines de cette nappe.

Ce travail de recherche s'articule autour d'une introduction et une conclusion générale et quatre chapitres.

Le **premier chapitre** dédié à une synthèse sur la situation géographique, le cadre physique et le cadre géologique de la zone d'étude.

Le **deuxième chapitre** consacré à l'étude Hydroclimatologique, en déterminant les paramètres du bilan hydrique, ainsi que d'avoir une idée sur l'hydrologie de la région d'étude.

Le **troisième chapitre** s'intéresse à la définition de la géométrie ainsi que la détermination des caractéristiques hydrodynamiques de la nappe du massif dunaire et les principaux aspects de l'écoulement des eaux souterraines.

Le **Quatrième chapitre** traite la chimie des eaux de la nappe (l'hydrochimie) à partir des analyses des éléments chimiques dans le but de les comparer avec les standards de l'OMS, de déterminer le faciès chimique dominant et son origine à l'aide de différents diagrammes, de déterminer l'origine de la minéralisation à l'aide de l'ACP et de déterminer la potabilité et l'aptitude à l'irrigation par la détermination de l'indice de qualité de l'eau (WQI) et la méthode du SAR respectivement.



# ***CHAPITRE I***

## ***Présentation de la zone d'étude***

## I. 1. Localisation :

### I. 1. 1. Situation géographique de la région d'étude est :

Le massif dunaire de Bouteldja se situe dans la partie orientale de l'Algérie. Il contient deux nappes d'eaux souterraines à savoir la nappe libre et celle des graviers (captive, située au dessous de la première), la plus importante est la nappe libre. Se situant dans le territoire de la wilaya d'El Tarf, la nappe libre du massif dunaire s'étend sur près de 10 Km et couvrant une superficie de 160 km<sup>2</sup> environ (Saadeli. B 2007). La nappe fait partie du système aquifère Annaba – Bouteldja du Nord-Est Algérien, inclus dans le bassin versant de la Mafragh. La nappe du massif dunaire de Bouteldja est limité naturellement par :

- ✓ Au Nord par la mer méditerranée ;
- ✓ Au Sud par la chine argilo-gréseuse numidienne ;
- ✓ Au Sud- Est par les monts de la cheffia et d'El Kala ;
- ✓ A l'Ouest par Oued Mafragh ;
- ✓ A l'Est par le massif du djbel Koursi.

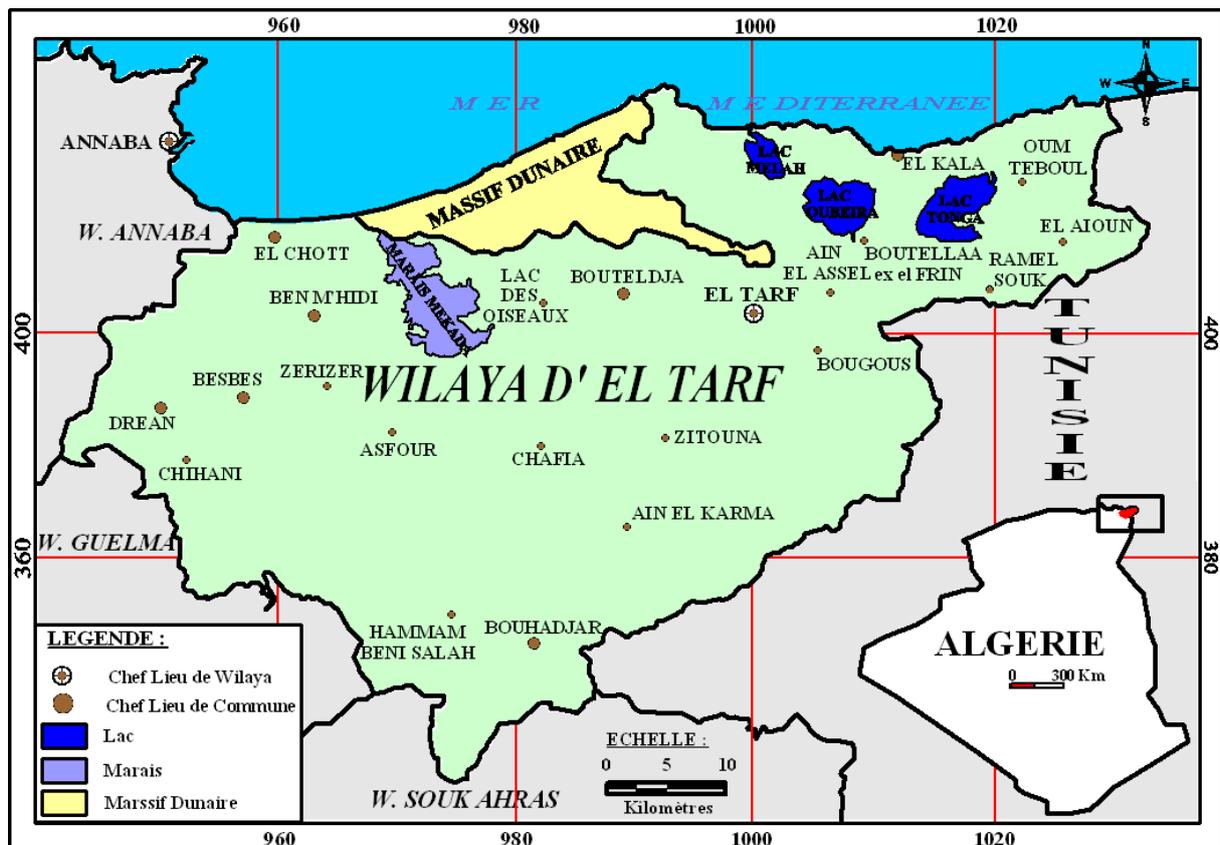


Figure 1 : Situation géographique du massif dunaire de Bouteldja (Haied N., 2015).

## I. 2. Géomorphologie :

Le bassin versant de la Mafragh dans lequel la région d'étude est inclus (figure 1) se caractérise par des unités géomorphologiques où le Quaternaire prédomine la partie avale Nord – Est et Nord – Ouest.

Le massif dunaire de Bouteldja est caractérisé par son étendu à partir de la mer Méditerranée jusqu'aux pieds des djebels Bourdim et Hajar Siah à l'Est (Ramdani, 1996). Les unités géomorphologiques constituant notre zone d'étude sont :

- Le complexe alluvial de la vallée de l'oued El Kébir Est, qui est caractérisé par une série de terrasses à faciès hétérogènes (sables, graviers, limons et surtout d'argiles).
- Les lacs et les marécages où leur présence est liée aux différentes phases d'assèchement des régions lacustres de l'Algérie orientale durant le Quaternaire. Ils sont dus principalement à la réduction progressive des surfaces lacustres plus un remplissage alluvionnaire intensif des régions avales, de nombreux oueds tributaires du bassin comblés surtout au niveau des dépressions internes par les transports solides des différents oueds. Les marécages de Mekada Mohacène et lac des oiseaux (figure 2), développés dans la basse vallée d'El Kébir Est, ils forment un delta commun aux principaux oueds drainant la zone.
- Les oueds représentés essentiellement par Bounamoussa à l'Ouest et Kébir-Est à l'Est (figure 2), deux grands cours d'eau rejoignent la mer à l'embouchure sous le nom de la Mafragh (exutoire unique).
- Les montagnes (figure 2), tel que les montagnes de la Cheffia qui surplombent la partie avale du bassin formant une barrière Est – Ouest. Leurs altitudes avoisinent les 450 m, avec la présence des massifs de 700 à 900 m d'altitude (djebel Bled Gherfie 996 m) à l'Ouest, et djebel Rhona 1202 m à l'extrême Est (frontière Algéro-Tunisienne). Les monts de la Cheffia sont caractérisés par les grés de la nappe Numidienne qui constitue le principal affleurement.
- Les collines qui sont développées à la limite des plaines, au niveau des terrasses déprimées. Au Nord – Est de Bouteldja, les collines sont représentées par Hadjar Siah et Djebel Bourdim avec des altitudes respectives de 175 et 177 m. Elles sont dominées par un faciès argilo-gréseux numidiens qui forment une limite étanche à la formation sous jacente (Mouchara, 2004).

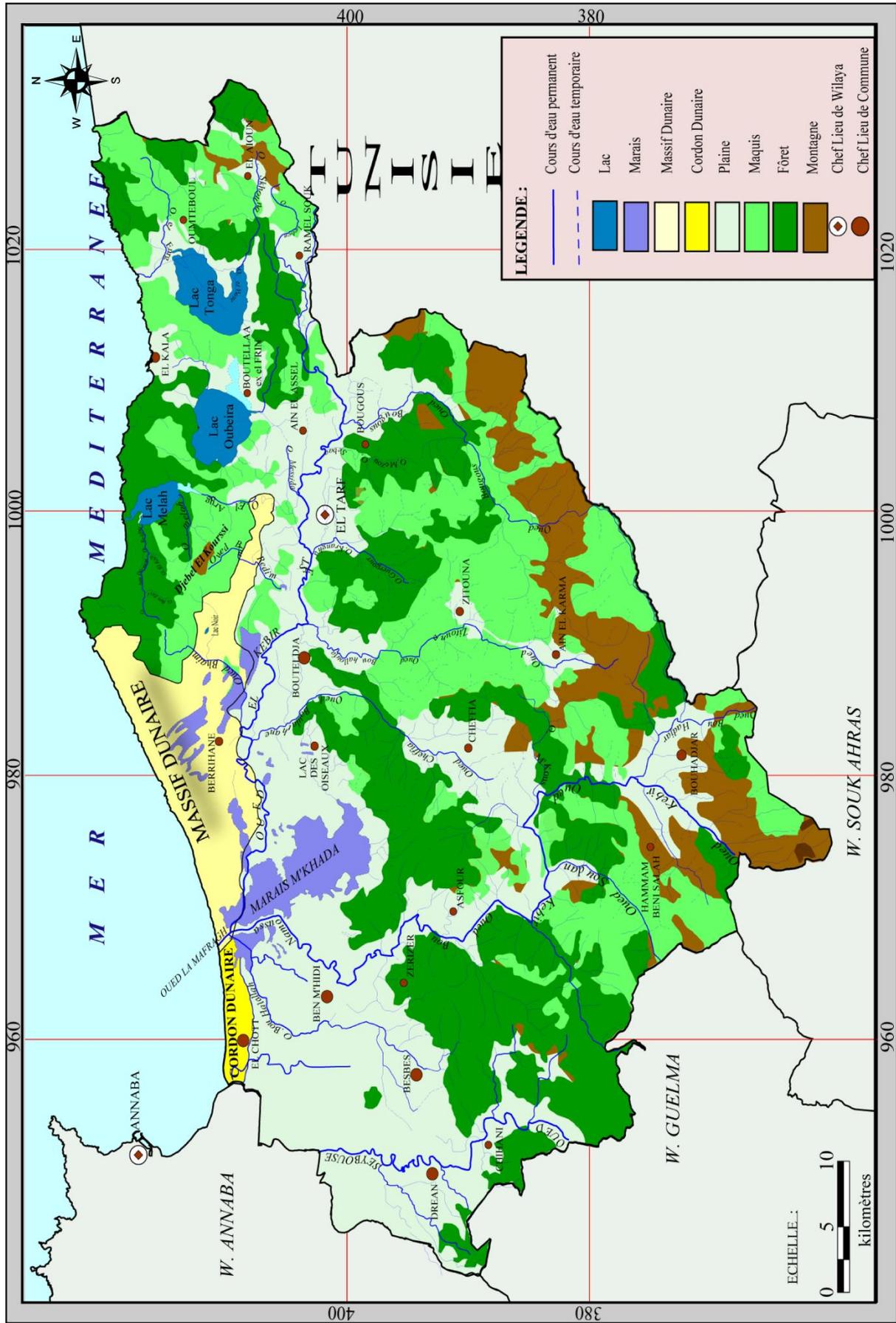


Figure 2 : Carte schématique des unités géomorphologiques dans la région d'El Tarf, (A.B.H. Mouchara. N ; 2004).

### I. 3. Couvert Végétale :

Ce couvert (figure 3) est représenté par une dominance des peuplements forestiers occupant une superficie de l'ordre de 167777 ha (60 % de la superficie de la wilaya d'El Tarf) selon le plan d'aménagement de la wilaya d'El Tarf, 2001. Cette superficie compte différents types des plantes avoisinant les 700 types. Il y a 63 % de ce patrimoine est représenté par divers peuplements, alors que 37% seulement sont constitués de maquis qui couvre les bas fond inter dunaire et à la surface des dunes au Nord - Ouest de la région (Sedrati, 2006).

**Tableau 1 : Peuplements et formations forestières de la wilaya d'El Tarf.**

<b>Espèces</b>	<b>Superficie en (ha)</b>	<b>Participation en (%)</b>
<b>Maquis</b>	62173	37.06
<b>Chênes liège</b>	59563	35.5
<b>Pin maritime</b>	18542	11.05
<b>Eucalyptus</b>	13047	7.78
<b>Chênes zeen</b>	6492	3.86
<b>Clairière</b>	4078	2.44
<b>Peuplier</b>	1278	0.76
<b>Oléastre</b>	1024	0.61
<b>Autre espèces</b>	850	0.51
<b>Alune</b>	730	0.43
<b>Total</b>	<b>167777</b>	<b>100 %</b>

### I. 4. Aperçu Socio-économique :

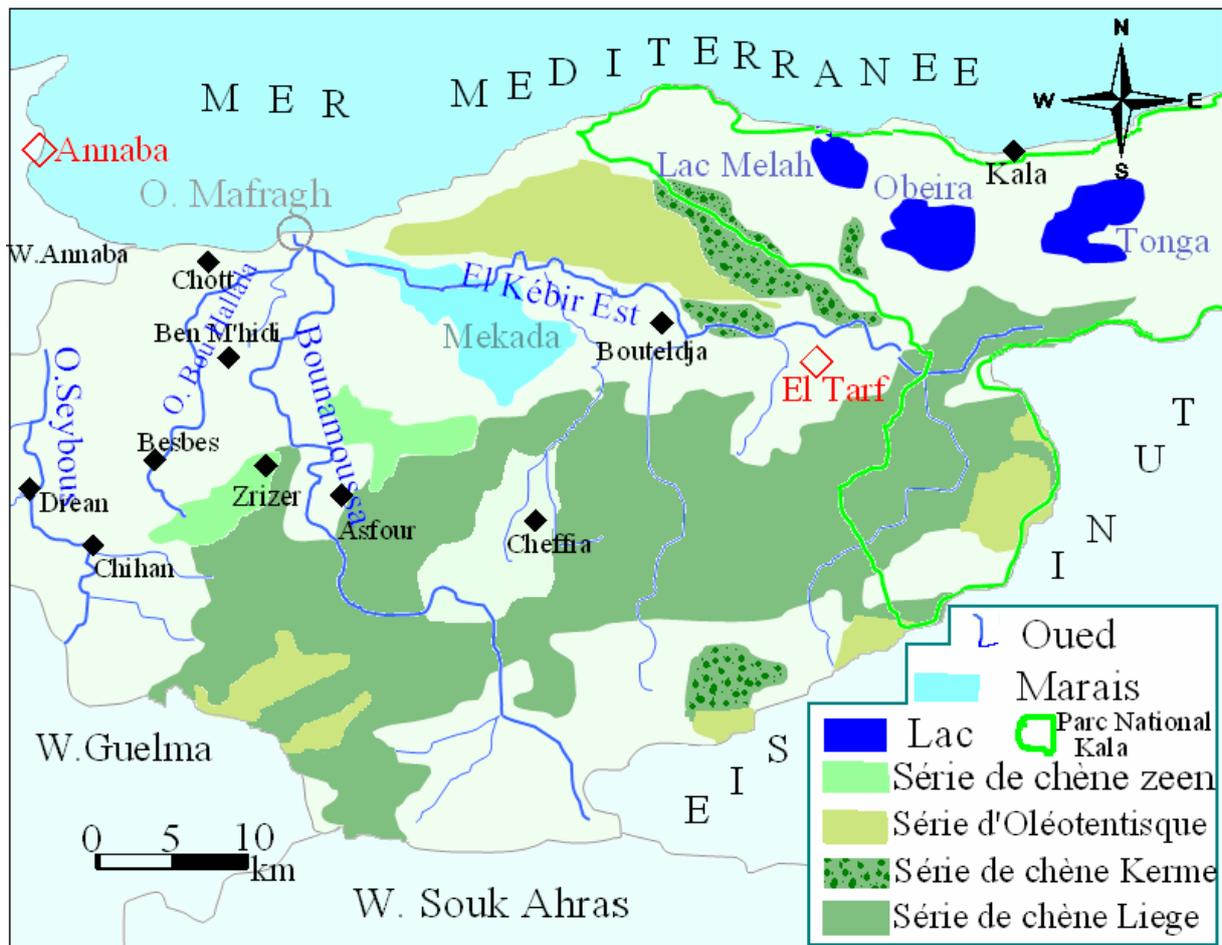
#### I. 4. 1. Population :

La wilaya d'El Tarf couverte majoritairement par le bassin versant de la Mafragh est occupée par une population de quatre cent huit mille quatre cinquante deux (408 452 RGPH 2008).

#### I. 4. 2. Agriculture :

Avec une superficie agricole totale de 84.031 ha, la wilaya d'El Tarf est connue par sa vocation agricole (Monographie d'El Tarf 2016). La superficie agricole est répartie comme suit :

- Superficie agricole utile (S.A.U) 74.173 ha, soit près de 88 % de la superficie agricole totale, dont 13.343 ha irriguée (18 % de la S.A.U).



**Figure 3 : Carte du couvert végétal dans la wilaya d'El Tarf (D'après le plan d'aménagement de la wilaya d'El Tarf, 2001 in Saadali B., 2007).**

- Pacages et parcours 8.518 ha, soit 10,13% de la superficie agricole totale.
- Terres improductives 1.340 ha, soit 02% de la superficie agricole totale.

Le potentiel productif agricole (S.A.U) est concentré à 20 % au niveau de la zone des plaines contre 76 % en zone de montagne.

En plus de sa richesse en terres agricoles, la wilaya d'EL-Tarf dispose d'un potentiel animal important, composé de 98,130 bovins, 162,830 ovins et 43,540 caprins.

Dans le domaine de l'aviculture, la wilaya dispose d'un effectif de 1058300 poulets et 10800 dindes dont 1018465 poulets commercialisés et 10800 dindes commercialisées.

### **I. 4. 3. La pêche :**

La flottille existante au niveau de la wilaya d'El Tarf au terme de l'année 2015, est estimée à 543 embarcations, dont 15 Chalutiers, 49 Sardiniers, 160 Petits métiers, 04 Corailleurs, 315 Plaisances, soit une augmentation de 492 embarcations par rapport à 1998.

La production halieutique enregistrée durant l'année 2015 est estimée à 3802.2 tonnes dont 3729.7 tonnes de poissons et 72.5 tonnes entre Crustacés, Mollusques et Squale / espadon. La quantité pêchée de poisson bleu représente plus de 92,26% (Monographie d'El Tarf 2016).

### **I. 5. Géologie :**

La zone d'étude fait partie la plus par bassin versant de la Mafragh. Du point de vue structure de la zone se divise du l'Oust en Est et Nord au Sud comme :

- Les massifs métamorphiques de l'Edough, formés de schistes cristallins ante-tertiaires et des roches éruptives tertiaires, recoupées par de nombreux filons métallifères.
- Le tell littoral (chaîne numidique) est caractérisé par des plis ouest-est, fort accentués. Il est formé de calcaires basiques et nummulitiques et est situé de part et d'autre des bombements cristallins primaires.
- Le tell inférieur comprenant la chaîne calcaire de Guelma et les collines de flysch argilo gréseux de la Numidie orientale.

### **I. 6. Stratigraphie :**

La stratigraphie des terrains du bassin versant de la Mafragh présente deux grands ensembles d'âge allant du Secondaire jusqu'au Quaternaire récent :

- Un ensemble constitué d'affleurements de bordure, caractérisé par des formations allant du Crétacé supérieur au Tertiaire.
- Un ensemble, généralement quaternaire, représenté par les formations dunaires et par les produits de comblement de la dépression alluviale de la plaine. Cet ensemble est inclus dans la zone de notre étude.

### I. 6. 1. Les formations Secondaires :

- **Crétacé supérieur (Sénonien)** : le seul étage, représenté dans le Secondaire (figure 5), occupe presque la totalité des monts de la Cheffia. Il est caractérisé par un faciès schisteux plus ou moins argileux. Parfois il s'agit aussi de passage de calcaire avec alternance de marnes ou de microbrèches épais de 5 à 10 cm. Quelques forages de reconnaissances, répartis dans la cuvette de la Cheffia et réalisés dans le cadre d'une étude géologique au droit de l'emplacement du barrage et de la galerie d'amenée, ont recoupé ces faciès.

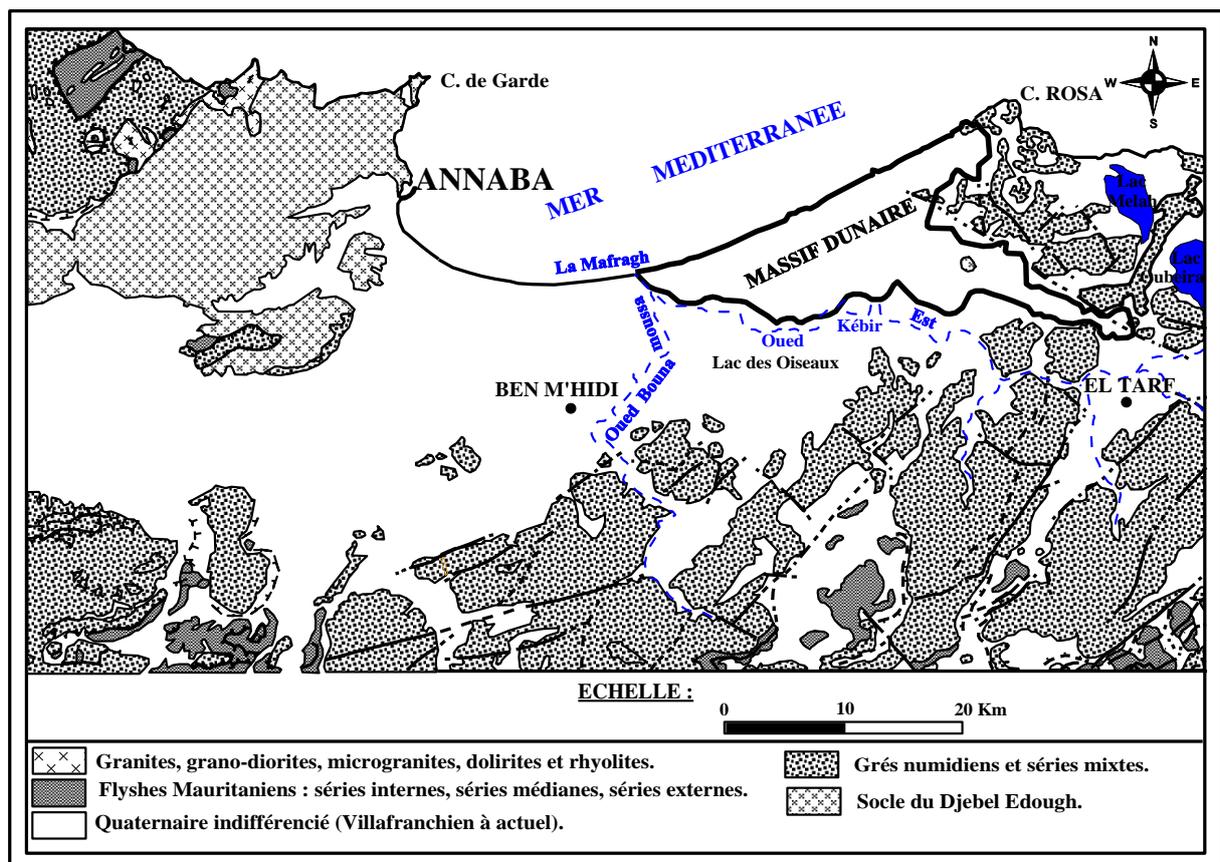


Figure 4: Extrait de la carte géologique et structurale au 1/500 000 de la chaîne alpine de l'Algérie orientale et des confins Algéro-Tunisiens (J. M. Vila, 1978, modifiée par Haied N., 2015).

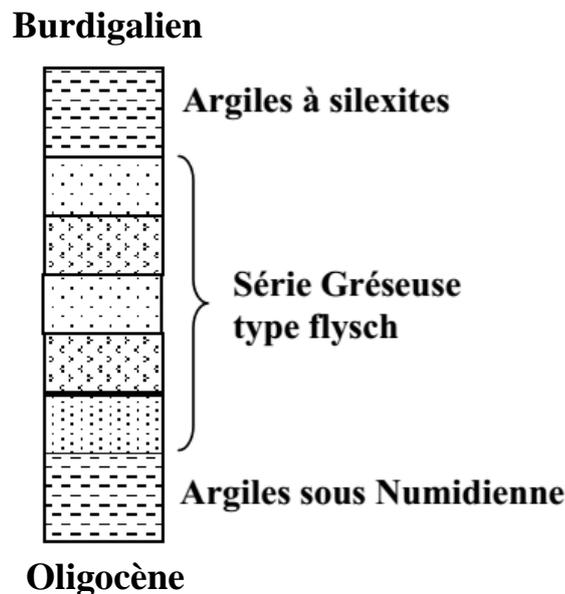
### I. 6. 2. Les formations Tertiaires :

- **Eocène supérieur (Oligocène)** : il est composé par des argiles numidiennes qui occupent les bas fonds de la plus grande partie de la zone et qui se rencontrent dans toute la partie Sud de la zone d'étude (les Monts de la Cheffia) au Sud-Est de Bouteldja. Localisé au niveau des Djebels Koursi, Bourdim, Hadjar Siah, Oum El Agreb. Ce faciès argileux, de couleur verdâtre, brunâtre ou bleu sombre, contient parfois des intercalations de lentilles gréseuses

pouvant aller d'un cm à 30 cm d'épaisseur. Localement, il est quartziteux et renferme parfois de petits nodules de pyrites. L'ensemble de ces formations peut atteindre plus de 100 m d'épaisseur. Ces argiles, forment la base de la série numidienne et sont datées de l'Oligocène moyen à supérieur (Lahondère, 1987).

Au dessus de ces formations argileuses viennent se superposer les grès numidiens en position allochtone d'âge aquitaniens (H. Rouvier in Ramdani, 1996), à granulométrie bien réglée (du grain grossier au grain fin).

Ces grès de nature quartzreuse, à grains de différente taille consolidés de couleur rouge à jaunâtre sont épais de près de 150 m, et bien représentés au Sud de la région d'étude, à l'Est dans le djebel Bourdim et au Nord-Est dans le Djebel Koursi. Ils entourent les formations alluvionnaires et surtout dunaires.



**Figure 5 : Log stratigraphique.**

### **I. 6. 3. Quaternaire :**

Les formations dunaires et alluvionnaires d'âge quaternaire constituent la roche réservoir du système aquifère de Bouteldja.

**I. 6. 3. 1. Quaternaire ancien :** il est caractérisé par des molasses calcaires marines et dunaires, d'âge sicilien (Joleaud, 1936).

**I. 6. 3. 2. Quaternaire moyen :**

- **Pléistocène ancien** : correspond aux alluvions de hautes terrasses, formée de sables et de cailloux roulés.
- **Pléistocène moyen** : correspond aux alluvions de moyennes terrasses assez caillouteuses et plus ou moins argileuses à la base avec une texture fine au haut.
- **Pléistocène récent** : correspond aux alluvions de basses terrasses qui sont moins sableuses que limoneuses.

**I. 6. 3. 3. Quaternaire récent** : il est composé par des formations récentes et actuelles du lit majeur de l'oued et est constitué de matériaux variés à savoir : limons, sables, cailloux et argiles.

- des aires lacustres dominées par un faciès sablo limoneux.
- des formations sableuses d'origine marine. Il s'agit d'un cordon dunaire qui affleure de la Mafragh jusqu'à El Kala.

**I. 7. Pédologie :**

La zone d'étude se compose de trois types de sols qui sont :

- **Les sols peu évolués d'apport alluvial** : ce sol est réparti principalement dans les canaux des vallées alluviales, il se caractérise par une qualité et une rugosité de texture avec une grande hétérogénéité dans le profil, souvent la structure est lamellaire aux premiers centimètres, polyédrique sub-angulaire dans l'obscurité, limitée par une croûte de matière organique de mauvaise qualité sur un substrat rocheux dur ou mou (20 cm) avec un pourcentage élevé d'éléments grossiers et il a une forte charge de roche avec un faible pourcentage de matière organique,

- **Les Vértisols** : ce sol est caractérisé par un ballon brun foncé et une grande quantité d'argile (pH) et la présence d'argile gonflée lui confère une grande capacité d'absorption de l'eau et la capacité de la maintenir. Avec une réserve utile de 180 mm à 80 cm d'épaisseur de sol, le calcio est un composant important du complexe absorbant. Les deux principales caractéristiques des Vértisols sont ; la déformabilité liées au niveau d'hydratation et la très faible conductivité hydraulique.

- **Les sols halomorphes** : ce sol s'est formé sur le limon du Delta et a des propriétés hydromorphiques, ce sol se caractérise par l'abondance des teneurs en sels de Duban qui se déposent à la surface de la Terre pendant la saison sèche se trouvent principalement dans les zones de marécages et de lacs.

### **I. 8. Conclusion :**

D'après la présentation de la zone d'étude il ressort les points suivants :

- ❖ La région d'étude se localise dans la partie orientale de l'Algérie, se situant dans le territoire de la wilaya d'El Tarf.
- ❖ La géomorphologie démontre la dominance du Quaternaire dans la partie avale Nord-Ouest et Nord-Est.
- ❖ La couverture végétale représente 60% de la superficie de la wilaya d'El Tarf.
- ❖ Stratigraphiquement, les formations géologiques sont d'âge allant du secondaire jusqu'au quaternaire récent.



## ***CHAPITRE II***

### ***Hydroclimatologie***

## II. 1. Introduction :

Ce chapitre s'intéresse à l'étude hydro-climatologique qui est importante dans toute approche hydrogéologique et hydro-chimique, car elle permet la compréhension des mécanismes d'alimentation et de circulation des eaux souterraines et ainsi de comprendre les polluants qui peuvent s'infiltrer par le biais de l'infiltration efficace vers la nappe du massif dunaire de Bouteldja. Ça permet d'avoir une idée sur la répartition des différents paramètres du bilan hydrologique notamment, les précipitations (P), l'évapotranspiration réelle (ETR), le ruissellement (R), et surtout l'infiltration (I).

## II. 2. Caractérisation du climat :

Cette étude a été grâce aux données climatiques recueillies des services de l'ONM Annaba des stations climatiques dont les caractéristiques sont représentées dans le tableau 2 et d'une période d'observation de dix (10) ans (2011 – 2021).

**Tableau 2 : Caractéristiques des stations de mesure.**

Stations	Altitude (m)	Coordonnées UTM		Période d'observation
		X	Y	
Salines	03	955.800	403.802	2011-2021
Ben M'hidi	07	961.620	397.300	
Boutheldja	25	989.600	400.650	

Source : ONM, 2022.

### II. 2. 1. Diagramme ombrothermique :

Il représente les variations mensuelles des températures et des précipitations. Il met en évidence les périodes sèches et humides.

Selon BAGNOULS et GAUSSEN (1953), un mois est considéré comme sec, si le total des précipitations (P) exprimées en millimètre est égal ou inférieur au double de la température moyenne (T) du mois, exprimée en degré centigrade ( $P \leq 2T$ ).

D'après ces diagrammes représentés par les Figure 7, 8 et 9, nous pouvons déduire deux périodes bien distinctes :

- Une saison sèche et chaude qui s'étale du mois d'Avril (pour la station des Salines) et du début du mois de Mai aux stations de Ben M'hidi et de Bouteldja jusqu'au mois de Septembre pour les trois stations.

- Une saison humide qui s'étend du mois de septembre (pour les trois stations) jusqu'au mois d'Avril pour la station des Salines et du début du mois de Mai pour les stations de Ben M'hidi et de Bouteldja.

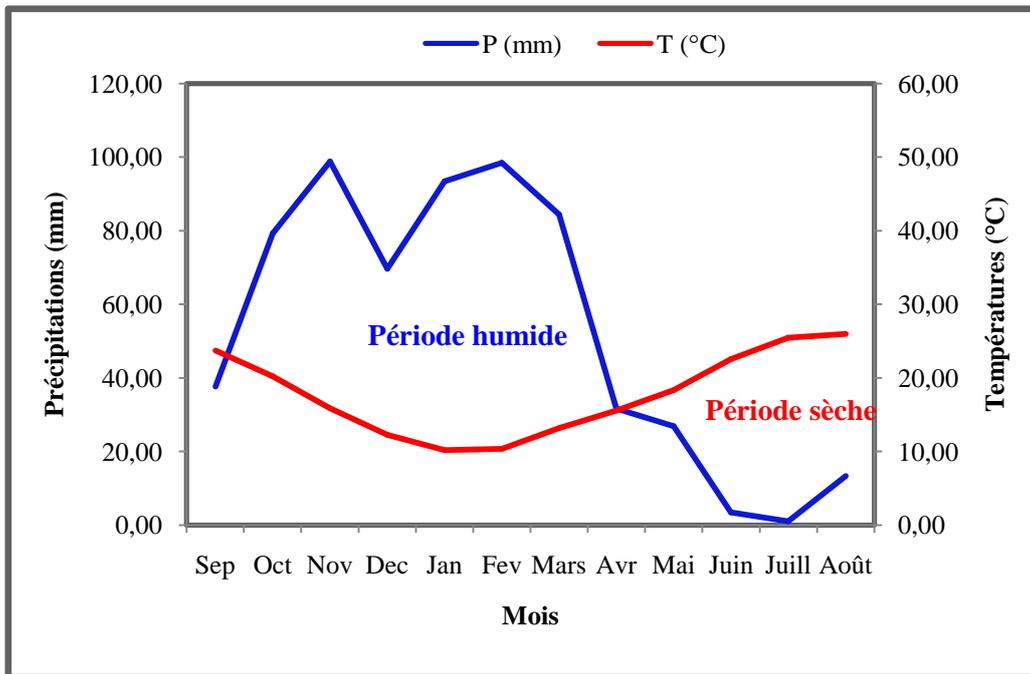


Figure 6 : Diagramme ombrothermique de la station des Salines (2011-2021).

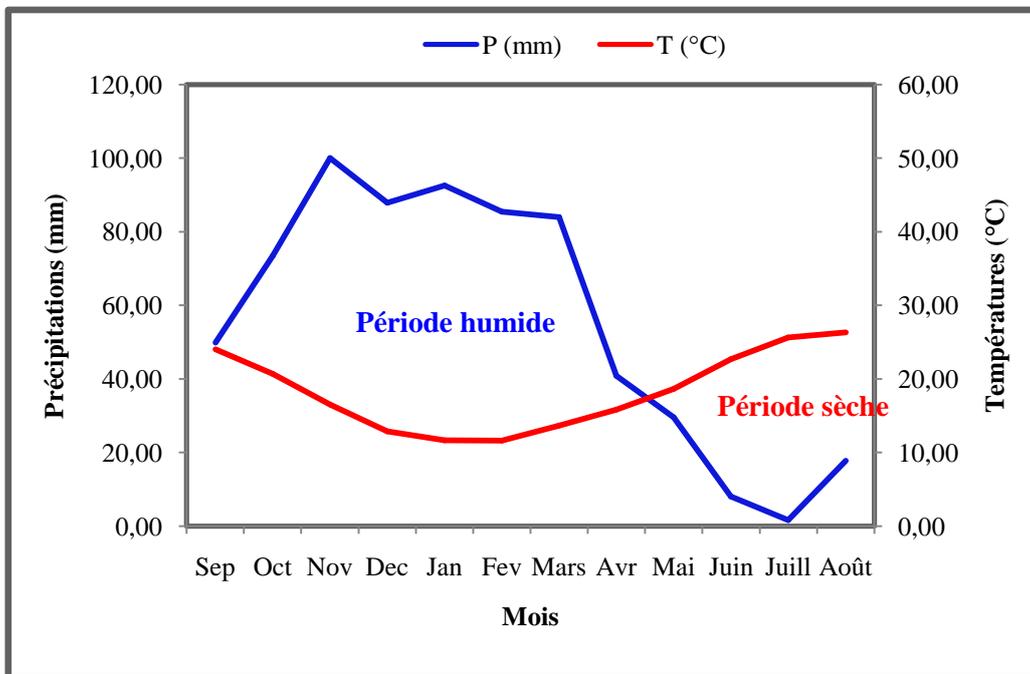


Figure 7 : Diagramme ombrothermique de la station de Ben M'hidi (2011-2021).

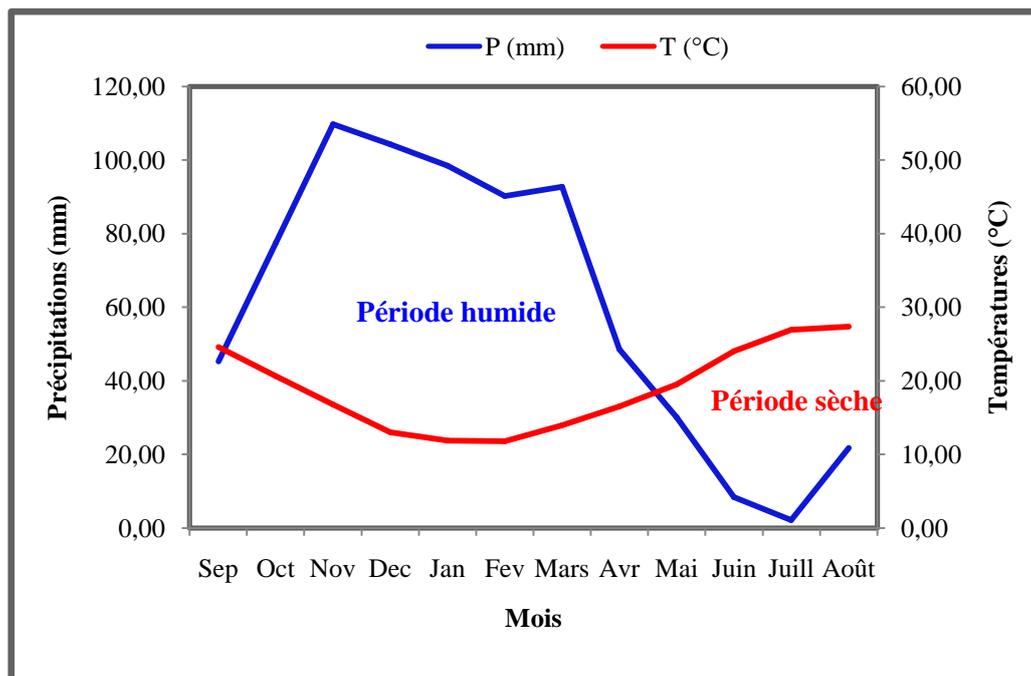


Figure 8: Diagramme ombrothermique de la station de Bouteldja (2011-2021).

## II. 2. 2. Climagramme de Louis Emberger :

Pour déterminer les types de climat, L. Emberger a proposé la détermination d'un quotient pluviométrique Q.

Ce dernier dépend des précipitations moyennes annuelles et des moyennes des températures minimales et maximales, respectivement des mois les plus froids et les plus chauds.

$$Q = \frac{p}{\frac{(M+m)(M-m)}{2}} \cdot 1000$$

Où :

P : précipitation moyenne annuelle (mm)

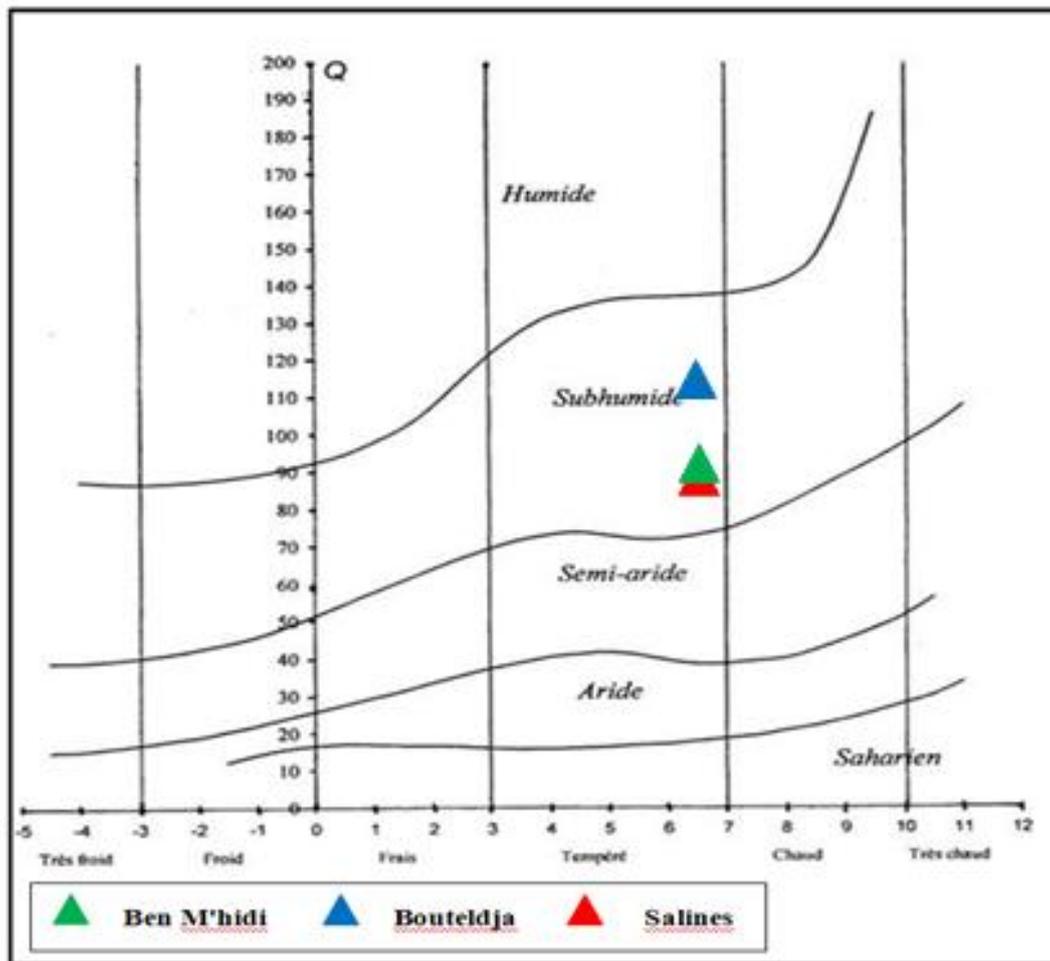
M : moyenne des maximas du mois le plus chaud (degrés/Kelvin)

m : moyenne des minimas du mois le plus froid (degrés/Kelvin) (in Bakria M., 2017).

L'application numérique pour les trois stations donne les résultats suivants :

Tableau 3 : Paramètres du climagramme d'Emberger.

Stations	Années	P (mm)	M (°K)	m (°K)	Q	Type de climat
Salines	2011/2021	647.97	304.67	279.53	88.23	Sub-humide
Ben M'hidi	2011/2021	670.82	304.63	279.53	91.50	Sub-humide
Bouteldja	2011/2021	729.08	304.56	279.42	99.32	Sub-humide



**Figure 9 : Climagramme d'Emberger des stations des Salines, de Ben M'hidi et de Bouteldja.**

Il est à noter que Q a été calculé pour suivre l'évolution du climat. Le rapport des stations météorologiques utilisées permet de dire que :

- L'étage climatiques des Salines, Bouteldja et de Ben M'hidi est Sub-humide à hiver Tempéré.

### II. 3. Les facteurs climatiques :

Les facteurs climatiques dans leur ensemble permettent d'expliquer quantitativement l'intensité et la variabilité des composantes du régime hydrologique, dans le temps et dans l'espace, en interaction avec les conditions physico-géographiques de l'écoulement.

#### II. 3. 1. Les précipitations :

Les précipitations sont un facteur essentiel caractérisant le climat d'une région et un élément principal du bilan hydrique. Les précipitations jouent un rôle prépondérant dans le comportement hydraulique des cours d'eaux et dans l'alimentation éventuelle des nappes

souterraines pour constituer à moyen terme des ressources mobilisables non négligeables (Haied N., 2015).

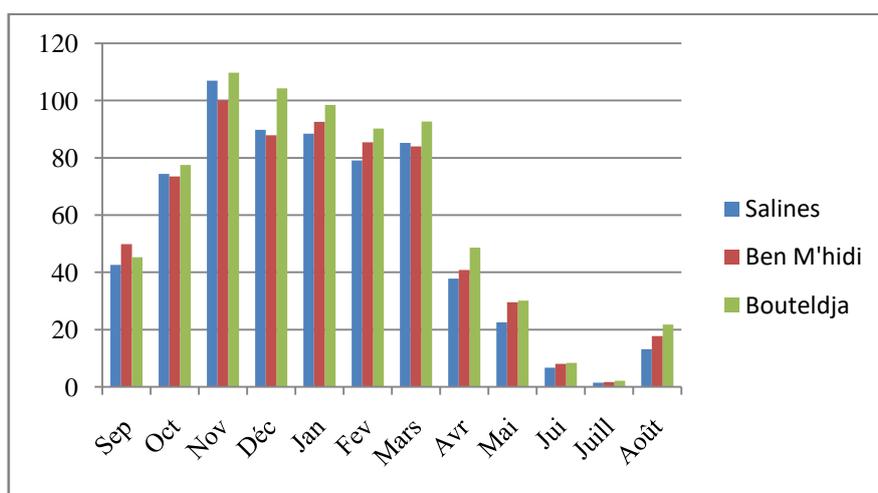
### II. 3. 1. 1. Les précipitations moyennes mensuelles :

Les précipitations moyennes mensuelles sont calculées à partir des données des hauteurs des précipitations de chaque mois sur une période de 10 ans (2012-2022) pour les trois stations. Les variations mensuelles et pluriannuelles des précipitations sont résumées dans le (Tableau 04) :

**Tableau 4 : Les précipitations moyennes mensuelles (mm).**

Mois Stations	Sept	Oct.	Nov.	Déc.	Jan	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Totale
Saline	19.81	27.23	43.84	34.79	54.20	36.70	37.49	34.81	23.93	7.19	1.35	2.59	323.92
Ben M'hidi	20.04	25.50	57.46	51.72	68.53	46.89	34.34	42.52	17.02	3.66	0.61	2.87	371.15
Bouteldja	31.11	40.61	50.49	36.30	55.17	43.56	43.63	43.41	34.14	18.59	3.96	10.21	411.18

L'histogramme des précipitations moyennes mensuelles (Figure 11) des stations des Salines, de Ben M'hidi et de Bouteldja montre une hétérogénéité importante des précipitations d'un mois à l'autre avec un maximum de l'ordre de 54.20 mm aux Salines, 68.53 mm à Ben M'hidi et 55.17 mm à Bouteldja durant le mois de Janvier, et avec un minimum de 1.35 mm à la station des Salines, 0.61 mm à la station de Ben M'hidi et 3.96 mm à la station de Bouteldja pendant le mois de Juillet.



**Figure 10 : Histogramme des précipitations moyennes mensuelles aux stations des Salines, de Ben M'hidi et de Bouteldja (2011-2021).**

### II. 3. 1. 2. Répartition saisonnière des précipitations :

Il est connu que le taux des précipitations diffère d'une saison à l'autre, pour déterminer les quantités nous sommes intéressés aux précipitations saisonnières (**Automne** : Septembre, Octobre, Novembre. **Hiver** : Décembre, Janvier, Février. **Printemps** : Mars, Avril, Mai. **Été** : Juin, Juillet et Août). Ce choix nous a amené aux constatations suivantes :

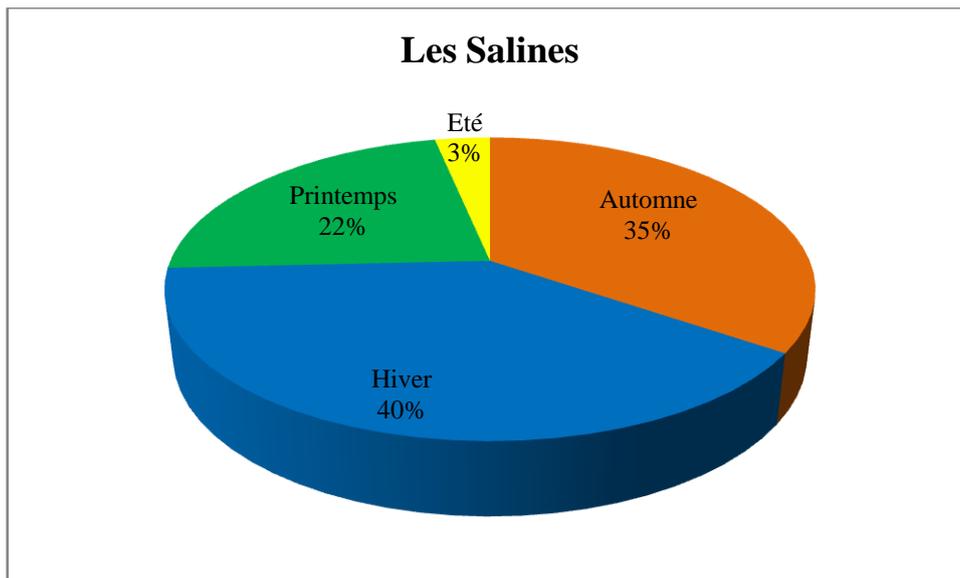
**Tableau 5 : Variation saisonnière des précipitations.**

Saisons Stations	Automne		Hiver		Printemps		Été		Totale	
	mm	%	Mm	%	Mm	%	mm	%	Mm	%
Salines	223.86	34.55	257.28	39.71	145.63	22.47	21.22	3.27	647.97	100
Ben M'hidi	223.3	33.29	265.97	39.62	154.37	23.01	27.35	4.08	670.82	100
Bouteldja	232.5	31.89	292.92	40.18	171.4	23.50	32.27	4.43	729.08	100

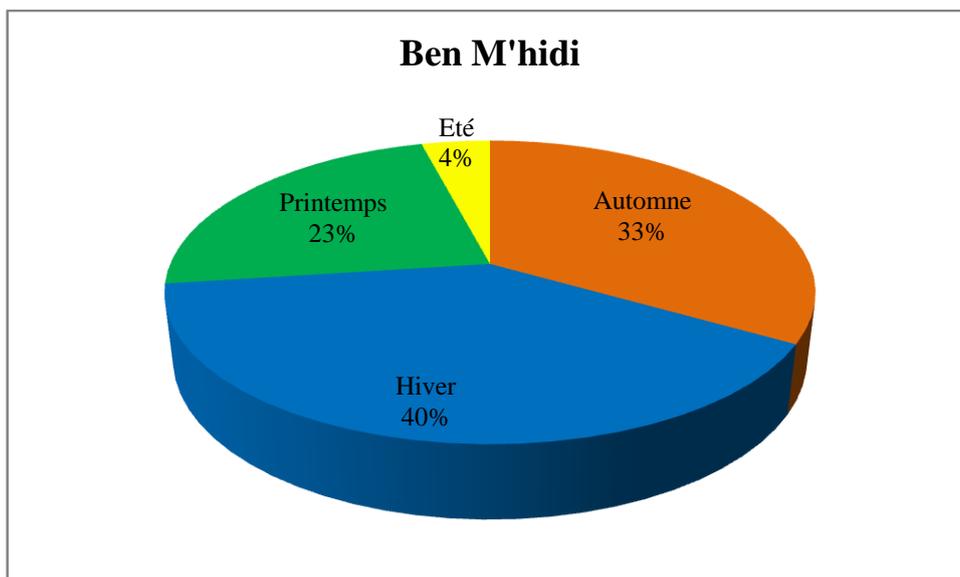
D'après le tableau 5 :

- En automne les précipitations sont de 223.86mm aux Salines, 223.3mm à Ben M'hidi et 232.5mm à Bouteldja.
- L'hiver est la saison la plus pluvieuse avec 257.28 mm aux Salines, 265.97mm à Ben M'hidi et 292.92mm à Bouteldja.
- Le Printemps avec un total de précipitations de l'ordre de 145.63mm aux Salines, 154.37mm à Ben M'hidi et 171.4mm à Bouteldja.
- En Été, la pluviométrie enregistrée est la plus faible par rapport aux autres saisons elle est de 21.22 mm aux Salines, 27.85mm à Ben M'hidi et 32.27mm à Bouteldja.

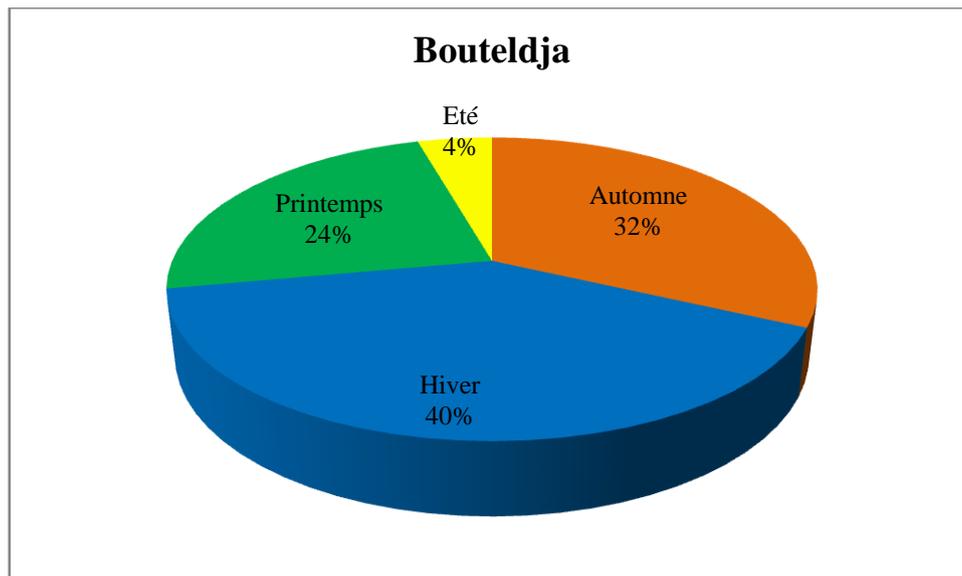
Ce qui implique que le climat est de type HAPE.



**Figure 11 : Répartition saisonnière des précipitations à la station des Salines (2011-2021).**



**Figure 12 : Répartition saisonnière des précipitations à la station de Ben M'hidi (2011-2021).**



**Figure 13 : Répartition saisonnière des précipitations à la station de Bouteldja (2011-2021).**

### II. 3. 1. 3. Les précipitations moyennes annuelles :

La variabilité interannuelle des précipitations est exprimée par le coefficient pluviométrique (CP). Ce paramètre est très important dans la détermination des années excédentaires et déficitaires. Il est obtenu par le rapport de la pluviométrie d'une année à la pluviométrie moyenne d'une série à une station donnée.

$$CP = \frac{P}{\bar{P}}$$

Le coefficient pluviométrique est en relation proportionnelle avec la pluviométrie. Nous avons deux cas :

- CP > 1: année excédentaire.
- CP < 1: année déficitaire (Haied N, 2015).

*Remarque :* la pluviométrie annuelle moyenne ( $\bar{P}$ ) est :

- Station des Salines :  $\bar{P}=647.97$  mm.
- Station de Ben M'hidi :  $\bar{P}=670.82$  mm.
- Station de Bouteldja :  $\bar{P}= 729.08$  mm.

**Tableau 6 : Précipitations moyennes annuelles et Coefficients pluviométriques de la station des Salines (2011-2021).**

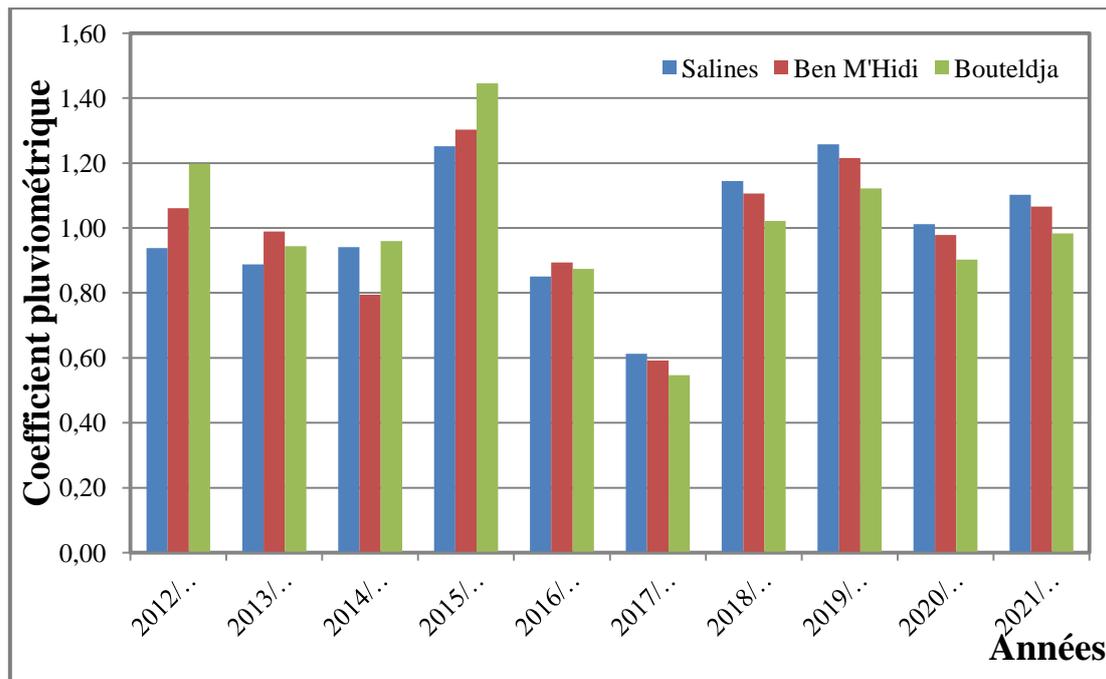
Années	Hauteur annuelle des précipitations P (mm)	Coefficient Pluviométrique	Les années déficitaires et excédentaires
2012/2013	608,00	0,94	Déficitaire
2013/2014	575,26	0,89	Déficitaire
2014/2015	610,10	0,94	Déficitaire
2015/2015	811,10	1,25	Excédentaire
2016/2017	551,24	0,85	Déficitaire
2017/2018	397,03	0,61	Déficitaire
2018/2019	741,90	1,14	Excédentaire
2019/2020	814,82	1,26	Excédentaire
2020/2021	655,79	1,01	Excédentaire
2021/2022	714,48	1,10	Excédentaire

**Tableau 7 : Précipitations moyennes annuelles et Coefficients pluviométriques de la station de Ben M'hidi (2011-2021).**

Années	Hauteur annuelle des précipitations P (mm)	Coefficient Pluviométrique	Les années déficitaires et excédentaires
2012/2013	711,7	1,06	Excédentaire
2013/2014	663,5	0,99	Déficitaire
2014/2015	532,9	0,79	Déficitaire
2015/2016	873,9	1,30	Excédentaire
2016/2017	599,85	0,89	Déficitaire
2017/2018	397,31	0,59	Déficitaire
2018/2019	742,42	1,11	Excédentaire
2019/2020	815,39	1,22	Excédentaire
2020/2021	656,25	0,98	Déficitaire
2021/2022	714,98	1,07	Excédentaire

**Tableau 8 : Précipitations moyennes annuelles et Coefficients pluviométriques de la station de Bouteldja (2011-2021).**

Années	Hauteur annuelle des précipitations P (mm)	Coefficient Pluviométrique	Les années déficitaires et excédentaires
2012/2013	873,6	1,20	Excédentaire
2013/2014	688,5	0,94	Déficitaire
2014/2015	700,1	0,96	Déficitaire
2015/2016	1054,3	1,45	Excédentaire
2016/2017	637,4	0,87	Déficitaire
2017/2018	398,57	0,55	Excédentaire
2018/2019	744,78	1,02	Excédentaire
2019/2020	817,99	1,12	Excédentaire
2020/2021	658,34	0,90	Déficitaire
2021/2022	717,26	0,98	Déficitaire



**Figure 14 : Les variations du coefficient pluviométrique aux stations des Salines, de Ben M'hidi et de Bouteldja (2011-2021).**

D'après l'histogramme (Figure 15 et les tableaux 6, 7 et 8), on peut remarquer que les années excédentaires sont égales aux années déficitaires pour les stations des Salines et de Ben M'hidi, alors que celle de Bouteldja est caractérisée par un nombre des années déficitaires supérieur aux années excédentaires sur les dix (10) années de la période d'observation.

### II. 3. 2. La Température :

La température est le deuxième facteur important qui conditionne le climat d'une région donnée. Paramètre qui intervient dans l'estimation des autres paramètres hydro-climatiques essentiellement évapotranspiration mais aussi contribue en grande partie dans la modification dans le caractère physico-chimique des eaux et des polluants. La température est un des facteurs caractérisant le climat d'une région et est important dans l'estimation de l'évapotranspiration. Elle dépend de plusieurs facteurs telle que l'altitude, où il est admis en Algérie selon SELTZER (1946) une diminution du gradient thermique de (-0,5 °c) chaque fois que l'altitude s'élève de plus de 100 m. Dans le cadre de la présente étude, nous avons utilisé les données des les stations des Salines, de Bouteldja et de Ben M'hidi sur une période de 10 ans, allant de (2011 à 2021) tel qu'il est mentionné dans le tableau 9.

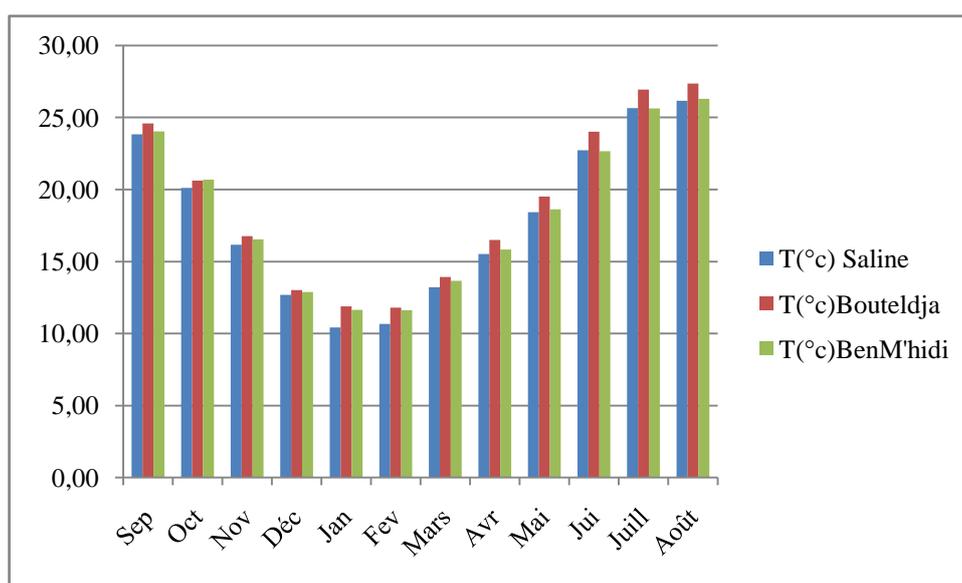
### II. 3. 2. 1. La température moyenne mensuelle :

La température moyenne mensuelle mesurée aux trois stations pour la période (2011-2021), sont présentées dans le tableau suivant :

**Tableau 9 : Températures moyennes mensuelles pour la période (2011-2021).**

Mois	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Mai.	Juin	Juill.	Août	Moy.
<b>Les Salines</b>	23.84	20.12	16.18	12.68	10.42	10.67	13.21	15.52	18.44	22.73	25.64	26.17	17.97
<b>Ben M'hidi</b>	24.03	20.68	16.53	12.88	11.64	11.62	13.66	15.84	18.63	22.67	25.62	26.30	18.34
<b>Bouteldja</b>	24.6	20.63	16.77	13.01	11.89	11.79	13.94	16.5	19.52	24.02	26.95	27.37	18.91

L'histogramme de la température moyenne mensuelle (figure 15) nous montre une différence assez proche des valeurs de la température entre les stations. Nous remarquons aussi que le mois le plus chaud est le mois d'Août (avec une température de l'ordre de 26.17 °C aux Salines et 26.30 °C à Ben M'hidi et 27.37 °C à Bouteldja). Le mois le plus froid est le mois de Janvier aux Salines avec 10.42 °C et Février avec une température de l'ordre de 11.62°C à Ben M'hidi et 11.79°C à Bouteldja.



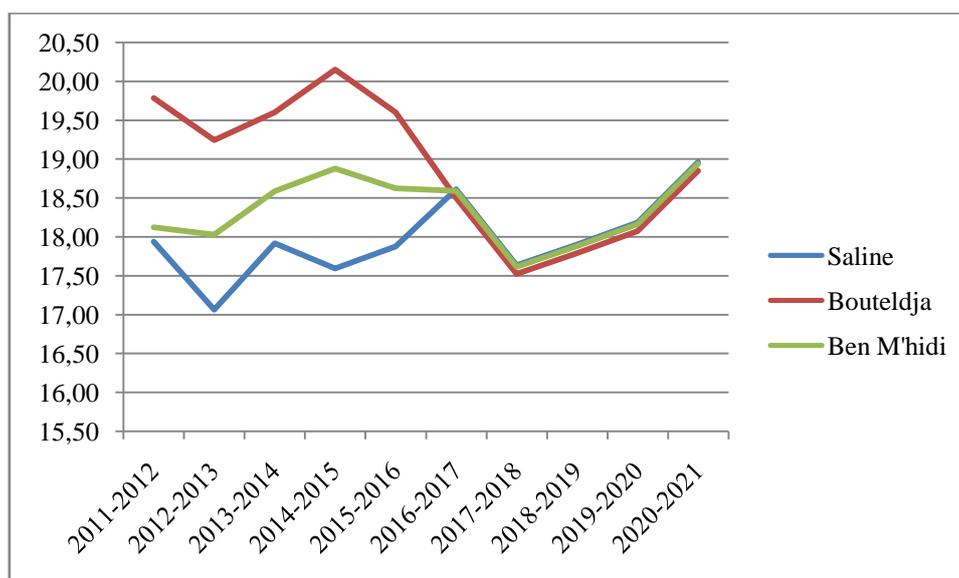
**Figure 15 : Histogramme des températures moyennes mensuelles aux stations des Salines, de Bouteldja et de Ben M'hidi (2011-2021).**

### II. 3. 2. 2. La température moyenne annuelle :

La température moyenne annuelle sur une période de 10 ans pour les trois stations de mesure est reportée dans le tableau 10 et sont respectivement de 17.96 °C aux Salines, 18.33 °C à Ben M'hidi, 18.74 °C à Bouteldja.

**Tableau 10 : Températures moyen annuelles (C°).**

Années	Salines	Ben M'hidi	Bouteldja
2009/10	17.94	18.12	19.78
2010/11	17.06	18.03	19.24
2011/12	17.92	18.59	19.60
2012/13	17.59	18.88	20.15
2013/14	17.88	18.62	19.60
2014/15	18.61	18.59	18.50
2015/16	17.63	17.61	17.52
2016/17	17.90	17.88	17.79
2017/18	18.18	18.16	18.07
2018/19	18.96	18.94	18.85
Moyenne	17.96	18.33	18.74



**Figure 16 : Courbe de variation des températures moyennes annuelles aux stations des Salines, de Bouteldja et de Ben M'hidi (2011-2021).**

#### II. 4. Estimation des paramètres du bilan hydrique :

Le bilan hydrique est établi pour un lieu et une période donnés par comparaison entre les apports et les pertes en eau dans ce lieu et pour cette période. Les apports d'eau sont effectués par les précipitations. Les pertes sont essentiellement dues à la combinaison de l'évaporation et la transpiration, que l'on désigne sous le terme d'évapotranspiration. Le bilan hydrique englobe l'étude des paramètres suivants :

- L'évapotranspiration.

- Les écoulements de surface ou ruissellement.
- L'infiltration

#### II. 4. 1. Définition de l'évapotranspiration :

L'évapotranspiration constitue un élément important du bilan hydrologique. Elle représente la quantité d'eau qui s'évapore et retourne vers l'atmosphère sous forme de vapeur.

Elle résulte de la combinaison de deux phénomènes l'un physique (évaporation) et l'autre biologique qui est lié au couvert végétal (transpiration) (Haied N, 2015).

#### II. 4. 2. Estimation de l'évapotranspiration réelle (ETR) :

L'ETR est la quantité d'eau généralement exprimée en mm évaporée ou transpirée par : le sol, les végétaux et les surfaces libres d'un bassin versant (mer, lac, cours d'eau...) et se manifeste de fait en conditions naturelles dans un site donné, compte tenu de la demande climatique de l'air et de la disponibilité en eau du sol (Haied N, 2015). Pour le calcul de L'ETR trois formules sont utilisées :

- ✚ Formule de Turc.
- ✚ Formule de Coutagne.
- ✚ Formule de Thornthwaite.

##### A- Formule de Turc :

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{(0,9 + \frac{P^2}{L^2})}} L = 300 + 25t + 0.05t^2$$

Avec :

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

**P** : Précipitation annuelle en mm.

**T** : Température moyenne annuelle en °C.

**L** : Pouvoir évaporant.

Les résultats sont portés dans le tableau suivant :

**Tableau 11 : ETR annuelle selon la méthode de Turc.**

Paramètres Stations	P (mm)	T (°C)	L	ETR (mm/an)
Saline	647.97	17.97	765.39	<b>539.97</b>
Ben M'hidi	670.82	18.34	775.31	<b>524.07</b>
Bouteldja	729.08	18.91	790.62	<b>416.61</b>

**B- Formule de Coutagne :**

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

Cette formule n'est valable que si la quantité des précipitations répond à la condition suivante :

$$\lambda = \frac{1}{8\lambda} < p < \frac{1}{2\lambda} \quad \text{pour} \quad \lambda = \frac{1}{0.8 + 0.1T}$$

Avec :

**ETR** : L'évapotranspiration réelle en m.

**P** : Précipitation moyenne annuelle en mm.

**T** : Température moyenne annuelle en °C.

Donc :

**Tableau 12 : ETR selon la méthode de Coutagne.**

Paramètres Stations	P (m)	T (°C)	$\lambda$	$\frac{1}{8\lambda}$	$\frac{1}{2\lambda}$	ETR (m/an)
Saline	0.64797	17.97	<b>0.385</b>	0.324	1.298	<b>0.485</b>
Ben M'hidi	0.67082	18.34	<b>0.379</b>	0.329	1.319	<b>0.499</b>
Bouteldja	0.72908	18.91	<b>0.371</b>	0.336	1.347	<b>0.531</b>

**II. 4. 3. Interprétation du bilan hydrique :**

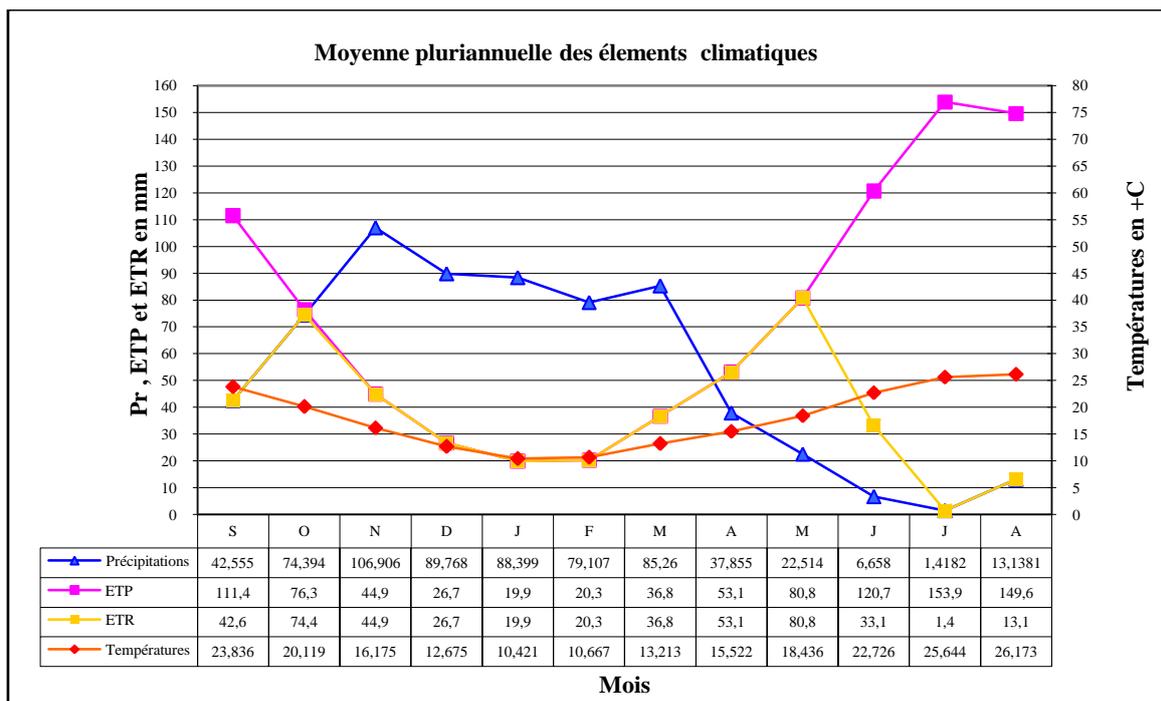
D'après le bilan hydrique pour les trois stations, selon la méthode de Thornthwaite, la RFU (réserve facilement utilisable) commence à se reconstituer à partir des mois d'Octobre (Bouteldja) de Novembre (les Salines et Ben M'hidi) pour atteindre son maximum 100 mm de Novembre et Décembre à Mars respectivement. Elle diminue à partir du mois de Mai jusqu'à ce qu'elle soit totalement épuisée au mois de Juin, caractérisant le déficit agricole

(DA) qui s'étale jusqu'au mois de Septembre à la station Bouteldja et au mois d'Octobre pour les stations des Salines et de Ben M'hidi.

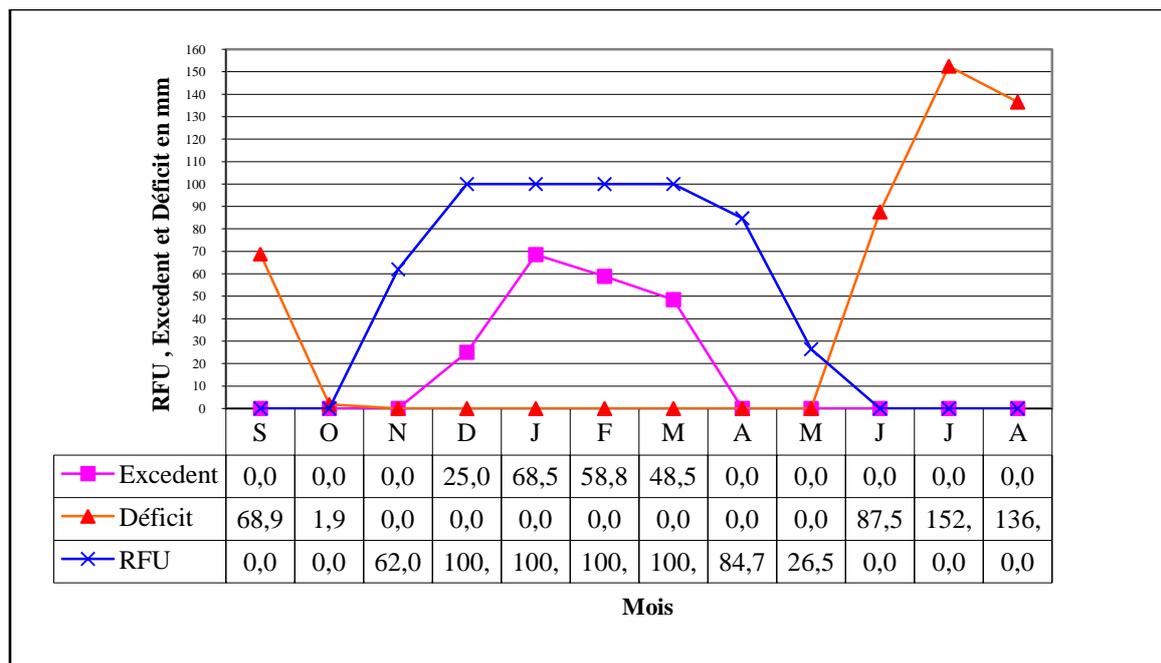
L'ETP atteint son maximum au mois de Juillet (153.9 mm aux Salines, 151.9 mm à Ben m'hidi et 164.5 mm à Bouteldja), son minimum au mois de Janvier pour les Salines (19.9 mm) et au mois de février aux autres stations (22.9 mm à Ben M'hidi et 21.8 mm à Bouteldja). L'Excédent à partir du mois de Décembre et atteint son maximum au mois de Janvier (68.5 mm aux Salines, 69.0 mm à Ben M'hidi et 75.8 mm à Bouteldja), et s'étale jusqu'au mois de Mars dans les trois stations.

**Tableau 13 : Bilan hydrique à la station de Saline pour la période (2011-2021).**

	<b>Tp</b>	<b>IT</b>	<b>CL</b>	<b>ETPC</b>	<b>Pr</b>	<b>BH</b>	<b>CH</b>	<b>VR</b>	<b>RU</b>	<b>ETPR</b>	<b>Def</b>	<b>Exc</b>
<b>S</b>	23,8	10,6	1,03	111,4	42,555	-68,9	-0,6	0,0	0,0	42,6	68,9	0,0
<b>O</b>	20,1	8,2	0,97	76,3	74,394	-1,9	0,0	0,0	0,0	74,4	1,9	0,0
<b>N</b>	16,2	5,9	0,86	44,9	106,91	62,0	1,4	62,0	62,0	44,9	0,0	0,0
<b>D</b>	12,7	4,1	0,81	26,7	89,768	63,0	2,4	38,0	100,0	26,7	0,0	25,0
<b>J</b>	10,4	3,0	0,87	19,9	88,399	68,5	3,4	0,0	100,0	19,9	0,0	68,5
<b>F</b>	10,7	3,1	0,85	20,3	79,107	58,8	2,9	0,0	100,0	20,3	0,0	58,8
<b>M</b>	13,2	4,4	1,03	36,8	85,26	48,5	1,3	0,0	100,0	36,8	0,0	48,5
<b>A</b>	15,5	5,6	1,10	53,1	37,855	-15,3	-0,3	-15,3	84,7	53,1	0,0	0,0
<b>M</b>	18,4	7,2	1,21	80,8	22,514	-58,3	-0,7	-58,3	26,5	80,8	0,0	0,0
<b>J</b>	22,7	9,9	1,22	120,7	6,658	-114,0	-0,9	-26,5	0,0	33,1	87,5	0,0
<b>J</b>	25,6	11,9	1,24	153,9	1,4182	-152,5	-1,0	0,0	0,0	1,4	152,5	0,0
<b>A</b>	26,2	12,3	1,16	149,6	13,138	-136,5	-0,9	0,0	0,0	13,1	136,5	0,0
<b>Annuel</b>	<b>18,0</b>	<b>86,2</b>		<b>894,4</b>	<b>648,0</b>	<b>-246,4</b>				<b>447,1</b>	<b>447,3</b>	<b>200,9</b>



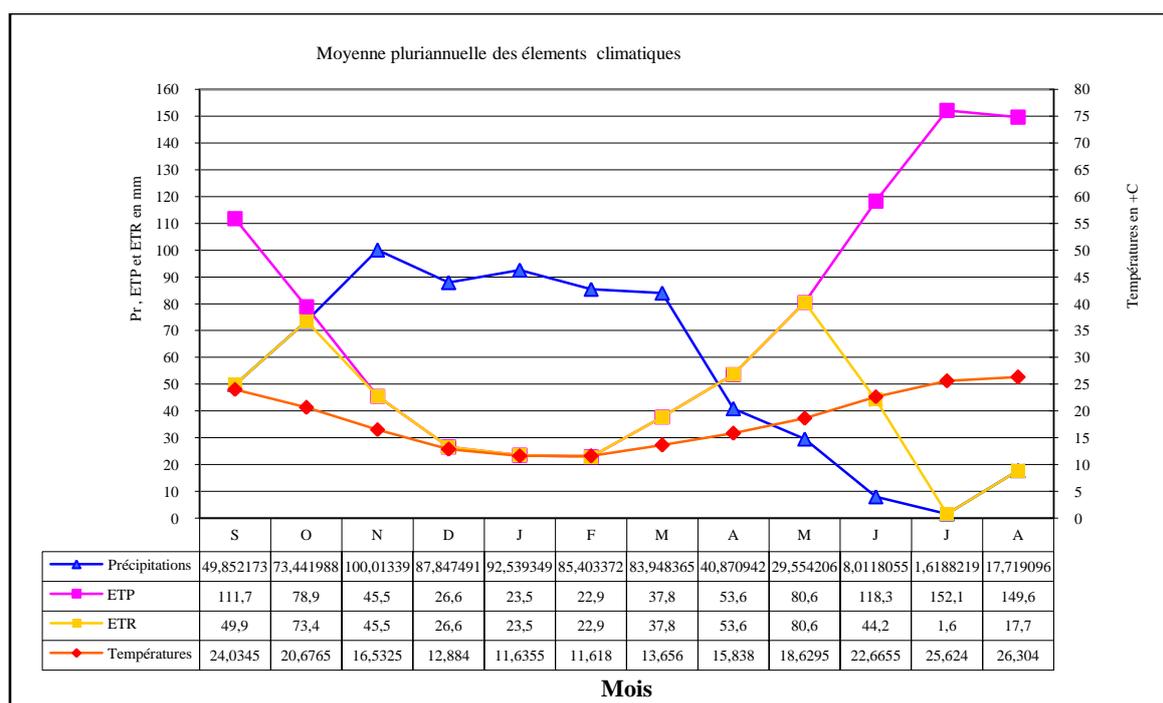
**Figure 17 : Moyennes pluriannuelles des éléments climatiques à la station des Salines pour la période (2011-2021).**



**Figure 18 : Diagramme de la variation de la RFU, du Déficit Agricole et de l'Excédent à la station des Salines (2011-2021).**

**Tableau 14 : Bilan hydrique à la station de Ben M'hidi pour la période (2011-2021).**

	<b>Tp</b>	<b>IT</b>	<b>CL</b>	<b>ETPC</b>	<b>Pr</b>	<b>BH</b>	<b>CH</b>	<b>VR</b>	<b>RU</b>	<b>ETPR</b>	<b>Def</b>	<b>Exc</b>
<b>S</b>	24	10.8	1.03	111.7	49.85	-61.8	-0.6	0.0	0.0	49.9	61.8	0.0
<b>O</b>	20.7	8.6	0.97	78.9	73.44	-5.4	-0.1	0.0	0.0	73.4	5.4	0.0
<b>N</b>	16.5	6.1	0.86	45.5	101.01	55.5	1.2	55.5	55.5	45.5	0.0	0.0
<b>D</b>	12.9	4.2	0.81	26.6	87.85	61.3	2.3	44.5	100.0	26.6	0.0	16.7
<b>J</b>	11.6	3.6	0.87	23.5	92.54	69.0	2.9	0.0	100.0	23.5	0.0	69.0
<b>F</b>	11.6	3.6	0.85	22.9	85.4	62.5	2.7	0.0	100.0	22.9	0.0	62.5
<b>M</b>	13.7	4.6	1.03	37.8	83.95	46.1	1.2	0.0	100.0	37.8	0.0	46.1
<b>A</b>	15.8	5.7	1.10	53.7	40.87	-12.8	-0.2	-12.8	87.2	53.7	0.0	0.0
<b>M</b>	18.6	7.3	1.21	80.6	29.55	-51.0	-0.6	-51.0	36.2	80.6	0.0	0.0
<b>J</b>	22.7	9.9	1.22	118.3	8.01	-110.3	-0.9	-36.2	0.0	44.2	74.1	0.0
<b>J</b>	25.6	11.9	1.24	151.9	1.62	-150.3	-1.0	0.0	0.0	1.6	150.3	0.0
<b>A</b>	26.3	12.3	1.16	149.6	17.72	-131.8	-0.9	0.0	0.0	17.7	131.8	0.0
<b>Annuel</b>	<b>18.3</b>	<b>88.5</b>		<b>901.0</b>	<b>671.8</b>	<b>-229.2</b>				<b>477.4</b>	<b>423.6</b>	<b>194.4</b>



**Figure 19 : Moyennes pluriannuelles des éléments climatiques à la station de Ben M'hidi pour la période (2011-2021).**

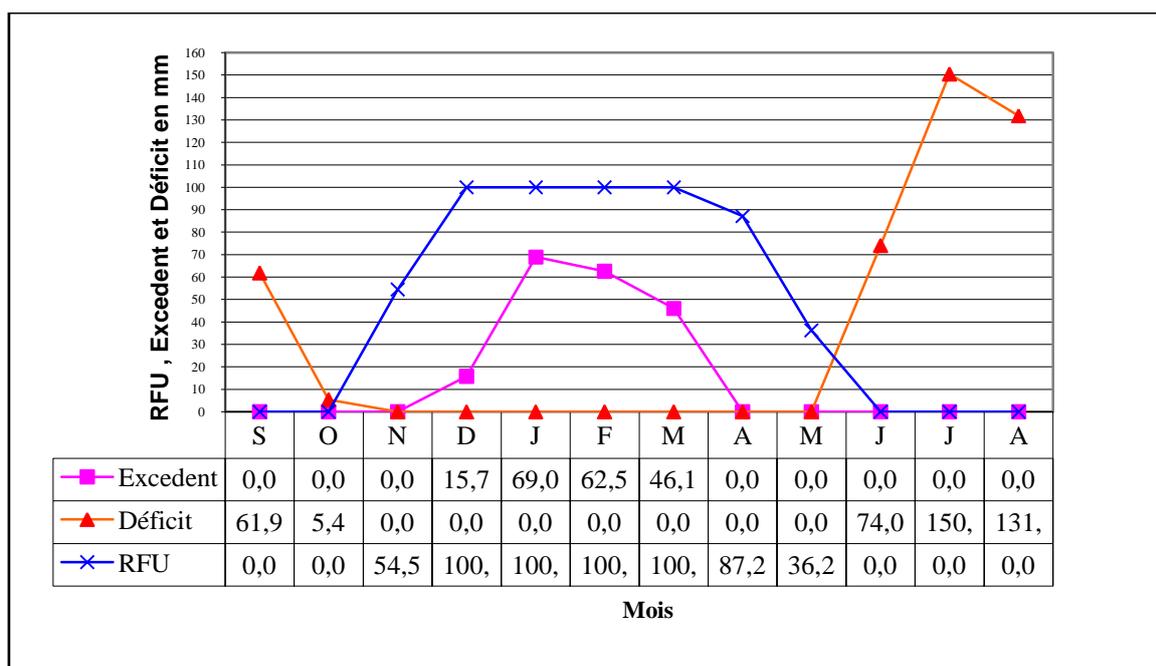
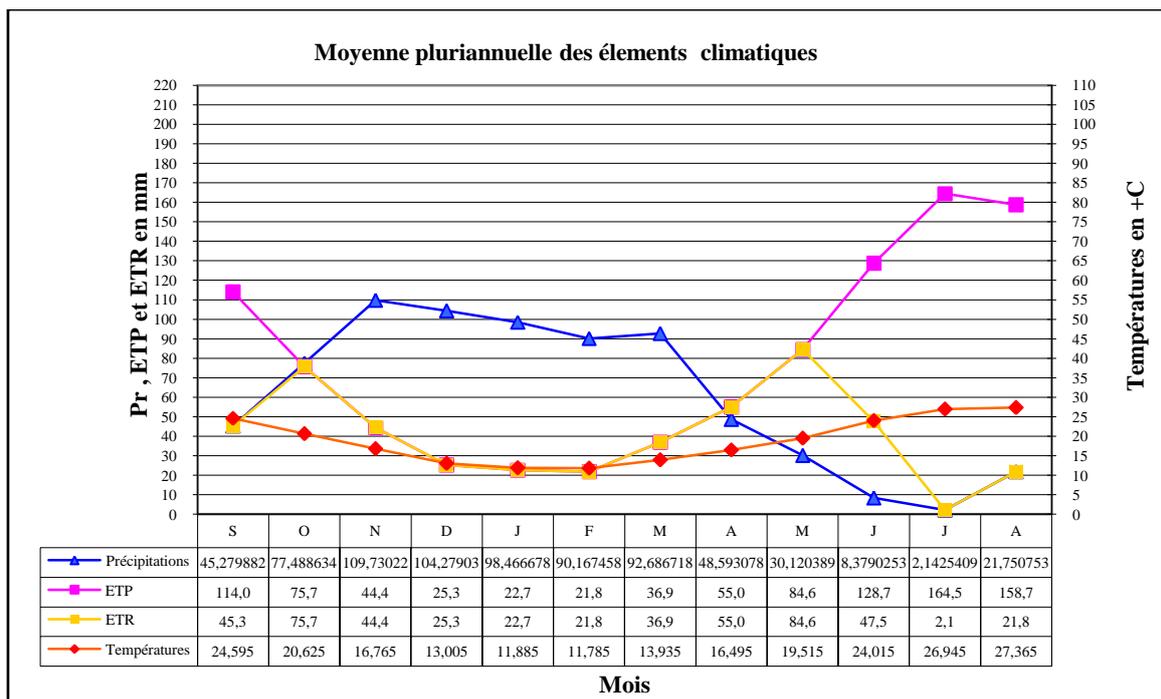


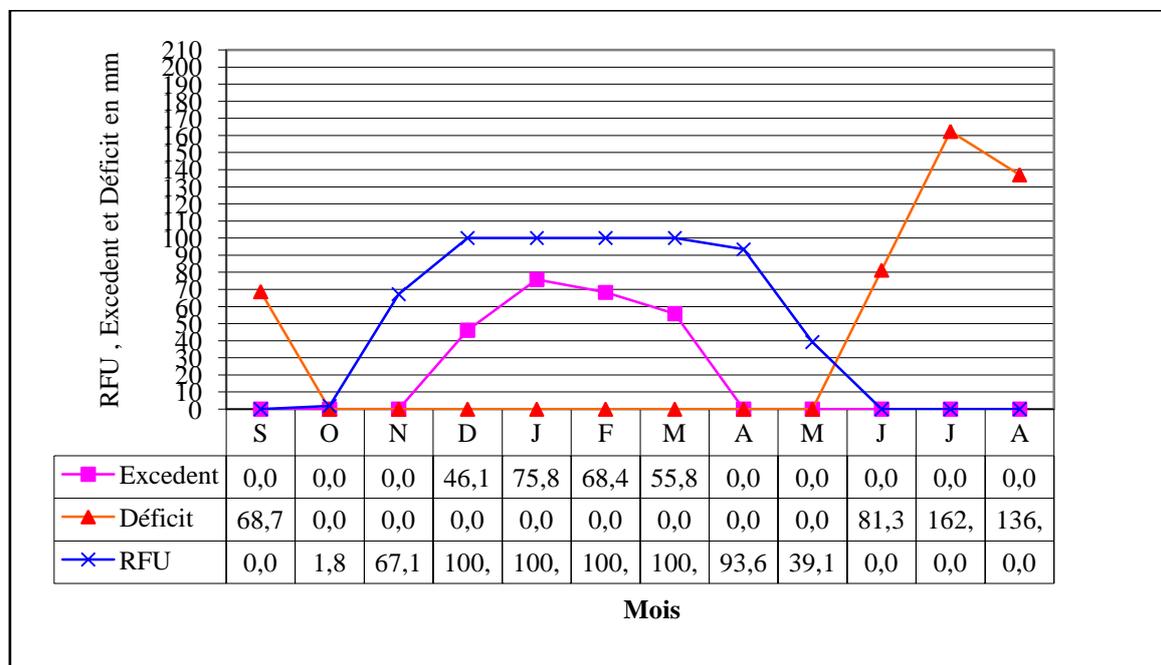
Figure 20 : Diagramme de la variation de la RFU, du Déficit Agricole et de l'Excédent à la station de Ben M'hidi (2011-2021).

Tableau 15 : Bilan hydrique à la station de Bouteldja pour la période (2011-2021).

	Tp	IT	CL	ETPC	Pr	BH	CH	VR	RU	ETPR	Def	Exc
S	24.6	11.2	1.03	114.0	45.28	-68.7	-0.6	0.0	0.0	45.3	68.7	0.0
O	20.6	8.5	0.97	75.7	77.49	1.8	0.0	1.8	1.8	75.7	0.0	0.0
N	16.8	6.2	0.86	44.4	109.73	65.3	1.5	65.3	67.1	44.4	0.0	0.0
D	13	4.3	0.81	25.3	104.28	79.0	3.1	32.9	100.0	25.3	0.0	46.1
J	11.9	3.7	0.87	22.7	98.47	75.8	3.3	0.0	100.0	22.7	0.0	75.8
F	11.8	3.7	0.85	21.8	90.17	68.4	3.1	0.0	100.0	21.8	0.0	68.4
M	13.9	4.7	1.03	36.9	92.69	55.8	1.5	0.0	100.0	36.9	0.0	55.8
A	16.5	6.1	1.10	55.0	48.59	-6.5	-0.1	-6.5	93.5	55.0	0.0	0.0
M	19.5	7.9	1.21	84.6	30.12	-54.4	-0.6	-54.4	39.1	84.6	0.0	0.0
J	24	10.8	1.22	128.8	8.38	-120.4	-0.9	-39.1	0.0	47.5	81.3	0.0
J	27	12.8	1.24	164.5	2.14	-162.4	-1.0	0.0	0.0	2.1	162.4	0.0
A	27.4	13.1	1.16	158.7	21.75	-137.0	-0.9	0.0	0.0	21.8	137.0	0.0
Annuel	18.9	93.0		932.4	729.1	-203.3				483.0	449.4	246.0



**Figure 21 : Moyennes pluriannuelles des éléments climatiques à la station de Bouteldja pour la période (2011-2021).**



**Figure 22 : Diagramme de la variation de la RFU, du Déficit Agricole et de l'Excédent à la station de Bouteldja (2011-2021).**

## II. 5. Estimation de la lame d'eau écoulée :

### II. 5. 1. Le ruissellement :

L'évaluation du ruissellement est nécessaire pour évaluer l'apport en eau de surface et d'apprécier l'érosion mécanique et chimique qui affecte la surface du sol.

#### - Formule de Tixerant-Berckaloff

$$R = \frac{P^3}{3(ETP)^2}$$

Avec :

**P** : Précipitation moyenne en **m**.

**R** : Ruissellement en **m**.

**ETP** : Evaporation potentiel en **m**

**Tableau 16 : Ruissellement selon la formule de Tixerant-Berckaloff.**

Paramètres Stations	P (m)	ETP(m)	R(m)
Saline	0.647	0.894	<b>0.112</b>
Ben M'hidi	0.670	0.901	<b>0.123</b>
Bouteldja	0.729	0.932	<b>0.148</b>

Le bilan hydrique est défini selon l'équation suivante.

$$P = ETR + R + Ie$$

Avec :

**P** : Précipitations moyennes annuelles en mm/an.

**ETR** : Evapotranspiration réelle en mm /an.

**Ie** : Infiltration efficace en mm/an.

### II. 5. 2. Infiltration efficace :

L'infiltration efficace est déduite de l'équation du bilan hydrique :

$$Ie = P - ETR - R$$

- Si  $Ie > 0$  : Les entrées sont supérieures aux sorties.
- Si  $Ie < 0$  : Les entrées sont inférieures aux sorties.

**Tableau 17 : Les valeurs de l'infiltration efficace.**

Paramètres	P (mm)	ETR		R		Ie	
		(mm/an)	(%)	(mm/an)	(%)	(mm/an)	(%)
<b>Saline</b>	647.97	447.1	<b>69.00</b>	112	<b>17.28</b>	88.87	<b>13.72</b>
<b>Ben M'hidi</b>	670.82	477.4	<b>71.17</b>	123	<b>18.33</b>	70.42	<b>10.5</b>
<b>Bouteldja</b>	729.08	483.0	<b>66.25</b>	148	<b>20.30</b>	98.08	<b>13.45</b>

## II. 6. Hydrologie :

### II. 6. 1. Le bassin versant de l'oued Kebir Est :

Le bassin versant de l'oued Kebir Est en amont de la station hydrométrique de Ain El Assel possède une orientation générale Sud Est, Nord Ouest.

Les données morphométriques de l'oued Kebir Est au site de la station de Ain El Assel sont représentées dans le tableau 18.

**Tableau 18 : Données morphométriques de l'oued Kebir Est.**

Paramètre	Valeur
<b>Superficie du bassin versant (Km<sup>2</sup>)</b>	680
<b>Périmètre (Km)</b>	115
<b>Indice de compacité</b>	1.23
<b>Longueur de Thalweg (Km)</b>	59
<b>Altitude Min du bassin versant (m)</b>	30
<b>Altitude Max du bassin versant (m)</b>	1202
<b>Altitude moyenne du bassin versant (m)</b>	398

Sources : ABH, 2005.

### II. 6. 2. Hydrographie :

En amont de la station hydrographique de Ain El Assel, les Oueds Ballota et Bougous constituent deux grands affluents de l'oued Kebir Est qui reçoit respectivement en rive gauche les Oueds Guergour, Boulathan et Bouhalloufa, mais avant de se jeter à la mer, il se réunit avec Oued Bounamoussa à l'embouchure sous le nom de la Mafragh (Exutoire unique) (figure 23).



**II. 7. Conclusion :**

Au terme de cette étude hydro-climatologique, on peut conclure que notre région d'étude possède un climat de type sub-humide. Les précipitations durant la période (2011-2021) sont de l'ordre de 647.97 mm, 670.82 mm et 729.08 mm en moyenne annuelle, la température moyenne annuelle est de 17.97 °C, 18.34°C, 18.91 °C aux stations des Salines, de Ben M'hidi et de Bouteldja respectivement. Les années déficitaires dépassent les années excédentaires à Bouteldja alors qu'elles sont égales aux Salines et Ben M'hidi.

Les évapotranspirations réelles (ETR) déterminées par la méthode de Thornthwaite, sont égales à 447.1 mm/an aux Salines, 477.4 mm/an à Ben M'hidi et 483.0 mm/an à Bouteldja, soit 69.00 %, 71.17% et 66.25% des précipitations.



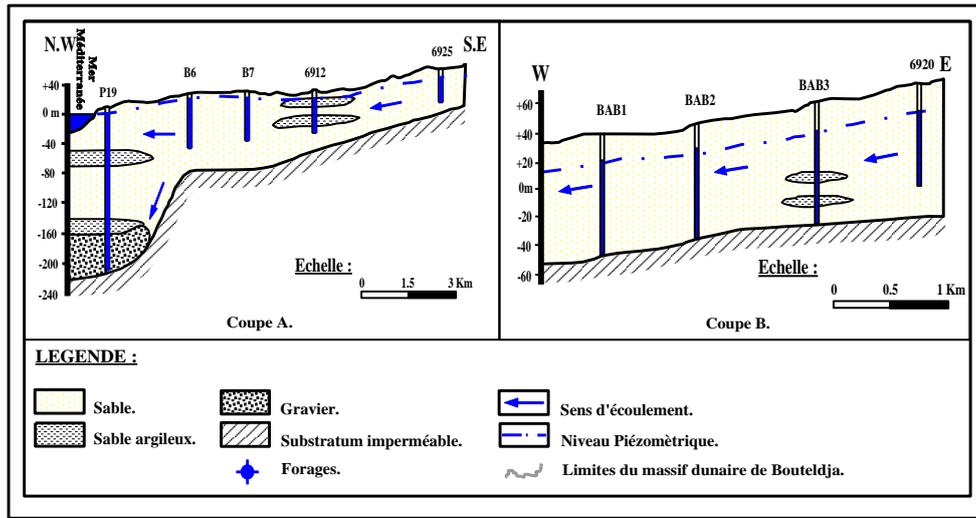
## ***CHAPITRE III***

### ***Hydrogéologie***



**III. 3. Géométrie de la nappe libre du massif dunaire :**

Le massif dunaire est formé essentiellement par des sables éoliens quaternaires qui forment une nappe libre épaisse de 20 m à l’Est et pouvant atteindre 220 m à l’Ouest, avec des intercalations de lentilles argileuses qui correspondent à d’anciens fonds de marais. Les formations aquifères reposent sur un substratum Numidien à l’Est de Bouglès et sur la surface d’érosion du remplissage Miopliocène de la fosse de Ben M’hidi à l’Ouest. Au Sud, les sables passent latéralement aux graviers de la nappe profonde.



**Figure 25 : Coupes hydrogéologiques schématiques dans le massif dunaire de Bouteldja.**

**III. 3. 1. Conditions aux limites de la nappe du massif dunaire :**

Les eaux souterraines du massif dunaire se déversent dans la mer le long du littoral à l’Est, le massif dunaire reçoit les eaux de ruissellement du massif Numidien. Au Sud, la nappe libre du massif alimente la nappe profonde des graviers.

**III. 3. 2. Caractéristiques hydrodynamiques de la nappe :**

On peut déterminer les paramètres hydrodynamiques de la nappe soit par la réalisation d’essai de pompage soit par de tests au laboratoire.

**III. 3. 2. 1. L’étude de la transmissivité (T) et du coefficient d’emménagement (S) :**

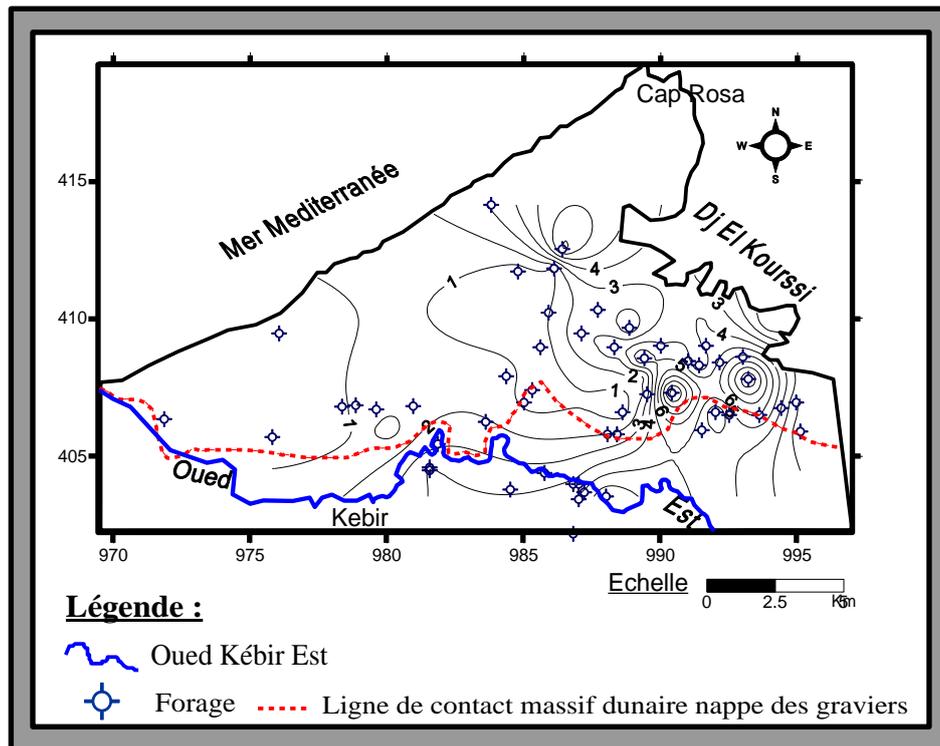
Les essais par pompage réalisé dans la nappe dunaire de Bouteldja ont permis de déterminer la transmissivité (T) et le coefficient d’emménagement (S).

La zone la plus transmissive se localise dans le bassin de l’oued El Bhaim et dans le secteur Bouglès, Bourdim. D’une manière générale les valeurs de transmissivité sont

comprises entre  $10^{-6}$  et  $1.3 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ . L'analyse de ces données a permis aussi de déterminer le coefficient d'emmagasinement dont les valeurs sont de l'ordre de 11.5% en moyenne se qui correspond à la valeur d'une nappe libre.

### III. 3. 3. Répartition spatiale des transmissivités :

La carte de répartition des transmissivité établit à partir des données collectée des essais par pompage (figure 26) fait ressortir :



**Figure 26 : Carte de répartition des transmissivités en  $10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$  de la nappe du massif dunaire de Bouteldja (Ramdani A., 1996, modifiée).**

L'analyse de cette carte montre une variabilité de la transmissivité liée à celle de l'épaisseur du sable et de la perméabilité des formations alluviales traversées par le lit de l'oued principal et qui constitue la zone franche avec les dunes.

Sur cette carte, nous remarquons que les valeurs de transmissivités comprises entre 1 et  $3 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$  se répartissent d'oued au Nord Est de la zone d'étude. Au Sud, Sud Est par contre les transmissivités s'améliorent et passent de 3 à  $1.1 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$  (Ramdani. A ; 1996).

### III. 3. 4. Détermination et répartition des perméabilités :

La perméabilité peut être déterminée à partir des valeurs de la Transmissivité et celles de l'épaisseur de la nappe (la perméabilité est le rapport entre la transmissivité et l'épaisseur de la nappe :  $k = T/E$ ).

L'étude de la carte des perméabilités élaborée à partir des valeurs de coefficients de perméabilités (figure 27), fait ressortir que les perméabilités augmentent d'Ouest en Est et varient entre  $10^{-4}$  et  $10^{-6}$  m/s ;

La distribution spatiale fait apparaître trois zones distinctes :

- La zone dont les valeurs inférieures à  $2.10^{-5}$  occupe la partie Ouest ;
- La zone centrale qui s'étend de Mouaïssia à Righia au Sud jusqu'à hennaya à la mer au Nord avec des valeurs comprises entre 2 et  $8.10^{-5}$  m/s ;
- La zone Sud Est, inscrite dans le triangle Righia, Bourdim et Bordj Ali Bey, est caractérisée par des perméabilités comprises entre 1 et  $3.10^{-4}$  m/s.

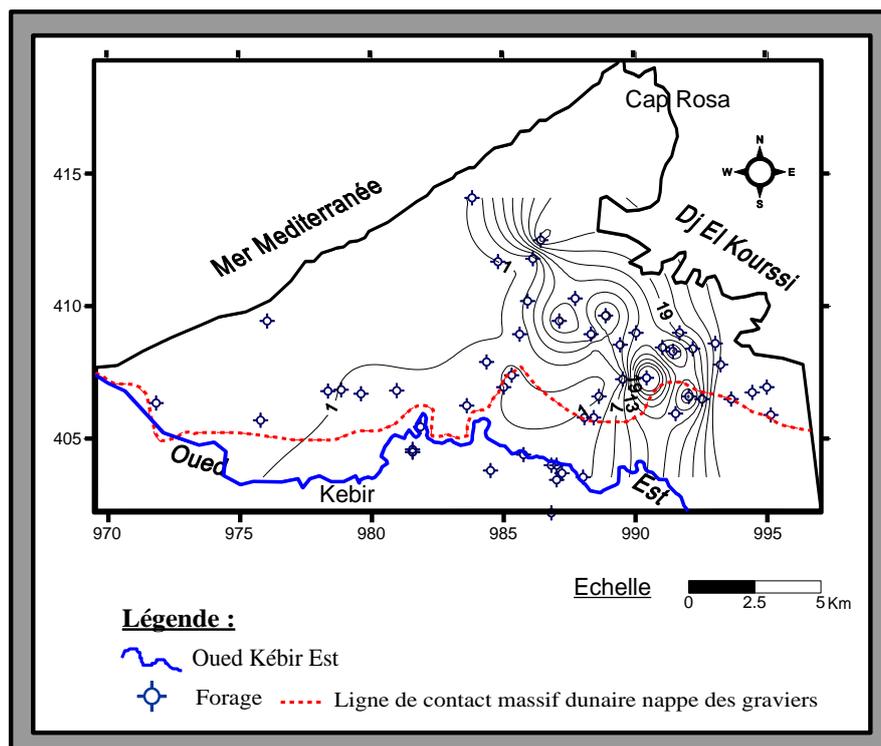


Figure 27 : Carte de répartition des perméabilités en  $10^{-5}$  m/s de la nappe du massif dunaire de Bouteldja (Ramdani A., 1996, modifiée).

### III. 3. 5. Interprétation de la carte du substratum (carte isobathe) :

L'élaboration de la carte isobathe a permis de montrer une morphologie complexe avec deux principales cuvettes : l'une au Nord et l'autre au Sud du massif dunaire. Ce sont deux zones favorables à l'implantation des forages :

- **La zone Nord** : L'espacement des courbes est plus ou moins régulier, indiquant des pentes faibles du centre vers le Nord. La profondeur augmente de 80m jusqu'à 120m. Cette structure est due à l'existence d'un affaissement du substratum, donc un réservoir plus épais.
- **La zone Sud** : Les courbes sont serrées, est donc abrupte, le substratum descend de 80m à 150m. Allant vers le Sud Ouest, l'espacement des courbes est important, indiquant une pente moins raide.

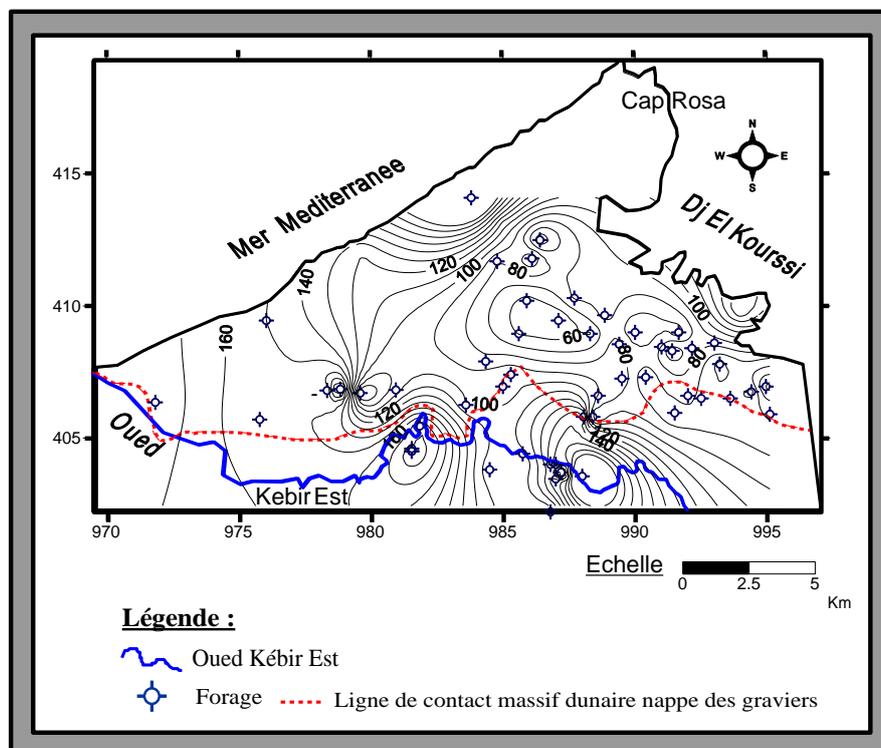


Figure 28 : Carte du substratum de la nappe du massif dunaire de Bouteldja (d'après l'étude géophysique de Strojexport, 1975, modifiée).

### III. 3. 6. Interprétation de la carte d'égale épaisseur de la couche saturée (carte isopache) :

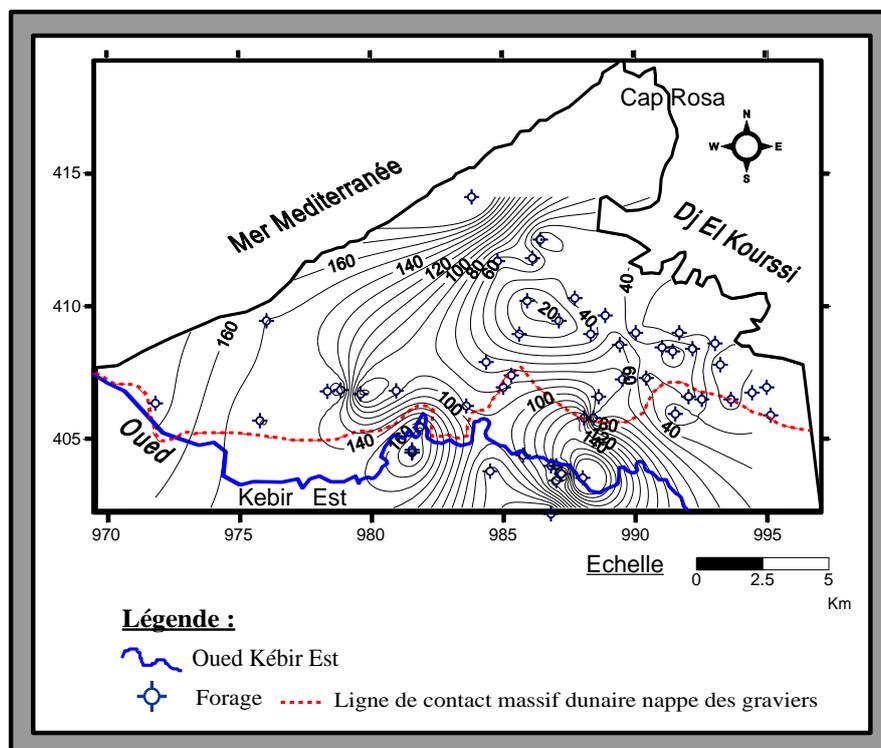
La carte du toit de substratum et la carte piezométrique de bases eaux, nous en permis de tracer la carte d'égale épaisseur de la couche saturée de l'aquifère libre du massif dunaire de Bouteldja (Figure 29).

Cette carte visualise la répartition spatiale des épaisseurs. Elle nous montre en effet, trois zones bien distinctes :

- La zone Sud Ouest localisée au niveau de Haraba, Mouaissia et Oued Dieb avec une épaisseur saturée entre 120 et 160m.
- La zone centrale allongée selon deux axes Nord Ouest, Nord Est dont les épaisseurs varient respectivement de 100 à 160m et de 60 à 120m.
- La zone Est, Sud Est (Bourdim, Dj.Siah, Oum El Agreb et Dj Kourssi).

Dans cette zone le substratum argilo-gréseux numidien se trouve entre 60 et 100m de profondeur. Les proportions d'argile demeurent très importantes, ce qui limite par conséquent la fraction de la couche saturée.

Les épaisseurs de la nappe ne dépassent pas les 60m.



**Figure 29 : Carte d'égal épaisseur de la couche saturée de la nappe du massif dunaire de Bouteldja (Ramdani A., 1996, modifiée).**

### III. 3. 7. Interprétation de la carte piezométrique :

L'élaboration de la carte piézométrique de la nappe libre du massif dunaire de Bouteldja s'est basée sur le relevé piézométrique de l'ANRH réalisé au mois d'Octobre 1994 (Ramdani 1996).

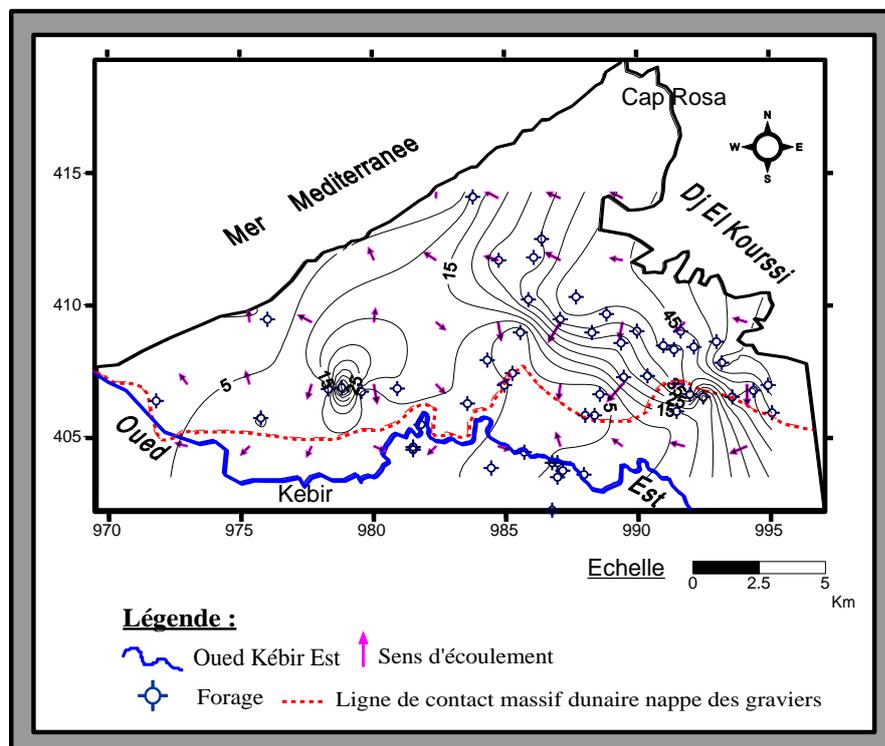
Cette carte (figure 30) montre que l'écoulement souterrain est dirigé vers la mer au Nord et vers les terrasses de l'oued Kebir au Sud.

On observe un écoulement vers la zone Sud Est, caractérisée par les apports venant des reliefs greso-argileux. Cette zone d'extension limitée par rapport au Nord dont la circulation des eaux est beaucoup plus orientée reste soumise à un écoulement important et rapide compte tenu de l'alimentation de la nappe qui se fait principalement par les précipitations.

On note que l'exploitation intensive a modifié la morphologie de la nappe. L'allure des courbes piézométriques est caractérisée par plusieurs axes de drainages liés aux pompages excessifs.

Le gradient hydraulique est d'autant plus fort que les courbes sont plus serrées, c'est notamment le cas de la partie Sud, Sud- Est correspondant aux sous bassins de Bouglès et Bhaim. Ce resserrement est dû essentiellement à une faible perméabilité. Par contre, au centre et Nord, Nord-Ouest, les courbes isopièzes sont espacées traduisant un faible gradient.

Le manque de points de mesure dans la partie Ouest de la zone d'étude n'a pas permis de tracer l'allure de la piézométrie.



**Figure 30 : Carte piézométrique de la nappe du massif dunaire de Bouteldja en Octobre 1994 (Ramdani A., 1996, modifiée).**

**III. 3. 8. Estimation des réserves :**

L'estimation des réserves des nappes libres repose essentiellement, sur l'étude des fluctuations du niveau piézométriques dans les nappes.

Les réserves régulatrices représentent la quantité d'eau libre emmagasinée par les terrains aquifères au cours d'une recharge importante par alimentation naturelle. Elles sont en rapport étroit avec les variations du niveau piézométriques des nappes, ce sont celles qui alimentent et régularisent le débit d'écoulement des eaux souterraines aux exutoires naturelles.

Les réserves permanentes correspondent aux réserves profondes, déterminant le volume d'eau libre stockée dans la couche aquifère délimitée à la base par le substratum, elles sont peu ou pas affectées par les fluctuations piézométriques et dont le volume est considéré comme constant (Haied N., 2015).

L'estimation des réserves permanentes repose sur le calcul du volume d'eau emmagasiné dans la tranche de la couche aquifère, d'après la carte d'égale épaisseur des sables saturée (figure 30), nous avons pu établir le volume d'eau par la formule suivante :

$$W = V \times I_e \Rightarrow W = s \times e \times I_e$$

Avec :

**W** : Volume d'eau emmagasiné (m<sup>3</sup>).

**s** : Surface de la zone (m<sup>2</sup>).

**e** : Epaisseur moyenne de la couche aquifère (m).

**I<sub>e</sub>** : Porosité efficace des sables, qui est de l'ordre de 12% d'après G.Castany.

Les résultats obtenus sont mentionnés sur le tableau suivant :

**Tableau 19 : calcul du volume d'eau emmagasiné dans la nappe du massif dunaire.**

Epaisseur moyenne de la tranche saturée (m)	Superficie calculée (m <sup>2</sup> )	Volume d'eau (m <sup>3</sup> )	Volume d'eau (Hm <sup>3</sup> )	Volume d'eau emmagasiné (m <sup>3</sup> )	Volume d'eau emmagasiné (Hm <sup>3</sup> )
115	620.6 10 <sup>5</sup>	75682.1 10 <sup>5</sup>	7568.21	90818.52 10 <sup>5</sup>	908.18

Le volume de la réserve permanent totale qui peut être emmagasiné par la nappe libre du massif dunaire de Bouteldja est estimé de l'ordre de 908.18 Hm<sup>3</sup>.

### III. 4. Etat des ressources en eau dans la Wilaya d'El TARF :

#### III. 4. 1. Ressources en eau superficielles :

La wilaya d'El Tarf dispose trois (03) barrages d'une capacité globale de 286 Hm<sup>3</sup> dont un barrage à Mexa d'une capacité de 60 Hm<sup>3</sup>, un à Bougous d'une capacité de 57 Hm<sup>3</sup> (mise en service en cours) et un autre à Cheffia d'une capacité de 169 Hm<sup>3</sup>, six (06) retenues collinaires fonctionnelles d'une capacité de 3 Hm<sup>3</sup>.

#### III. 4. 2. Ressources en eau souterraines :

Globalement, les ressources en eau mobilisées à partir des nappes de la zone d'étude (nappe dunaire de Bouteldja, nappe alluviale d'El Tarf, nappe des grès de Bougous, nappe alluviale de Bouteldja, nappe alluviale de Bounamoussa et nappe alluviale de Seybouse 1, 2 et 3) sont évaluées à près de 58.55 Hm<sup>3</sup> par an, soit 83.64 % des ressources en eau mobilisables (Affoun S., 2006).

#### III. 4. 3. Mobilisation des ressources en eaux :

Le pourcentage des ressources en eau mobilisées de la région d'étude est évalué à près de 233.65 Hm<sup>3</sup> par an, soit à peu près 65.08 % des ressources en eau mobilisables (Tableau 20).

**Tableau 20 : Potentiel hydrique global du bassin versant de la Mafragh.**

Ressources en eau	Potentiel reconnu	R <sup>ces</sup> Mobilisables	R <sup>ces</sup> Mobilisé
Superficielles	321	289	175.1
Souterraines	118.5	70	58.55
Total	439.5	359	233.65

Source : DHW El-Tarf, 2004.

### III. 5. Conclusion :

La confrontation des différentes cartes sur lesquelles la distribution de chaque paramètre caractéristique (épaisseur, transmissivité et perméabilité), nous a permis sur le plan hydrodynamique de distinguer deux zones de meilleures potentialités :

- La zone Sud-Est qui va de Mouaïssia à Bordj Ali Bey regroupe un grand nombre de forages présentant des meilleurs débits.

- La zone centrale.

Il semble que le système aquifère du massif dunaire est en relation directe avec la mer au Nord et avec la nappe alluvionnaire de l'oued Kebir Est au Sud, suivent un axe d'écoulement préférentiel Nord-Est, Sud-Est.



## ***CHAPITRE IV***

### ***Hydrochimie***

**IV. 1. Introduction :**

L'hydrochimie constitue depuis plusieurs années un moyen d'investigation privilégié de la structure de fonctionnement de l'aquifère, en effet l'eau est à la fois créative et vecteur d'information (Bougherira N., 2008).

L'étude hydro-chimique à travers les analyses chimiques permet d'examiner les conditions physico-chimiques et géologiques auxquelles ces eaux sont liées. Elle permet de suivre l'évolution spatiale des différents éléments métalliques dissous et d'estimer leur origine, d'estimer la profondeur de circulation des eaux, et d'apprécier la qualité des eaux vis-à-vis la potabilité et à l'irrigation.

La détermination des faciès chimiques des eaux souterraines et l'appréciation de la potabilité des eaux à travers la comparaison des concentrations des éléments majeurs avec les normes de l'OMS, la dureté ainsi que la détermination de l'indice de la qualité de l'eau (WQI) et enfin la détermination de l'aptitude à l'irrigation des ces eaux.

**IV. 2. Echantillonnage et analyses Hydro-chimiques :**

Cette étude se base un seul prélèvement d'eau effectué par l'ADE-Annaba en Mai 2021, quatorze (14) points d'eau ont été choisis, en se basant sur une bonne répartition spatiale.

**IV. 2. 1. Méthode de prélèvement :**

La méthode de prélèvement utilisée par le Laboratoire Centrale de l'Algérienne des eaux (ADE) d'Annaba est la suivante :

Les paramètres physico-chimiques (température, pH, Eh et conductivité) sont mesurés in situ au moyen d'appareillage de terrain avec des sondes sélectives (pH-mètre, conductimètre). Les échantillons ont été prélevés dans des flacons en polyéthylène (deux flacons par échantillon), l'un pour l'analyse des sels nutritifs après addition de quelques gouttes de chloroforme, l'autre pour l'analyse des éléments majeurs (après addition de quelques gouttes d'acide nitrique).

Les échantillons d'eau, prélevés dans la journée, ont été conservés dans des flacons à basse température (4°C) et les analyses ont été effectuées après 4 à 5 jours (Haied N., 2015).

## IV. 2. 2. Les méthodes d'analyse :

Les méthodes utilisées sont :

- **Méthode volumétrique** pour les éléments ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ )

- **Méthode de spectrophotométrie d'absorption atomique** (en utilisant un spectrophotomètre pour les éléments ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ )).

Pour la fiabilité des résultats d'analyse, on a procédé à l'application de la méthode de la balance ionique avec une erreur de 6%.

## IV. 3. Etude des paramètres physiques :

### IV. 3. 1. Le potentiel d'hydrogène (pH) :

Le pH (potentiel Hydrogène) exprime la concentration en ions hydrogène  $\text{H}^+$  de l'eau. Il traduit ainsi la balance entre acide et base sur une échelle de 0 à 14, 7 étant le pH de neutralité. Les caractères plus acide (inférieur à 5) ou plus basique (supérieur à 8,5) altèrent les micro-organismes vivant dans une eau (la norme de l'OMS est comprise entre 6.5 et 8,5) (Lokman B. & al, 2017). Ce paramètre caractérise un grand nombre d'équilibre physico-chimique et dépend de facteurs multiples, dont l'origine de l'eau (G. Castany et J. Margat, 1977).

A partir des résultats (figure 31), il est clair que le pH varie entre 5.07 et 7.2 ce qui implique que les eaux sont caractérisées par une légère acidité (sauf pour le forage B3).

### IV. 3. 2. Conductivité électrique :

La conductivité est liée à la présence des espèces ioniques en solution. Les valeurs mesurées sont corrigées par rapport à une température standard de 25°C. Elle est définie comme étant l'aptitude d'une eau (ou d'un matériau) à se laisser traverser par un courant électrique.

L'organisation mondiale de la santé (OMS) recommande une classification des eaux, selon les plages de valeurs de la conductivité, qui sont présentées dans le tableau ci-dessous.

**Tableau 21 : Normes et classification des eaux selon leur conductivité.**

Classe de qualité	Excellente	Bonne	Passable	Médiocre	Pollution excessive
CE ( $\mu\text{s}/\text{cm}$ )	2 500	3 000	3 500	4 000	>4 000

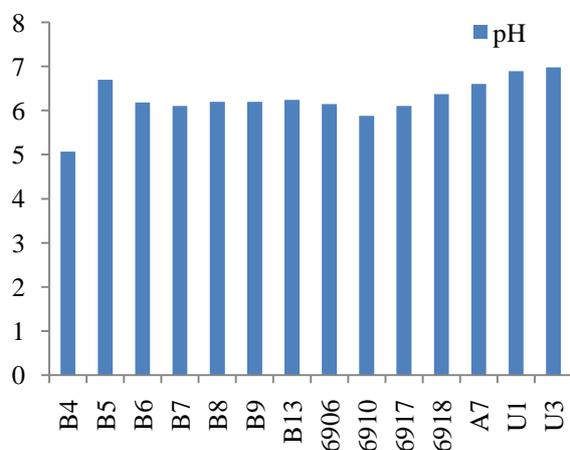
(Source : OMS 1994).

La variation de la conductivité donne des informations importantes sur l'évolution de la qualité de l'eau. Le tableau 22 présente la relation qui lie les valeurs de conductivité à la minéralisation.

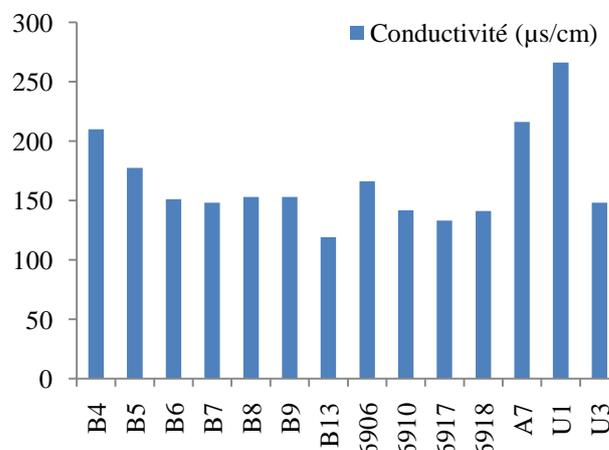
**Tableau 22 : Relation entre conductivité et minéralisation (Detay, 1997).**

Conductivité en $\mu\text{s}/\text{cm}$ , à 20°C	Minéralisation
- inférieur à 10.	- eau de minéralisation très faible.
- comprise entre 100 et 200.	- eau de minéralisation faible.
- comprise entre 200 et 400.	- eau de minéralisation peu accentuée.
- comprise entre 400 et 600.	- eau de minéralisation moyenne.
- comprise entre 600 et 1000.	- eau de minéralisation importante.
- supérieur à 1000.	- eau de minéralisation excessive.

La conductivité des eaux de la nappe libre du massif dunaire de Bouteldja (figure 32) varie entre 119 et 266  $\mu\text{s}/\text{cm}$ . En se basant sur le tableau 22, ces eaux ont une minéralisation variant entre une minéralisation faible à peu accentuée.



**Figure 31 : Histogramme de la variation du pH.**



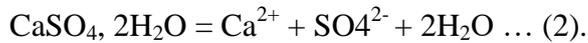
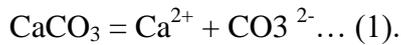
**Figure 32 : Histogramme de la variation de la Conductivité Electrique.**

**IV. 4. Etude des paramètres chimiques :**

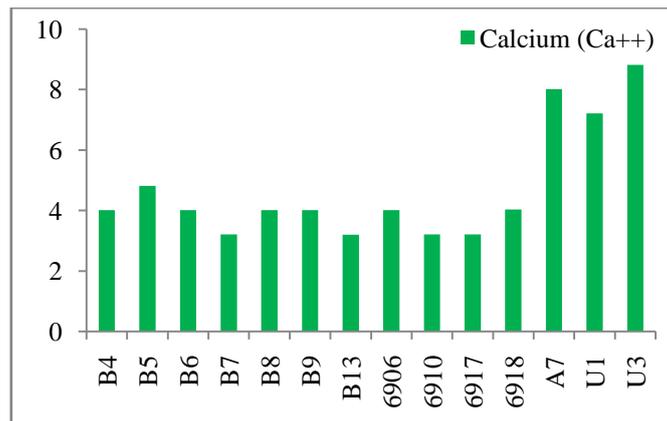
Tous ces paramètres ont été analysés au laboratoire central de l'ADE-Annaba. Les analyses chimiques ont concerné les éléments majeurs à savoir les anions :  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ , et les cations :  $\text{Ca}^+$ ,  $\text{Mg}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ , et le nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ).

**IV. 4. 1. Calcium (Ca<sup>++</sup>) :**

La présence de l'ion calcium Ca<sup>++</sup> est liée soit à la dissolution des formations carbonatées (CaCO<sub>3</sub>), soit à la dissolution des formations gypseuses (CaSO<sub>4</sub>).



Les teneurs en calcium (figures 34) oscillent entre 3.20 et 8.82 mg/l. Ces valeurs ne dépassent pas la norme qui est fixée à 75 mg/l.



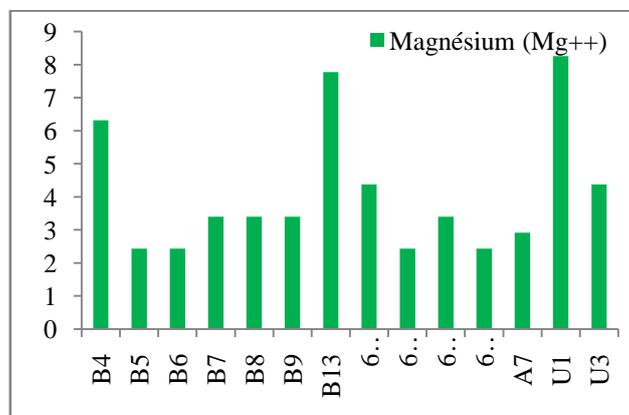
**Figure 33 : Histogramme de la variation de calcium (Ca<sup>2+</sup>).**

**IV. 4. 2. Magnésium (Mg<sup>++</sup>) :**

Comparable à l'origine du calcium, la présence du magnésium dans les eaux souterraines est liée à la dissolution des formations carbonatées à fortes teneurs en magnésium (Magnésite et dolomite).



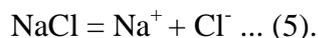
Le dosage du Magnésium démontre que les concentrations ne dépassent pas les 50 mg/l (la norme fixée par l'OMS en 2011). Elles varient entre 2.43 et 8.26 mg/l.



**Figure 34 : Histogramme de la variation de magnésium (Mg<sup>2+</sup>).**

#### IV. 4. 3. Sodium (Na<sup>+</sup>) :

L'existence de cet ion dans les eaux souterraines est liée principalement à la dissolution des formations salifères et à l'effet de la salinité marine. La dissolution des minéraux salifères se fait selon la relation suivante :



Variant entre 11.72 et 47.50 mg/l, les teneurs en sodium sont en dessous de la norme de l'OMS (200 mg/l).

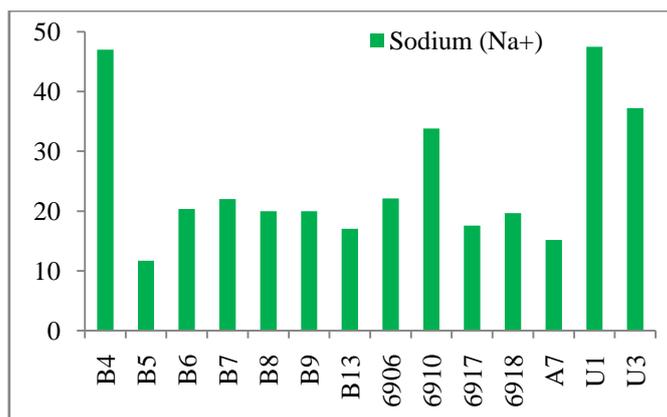


Figure 35 : Histogramme de la variation de sodium (Na<sup>+</sup>).

#### IV. 4. 4. Potassium (K<sup>+</sup>):

L'altération des formations silicatées (gneiss, schiste), des argiles potassiques et de la dissolution des engrais chimiques (NPK) sont les principales origines du potassium.

Les faibles teneurs en potassium ne dépassant pas les 3 mg/l prouve que les engrais à partir desquels le potassium peut provenir ne sont pas utilisés excessivement par l'agriculture.

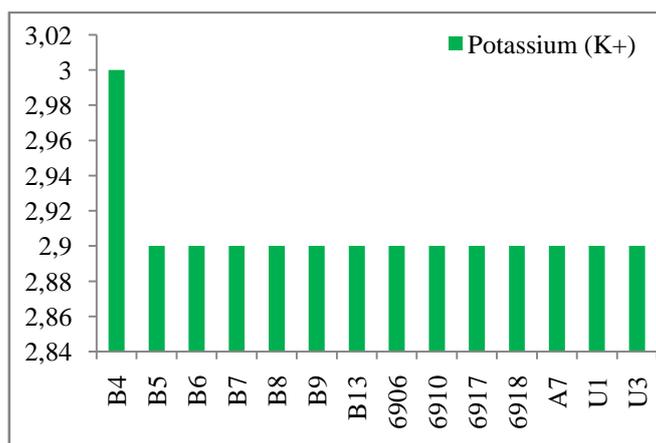
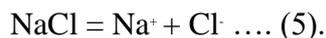


Figure 36 : Histogramme de la variation de potassium (K<sup>+</sup>).

#### IV. 4. 5. Les chlorures (Cl<sup>-</sup>) :

L'ion chlorure possède des caractéristiques différentes de celles des autres éléments, il n'est pas adsorbé par les formations géologiques, ne se combine pas facilement avec les éléments chimiques et reste très mobile. Il constitue un bon indicateur de la pollution.

L'origine de cet élément avec celle de Na est liée principalement à la dissolution des formations gypsifères, salifères et à l'effet de la salinité marine dans les aquifères côtières. La dissolution des minéraux salifères se fait selon la relation suivante :



Dans notre cas les teneurs en chlorures varient entre 28.36 et 54.20 mg/l tout en restant dans les standards (250 mg/l). Le NaCl provient essentiellement dans notre cas à partir des précipitations directes des eaux de pluie chargées en NaCl vu que la nappe est côtière (P. Négrel et al, 2007).

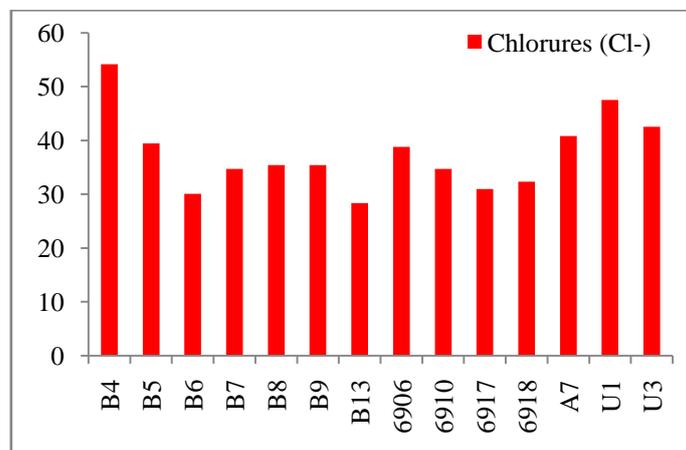
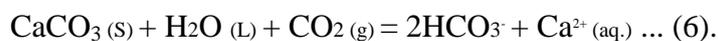


Figure 37 : Histogramme de la variation de chlorure (Cl<sup>-</sup>).

#### IV. 4. 6. Bicarbonates (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) :

La dissolution des formations carbonatées par des eaux chargées en gaz carbonique est la source des bicarbonates dans l'eau. La somme des équations de dissolution est donnée comme suit :



Dans les eaux naturelles l'alcalinité, exprimée en HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, varie de 10 à 350 mg/l (Rodier J., et al., 2005). Dans notre cas les teneurs en Bicarbonates enregistrées à travers les points d'échantillonnage varient entre 1.22 et 69.05 mg/l.

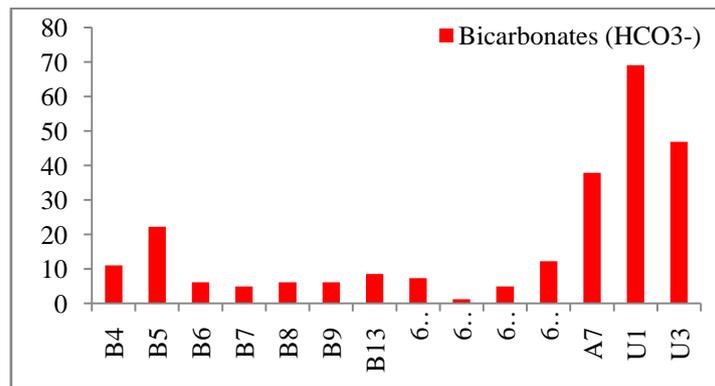
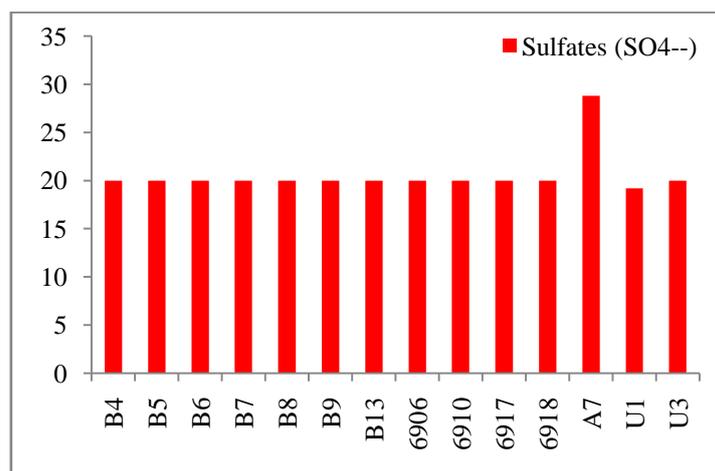


Figure 38 : Histogramme de la variation des bicarbonates (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>).

#### IV. 4. 7. Sulfates (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) :

La dissolution des formations gypseuse est la cause principale de l'existence des sulfates dans les eaux souterraines.

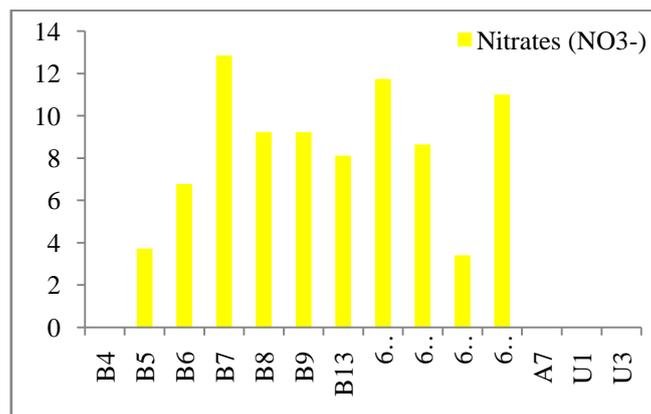
Avec des concentrations oscillant entre 19.20 et 28.80 mg/l, les sulfates ne dépassent pas eux aussi la norme préconisée par l'OMS (250 mg/l).



Figures 39 : Histogramme de la variation des Sulfates (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>).

#### IV. 4. 8. Nitrates (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) :

Les nitrates représentent la forme la plus oxygénée de l'azote, c'est une forme très soluble à confirmé (Debieche T. H., 2002). A partir de la figure 41 représentant l'histogramme des teneurs en nitrates, montre une variation allant de 2.2 à 12.85 mg/l. L'accroissement des teneurs en nitrates dans les eaux provient du lessivage des fertilisants utilisés dans les sols irrigués qui sont riches en nitrate (Kachi et al, 2016), ceci implique que la région d'étude ne connaît pas une utilisation intensive de ces fertilisants.



**Figures 40 : Histogramme de la variation des Nitrates (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>).**

#### **IV. 5. Interprétation des analyses chimiques par les diagrammes de Stabler, Stiff, Piper et de Durov :**

Dans le but de bien identifier les faciès hydro-chimiques et d'avoir une indication sur l'aspect qualitatif des eaux souterraines, la représentation graphique des résultats d'analyses s'avère un outil inévitable. Pour atteindre cet objectif, on a eu recours aux diagrammes de Stabler, Stiff, Piper et celui de Durov. La réalisation de ces diagrammes a été faite en utilisant le logiciel **Diagrammes**.

##### **IV. 5. 1. Diagrammes de Stabler et Stiff :**

La classification de Stabler est obtenue en classant, de gauche à droite par ordre décroissant de quantité en réaction pour cent, d'abord le groupe des trois anions, puis celui des trois cations. Afin de pouvoir comparer les compositions chimiques de l'eau aux caractéristiques physico-chimiques de la roche réservoir dont elle est issue.

Le diagramme de Stiff permet d'obtenir une figure géométrique polygonale caractéristique d'une famille d'eau donnée, la taille du polygone reflète le degré de la minéralisation. Les données d'analyse des ions majeurs sont reportées sur des axes horizontaux de part et d'autre de l'axe vertical d'origine. Les cations sont représentés à gauche (Na<sup>+</sup> + K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup> et Mg<sup>2+</sup>) et les anions à droite (Cl<sup>-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> + CO<sub>3</sub><sup>-2</sup>, SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>).

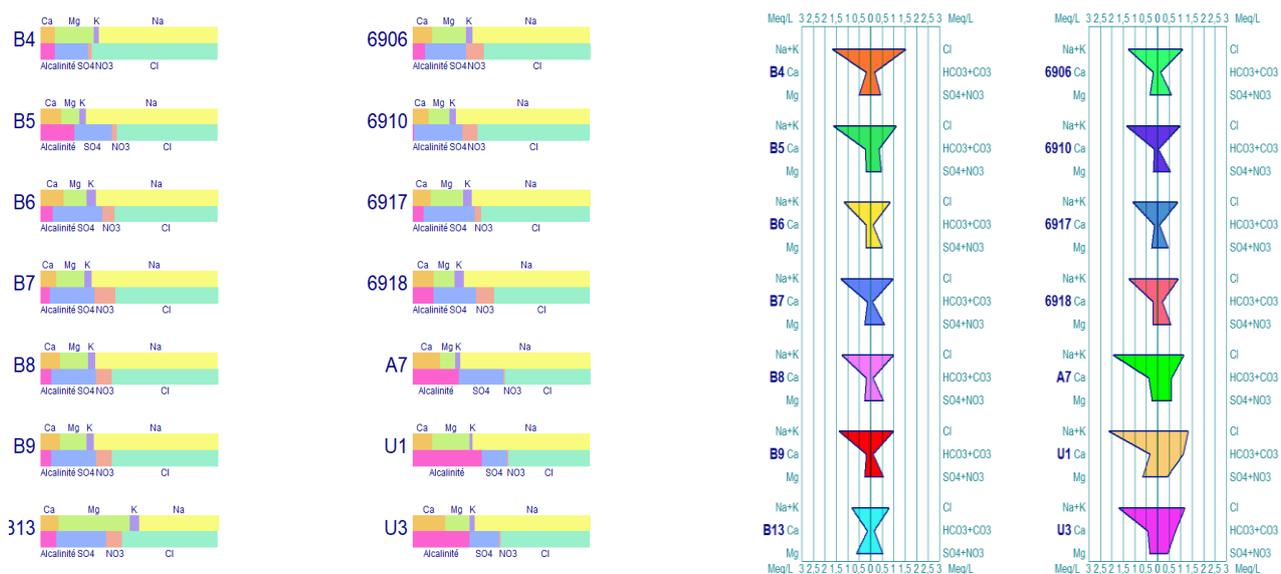
La représentation des analyses sur les diagrammes Stabler et Stiff permet la comparaison des point d'eau comme elle montre la variation spatiale des faciès chimiques de l'aquifère (Boudiaf Z. & Kemal H. F., 2019).

Ces diagrammes confirment la dominance du faciès chimiques chloruré sodique, ce qui confirme l'influence des précipitations chargées en Na Cl vu que la nappe est côtière (figure 41).

**IV. 5. 2. Diagramme de Piper :**

Le diagramme triangulaire de Piper (Piper, 1944) évalue l'évolution de l'eau du système aquifère et la relation entre les types de roches réservoir et la composition de l'eau. La représentation des analyses sur le diagramme de Piper montre une variation des faciès chimiques des eaux de la nappe (Hani A., 2003).

A partir du diagramme de Piper (figure 42) élaboré sur la base des résultats des analyses chimiques des eaux souterraines de la nappe libre du massif dunaire durant la période des hautes eaux (Mai 2021) montre clairement que les points d'eaux se concentrent dans le pôle chloruré sodique et potassique ou sulfaté sodique.



**Figure 41 : Diagrammes de Stabler et Stiff.**

Les eaux chlorurées sodiques et potassique sont dues à la salinité marine ou bien aux précipitations chargées de Na Cl à cause de la proximité de la mer. Le potassium, son présence dans est due probablement à l'utilisation des engrais chimiques.

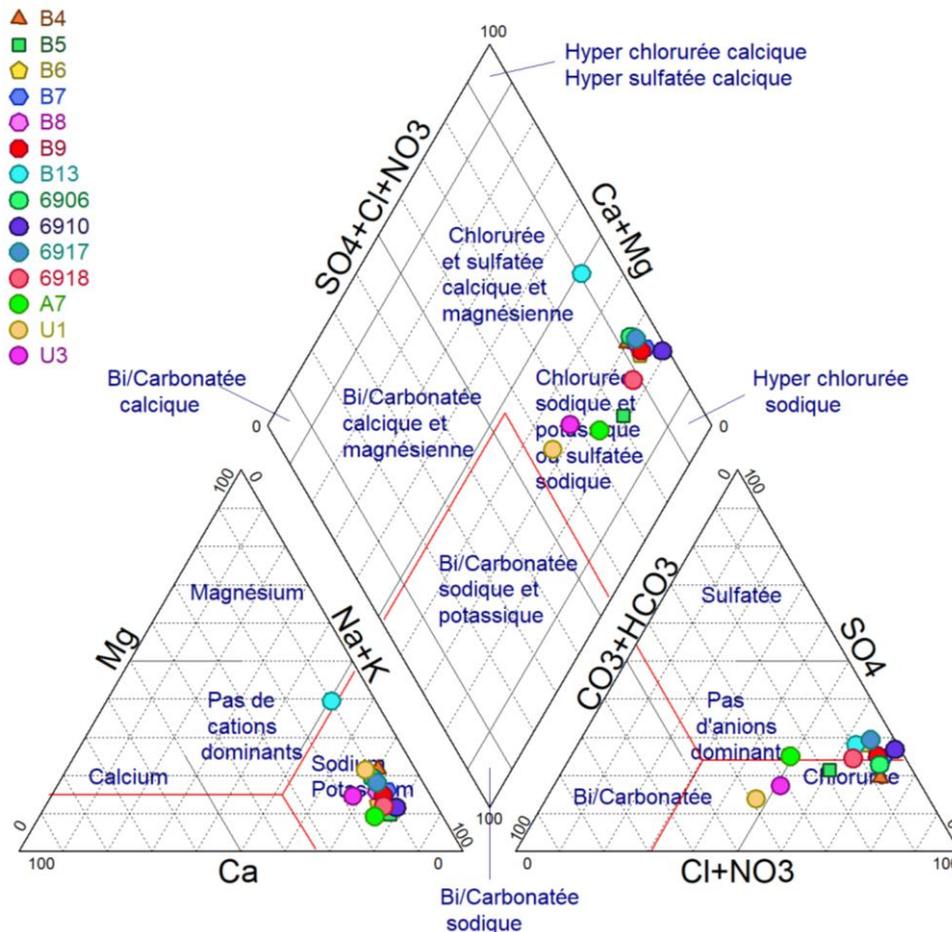


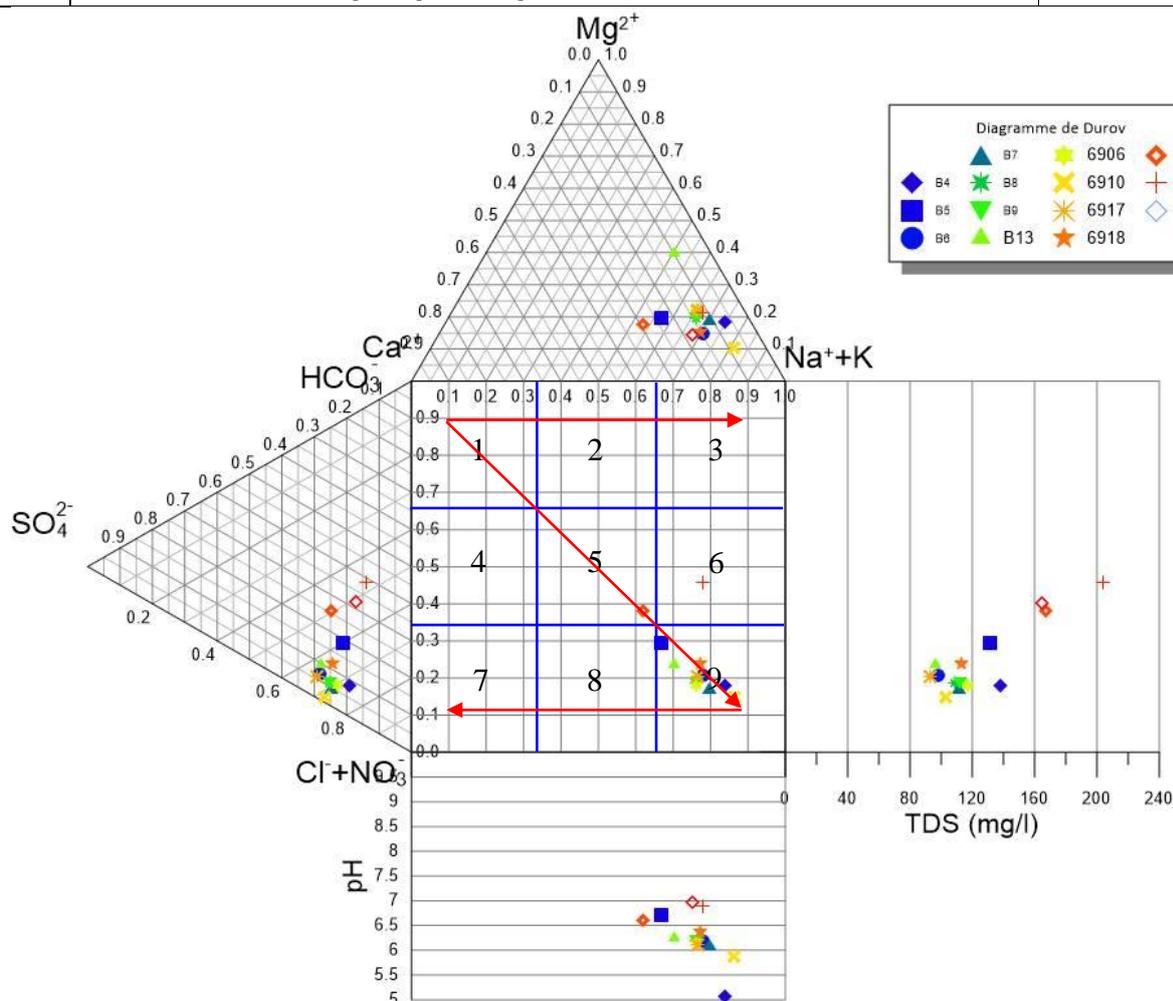
Figure 42 : Diagramme de Piper.

IV. 5. 3. Diagramme de Durov :

Le diagramme de Durov (in Lloyd et Heathcoat 1985) construit sur la base des teneurs relatives (en méq/l) des ions majeurs en solution est avantageux par rapport au diagramme de Piper en révélant certains processus géochimiques qui pourraient affecter la genèse des eaux souterraines. Ce diagramme (figure 44) démontre clairement qu'il y a une dominance du Cl et du Na (85.72 %) ce qui confirme les résultats des illustrations suscitée. Le second champ 7.14 % des échantillons qui ne présente aucun cation ou anions dominant, témoignant d'une eau due à une recharge récente et fraîche. Le troisième champ 7.14 % des échantillons caractérisant l'eau de dominance des cations et anions  $Na^{++}$  et  $SO_4^{-}$ , ce qui indique c'est un type d'eau qui n'est pas fréquemment rencontré et indique un mélange probable ou une influence rare de dissolution.

**Tableau 23 : Classification de l'eau de la nappe du massif dunaire de Bouteldja basée sur le diagramme de Durov (Lloyd et Heathcoat, 1985).**

Sl. No	Types de l'eau	No. d'échantillons (GW=14)	%
1	HCO <sub>3</sub> et Ca dominant, ce ci indique fréquemment que les eaux sont contenues dans des formations aquifères calcaireuses, sableuses, et d'autres types de formations aquifères.	----	---
2	Cette eau est à dominance des ions Ca et HCO <sub>3</sub> . Une association avec la dolomite est présumée si le Mg est significatif. Cependant, ces échantillons dans lesquels Na est significatif, un échange important des ions est présumé.	----	---
3	HCO <sub>3</sub> et Na sont dominants, généralement ce ci indique un échange de base de l'eau, bien que la production du CO <sub>2</sub> en profondeur puisse générer HCO <sub>3</sub> où Na est dominant sous certains conditions.	----	---
4	SO <sub>4</sub> domine, ou anion secondaire et Ca est dominant, Ca et SO <sub>4</sub> dominant, ce ci indique fréquemment que l'eau est contenue dans des dépôts de laves ou gypsifères, sinon des eaux de mélange ou indiquant une simple dissolution.	----	---
5	Pas d'anion ou cation dominant, ce ci indique que la minéralisation de l'eau est due à une simple dissolution ou à un mélange.	01 (1GW)	7.14
6	SO <sub>4</sub> domine, ou anion secondaire et Na est dominant, c'est un type d'eau qui n'est pas fréquemment rencontré et indique un mélange probable ou une influence rare de dissolution.	01 (1GW)	7.14
7	Cl et Na dominant, minéralisation fréquemment rencontrée sauf s'il y'a une pollution de couche aquifère. Sinon l'eau peut résulter d'un échange de base inverse du Na-Cl.	----	---
8	Cl l'anion dominant et Na le cation dominant, ce ci indique que les eaux souterraines sont liées à un échange de base inverse du Na-Cl.	----	---
9	Cl et Na dominant, ce ci indique fréquemment qu'ils sont issus d'une dissolution.	12 (12GW)	85.72



**Figure 43 : Diagramme de Durov.**

**IV. 6. Etude statistique des données chimiques :****IV. 6. 1. Analyses en composantes principales (A.C.P) :**

L'ACP est une méthode statistique essentiellement descriptive dont l'objectif est de présenter sous une forme graphique, le maximum de l'information contenu dans un tableau de données. L'ACP peut s'utiliser dans des situations nombreuses et variées pour savoir comment structurer les variables ? Quelles sont celles qui sont associées ? Quelles sont celles qui ne le sont pas ? Quelles sont celles qui «vont dans le même sens» ? Quelles sont celles qui s'opposent ?

L'ACP permettra de regrouper selon les mêmes facteurs les échantillons présentant des caractères d'origine ou d'évolution similaire.

L'analyse effectuée a été réalisée sur un tableau de données à 12 variables (CE, pH, TDS, T°C, Ca<sup>+2</sup>, Mg<sup>+2</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>) et à 14 échantillons (individus).

**IV. 6. 2. Matrice des corrélations (Pearson (n)) :**

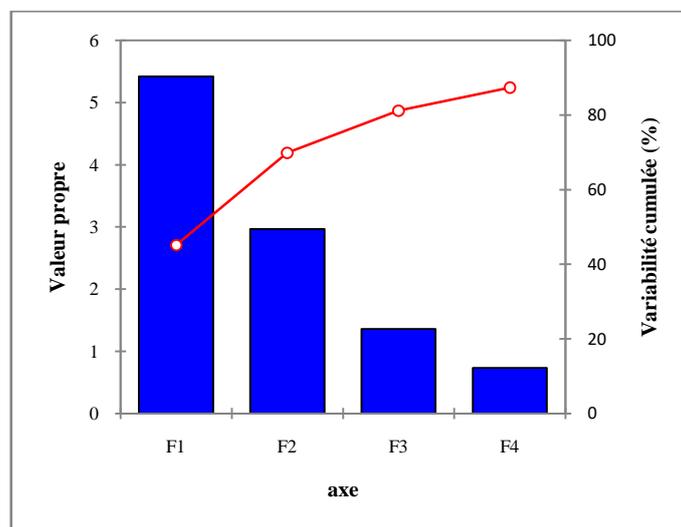
La matrice montre qu'il existe des corrélations positives et négatives très significatives entre les éléments physicochimiques (tableau 24). Les valeurs en gras sont différentes de 0 à un niveau de signification alpha=0.05.

**Tableau 24 : Matrice des corrélations des paramètres physicochimiques.**

Variables	Ph	T°C	CE	TDS	Ca	Mg	Na	K	HCO <sub>3</sub>	Cl	SO <sub>4</sub>	NO <sub>3</sub>
pH	<b>1.00</b>											
T	<b>0.26</b>	<b>1.00</b>										
CE	<b>0.16</b>	<b>-0.02</b>	<b>1.00</b>									
TDS	<b>0.50</b>	<b>0.02</b>	<b>0.85</b>	<b>1.00</b>								
Ca	<b>0.67</b>	<b>0.12</b>	<b>0.56</b>	<b>0.87</b>	<b>1.00</b>							
Mg	<b>-0.01</b>	<b>-0.31</b>	<b>0.42</b>	<b>0.43</b>	<b>0.17</b>	<b>1.00</b>						
Na	<b>-0.19</b>	<b>-0.22</b>	<b>0.53</b>	<b>0.56</b>	<b>0.31</b>	<b>0.56</b>	<b>1.00</b>					
K	<b>-0.73</b>	<b>-0.39</b>	<b>0.32</b>	<b>0.11</b>	<b>-0.11</b>	<b>0.33</b>	<b>0.55</b>	<b>1.00</b>				
HCO <sub>3</sub>	<b>0.68</b>	<b>0.07</b>	<b>0.73</b>	<b>0.95</b>	<b>0.89</b>	<b>0.45</b>	<b>0.47</b>	<b>-0.09</b>	<b>1.00</b>			
Cl	<b>-0.12</b>	<b>-0.22</b>	<b>0.80</b>	<b>0.75</b>	<b>0.51</b>	<b>0.41</b>	<b>0.73</b>	<b>0.68</b>	<b>0.56</b>	<b>1.00</b>		
SO <sub>4</sub>	<b>0.17</b>	<b>0.38</b>	<b>0.30</b>	<b>0.30</b>	<b>0.47</b>	<b>-0.22</b>	<b>-0.30</b>	<b>-0.07</b>	<b>0.22</b>	<b>0.10</b>	<b>1.00</b>	
NO <sub>3</sub>	<b>-0.22</b>	<b>0.03</b>	<b>-0.55</b>	<b>-0.62</b>	<b>-0.64</b>	<b>-0.29</b>	<b>-0.38</b>	<b>-0.33</b>	<b>-0.64</b>	<b>-0.56</b>	<b>-0.29</b>	<b>1.00</b>

**Tableau 25 : Valeurs propres.**

	F1	F2	F3	F4
Valeur propre	5.418	2.963	1.359	0.734
Variabilité (%)	45.151	24.691	11.329	6.117
% cumulé	45.151	69.842	81.171	87.288

**Figure 44 : Totales des variances et pourcentages cumulés.**

#### IV. 6. 3. Etude des variables et des individus :

L'observation du cercle de corrélation formé par les deux axes F1 et F2, nous montre que le facteur F1 exprime 45.15 % de la variance (figure 46). Dans cet axe, les sels solubles ( $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ , TDS et CE) sont opposés à  $\text{NO}_3^-$  qui représente la teneur en éléments nitrates dans l'eau. C'est un axe qui traduit probablement à la fois des phénomènes de lessivages affectant certains types de sols avec plus au moins une activité agricole induisant des teneurs en nitrates remarquable. Le second axe F2, qui exprime 24.69 % de la variance, oppose les sels solubles à l'élément  $\text{SO}_4^{2-}$ , ainsi pH,  $T^\circ\text{C}$ . Il représente les eaux acides caractérisées par des pH faibles. Il pourrait traduire également des phénomènes de fixation du  $\text{K}^+$  par certains minéraux argileux.

La répartition des individus nous permet de visualiser deux groupes d'associations (figure 47). Le groupe G1 (U1, U2, A7, et B5) qui se caractérise par des solutions minéralisées avec un pH proche de la neutralité, ce dernier s'oppose au groupe G2 (B6, B7, B8, B9, B13, 6906, 6910, 6917 et 6918) qui représente des solutions moins minéralisées avec une acidité plus au moins remarquable.

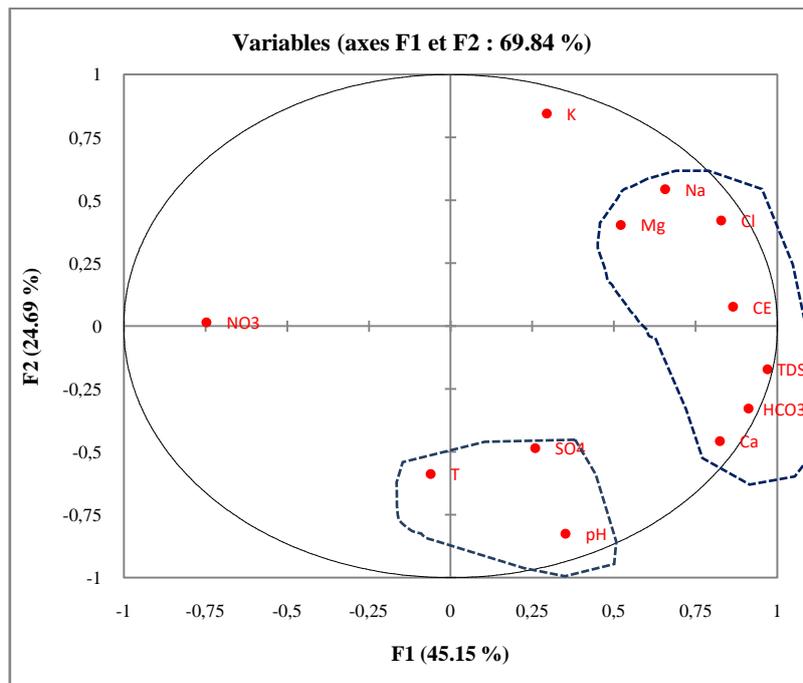


Figure 45 : Cercle de corrélation selon le plan F1F2.

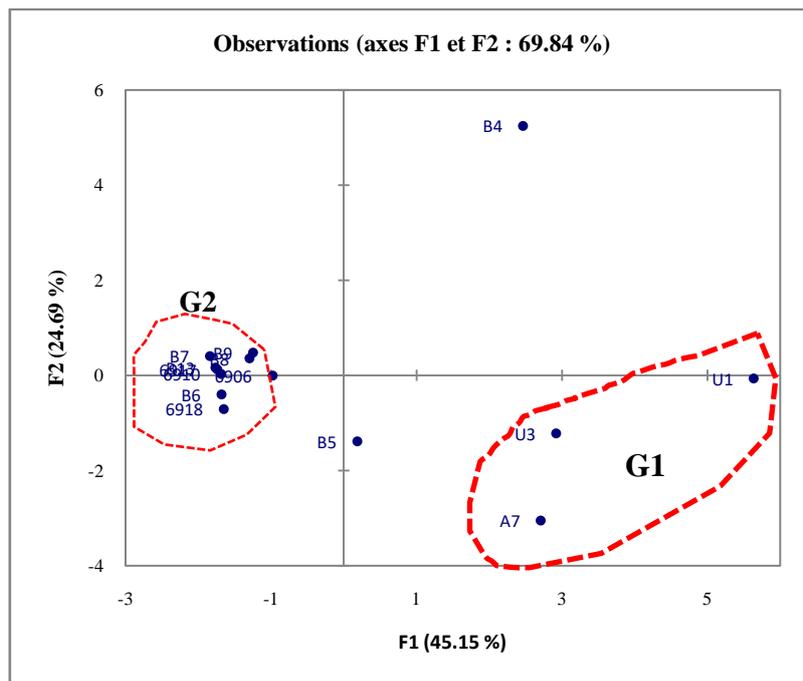


Figure 46 : Répartition des individus selon le plan F1F2.

IV . 7. Qualité chimique des eaux :

IV . 7. 1. La potabilité des eaux souterraines (AEP) :

La potabilité des eaux souterraines est conditionnée par les standards de l’OMS. Les

normes préconisées par l'OMS figurent dans le tableau 26. La comparaison des concentrations des éléments chimiques des points d'eaux étudiés ne dépassent pas tous les normes de potabilité.

**Tableau 26 : Normes de potabilité des eaux d'après l'OMS (2011).**

Substance	PH	Calcium (Ca <sup>+2</sup> )	Magnésium (Mg <sup>+2</sup> )	Sulfates (SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> )	Nitrates (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )
Norme de l'O.M.S. (concentration en mg/l)	6,5 – 8,5	75	50	250	50
Substance	Chlorures (Cl <sup>-</sup> )	Sodium (Na <sup>+</sup> )	Potassium (K <sup>+</sup> )	Ammonium (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )	Température (T°C)
Norme de l'O.M.S. (concentration en mg/l)	250	200	12	0,5	25

#### IV . 7. 1. 1. Titre hydrotimétrique (dureté de l'eau) TH :

La dureté d'une eau peut être évaluée à l'aide du degré hydrotimétrique (TH). Ce dernier est défini par la teneur totale de calcium et du magnésium (méq/l) et il est exprimé en degré français :

$$TH = (r \text{ Ca} + r \text{ Mg}) * 5 \text{ (°F)}.$$

**r Ca** : Concentration en calcium en méq/l.

**r Mg** : Concentration en magnésium en méq/l.

La classification des eaux en fonction de leur dureté est représentée dans le tableau suivant :

**Tableau 27 : Classification des eaux en fonction de leur dureté (d'après RODIER J. 1980).**

TH°F	0	7 à 22	22 à 32	32 à 54	54
Dureté de l'eau	douce	modérément douce	assez douce	dures	dures à très dure

**Tableau 28 : Dureté des eaux souterraines de la zone d'étude.**

Point d'eaux	TH (°F)	Point d'eaux	TH (°F)
<b>B4</b>	3,60	<b>6906</b>	2,80
<b>B5</b>	2,20	<b>6910</b>	1,80
<b>B6</b>	2,00	<b>6917</b>	2,20
<b>B7</b>	2,20	<b>6918</b>	2,01
<b>B8</b>	2,40	<b>A7</b>	3,20
<b>B9</b>	2,40	<b>U1</b>	5,20
<b>B13</b>	4,00	<b>U3</b>	4,00

Les eaux souterraines de la nappe libre du massif dunaire de Bouteldja destinées à l'alimentation en eau potable sont des eaux douces.

#### IV. 7. 1. 2. Indice de la qualité de l'eau (WQI) :

L'utilisation d'un indice de qualité de l'eau WQI ou IQE a été proposée par Horton (1965) et Brown et al. et (1970). Ensuite, plusieurs auteurs ont développés des nombreux méthodes différentes pour le calcul des IQE (Şener et al., 2017).

Cet indice est défini comme une technique d'évaluation fournissant l'influence composite des paramètres individuels de la qualité de l'eau sur la qualité globale de l'eau destinée à la consommation humaine (Mitra, 1998)

Le WQI est une méthode très utile et efficace pour évaluer la qualité de l'eau. C'est un outil très utile pour communiquer des informations sur la qualité globale de l'eau car celle-ci ne dépend pas d'un seul paramètre (Abassi 1999 ; Pradhan et al. 2001; Adak et al. 2001; Ketata et al 2011; Sundara Kumar et al 2015).

##### IV. 7. 1. 2. 1. Estimation de l'indice de la qualité de l'eau :

Pour calculer le WQI, trois étapes ont été suivies (Horton 1965; Pradhan et al. 2001; Dwivedi and Pathak 2007; Asadi et al. 2007; Vasanthavigar et al. 2010; Saeedi et al. 2010; Yidana and Yidana 2010). Lors de la première étape, un poids ( $w_i$ ) a été attribué à chacun des dix paramètres chimiques (pH, TDS, Cl, SO<sub>4</sub>, HCO<sub>3</sub>, NO<sub>3</sub>, Ca, Mg, Na et K) en fonction de leurs effets perçus sur la santé (Tableau 29).

**Tableau 29 : Poids et poids relatif de chaque paramètre chimique (Ketata et al., 2011).**

Paramètre chimique	Normes de l'OMS	Poids ( $w_i$ )	Poids relatif ( $W_i$ )
pH	8,5	3	0,103
TDS (mg/)	500	5	0,172
Cl <sup>-</sup> (mg/)	250	3	0,103
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/)	250	3	0,103
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/)	45	5	0,172
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/)	120	2	0,068
Na <sup>+</sup> (mg/)	200	3	0,103
Ca <sup>2+</sup> (mg/)	75	2	0,068
Mg <sup>2+</sup> (mg/)	50	2	0,068
K <sup>+</sup> (mg/)	12	1	0,034
		$\Sigma w_i = 29$	$\Sigma W_i = 0,9949$

Le poids maximal 5 a été attribué à des paramètres tels que le TDS, les chlorures, les sulfates et les nitrates en raison de leur importance majeure dans l'évaluation de la qualité de l'eau (Srinivasamoorthy et al. 2008). Le bicarbonate reçoit le poids minimum de 1 car il joue un rôle négligeable dans l'évaluation de la qualité de l'eau. D'autres paramètres tels que le calcium, le magnésium, le sodium et le potassium ont reçu un poids compris entre 1 et 5, en fonction de leur importance dans la qualité globale de l'eau destinée à la consommation (Ketata et al. 2011).

Dans la deuxième étape, la pondération relative ( $W_i$ ) de chaque paramètre est calculée comme suit :

$$W_i = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (1)$$

Où

$W_i$  : le poids relatif ;

$w_i$  : le poids de chaque paramètre ;

$n$  : le nombre de paramètres.

Dans la troisième étape, un classement de qualité ( $q_i$ ) pour chaque paramètre est donné en divisant la concentration de chaque échantillon d'eau par sa valeur limite fixée selon les normes algériennes de potabilité et le résultat multiplié par 100 (Ramakrishnaiah et al., 2009 ; Ketata et al., 2011 ; et Şener et al., 2017) :

$$q_i = \left( \frac{C_i}{S_i} \right) \times 100 \quad (2)$$

Avec  $q_i$  est la notation de qualité,  $C_i$  est la concentration de chaque paramètre chimique dans chaque échantillon d'eau en mg/l, et  $S_i$  est la norme d'eau potable algérienne pour chaque paramètre chimique en milligrammes par litre. La somme des valeurs  $S_i$  donne l'indice de qualité de l'eau pour chaque échantillon, la valeur  $S_i$  doit être déterminée par l'équation suivante :

$$S_i = W_i \times q_i \quad (3)$$

$S_i$  est le sous indice du paramètre  $i$ ème;  $q_i$  est l'évaluation de la qualité basée sur la concentration du paramètre  $i$ ème (Ramakrishnaiah et al., 2009). La somme des valeurs  $S_i$  donne l'indice de qualité de l'eau pour chaque échantillon.

$$WQI = \sum_{i=1}^n S_i \quad (4)$$

Les valeurs de l'indice de qualité de l'eau (WQI) calculées sont classées en cinq catégories (Ketata et al., 2011 ; Şener et al., 2017).

**Tableau 30 : Classification des eaux souterraines selon le WQI.**

Classe du WQI	Type d'eau	Octobre 2014 (%)	Avril 2015 (%)
<50	Eau excellente	0,00	0,00
50 - 100,1	Eau bonne	44,44	51,85
100 - 200,1	Eau pauvre	48,15	40,74
200 - 300,1	Eau très pauvre	7,41	7,41
>300	Eau impropre à la consommation	0,00	0,00

La classification a été faite à la base des valeurs calculées de l'indice de qualité de l'eau.

D'après le calcul de l'indice de la qualité de l'eau mentionnée dans le tableau 31, les valeurs sont comprises entre 16,75 et 27,92. Cette classification démontre que la qualité des eaux de la nappe libre du massif dunaire de Bouteldja est excellente à la consommation humaine.

**Tableau 31 : Calcul et classification de la qualité de l'eau selon l'indice WQI.**

Echantillons	X (m)	Y (m)	WQI	Classification
<b>B4</b>	982,10	406,01	19,90	Excellente eau
<b>B5</b>	983,60	406,25	19,95	Excellente eau
<b>B6</b>	986,10	411,80	18,42	Excellente eau
<b>B7</b>	987,70	410,30	21,36	Excellente eau
<b>B8</b>	988,85	409,65	20,10	Excellente eau
<b>B9</b>	989,40	408,55	20,20	Excellente eau
<b>B13</b>	992,00	406,60	19,49	Excellente eau
<b>6906</b>	987,10	409,45	21,72	Excellente eau
<b>6910</b>	988,30	408,95	19,48	Excellente eau
<b>6917</b>	990,03	407,38	16,75	Excellente eau
<b>6918</b>	991,40	406,90	21,19	Excellente eau
<b>A7</b>	981,55	404,50	22,32	Excellente eau
<b>U1</b>	981,85	405,55	27,92	Excellente eau
<b>U3</b>	991,00	408,45	24,34	Excellente eau

La distribution spatiale de l'indice de la qualité de l'eau (WQI) prouve que toute la région d'étude n'est pas soumise à aucune sorte de pollution et que ces eaux gardent leur qualité originelle malgré qu'elles sont contenu dans une nappe libre formée essentiellement de sable propice à toute sorte de pollution éventuelle.

#### **IV. 7. 2. Aptitude des eaux souterraines à l'irrigation (Diagramme de Richards) :**

Richards (1954) a élaboré une classification, en se basant sur les deux paramètres à savoir (SAR et conductivité électrique). Le SAR qui est défini par la relation :

$$SAR = \frac{Na}{\sqrt{\frac{Ca+Mg}{2}}} \text{ mg/l}$$

Les classes d'utilisation des eaux (C1S1,...C4S4) (tableau 32) montrent les différentes précautions à prendre pour l'utilisation de ces eaux pour l'irrigation. Utilisé pour les eaux de la région, nous obtenons le diagramme représenté par la figure 48.

D'après la figure ci-dessous on peut conclure que les eaux souterraines de la nappe libre du massif dunaire de Bouteldja se dévisent en deux classes d'aptitude à l'irrigation, la classe C<sub>1</sub>S<sub>1</sub> et la classe C<sub>2</sub>S<sub>1</sub>. La première classe, qui englobe la plupart des points d'eau, elle signifie que les eaux sont d'excellente qualité et leur utilisation est sans danger pour l'irrigation de la plupart des cultures sur la plupart des sols. La deuxième classe, qui concerne seulement le forage U1, elle signifie que les eaux sont de bonne qualité et qu'elles sont convenables aux plantes qui ont une tolérance aux sels, cependant leur utilisation peut générer des problèmes pour les argiles.

**Tableau 32 : Classification des eaux par degrés d'aptitude à l'irrigation (Méthode du SAR).**

Degrés	Qualité	Classe	Etat d'utilisation
1	Excellente	C <sub>1</sub> -S <sub>1</sub> C <sub>1</sub> -S <sub>2</sub>	Utilisation sans danger pour l'irrigation de la plupart des cultures sur la plupart des sols.
2	Bonne	C <sub>2</sub> -S <sub>1</sub> C <sub>2</sub> -S <sub>2</sub>	Convenable aux plantes qui ont une tolérance aux sels, cependant son utilisation peut générer des problèmes pour les argiles.
3	Admissible	C <sub>3</sub> -S <sub>1</sub> , C <sub>2</sub> -S <sub>3</sub> C <sub>3</sub> -S <sub>2</sub>	La salinité doit être contrôlée, irrigation des cultures tolérables aux sels sur des sols bien drainées.
4	Médiocre	C <sub>4</sub> -S <sub>1</sub> , C <sub>4</sub> -S <sub>2</sub> C <sub>3</sub> -S <sub>3</sub>	Eau fortement minéralisée, utilisée uniquement pour des plantes très résistantes aux sels dont le sol présente une bonne perméabilité.
5	Mauvaise	C <sub>3</sub> -S <sub>4</sub> , C <sub>4</sub> -S <sub>3</sub> C <sub>4</sub> -S <sub>4</sub>	Inutilisable.

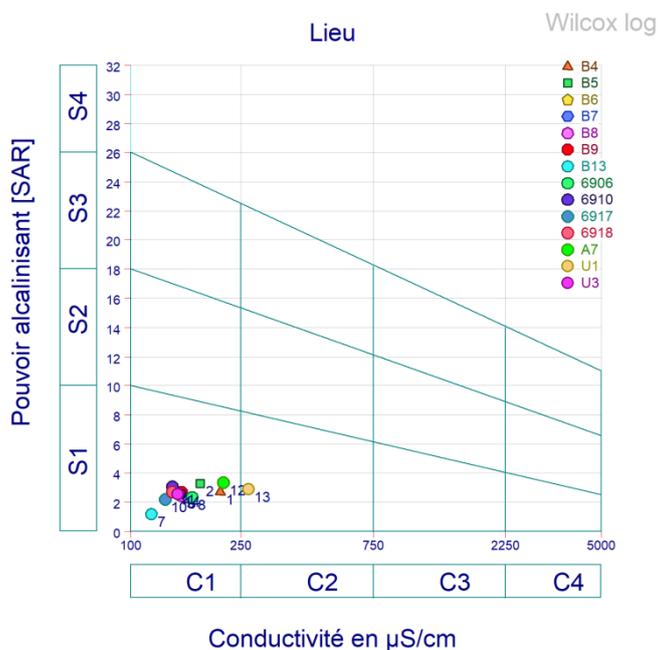


Figure 47 : Diagramme de Richards.

#### IV. 8. Conclusion :

D'après l'étude hydro-chimique des eaux de la nappe libre du massif dunaire de Bouteldja il résulte que le faciès chimique dominant est chloruré sodique et potassique ou sulfaté sodique. Le diagramme de Stiff démontre une minéralisation faible.

Le diagramme de Durov démontre clairement qu'il y a une dominance du Cl et du Na à 85.72 % des échantillons prélevés, le reste découle soit d'une recharge récente et fraîche, soit d'une dominance des cations et anions  $\text{Na}^{++}$  et  $\text{SO}_4^{-}$ .

Les études statistiques par analyse en composantes principales (ACP) confirment que les chlorures et le sodium sont à l'origine de la minéralisation des eaux.

Les concentrations des éléments chimiques des points d'eaux étudiés sont tous dans les intervalles des standards de l'OMS et sont des eaux douces.

D'après la classification selon l'Indice de la qualité de l'eau (WQI), la qualité des eaux de la nappe libre du massif dunaire de Bouteldja est excellente à la consommation humaine ce qui prouve que toute la région d'étude n'est pas soumise à aucune sorte de pollution et que ces eaux gardent leur qualité originelle malgré qu'elles sont contenues dans une nappe libre formée essentiellement de sable propice à toute sorte de pollution éventuelle.

Enfin, en classant ces eaux par degrés d'aptitude à l'irrigation selon la méthode du SAR, il découle qu'elles sont soit d'excellente ou bien de bonne qualité.



# *Conclusion*

## *Générale*

### Conclusion générale :

A travers ce mémoire de fin d'études de master, nous avons abordé la problématique de ce mémoire qui traite l'évaluation qualitative des eaux souterraines de la nappe libre du massif dunaire de Bouteldja (Wilaya d'El Tarf). Les conclusions que nous avons pu tirer sont:

La région d'étude se localise dans la partie orientale de l'Algérie et plus précisément dans le territoire de la wilaya d'El Tarf.

La géomorphologie démontre la dominance du Quaternaire dans la partie avale Nord-Ouest et Nord-Est.

La couverture végétale représente 60% de la superficie de la wilaya d'El Tarf.

Stratigraphiquement, les formations géologiques sont d'âge allant du secondaire jusqu'au quaternaire récent.

L'étude hydroclimatologique, a démontré que notre région d'étude possède un climat de type sub-humide. Les précipitations durant la période (2011-2021) sont de l'ordre de 647.97 mm, 670.82 mm et 729.08 mm en moyenne annuelle, la température moyenne annuelle est de 17.97 °C, 18.34°C, 18.91 °C aux stations des Salines, de Ben M'hidi et de Bouteldja respectivement. Les années déficitaires dépassent les années excédentaires à Bouteldja alors qu'elles sont égales aux Salines et Ben M'hidi.

Les évapotranspirations réelles (ETR) déterminées par la méthode de Thornthwaite, sont égales à 447.1 mm/an aux Salines, 477.4 mm/an à Ben M'hidi et 483.0 mm/an à Bouteldja, soit 69.00 %, 71.17% et 66.25% des précipitations.

La confrontation des différentes cartes sur lesquelles la distribution de chaque paramètre caractéristique (épaisseur, transmissivité et perméabilité), nous a permis sur le plan hydrodynamique de distinguer deux zones de meilleures potentialités :

- La zone Sud-Est qui va de Mouaïssia à Bordj Ali Bey regroupe un grand nombre de forages présentant des meilleurs débits.
- La zone centrale.

Il semble que le système aquifère du massif dunaire est en relation directe avec la mer au Nord et avec la nappe alluvionnaire de l'oued Kebir Est au Sud, suivent un axe d'écoulement préférentiel Nord-Est, Sud-Est.

Du point de vue hydrochimique, le faciès chimique dominant des eaux de la nappe libre du massif dunaire de Bouteldja est le faciès chloruré sodique et potassique ou sulfaté sodique. Le diagramme de Stiff démontre une minéralisation faible.

## CONCLUSION GÉNÉRALE

---

Le diagramme de Durov démontre clairement qu'il y a une dominance du Cl et du Na à 85.72 % des échantillons prélevés, le reste découle soit d'une recharge récente et fraîche, soit d'une dominance des cations et anions  $\text{Na}^{++}$  et  $\text{SO}_4^{-}$ .

Les études statistiques par analyse en composantes principales (ACP) confirment que les chlorures et le sodium sont à l'origine de la minéralisation des eaux.

Les concentrations des éléments chimiques des points d'eaux étudiés sont tous dans les intervalles des standards de l'OMS et sont des eaux douces.

D'après la classification selon l'Indice de la qualité de l'eau (WQI), la qualité des eaux de la nappe libre du massif dunaire de Bouteldja est excellente à la consommation humaine ce qui prouve que toute la région d'étude n'est pas soumise à aucune sorte de pollution et que ces eaux gardent leur qualité originelle malgré qu'elles sont contenu dans une nappe libre formée essentiellement de sable propice à toute sorte de pollution éventuelle.

Enfin, en classant ces eaux par degrés d'aptitude à l'irrigation selon la méthode du SAR, il découle qu'elles sont soit d'excellente ou bien de bonne qualité.



*Références*

*Bibliographiques*

### Références bibliographiques :

**Abassi S. A., 1999.** Water Quality Indices. State-of-the art. J.IPHE., No.1.

**Adak M. D. G., Purohit K. M. & Datta J., 2001.** Assessment of drinking water quality of river Brahmani. Indian J Environ Protect 8 (3):285–291.

**Affoun S., 2006.** Ressources en eaux, mobilisation et utilisation dans le bassin versant de la Mafragh", Mémoire de Magistère, Université Mentouri-Constantine, 158p.

**Asadi S. S., Vuppala P. & Anji R. M., .2007.** Remote sensing and GIS techniques for evaluation of groundwater quality in Municipal Corporation of Hyderabad (Zone-V). India Int. J. Environ. Res. Publ. Health 4(1):45–52.

**Bakria M., 2017.** Essai de gestion intégrée des ressources en eau dans la wilaya de Guelma. Mémoire de Master en Géographie et Aménagement du Territoire, option : Villes et Dynamiques Spatiales, Univ. Ziane Achour-Djelfa, 72p.

**Belksir M.S., Chaab S. & Abour F., 2016.** Qualité hydro chimique des eaux de la nappe superficielle dans la région de l'oued Righ et évaluation de sa vulnérabilité à la pollution. Rev. Sci. Technol., Synthèse 32: 42 - 57. ISSN-1111-4924. e-ISSN : 2352-9717.

**Bougherira N., 2008.** Impact des rejets industriels du complexe sidérurgique sur les eaux superficielles et souterraines dans la plaine de Meboudja. Mémoire de Magister en Géologie option : géosciences, Département de géologie, FST, Uni. Badji Mokhtar-Annaba, 129p.

**Boudiaf Z. & Kemal H. F., 2019.** Vulnérabilité des ressources en eaux souterraines à la pollution, cas de la nappe du Mio-plio-quadernaire du Synclinal de Djelfa. Mémoire de Master en Agronomie, Département des Sciences Agronomiques et Vétérinaires, FSNV, Univ. Ziane Achour-Djelfa, 104p.

**Boukerb S., 2021.** Vulnérabilité à la pollution de la nappe aquifère du massif dunaire de Bouteldja (El-Tarf). Mémoire de master en géologie appliquée, Unv.Tizi-Ouzou

**Castany G. & Margat J., 1977.** Dictionnaire français d'hydrogéologie. B.R.G.M S.G.N, Orléans, 249p.

**Debieche T. H., 2002.** Évolution de la qualité des eaux (salinité, azote et métaux lourds) sous l'effet de la pollution saline, agricole et industrielle. Application à la basse plaine de la Seybouse, Nord-Est Algérien. Thèse de Doctorat, Univ. de Franche-Comté .199p

**Detay, 1997.** La gestion active des aquifères. Edition MASSON, Paris, 415p.

**Douyemi A. & Khlaif S., 2015.** Evaluation de vulnérabilité à la pollution d'une nappe en milieu humide et comparaison des méthodes appliquées cas de la nappe liber d'El Tarf (Nord-est d'Algérie). Mémoire de master, Département des Sciences et Technologie, Univ. d'El Oued.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

**Dwivedi S. L. & Pathak V. 2007.** A preliminary assignment of water quality index to Mandakini river, Chitrakoot. *Indian J Environ Protect* 27:1036–1038.

**Haied N., 2015.** Evaluation quantitative d'une réalimentation de la nappe libre du massif dunaire de Bouteldja dans la région de Bordj Ali Bey et son impact sur la qualité des eaux souterraines. Thèse de doctorat, Univ. Badji Mokhtar-Annaba, 193p.

**Haied N., 2008.** Impact des eaux de réalimentation sur la qualité des eaux souterraines de la nappe libre du massif dunare de Boutldja (NE Algérien). Mémoire de magister , Univ. Badji Mokhtar-Annaba, 128p.

**Hani A., 2003.** Analyse méthodologique de la structure et des processus anthropiques : application aux ressources en eau d'un bassin côtier méditerranéen. Thèse de Doctorat d'état en géologie appliquée, Univ. Badji Mokhtar-Annaba, 214p.

**Hani B., 2011.** Faisabilité de l'implantation de bassins d'alimentation d'un aquifère, cas du massif dunaire de Bouteldja (Exterme Nord-EST Algérien). Mémoire de magisterr, Univ. Badji Mokhtar-Annaba, 127p.

**Horton R. K., 1965.** An index number system for rating water quality. *J. Water Pollu. Cont. Fed.*, 37(3). 300-305.

**Joleaud, 1936.** Etude géologique de la région de Bône et la Calle.

**Kachi N., Kachi S. & Bousnoubra H., 2016.** Effects of Irrigated Agriculture on Water and Soil Quality (Case Perimeter Guelma, Algeria). *Soil & Water Res.*, 11, 2016 (2): 97–104, doi: 10.17221/81/2015-SWR.

**Ketata M., Gueddari M. & Bouhlila R., 2012.** Use of geographical information system and water quality index to assess groundwater quality in El Khairat deep aquifer (Enfidha, Central East Tunisia). *Arab. J. Geosci.* 5:1379–1390.

**Khelaifa S., 2015.** Evaluation de la vulnérabilité à la pollution d'une nappe en milieu humide et comparaison des méthodes appliquées. Cas de la nappe libre d'El Tarf (Nord-Est d'Algérie). Mémoire de Master en Hydraulique, Univ. Hamma Lakhdar d'El-Oued, 112p.

**Lahondere J. C., 1987.** Les séries ultra Telliennes d'Algérie Nord-Orientale et les formations environnantes dans leur cadre structurale. Thèse sc., Univ. Paul Sabatier Toulouse, 242p.

**Mansouri S., 2016.** Analyse et planification des ressources en eau intr-région en utilisant le modele weap. seybouse (annaba) et cotiers costantinois Est (El-Tarf). Laboratoire Eau et énergie, Univ. Hassiba Benbouali.

**Mitra B. K., 1998.** Spatial and Temporal Variation of Ground Water Quality in Sand Dune Area of Aomori Prefecture in Japan.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

- Mouchara N., 2004.** L'hydrogéologie du massif dunaire de Bouteldja et les possibilités de réalimentation artificielle de la nappe. Mémoire d'ingénieur, Univ. Badji Mokhtar-Annaba, 59p.
- Négre P., Guerrot C. & Millot R., 2007.** Chemical and Strontium isotope characterization of rainwater in France: influence of sources and hydrogeochemical implications. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, Volume 43(3), 179-196.
- Pradhan S. K., Patnaik D., & Rout S. P., 2001.** Water quality index for the ground water in and around a phosphatic fertilizer plant. *Indian J Environ Protect* 21:355–358.
- Ramakrishnaiah C. R., Sadashivaiah C. & Ranganna G., 2009.** Assessment of Water Quality Index for the Groundwater in Tumkur Taluk, Karnataka State. India. *E-Journal of Chemistry*, 2009, 6(2), 523-530, <http://dx.doi.org/10.1155/2009/757424>.
- Ramdani A., 1996.** Etude hydrogéologique et simulation par modèle mathématique de la nappe dunaire de la région de Bouteldja. Thèse de magister, Univ. Badji Mokhtar-Annaba, 139p.
- Rodier J., Legube B., Merlet N. & Coll., 1980.** L'analyse de l'eau. Edition Dunod, Paris, 1529p.
- Saadali B., 2007.** Etude de la qualité des eaux des sources issues du massif dunare de Bouteldja (Algérie externe Nord orientale. Mémoire de magister option géosciences Univ. Badji Mokhtar-Annaba, 84p.
- Sadoune A., 2012.** Vulnérabilité, et évaluation des ressources en eau dans l'extrême Nord-Est Algérie. Mémoire de magister, Univ. Badji Mokhtar-Annaba, 80p.
- Saeedi M., Abessi O., Sharifi F. & Meraji H., 2010.** Development of groundwater quality index. *Environ Monit Assess* 163:327–335.
- Sedrati. N., 2006.** Vulnérabilité et impact des agglomérations sur la qualité des eaux du massif dunaire de Bouteldja. Mém de Magister. Univ Badji Mokhtar-Annaba, 106 p.
- Seltzer P., 1946.** Le climat de l'Algérie. Bull. hors série. IMPGA. 219p.
- Şener Ş., Şener E., & Davraz A. 2017.** Evaluation of water quality using water quality index (WQI) method and GIS in Aksu River (SW-Turkey). *Science of the Total Environment*, 584–585, 131–144.
- Srinivasamoorthy K., Chidambaram M., Prasanna M. V., Vasanthavigar M., John Peter A. & Anandhan P. 2008.** Identification of major sources controlling Groundwater Chemistry from a hard rock terrain-a case study from Mettur taluk, Salem district. Tamilnadu, India. *Journal of Earth System Sciences* 117(1):49–58.
- Strojexport, 1975.** Prospection géophysique de la plaine de Annaba. Réinterprétation, Rapport A.N.R.H., inédit, Annaba, Algérie, 30p.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

**Vasanthavigar M., Srinivasamoorthy K., Vijayaragavan K., Rajiv Ganthi R., Chidambaram S., Anandhan P., Manivannan R. & Vasudevan S., 2010.** .Application of water quality index for groundwater quality assessment: Thirumanimuttar sub-basin. Tamilnadu, India. Environ Monit Assess. doi:[10.1007/s10661-009-1302-1](https://doi.org/10.1007/s10661-009-1302-1).

**Vila J. M., 1978.** Carte structurale au 1/500000 de la chaîne alpine d'Algérie orientale et des confins Algéro-Tunisiens. (Structural map of the Alpine range of eastern Algeria and the Algerian-Tunisian borders).

**Yidana S. M. & Yidana A., 2010.** Assessing water quality using water quality index and multivariate analysis. Environmental Earth Science 59:1461–1473.