

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

LARBI TBESSI-TEBESSA UNIVERSITY  
UNIVERSITE LARBI TBESSI-TEBESSA



جامعة العربي التبسي - تبسة

Faculté des Sciences Exactes et Sciences  
de la Nature et de la Vie  
Département des Sciences de la Terre et  
de l'Univers

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de MAGISTER  
en *Hydrogéologie*

Option : Impact de changement climatique sur les ressources hydriques  
en Algérie

Par

**RAHMANI Badreddine**

(Ingénieur d'Etat en Hydrogéologie)

**APPROCHE HYDROGEOLOGIQUE ET HYDROCHIMIQUE  
DES EAUX SOUTERRAINES DANS UNE ZONE SEMI  
ARIDE. CAS DE LA NAPPE MIO-PLIO-QUATERNAIRE DU  
SYNCLINAL DE DJELFA**

Date de soutenance:

**DEVANT LE JURY**

Mr HAMIMED Messaoud	MCA	Université de Tébessa	Président
Mr BAALI Fethi	Professeur	Université de Tébessa	Rapporteur
Mr MAOUI Amar	Professeur	Université de Guelma	Examineur
Mr GOUAIDIA Layachi	MCA	Université de Tébessa	Examineur

## ملخص:

المنطقة المدروسة (منخفض الجلفة) تعد من المناطق الشبه جافة بنسبة تساقط 334 مم. هذه المنطقة تتضمن الجيب المائي ميوبليوكواترنار الجوفي ، الذي يلعب دورا هاما في تزويد مياه الري بالإضافة إلى مياه الشرب للمنطقة .

الهدف من هذه الدراسة هو دراسة مستوى المياه الجوفية بالإضافة إلى الدراسة الهيدروكيميائية لهذا الجيب المائي .

النتائج المحصل عليها لهذه الدراسة تجعل من الممكن إبراز اتجاه التدفق العام نحو الشمال الشرقي مع تدرج هيدروليكي يتراوح من 0.5 إلى 2 في المائة .

من جهة أخرى ، الدراسة الهيدروكيميائية تظهر بأن أغلب المياه المدروسة لها طابع كيميائي بيكربوناتى كالسيومي و كبريتي كالسيومي .

فحص خرائط متساوية المحتوى تترجم التغيرات السطحية لمختلف الخصائص الفيزيوكيماوية التي تسمح بمعرفة درجة التمعدن المرتفعة على مستوى الجزء الشمالي الغربي وأقصى الشمال الشرقي للمنطقة المدروسة .

في النهاية، دراسة قدرات المياه الجوفية لري الأراضي الزراعية لمنطقة الدراسة تبين أن أغلب المياه تظهر نوعية مقبولة باستثناء بعض المناطق في الجزء الشمالي الغربي و أقصى الشمال الشرقي .

**كلمات مفتاحيه :** منخفض الجلفة ، جيب مائي، البيزومتري ، هيدروكيمياء ، الري.

## **ABSTRACT:**

The zone study (Synclinal of Djelfa) belongs to the semi-arid zones, with precipitations 334mm.

This zone includes the Mio-Plio-Quaternary aquifer, which plays an important role in the supply of irrigation water as well as drinking water for the region.

The objective of this work is the piezometric study as well as the hydrochemical studies of groundwaters of the Mio-Plio-Quaternary aquifer.

The obtained results of the piezometric study make it possible to highlight the general direction of flow towards the North-East with hydraulic gradients varying from 0.5 to 2 %.

In addition, the hydrochemical study reveals that the quasi totality of the studied water wells present calcic bicarbonated and calcic sulphated facies.

The examination of the iso-concentrations map representing the variation of the various physicochemical parameters; allows noting a high degree of mineralization at the North-West part and the far North-East of the studied area.

Finally, the study of the groundwater aptitude for the irrigation of the agricultural lands shows that the majority of the water wells have an acceptable quality for the irrigation, except for some areas in the North-West and the far North-East.

**Key words:** Synclinal of Djelfa, aquifer, piezometric, hydrochemistry, irrigation

## **RESUME :**

La zone étudiée (synclinal de Djelfa) fait parti des zones semi arides avec des précipitations 334mm. Cette zone comprend l'aquifère Mio-Plio-Quaternaire, qui joue un rôle très important dans l'approvisionnement en eau d'irrigation et l'eau potable dans la région d'étude.

L'objectif de ce travail est l'étude piézométrique ainsi que l'étude hydrochimique des eaux souterraine de l'aquifère Mio-Plio-Quaternaire.

Les résultats obtenue de l'étude piézométrique permettant en mettre en évidence que le sens d'écoulement général est dirigé vers le Nord Est avec un gradient hydraulique varie entre 0.5 et 2%.

D'autre part, l'étude hydrochimique fait apparaitre que la quasi-totalité des points d'eau étudiés présentent un faciès bicarbonaté calcique et sulfaté calcique.

L'examen des cartes d'iso teneurs chimiques ; traduisant la variation spatiale des différents paramètres physico-chimiques. Cette cartographie permet de constater un degré de minéralisation élevée au niveau de la partie Nord Ouest et l'extrême Nord Est de la zone d'étude.

Enfin, l'étude de l'aptitude des eaux souterraines à l'irrigation des terres agricoles, montre que la majorité des points d'eau présentent une qualité acceptable pour l'irrigation, sauf pour certaines zones du Nord-Ouest et l'extrême Nord-Est.

**Mots clés :** Synclinal de Djelfa, aquifère, piézométrique, hydrochimie, irrigation

## REMERCIEMENTS

Au terme de cette étude, je tiens en premier lieu à remercier Dieu qui m'a facilité le travail en mettant dans mon chemin des gens qui m'ont énormément aidé et soutenu

Je voudrais remercier Mr. le Professeur BAALI Fethi pour avoir dirigé ce travail tout au long de son édification. Les critiques et les conseils qu'il m'a prodigués me furent utiles. et d'avoir été toujours disponible et attentif.

Je tenons à exprimer mes très vifs remerciements à l'ensemble des enseignants de l'hydrogéologie de Département des Sciences de la Terre et de l'Univers.

Je remercie et affectueusement le comité de jury d'avoir accepté d'examiner ce modeste travail.

J'ai l'agréable tâche de témoigner ma grande reconnaissance aux différents services techniques auprès desquels j'ai bénéficié d'un aimable appui, notamment ceux qui m'ont facilité l'accès aux données de mesures et à la documentation, en particulier :

- l'A.N.R.H. de Djelfa (particulièrement Mr MEGHRBI Abdelkader) ;
- la Direction de ressources en eau de la Wilaya de Djelfa ;
- l'Office National de la Météorologie (station de Djelfa) ;

IL m'est également très agréable de remercier l'ensemble de mes amis, pour l'aide qu'ils m'ont apporté : CHEHILI Djamel, STAMBOLI Mohamed Lamine, NESRAT Ali , DJEBASSI Toufik, BRAHMI Serhane.

Mes plus vifs remerciements vont plus particulièrement :

A mes parents qui sans leur aide surtout morale, ce travail ne serait pas arrivé à bout ;  
A mes chers frères et sœurs.

## Liste des Tableaux

<b>01</b>	Caractéristiques morphométriques du sous bassin versant Oued Djelfa-Melah et Daiet Mefiteg.....	04
<b>02</b>	Caractéristiques hydrogéologiques et géophysiques des formations.(CGG1974).....	18
<b>03</b>	Coordonnées de la stations météorologique de Djelfa.....	23
<b>04</b>	Variation des précipitations au niveau de la station de Djelfa (1975-2014).....	24
<b>05</b>	Valeurs du rapport P/T pour la période 1975 – 2014 à la station de Djelfa . .....	30
<b>06</b>	Valeurs de l’ETP estimées par la formule de Thornthwaite. à la station de Djelfa .....	32
<b>07</b>	Bilan hydrologique moyen (1975-2014) à la station de Djelfa.....	34
<b>08</b>	Valeurs du ( R ) et ( I ) dans la région du synclinal de Djelfa , période (1975-2014).....	35
<b>09</b>	Valeurs des apports liquides selon la formule Algérienne.....	36
<b>10</b>	Valeurs des apports liquides selon la formule de Mallet-Gauthier .....	36
<b>11</b>	Valeurs des apports liquides selon la formule de Turc.....	36
<b>12</b>	Variation des paramètres physiques des eaux souterraines.....	51
<b>13</b>	Variation des paramètres chimiques des eaux souterraines.....	53
<b>14</b>	Faciès chimiques des eaux souterraines .....	64
<b>15</b>	Matrice de corrélation entre les variables. Octobre 2014.....	74
<b>16</b>	Matrice de corrélation entre les variables. Avril 2015.....	74
<b>17</b>	Normes applicables aux eaux destinées à l’alimentation humaine d’après l’O.M.S.....	76
<b>18</b>	Pourcentage des échantillons d’eau à concentrations inférieures aux normes fixées par l’OMS.....	76
<b>19</b>	Classification des eaux d’irrigation en fonction de la C.E et du S.A.R .....	77

## Liste des Figures

<b>01</b>	Situation géographique de la région d'étude .....	03
<b>02</b>	Situation du bassin versant de l'oued Djelfa-Melah et Daiet Mefiteg.....	04
<b>03</b>	Réseau hydrographique du sous bassin versant Oued Djelfa-Melah et Daiet Mefiteg .....	05
<b>04</b>	Géologie de la région d'étude à partir de l'extrait de la carte géologique de Djelfa .....	09
<b>05</b>	Coupes géologiques traversant la région d'étude .....	10
<b>06</b>	Log stratigraphique synthétique du Synclinal de Djelfa.....	14
<b>07</b>	Schéma tectonique du monts des Ouled Nail et bassin des Zahrez.....	16
<b>08</b>	Carte de position des sondages électriques verticaux et des profils .....	17
<b>09</b>	Coupes géoélectriques des profil B,D,F,G,R.(CGG1974) .....	19
<b>10</b>	Carte d'iso résistivités en ligne AB=400m. dans la région d'étude .....	20
<b>11</b>	Courbe de simple cumul des précipitations à la station de Djelfa (1975-2014).....	23
<b>12</b>	Abaque de l'indice d'aridité annuel de De Martonne.....	25
<b>13</b>	Climagramme d'Emberger .....	26
<b>14</b>	Variations interannuelles des précipitations de la station de Djelfapour .....	27
<b>15</b>	Variation des précipitations moyennes mensuelles à la station de Djelfa pour la période.....	27
<b>16</b>	Variation des températures moyennes annuelles à la station de Djelfa pour la période .....	28
<b>17</b>	Variation des températures moyennes mensuelles à la station de Djelfa .....	28
<b>18</b>	Diagramme Ombro-thermique pour la période (1975-2014) à la station de Djelfa .....	29
<b>19</b>	Abaque de Wundt modifié par Coutagne .....	32
<b>20</b>	Relation Précipitation-Température-ETR , Pour la période (1975-2014) à la station de Djelfa .	34
<b>21</b>	Carte d'inventaire des points d'eau de la nappe Mio-Plio-quaternaire du synclinale de Djelfa ...	40
<b>22</b>	Carte piézométrique de la nappe Mio-Plio-quaternaire du synclinale de Djelfa, Octobre 2014 ...	41
<b>23</b>	Carte piézométrique de la nappe Mio-Plio-quaternaire du synclinale de Djelfa, Avril 2015 .....	42
<b>24</b>	Variation du niveau statique en fonction du temps et des précipitations .....	43
<b>25</b>	Carte des conditions aux limites de la nappe Mio-Plio-Quaternaire du synclinal de Djelfa .....	44
<b>26</b>	Courbe de descente du forage Maalba F5 .....	46
<b>27</b>	Courbe de remontée du forage Maalba F5.....	46
<b>28</b>	Courbe de descente du forage 05 Juillet .....	47
<b>29</b>	Courbe de remontée du forage 05 Juillet.....	47
<b>30</b>	Carte d'inventaire des points d'eau échantillonnés .....	50
<b>31</b>	carte des conductivités octobre 2014.....	52
<b>32</b>	carte des conductivités Avril 2015 .....	53
<b>33</b>	Carte des calcium ( $Ca^{2+}$ ), Octobre 2014.....	55
<b>34</b>	Carte des calcium ( $Ca^{2+}$ ), Avril 2015 .....	55
<b>35</b>	Carte des magnésiums ( $Mg^{2+}$ ), Octobre 2014 .....	56
<b>36</b>	Carte des magnésiums ( $Mg^{2+}$ ), Avril 2015.....	56
<b>37</b>	Carte des sodiums ( $Na^+$ ), Octobre 2014 .....	57
<b>38</b>	Carte des sodiums ( $Na^+$ ), Avril 2015 .....	57
<b>39</b>	Carte des bicarbonates ( $HCO_3^-$ ), Octobre 2014.....	59
<b>40</b>	Carte des bicarbonates ( $HCO_3^-$ ), Avril 2015 .....	59
<b>41</b>	Carte des chlorures ( $Cl^-$ ), Octobre 2014 .....	60
<b>42</b>	Carte des chlorures ( $Cl^-$ ), Avril 2015.....	60

<b>43</b>	Carte des sulfates ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), Octobre 2014 .....	61
<b>44</b>	Carte des sulfates ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), Avril 2015 .....	61
<b>45</b>	le cycle de l'azote dans le sol (Hill, 1991) .....	62
<b>46</b>	carte des nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ), Octobre 2014 .....	63
<b>47</b>	carte des nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ), Avril 2015 .....	63
<b>48</b>	carte de répartition des faciès chimiques de la nappe Mio-Plio-Quaternaire .....	65
<b>49</b>	Diagramme de Piper , campagne Octobre 2014 .....	65
<b>50</b>	Diagramme de Piper , campagne Avril 2015.....	66
<b>51</b>	Diagrammes de Schoeller-Berkaloff , Octobre 2014 .....	67
<b>52</b>	Diagrammes de Schoeller-Berkaloff , Avril 2015 .....	68
<b>53</b>	Evolution du calcium .....	69
<b>54</b>	Origine de la salinité en fonction des rapports caractéristiques .....	70
<b>55</b>	Relation $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ - conductivité .....	70
<b>56</b>	Relation $\text{Mg}^{2+}$ - $\text{Cl}^-$ .....	71
<b>57</b>	Relation $\text{Mg}^{2+}$ - $\text{SO}_4^{2-}$ .....	71
<b>58</b>	Relation $\text{SO}_4^{2-}$ - $\text{Cl}^-$ .....	72
<b>59</b>	Relation $\text{SO}_4^{2-} / \text{Cl}^-$ - conductivité .....	72
<b>60</b>	Echange de base.....	73
<b>61</b>	Espace des variables du plan factoriel $\text{F1} \times \text{F2}$ .....	75
<b>62</b>	Espace des individus.....	76
<b>63</b>	Diagramme de classification des eaux d'irrigation (méthode de Richards) , Octobre 2014 .....	78
<b>64</b>	Diagramme de classification des eaux d'irrigation (méthode de Richards) , Avril 2015.....	78
<b>65</b>	Diagramme de classification des eaux d'irrigation ( méthode de Wilcox ).....	79

# Table de matières

<b>INTRODUCTION GENERALE</b>	<b>01</b>
<b>Chapitre I : CADRE GEOGRAPHIQUE</b>	
I.1. Situation géographique .....	03
I.2. Hydrographie .....	04
I.3. Caractéristiques morphométriques.....	04
I.4. Climat et végétation .....	05
I.5. Aperçu géomorphologique.....	06
<b>Chapitre II : CADRE GEOLOGIQUE ET GEOPHYSIQUE</b>	
II.1 INTRODUCTION .....	08
II.2 DESCRIPTION LITHOLOGIQUE DES FORMATIONS.....	08
II.2.1 TRIAS.....	08
II.2.2 CRETACE.....	08
II.2.2.1 Néocomien.....	08
II.2.2.2 Barrémien .....	11
II.2.2.3 Aptien .....	11
II.2.2.4 Albien .....	11
II.2.2.5 Cénomaniens .....	11
II.2.2.6 Turonien.....	11
II.2.2.7 Sénonien .....	11
II.2.3 NEOGENE .....	12
II.2.3.1 Mio-Pliocène .....	12
II.2.4 QUATERNAIRE.....	12
II.3 HYDROGEOLOGIE ET STRATIGRAPHIE .....	13
II.4 APERCU TECTONIQUE .....	15
II.5. GEOPHYSIQUE .....	17
II.5.1. Interprétations des résultats de la prospection électrique .....	18
II.5.2. Echelle des résistivités .....	18
II.6 CONCLUSION .....	21
<b>Chapitre III : HYDROCLIMATOLOGIE</b>	
III.1 INTRODUCTION .....	23
III.2 HOMOGENEITE DES DONNEES .....	23
III.3 DETERMINATION DU TYPE DE CLIMAT .....	24
III.3.1 Indice de De Martonne .....	24
III.3.2 Climagramme de Louis Emberger .....	25
III.4 ANALYSE DES DONNEES CLIMATIQUES.....	26
III.4.1 Précipitation .....	26
III.4.1.1 Variations interannuelles des précipitations.....	26
III.4.1.2 Variation de la précipitation moyenne mensuelles .....	27



III.4.2	Température .....	28
III.4.2.1	variation des températures moyennes annuelles .....	28
III.4.2.2	variation des températures moyennes mensuelles .....	28
III.4.3	Diagramme ombrothermique .....	29
III.4.4	Détermination de l'humidité du sol ( méthode d'Euverte ) .....	29
<b>III.5</b>	<b>ESTIMATION DE L'ÉVAPOTRANSPIRATION</b> .....	<b>30</b>
III.5.1	Evapotranspiration potentielle ( ETP ) .....	30
III.5.1.1	Formule de Thornthwaite .....	30
III.5.2	Evapotranspiration réelle (ETR) ou déficit d'écoulement ( De ) .....	31
III.5.2.1	Formule de L. Turc .....	31
III.5.2.2	Formule de Coutagne .....	31
III.5.2.3	Méthode de Wundt.....	32
<b>III.6</b>	<b>LE BILAN HYDROLOGIQUE</b> .....	<b>33</b>
III.6.1	Calcul de l'ETR selon la formule de Thornthwaite .....	33
III.6.2	Calcul du déficit agricole ( Da ) .....	33
III.6.3	Détermination du ruissèlement et de l'infiltration .....	34
<b>III.7.</b>	<b>DETERMINATION DES APPORTS LIQUIDES</b> .....	<b>34</b>
<b>III.8</b>	<b>CONCLUSION</b> .....	<b>37</b>

## **Chapitre IV : HYDROGEOLOGIE**

<b>IV.1</b>	<b>INTRODUCTION</b> .....	<b>39</b>
<b>IV.2</b>	<b>GEOMETRIE DE L'AQUIFERE</b> .....	<b>39</b>
<b>IV.3</b>	<b>PIEZOMETRIE</b> .....	<b>39</b>
IV.3.1	Carte piézométrique Octobre 2014 .....	40
IV.3.2	Carte piézométrique Avril 2015.....	42
IV.3.3	Variation du niveau statique en fonction du temps et des précipitations.....	42
<b>IV.4</b>	<b>CONDITIONS AUX LIMITES</b> .....	<b>44</b>
<b>IV.5</b>	<b>DETERMINATION DES PARAMETRES HYDRODYNAMIQUES</b> .....	<b>45</b>
IV.5.1	Interprétation des essais de pompage .....	45
<b>IV.6</b>	<b>CONCLUSION</b> .....	<b>48</b>

## **Chapitre V : HYDROCHIMIE**

<b>V.1</b>	<b>INTRODUCTION.</b> .....	<b>50</b>
<b>V.2</b>	<b>ECHANTILLONNAGE ET ANALYSE HYDROCHIMIQUE</b> .....	<b>50</b>
V.2.1	Méthodes d'analyse .....	51
V.2.1.1	Mesures in situ.....	51
V.2.1.2	Analyses aux laboratoires.....	51
<b>V.3</b>	<b>ETUDE DES PARAMETRES PHYSIQUES</b> .....	<b>51</b>
V.3.1	Température.....	51
V.3.2	Potentiel hydrogène (pH) .....	51
V.3.3	La conductivité électrique (CE) .....	52

<b>V.4 ETUDE DES PARAMETRES CHIMIQUES</b> .....	53
V.4.1 Cartographie hydrochimique.....	54
V.4.1.1 Cartes du calcium .....	54
V.4.1.2 Carte du magnésium.....	54
V.4.1.3 Cartes du sodium .....	54
V.4.1.4 Cartes du Bicarbonate .....	58
V.4.1.5 Cartes du chlorure .....	58
V.4.1.6 Cartes du sulfate .....	58
V.4.1.7 Cartes du nitrate .....	62
V.4.2 Classification chimique des eaux .....	64
V.4.2.1 Classification des eaux d'après Stabler.....	64
V.4.2.2 Classification des eaux d'après Piper.....	64
V.4.2.3 Classification des eaux d'après Schoeller-Berkaloff.....	66
<b>V.5 L'ORIGINE DU CHIMISME DES EAUX SOUTERRAINES</b> .....	69
V.5.1 Les éléments $\text{Ca}^{2+} - \text{HCO}_3^- - \text{SO}_4^{2-}$ .....	69
V.5.2 Rapport $\text{HCO}_3^- / (\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-})$ - Conductivité électrique .....	69
V.5.3 Couple $\text{Ca}^{2+} / \text{Mg}^{2+}$ - Conductivité.....	70
V.5.4 Couple $\text{Mg}^{2+} - \text{Cl}^-$ .....	71
V.5.5 Couple $\text{Mg}^{2+} - \text{SO}_4^{2-}$ .....	71
V.5.6 Couple $\text{SO}_4^{2-} - \text{Cl}^-$ .....	72
V.5.7 Couple $\text{SO}_4^{2-} / \text{Cl}^-$ - Conductivité.....	72
V.5.8 Diagramme $\text{Ca}^{2+} / (\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}) - \text{Na}^+ / \text{Cl}^-$ .....	73
V.5.9 Diagramme $\text{Mg}^{2+} / (\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}) - \text{Na}^+ / \text{Cl}^-$ .....	73
<b>V.6 ANALYSE STATISTIQUE (A.C.P)</b> .....	74
V.6.1 Matrice de corrélation .....	74
V.6.2 Analyse des plans factoriels $F1 \times F2$ .....	75
<b>V.7 QUALITE CHIMIQUE DES EAUX</b> .....	75
V.7.1 Potabilité des eaux.....	75
V.7.2 Aptitude des eaux à l'irrigation .....	76
V.7.2.1 Classification des eaux par la méthode de Richards .....	76
V.7.2.2 Classification des eaux par la méthode de Wilcox.....	79
<b>V.8 CONCLUSION</b> .....	81
<b>CONCLUSION GENERALE et RECOMMANDATIONS</b> .....	83
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b>	
<b>ANNEXES</b>	

## **Liste des abréviations et des paramètres :**

**ANRH** : Agence Nationale des Ressources Hydrauliques

**DRE** : Direction des Ressources en Eau

**OMS** : Organisation Mondiale de la Santé

**O.R.S.T.O.M** : Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre mer

**ETP** : Evapotranspiration potentielle (mm)

**ETR** : Evapotranspiration Réelle (mm)

**DA** : Déficit Agricole (mm)

**I** : Infiltration de l'eau dans le sol (mm)

**K** : Perméabilité (m/s)

**R** : Ruissellement (mm)

**RFU** : Réserve Facilement Utilisable (mm)

**SAR** : Sodium Absorption Ratio

**T** : Transmissivité (m<sup>2</sup>/s)

**T** : Température (°C)

**ACP** : Analyse en Composantes Principales

## **INTRODUCTION GENERALE :**

La zone étudiée (synclinal de Djelfa) fait partie semi-arides de l'Algérie. Elle est située à 300 km au sud de la capitale Alger. La zone étudiée est caractérisé par sa vocation agro-pastorale. Actuellement l'agriculture connaît un grand essor dans la région, les cultures maraichères cultivées en été destinées non seulement aux marchés de la wilaya mais aussi à d'autre wilaya limitrophes. La région a connu plusieurs implantation des vergers d'arbres fruitiers tel que: les pommiers, les grenadiers, les abricotiers, les prunes ....etc. Notons que l'industrie au niveau de la wilaya de Djelfa est à ses premiers balbutiements.

Toutes ces activité agricole et agro-pastorales nécessitent des ressources en eaux, qui pourront satisfaire les besoins de la région, en vu d'aboutir à un développement durable de la zone d'étude.

Dans ces conditions et en l'absence des ressources en eaux de surface, le Mio-Plio-Quaternaire est l'aquifère le plus sollicité par la population rurale dans toutes les étendues steppiques de la région. Il est exploité par des puits de grands diamètres et des forages.

La forte demande en eau d'irrigation et même de l'eau potable dans la région d'étude, accentuera les contraintes sur cette ressource. En outre, les facteurs naturels, telle que les contraintes géologiques, ont un effet sur la qualité de eaux. Les travaux hydrogéologiques antérieurs (ANRH, MRE, ...etc.) sont peu nombreux et n'ont pas mis en évidence l'impact de la surexploitation et la lithologie sur la qualité de cette ressource souterraine.

C'est dans ce cadre, que cette étude a été réalisée; pour mieux caractériser les différents paramètres hydrodynamiques et hydrochimiques de la dite nappe.

La méthodologie adoptée pour ce travail se présente comme suit :

Dans le premier chapitre une présentation générale de la région d'étude; les différents aspects caractéristique; à savoir situation géographique, climatique et aspect géomorphologique.

Le deuxième chapitre on s'est intéressé à identifier toutes les formations et les structures géologiques qui ont une relation de près ou de loin avec notre aquifère.

On a détaillé, dans le troisième chapitre, les conditions climatiques qui règnent sur la région, à savoir la pluviométrie et le régime thermique. Ces facteurs influencent d'une façon directe les mécanismes hydrogéologiques des aquifères. On a établie, ensuite, le bilan hydrique et dégagé les éléments du bilan (écoulement, infiltration et ruissellement).

L'hydrogéologie de l'aquifère est étudiée en Quatrième chapitre où, un inventaire des points d'eaux et des mesures piézométriques ont été effectués. En outre l'établissement et l'interprétation de la carte piézométrique qui permet de déduire les conditions aux limites ainsi que les caractéristiques hydrodynamiques de la nappe, suivies par l'interprétation des essais de pompage réalisés.

Le dernier chapitre porte sur la détermination des faciès chimiques des eaux, leur évolution dans l'espace et la qualité chimique des eaux.

Et enfin une conclusion générale.

**Chapitre I :**  
**CADRE GEOGRAPHIQUE**

## I.1. Situation géographique :

Le synclinal de Djelfa occupe la partie centrale de l'Atlas Saharien précisément, aux monts de Ouled Nail au Nord de la Wilaya de Djelfa, il est situé à 300 Km au sud de la capitale Alger, à 110 Km au Nord de la wilaya de Laghouat et à 110 Km au Sud-Ouest de Boussaada (Wilaya de M'sila), Il s'étend sur 80 Km de long et 25 Km de large en maximum, entouré par les massifs des Djebels: Senalba, Dj.Djellal Gharbi et Dj.Djellal Chargui. (Fig. 01).

Il est limité par les coordonnées géographiques suivantes :

- latitude : 34°22' -34°-50' Nord
- Longitude : 2°45' -3°40' Est

Le synclinal appartient principalement au grand bassin des Zahrezs codé 17, plus exactement, dans la partie amont du sous bassin versant de l'Oued Djelfa-Melah codé 17-02 et dans une partie du sous bassin versant Daïet Mefiteg codé 17-04. (Fig. 02)

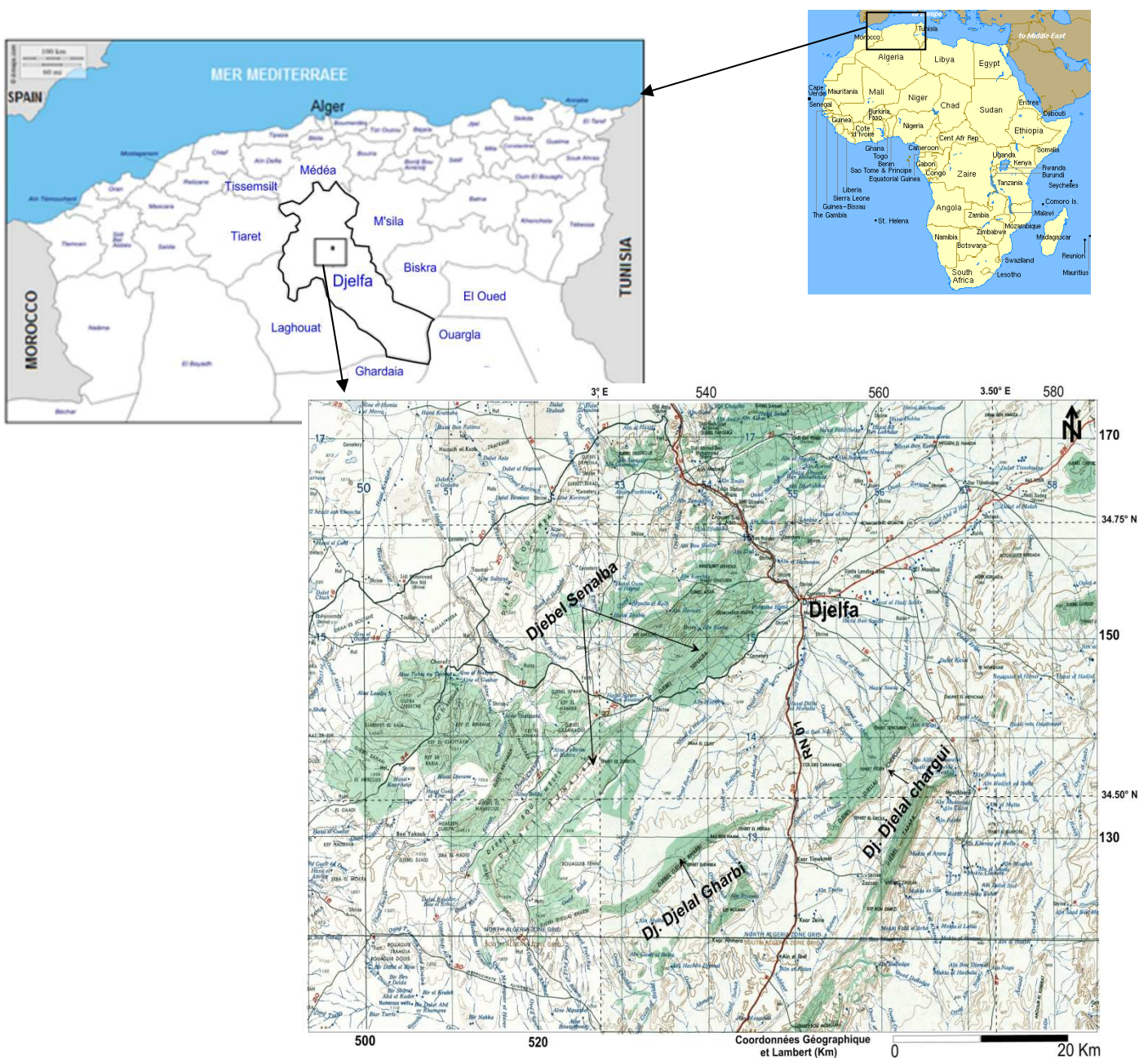
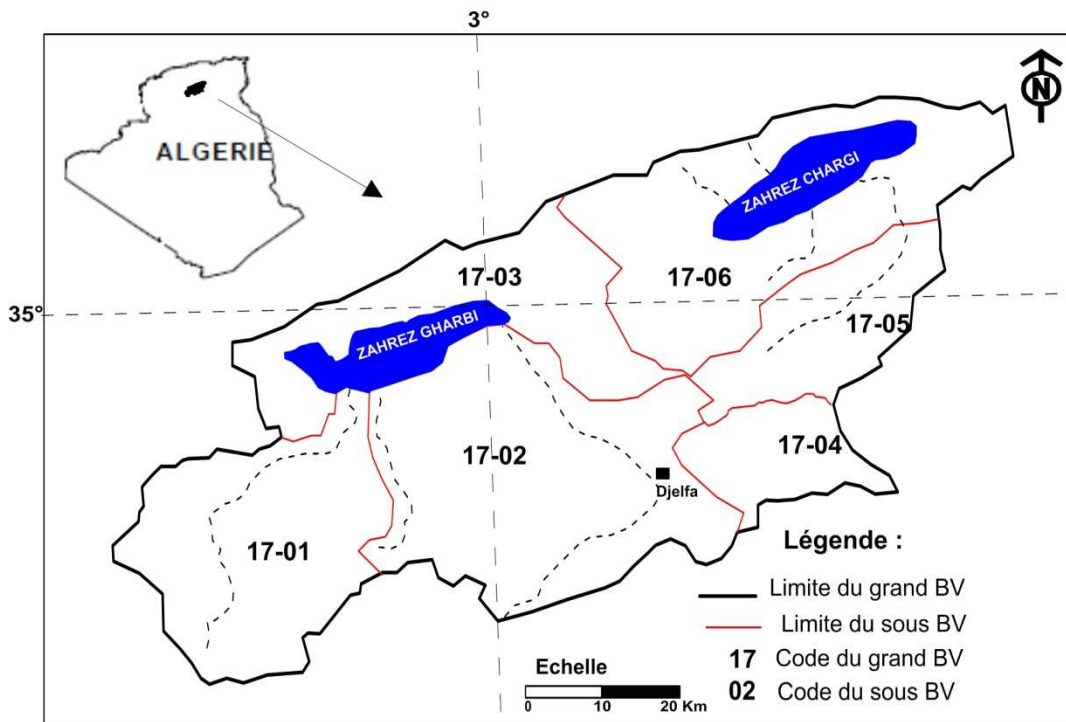


Figure 01 : Situation géographique de la région d'étude



**Figure 02 :** Situation du bassin versant de l’oued Djelfa-Melah et Daiet Mefiteg Dans le grand bassin des Zahrez

## I.2. Hydrographie

Le réseau hydrographique du sous bassin versant de l’Oued Djelfa-Melah est fortement ramifié par de nombreux affluents. Le parcours des cours d’eau est conditionné par la structure du bassin. En effet, la topographie accentuée des flancs du synclinal délimite les versant, d’où dérivent des thalwegs qui s’ordonnent et forment des entailles plus ou moins importantes au niveau des dépôts Mio-Plio-Quaternaires. Au niveau de ce réseau, on distingue l’Oued principal qui est l’Oued Djelfa-Melah, draine toute la partie occidentale du synclinal de Djelfa sur une étendue de 1294 Km<sup>2</sup>. Oued Msekka et Oued Ben-Naam formant les affluents de l’Oued Djelfa-Melah. (Fig.03)

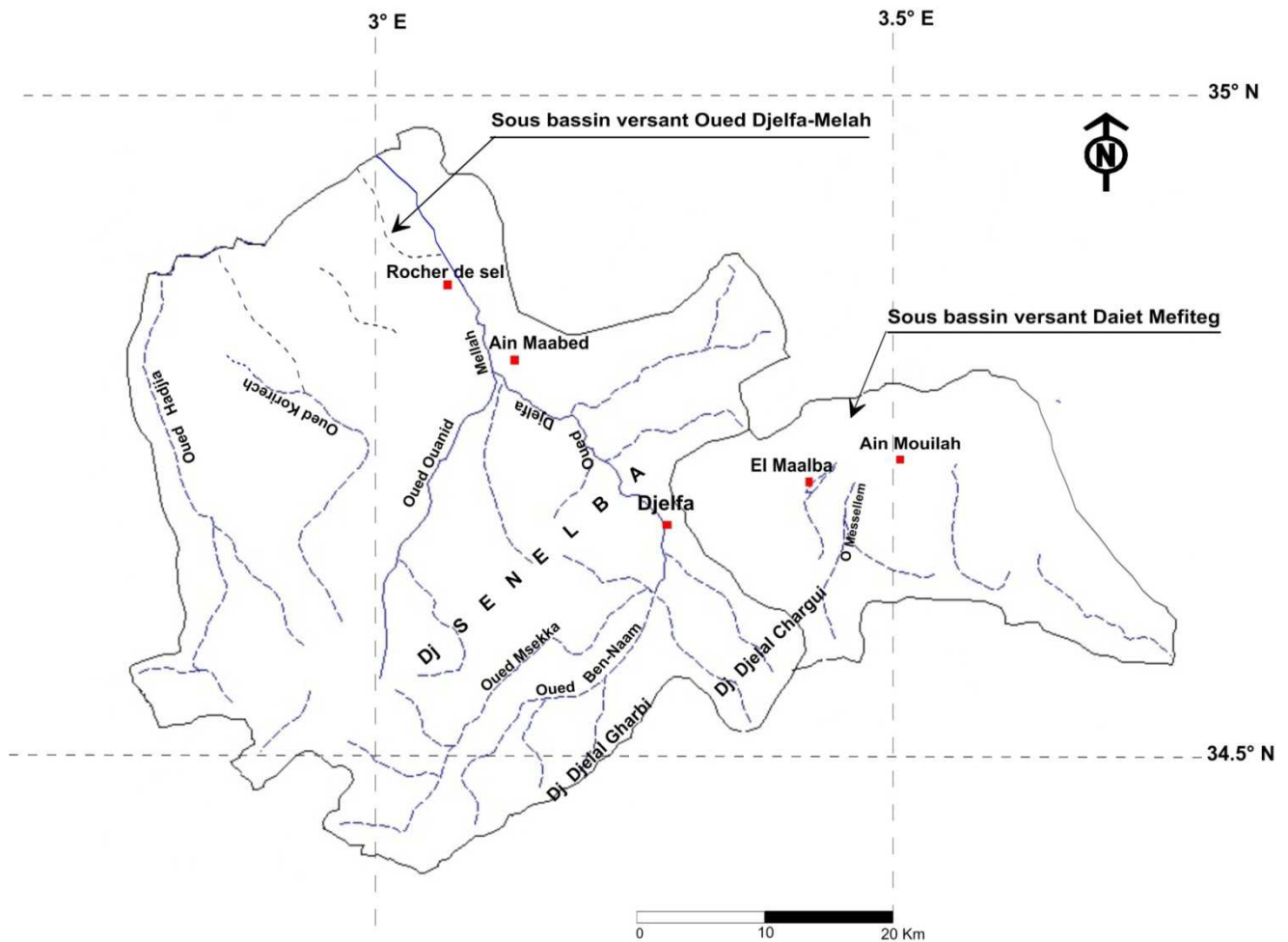
Pour le sous bassin versant Daiet Mefiteg qui occupe 437.6Km<sup>2</sup>, le réseau hydrographique n’est pas développé où les rares cours d’eau, souvent éphémères.

## I.3. Caractéristiques morphométriques :

les sous bassins versants, Oued Djelfa-Melah et Daiet Mefiteg, ont été délimités à l’aide des cartes topographiques de Djelfa 1/300.000 et 1/1.000.000 , leurs caractéristiques morphométriques se résument dans le tableau 01.

Paramètre de forme	Périmètre (Km)	Surface (Km <sup>2</sup> )	Indice de compacité deGravillius (K <sub>c</sub> )	Altitude moyenne (m)	Altitude de fréquence ½ (m)	Longueur du rectangle équivalent (Km)	largeur du rectangle équivalent (Km)	Indice de pente globale (%)
Bv de l’oued Djelfa-Melah	252.7	2223	1.5	1210	1205	105.16	21.14	0.46
Bv Daiet Mefiteg	95.9	437.6	1.28	1280	1277	35.49	12.33	0.71

**Tableau 01 :** Caractéristiques morphométriques du sous bassin versant Oued Djelfa-Melah et Daiet Mefiteg.



**Figure 03 :** Réseau hydrographique du sous bassin versant Oued Djelfa-Melah et Daiet Mefiteg

#### **I.4. Climat et végétation :**

La région concernée est caractérisée par un climat semi aride avec des hivers très froids, des périodes de gel et des étés chauds. La période sèche apparaît à partir du mois de Juin avec un maximum en Juillet 33 C°. La température minimale absolue est inférieure à 0° C en hiver

Les principales formations végétales existantes au niveau des bassins versants sont: le forêt, la steppe et le matorral.

- La forêt: Elle est localisée dans les zones montagneuses, c'est une forêt formée de pins d'Alep qui a du mal à s'adapter au climat de la région.
- La steppe: Elle se présente comme une formation discontinue, formée de touffes de xérophiles, plantes herbacées implantées sur les sols non salés. Elles sont spécifiques des régions de climat continental semi-aride.
- Le matorral: Il occupe une surface inférieure à celle de la forêt. Il s'agit d'une steppe arbustive, constituée de petits chênes, d'oliviers sauvages et d'arbousiers.



### **I.5. Aperçu géomorphologique :**

La région d'étude s'intègre dans deux vastes compartiments topographiquement parallèles, représentés par Djebel Senalba et les deux Djebels Djellal. Ils sont orientés Sud Ouest-Nord Est. Ces deux parties sont parfaitement distinctes par des limites bien marquées et des dénivellements assez accusés. Sur le bord Nord de la dépression, le Djebel Senalba suit un tracé rectiligne. Il s'élève entre 1400 et 1600 m d'altitude et sur le bord Sud de la dépression, les deux Djebels Djellal, opposent un tracé sinueux dû aux différents accidents qui l'affectent. Ils s'élèvent jusqu'à 1450 m d'altitude.

La dépression est formée de petites plaines dont l'altitude varie entre 1100 mètres et 1300 mètres, les plaines les plus importantes sont celles de Maalba et de Mouilah à l'Est de la ville de Djelfa.

**Chapitre II :**  
**CADRE GEOLOGIQUE ET**  
**GEOPHYSIQUE**

## **II.1 INTRODUCTION :**

Le synclinal de Djelfa fait partie des monts de Ouleds Naïls qui forment la partie centrale de l'Atlas Saharien, qui est d'orientation grossière Sud Ouest – Nord Est. Représenté principalement sur la carte de Djelfa 1/200000 (NI-31-XVI) et la carte d'Aflou 1/200000 (NI31-XV).

En se basant sur les anciens travaux géologiques régionaux de nombreux géologues chercheurs tels que: G.CORNET (1952), A.CAIRE (1967), POUGET(1980), J.TRAYSSAC (1981).....etc, le synclinal est constitué d'un matériel de nature continentale d'âge, Trias, Crétacée, Tertiaire et Quaternaire, plissé au cours des phases orogéniques Tertiaires, Ces formations sont constituées de:

- Terrains anciens représentés par le Trias.
- Très importantes assises carbonatées, grès, marnes d'âge Crétacé.
- Remplissage Mio-Plio-Quaternaire constitué essentiellement de limons, d'argiles, de marnes, de lentilles de grés et de conglomérats.

## **II.2 DESCRIPTION LITHOLOGIQUE DES FORMATIONS :**

En se référant aux études sus citer, La série stratigraphique de la région d'étude se présente de bas en haut comme suit (Fig. 03 et 04):

### **II.2.1 TRIAS :**

Le Trias ne se trouve en surface que dans quelques diapirs, c'est-à-dire dans des endroits où il à remonté à travers les couches qui l'avaient recouvert, où se trouve en contact anormal avec les couches plus récentes.

Le plus important de ces diapirs est le « Rocher de sel » , situé à une vingtaine de Kilomètres au Nord de la ville de Djelfa , il existe également d'autres affleurements triasiques visibles le long de la route (Alger-Djelfa, RN°01) à l'entrée de la ville de Djelfa , et aussi à l'extrême Sud Est de la zone d'étude au niveau du Maalba.

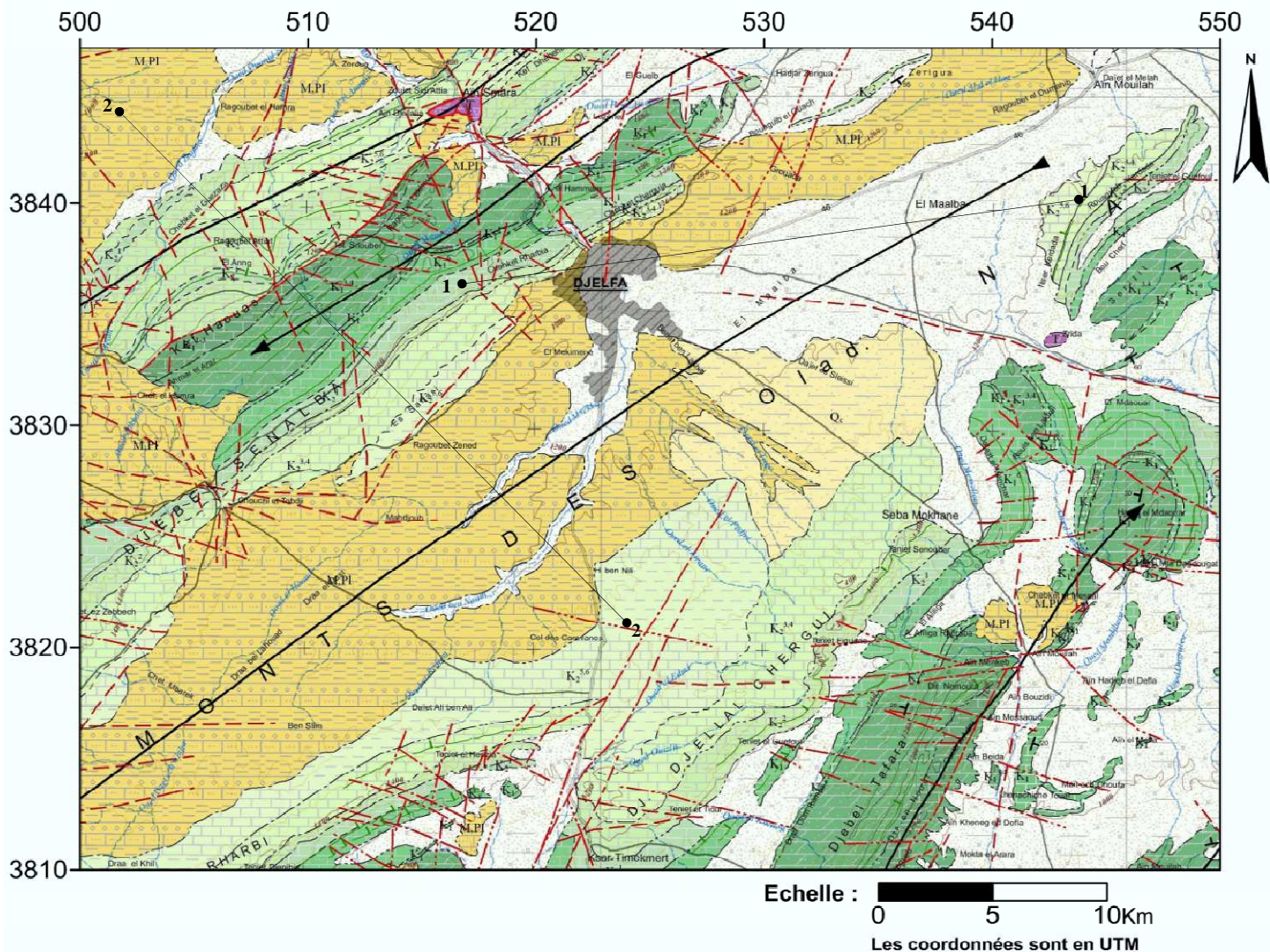
Ce sont des faciès évaporitiques constitués de sel gemme, de gypse lamellaire, d'anhydrite, de marnes bariolées, de grés argileux de couleur lie de vin et de schistes versicolores, avec des inclusions de conglomérats.

Le Trias est sans intérêt hydrogéologique, au contraire, il peut constituer un problème de salinité des eaux.

### **II.2.2 CRETACE :**

#### **II.2.2.1 Néocomien :**

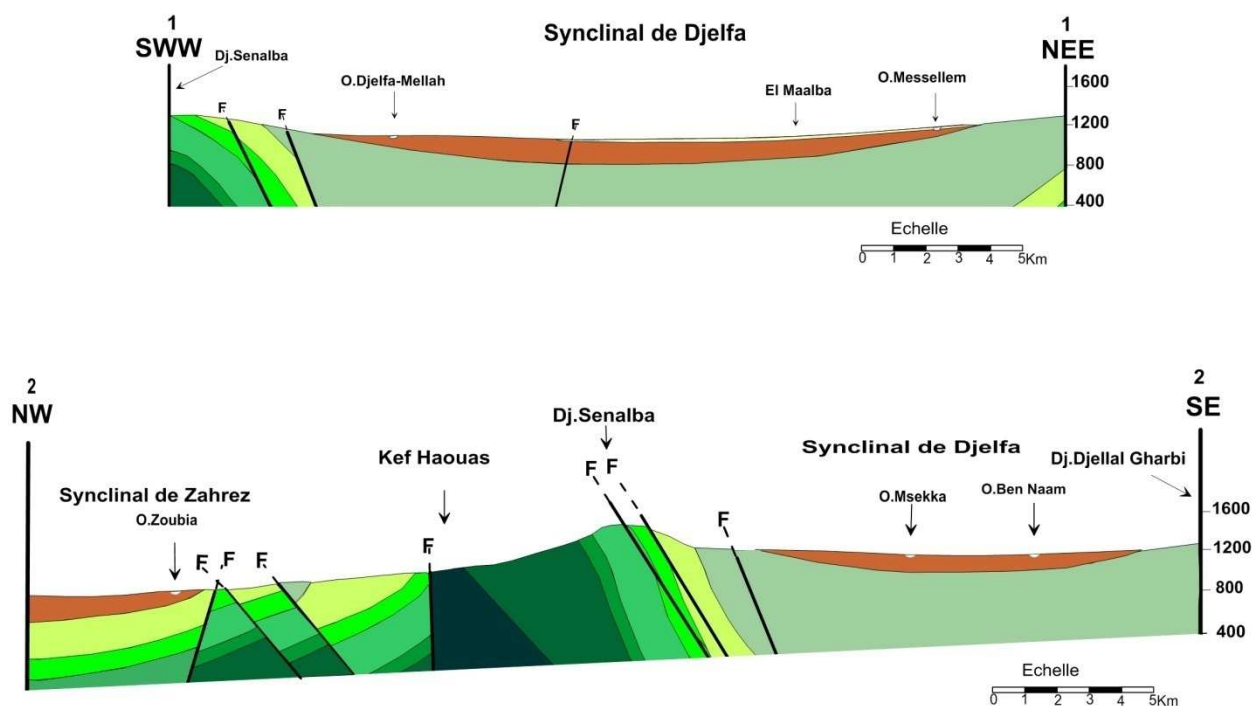
Il affleure et forme les reliefs du Kef-Haouas et Djebel Aissa qui sont situées au Nord à proximité de Djebel Senalba. Il est représenté par des argiles gréseuses, sur lesquelles reposent des bancs décamétriques de calcaires dolomitiques, riches en polypiers diaclasés avec des figures de dissolution en surface. Vers le sommet on trouve des calcaires gréseux, des calcaires à térébratules et échinidés. L'ensemble atteint une épaisseur de 800 m.



**Légende :**

- |  |                               |  |    |  |    |  |    |   |
|--|-------------------------------|--|----|--|----|--|----|---|
|  | A                             |  | Qa |  | Qd |  | Qc | Quaternaire : Alluvions, sables, graviers, limons, argiles, croûte calcaire |
|  | M.PI                          | Mio-Pliocène: Argiles et conglomérats, calcaires lacustres   |    |  |    |  |    |   |
|  | K <sub>2</sub> <sup>5,6</sup> | Crétacé supérieur (Campanien et Maestrichtien): Ensemble mameux à la base et calcaires variés (oolitic, zoogen, à silex) au sommet |    |  |    |  |    |   |
|  | K <sub>2</sub> <sup>3,4</sup> | Crétacé supérieur (Coniacien et Santonien): Calcaires  |    |  |    |  |    |   |
|  | K <sub>2</sub> <sup>2</sup>   | Crétacé supérieur (Turonien): Calcaires  |    |  |    |  |    |   |
|  | K <sub>2</sub> <sup>1</sup>   | Crétacé supérieur (Cénomaniens): Calcaires jaunes, mames et gypse et dolomies  |    |  |    |  |    |   |
|  | K <sub>1</sub> <sup>6</sup>   | Crétacé inférieur (Albien): Grès, calcaires ocres et argiles   |    |  |    |  |    |   |
|  | K <sub>1</sub> <sup>5</sup>   | Crétacé inférieur (Aptien) mames et Calcaires  |    |  |    |  |    |   |
|  | K <sub>1</sub> <sup>3,4</sup> | Crétacé inférieur (Hautérvien-Barrémien): Grès, dolomies et argiles gréseuses  |    |  |    |  |    |   |
|  | K <sub>1</sub> <sup>1-3</sup> | Crétacé inférieur (Berriasien-Hautérvien): Calcaires dolomités et mames  |    |  |    |  |    |   |
|  | T                             | Trias: Gypses, argiles et dolomies noires  |    |  |    |  |    |   |

**Figure 04:** Géologie de la région d'étude à partir de l'extrait de la carte géologique de Djelfa.



**Légende :**

- Q Quaternaire : Alluvions, sables, graviers
- MPI Mio-Pliocène : Argiles et conglomérats, calcaires lacustres
- $K_2^{5,6}$  Crétacé supérieur ( sénonien ) : Marnes et calcaires
- $K_2^{3,4}$  Crétacé supérieur ( Turonien ) : Calcaires
- $k_2^2$  Crétacé supérieur ( Turonien ) : Calcaires
- $k_2^1$  Crétacé supérieur ( Cénomaniens ) : Calcaires et marnes
- $k_1^6$  Crétacé inférieur ( Albien ) : Grès et calcaires
- $k_1^5$  Crétacé inférieur ( Aptien ) : Marnes et calcaires
- $k_1^{3,4}$  Crétacé inférieur ( Barrémien ) : Grès et dolomies
- $k_1^{1-3}$  Crétacé inférieur ( Néocomien ) : Calcaires dolomités et marnes

**Figure 05 :** Coupes géologiques traversant la région d'étude (réalisées à partir de la carte géologique et topographique de Djelfa-1/200000-)

### **II.2.2.2 Barrémien :**

Ces formations affleurent au Kef-Haouas et dans l'Est de la carte, avec des épaisseurs allant jusqu'à 1500m à l'Ouest et plus de 2000m à l'Est. Ces formations sont représentées par de dépôts continentaux où nous y trouvons des alternances de grès et d'argiles gréseuses rouges. Les grès sont durs à stratifications entrecroisées, constitués de grains fins très consolidés. Vers la partie sommitale, les bancs de grès sont moins épais (de l'ordre métrique). Les diaclases sont fréquentes et conformes à la direction des failles.

### **II.2.2.3 Aptien :**

L'Aptien forme une bande étroite, continue bien visible dans les deux flancs, Nord et Sud, parfois il est discontinu quand il est caché par le quaternaire. (Rapport ANRH 1999)

Concernant la lithologie, l'Aptien II est formé de calcaires à orbitolines plus ou moins durs, de couleur beige à patine jaune légèrement verdâtre, et des marnes verdâtres à grisâtres. Les marnes sont plus dominantes que les calcaires, parfois on rencontre des bancs de calcaires fins argileux ou gréseux avec une épaisseur de 50 m au niveau de Djebel Djellal Chargui et Senalba. L'ensemble atteint une épaisseur de 200 m.

### **II.2.2.4 Albien :**

Les formations de l'Albien sont affleures tout au tour du synclinal. Sa partie inférieure est formée de grès massifs fins de couleur rouge, parfois blanc pâle tacheté de points noirs. Les grès sont intercalés par des passées d'argiles grisâtres. L'épaisseur est de 400 m en moyenne.

Sa partie supérieure est constituée de calcaires et marnes en alternance, avec une épaisseur d'environ 200 m.

### **II.2.2.5 Cénomaniens :**

Ces formations sont bien représentées dans la partie Nord au niveau de Djebel Senalba, avec une épaisseur moyenne 350m. Cette série est formée essentiellement par des marnes jaunes à jaunes verdâtres avec parfois des argiles jaunâtres, dans la partie sommitale, on y trouve aussi des intercalations de bancs calcaires, peu épais.

### **II.2.2.6 Turonien :**

Ces formations affleurent tout au tour du synclinal, avec une épaisseur moyenne 400m. Cette série est formée dans la partie sommitale de calcaires durs de couleur blanche claire ou grisâtre, très diaclasés et fissurés avec des figures de dissolution. Les fissures non concrétionnées, sont en communication directe, ce qui implique son intérêt hydrogéologique.

Vers la partie médiane, on rencontre un ensemble marneux gris verdâtre, fossilifère avec des intercalations des niveaux de calcaires organiques. Cet étage s'achève par des calcaires en plaquettes et des gypses.

### **II.2.2.7 Sénonien :**

Nous rencontrons ces formations sur les bordures et sous les affleurements Mio-pliocène et du Quaternaire. C'est essentiellement une alternance plus ou moins régulière de marnes, de calcaires dolomitiques, de calcaires blanc diaclasés à inocérames (de couleur jaunâtre à gris) et de lentilles de gypse qui sont fréquentes dans la partie sommitale. Il admet une épaisseur comprise entre 800 et 1000m.

## **II.2.3 NEOGENE :**

### **II.2.3.1 Mio-Pliocène :**

Il est bien représenté, au centre, au Nord, à l'Est, au Sud et à l'Ouest de la carte. Il est constitué de marnes, argiles rouges à jaunes verdâtres, de bancs de calcaires peu épais, de conglomérats à éléments calcaires et de gypse.

Les lentilles de conglomérat d'épaisseur entre 0,50 m à 1 m, alternent tous les 0,5 m avec des limons sableux rosâtres finement lités (J. TRAYSSAC 1981). Dans le matériel conglomératique nous y trouvons une prédominance de calcaire Turonien, aux cotés des débris de grès Albien, des marnes bariolées du Trias et des marnes bitumineuses Aptiennes à rognons de silex.

Il existe cependant, en allant vers le centre du synclinal, dans des assises supérieures, de rares intercalations de poudings, ce sont des grosses lentilles de 2 à 5 m d'épaisseur et de longueur pouvant atteindre plus de 30 mètres. Des figures de courants et de stratifications obliques, sont également représentées au niveau des lentilles conglomératiques ainsi que sur les limons sableux rouges.

Nous avons aussi un certain granoclassement; les gros galets et blocs sont massés en haut, tandis que la base est gravillonnée.

## **II.2.4 QUATERNAIRE :**

### **II.2.4.1 Quaternaire ancien :**

Représenté par un premier glaciaire, constitué d'une croute très épaisse et très dure presque dépourvue du matériel grossier. Il existe cependant un deuxième glaciaire, reposant sur les formations sablo-limoneuses du Néogène. Ils sont dans un premier lieu en discordance sur l'horizon de limon carbonaté blanc pulvérulent. Par dessus, on passe à un horizon bréchiq ue très fortement consolidé par une croute carbonatée.

### **II.2.4.2 Quaternaire moyen ( Tensiftien ) :**

Représenté par le troisième glaciaire, qui est caractérisé par une superposition de deux horizons carbonatés ; l'un limoneux à la base, pulvérulent à faciès gréseux, l'autre de type bréchiq ue englobant une forte proportion de galets et de calcaires et recouvert d'une croute zonaire, son épaisseur varie de 0,5 à 1,5 m.

Les terrasses à poudings sont fortement consolidées, deux sont visibles le long de l'oued Djelfa-Melah et de ces affluents principaux (O.Msekka et O.Ben Naam). L'épaisseur de ces terrasses est de 2 à 3 m en moyenne.

### **II.2.4.3 Quaternaire récent :**

Présente deux niveaux différents qui sont :

#### **A- Le bas glaciaire en croute :**

Il s'étale sur la moitié Nord de la dépression de Djelfa, et n'occupe qu'une place restreinte le long des oueds. Lithologiquement il est de type sablo-limoneux, peu consolidé avec un conglomérat constitué de galets anguleux et une matrice limono-argileuse. Son épaisseur varie de 0,5 à 1 m.

## **B- Les basses terrasses :**

### **B.1- La terrasse Soltanienne ( majeure ) :**

La stratigraphie est déposée en un granoclassement décroissant du bas en haut; on y en présence d'une séquence verticale avec à:

- La base : est constituée de conglomérat épais de 1 à 2 m. Le dépôt est de type alluvionnaires les plus grossiers de tout le Quaternaire. La matrice est sablo-graveleuse, peu consolidée.

- La partie moyenne : est constituée de lentilles de sables et de galets dans les quelles s'intercalent de minces passées de blocs.

- La partie haute : les sables sont de couleur ocre-beige, très finement lités, de plus en plus limoneux et carbonaté vers le haut de la séquence. Cette terrasse nous la rencontrons en bordure des oueds principaux du réseau hydrique, quelque fois, formant de vastes cônes de déjection. Elle s'étend de 5 à 6 m en moyenne.

### **B.2- La terrasse Rharbienne (mineure) :**

Elle est située près des principaux oueds et s'emboîte dans les terrasses Soltaniennes. Son épaisseur est de 2 à 4 m. La sédimentation est de type granoclassée, elle débute par un dépôt de conglomérat grossier et se termine par un autre sablo-limoneux.

Les différentes formations géologiques du synclinal de Djelfa se résument dans la figure 05.

## **II.3 HYDROGEOLOGIE ET STRATIGRAPHIE :**

A partir de la série lithostratigraphique décrite plus haut, on peut déduire les formations susceptibles d'être aquifères, présentant un intérêt hydrogéologique, et d'autres imperméables pouvant jouer le rôle de substratum imperméable (Fig. 05) :

### **II.3.1 Formations perméables :**

On peut citer :

- Les calcaires gréseux du néocomien supérieur
- Les grès du Barrémien.
- Les grès et les calcaires de l'Albien.
- Les calcaires du Cénomaniens supérieure
- Les calcaires du Turonien.
- Les formations Moi-Plio-Quaternaires.

### **II.3.2 Formations imperméables :**

On peut citer :

- Les argiles du Néocomien inférieure.
- Les marnes de l'Aptien.
- Les marnes et les argiles du Cénomaniens inférieure.
- Les marnes du Sénonien.



Faciès et étage correspondant		Lithostratigraphie	Hydrogéologie
300	Mio-Plio-Quaternaire	Limons sableux, croutes calcaires, argiles, marnes rouges, avec des lentilles de grès et calcaires	Perméable
800-1000 m	Sénonien	Calcaires et marnes en alternance et des lentilles de gypses assez fréquentes vers la partie sommitale	Peu perméable
400 m	Turonien	Calcaires durs de couleur blanche claire ou grisâtre, très diaclasés et fissurés, aussi des marnes gris verdâtre, fossilifère avec des intercalations des niveaux de calcaires organiques	Type karstique très productif
300	Cénomanién	Présence de calcaire vers la partie sommet et des marnes dans la partie basale	Perméable au sommet Imperméable à la base
600 m	Albien	Dans la partie sup des calcaires et marnes en alternances et dans la partie inf des grès massifs fins intercalé par des passées d'argiles grisâtres	Perméable
200	Aptien	Des marnes et calcaires (les marnes sont dominantes)	Imperméable
1500-2000 m	Barrémien	Alternance de grès et d'argiles gréseuses rouges avec une stratification entrecroisée fréquente dans les grès, les diaclases et les fissures sont nombreuses	Perméable
800 m	Néocomien	Présence des calcaires dolomitiques et calcaires gréseux vers la partie sommet, et des argiles gréseuses dans la partie basale	Perméable Imperméable
	Trias	gypse lamellaire, d'anhydrite, sel gemme, une série d'argile violines parfois bariolées à évaporites	

**Figure 06 :** Log stratigraphique synthétique du Synclinal de Djelfa.  
(Article : Chibane B, Boutaleb A, Lacroix M (2010), modifié)

## **II.4 APERCU TECTONIQUE :**

La structure géologique actuelle des monts des Ouleds Naïls est issue essentiellement des plissements tertiaires, avec des séries crétacées constituant l'ossature de ces monts, ils sont très plissés selon une direction SW-NE (J. TRAYSSAC 1981).

Le synclinal est subdivisé en deux parties :

- La partie centrale (axiale)
- Les flancs Nord et Sud du synclinal.

### **II.4.1 La partie centrale (axiale) :**

La zone axiale caractérisée par une orographie basse, correspond à une vaste cuvette d'axe SW-NE. Elle est comblée par des dépôts continentaux du Néogène et du Quaternaire.

### **II.4.2 Les flancs Nord et Sud du synclinal :**

#### **Le flanc Nord :**

Est constitué de deux sous-ensembles séparés par un contact tectonique majeur d'une direction conforme à la direction globale du synclinal.

-Le premier sous-ensemble de pendage supérieur à 40° est formé par une série monoclinale d'âge Sénonien à Néocomien. Ce qui correspond à une zone montagneuse parcourue par un réseau hydrographique orienté SE-NW dont l'oued principal est celui de Djelfa-Melah.

-Le deuxième sous-ensemble de même série à pendage NW inversé SE formant des plis au niveau de Kef-Haouas.

#### **Le flanc Sud :**

Il est constitué par une série monoclinale de pendage NW relativement plus faible de 12° à 30°. Ce flanc est affecté par un accident tectonique important, c'est un décrochement dextre dont le rejet horizontal dépasse les 5 Km subdivisant le flanc Sud du synclinal de Djelfa en deux parties (Djebels): Djebel Djellal Gharbi à l'Ouest de la route Djelfa-Laghouat et Djebel Djellal Chergui à l'Est de cette route (Fig. 06).

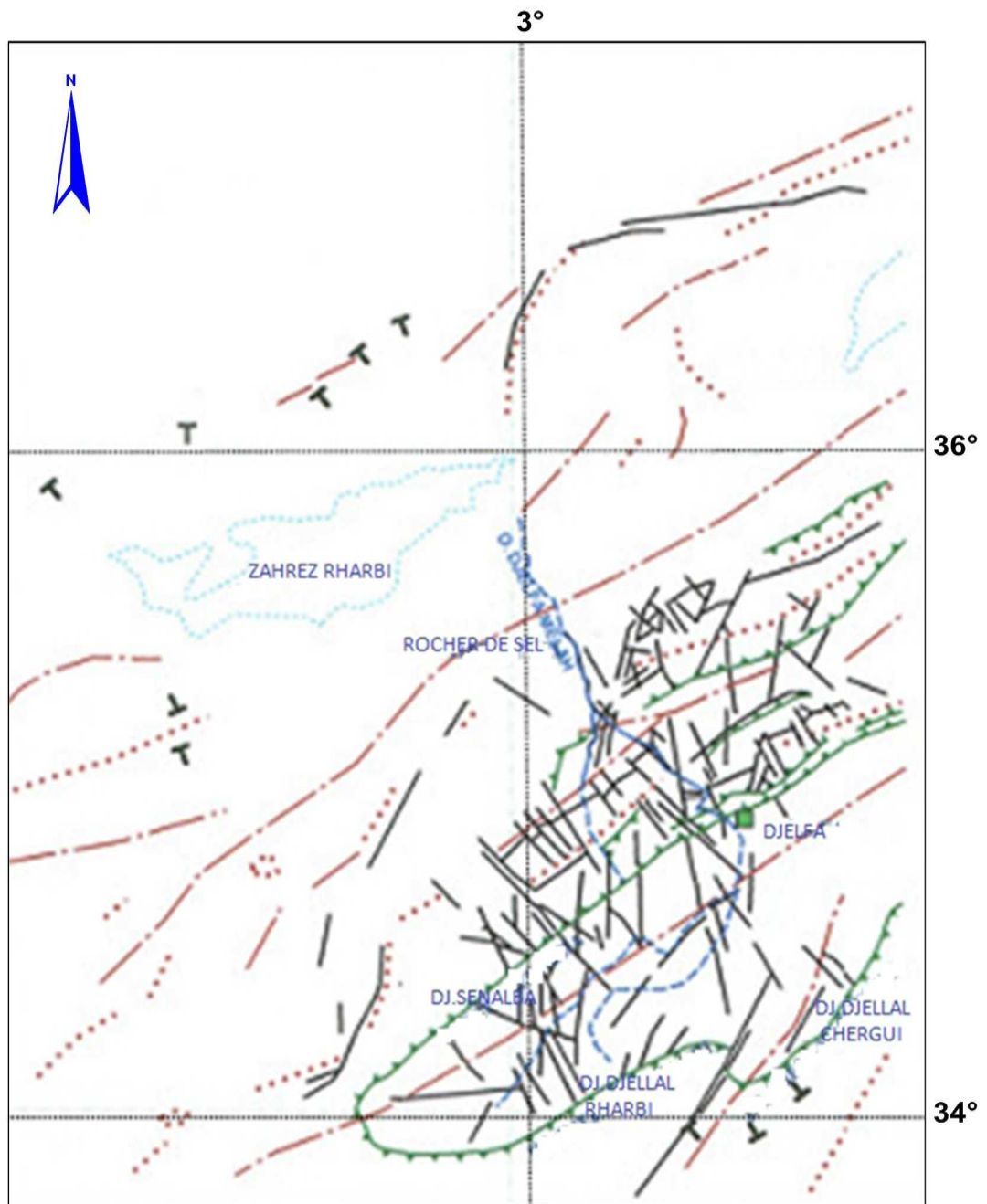
L'observation de la figure 06 montre que le flanc Nord de la dépression de Djelfa est beaucoup plus affecté par les accidents tectoniques que le flanc Sud. En générale la fracturation prend deux familles de directions différentes qui sont :

-Une famille orientée NW-SE a pour trois directions préférentielles:

N 110° à N 120°, N 120° à N 130°, N 130° à N 140°.






- Une famille orientée N-S a pour direction N 0° à N 10°.

Notant également, l'existence des fractures orientées NE-SW.



Echelle : 1/500.000

**Légende :**

- |   |  |  |
|---|--|--|
|  crête       |  Synclinaux |  Alignement de fractures ou de linéaments |
|  Anticlinaux |  Pendage    |  |

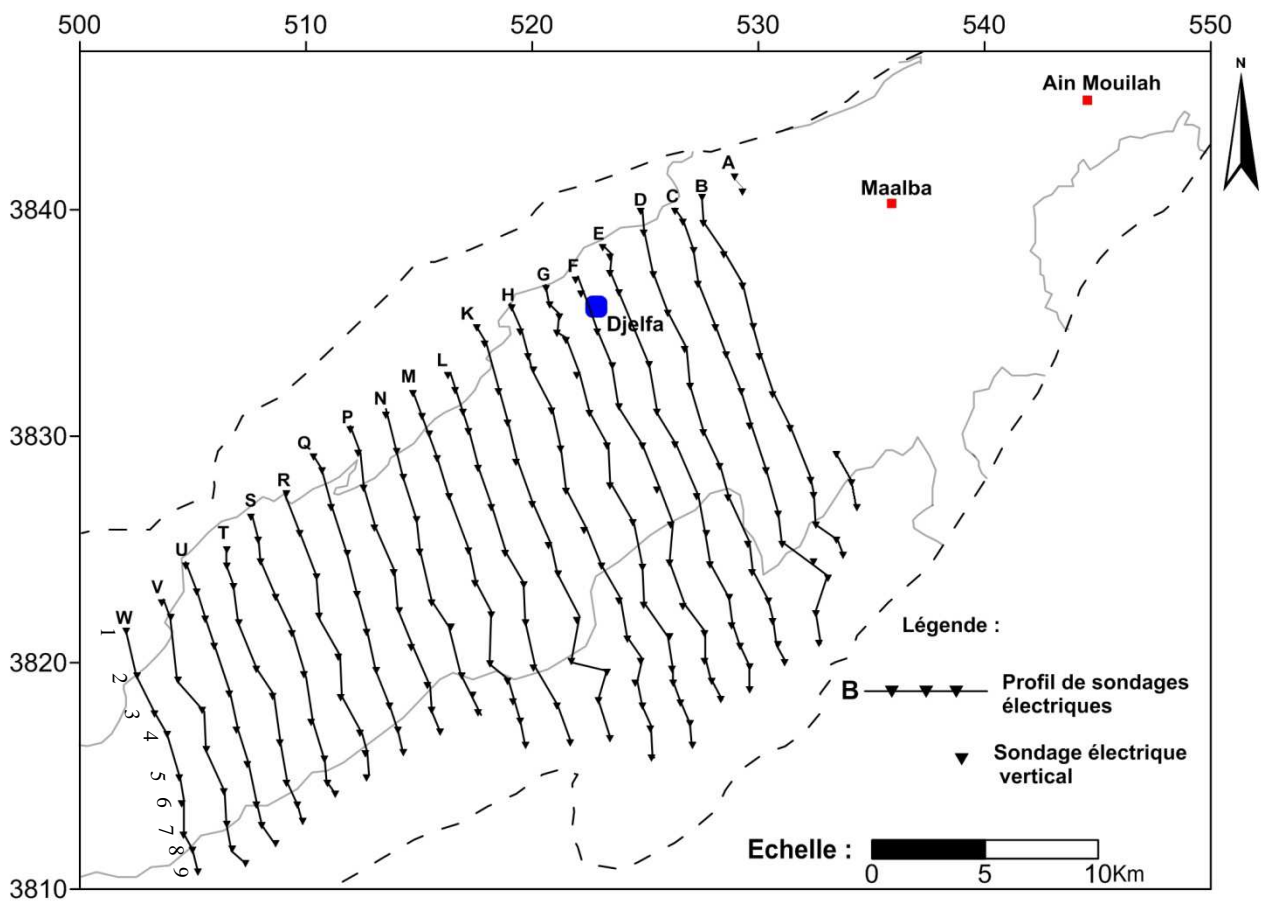
**Figure 07 :** Schéma tectonique du monts des Ouled Nail et bassin des Zahrez (D'après G. CORNET 1952, complété par J. TRAYSAC 1981)

## II.5. GEOPHYSIQUE :

Dans la région de Djelfa, la Compagnie Générale de Géophysique (CGG) a réalisé en 1974 une étude géophysique pour le compte de la direction des études du milieu et de la recherche hydraulique (DEMRH), qui touche la majorité du synclinal à partir de la ville de Djelfa jusqu'à la terminaison du synclinal à Ain Takersane.

Un nombre de 282 sondage électrique, dont 182 en ligne AB=4000 m et 100 en ligne AB=6000 m, ont été réalisés pour atteindre les objectifs suivants (Fig. 08):

- Recherche des niveaux grossiers du remplissage.
- Extension des niveaux calcaires du Maestrichtien et du Campanien.
- Profondeur et structure, au moins sur les bordures, des calcaires Turoniens,
- Définition de la structure générale du bassin et des accidents qui l'affectent.



**Figure 08:** Carte de position des sondages électriques verticaux et des profils.

### II.5.1. Interprétations des résultats de la prospection électrique :

Un premier examen de l'ensemble des coupes montre la multiplicité des niveaux résistants et conducteurs, et de ce fait, les difficultés d'interprétation c'est-à-dire d'une part, la difficulté de rattacher un niveau électrique à un horizon géologique déterminé dès qu'on s'avance au centre du bassin, d'autre part la difficulté de corréliser les horizons d'un sondage électrique à l'autre. (Rapport CGG 1974).

L'examen de l'ensemble des coupes géoélectriques, confirme bien la structure synclinale de la région de Djelfa, par exemple les coupes B,D,F,G,R (Fig. 09), où les faciès conducteurs représentent d'une part les formations marneuses du Sénonien et d'autre part les formations argileuses et marneuses du recouvrement Mio-pliocène. Deux niveaux résistants forment un écran d'autant plus difficile à traverser au centre du synclinal ; le premier niveau représente probablement des conglomérats Miocènes et le deuxième niveau des calcaires d'âge Maestrichtien où la résistivité varie entre 200- 500Ω.m, ces derniers séparés parfois par un niveau conducteur de 10 à 20 Ω.m. Les calcaires du Maestrichtien peuvent atteindre une résistivité de 1000 Ω.m dans certains endroits. Les niveaux résistants qui apparaissent lorsque on se dirige vers les bordures (100 à 300 ohm.m) sont supposés des calcaires du Campanien ou des calcaires marneux de l'Emchérien. On voit apparaître dans la partie sud des coupes, des niveaux très résistants représentant probablement des calcaires du Turonien avec une résistivité varie entre 500-2000 Ω.m.

### II.5.2. Echelle des résistivités :

Les résistivités étant très variable d'un endroit à l'autre du synclinal, les diverses formations de la série stratigraphique offrent une fourchette très large de résistivités. La comparaison de ces résultats des sondages électriques et de la lithologie déduite des forages mécaniques paramétriques, a permis de définir plus précisément les résistivités des différentes formations géologiques. La comparaison des données nous a permis de caractériser les formations hydrogéologiques.

Age	Epaisseur (m)	Formation	Résistivité (Ω.m)	Intérêt hydrogéologique
Mio-Pliocène	200-300	Argiles	10-20	impermeable
		Sables-graviers	30-200	perméable
		conglomérats	200-500	perméable
		Argiles à gypses	100-200	impermeable
Maestrichtien	800-1000	Marnes	10-30	impermeable
		Calcaires	200-500 à 1000	perméable
Campanien		Marno-calcaires	50-100	impermeable
		Calcaires	100-300	perméable
Emschérien		Marne	20-50	impermeable
		Calcaires marneux	100-300	Semi-perméable
Turonien	200-400	Calcaires	500-2000	perméable

**Tableau 02:** Caractéristiques hydrogéologiques et géophysiques des formations. (CGG1974)

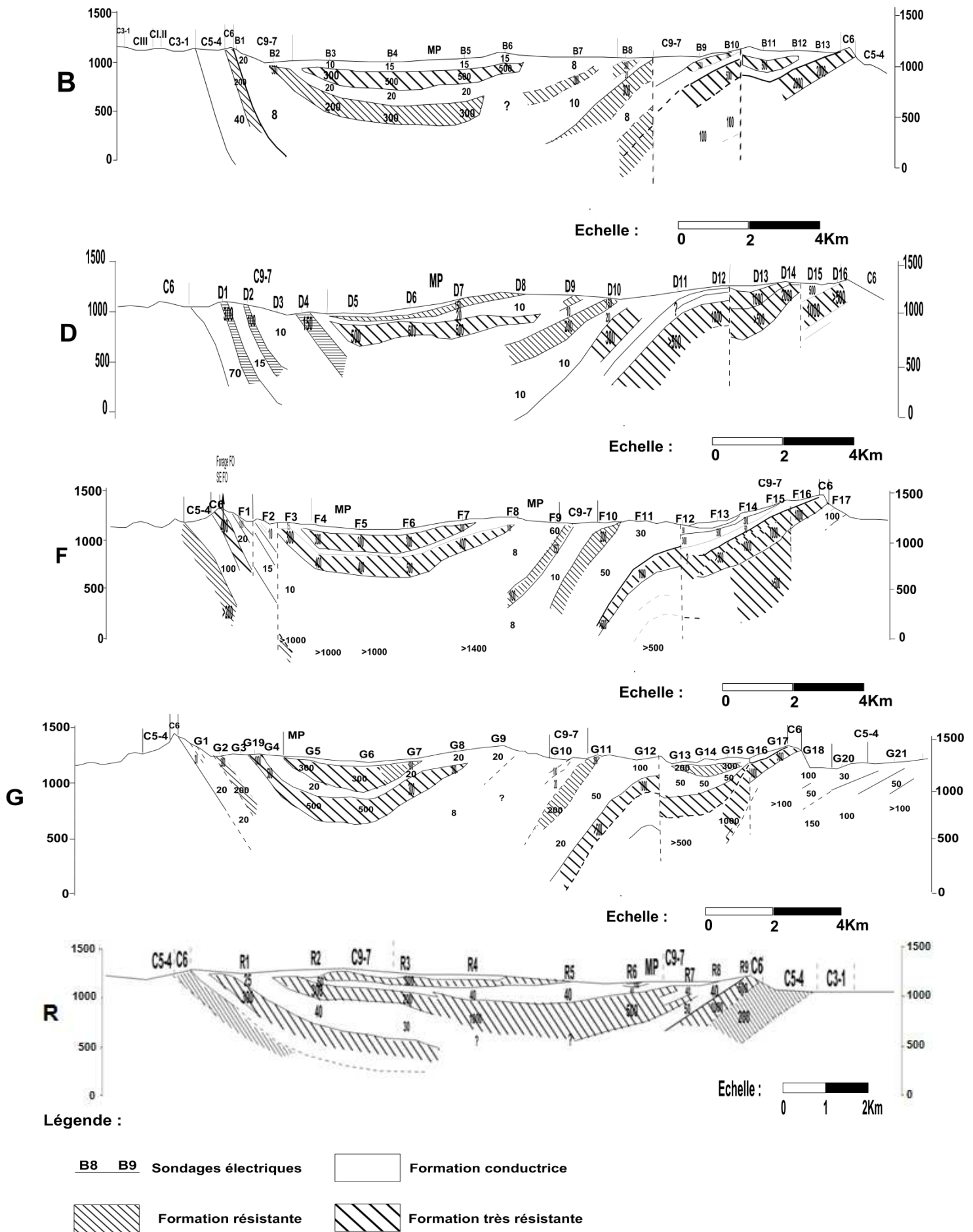
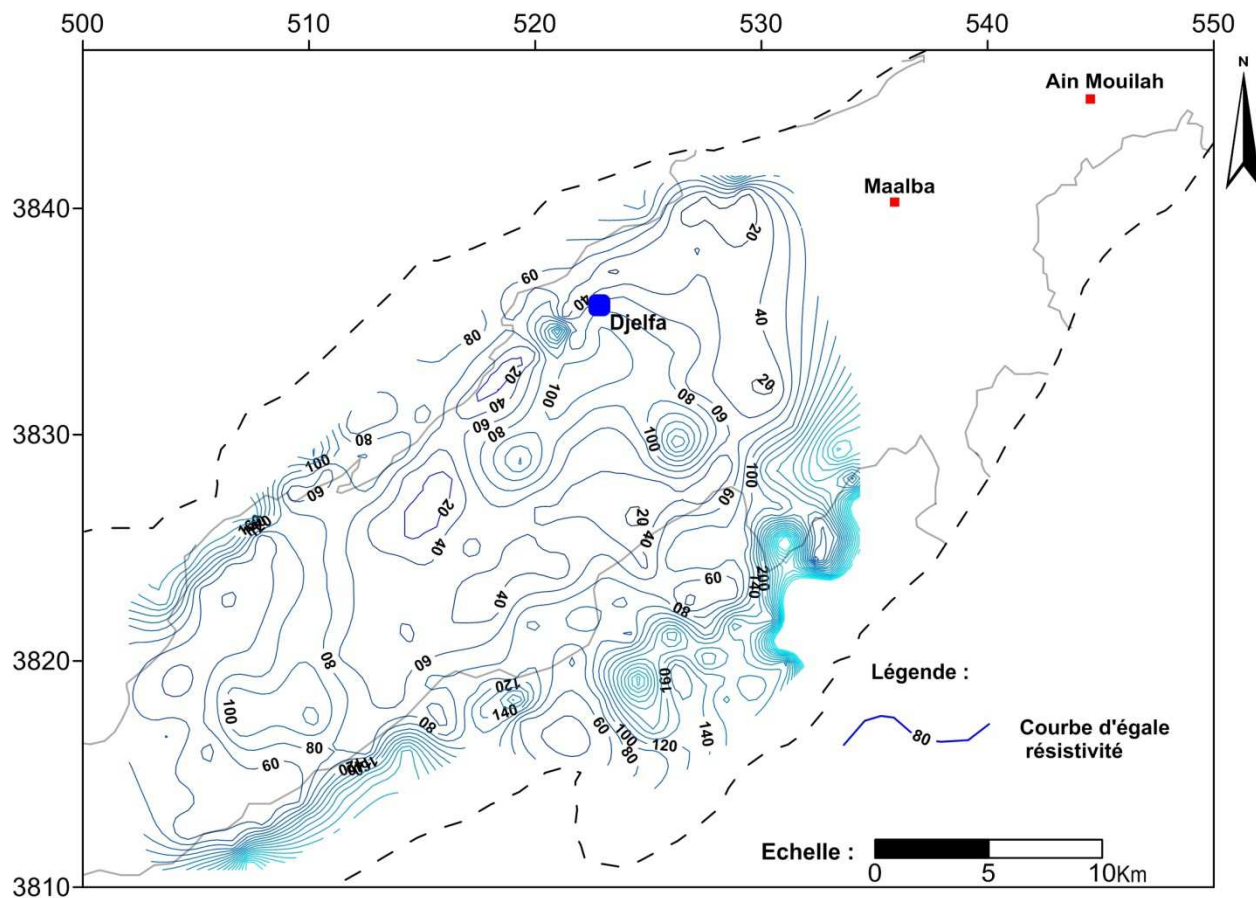


Figure 09 : Coupes géoélectriques des profils B, D, F, G, R. (CGG1974)

L'exploitation de ces données a permis d'établir une carte des iso-résistivités en ligne AB=400m (Fig. 09) ; traduisant les variations de résistivités pour une profondeur d'investigation de L'ordre de 80-100 m. Elle intéresse donc principalement les niveaux du remplissage Mio-Pliocène au centre du synclinal et du Sénonien aux bordures.



**Figure. 10 :** Carte d'iso résistivités en ligne AB=400m.  
dans la région d'étude

Les calcaires Turoniens marquent par une bordure résistante qui part des affleurements, cette bordure est bien marquée sur le flanc Nord à partir du profil S vers l'Ouest, et sur tout le flanc Sud.

Cette carte constitue donc, une sorte d'écorche géologique en bordure, susceptible de mettre en évidence les niveaux résistants et conducteurs du Sénonien, où apparaît une couronne de zones conductrices : B1, C2, D2, E2, H1, K2, qui représentent sans doute les marnes emschériennes, lorsqu'elles ne contiennent pas de niveaux calcaires. Une couronne de plage résistante prend la suite : P2, R2, S8, U2, T9, R8, L9, H10, C10, représente un niveau calcaire appartenant probablement au Campanien.

Une couronne conductrice très bien marquée étroite au Nord, plus étalée au Sud représente des argiles du recouvrement : B2, E3, F2, G3, L3, M4, N4, N5, P6, N7, M8, H8, G8, B7.

Au centre, une plage résistante représentant à la fois des conglomérats et gypses du recouvrement Mio-Pliocène.

Une première idée des accidents affectant les formations crétacées supérieures est donnée par cette carte :

- Un accident transversal important au Sud de Djelfa ; plage conductrice au Nord-Est et plage résistante au Sud-Ouest .
- Un accident transversal entre les profils G et H.
- Un accident transversal au niveau des profils W, U, T.

## II.6 CONCLUSION :

L'étude géologique effectuée à partir des données lithostratigraphiques et tectoniques du synclinal de Djelfa ont permis de dégager les constatations suivantes:

- les formations de bordures sont d'âge Crétacé (du Barrémien au Sénonien). Les formations d'âge Mio-Plio-Quaternaire occupent la totalité de la dépression.
- Du point de vue hydrogéologique, les formations alluvionnaires à l'intérieur de synclinal qui sont composées essentiellement de sable, de limons, de conglomérats et de croûte calcaire, qui pourraient avoir une porosité primaire et former une nappe libre .  
Les grès et les calcaires du crétacé pourraient jouer le rôle d'importants aquifères d'eau. Les fracturations dans ces formations sont omniprésentes, indique une bonne perméabilité de milieu. Les assises marneuses constitueraient un substratum imperméable.
- La fracturation existe plus dans le flanc Nord que dans le flanc Sud du synclinal, Cela peut suggérer qu'il existe une karstification beaucoup plus intense au Nord qu'au Sud.

Les résultats de la prospection électrique a bien traduit la structure synclinale de la région d'étude, et confirme l'hétérogénéité des formations Mio-Plio-Quaternaire; qui sont représentés d'une part par des couches conductrices (argiles avec une résistivité varié entre 10 à 20  $\Omega.m$ ) et d'autre part par des couches résistantes (sables, graviers et conglomérats avec une résistivité varié entre 30 à 600 $\Omega.m$ ).



**Chapitre III :**  
**HYDROCLIMATOLOGIE**

### III.1 INTRODUCTION:

L'étude des caractéristiques hydroclimatologiques joue un rôle primordial dans la connaissance des comportements des cours d'eau, les variations des réserves, la compréhension des mécanismes d'alimentation et de la circulation des eaux naturelles. Elle permet également d'identifier les termes du bilan hydrique notamment les précipitations, les températures, l'évapotranspiration, le ruissellement et l'infiltration.

C'est à cet effet que nous tenterons dans ce chapitre de déterminer ces paramètres hydro climatologiques et surtout ceux intervenant directement ou indirectement dans l'évaluation du bilan hydrique, Où nous s'attacherons plus particulièrement à la détermination des apports d'eau dans la zone d'étude en mettant l'accent sur les quantités des eaux reçues par précipitation et les quantités des eaux perdues par évaporation. Pour ce faire, nous avons utilisé les données de la station météorologique de Djelfa (ONM de Djelfa) (Tab.03), cette station possède une série d'observations plus longue de 40 ans et ne présente aucune discontinuité.

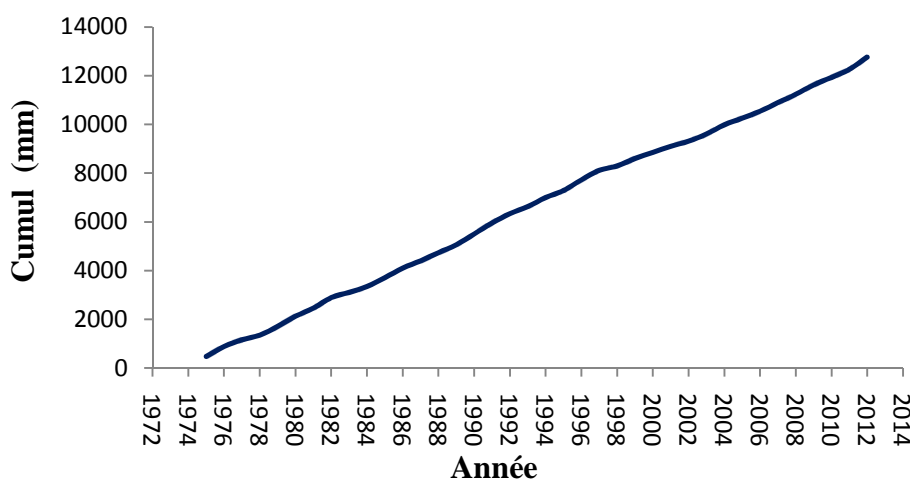
Station	Altitude ( m )	Coordonnées en UTM		Période d'observation
		X	Y	
Djelfa	1180	525.325	3.835.183	1975-2014

**Tableau 03 :** Coordonnées de la stations météorologique de Djelfa

### III.2 HOMOGENEITE DES DONNEES :

Avant d'utiliser la station de Djelfa. Il est indispensable de vérifier l'homogénéité des données de base, Une série chronologique est dite homogène si elle présente le caractère aléatoire simple ce qui suppose l'absence de toute organisation à l'intérieur de la série.

Parmi les nombreuses méthodes permettant de vérifier l'homogénéité d'une série de données, nous utiliserons la méthode graphique du simple cumul. Après avoir cumulé les valeurs de pluies de la période (1975-2014), nous avons reporté les années en abscisse et les valeurs cumulées de pluies en ordonnée. (fig. 11)



**Figure 11 :** Courbe de simple cumul des précipitations à la station de Djelfa (1975-2014)

Le tracé de la courbe ne présentant pas de rupture brusque, la série est alors considérée comme homogène.

Les calculs statistiques donnent les caractéristiques de la série de Djelfa, qui sont illustrées dans le tableau 04.

	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aou	Annuelle
<b>Max</b>	96	117	80.5	97.1	117	74	75.1	87	122	74	278	77.8	510
<b>Moy</b>	30.86	27.04	30.42	29.15	35.01	30.46	28.62	29.92	34.49	19.94	17.79	20.44	334.14
<b>Min</b>	0.7	0.7	1	3.5	2	0.3	1	0.4	1.4	1	0.4	0.3	180.5
<b>Ecart type</b>	25.77	26.13	20.41	18.00	26.38	20.99	24.14	21.35	26.90	18.25	43.50	18.77	79.89
<b>Coef de variation</b>	0.84	0.97	0.67	0.62	0.75	0.69	0.84	0.71	0.78	0.92	2.45	0.92	0.24

**Tableau 04:** Variation des précipitations au niveau de la station de Djelfa (1975-2014).

### III.3 DETERMINATION DU TYPE DE CLIMAT :

Le type du climat d'une zone donnée à l'aide d'indices ou de diagrammes, qui permet également de comparer les climats d'une région à l'autre, parmi lequel, l'indice de De Martonne et le Climagramme de Louis Emberger.

#### III.3.1 Indice de De Martonne :

En 1923, le géographe "De Martonne" a défini l'indice de l'aridité qui est fonction de deux paramètres climatiques : la température et la précipitation selon la formule suivante :

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

Avec : I : indice de " De Martonne «.

P : précipitations moyennes annuelles, (mm).

T : température moyenne annuelle, (°C).

Suivant les valeurs de (I), De Martonne a établi la classification suivante :

I < 5 : climat hyperaride

5 < I < 7,5 : climat désertique

7,5 < I < 10 : climat steppique

10 < I < 20 : climat semi-aride

20 < I < 30 : climat tempéré.

Pour notre cas : I= 13,58 tel que  $P_{moy} = 334,14$  mm  $T_{moy} = 14,60$  °c

Donc selon la classification de "De Martonne", la région du synclinal de Djelfa est caractérisée par un climat Semi-aride. (Fig. 12)

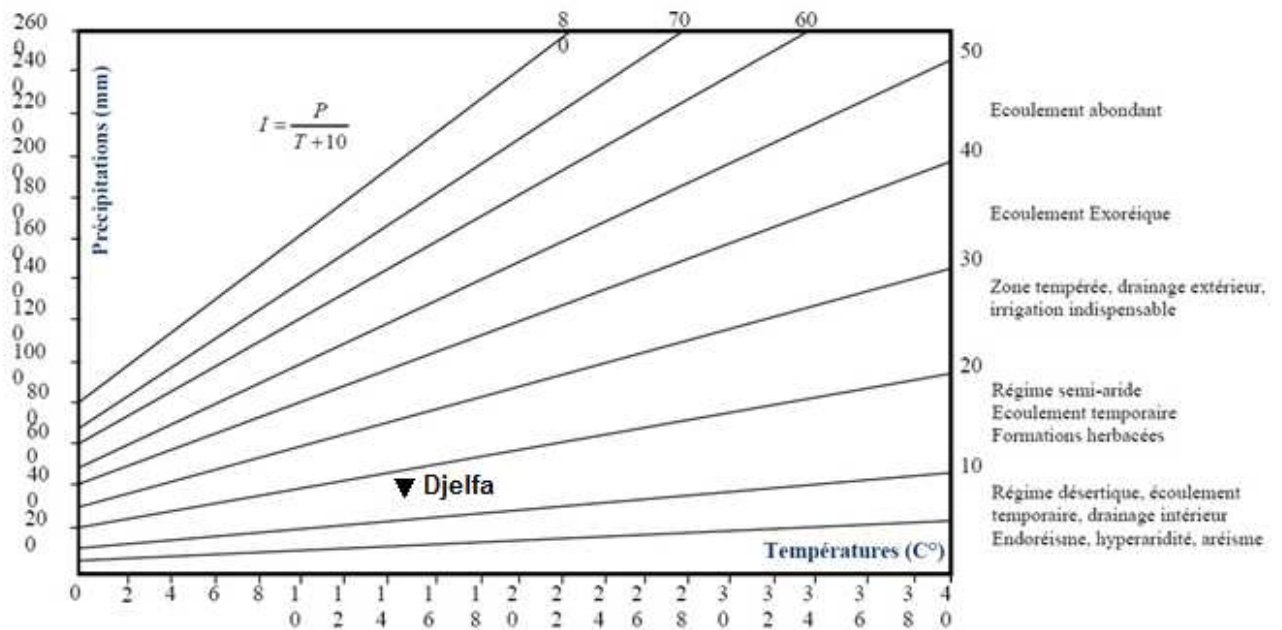


Figure 12 : Abaque de l'indice d'aridité annuel de De Martonne.

### III.3.2 Climagramme de Louis Emberger :

Le Climagramme d'Emberger est un abaque comportant en ordonnées les valeurs du quotient pluviométrique d'Emberger ( $Q^2$ ), et en abscisses les valeurs de la température moyenne minimum de la saison froide ( $T$  °C), où :

$$Q^2 = \frac{2000P}{M^2 - m^2}$$

- Avec :
- $Q^2$  : quotient pluviométrique d'Emberger.
  - $P$  : précipitations moyennes annuelles, (mm).
  - $M$  : moyenne des maxima du mois le plus chaud, (°K).
  - $m$  : moyenne des minima du mois le plus froid, (°K).

Pour notre cas :

$$M = 33,70 + 273,15 = 306,85 \text{ °K}$$

$$m = 0,41 + 273,15 = 273,56 \text{ °K}$$

$$P = 334,14 \text{ mm} \quad \text{donc : } Q^2 = 34,59$$

$$T = 1,78 + 0,41 + 1,55 = 1,25 \text{ °C}$$

Le report de notre station sur la figure 13 permet de confirmer que le climat de la région du synclinal de Djelfa est de type semi-aride.

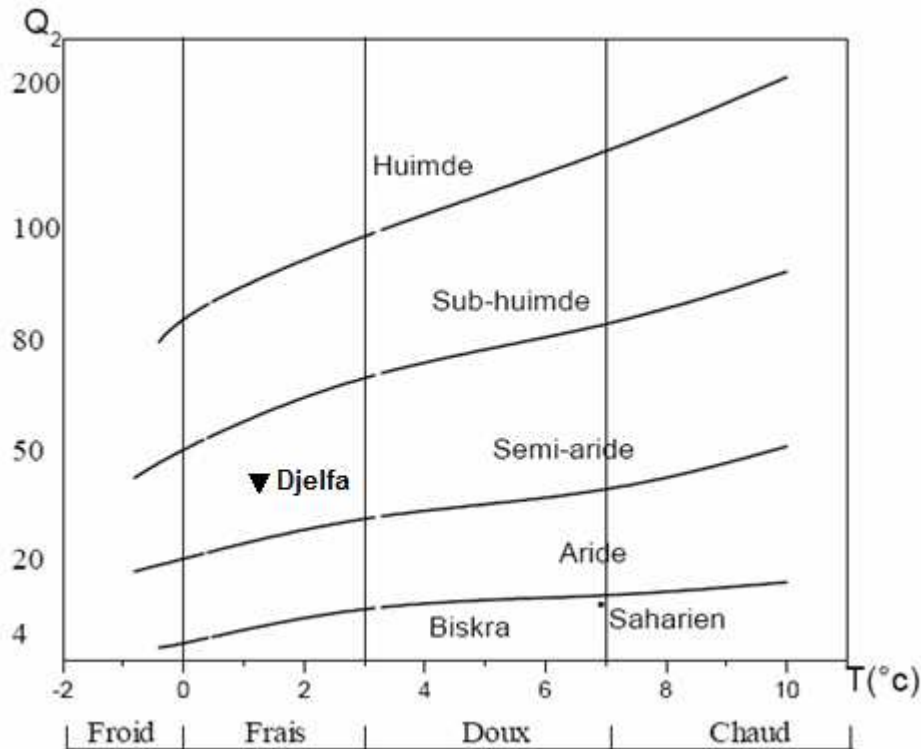


Figure 13 : Climagramme d'Emberger

### III.4 ANALYSE DES DONNEES CLIMATIQUES:

#### III.4.1 Précipitation :

Les précipitations constituent le phénomène physique qui décrit le transfère d'eau de la phase liquide (pluie) ou solide (neige et grêle) entre l'atmosphère et le sol. En plus de son influence sur les eaux de surface, la précipitation a une influence sur le volume d'eau emmagasinée, par conséquence, augmentant le niveau piézométrique de la nappe.

Nous nous intéressons dans cette étude uniquement à la précipitation liquide plus particulièrement à la hauteur de précipitation.

##### III.4.1.1 Variations interannuelles des précipitations :

En analysant la courbe de la figure (14), on remarque que les valeurs maximales annuelles de cette période (1975-2014) se sont produites durant les années 1976, 1990, 1991 et 2012 avec respectivement 510 mm, 447,4 mm, 451,5 mm, 502 mm. Cependant, on note que ces valeurs maximales ne dépassent pas le double de la valeur moyenne annuelle (334,14 mm), et les années 1978, 1998 sont les plus sèches avec respectivement 194,8 mm, 180.5 mm.

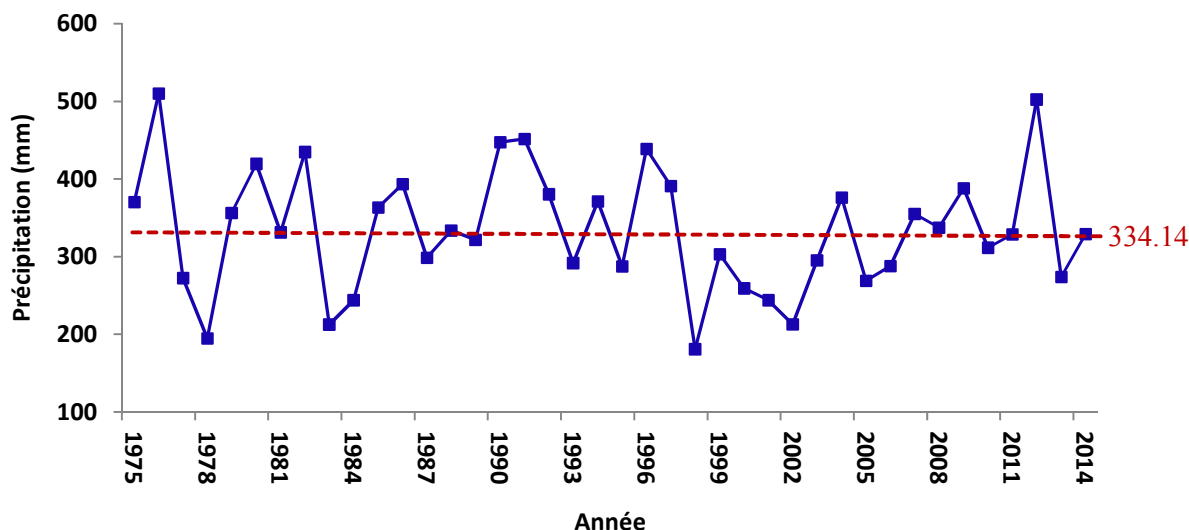
L'évolution de la pluviométrie annuelle permet de noter une variabilité assez importante d'une année à une autre. Si on subdivise la période (1975-2014) en quatre décennies, on constate que :

- Durant la première décennie (1975-1984), il ya 6 ans où la précipitation égale ou supérieure à la moyenne annuelle, c'est une décennie d'une précipitation plus ou moins proche de la moyenne annuelle.
- La deuxième décennie (1985-1994), est la plus pluvieuse, durant laquelle 8 ans où la précipitation égale ou supérieure à la moyenne annuelle.
- La troisième décennie (1995-2004), est la plus sèche, durant laquelle 3 ans où la précipitation égale ou supérieure à la moyenne annuelle.

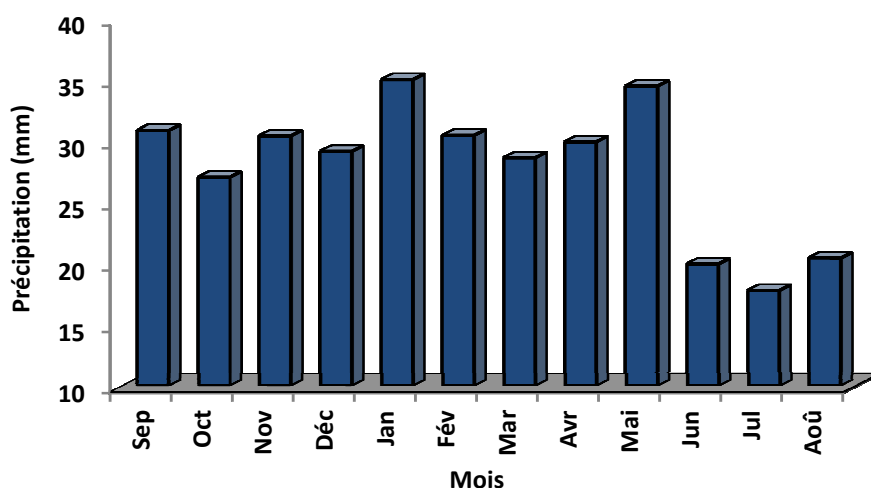
- Durant la quatrième décennie (2005-2014), il ya 6 ans où la précipitation égale ou supérieure à la moyenne annuelle, c'est une décennie d'une précipitation plus ou moins proche de la moyenne annuelle.

### III.4.1.2 Variation de la précipitation moyenne mensuelle :

L'histogramme de variations des moyennes mensuelles des précipitations, sur une période de 40ans (1975-2014), montre que les mois les plus pluvieux sont les mois de Janvier 35,01 mm et de Mai 34,49 mm et le mois de Juillet étant le mois le plus sec 17,79 mm . (Fig. 15)



**Figure 14 :** Variations interannuelles des précipitations de la station de Djelfa pour la période (1975-2014).



**Figure 15 :** Variation des précipitations moyennes mensuelles à la station de Djelfa pour la période (1975-2014).

### III.4.2 Température :

La température est un facteur climatique très important avec ces variations qui peuvent influencées beaucoup sur l'évapotranspiration, le déficit d'écoulement et donc sur le bilan hydrique Les données de température dont disposons sont des valeurs moyennes mensuelles relatives à la station météorologique de Djelfa avec une période de (1975-2014).

#### III.4.2.1 variation des températures moyennes annuelles :

L'analyse de la courbe de variation des températures moyennes annuelles (Fig. 16), sur une période de 40ans (1975-2014), montre que l'année la plus chaude est l'année 2001 avec une moyenne de 15.68°C, et l'année la plus froide est l'année 1976 avec une moyenne de 12.22°C , la valeur moyenne de la série est de 14,60 °C .

#### III.4.2.2 variation des températures moyennes mensuelles :

L'histogramme de variation des températures moyennes mensuelles (Fig. 17), sur une période de 40 ans (1975-2014), montre que les valeurs les plus élevées sont observées pendant l'été (juin-septembre) avec des températures allant de 20,76 à 26,46°C, avec un maximum pendant le mois de juillet (26,46°C). Les valeurs les plus basses ,qui varient de 4,74 à 9,06°C, sont observées durant la période hivernale (décembre – mars), avec un minimum pendant le mois de janvier (4.74°C).

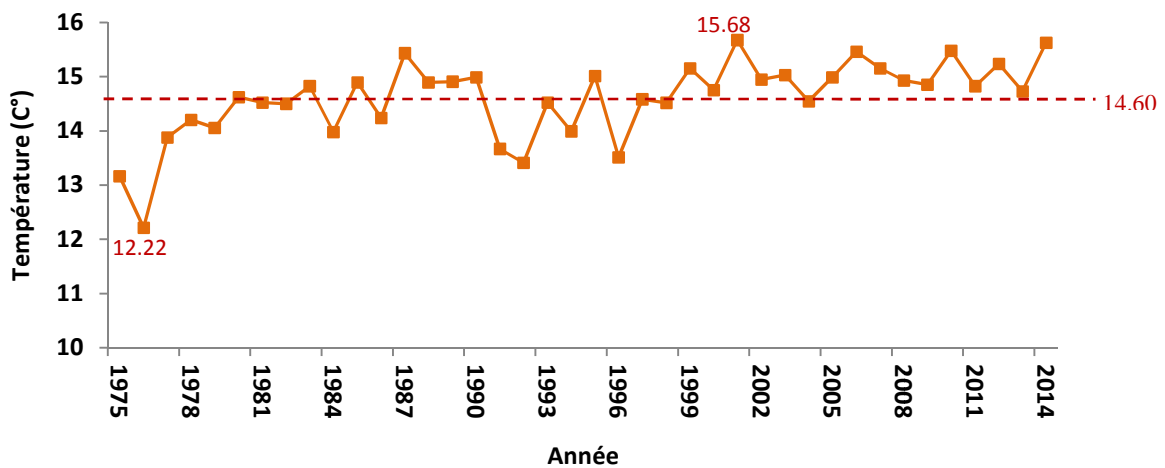


Figure 16 : Variation des températures moyennes annuelles à la station de Djelfa pour la période ( 1975-2014 )

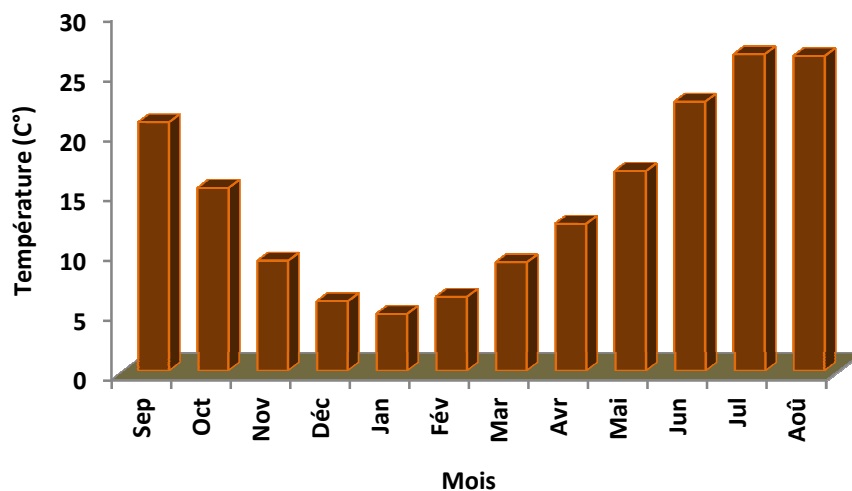
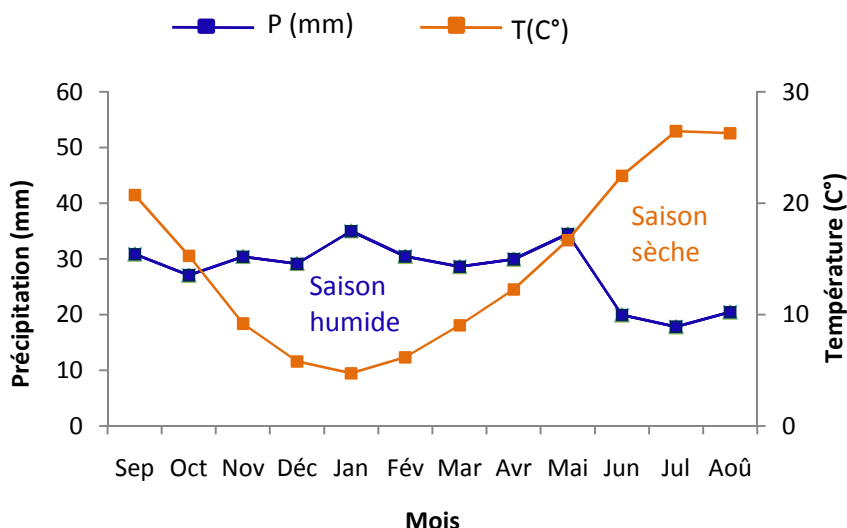


Figure 17 : Variation des températures moyennes mensuelles à la station de Djelfa (1975-2014)

### III.4.3 Diagramme ombrothermique :

Bagnouls (1953) et Gaussen (1957), considèrent un mois sec, quand le total moyen des précipitations exprimé en (mm) est inférieur ou égal au double de la température moyenne mensuelle du même mois ( $P \leq 2T$ ).

Cette définition permet de tracer une courbe Ombro-thermique sur un graphique dans lequel les températures sont portées à l'échelle double des précipitations (Fig. 18). La surface délimitée entre les deux points de croisement des deux courbes, mesure l'intensité de la saison sèche, la différence des abscisses donne la durée de cette saison.



**Figure 18 :** Diagramme Ombro-thermique pour la période (1975-2014) à la station de Djelfa

D'après ce diagramme Ombro-thermique, la période sèche s'étale de la moitié du mois de Mai jusqu'à la dernière semaine du mois d'Octobre, avec une durée de cinq mois, la période humide caractérise le reste des mois de l'année hydrologique.

### III.4.4 Détermination de l'humidité du sol (méthode d'Euverte):

Cette méthode est basée sur l'établissement d'un rapport entre les précipitations et les températures moyennes mensuelles ( $P/T$ ) d'une même période. Le rapport ( $P/T$ ) donne la valeur de l'humidité du sol et permet de définir 4 types de régimes :

- $P/T < 1$  Régime très sec
- $1 < P/T < 2$  Régime sec
- $2 < P/T < 3$  Régime subhumide
- $P/T > 3$  Régime humide

Les valeurs du rapport ( $P/T$ ) représentées dans le Tableau 05 permettent de connaître l'évolution de l'humidité du sol pendant l'année, dans la région d'étude:

- Un régime très sec durant les mois de Juin, Juillet et Aout.
- Un régime sec durant les mois de Septembre et Octobre.
- Un régime subhumide durant les mois d'Avril et Mai.
- Un régime humide durant les de mois de Novembre, Décembre, Janvier, Février et Mars.



Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
<b>P moy (mm)</b>	30.86	27.04	30.42	29.15	35.01	30.46	28.62	29.92	34.49	19.94	17.79	20.44
<b>T moy (°C)</b>	20.76	15.29	9.18	5.8	4.74	6.17	9.06	12.27	16.69	22.48	26.46	26.31
<b>P/T</b>	1.49	1.77	3.31	5.03	7.39	4.94	3.16	2.44	2.07	0.89	0.67	0.78

**Tableau 05 :** Valeurs du rapport P/T pour la période 1975 - 2014 à la station de Djelfa.

### III.5 ESTIMATION DE L'ÉVAPOTRANSPIRATION :

Le paramètre évapotranspiration est d'une grande importance pour les études hydrologique, car il intéresse le bilan hydrologique et ainsi les réserves souterraines.

Toute perte sous forme de vapeur c'est l'évapotranspiration aboutissant de deux Phénomènes, l'un physique l'évaporation, et l'autre biologique la transpiration. Donc l'évapotranspiration joue un rôle primordial dans le cycle de l'eau et elle est fonction des Paramètres physiques tels que, la température de l'air et de l'eau, la vitesse du vent et L'ensoleillement.

#### III.5.1 Evapotranspiration potentielle (ETP) :

L'évapotranspiration potentielle (exprime la hauteur de la lame d'eau ou la tranche d'eau évaporée) est la somme des quantités d'eau pouvant s'évaporer et transpirer sur une surface donnée pendant une période bien définie, en considérant les apports d'eau Suffisants.

Plusieurs formules ont été proposées par différents auteurs (Blaney et Criddle, Turc (1962), Thornthwaite (1948).....) pour le calcul de l'ETP, mais nous n'avons pas utilisé toute ces formules par manque de données nécessaires à leur applications, on a choisi seulement la formule de Thornthwaite.

##### III.5.1.1 Formule de Thornthwaite :

L'agronome américain G.W. Thornthwaite proposa en 1948 une expression pour l'estimation de l'évapotranspiration potentielle pour une durée théorique de 12.00H en tenant compte seulement de la température mensuelle. Le développement de cette expression donne la formule suivante:

$$ETP = 16.(10/I)^a . t^a$$

Avec :  $I = \sum i$  où  $i = \left(\frac{t}{5}\right)^{1,514}$  dans notre cas :  $I = 67,23$

$$a = \left(\frac{1,6}{100}\right)I + 0,5 \quad a = 1,57$$

Où : ETP : évapotranspiration potentielle non corrigée du mois considéré, (mm).

t : température mensuelle moyenne du mois considéré, (C°).

I : indice thermique annuel, égal à la somme de douze indices mensuels.

i : indice thermique mensuel.

a : désigne l'exposant climatique.

Les valeurs obtenues sont corrigées par un coefficient de correction f qui dépend de la latitude du bassin. (Ta. 06)

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Année
<b>P (mm)</b>	30.86	27.04	30.42	29.15	35.01	30.46	28.62	29.92	34.49	19.94	17.79	20.44	<b>334,14</b>
<b>T (°C)</b>	20.76	15.29	9.18	5.8	4.74	6.17	9.06	12.27	16.69	22.48	26.46	26.31	<b>14,60</b>
<b>i</b>	8.63	5.43	2.51	1.25	0.92	1.37	2.46	3.89	6.20	9.74	12.46	12.35	<b>67,23</b>
<b>ETP (mm)</b>	93.95	58.13	26.09	12.69	9.24	13.98	25.56	41.15	66.70	106.46	137.50	136.28	<b>727.72</b>
<b>f</b>	1,03	0,97	0,86	0,86	0,87	0,86	1,03	1,09	1,20	1,20	1,22	1,16	/
<b>ETP<sub>c</sub> (mm)</b>	96.77	56.38	22.44	10.91	8.04	12.03	26.33	44.85	80.04	127.75	167.75	158.09	<b>811.36</b>

**Tableau 06 :** Valeurs de l'ETP estimées par la formule de Thornthwaite.  
à la station de Djelfa, période (1975-2014)

La valeur obtenue de l'évapotranspiration potentielle annuelle est de 811,36 mm pour un indice thermique annuel de 67,23. Nous notons qu'elle est largement supérieure aux précipitations qui sont de 334,14 mm.

### III.5.2 Evapotranspiration réelle (ETR) ou déficit d'écoulement ( De ) :

L'évapotranspiration réelle est appelée aussi déficit d'écoulement (De), intègre dans l'ensemble du bassin versant, les évaporations physiques et physiologiques, elles mêmes influencées par les caractéristiques topographiques (pente des versants, nappes d'eau libres), géologiques (terrains perméables et imperméables, profondeur de la nappe phréatique) et la couverture végétale de celui-ci.

Plusieurs formules sont établies par différents auteurs pour le calcul du déficit d'écoulement annuel moyen en fonction des caractéristiques météorologiques du bassin, parmi ces formules, nous avons:

#### III.5.2.1 Formule de L. Turc (1954) qui s'écrit de la manière suivante :

$$De = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \frac{P^2}{L^2}}} \quad \text{Où :}$$

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

T : température moyenne annuelle de l'air en (°C),

P : précipitation moyenne annuelle en (mm)

Cette formule donne une valeur d'ETR égale à 323,66 mm/an, soit 96,86 % des précipitations.

#### III.5.2.2 Formule de Coutagne : qui s'écrit de la manière suivante :

$$De = P - \lambda P^2 \quad \text{Avec : } \lambda = 1 / (0.8 + 0.14T)$$

P : précipitation moyenne annuelle en (m).

L'application de cette formule est conditionnée par la relation suivante :  $1/8\lambda < P < 1/2\lambda$

- Si  $P > \frac{1}{2\lambda}$  : le déficit est indépendant de P :  $De = 0,20 + 0,035t$ .
- Si  $P < \frac{1}{8\lambda}$  : le déficit est égal à la précipitation :  $De = P$ .

Dans notre cas, les précipitations ( P ) sont inférieures à  $\frac{1}{8\lambda}$ , donc :  $De = 334.14 \text{ mm}$ .

### III.5.2.3 Méthode de Wundt :

L'abaque de Wundt modifié par Coutagne (Fig.19), permet de déterminer graphiquement l'évapotranspiration réelle en fonction de la température moyenne annuelle (°C) et les précipitations moyennes annuelles (mm).

La valeur obtenue à la station de Djelfa est de 330 mm, soit 98,76% des précipitations.

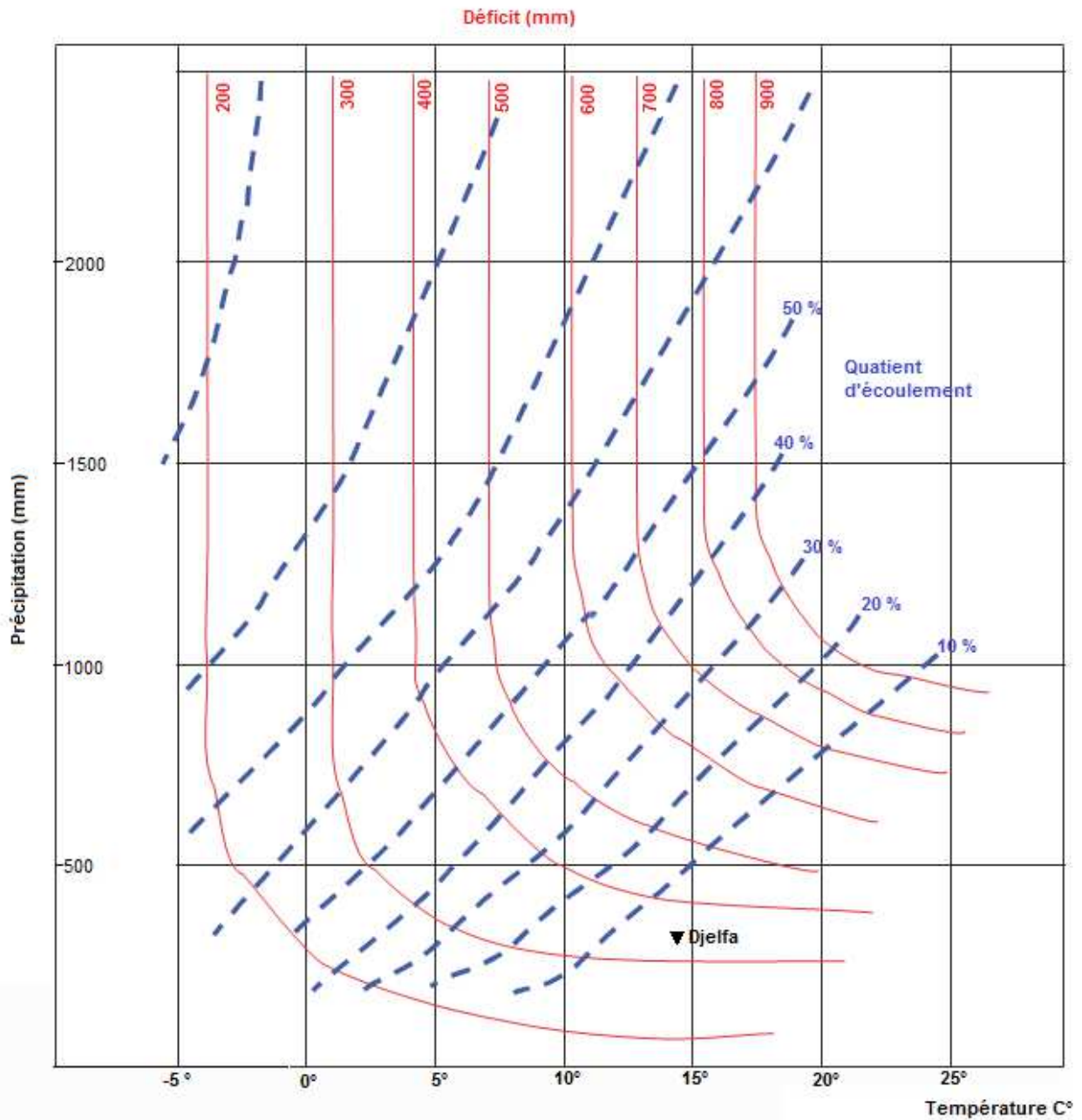


Figure 19 : Abaque de Wundt modifié par Coutagne

### III.6 LE BILAN HYDROLOGIQUE :

Il est très nécessaire d'établir le bilan hydrologique du bassin versant qui donne des informations sur la relation entre la quantité d'eau précipitée, l'évapotranspiration, le déficit dans le sol et le débit observé au niveau de l'exutoire.

La méthode de Thornthwaite permet d'établir un bilan hydrologique mensuel et donne pour chaque mois :

- L'évapotranspiration réelle (ETR), mm.
- La réserve facilement utilisable (RFU), mm.
- Le déficit agricole (Da), mm.
- L'excédent (le ruissellement à l'échelle du bassin versant) (EX), mm.

#### III.6.1 Calcul de l'ETR selon la formule de Thornthwaite :

Elle consiste à calculer l'évapotranspiration réelle (ETR) mensuelle à partir des précipitations moyennes mensuelles (P), l'évapotranspiration potentielle (ETP) et la réserve facilement utilisable contenue dans le sol (RFU).

Le principe de raisonnement est le suivant :

- Pour un mois  $P \geq ETP$ , On pose  $ETP = ETR$ , la quantité d'eau qui reste ( $P - ETR$ ) va alimenter La RFU jusqu'à son maximum (50 mm) et si elle dépasse cette valeur, il y'aura un excédent (Ex) qui va partir sous forme d'infiltration efficace vers la nappe soit sous forme de ruissellement.
- Pour un mois  $P < ETP$ , et si  $P + RFU_{(i-1)} > ETP \Rightarrow ETR = ETP$   
si  $P + RFU_{(i-1)} < ETP \Rightarrow ETR = P + RFU_{(i-1)}$
- Pour un mois  $P < ETP$  et  $RFU = 0 \Rightarrow ETR = P$

#### III.6.2 Calcul du déficit agricole ( Da ):

Le déficit agricole est calculé par la formule suivante :

$$Da = ETP_i - (P + RFU_{(i-1)})$$

On commence le calcul du bilan par le mois de Septembre où on considère que la RFU est nulle, pour notre cas la RFU maximum égale à 50 mm. (D'après l'ANRH).

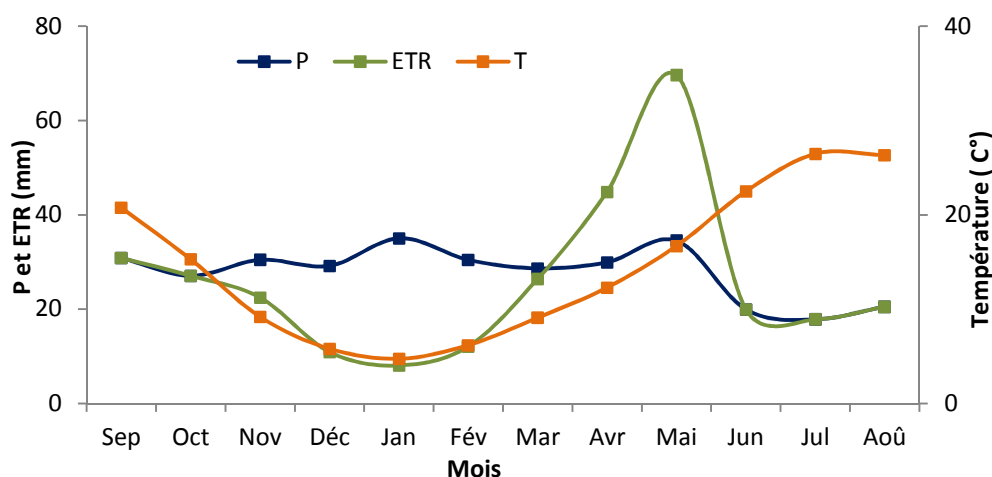
Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Année
<b>P (mm)</b>	30.86	27.04	30.42	29.15	35.01	30.46	28.62	29.92	34.49	19.94	17.79	20.44	334.14
<b>T(C°)</b>	20.76	15.29	9.18	5.8	4.74	6.17	9.06	12.27	16.69	22.48	26.46	26.31	14.60
<b>ETP (mm)</b>	96.77	56.38	22.44	10.91	8.04	12.03	26.33	44.85	80.04	127.75	167.75	158.09	811.36
<b>P-ETP</b>	-	-	7.98	18.24	26.97	18.43	2.29	-	-	-	-	-	
<b>ETR (mm)</b>	65.91	29.34	7.98	18.24	26.97	18.43	2.29	14.93	45.55	107.81	149.96	137.65	
<b>ETR (mm)</b>	30.86	27.04	22.44	10.91	8.04	12.03	26.33	44.85	69.56	19.94	17.79	20.44	310.23
<b>RFU (mm)</b>	0	0	7.98	26.22	50	50	50	35.07	0	0	0	0	
<b>EX (mm)</b>	0	0	0	0	3.19	18.43	2.29	0	0	0	0	0	23.91
<b>Da (mm)</b>	65.91	29.34	0	0	0	0	0	0	9.78	107.81	149.96	137.65	500.45

**Tableau 07** : Bilan hydrologique moyen (1975-2014) à la station de Djelfa, par la méthode de Thornthwaite.

D'après le tableau 07, on constate qu'à partir du mois de Mai jusqu'au mois d'Octobre, la réserve en eau du sol est nulle, durant cette période, des valeurs variables du déficit agricole sont enregistrées. La RFU atteint sa valeur maximale (50 mm) dans les mois de Janvier, Février et Mars, où il permet un ruissellement annuel de 23,91 mm. Les valeurs trouvées du déficit agricole correspondent à une estimation sur les besoins en eau d'irrigation des cultures.

L'observation des différentes courbes de la figure 20, permet de faire les constatations suivantes :

- Le surplus d'eau commence du mois de Novembre jusqu'au mois de Mars, c'est une période dans laquelle l'ETR est inférieure aux précipitations. Cette diminution de l'ETR est causée par les faibles températures observées dans cette période (période froide).
- A partir de Mars et jusqu'au Juin, l'ETR est supérieure aux précipitations, c'est la période d'épuisement du stock, correspondre à l'augmentation de l'ETR par rapport aux précipitations. Cette augmentation est causée par l'élévation de la température.
- A partir de Juin et jusqu'au Octobre, l'ETR est égale aux précipitations, c'est une période dans laquelle les températures sont élevées et les précipitations sont faibles. Cette période est donc marquée par un déficit agricole (500,45 mm en moyenne annuelle).



**Figure 20** : Relation Précipitation-Température-ETR , Pour la période (1975-2014) à la station de Djelfa

### III.6.3 Détermination du ruissèlement et de l'infiltration :

Il est important de connaître la quantité d'eau ruisselée sur le bassin versant topographique et la quantité d'eau infiltrée dans les aquifères contenues dans ce bassin pour estimer les réserves en eau pour différents besoins.

L'expression générale du bilan hydrique s'écrit comme suit :

$$P = ETR + R + I$$

Où :

P : précipitation moyenne annuelle, mm.

ETR : évapotranspiration réelle moyenne selon le bilan de Thornthwaite , (mm) .

R : ruissèlement, mm

I : infiltration, en mm.

- Le ruissèlement (R) est calculé par la formule de Tixeront-Berkaloff :

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

- L'infiltration (I) est calculée par la formule suivante :

$$I = P - (ETR + R)$$

D'après les valeurs de l'ETR et l'ETP calculées par la méthode de Thornthwaite (Tab.08) , on calcul le ruissèlement (R) et l'infiltration (I) :

	<b>P</b>	<b>ETP</b>	<b>ETR</b>	<b>R</b>	<b>I</b>
<b>mm/an</b>	334,14	811,36	310,23	18,89	5.02
<b>%</b>	100	242,82	92,84	5,65	1,50

**Tableau 08 :** Valeurs du ( R ) et ( I ) dans la région du synclinal de Djelfa , période (1975-2014)

L'ensemble de La lame d'eau ruisselée et infiltrée est égal à 23,91 mm/an, il représente 7.15 % des précipitations moyennes annuelles tombées sur la région du synclinal de Djelfa, ce qui est extrêmement faible. Ces valeurs obtenues restent à vérifier, en tenant compte de la lithologie du terrain, la topographie, le climat et la végétation qui caractérise la région.

### III.7. DETERMINATION DES APPORTS LIQUIDES :

Les apports liquides (A) ou les ruissèlements superficiels (Rs) des eaux peuvent être estimés par différent formules empiriques, tel que (la formule Algérienne, la formule de Mallet-Gauthier, et la formule de Turc) .

$$A = Le. S.10^{-3} (Hm^3/an)$$

Où :

Le : lame d'eau ruisselée, (mm/an) ;

S : superficie du bassin versant, (Km<sup>2</sup>)

**-La formule Algérienne :**

$$Le = P_a(1-10^{-KP_a^2}). 10^3 \quad \text{avec} \quad K = 0,18 - 0,01.\log S$$

$P_a$ (m)	k	Le (mm/an)	A (Hm <sup>3</sup> /an)
0,334	0,15	12,64	28,10

**Tableau 09:** Valeurs des apports liquides selon la formule Algérienne

**-Formule de Mallet-Gauthier :**

$$Le = 0,6 P_a(1 - 10^{-0,36P_a^2}). 10^3$$

$P_a$ (m)	Le (mm/an)	A (Hm <sup>3</sup> /an)
0,334	17,72	39,39

**Tableau 10 :** Valeurs des apports liquides selon la formule de Mallet-Gauthier

**- Formule de Turc :**

$$Le = P_a - \frac{P_a}{\sqrt{(0,9 + \frac{P_a^2}{L^2})}} \quad \text{avec} \quad L = 300 + 25T + 0,05T^3$$

Où : L : coefficient de température, (mm) ;  
T : température moyenne annuelle, (°C) .

$P_a$ (mm)	T (°C)	L (mm)	Le (mm/an)	A (Hm <sup>3</sup> /an)
334,14	14,60	820,61	10,48	23,30

**Tableau 11 :** Valeurs des apports liquides selon la formule de Turc

Si nous comparons les résultats des quatre méthodes, nous trouverons que la valeur maximale des apports liquides est donnée par la formule de Mallet-Gauthier (39,39 Hm<sup>3</sup>/an), alors que la valeur minimale est trouvée par la formule de Turc (23.30 Hm<sup>3</sup>/an) .

### III.8 CONCLUSION :

Après cette étude hydroclimatologique de la région d'étude, les résultats obtenus sont les suivants :

- La région d'étude possède un climat continental de type semi-aride à hiver très froid, et un été chaud et sec. Les précipitations durant la période (1975-2014) sont relativement peu importantes et elles sont de l'ordre de 334,14 mm en moyenne annuelle, la température moyenne annuelle est de 14,60 °C.
- L'évapotranspiration potentielle (ETP) et l'évapotranspiration réelle (ETR) déterminées par la méthode de Thornthwaite, sont respectivement égales à 811,36 mm (242,82 % des précipitations) et 310,23 mm (92,84 % des précipitations).
- Le bilan hydrique de Thornthwaite est dans son ensemble déficitaire.
- Le ruissellement ( R ) estimé par la formule de Tixeront-Berkaloff est de 18,89 mm/an , soit 5,65% des précipitations moyennes annuelles . Cette valeur est faible, mais vu la topographie (peu accidentée, mis à part les deux flancs), elle est admissible.
- L'infiltration ( I ) est estimée de l'équation du bilan de l'eau , elle est de l'ordre de 5,02 mm/an , soit 1,50 % des précipitations, ce qui est extrêmement faible , mais cette valeur d'infiltration ne tient compte ni des neiges, ni de l'infiltration au niveau de l'oued principal .

D'après toutes ces données précédentes, on peut dire que le bilan hydrogéologique au niveau du bassin versant de l'Oued Djelfa-Mellah, est dans son ensemble inadapté à la région.



**Chapitre IV :**  
**HYDROGEOLOGIE**

#### **IV.1 INTRODUCTION :**

L'hydrogéologie constitue un outil de base pour connaître les différents éléments permettant de définir les caractéristiques d'une nappe, elle permet donc de reconnaître les potentialités en eau souterraine de la région.

Pour notre étude sur la nappe Mio-Plio-Quaternaire du synclinal de Djelfa, nous avons basé essentiellement sur l'interprétation de la piézométrie qui est la synthèse la plus importante dans une étude hydrogéologique, elle renseigne sur l'état de la nappe (l'allure de l'écoulement de la nappe, l'alimentation et le drainage, le gradient hydraulique...ect), et nous permet de mettre en évidence le lien qu'elle peut avoir avec son environnement. Le suivi de la piézométrie avec le temps nous permet de comprendre l'impact de la variation climatique et l'exploitation sur le comportement hydrodynamique de la nappe.

En outre, la détermination des paramètres hydrodynamiques de l'aquifère (transmissivité et perméabilité) renseigne sur le potentiel hydraulique de la nappe.

#### **IV.2 GEOMETRIE DE L'AQUIFERE :**

Les résultats de la prospection électrique (CGG 1974) et les données des différents forages qui ont traversés les formations Mio-Plio-Quaternaire ont montré que l'épaisseur de ces formations est augmentée du Sud Ouest vers le Nord Est. L'épaisseur peut atteindre 300 m au centre et au Nord Est, mais dans la partie Sud Ouest ne dépasse pas 200 m.

Il faut signaler que les assises argileuses à la base de ces formations jouent un rôle d'un substratum imperméable.

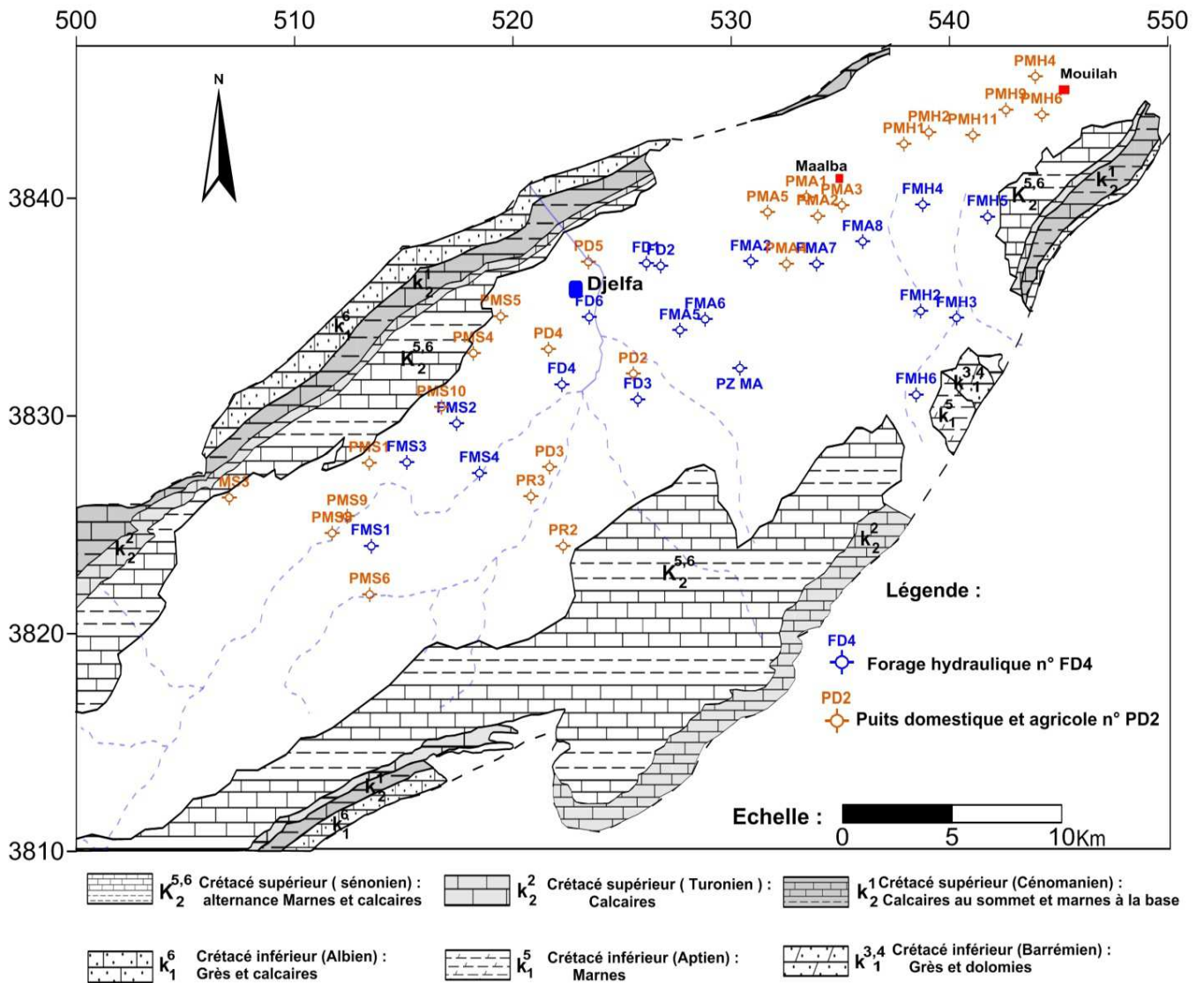
#### **IV.3 PIEZOMETRIE :**

Dans le cadre de ce travail, on a effectué deux campagnes piézométrique, l'une en basses eaux Octobre 2014 et l'autre en hautes eaux Avril 2015.

Un nombre de 65 points d'eau ont été recensés, repartis sur la nappe du Mio-Plio-Quaternaire. Seulement 45 points utilisés pour l'élaboration des cartes piézométriques (25 puits et 19 forages et un seul piézomètre) (Fig. 21); à cause de la faible distance entre quelques points d'eau. La quasi-totalité des puits et forages ; sont destinés à l'irrigation.

Nous signalons que les mesures ont été effectuées dans les conditions d'équilibres et dans le laps de temps le plus court, en utilisant une sonde piézométrique de 200 m à double signalisation (sonore et lumineuse).

La cartographie piézométrique a été réalisée par interpolation triangulaire, en utilisant le logiciel Surfer 10 (Golden software, 2011).



**Figure 21:** Carte d'inventaire des points d'eau de la nappe Mio-Plio-Quaternaire du synclinal de Djelfa.

#### IV.3.1 Carte piézométrique Octobre 2014:(Fig. 22)

Dans l'ensemble, l'examen de la carte piézométrique des basses eaux Octobre 2014 en fonction de l'allure des courbes isopièzes et la direction des axes d'écoulement permet de distinguer trois zones :

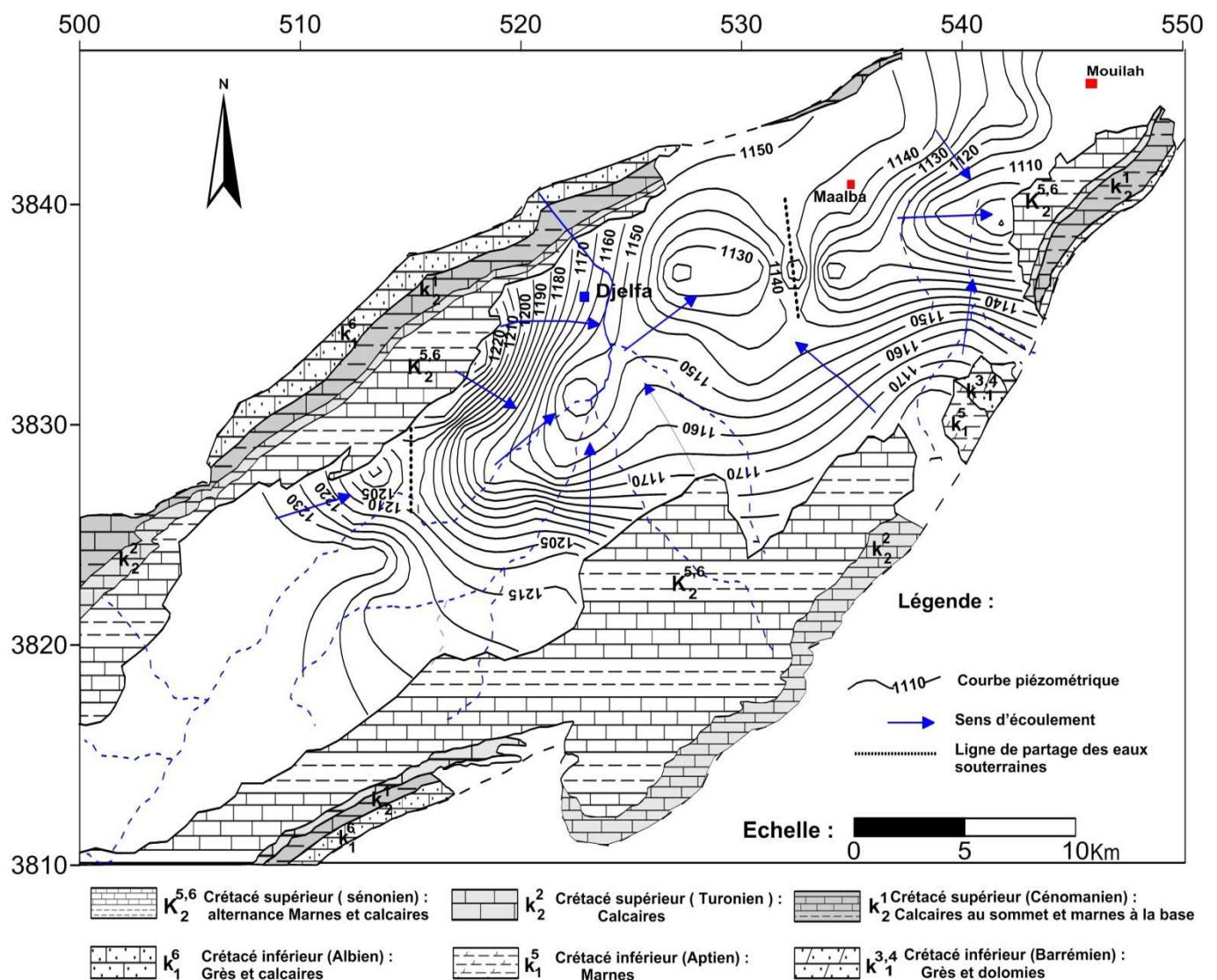
La zone Sud-Ouest et centre: Dans la partie Sud-Ouest, les courbes isopièzes sont espacées, avec un sens d'écoulement du Sud-Ouest vers le Nord-Est, c'est-à-dire vers les deux oueds (oued M'sekka et oued Ben Naam). On remarque l'existence d'une ligne de partage des eaux souterraines qui peut être due à l'influence des forages. Le gradient hydraulique est relativement moyen, il est de l'ordre de 1%. Dans la partie centrale, des courbes isopièzes serrées parallèles à la structure géologique, ceci engendre une alimentation de la nappe par les formations Sénoniennes semi perméables du flanc Nord du Synclinal où l'écoulement s'effectue du Nord-Ouest vers le Sud-Est. Concernant le gradient hydraulique, il est fort, de l'ordre de 2%.

Donc dans cette zone, les lignes de courant convergent vers l'oued principal Djelfa- Mellah, la nappe est drainée par l'oued.

La zone centre Est: Les courbes isopièzes sont espacées et l'écoulement se fait du Sud vers le Nord, vers une zone de dépression qui peut être liée à la surexploitation des forages, avec l'existence d'une ligne de partage des eaux souterraines. Le gradient hydraulique est relativement moyen à faible, il est de l'ordre de 0,5%.

La zone Est: Le sens d'écoulement montre un axe de drainage d'une direction Ouest-Est, ce drainage va alimenter les formations calcaires Sénoniennes. Le gradient hydraulique est relativement moyen, il est de l'ordre de 1%. On pense que la variation du gradient hydraulique est due, essentiellement, à l'hétérogénéité de la lithologie.

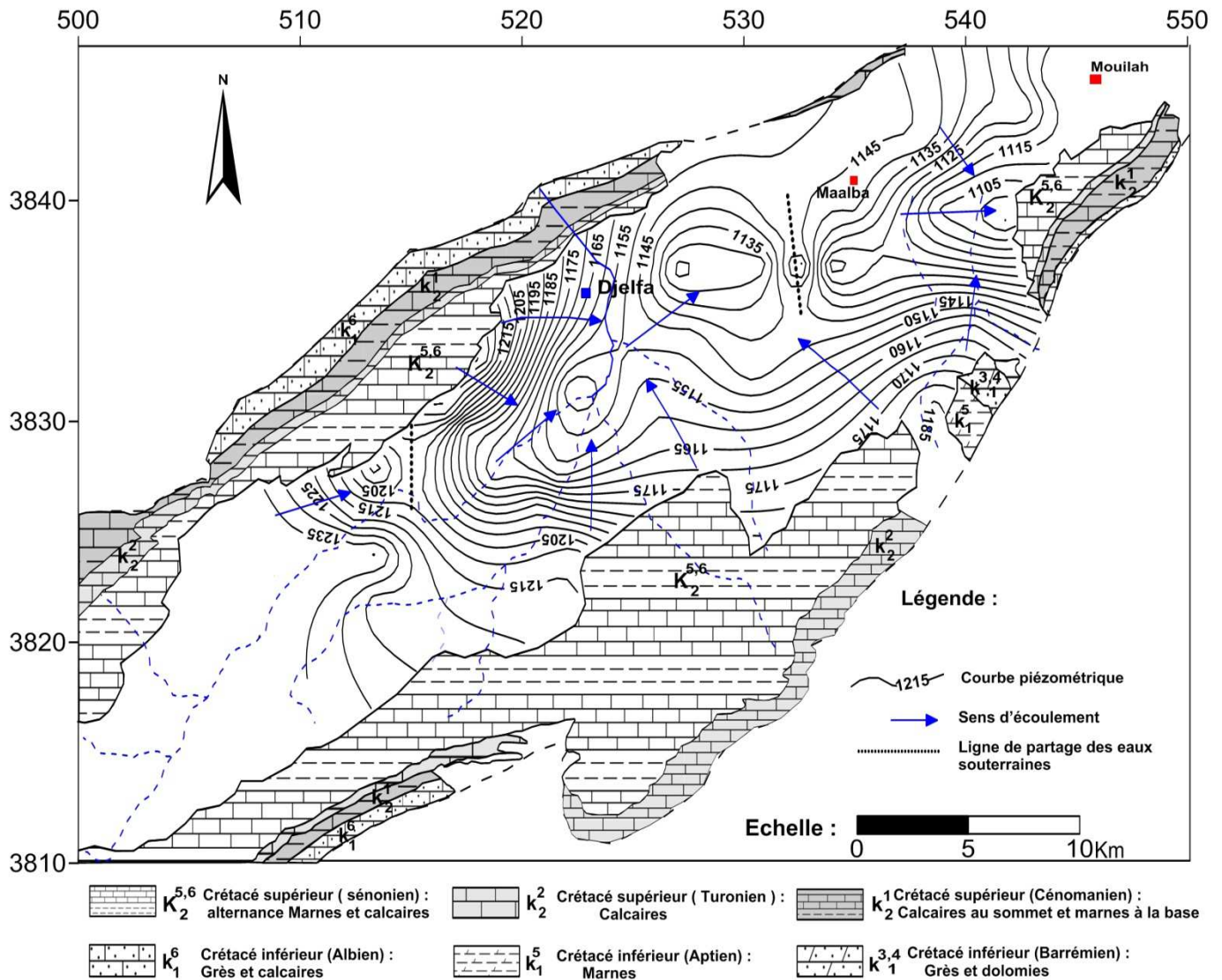
D'une façon générale, on note que l'écoulement s'effectue suivant l'axe du synclinal, du Sud-Ouest vers le Nord-Est (marqué par les oueds actuels au centre Ouest et par des paléo-vallées au Nord Est).



**Figure 22 :** Carte piézométrique de la nappe Mio-Plio-Quaternaire du synclinal de Djelfa, Octobre 2014.

### IV.3.2 Carte piézométrique Avril 2015 : (Fig. 23)

Cette carte piézométrique correspond à la période des hautes eaux (figure 29). Elle possède la même morphologie piézométrique que la carte précédente, ce qui traduit le même régime d'écoulement, où la nappe Mio-Plio-Quaternaire est toujours drainée par l'Oued principal Djelfa-Melah.



**Figure 23 :** Carte piézométrique de la nappe Mio-Plio-Quaternaire du synclinal de Djelfa, Avril 2015.

### IV.3.3 Variation du niveau statique en fonction du temps et des précipitations :

A partir des données recueillies auprès de l'ANRH de Djelfa, nous avons pu établir quatre courbes de variation du niveau statique en fonction du temps et des précipitations moyennes mensuelles depuis Septembre 2001 jusqu'à Avril 2015 pour trois puits ; PMS4, PMA3, PD2 et un piézomètre PZ ANRH.

L'analyse des courbes (Fig. 24) a montré que la variation de niveau statique est en relation avec le rythme de la précipitation, où la remontée du niveau statique se fait grâce à l'effet des averses qui

produisent une recharge de la nappe et augmentent le niveau statique, par contre la baisse du niveau statique due à l'effet de l'évaporation compensée par la diminution de la précipitation, néanmoins, la baisse du niveau statique due également sous l'effet de pompage surtout dans les zones agricoles où il y'a une exploitation intensive comme les puits PMA3 et PMS4, le niveau statique de ces puits est en baisseement depuis l'année 2009 de 3 m et 1.5 m respectivement, par contre et pour la même période le niveau statique de piézomètre de l'ANRH (PZ ANRH) qui conçus spécialement au contrôle de la variation du niveau statique, la baisseement est de l'ordre de 0.5 m.

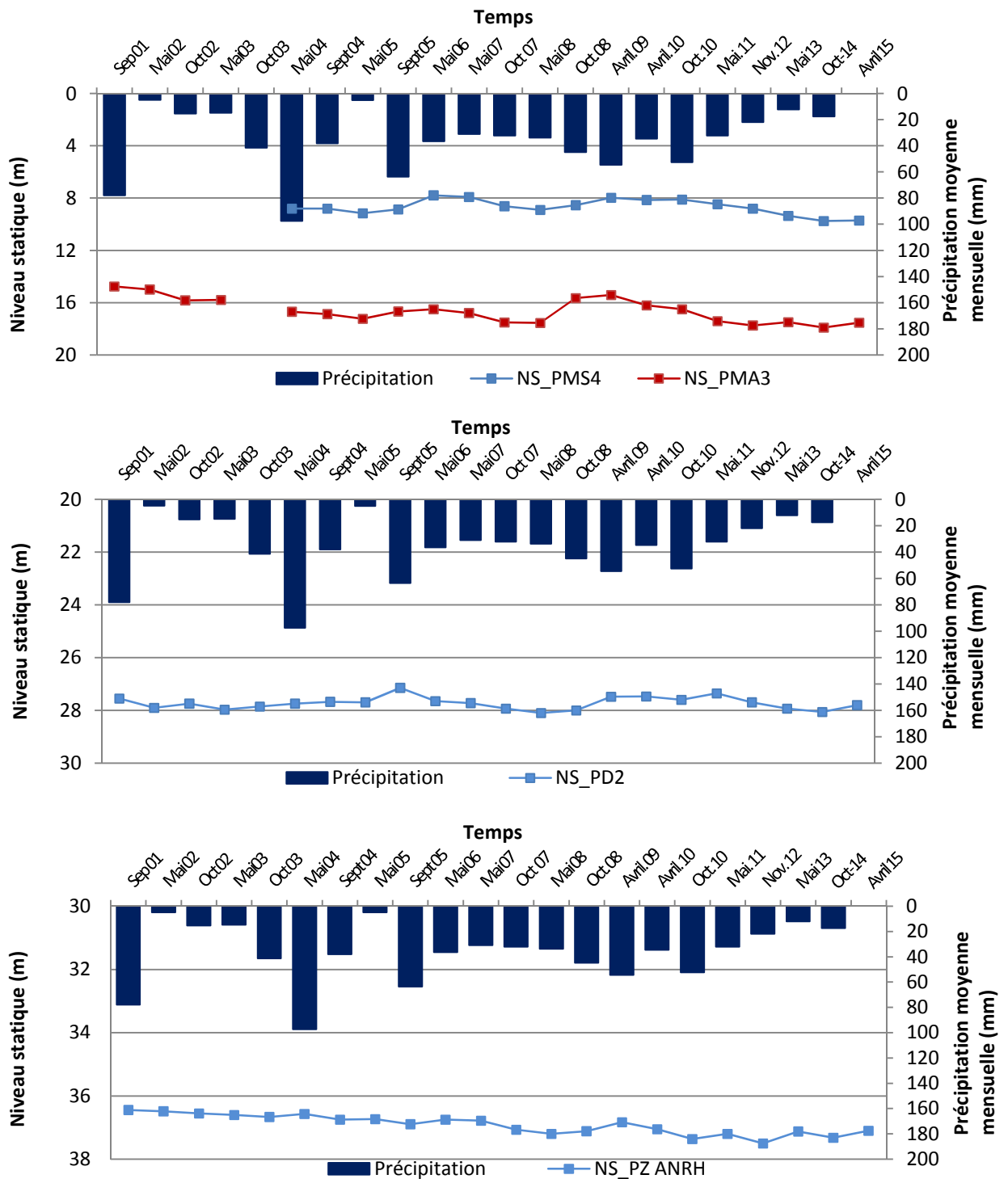


Figure 24 : Variation du niveau statique en fonction du temps et des précipitations.

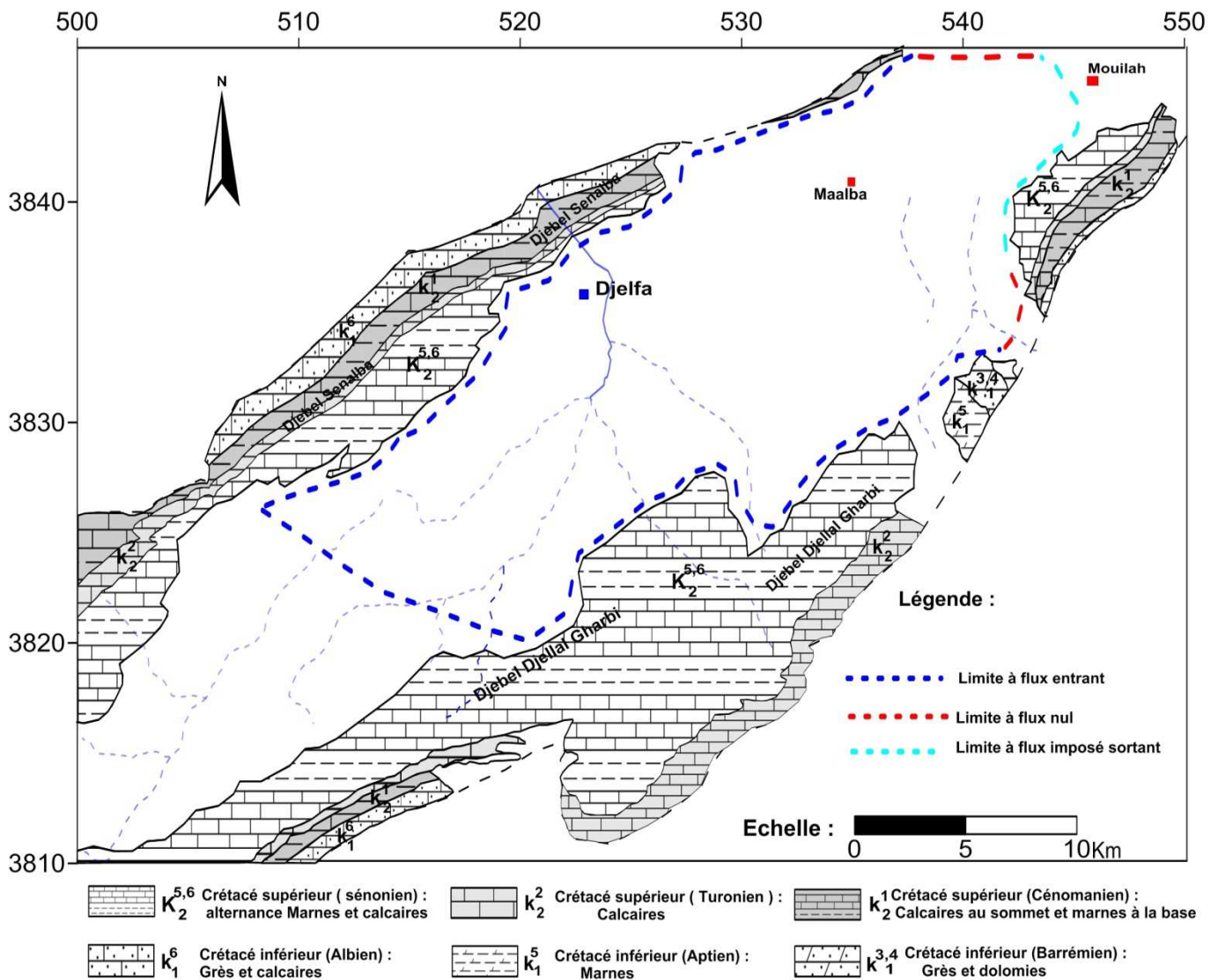
#### IV.4 CONDITIONS AUX LIMITES :

A partir des relevés piézométriques et des caractéristiques lithologiques des formations géologiques, on a établi la carte des conditions aux limites de la nappe Mio-Plio-Quaternaire du synclinal de Djelfa (Fig. 25)

La nappe est caractérisée par une limite à flux entrant au niveau de piémont Sud de Dj Senalba et le piémont Nord de Dj Djellal Charqui et Gharbi, qui sont constitués essentiellement d'alternance des calcaires et marnes d'âge Sénomien, où la nappe va bénéficier d'une source d'alimentation très importante, soit par le ruissellement direct soit par l'infiltration par l'intermédiaire des failles.

A l'extrême Est, la nappe est caractérisée par une limite à flux sortant vers la région de Mouilah, et vers les calcaires du Sénomien bordant la nappe, où les courbes isohypses montrent un axe de drainage qui alimente ces formations. Les courbes isohypses qui sont perpendiculaires aux bordures montrent des limites à flux nul.

Il faut signaler que l'Oued principal Djelfa Mellah draine la nappe Mio-Plio-Quaternaire en période des basses eaux et hautes eaux.



**Figure 25 :** Carte des conditions aux limites de la nappe Mio-Plio-Quaternaire du synclinal de Djelfa

#### IV.5 DETERMINATION DES PARAMETRES HYDRODYNAMIQUES :

Dans le but de déterminer la transmissivité et la perméabilité, nous avons travaillé sur des données brutes des essais de pompage de deux forages. Leur interprétation graphique est basée sur l'expression de l'approximation logarithmique de C.E.Jacob (1950).

$$S = \frac{0.183 Q}{T} \log \frac{2.25 T.t}{R^2 . s} \quad \text{Où :}$$

S: rabattements en (m) ;

T : transmissivité en (m<sup>2</sup>/s) ;

Q : débit de pompage en (m<sup>3</sup>/s) ;

s : coefficient d'emmagasinement ;

t : temps écoulé depuis le début du pompage en (secondes) ;

R : distance entre le piézomètre et le forage en (m).

On remarque que l'équation de JACOB est celle d'une droite de la forme :  $Y = ax + b$  avec la pente (a) ,  $a = 0,183Q/T$  , donc la transmissivité ( T ) est estimé comme suit :  $T = 0.183 Q / a$  .

La détermination de la perméabilité a été faite en se basant sur la transmissivité et l'épaisseur de la couche mouillée de l'aquifère, à partir de la formule :

$$K = \frac{T}{e} \quad \text{Où :}$$

K : perméabilité, ( m/s ) .

T : transmissivité, ( m<sup>2</sup>/s ) .

e : épaisseur mouillée de l'aquifère capté, ( m ) .

##### IV.5.1 Interprétation des essais de pompage :

###### ➤ Forage Maalba F5 :

Le forage F5 est situé à 20 Km au Nord-Est de la ville de Djelfa, au niveau de la région de Maalba, ce forage à été réalisé par la direction des ressources en eau (DRE) de la Wilaya de Djelfa. Ses coordonnées sont les suivantes :

X(UTM) : 538,797

Y(UTM) : 3840,021

La réalisation de l'essai de pompage a duré 48H, suivi d'une remontée de 8H. Le débit de pompage était réglé à 10 l/s, l'épaisseur mouillée est de 285 m (Fig. 26a, en annexe).

###### - La courbe de descente : (Fig. 26)

Une forte baisse de rabattement se fait sentir et qui pourrait traduire le refoulement de l'eau emmagasiné dans le tubage. En suite, on observe des points s'alignant suivant une droite avec une pente très faible ( $a=0.67m$ ).

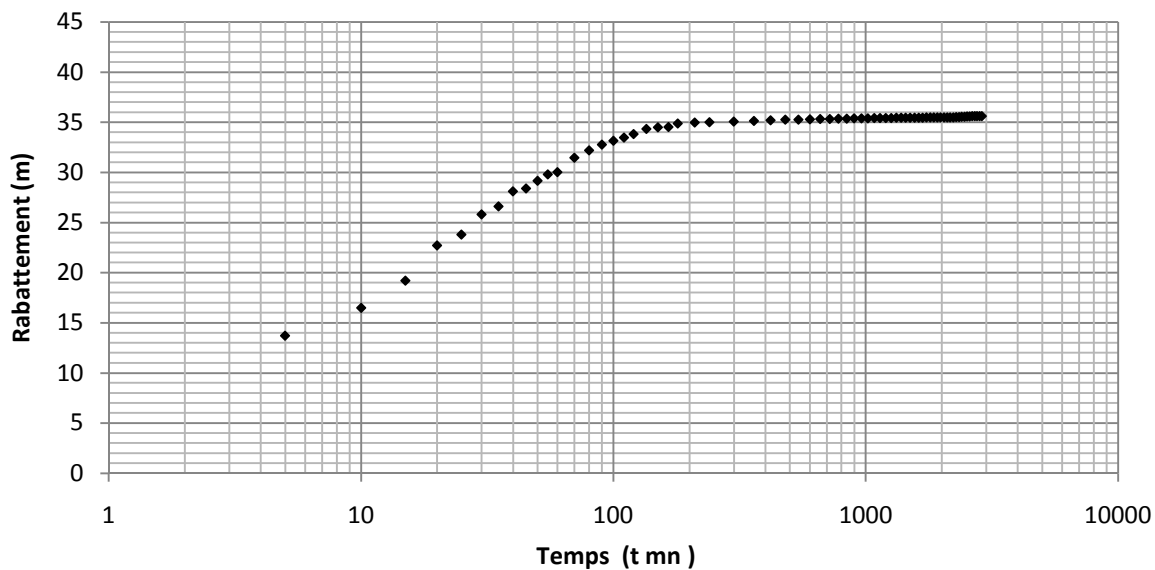
La transmissivité s'évalue dans ce cas :  $T = 0,183 \cdot 10 \cdot 10^{-3} / 0.67 \Rightarrow T = 2,7 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$

La perméabilité :  $K = 2,7 \cdot 10^{-3} / 285 \Rightarrow K = 0,94 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$

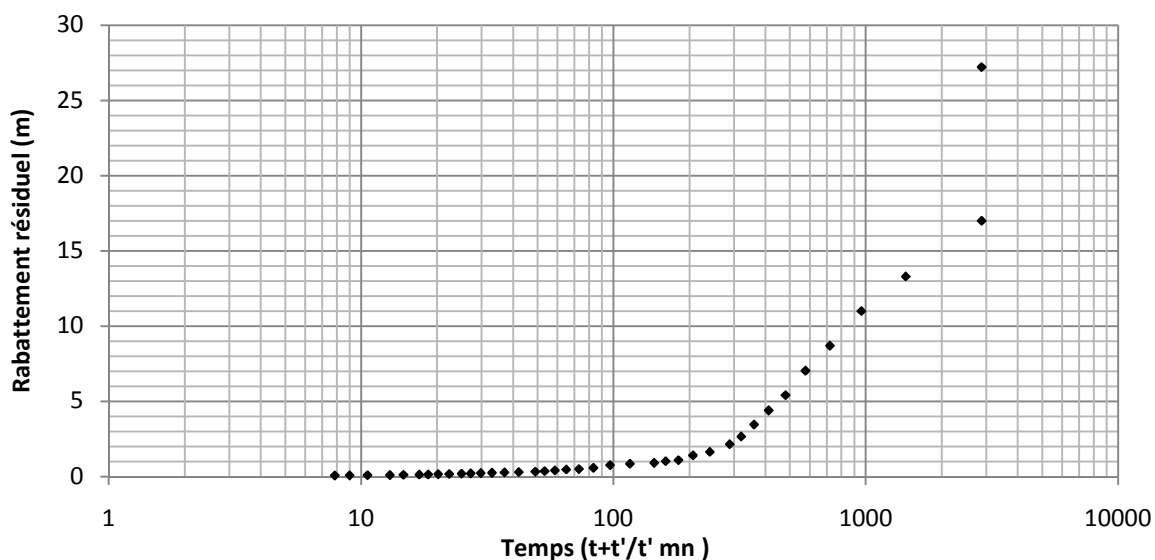
###### - La courbe de remontée : (Fig.27)

Le début de la remontée accuse une pente forte qui est semblable à celle de la descente (l'effet de capacité de l'ouvrage), cependant à la fin on trouve une pente très faible ( $a = 0,7 \text{ m}$ ), ce qui nous donne une valeur de transmissivité :  $T = 2,6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$  donc :  $K = 0,91 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$ .





**Figure 26 :** Courbe de descente du forage Maalba F5



**Figure 27 :** Courbe de remontée du forage Maalba F5

➤ **Forage 05 Juillet :**

Le forage 05 Juillet est situé au Nord au niveau de la ville de Djelfa, ce forage à été réalisé par la direction des ressources en eau (DRE) de la Wilaya de Djelfa. Ses coordonnées sont les suivantes :

X(UTM) : 526,218

Y(UTM) : 3834,293

L'essai de pompage a duré 48H suivi d'une remontée de 24H pour un débit de 05 l/s, l'épaisseur mouillée est de 200 m (Fig. 28a, en annexe).

**- La courbe de descente :** (Fig. 28)

La descente du niveau d'eau était très rapide, pendant une heure seulement, le rabattement a atteint les 47 m. Ensuite les points représentatifs du niveau d'eau s'alignent brusquement pour former une droite d'une pente très faible. On remarque que la courbe de remontée est plus représentative que celle de la descente pour calculer la transmissivité .

**- La courbe de remontée :** (Fig. 29)

Le début de la remontée accuse une pente très forte qui est semblable à celle de la descente, cependant à la fin on trouve une pente faible (a = 7 m) permettant de calculer la transmissivité comme suit :

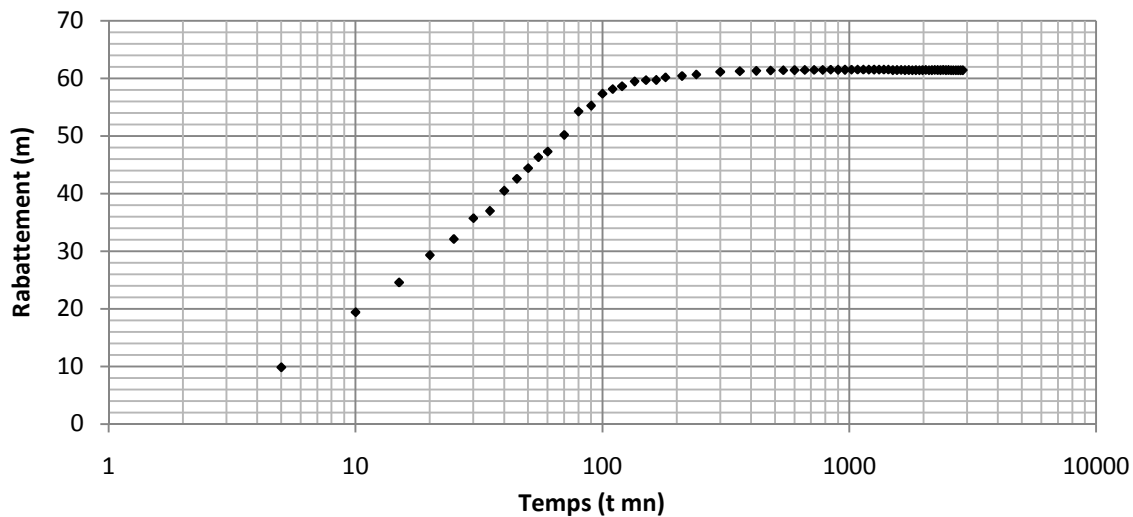
$$T = 0,183.5.10^{-3} / 7$$

$$T = 1,31.10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$$

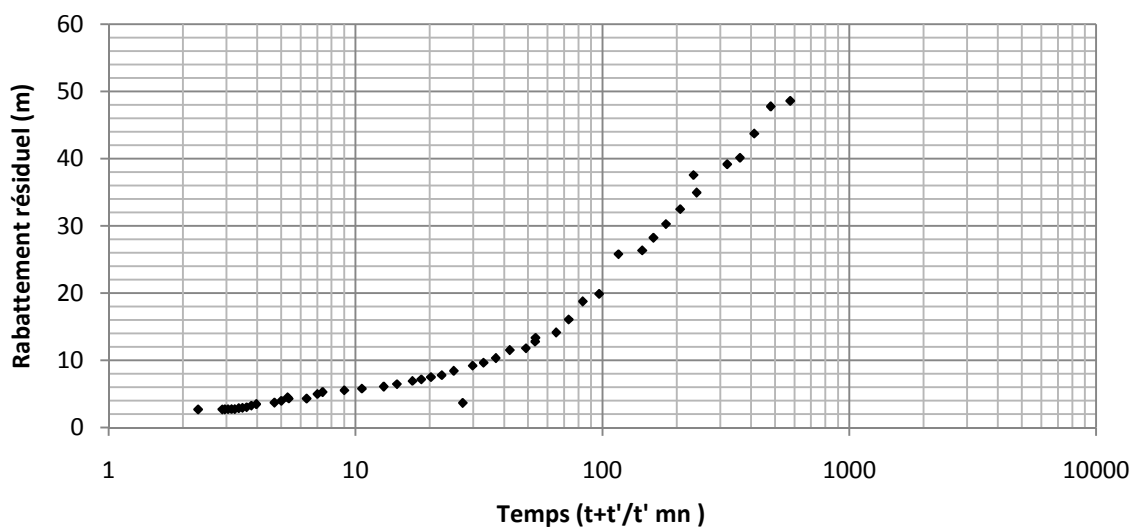
La perméabilité :

$$K = 1,31.10^{-4} / 200$$

$$K = 0,66.10^{-6} \text{ m/s}$$



**Figure 28 :** Courbe de descente du forage 05 Juillet



**Figure 29 :** Courbe de remontée du forage 05 Juillet

#### IV.6 CONCLUSION :

Après cette étude hydrogéologique de la région d'étude, on tire les conclusions suivantes :

- L'allure générale des courbes piézométriques est restée constante lors des 02 campagnes d'observations avec l'existence des cônes de dépression, liés probablement à la surexploitation de la nappe, l'écoulement souterrain se fait, en général, suivant l'axe du synclinal, du Sud-Ouest vers le Nord- Est.
- L'alimentation de la nappe se fait à partir les deux flancs du synclinal (Djebel Senalba au flanc Nord et Djebel Djellal Chergui et Djellal Gharbi au flanc Sud) soit par le ruissellement direct soit par l'infiltration par l'intermédiaire des failles.
- L'évolution du niveau statique est en relation avec le rythme de la précipitation, où la remontée du niveau statique se fait grace à l'effet des averses qui augmentent le niveau statique, par contre la baisse du niveau statique due à l'effet de l'évaporation compensée par la diminution de la précipitation.
- Les exutoires de la nappe sont:
  - \*L'oued principal Djelfa-Mellah qui constitue un important drain (exutoire) de la nappe, en période des basses eaux et hautes eaux.
  - \*L'axe de drainage de direction Ouest-Est, au niveau de la région de Maalba, avec un écoulement vers les calcaires Sénoniennes (l'extrême Est de la région).
  - \*Les forages et les puits, avec des débits différents suivant l'utilisation.
- Les essais de pompages effectués au niveau de l'aquifère nous donnent des valeurs de transmissivité qui varie entre  $1,31.10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s et  $2,6.10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s, avec des valeurs de perméabilité varie entre  $0,66.10^{-6}$  m/s et  $0,87.10^{-5}$  m/s.

**Chapitre V :**  
**HYDROCHIMIE**

## V.1 INTRODUCTION :

L'étude de la chimie des eaux souterraines apporte à l'hydrogéologie une somme considérable de renseignements utiles à la compréhension des phénomènes se produisant dans les systèmes aquifères. C'est-à-dire dans les échanges possibles entre l'eau et la roche, sachant que la minéralisation des eaux souterraines peut provenir de l'acquisition des éléments chimiques par la dissolution et l'altération des minéraux du réservoir.

L'étude de la chimie des eaux souterraines, elle permet aussi de suivre l'évolution spatiale des différents éléments dissous et d'estimer leur origine, d'estimer la profondeur de circulation des eaux, et d'apprécier la qualité des eaux vis-à-vis de la potabilité et à l'irrigation.

C'est dans ce but que ce chapitre a été consacré, où on a utilisé certain nombre de diagrammes avec les différentes cartes qui ont été tracés pour l'ensemble des éléments chimiques. Une analyse statistique a été effectuée aussi sur les principaux paramètres caractérisant le chimisme des eaux de l'aquifère.

## V.2 ECHANTILLONNAGE ET ANALYSE HYDROCHIMIQUE:

Nous avons effectué deux campagne de prélèvement d'eau en Octobre 2014 et Avril 2015, où on a sélectionné lors de l'inventaire des points d'eau, 27 points d'eau, en nous basant sur leur répartition spatiale et l'aquifère capté. (Fig. 30)

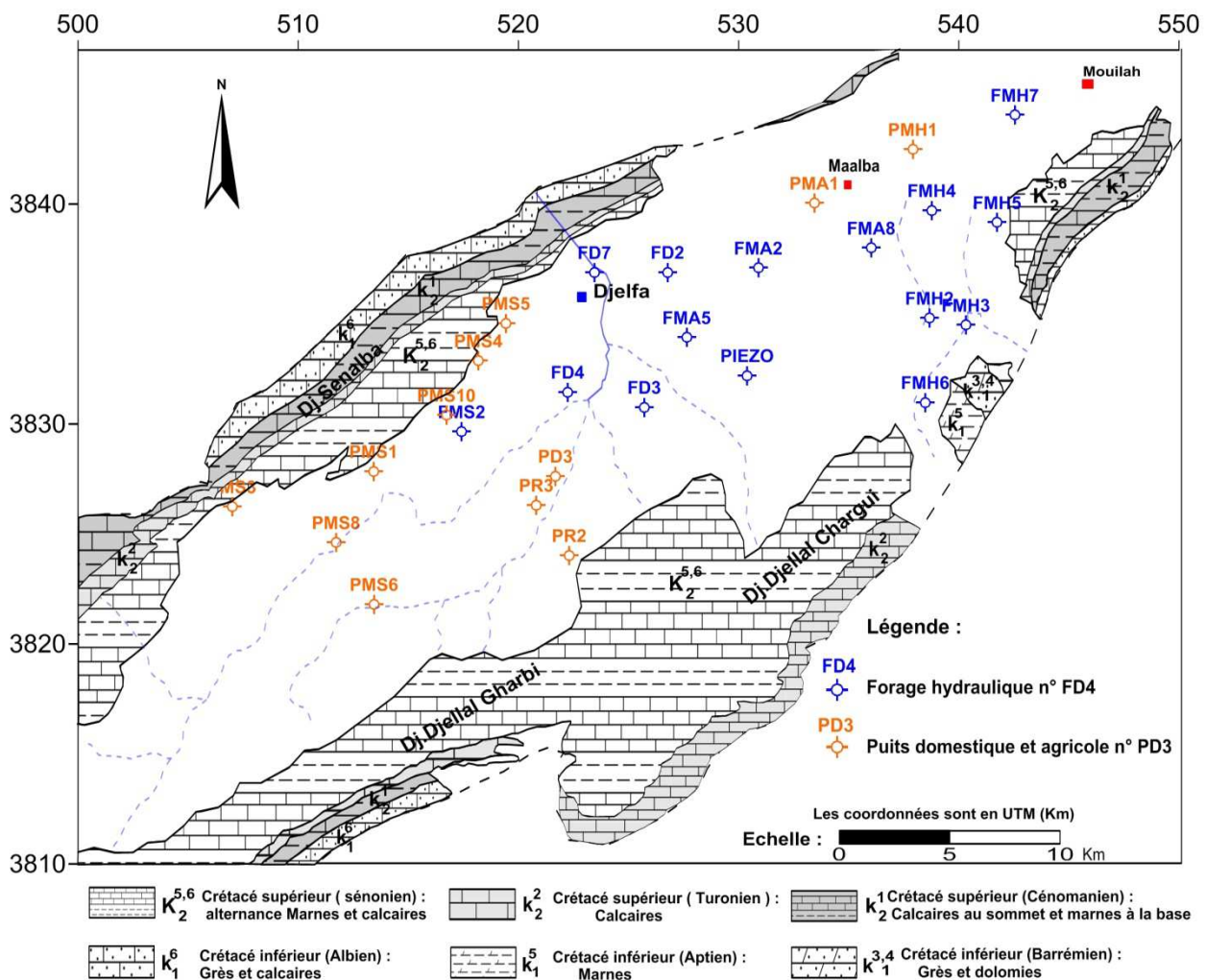


Figure 30 : Carte d'inventaire des points d'eau échantillonnés

## V.2.1 Méthodes d'analyse :

### V.2.1.1 Mesures in situ :

Trois paramètres physico-chimiques ( $T^{\circ}$ , pH, conductivité électrique) ont été mesurés in situ, immédiatement après le prélèvement de l'échantillon à l'aide d'un pH mètre pHep (HANNA), et un Conductivimètre de terrain du type Delta OHM HD 3406.2.

### V.2.1.2 Analyses aux laboratoires :

Les analyses d'eau ont été effectuées au laboratoire d'hydrogéologie de l'université de Tébessa pour la première campagne Octobre 2014, et laboratoire de l'Agence National des Ressources Hydraulique (ANRH) pour la deuxième campagne Avril 2015. Elles ont porté sur les éléments majeurs ( $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^{+}$ ,  $K^{+}$ ,  $Cl^{-}$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $HCO_3^{-}$ ,  $NO_3^{-}$ ).

Les méthodes utilisées sont :

-Méthode volumétrique pour les éléments ( $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Cl^{-}$ ,  $HCO_3^{-}$ )

-Méthode de spectrophotométrie d'absorption atomique (en utilisant un spectrophotomètre Hi 83200 (HANNA)) pour les éléments ( $Na^{+}$ ,  $K^{+}$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $NO_3^{-}$ ).

Pour la fiabilité des résultats d'analyse, on a procédé à l'application de la méthode de la balance ionique et une erreur de 10 % a été acceptée.

## V.3 ETUDE DES PARAMETRES PHYSIQUES :

Le récapitulatif des résultats de mesures des paramètres physiques des eaux de la nappe Mio-Plio-Quaternaire du synclinal de Djelfa sont donnés sur le tableau 12

paramètre	Période des basses eaux				Période des hautes eaux			
	Min	Moy	Max	Ecart-type	Min	Moy	Max	Ecart-type
$T^{\circ}C$	16	18.37	21.5	1.86	17	20.38	22.5	1.39
pH	7.49	7.75	8.1	0.16	7.58	7.87	8.2	0.17
CN $\mu s/cm$	594.55	1339.60	4925.16	928.45	550.28	1320.12	5310.67	1054.12

Tableau 12 : Variation des paramètres physiques des eaux souterraines.

### V.3.1 Température :

La température des eaux prélevées dans la région étudiée, varie de 16 à 22.5  $^{\circ}C$ , elle ne dépasse pas les normes fixées par l'O.M.S (25  $^{\circ}C$ ). Cette variation de température des eaux souterraines peut être fonction de la profondeur de l'aquifère.

### V.3.2 Potentiel hydrogène (pH) :

Le pH exprime la concentration en ion  $H^{+}$  d'une solution. C'est un paramètre physique qui détermine l'acidité ou l'alcalinité. Les mesures du pH montrent que tous les puits se trouvent dans l'intervalle de norme de potabilité (d'après l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS)). Dans la période des hautes eaux le pH varie entre 7.58 et 8.2, alors qu'en période des basses eaux les valeurs variées entre 7.49 et 8.1.

### V.3.3 La conductivité électrique (CE):(Fig. 31 et 32)

La conductivité traduit globalement la teneur d'une eau en sels dissous, elle est d'autant plus élevée que la minéralisation est importante. Les valeurs mesurées ont été ramenées à 20°C, à l'aide de la relation suivante :

$$CE_{20} = CE_{Tmes} \times F \quad \text{Avec :}$$

$CE_{20}$  : conductivité à une température de 20 °C .

$CE_{Tmes}$  : conductivité lue sur l'appareil à une température mesurée.

F : facteur de correction , varie de 0.885 à 1.490 selon la température mesurée .

La gamme de variation de la conductivité des eaux de la nappe du Mio-Plio-Quaternaire pendant toutes les campagnes, varie de 550.28  $\mu\text{S}/\text{cm}$  à 5310.67  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , où la cartographie de ce paramètre montre que les grandes valeurs se localisent dans la partie Nord ouest du synclinal en contact avec les piémonts des massifs à l'Ouest des cartes de 1600 à 5310  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , Ces fortes concentrations peuvent se traduire par des apports d'eau qui sont chargés venus des piémonts des massifs (surtout à partir des formations marno-calcaires du Sénonien) et en relation avec les formations triasiques par l'intermédiaire des failles. On remarque également un accroissement de la conductivité suivant le sens d'écoulement des eaux souterraines c'est-à-dire du Sud-Ouest vers le Nord-Est , débute de 400 à 1800  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

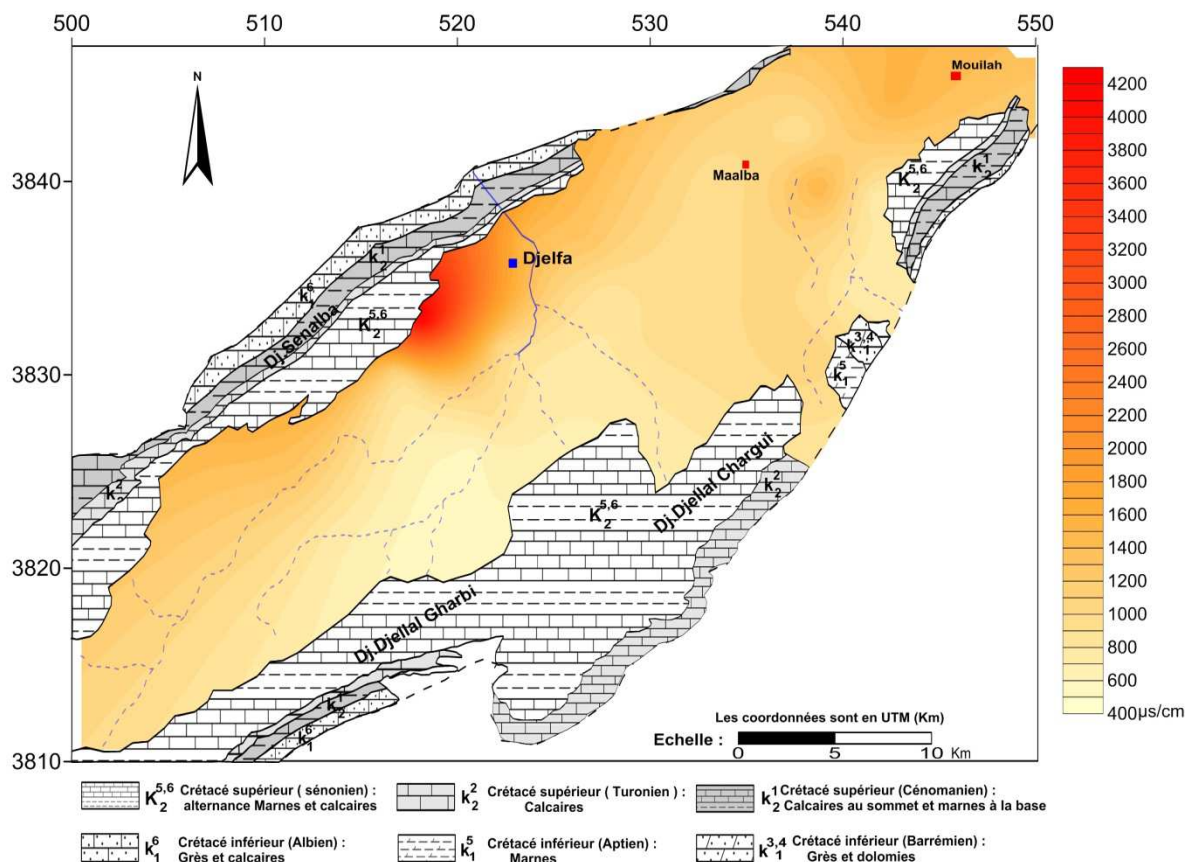


Figure 31 : carte des conductivités octobre 2014.

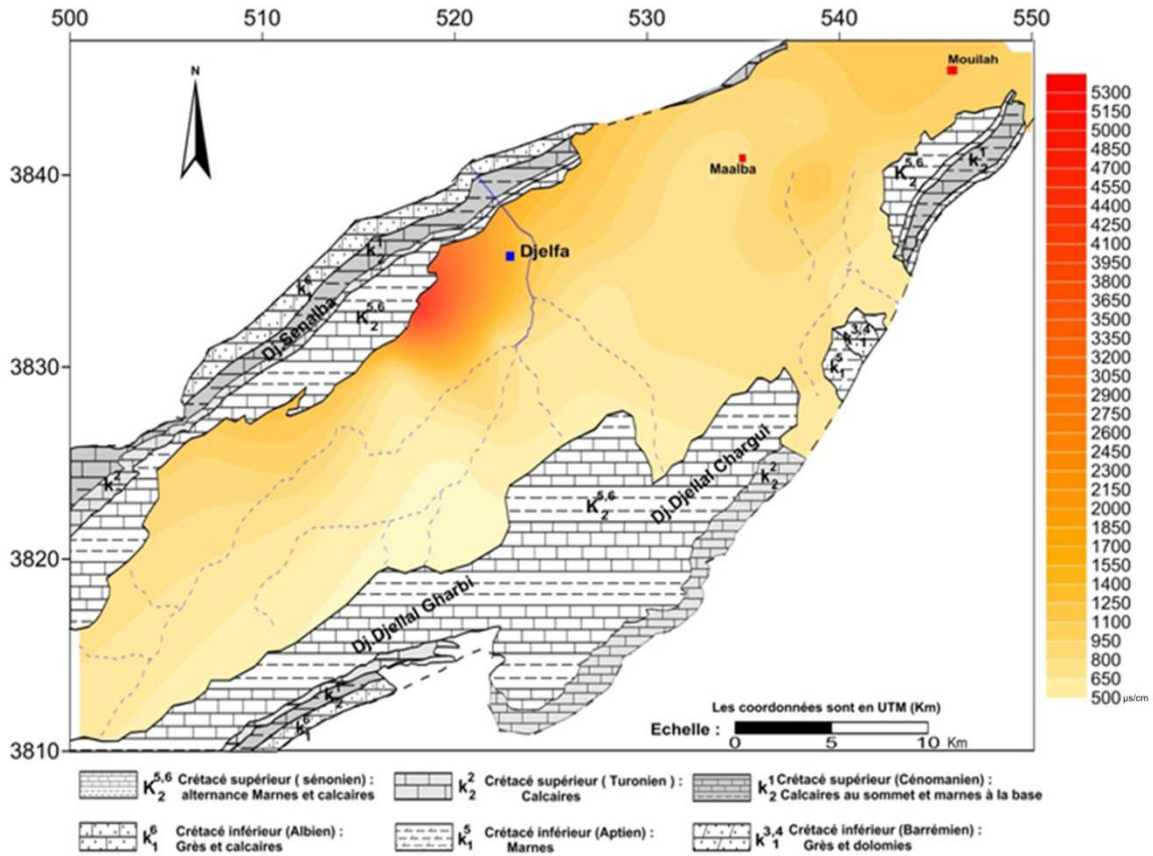


Figure 32 : carte des conductivités Avril 2015.

#### V.4 ETUDE DES PARAMETRES CHIMIQUES :

Le récapitulatif des résultats d'analyse chimique des eaux de la nappe Mio-Plio-Quaternaire du synclinal de Djelfa sont donnés sur le tableau 13

Eléments	Période des basses eaux				Période des hautes eaux			
	Min	Moy	Max	Ecart-type	Min	Moy	Max	Ecart-type
Ca <sup>2+</sup> (mg/l)	41.40	107.48	188.60	40.21	32.75	105.09	188.67	45.91
Mg <sup>2+</sup> (mg/l)	19.72	72.48	285.12	68.14	19.27	81.51	325.64	82.17
Na <sup>+</sup> (mg/l)	20.14	54.42	118.35	24.29	20.13	49.88	112.52	22.45
K <sup>+</sup> (mg/l)	0.5	2.64	14	2.65	0.5	4.04	12	2.40
So <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/l)	65	254.46	920	220.17	45	255.93	990	239.44
Cl <sup>-</sup> (mg/l)	32.61	91.92	236.84	46.16	22.17	84.47	252.67	52.97
Hco <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	124.20	296.31	531.60	96.21	106.62	280.81	537.22	101.89
No <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	8.61	23.35	42.07	9.85	6.75	25.52	41.75	10.84

Tableau 13 : Variation des paramètres chimiques des eaux souterraines.



#### V.4.1 Cartographie hydrochimique :

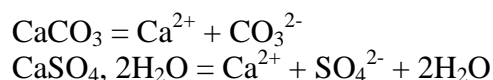
Afin de montrer la répartition spatiale des éléments chimiques, nous avons choisi l'outil cartographique qui constitue un outil très appréciable dans la vision de l'évolution spatiale d'un constituant chimique quelconque.

La cartographie hydrochimique a été illustrée par interpolation triangulaire, en utilisant le logiciel Surfer 10 (Golden software, 2011).

##### V.4.1.1 Cartes du calcium :(Fig.33 et 34)

Les teneurs en calcium oscillent en général entre 40 et 190 mg/l, L'examen des deux cartes montre que les concentrations sont importantes dans la partie Nord-ouest du synclinal, au piémont Sud du flanc Nord, c'est-à-dire en bordure des formations carbonatées et des marnes avec des lentilles de gypse d'âge Sénonien, donc ces fortes concentrations proviennent essentiellement de la dissolution des formations carbonatées (  $\text{CaCO}_3$  ) de bordure, et des gypses contenus dans les marnes.

Les ions  $\text{Ca}^{2+}$  proviennent de la dissolution des formations carbonatées ( $\text{CaCO}_3$ ) et des gypses selon les équations d'équilibre suivantes:



On remarque également que les teneurs croissent dans le sens de l'écoulement c'est-à-dire du Sud-Ouest vers le Nord-Est, débute de 32.75 à 188.67 pour la période des hautes eaux et de 41.35 à 169.82 pour la période des basses eaux.

##### V.4.1.2 Carte du magnésium :(Fig. 35 et 36)

Les concentrations en magnésium, varient de 19 à 330 mg/l. On note que les teneurs élevées sont observées dans la parité Nord-Ouest du synclinal au piémont sud du flanc nord. Les ions ( $\text{Mg}^{2+}$ ) proviennent, comme les ions ( $\text{Ca}^{2+}$ ), de la dissolution des formations carbonatées riches en magnésium (dolomites), comme peuvent se traduire également par la dissolution des formations salifères. Les fortes concentrations sont enregistrées pendant la période des hautes eaux ceci montre l'importance du lessivage des formations géologiques. Les teneurs inférieures à 50 mg/l sont observées dans la partie Sud-Ouest et la partie centrale de la nappe.

##### V.4.1.3 Cartes du sodium :(Fig.37 et 38)

Le Sodium est toujours présent dans les eaux naturelles en proportions variables, il provient essentiellement du lessivage des formations riches en NaCl (argiles et marnes) et des eaux usées d'origine industrielle et domestique.

Les concentrations varient entre 20 et 120 mg/l. L'observation des deux cartes montre que les concentrations sont importantes dans la zone Nord-Ouest de la plaine au piémont sud du flanc nord qui dépassent 100 mg/l, ces concentrations peuvent se traduire par la dissolution des formations salifères contenues dans la bordure, les teneurs faibles se localisent au Sud Ouest (en amont de la nappe), là où les eaux souterraines sont au début de leur cheminement, c'est-à-dire ne sont pas encore trop minéralisées, et augment progressivement lorsque en allant vers le Nord-Est, débute de 20.14 à 118.35 pendant la période des basses eaux et 20.13 à 112.52 pendant la période des hautes eaux.

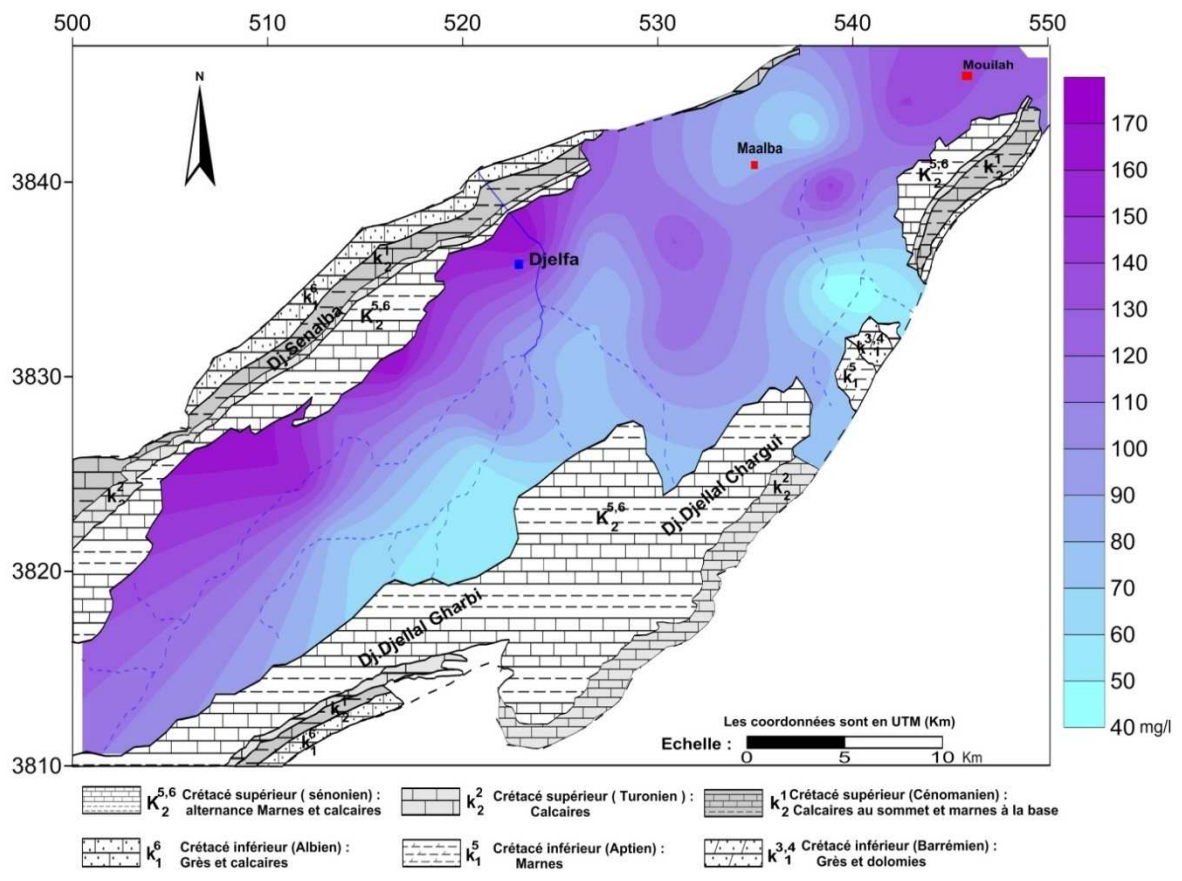


Figure 33 : Carte des calcium ( $Ca^{2+}$ ), Octobre 2014

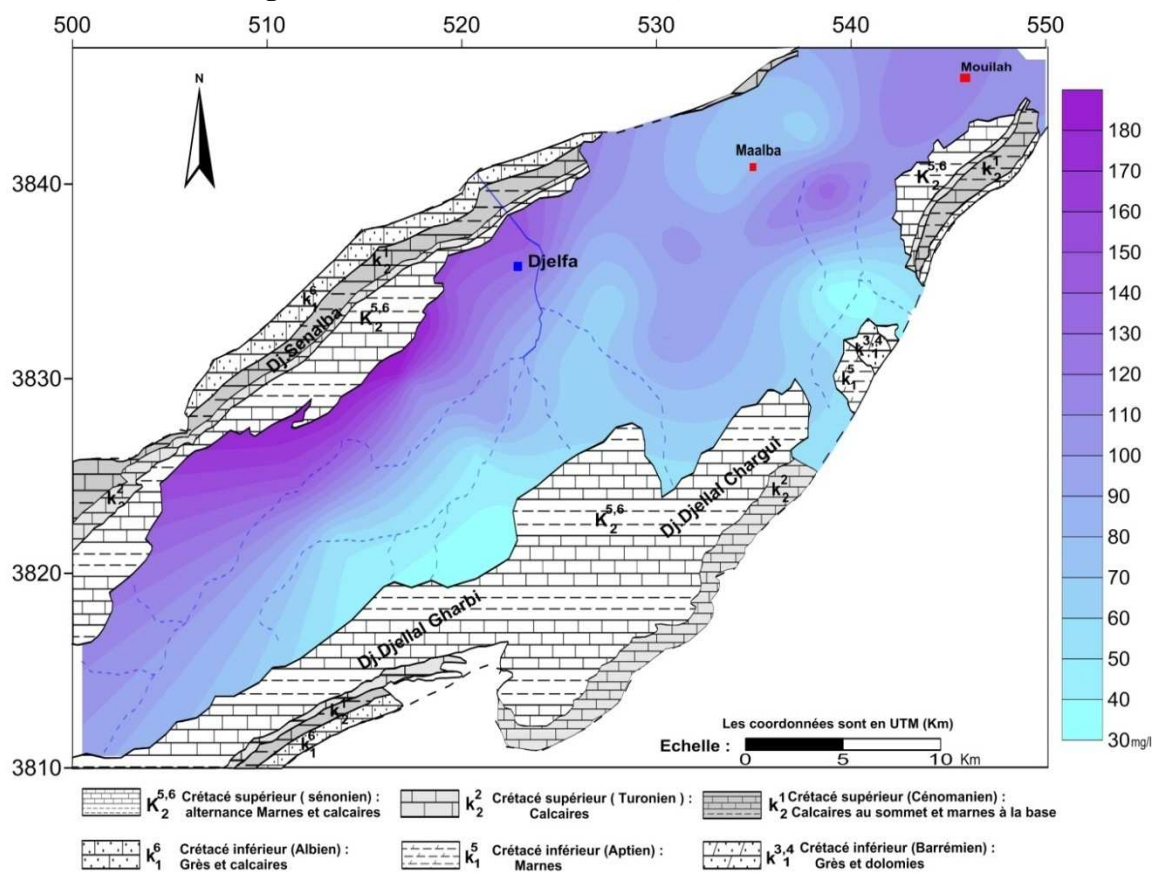
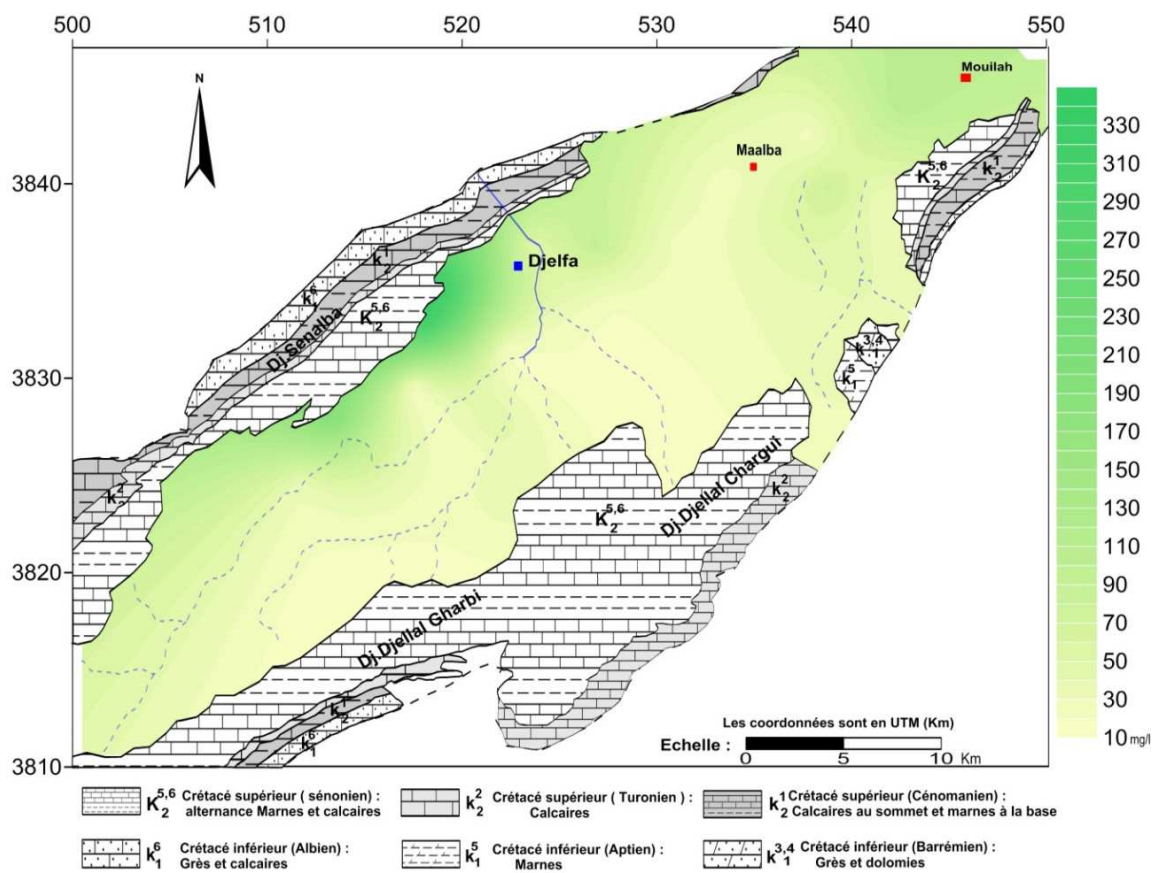
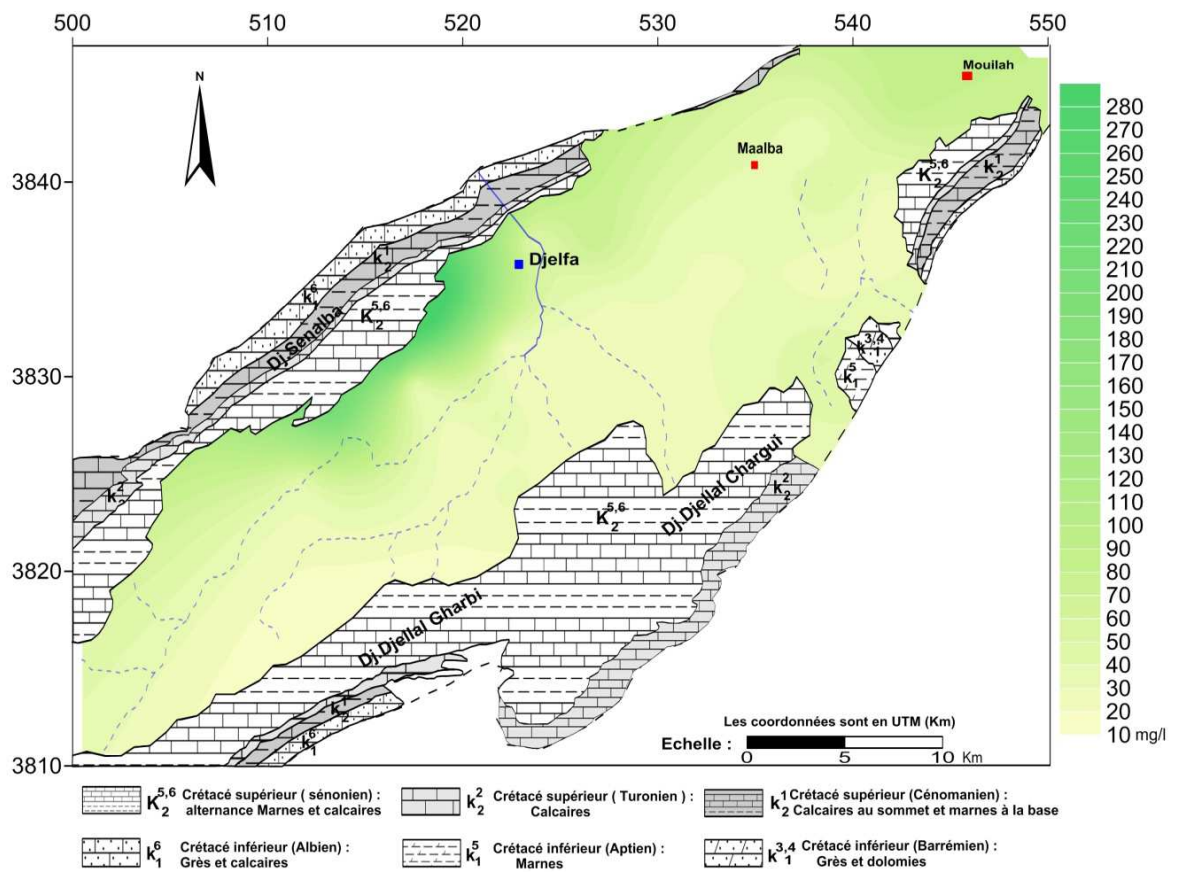


Figure 34 : Carte des calcium ( $Ca^{2+}$ ), Avril 2015



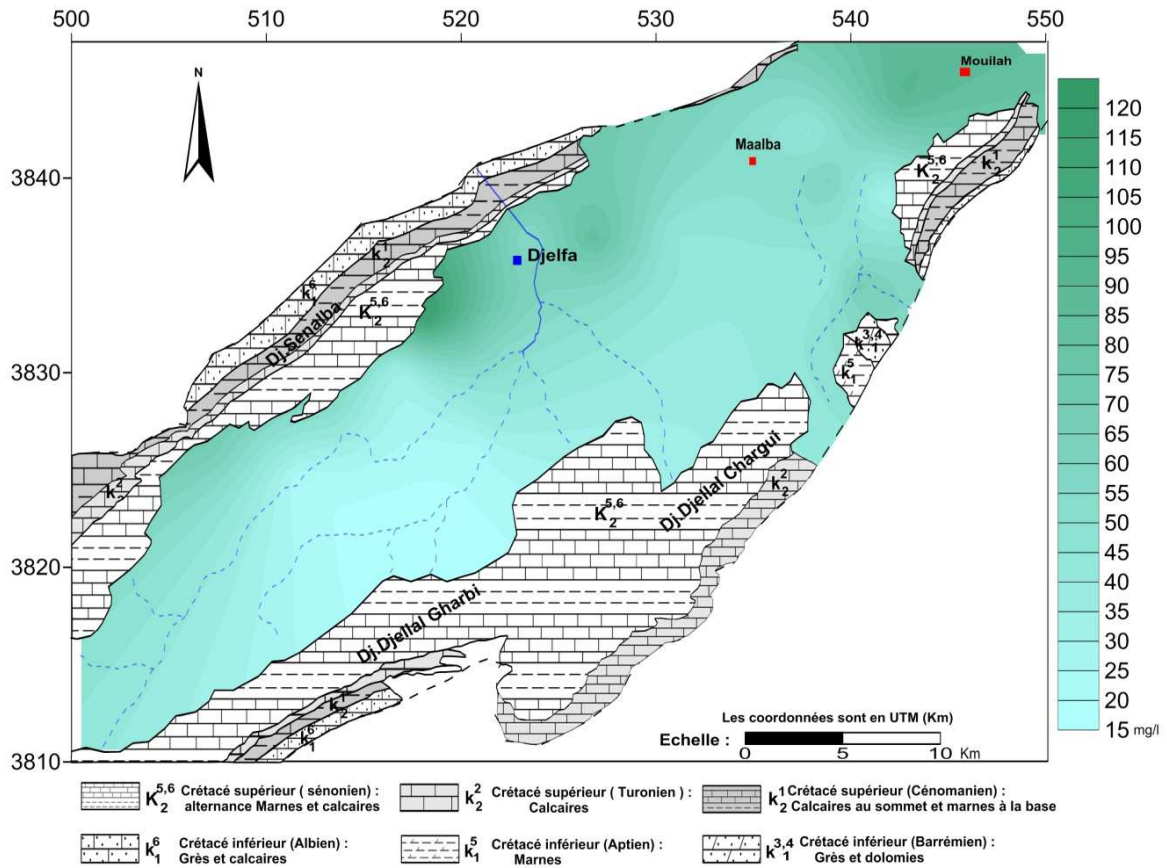


Figure 37 : Carte des sodiums ( $Na^+$ ), Octobre 2014

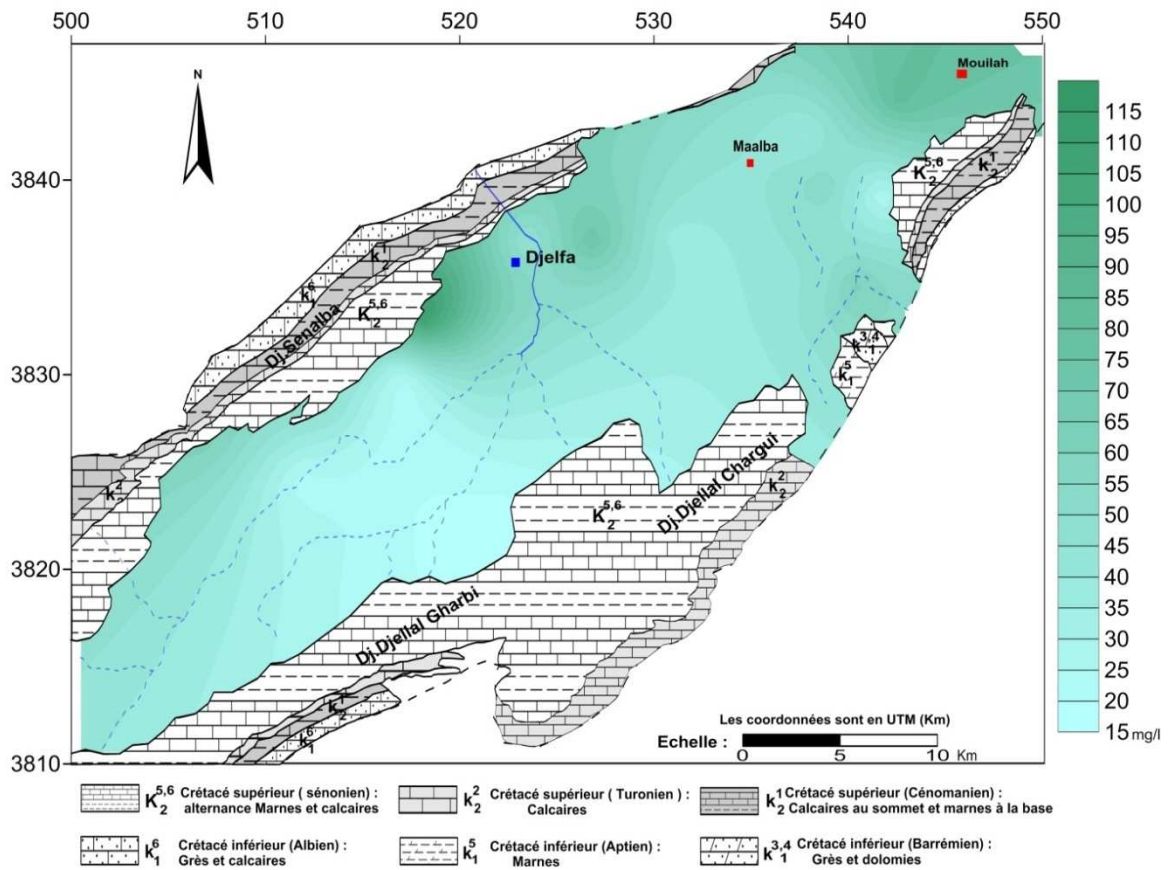


Figure 38 : Carte des sodiums ( $Na^+$ ), Avril 2015

#### **V.4.1.4 Cartes du Bicarbonate :(Fig.39 et 40)**

Les teneurs en bicarbonates variées entre 120 à 560 mg/l. L'examen des deux cartes montre que les teneurs sont relativement faibles dans la partie Sud-Est de la nappe où les eaux sont au début de leur cheminement dans la nappe. Les concentrations les plus importantes sont observées; dans la partie centre Nord et plus à l'Ouest en bordure du flanc Nord, donc ces fortes concentrations peuvent se traduire par la dissolution des calcaires de la bordure par les pluies acides surtout pendant la période des hautes eaux selon la réaction suivante:



On note également que les cailloutis calcaires qui existent dans les formations de la nappe peuvent influencer sur la concentration en cet élément.

#### **V.4.1.5 Cartes du chlorure :(Fig.41 et 42)**

Les teneurs en chlorures variées entre 32 à 260 mg/l, la cartographie de cet élément montre une élévation remarquable dans la partie Nord-Ouest au piémont sud du flanc Nord de synclinal. Ces fortes concentrations peuvent se traduire par la dissolution des formations gypsifères dans la bordure. Les activités anthropiques contribuent également à l'augmentation des teneurs en chlorures. Les teneurs faibles sont enregistrées dans la partie Sud-Ouest et augmentent progressivement lorsque on va vers la partie Sud-Est. Le rapprochement des valeurs des concentrations durant les deux (02) périodes des hautes eaux et basses eaux met en évidence l'effet du lessivage des formations traversées.

#### **V.4.1.6 Cartes du sulfate :(Fig.43 et 44)**

Les concentrations, en général, oscillent entre 50 et 990 mg/l. Les fortes concentrations sont enregistrées dans la partie Nord Ouest de la nappe au piémont Sud du flanc Nord du synclinal surtout durant la période des hautes eaux avec des valeurs qui dépassent les 500 mg/l (990 mg/l) comme valeur maximale observée au niveau du puits (PMS4), ces fortes valeurs peuvent s'expliquer par la dissolution des sels minéraux (gypses) contenus dans les formations Sénoniennes au bordure.

On remarque un accroissement des teneurs suivant le sens de l'écoulement c'est-à-dire de Sud-Ouest vers le Nord-Est, débute de 45 à 400 mg/l, l'augmentation des teneurs peut se traduire par le lessivage des formations gypsifères.

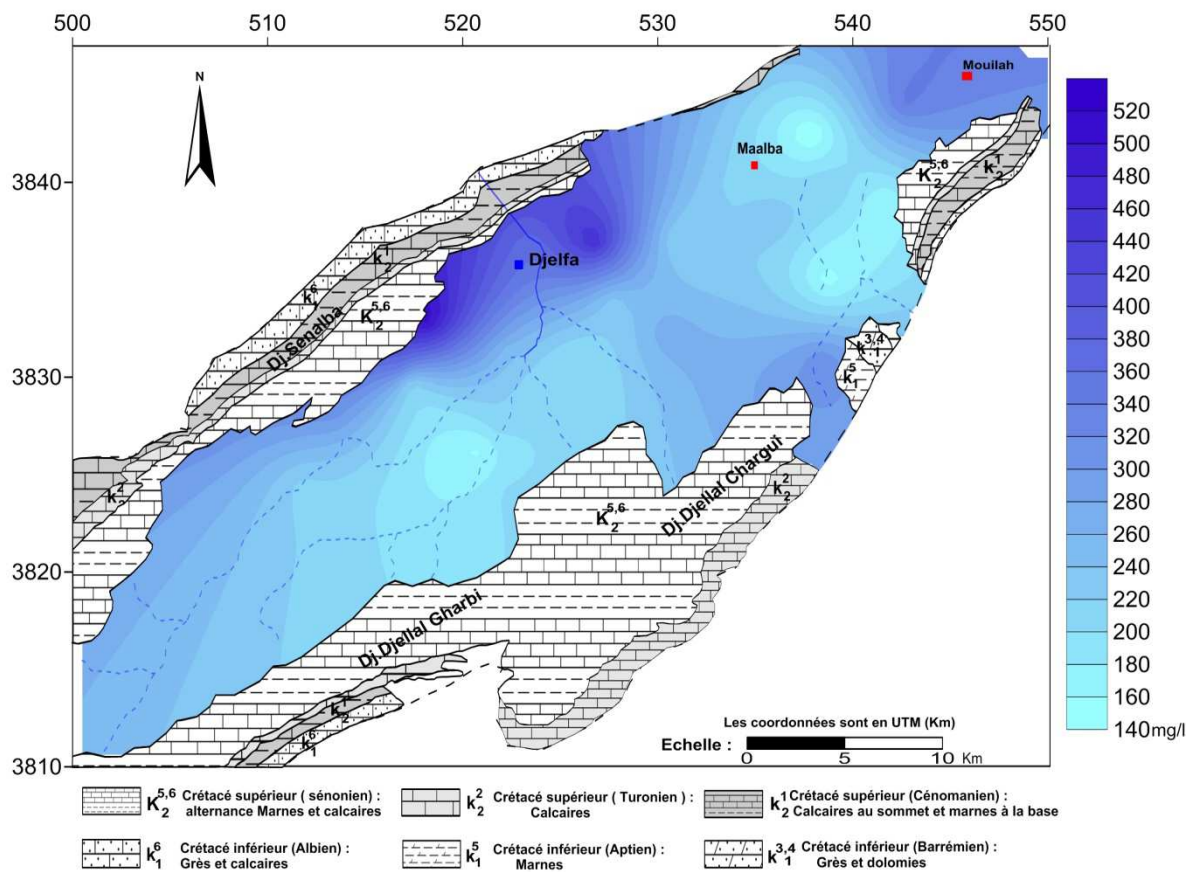


Figure 39 : Carte des bicarbonates (  $\text{HCO}_3^-$  ), Octobre 2014

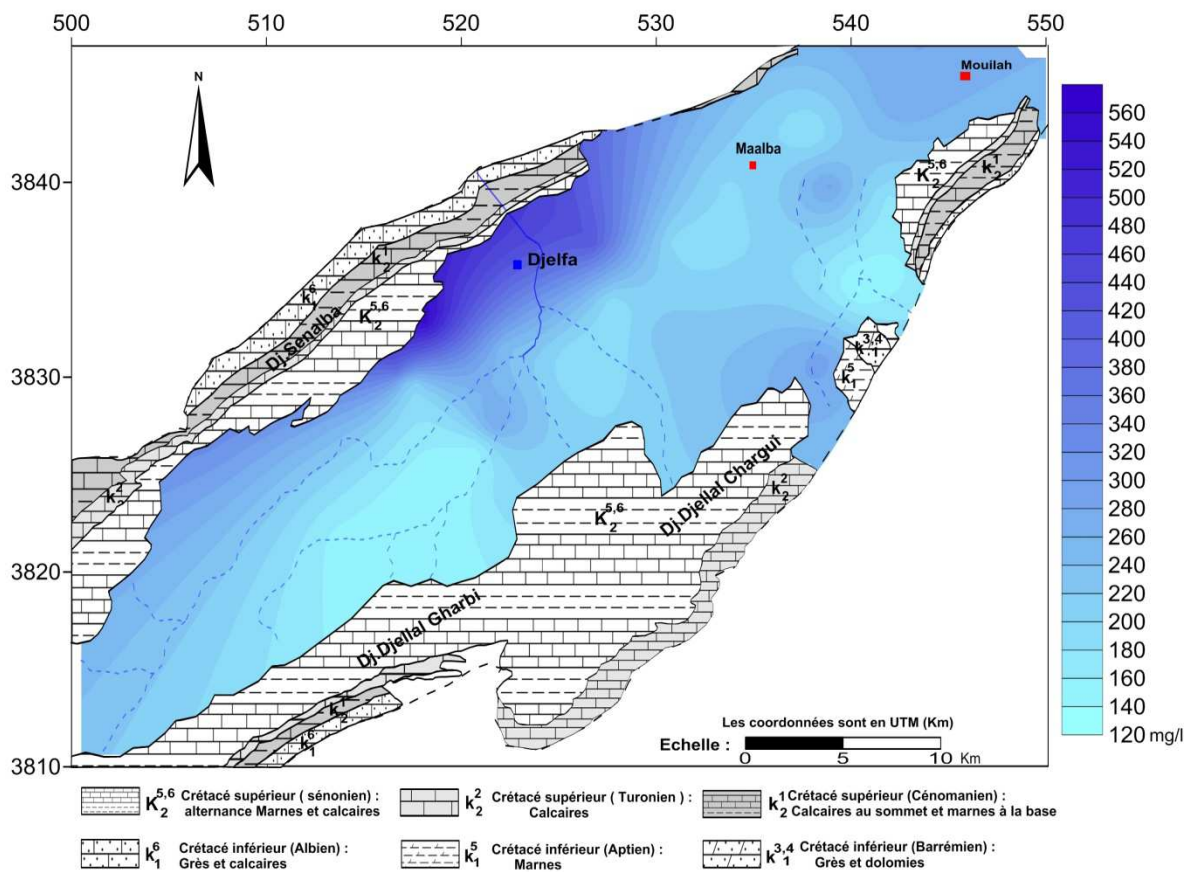


Figure 40 : Carte des bicarbonates (  $\text{HCO}_3^-$  ), Avril 2015

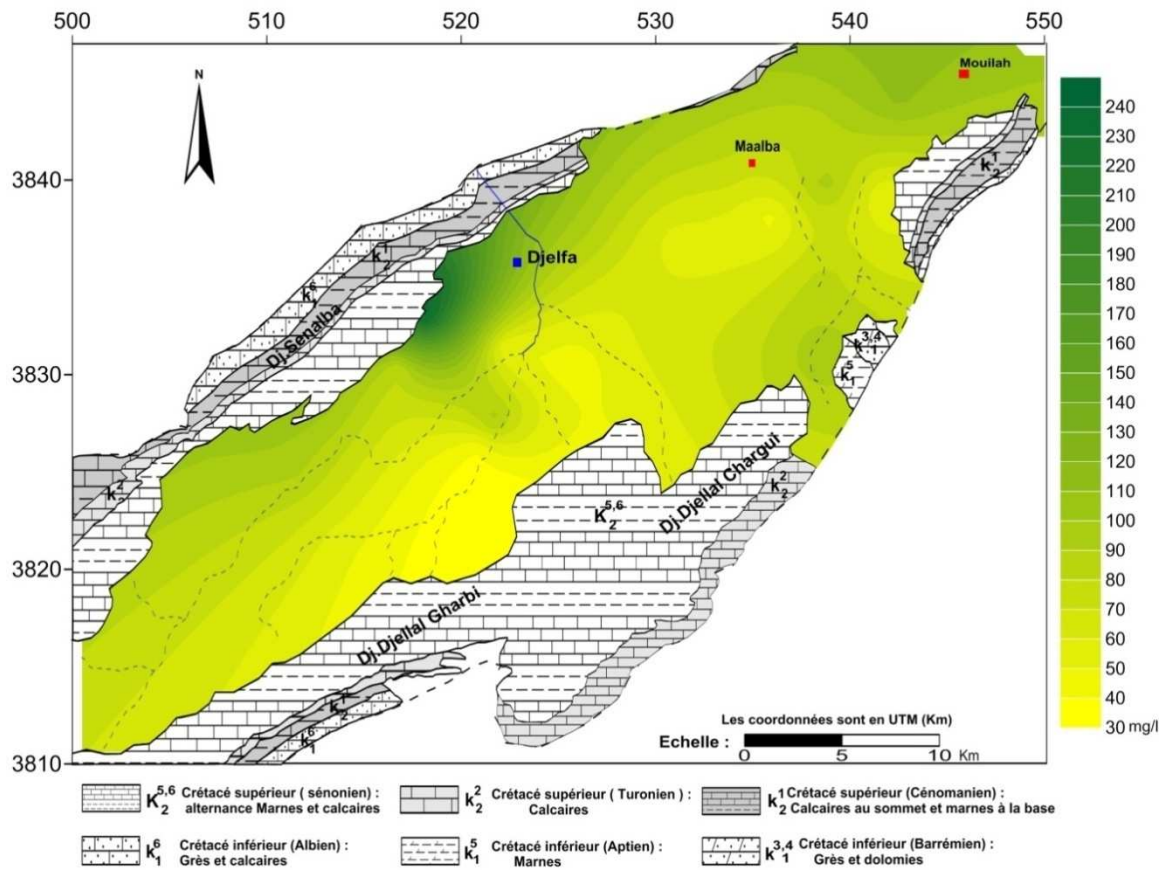


Figure 41 : Carte des chlorures ( Cl<sup>-</sup> ), Octobre 2014

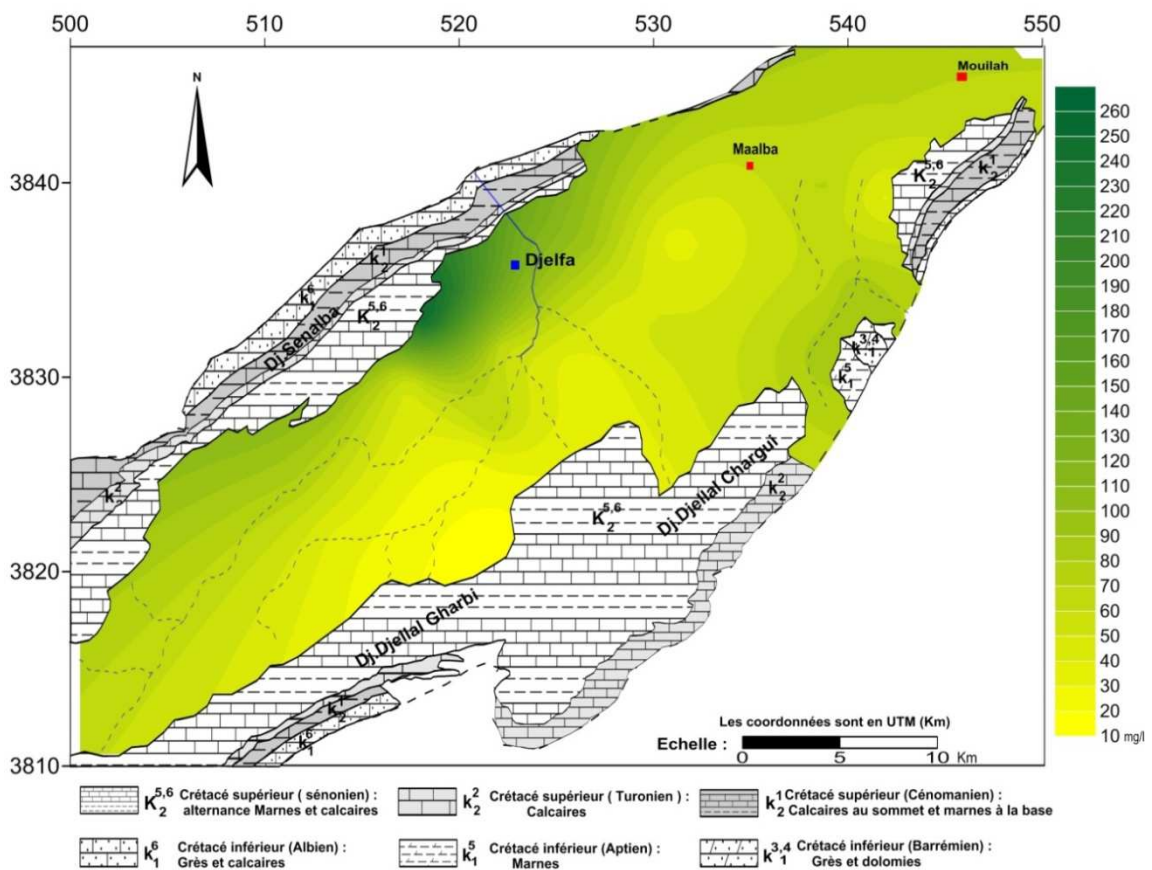


Figure 42 : Carte des chlorures ( Cl<sup>-</sup> ), Avril 2015

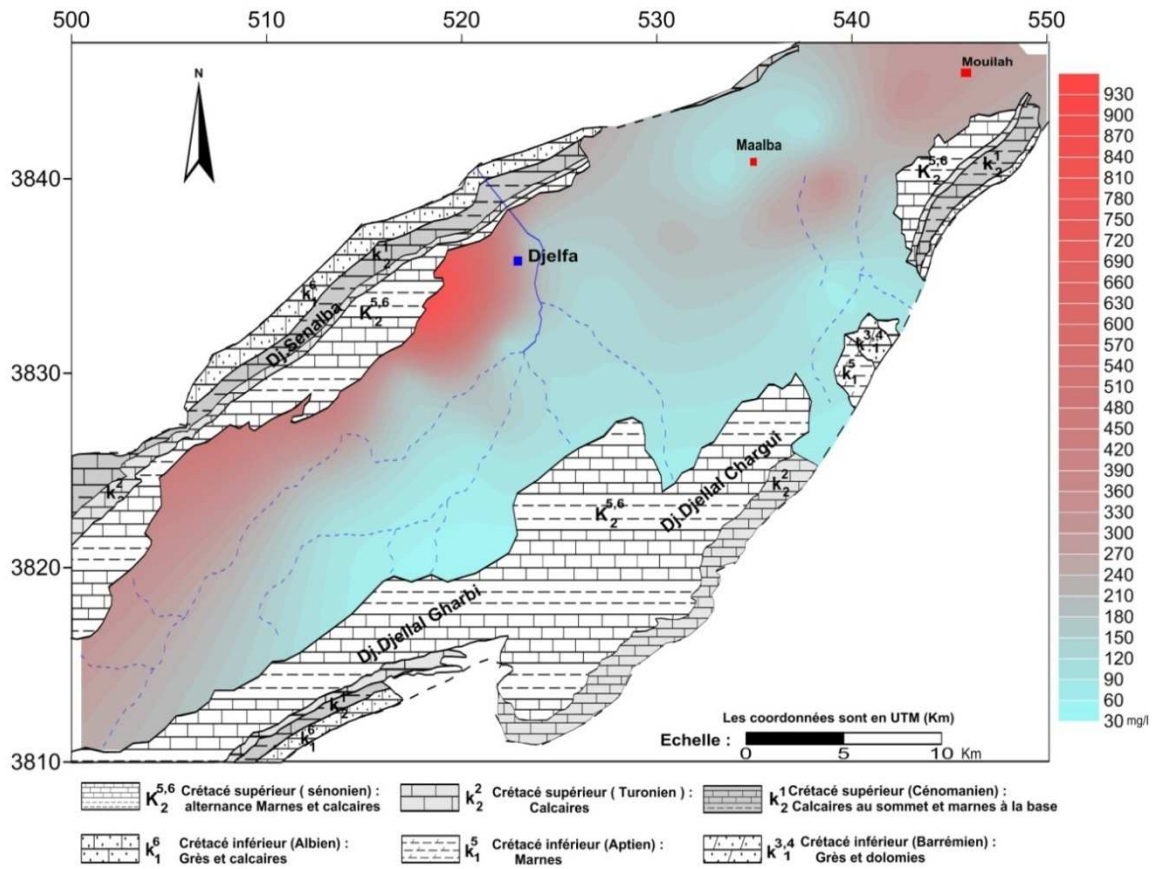


Figure 43 : Carte des sulfates (  $SO_4^{2-}$  ), Octobre 2014

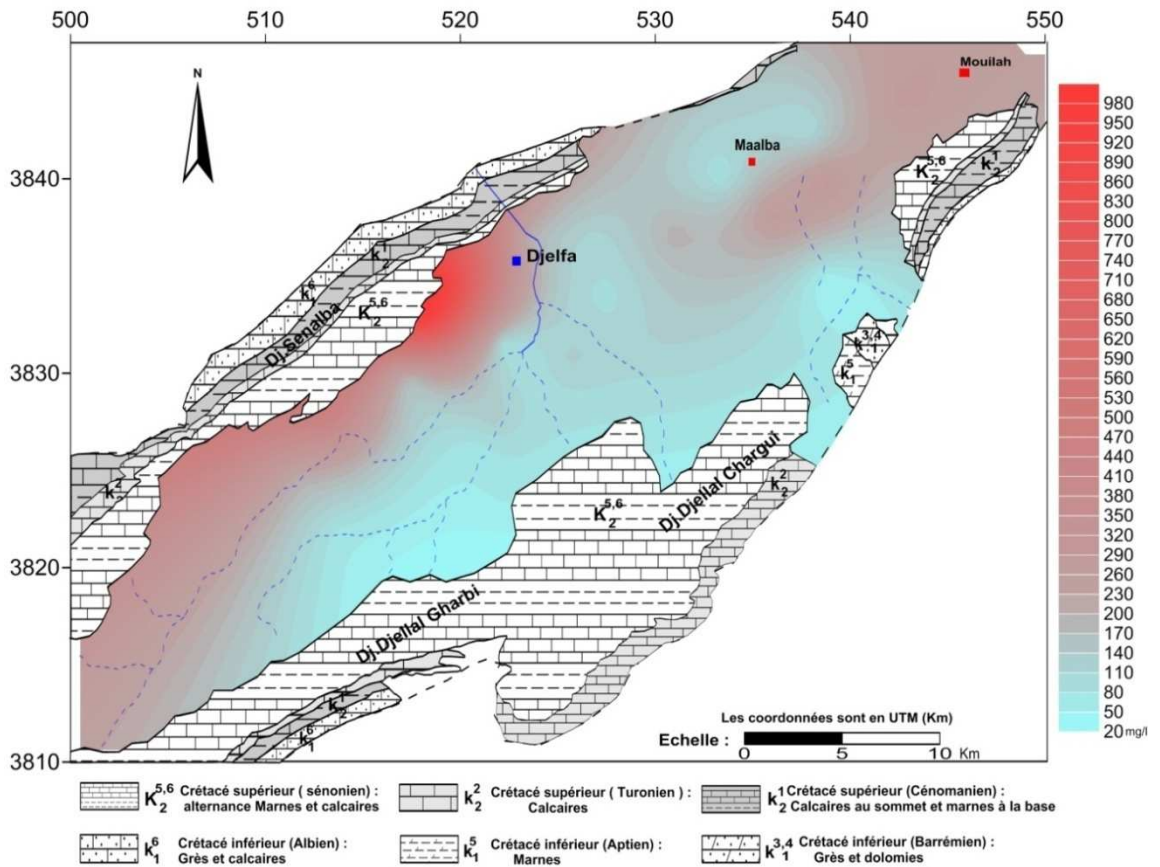


Figure 44 : Carte des sulfates (  $SO_4^{2-}$  ), Avril 2015



#### V.4.1.7 Cartes du nitrate :(Fig.46 et 47)

Les nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ) constituent le stade final d'oxydation de l'azote organique. Les nitrates sont abondamment répandus dans le sol, dans la plupart des eaux et des plantes où ils sont nécessaires à la synthèse des végétaux. Soluble dans l'eau, ils se retrouvent naturellement en faible concentration dans les eaux souterraines et les eaux de surface.

Les sources d'azote peuvent être :

- La matière organique du sol par la minéralisation ;
- Les amendements organiques comme le fumier et les autres déchets ;
- Les engrais azotés.

Ces derniers donnent naissance aux nitrates par les processus de nitrification qui correspondent à l'oxydation biologique de l'azote ammoniacal en azote nitrique  $\text{NO}_3^-$  (Fig.45) .Les étapes successives de la nitrification se font par l'intermédiaire de deux familles de bactéries principalement présentes dans les sols: *Nitrosomonas* pour la nitrification (transformation de  $\text{NH}_4^+$  en  $\text{NO}_2^-$ ) et *Nitrobacter* pour la nitratation (transformation de  $\text{NO}_2^-$  en  $\text{NO}_3^-$ ).

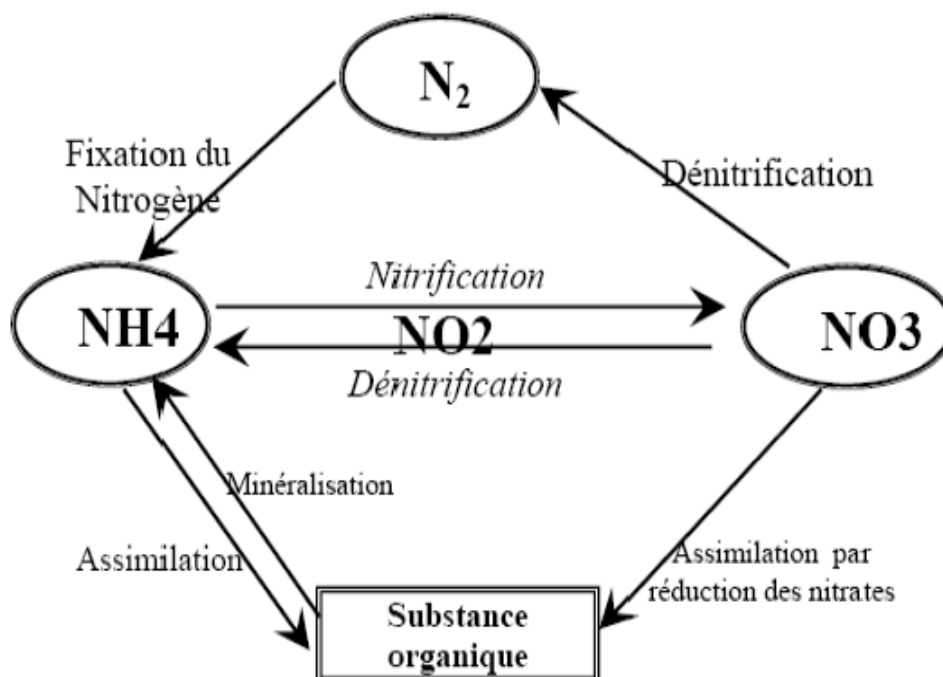


Figure 45 : le cycle de l'azote dans le sol (Hill, 1991)

En général, les teneurs en nitrates dans les eaux souterraines de la nappe Mio-Plio-Quaternaire sont faibles, sauf dans la partie Nord Est de la nappe où on a enregistré des valeurs variées entre 30 et 42, mais elles restent inférieures à la norme fixée par l'OMS 50 mg/l.

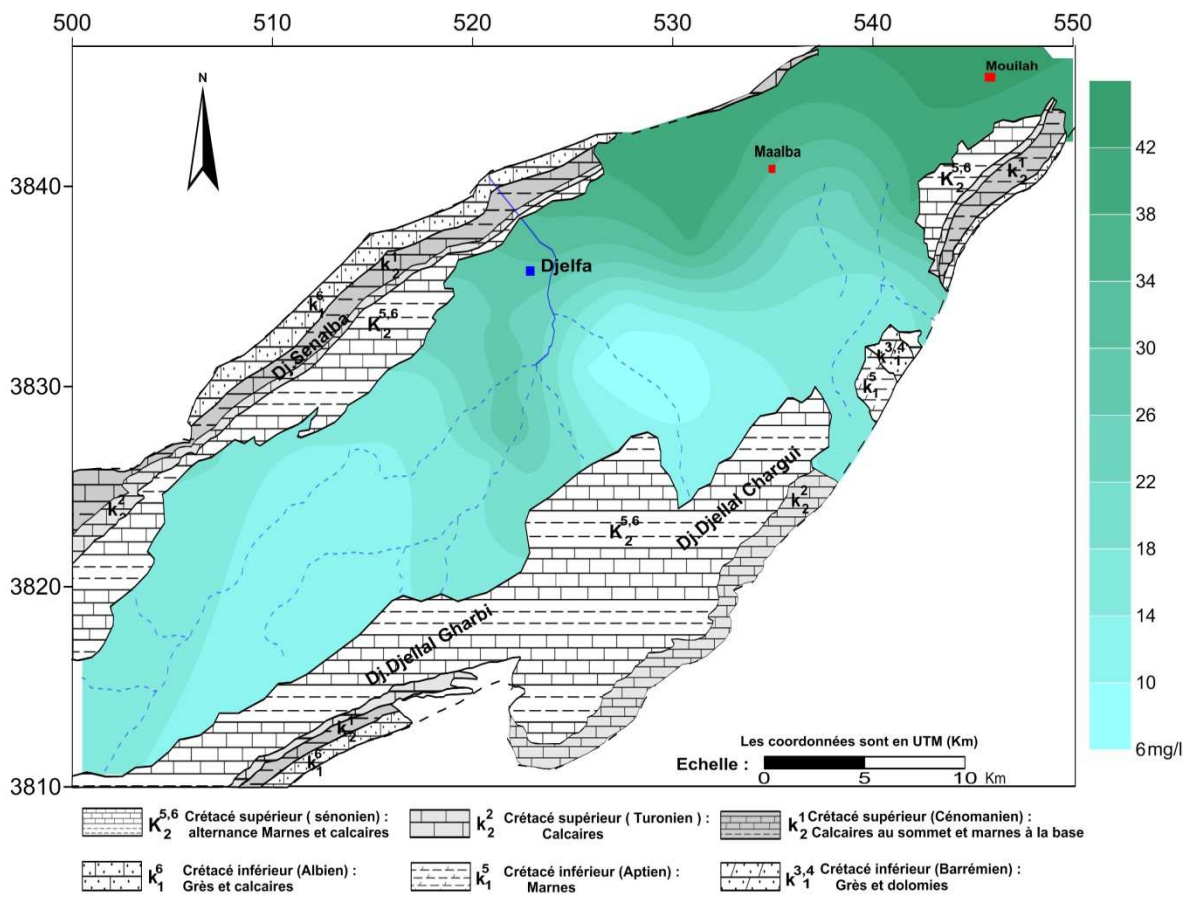


Figure 46 : carte des nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ), Octobre 2014

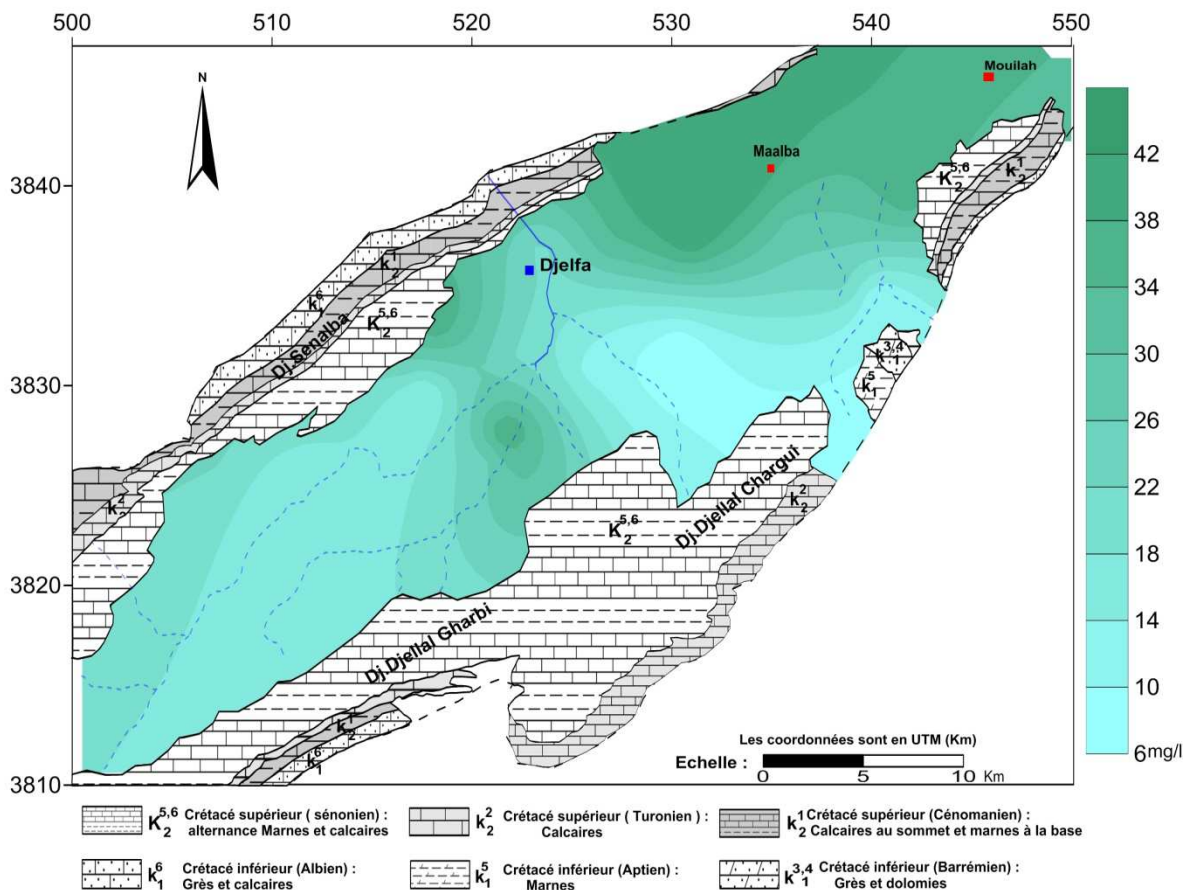


Figure 47 : carte des nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ), Avril 2015

## V.4.2 Classification chimique des eaux :

Plusieurs méthodes ont été définies par divers auteurs pour classer et connaître les différents faciès chimiques des eaux naturelles.

Dans le cadre de notre étude, nous avons utilisé les méthodes principales les plus utilisées: la classification de Stabler, de Schoeller-Berkaloff et celle de Piper. Toutes ces classifications sont basées essentiellement sur la composition chimique.

### V.4.2.1 Classification des eaux d'après Stabler : ( Tab. 14 )

Cette classification permet de connaître les différents faciès chimiques des eaux, où nous avons convertir les masses pondérales de chaque élément en (mé/l), puis on réduit ces derniers en pourcentage (%) du nombre total du (mé/l). On classe par ordre de grandeur, d'abord les anions suivis des cations.

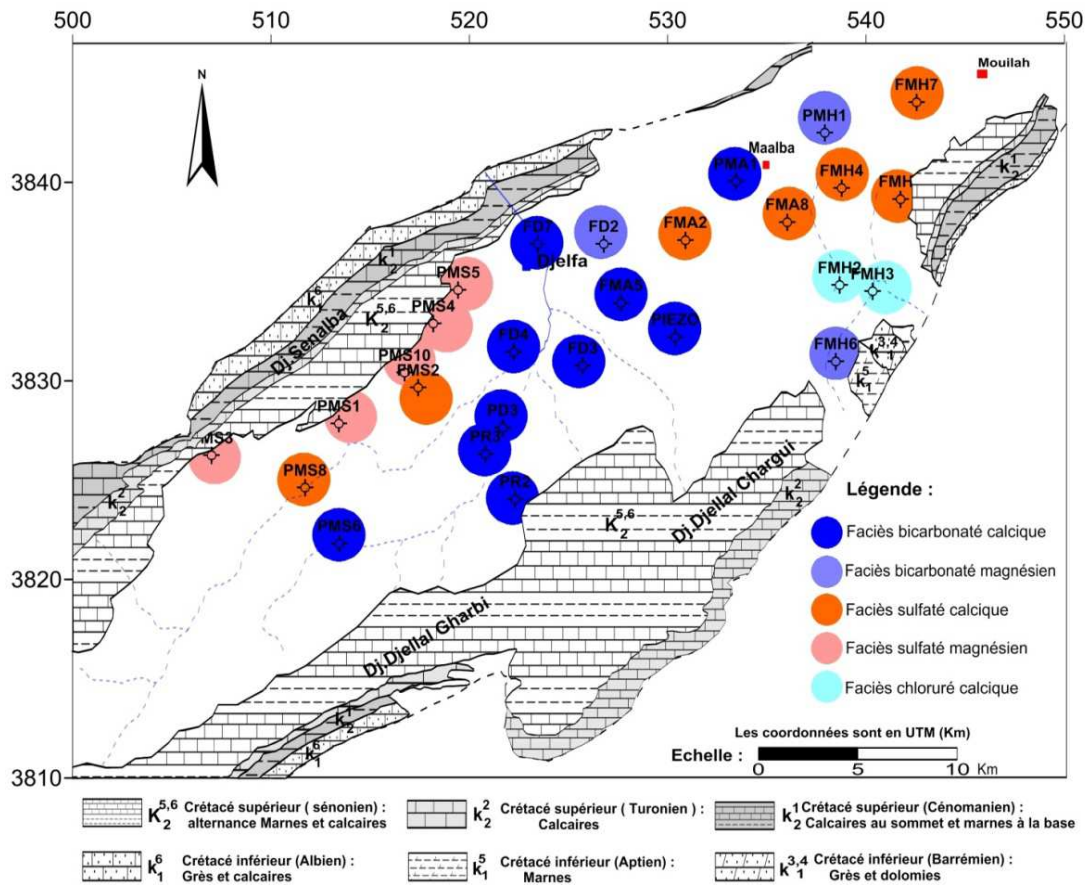
De ce classement, nous définissons les eaux de la nappe du Mio-Plio-Quaternaire en cinq familles (Tab. 14).

	Bicarbonaté calcique %	Bicarbonaté magnésien %	Sulfaté magnésien %	Sulfaté calcique %	Chloruré calcique
La nappe MPQ	37.03	11.11	18.51	25.92	7.40

**Tableau 14 :** Faciès chimiques des eaux souterraines .

On observe qu'il y'a deux facies dominant qui sont le bicarbonaté calcique et sulfaté calcique, ce qui confirme l'influence de la lithologie sur le chimisme des eaux (Fig. 48). On observe que le facies sulfaté magnésienne apparaît au Nord Ouest de la nappe au piémont sud du flanc Nord, les formations marneuses riche en gypse et les calcaires riche en magnésium d'âge Sénonien qui y sont présentes dans la bordure doivent donc être à l'origine de ce faciès, la conductivité des eaux dans cette partie est très élevée dépasse 1600 et qui peut atteinte 5000 dans certains puits. Le facies sulfaté calcique apparaît en aval à l'extrême Nord Est où les affleurements sénonienne dans cette partie doivent être également à l'origine de ce faciès. Les facies bicarbonatés calciques et bicarbonatés magnésiennes se localisent au Sud Ouest, au centre et au Nord Est, donc les formations calcaires sont à l'origine de ces faciès.

Seuls les points FMH2 et FMH3 à l'extrême Sud Est (chlorurée calcique) indiquent un mélange probable d'eau de faciès différents. En effet, ces deux points sont situés au Nord d'une faille E-W traversant une partie du synclinal et aussi à proximité d'un affleurement triasique (voir la carte géologique, chapitre II).



**Figure 48** : carte de répartition des faciès chimiques de la nappe Mio-Plio-Quaternaire du synclinal de Djelfa .

#### V.4.2.2 Classification des eaux d'après Piper :(Fig. 49 et 50 )

Le diagramme de Piper permet de représenter plusieurs échantillons d'eau simultanément. Il est composé de deux triangles, permettant de représenter le faciès cationique et le faciès anionique, et d'un losange synthétisant le faciès global. Le principe consiste à représenter dans chaque triangle équilatéral les quantités en réaction par rapport à la concentration totale des anions et des cations, on obtient ainsi deux points représentatifs indiquant la dominance d'un anion ou d'un cation. La composition de l'eau peut être figurée sur le losange par un point unique correspondant à l'intersection des parallèles depuis ces deux points aux côtés du losange qui représente la nature chimique de l'échantillon.

La représentation des point d'eau sur le diagramme triangulaire de PIPER pour les deux périodes Octobre 2014 et Avril 2015, montre la tendance vers le pole magnésien et le pole calcique dans le sous triangle des cations, alors que les anions montrent une dominance bicarbonatée pour certains points, et des autres points montrent la tendance vers le pole Sulfatée. Le diagramme global fait ressortir les faciès suivants: le sulfatée calcique, sulfatée magnésienne, bicarbonaté calcique et bicarbonatée magnésienne.

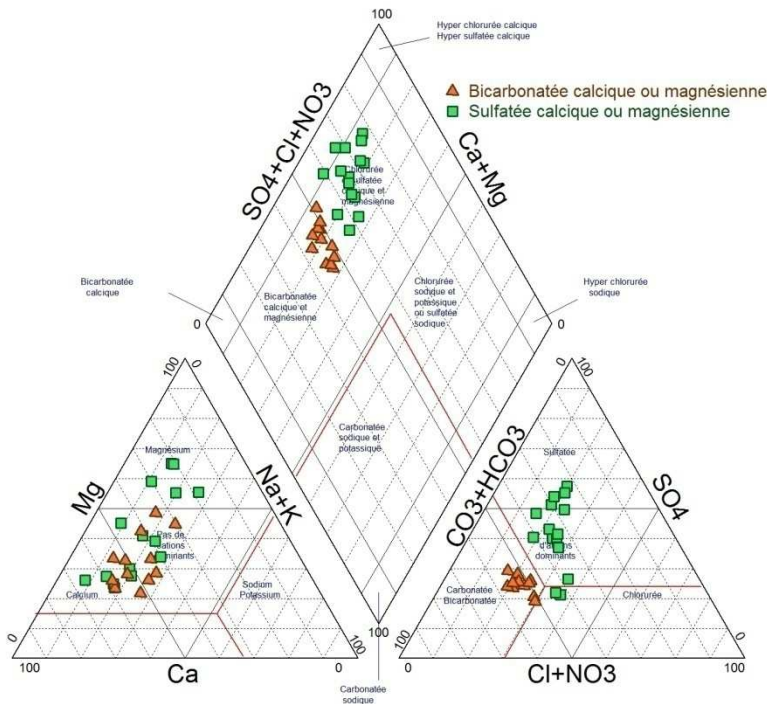


Figure 49 : Diagramme de Piper , campagne Octobre 2014

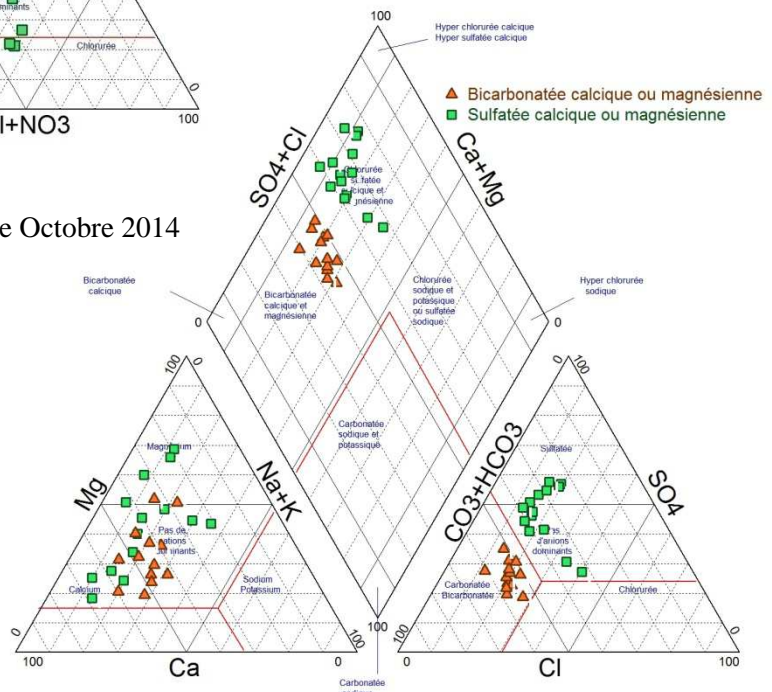


Figure 50 : Diagramme de Piper , campagne Avril 2015

#### V.4.2.3 Classification des eaux d'après Schoeller-Berkaloff :

Le diagramme de Schoëller-Berkaloff permet de représenter le faciès chimique de plusieurs échantillons d'eaux. Chaque échantillon est représenté par une ligne brisée. La concentration de chaque élément chimique est figurée par une ligne verticale en échelle logarithmique. La ligne brisée est formée en reliant tous les points qui représentent les différents éléments chimiques.

Les diagrammes tracés pour les deux périodes Octobre 2014 et Avril 2015 (Fig.51 et 52), confirment la prédominance des faciès bicarbonatée calcique et sulfatée calcique, permettant de dire que la minéralisation des eaux est liée essentiellement aux ions  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  et  $\text{Ca}^{2+}$ . D'une manière générale les eaux sont évoluées, de la 1<sup>ère</sup> au 2<sup>ème</sup> stade d'évolution chimique.

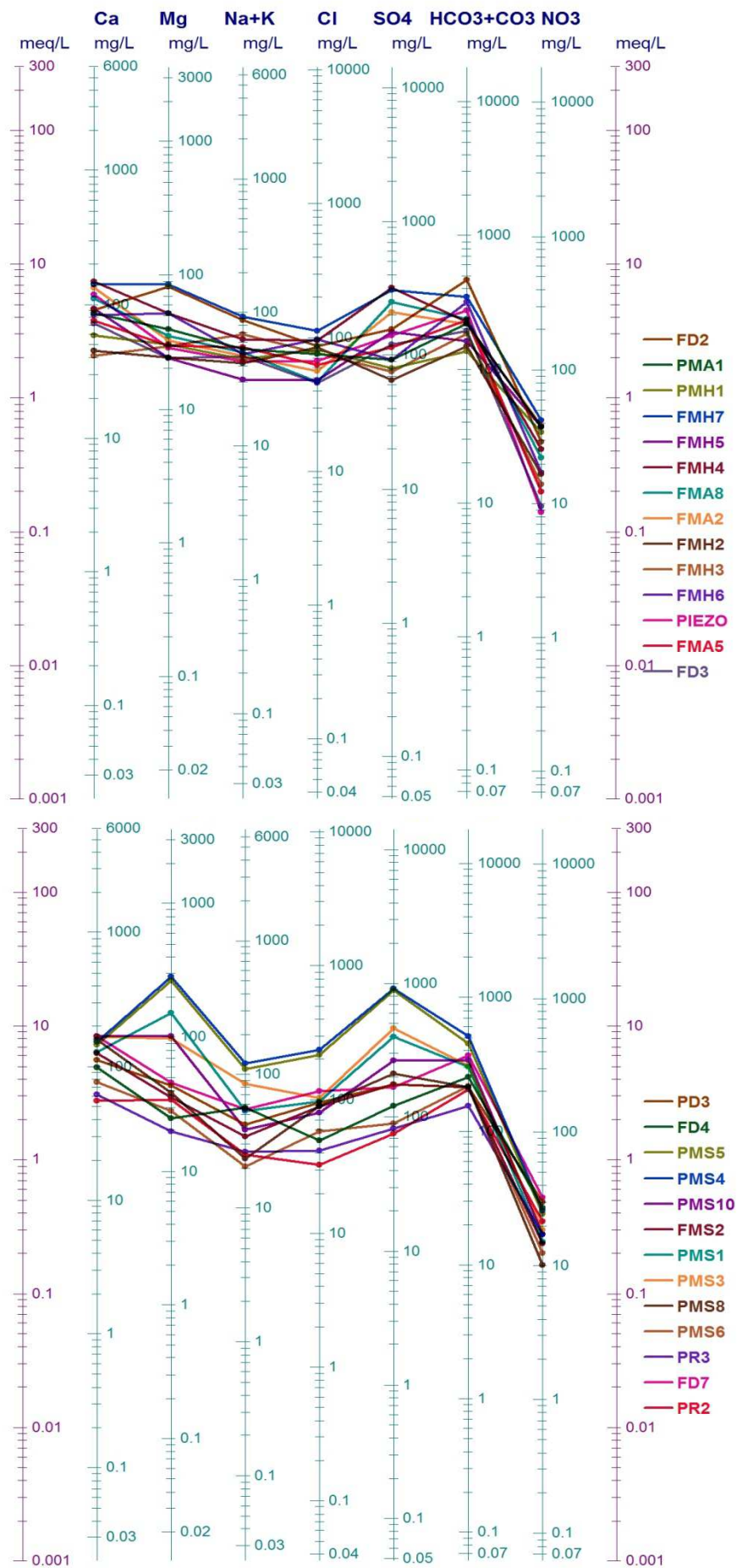


Figure 51 : Diagrammes de Schoeller-Berkaloff , Octobre 2014

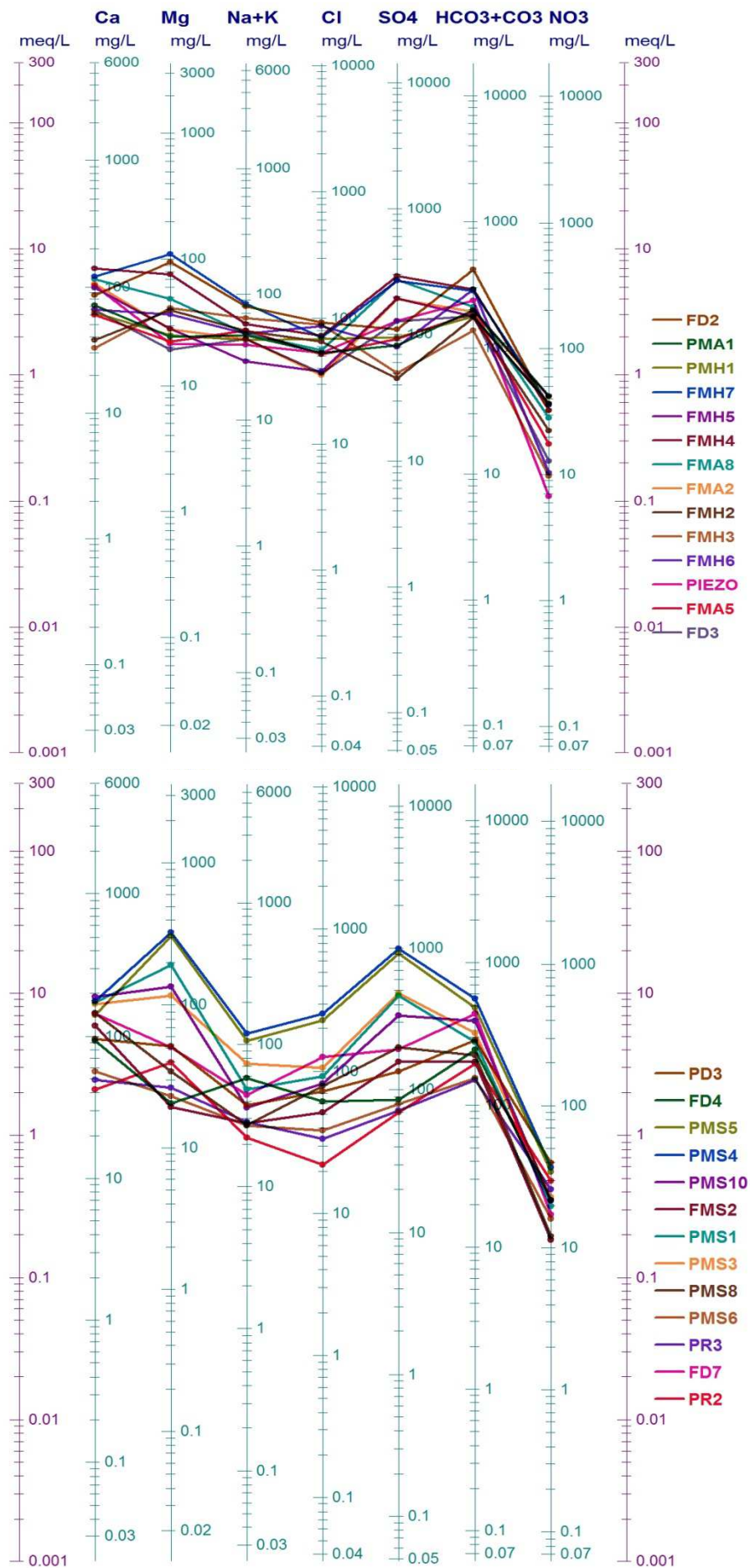


Figure 52 : Diagrammes de Schoeller-Berkaloff , Avril 2015

## V.5 L'ORIGINE DU CHIMISME DES EAUX SOUTERRAINES :

En se basant sur les mesures et les analyses chimiques de toutes les campagnes, on va essayer de déterminer l'origine probable de tous les ions.

### V.5.1 Les éléments $\text{Ca}^{2+} - \text{HCO}_3^- - \text{SO}_4^{2-}$ :

La figure 53 A montre l'évolution du calcium en fonction des bicarbonates. Les points se positionnant sur la droite de pente 1 indiquent l'origine carbonatée des ions du calcium. Les autres points montrent un excès du calcium suite à la dissolution du gypse.

L'analyse de graphe 53 B montre que 85 % de l'ensemble des échantillons ont une origine carbonatée.

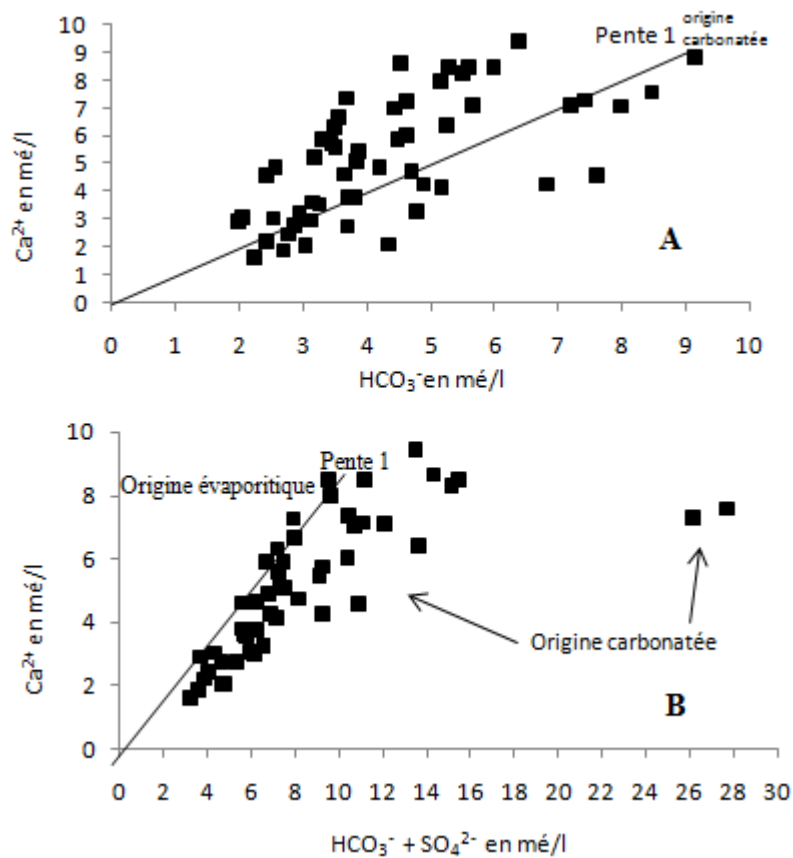


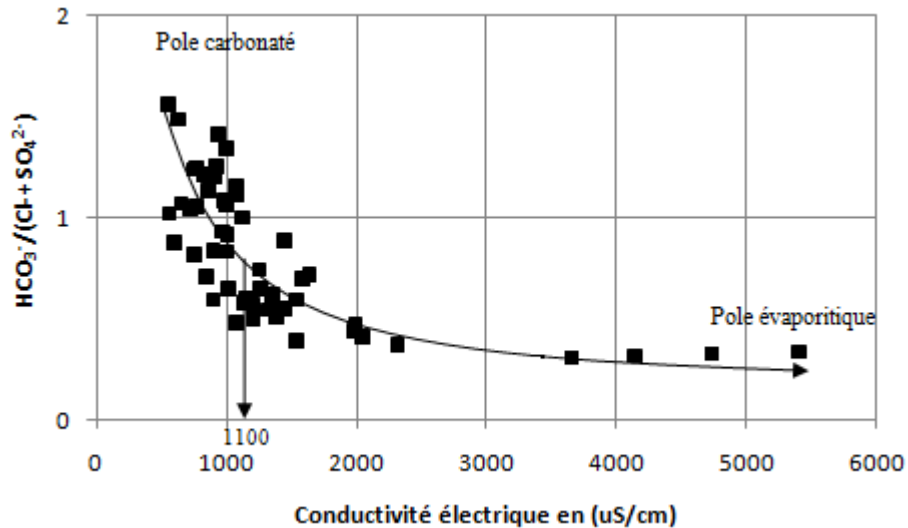
Figure 53: Evolution du calcium

### V.5.2 Rapport $\text{HCO}_3^- / (\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-})$ - Conductivité électrique :

La réalisation de ce diagramme a montré la présence de deux pôles : le premier est carbonaté et représente 35 % des Point d'eau, il se caractérise par une dominance des ions  $\text{HCO}_3^-$  pour des conductivités inférieures à  $1100 \mu\text{S/cm}$ . Le second, gypsifère, représente 65% des Point d'eau, les ions  $\text{Cl}^-$  et  $\text{SO}_4^{2-}$  y dominent. Ce pôle est accompagné d'une conductivité plus importante qui peut atteindre  $5427 \mu\text{S/cm}$  (Fig. 54).

L'examen de la figure confirme donc que la conductivité électrique de l'eau est due aux sulfates et aux chlorures.

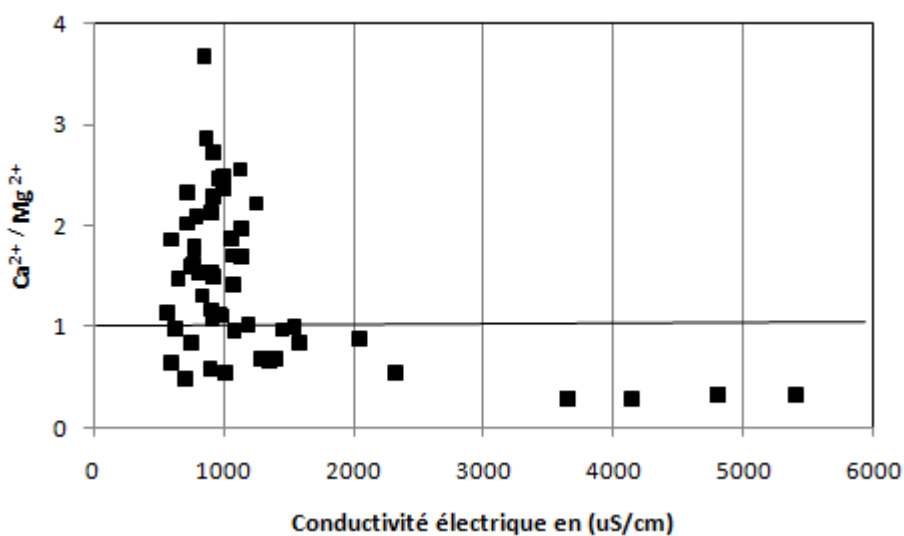




**Figure 54:** Origine de la salinité en fonction des rapports caractéristiques.

### V.5.3 Couple $\text{Ca}^{2+} / \text{Mg}^{2+}$ - Conductivité :

L'influence de ces deux éléments sur la conductivité électrique de l'eau a été vérifiée à l'aide de la figure 55. On note que pour les valeurs de conductivité supérieures à 1200  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , la conductivité n'est influencée que par le magnésium. La représentation graphique montre que 60 % des points analysés présentent un rapport supérieur à 1, indiquant une dominance des ions du calcium par rapport aux ions magnésiens (40 % des points analysés).



**Figure 55:** Relation  $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$  - conductivité.

### V.5.4 Couple $Mg^{2+}$ - $Cl^-$ :

Le graphe 56 montre l'évolution du magnésium en fonction des chlorures. Le graphe montre une dispersion des points indiquant une évolution proportionnelle des deux éléments, cette relation traduit la dissolution d'un chlorure de magnésium d'origine salifère. Des autres points présentent un excès en magnésium qui peut être due à la dissolution des formations carbonatée riche en magnésium (dolomites).

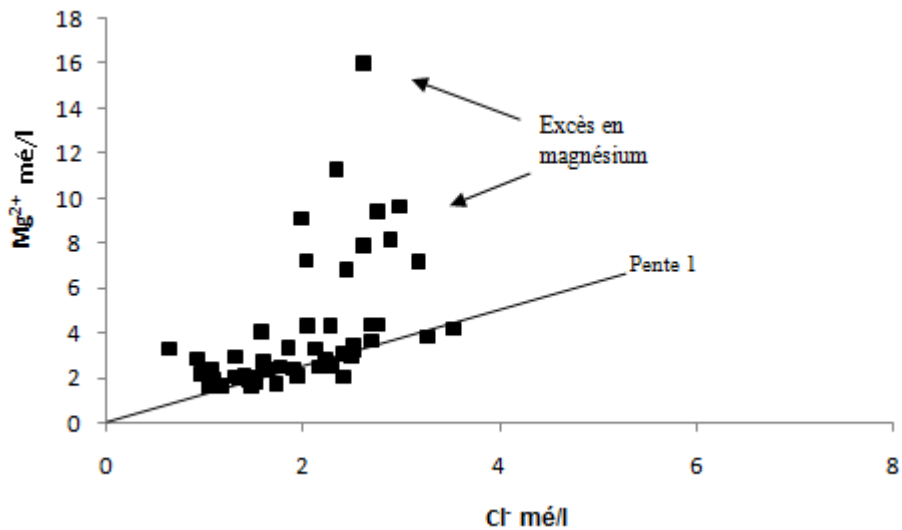


Figure 56: Relation  $Mg^{2+}$  -  $Cl^-$ .

### V.5.5 Couple $Mg^{2+}$ - $SO_4^{2-}$ :

L'examen de cette relation montre une évolution proportionnelle des sulfates et du magnésium (Fig. 57). Cette relation traduit la dissolution d'un sulfate de magnésium d'origine salifère. Cette relation confirme aussi l'existence du faciès sulfaté magnésien.

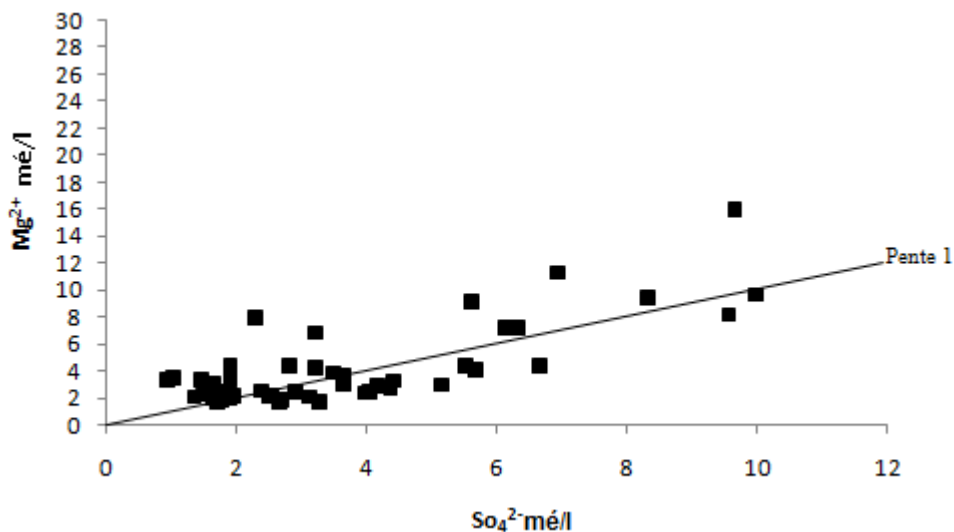


Figure 57: Relation  $Mg^{2+}$  -  $SO_4^{2-}$ .

### V.5.6 Couple $\text{SO}_4^{2-}$ - $\text{Cl}^-$ :

Ces deux ions sont issus de deux formations différentes, le  $\text{SO}_4^{2-}$  provient du gypse et le  $\text{Cl}^-$  provient de la dissolution de l'halite et probablement d'une pollution anthropique. Le graphe 09 montre l'évolution du chlorure en fonction des sulfates. Le graphe montre une dispersion des points indiquant une dominance des ions du Sulfate par rapport aux ions chlorurés. Cela traduit la dominance du faciès Sulfaté sur le faciès chlorure. (Fig. 58).

### V.5.7 Couple $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$ - Conductivité :

Ce rapport permet de déterminer la manière selon laquelle évolue la mise en solution des ions évaporitiques en fonction de la conductivité électrique. D'une autre manière l'influence de ces ions sur la conductivité électrique de l'eau a été vérifiée à l'aide du graphe (Fig. 59). On note que pour les valeurs de conductivité supérieures à 1300  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , la conductivité n'est influencée que par le sulfate.

La représentation graphique montre que 80 % des points analysés présentent un rapport supérieur à 1, indiquant une dominance des ions du gypse par rapport aux ions chlorurés (20 % des points analysés).

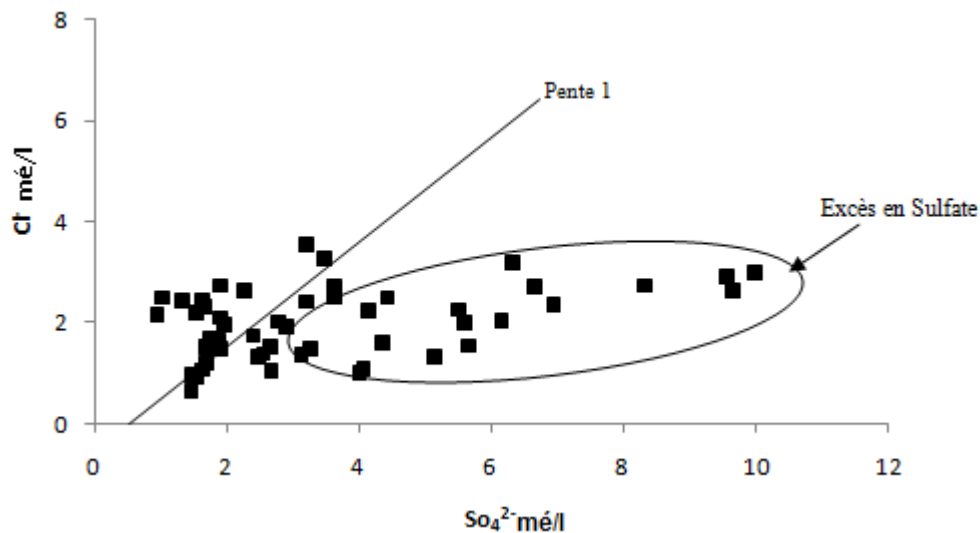


Figure 58: Relation  $\text{SO}_4^{2-}$  -  $\text{Cl}^-$ .

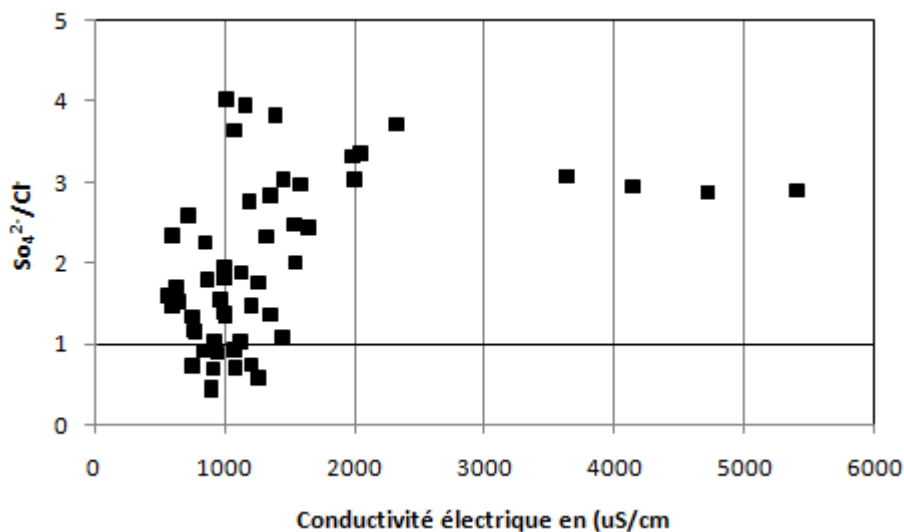


Figure 59: Relation  $\text{SO}_4^{2-} / \text{Cl}^-$  - conductivité.

### V.5.8 Diagramme $\text{Ca}^{2+} / (\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}) - \text{Na}^+ / \text{Cl}^-$ :

Le report de tous les points d'eau sur le diagramme montre que 37 % des points d'eau ont subi un échange de base, 28 % des points présentent un déficit en  $\text{Na}^+$  et en  $\text{Ca}^{2+}$ , et 33 % des points présentent un excès en  $\text{Ca}^{2+}$  par rapport aux ions  $\text{HCO}_3^-$  et  $\text{SO}_4^{2-}$ . L'excès en  $\text{Na}^+$  qui s'accompagne par un déficit en  $\text{Ca}^{2+}$  témoigne la responsabilité de l'échange de base dans l'augmentation des teneurs en  $\text{Na}^+$  (Fig. 60A).

### V.5.9 Diagramme $\text{Mg}^{2+} / (\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}) - \text{Na}^+ / \text{Cl}^-$ :

Le report de tous les points d'eau sur le diagramme montre qu'également 37 % des points d'eau ont subi un échange de base, et 36 % des points présentent un déficit en  $\text{Na}^+$  et en  $\text{Mg}^{2+}$ , et 18 % des points présentent un excès en  $\text{Mg}^{2+}$  par rapport aux ions  $\text{HCO}_3^-$  et  $\text{SO}_4^{2-}$ . L'excès en  $\text{Na}^+$  qui s'accompagne par un déficit en  $\text{Mg}^{2+}$  témoigne la responsabilité de l'échange de base dans l'augmentation des teneurs en  $\text{Na}^+$  (Fig. 60B).

Au cours de leurs trajets souterrains, les eaux entrent en contact avec différentes formations géologiques qui ont la propriété d'échanger leurs ions contre ceux contenus dans les eaux. Ici, l'échange des alcalins  $\text{Na}^+$  et  $\text{K}^+$  de ces formations s'est réalisé contre les alcalino-terreux de l'eau à des proportions égales (37 % des points d'eau analysés).

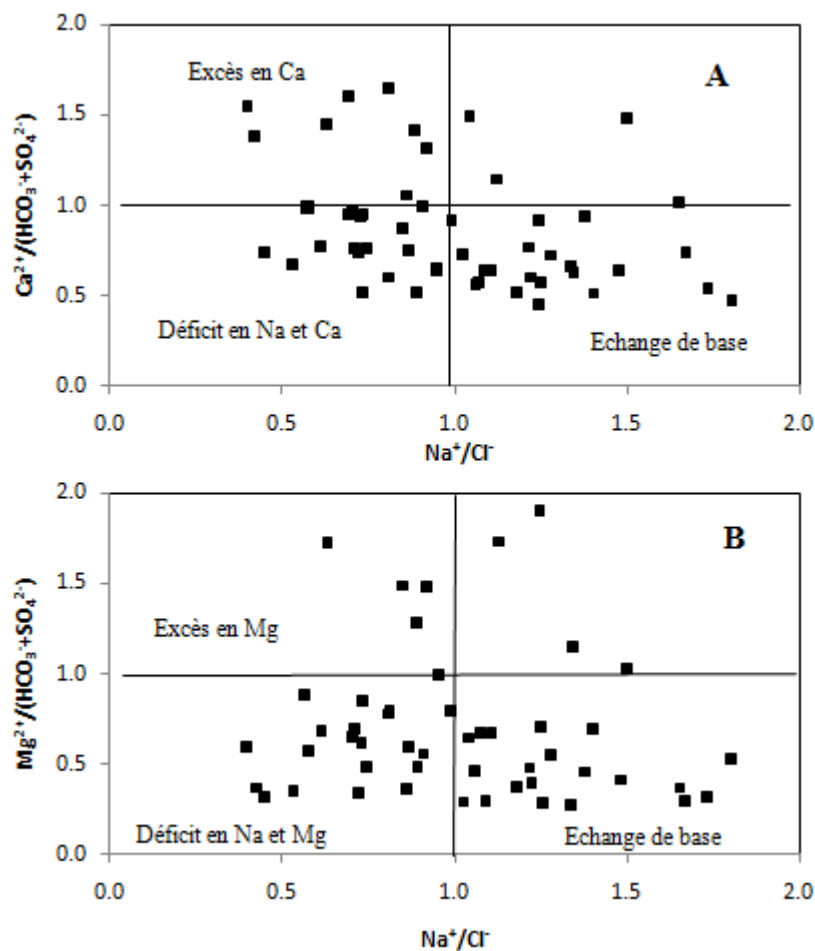


Figure 60: Echange de base.

## V.6 ANALYSE STATISTIQUE (A.C.P) :

Pour comprendre les mécanismes régissant la qualité des eaux de la région, nous avons utilisé l'outil statistique particulièrement l'analyse en composantes principales. Cette dernière met en évidence les liens qui semblent exister entre les éléments chimiques (Travi et Mudry, 1997).

L'étude statistique a englobé les 27 échantillons prélevés dans chaque campagne Octobre 2014 et Avril 2015, Le nombre de variables de base retenues pour l'A.C.P est de 09 qui sont :  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $(\text{Na}^+ + \text{K}^+)$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ , p.H, et la conductivité CN.

Le traitement de nos données par analyse en composantes principales (ACP) a donc été réalisé à l'aide de logiciel IBM SPSS Statistics v21. Cette analyse a été poussée jusqu'à 2 facteurs et 76.86% de la variance ont pu être exprimés.

### V.6.1 Matrice de corrélation :

Selon Mangin A. (1974), pour 27 individus, le coefficient de corrélation critique est de 0,658. L'examen des deux tableaux (15 et 16) montre que, il existe une forte corrélation entre la conductivité électrique et les sulfates, les chlorures, les magnésiums, Ces corrélations montrent que les variations des charges ioniques dissoutes sont entièrement ou en partie liées à des variations de teneurs de ces différents ions. Ceci indique également que ces différents paramètres ont tendance à évoluer concomitamment, par concentration sous l'effet de la lithologie.

Une corrélation faible entre les alcalino-terreux ( $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$ ).  $\text{Ca}^{2+}$  est fortement corrélé avec les ions  $\text{HCO}_3^-$ (0,85), par contre l'ion  $\text{Mg}^{2+}$  est bien corrélé avec les ions  $\text{Cl}^-$ (0,94),  $\text{SO}_4^{2-}$ (0,96)  $\text{Na}^+$ (0,79). Ces derniers sont également bien corrélés entre eux, ces liaisons témoignent de l'influence salifère sur le chimisme de l'eau de la région.

	Ca	Mg	Cl	So4	hco3	No3	Na+K	CN	PH
Ca	1.00								
Mg	0.59	1.00							
Cl	0.53	<b>0.91</b>	1.00						
So4	0.67	<b>0.95</b>	<b>0.88</b>	1.00					
hco3	<b>0.89</b>	0.61	0.64	0.64	1.00				
No3	0.14	0.07	0.12	0.10	0.15	1.00			
Na+K	0.36	<b>0.76</b>	<b>0.79</b>	<b>0.74</b>	0.55	0.27	1.00		
CN	0.64	<b>0.97</b>	<b>0.92</b>	<b>0.98</b>	0.63	0.08	<b>0.77</b>	1.00	
PH	0.09	-0.17	-0.19	-0.09	0.08	-0.16	-0.13	-0.11	1.00

Tableau.15: Matrice de corrélation entre les variables. Octobre 2014

	Ca	Mg	Cl	So4	Hco3	No3	Na+K	CN	PH
Ca	1.00								
Mg	0.60	1.00							
Cl	0.55	<b>0.91</b>	1.00						
So4	0.67	<b>0.95</b>	<b>0.87</b>	1.00					
Hco3	<b>0.80</b>	0.64	0.63	0.65	1.00				
No3	0.10	0.29	0.16	0.29	0.16	1.00			
Na+K	0.32	<b>0.77</b>	<b>0.80</b>	<b>0.71</b>	0.55	0.30	1.00		
CN	0.64	<b>0.95</b>	<b>0.93</b>	<b>0.98</b>	0.65	0.31	<b>0.79</b>	1.00	
PH	-0.01	-0.12	-0.13	-0.16	0.00	-0.17	-0.04	-0.09	1.00

Tableau.16: Matrice de corrélation entre les variables. Avril 2015

## V.6.2 Analyse des plans factoriels F1xF2:

- **Analyse de l'espace des variables**

L'analyse du plan factoriel 1-2 montre que plus de 75% de la variance totale sont exprimés. (Fig. 61). L'examen des deux plans montre une opposition entre les eaux fortement minéralisées et les eaux faiblement minéralisées.

Le facteur F1 représente plus de 61 % de la variance et il est déterminé principalement par toutes les éléments chimiques, et la conductivité électrique CN, donc ce axe peut être interprété comme axe de minéralisation.

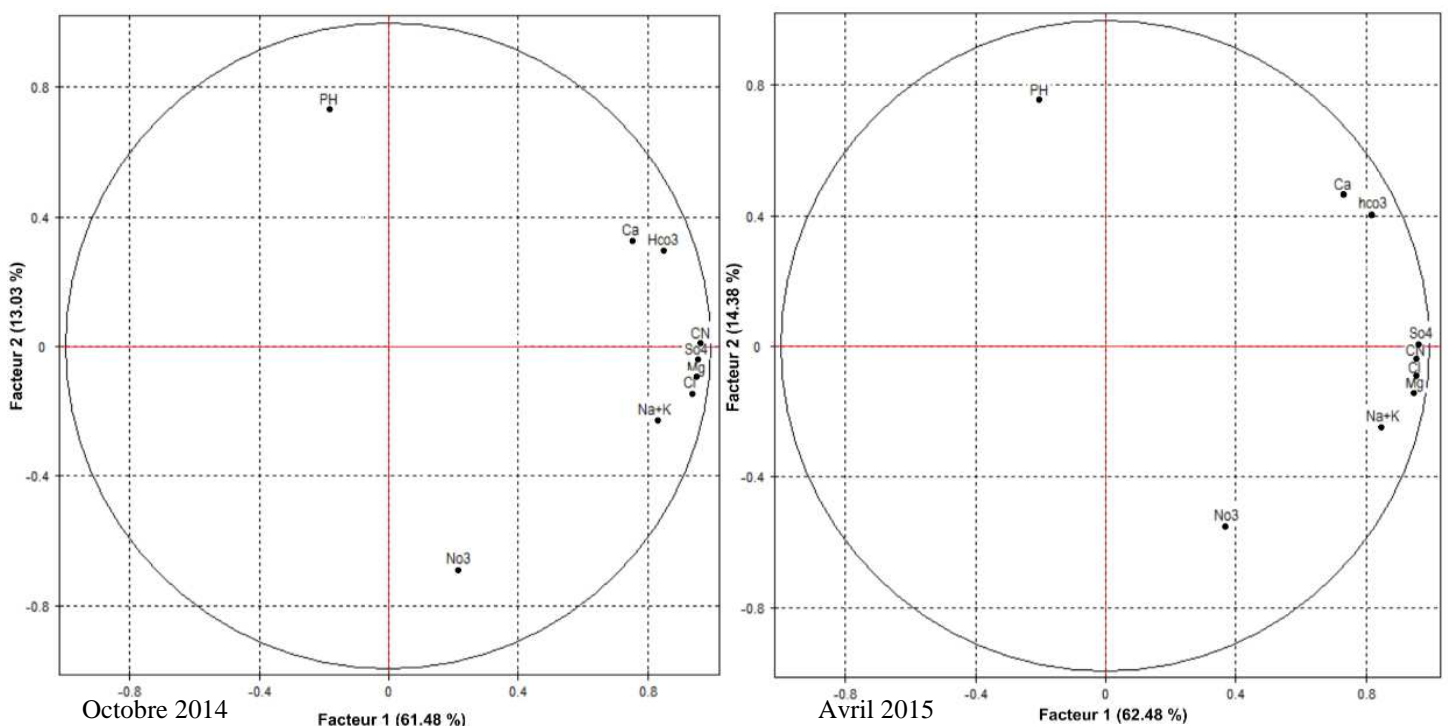
Selon l'axe F2, les eaux riches en nitrates et sodium, accompagnées par les sulfates, les magnésiums, et les chlorures, s'opposent aux eaux riches en Ca et Hco<sub>3</sub>. Cette distribution indique une opposition entre deux minéralisations, l'une liée aux formations carbonatées, cette minéralisation représentée par les eaux les moins chargées, et l'autre liée aux formations salifères, représentée par les eaux les plus chargées.

- **Projection dans l'espace des individus :**

À l'observation de la projection des individus sur le plan factoriel F1×F2 (figure 62), nous pouvons regrouper les points d'eau en deux familles :

- Famille 1 est constituée des eaux fortement minéralisées et ayant des teneurs très élevées en Sulfates (supérieures à la norme OMS), chlorures et magnésiums. Cette famille regroupe 18 points d'eau c'est-à-dire 33,3% du total des points d'eau échantillonnés; Ces points d'eau se localisent au Nord Ouest et à l'extrême Nord Est de la nappe.

- La famille 2 est constituée des eaux faiblement minéralisées et ayant des teneurs élevées en bicarbonates, ces eaux proviennent de 36 points d'eau c'est-à-dire 66,6% du total des points d'eau échantillonnés. Ces points d'eau se localisent au Sud Ouest et au centre de la nappe.



**Figure 61** : Espace des variables du plan factoriel F1×F2

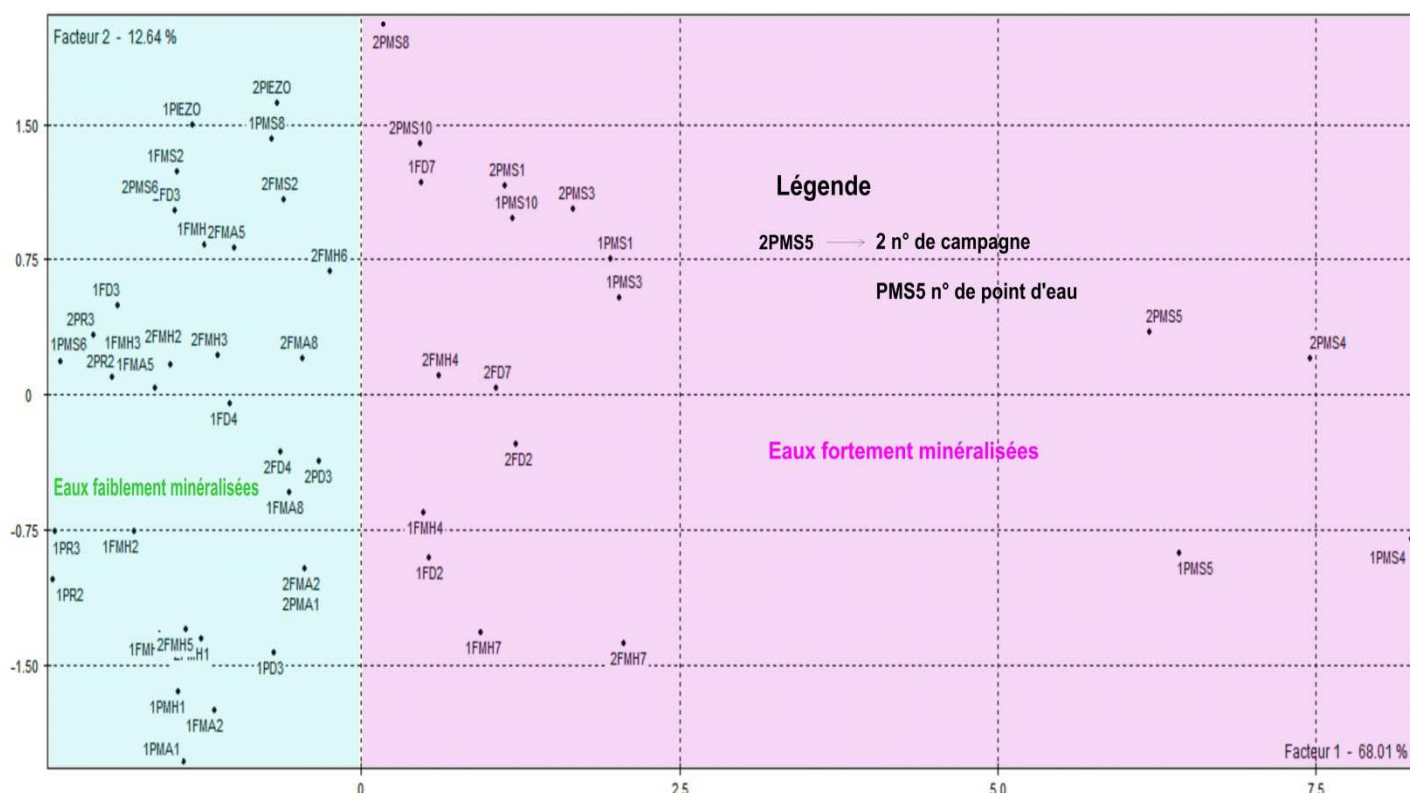


Figure 62: Espace des individus.

## V.7 QUALITE CHIMIQUE DES EAUX :

### V.7.1 Potabilité des eaux :

Pour définir la potabilité des eaux étudiées, nous allons baser sur les normes qui ont été établies par l'Organisation Mondiale de la Santé (O.M.S). (Tab. 17).

Ces normes définissent deux types de concentrations maximales, traduisant les limites de potabilité :

- Une concentration maximale acceptable à partir de laquelle une eau peut provoquer une certaine réticence chez le consommateur.
- Une concentration maximale admissible correspondant à la quantité maximale de substance à tolérer et dont la teneur supérieure peut être dangereuse pour la santé.

Eléments	Concentration maximale acceptable (mg/l)	Concentration maximale admissible (mg/l)
Ca <sup>++</sup>	75	200
Mg <sup>++</sup>	50	150
So <sub>4</sub> <sup>--</sup>	200	400
Cl <sup>-</sup>	200	600
pH	7 à 8,5	6,5 à 9,2

Tableau 17 : Normes applicables aux eaux destinées à l'alimentation humaine d'après l'O.M.S

Eléments	Pourcentage des échantillons d'eau à concentration inférieure à la concentration maximale admissible		Pourcentage des échantillons d'eau à concentration inférieure à la concentration maximale acceptable	
	Octobre 2014	Avril 2015	Octobre 2014	Avril 2015
Ca <sup>++</sup>	29,62	37,04	92,59	92,59
Mg <sup>++</sup>	66,66	62,96	88,88	81,48
So <sub>4</sub> <sup>-</sup>	62,96	66,66	85,18	85,18
Cl <sup>-</sup>	92,59	92,59	100	100
pH	100	100	100	100

**Tableau 18 :** Pourcentage des échantillons d'eau à concentrations inférieures aux normes fixées par l'OMS

Le tableau 18 montre que les normes maximales admissibles sont dépassées par 38 % des échantillons. On note également que 90 % des échantillons ont des concentrations inférieures aux concentrations maximales acceptables.

### V.7.2 Aptitude des eaux à l'irrigation :

La qualité chimique des eaux influe directement sur le rendement des terres agricoles et sur la préservation des sols. A cet effet et étant donné que la zone d'étude est à vocation agricole, une étude chimique des eaux pour l'irrigation est indispensable pour mettre en évidence le danger que peut présenter certains éléments chimiques pour les plantes et pour les sols.

Afin d'apprécier la valeur agricole d'une solution, Wilcox (1948) a proposé le premier diagramme délimitant des classes basées sur la minéralisation totale et le pourcentage du sodium absorbé par l'eau; puis en 1954 le laboratoire de salinité du département de l'agriculture en USA (Richards) a proposé un deuxième diagramme délimitant aussi des classes fondées sur la minéralisation totale et le sodium absorbé par le sol (S.A.R).

#### V.7.2.1 Classification des eaux par la méthode de Richards :

Cette classification a été proposée par Richards. Elle est très utile et fiable pour caractériser une eau d'irrigation. Une eau chargée en sels peut provoquer un risque pour l'irrigation. Ce risque est déterminé à l'aide de la valeur du sodium absorbable (Sodium Absorption Ratio, SAR). Ce paramètre comme étant une détermination du pouvoir d'échange des ions Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, par le Na<sup>+</sup> dans les argiles et les colloïdes. (Tab. 19a et 19b, en annexe).

Le taux de sodium absorbé par le sol (S.A.R) est donné par la formule suivante :

$$S.A.R = \frac{rNa^+}{\sqrt{\frac{rCa^{2+} + rMg^{2+}}{2}}}$$



Cette classification se fait donc, en reportant sur le diagramme les conductivités électriques en ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) à 20 °C, en fonction du taux d'absorption du sodium (S.A.R).

La classification de Richards basée sur la conductivité et le S.A.R, permet de définir plusieurs classes d'eau, présentant chacune un danger de salinisation et d'alcalinisation variable (Tab.21).

Degré	Qualité	Classe	L'état d'utilisation
1 <sup>ère</sup>	Excellente	C <sub>1</sub> S <sub>1</sub>	Eaux utilisables sans danger pour l'irrigation pour la plus part des cultures, sur la plus part des sols.
2 <sup>ème</sup>	Bonne	C <sub>2</sub> S <sub>1</sub> C <sub>1</sub> S <sub>2</sub>	En général, eau pouvant être utilisée sans contrôle en particulier pour l'irrigation des plantes moyennement tolérantes aux sels sur sol.
3 <sup>ème</sup>	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>	En général, eau convenant à l'irrigation des cultures tolérantes aux sels sur sol bien drainés. L'évolution de la salinité doit cependant être contrôlée.
4 <sup>ème</sup>	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 pouvant convenir à l'irrigation de certaines espèces bien tolérantes aux sels sur sol et bien drainées.
5 <sup>ème</sup>	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>	Eau ne convenant pas généralement à l'irrigation mais pouvant être utilisée sous certaines conditions : sol très perméable, bien lessivé, plantes tolérantes aux sels.

**Tableau 19** : Classification des eaux d'irrigation en fonction de la C.E et du S.A.R (Méthode de Richards)

La représentation des échantillons analysés sur le diagramme de Richards (Fig. 63 et 64), montre que les eaux de la nappe du Mio-Plio-Quaternaire appartiennent aux 3 classes : C<sub>2</sub>S<sub>1</sub>, C<sub>3</sub>S<sub>1</sub>, C<sub>4</sub>S<sub>1</sub>, mais la plupart des points d'eaux 81.48 % appartiennent au classe C<sub>3</sub>S<sub>1</sub>. Elles se manifestent par un faible danger d'alcalinisation et par une salinisation moyenne. En général ces eaux sont convenables à l'irrigation de culture tolérante aux sels sur des sols bien drainés, l'évolution de la salinité doit être contrôlée. La salinisation est causée par la dissolution des gypses et la forte évaporation des eaux, due au climat semi-aride de la région.

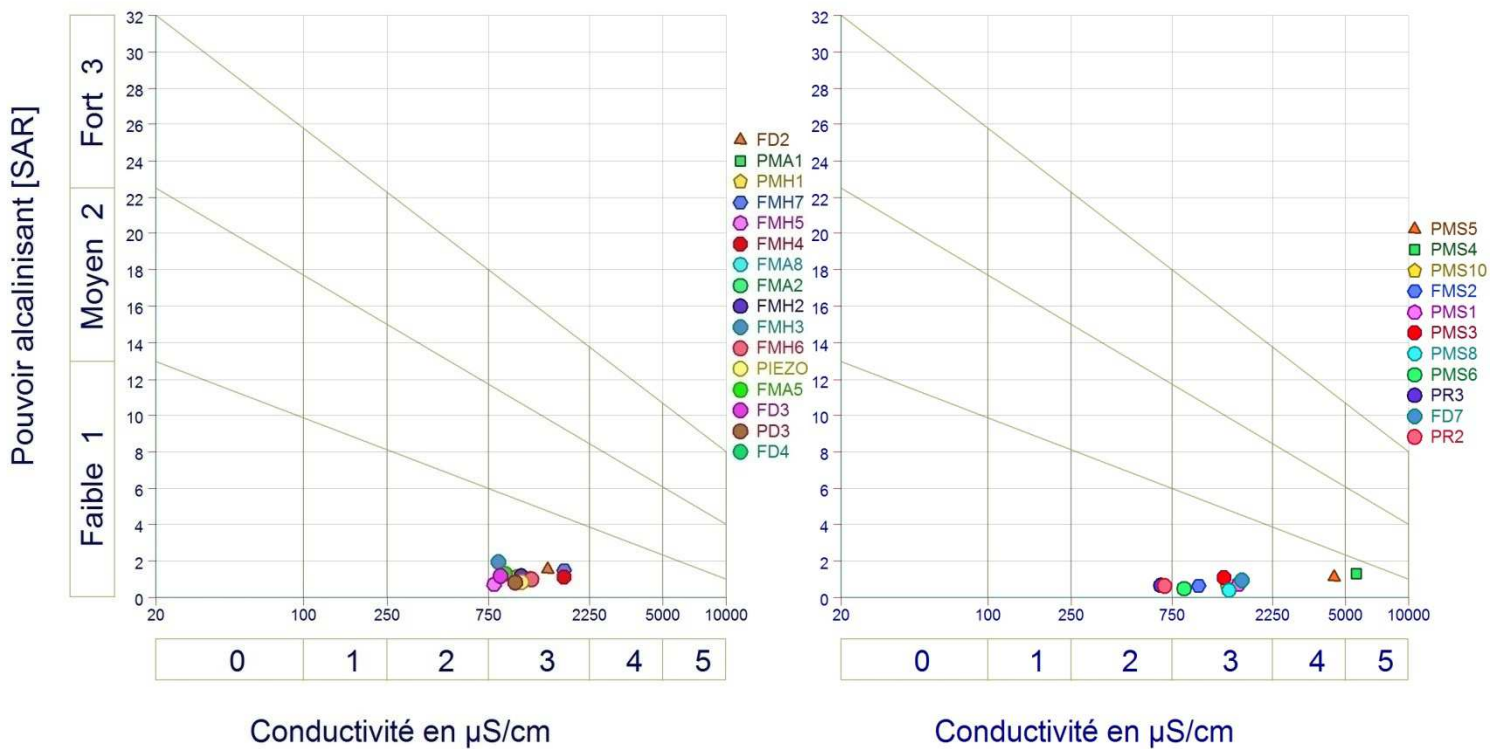


Figure 63 : Diagramme de classification des eaux d'irrigation (méthode de Richards) , Octobre 2014

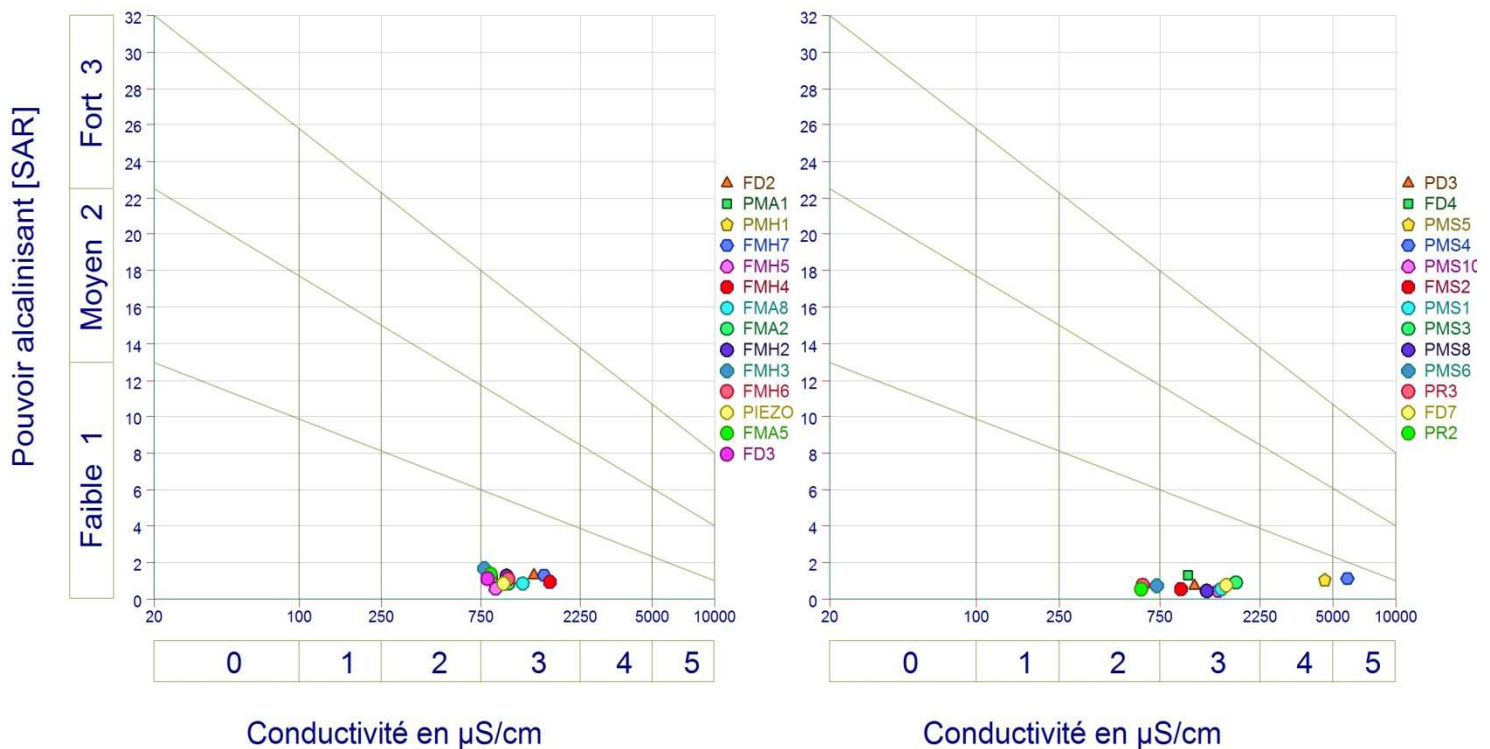


Figure 64 : Diagramme de classification des eaux d'irrigation (méthode de Richards) , Avril 2015

### V.7.2.2 Classification des eaux par la méthode de Wilcox :

Généralement, les plantes supportent mal les sols saturés en sodium. La classification de Wilcox fondée sur la conductivité électrique et la teneur en sodium dans l'eau exprimée en pourcentage. La représentation des différents échantillons sur ce diagramme permet la caractérisation des eaux pour leur aptitude à l'irrigation. (Fig. 65)

Le pourcentage du sodium est défini par la formule suivante :

$$\% \text{Na}^+ = \frac{\text{Na}^+}{\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++} + \text{Na}^+ + \text{K}^+} \times 100 \quad , \text{ tous les ions sont exprimés en méq/l}$$

La représentation des différents échantillons analysés sur le diagramme de Wilcox montre que les eaux de la nappe du Mio-Plio-Quaternaire appartiennent aux quatre classes; excellentes, bonnes médiocres et mauvaise. La classe excellent représentée par 11.11 % des points d'eaux, et la classe bonne représentée par la plupart des points d'eaux 74.08 % correspond à celles 'admissible' dans la méthode de Richards, la classe médiocre et mauvaise 14.81 % des points d'eaux.

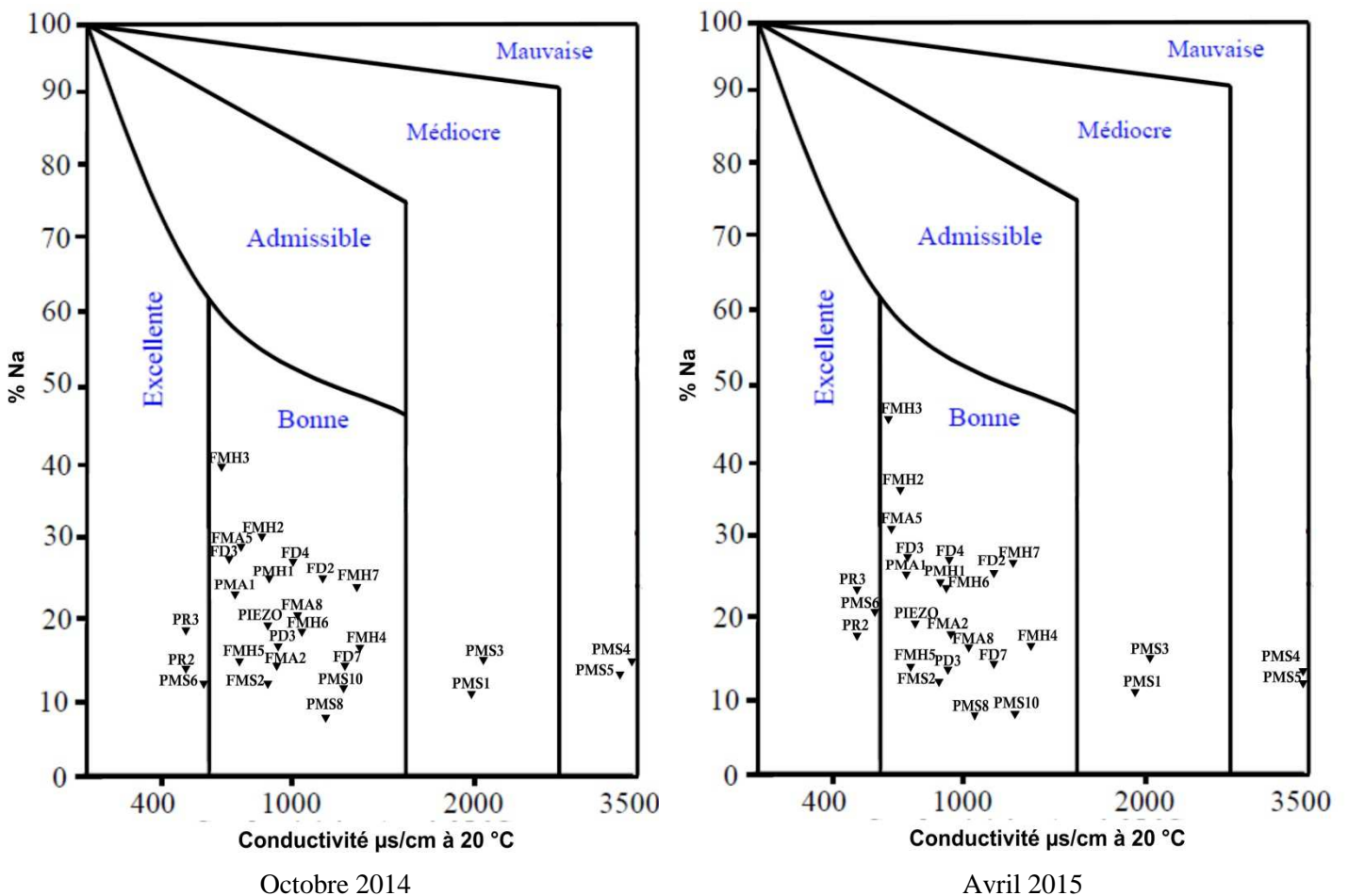


Figure 65 : Diagramme de classification des eaux d'irrigation (méthode de Wilcox )

## V.8 CONCLUSION:

L'étude hydrochimique de la nappe du Mio-Plio-Quaternaire du synclinal de Djelfa permet de dire que :

-La majorité des échantillons analysés présentent des valeurs de conductivité moyenne et admissibles, une moyenne de l'ordre de 900  $\mu\text{s}/\text{cm}$ , à l'exception de deux zones, l'extrême Nord Est et la zone Nord Ouest où la conductivité dépasse le 1600  $\mu\text{s}/\text{cm}$ .

-L'interprétation des cartes hydrochimiques, montre une forte concentration en éléments chimiques dans la partie Nord-Ouest de la nappe, c'est-à-dire au piémont Sud du flanc Nord du synclinal (Djebel Senalba), donc l'influence de la lithologie des formations sur l'acquisition de la minéralisation et sur les types de faciès. Les failles peut joue également un rôle intermédiaire dans la remonté des eaux profondes avec un lessivage des formations triasiques qui augmente la minéralisation des eaux dans cette partie.

-L'interprétation des classifications de Stabler, Schoeller-Berkaloff et Piper, a montré que les faciès chimiques dominants sont celles bicarbonatés calciques et sulfatés calciques. En effet, les formations carbonatées et les formations marneuses du Crétacé supérieur bordant la nappe sont à l'origine de ces faciès qui sont les prédominants sur l'ensemble de la nappe, confirmant ainsi l'alimentation latérale de la nappe, à partir les bordures du synclinal, comme nous l'a montré la carte piézométrique (fig. 22).

-Les différentes relations entre les éléments chimique avec la conductivité des eaux, a montré que l'augmentation de la conductivité des eaux souterraines due essentiellement aux trois éléments chimique, le Sulfate, le magnésium et le chlorure. L'analyse en composante principale a confirmé cette tendance, où les eaux les moins chargées au Sud Ouest et au centre de la nappe caractérisée par un faciès bicarbonatés calciques avec des valeurs du conductivité inférieurs 1100  $\mu\text{s}/\text{cm}$ , par contre les eaux les plus chargées au Nord Ouest et à l'extrême Nord Est de la nappe caractérisée par les faciès; sulfaté magnésien et sulfaté calcique avec des conductivité dépassent 1600  $\mu\text{s}/\text{cm}$  . Deux point au Sud Est présentent un faciès chlorurée calcique indiquent un mélange probable d'eau de faciès différents. En effet, ces deux points sont situés au Nord d'une faille E-W traversant une partie du synclinal et aussi à proximité d'un affleurement triasique (voir la carte géologique, chapitre II).

-L'utilisation de ces eaux à l'irrigation, sont convenable à l'irrigation de culture tolérante aux sels sur des sols bien drainés, l'évolution de la salinité doit être contrôlée.

**CONCLUSIONS GENERALES  
ET  
RECOMMANDATIONS**

## CONCLUSION GENERALE :

La présente étude, qui a porté sur la nappe Mio-Plio-Quaternaire du synclinal de Djelfa, (situé dans le centre Nord de l'Algérie), a abouti aux conclusions suivantes :

-L'étude géologique et géophysique concernant le synclinal a montré que les formations de bordures sont d'âge Crétacé (du Barrémien au Sénonien) composées essentiellement de calcaires, marnes, grès, argiles. Les formations d'âge Mio-Plio-Quaternaire occupent la totalité de la dépression, elles sont hétérogènes, composées de croutes calcaires, argiles, marnes, grès, graviers, conglomérats, sables et de limons. Les résultats de la prospection électrique confirment cette hétérogénéité, où ces formations offrent une fourchette très large de résistivité variée entre 10 à 600Ω.m.

-L'existence des deux types de tectonique, fragile et cassante, cette dernière est plus fréquente sur le flanc Nord du synclinal.

-La région d'étude possède un climat continental de type semi-aride à hiver très froid, et un été chaud et sec. Les précipitations durant la période (1975-2014) sont relativement peu importantes et elles sont de l'ordre de 334,14 mm en moyenne annuelle, Janvier est le mois le plus pluvieux (35.01 mm) et Juillet plus sec (17,79mm); la température moyenne annuelle est de 14,60 °C,

-Le calcul du bilan hydrologique par la méthode de Thornthwaite a révélé que l'évapotranspiration réelle moyenne est de l'ordre de 310.23 mm, mobilisant 92,84 % des précipitations. Le déficit agricole est de l'ordre de 500.45 mm pour la station de Djelfa. Le ruissellement ne bénéficie également que de 5,65% de ces précipitations. Cette valeur est faible, mais vu la topographie (peu accidentée, mis à part les deux flancs), l'infiltration ne présente que 1,50 % de ces dernières mais il faut tenir compte également des infiltrations engendrées par la fonte des neiges. Notons que une partie du ruissellement va rejoindre le flux infiltré après un certain temps de ruissellement (régime endoreïque ou areïque).

-La nappe du Mio-Plio-Quaternaire a une épaisseur moyenne de 250 m va bénéficier de 2 sources d'alimentation: la première, c'est la précipitation; la deuxième source d'alimentation se fait soit par le ruissellement direct soit par l'infiltration par l'intermédiaire des failles à partir des deux flancs du synclinal.

-les cartes piézométriques des deux périodes d'observation Octobre 2014 et Avril 2015 ont montré la même morphologie piézométrique ce qui traduit le même régime d'écoulement avec un écoulement qui s'effectue d'une manière générale suivant l'axe du synclinal, du SW vers le NE .

-Les exutoires de la nappe sont: l'oued principal Djelfa-Mellah, une axe de drainage de direction Ouest-Est au niveau de la région de Maalba, les forages et les puits.

-Les valeurs de la perméabilité et de la transmissivité sont très variables d'un endroit à l'autre du synclinal, où les données des deux forages ( maalba F5 au Nord Est et 5 Juillet au Nord ) nous donnent des valeurs de transmissivité qui varie entre  $1,31.10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s et  $2,6.10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s, avec des valeurs de perméabilité varie entre  $0,66.10^{-6}$  m/s et  $0,87.10^{-5}$  m/s.

-La cartographie chimique montre très clairement l'importance des concentrations des éléments chimiques dans la partie Nord-Ouest au piémont sud du flanc Nord de synclinal, surtout pour les deux points d'eau PMS4 et PMS5 (Fig. 31a, 35a, 41a, 43a, en annexe), avec des valeurs de conductivité dépassent 4000 pendant les deux périodes d'observation, Ces fortes concentrations peuvent être expliquées par la dissolution des formations de la bordure d'âge sénonien, mais nous pensons également que ces points d'eau peuvent procéder à un dispositif hydrogéologique différent

du cas la plaine, en relation avec une circulation profonde des eaux, et une remonté par l'intermédiaire des failles avec un lessivage des formations triasiques. Il faut signaler que la bordure Nord-Ouest du synclinal il est très plein des failles tectoniques (voir la carte géologique et schéma tectonique, chapitre II).

-Les faciès chimiques dominants sont celles bicarbonatés calciques et sulfatés calciques. En effet, les formations carbonatées et les formations marneuses du Crétacé supérieur bordant la nappe sont à l'origine de ces faciès qui sont les prédominants sur l'ensemble de la nappe, confirmant ainsi l'alimentation latérale de la nappe, à partir des bordures du synclinal.

-L'analyse statistique a montré que l'augmentation de la conductivité des eaux est due essentiellement aux trois éléments le Sulfate, le magnésium et le chlorure où les eaux les moins chargées au Sud Ouest et au centre de la nappe caractérisée par un faciès bicarbonatés calciques avec des valeurs de conductivité inférieures 1100  $\mu\text{s}/\text{cm}$ , et les eaux les plus chargées au Nord Ouest et à l'extrême Nord Est de la nappe caractérisée par les faciès ; sulfaté magnésien et sulfaté calcique avec des conductivité dépassent 1600  $\mu\text{s}/\text{cm}$ .

-D'une manière générale, y a pas un changement entre les faciès chimiques des eaux des deux compagnies. L'utilisation de ces eaux à l'irrigation, sont convenable pour des cultures tolérantes aux sels sur des sols bien drainés, l'évolution de la salinité doit être contrôlée.

## **Recommandations :**

Au terme de cette étude, nous recommandons :

-D'installer des stations Hydrométriques fonctionnelles en aval sur l'oued Djelfa Mellah, pour mesurer les débits liquides nécessaires à la détermination des paramètres du bilan hydrologique.

-D'installer des piézomètres à proximité des forages pour pouvoir estimer le coefficient d'emmagasinement des formations captées.

-Contrôler l'utilisation des engrais pour éviter une éventuelle pollution par les nitrates.

-La réflexion sur l'établissement des cartes de vulnérabilité à la pollution vue la sensibilité de l'aquifère de la région étudiée.

**REFERENCES**  
**BIBLIOGRAPHIQUES**



- AGENCE NATIONALE DES RESSOURCES HYDRAULIQUES (1999) :** Synthèse des études et exploitation des données existantes sur le synclinal de Djelfa. 50 pages.
- AITAISSA B , HAMIMI A . (2002) :** Contribution à l'étude hydrogéologique du synclinal d'Ain El Ibel-Sidi Makhlouf ( Wilaya de Djelfa ) . Mémoire d'ingénieur. USTHB.103 pages.
- AREZKI S , AMMAR G . (1982) :** Etude hydrogéologique du flanc Nord du synclinal de Djelfa. Mémoire d'ingénieur . DRE. Djelfa . 177 pages.
- BAALI F. (2007) :** Contribution à l'étude hydrogéologique, hydrochimique et Vulnérabilité d'un système aquifère karstique en zone semi aride. Cas du plateau de Chéria N. E. Algérien. Thèse de doctorat . Univ . Annaba .121 pages.
- BELKHIRI L. (2005) :** Etude hydrogéologique et problème de la qualité des eaux souterraines de la plaine de Ain Azel -Sétif- Est Algérien. Mémoire de magister. Univ. Batna.168 pages.
- BENDJEDOU M , RAHMANI B. (2013) :** Etude hydrogéologique du synclinal de Djelfa . Mémoire d'ingénieur. Univ. Constantine. 199 pages.
- BENSAAD S , SAARI R . (1997) :** Contribution à l'étude hydrogéologique du synclinal de Diar Ech Chioukh (Wilaya de Djelfa ) . Mémoire d'ingénieur . USTHB . 170 pages .
- BOUTELDJAOUI F, BESSENASSE M, GUENDOUIZ A. (2011) :** Etude comparative des différentes méthodes d'estimation de l'évapotranspiration en zone semi-aride (cas de la région de Djelfa) . Revue Nature & Technologie , page 109-116 .
- CASTANY G. (1963) :** Traité pratique des eaux souterraines. Dunod Edit. Paris, 641 pages.
- CASTANY G , MARGAT (1977) :** Dictionnaire français d'Hydrogéologie. Bur. Rech.Géol. Minière, 249 pages.
- CASTANY G. (1982) :** Principes et méthodes de l'Hydrogéologie. Dunod Edit. Paris,334pages.
- CHENAFI A (2013) :** Cartographie et protection qualitative des eaux souterraines en zone aride , cas de Milok – Metlili , Atlas Saharien Central ( Laghouat – Algérie ) . Mémoire de magister Univ . Oran .186 pages .
- CHIBANE B , BOUTALEB A , LACROIX M . (2010) :** Etude hydrochimique et approche isotopique en région semi aride : cas du synclinal de Djelfa . European Journal of Scientific Research.ISSN1450-216X Vol.45No.2(2010). pages 270-290 .
- COMPAGNIE GENERALE DE GEOPHYSIQUE. (1974) :** Etude par prospection électrique sur la partie Sud Ouest du bassin de Djelfa – Ain Takersane . 23 pages .
- CORNET G . (1952) :** Etude hydrogéologique du bassin fermé des Zahrez Gharbi et Chergui XIX° congr .Géol . Inst . Alger , la géologie et les problème de l'eau en Algérie, t.2 . données sur l'hydrogéologie, Alger . 20 pages ,
- DE MARSILY, G. (1980) :** Cours d'hydrogéologie, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris. Centre d'infomation géologique, Fontainebleau.

**DEBIECHE T.H.(2002)** : Evolution 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 Université de Franche-Comté .199 pages

**DIRECTION DES RESSOURCES EN EAU** : Données des essais de pompage , et rapports de fins sondages .

**DUBREUIL P . (1974)** : Initiation à l'analyse hydrogéologique . Ed. Masson , Paris , ORSTOM .

**GILLI E, MANGAN CH, MUDRU J. (2004)** : Hydrogéologie. Objets, méthodes, applications. Dunod, Paris, 303 pages.

**GOUAIDIA L.(2008)** : Influence de la lithologie et des conditions climatique sur la variation des paramètres physico-chimique des eaux d'une nappe en zone semi aride , cas de la nappe de meskiana Nord-Est Algérien . Thèse de doctorat . Univ . Annaba .131 pages .

**HAMZAOUI AZAZA F , BOUHLILA R , GUEDDARI M. (2012)** : Caractérisation de la minéralisation des eaux de la nappe des grès du Trias (Sud-Est Tunisien) par les méthodes géochimiques et statistiques . Revue Geo-Eco-Trop. Page 49-62

**HASSANI M , GOURIDA D.(2012)** :Evaluation de vulnérabilité au risque inondation et ses effets sur l'aménagement de l'espace (cas de la ville de Djelfa). Mémoire d'ingénieur. Univ. Djelfa. 95 pages.

**LAMBIERD C.(1999)** : Mesures BTS et interpolation ,Guide d'utilisation de Variowin et Surfer. Université de Laussane ,48 pages

**MANGIN A. (1974)** : Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques. Concepts méthodologiques adoptés. Systèmes karstiques étudiés , Ann. Spéléol., , pp. 294, 495, et 601.

**MEHAIGUENE M. (2001)** : Bilan hydrologique et ressources en eau de surface du bassin Cheliff-Zahrez . Mémoire de magister . U.S.T.H.B .140 pages

**MAOUI A. (2007)** : Evolution et origine du chimisme des eaux de l'aquifère superficiel de Zaâfrane: région de la steppe Sud Algéroise .Etude de la variation spatiale de la salinité et ses risques sur les sols et la végétation. Thèse de doctorat. Univ. Annaba .249 pages.

**MAOUIA ,KHERICI N. (2006)** : Contribution à l'étude du processus de salinité des eaux de l'aquifère superficiel de Zâafrane ,Sud Algérien , application de la thermodynamique , Revue Physical & chemical news Vol.32 .pages 129-136.

**MARIANI A . (1966)** : Etude hydrogéologique en vue de l'A.E.P de la ville de Djelfa (ANRH). Thèse de doctorat .U.S.T.H.B 250 pages.

**MARSILY DE G. (2004)** : Cours d'hydrogéologie. Université pierre & marie curie. 226 pages.

**MESBAH M . (1991)** : Apports des méthodes informatiques à la connaissance hydrogéologique du bassin endoréique des Zahrez .Thèse de doctorat.USTHB .

**MONFORT MI. (1997)** : Hydrochimie et hydrodynamique de la nappe phréatique au Niger Sud Oriental Mémoire de DEA 2H2G, Université Paris Sud, 121 page.

**MONOGRAPHIE . (2013)** : Direction de la programmation et de suivi budgétaire .Wilaya de Djelfa. 130 pages

**NATHALIE V (2009)** : Cours d'Analyse en composantes principales. Université Toulouse 1. 29 pages

**OFFICE NATIONAL DE METEOROLOGIE** : Relevés du station de Djelfa. période 1975-2014.

**POUGET M. (1977)** : Géomorphologie , pédologie , groupement végétaux , aptitude du melieu a la mise en valeur , région de Messade-Ain ibel (Algérie) . Paris . ORSTOM .73 pages .

**SEDRATI N. (2011)** : Origines et cartographiques physico-chimique des eaux de la wilaya de biskra- Sud Est Algérien . Thèse de doctorat . Univ . Annaba . 153 pages .

**STAMBOUL M.(2002)** : Contribution à l'étude hydrogéologique de l'Atlas Saharien,l'exemple de Djebel Amour,Thèse de doctorat d'état,Univ.d'Oran 312 pages.

**TRAYSSAC J. (1981)** : Etude géomorphologique du bassin versant de l'oued Djelfa Mellah , versant Nord des Monts de Ouled Naïl (Algérie) . Thèse de Doctorat de 3<sup>ème</sup> cycle . Univ.de Poitiers . fac,des sc , Humaines .308 pages .

**YOUNSI N. (2008)** : Alimentation en eau potable de la ville de Djelfa . Mémoire d'ingénieur . Univ. Djelfa .93p .

**ZATOUT M. (2012)** : Etude géochimique et minéralogique du chott de Ain El Beida et de la sebkha d'Oum Erraneb Cuvette de Ouargla - Bas Sahara . Mémoire de magister . Univ . Ouargla .195 pages

# **ANNEXES**

### CHAPITRE III : HYDROCLIMATOLOGIE

station de Djelfa	sep	oct	nov	déc	jan	fév	mar	avr	mai	jun	juil	août	Annuelle	
1975	p(mm)	62	17.5	54	14	17	40	46	28	51	5	18.9	17	370.4
1976	/	72	44	61	23	8	61	19	20	52	74	47	29	510
1977	/	4	4	48	29	41	9	2	13	68	17	25	12	272
1978	/	20.7	44	25	7	33	7	9	16	24	6.1	2	1	194.8
1979	/	39.7	27.1	20.4	26.9	50	67	29	28	14	4.6	1.6	47.9	356.2
1980	/	34.6	7.4	56.7	97.1	28.7	32.5	68.5	34.8	18.6	35	1.8	3.4	419.1
1981	/	73.3	12	1	33.5	6.2	45.2	36.4	67.4	5.3	7	10.6	33	330.9
1982	/	10.5	60.1	75.1	31.8	44.9	42.1	20.3	72.7	48	17.3	4.6	7	434.4
1983	/	0.7	2	17.6	11.3	35	15.5	15.2	19.6	25.6	15.5	8.6	45.7	212.3
1984	/	4.2	66.3	29.7	36.7	30.3	5	38	0.6	8.7	19	0.9	4.2	243.6
1985	/	39.6	31.7	30.8	51.9	48.1	12	65.1	1.3	59.4	13.3	9.7	0.5	363.4
1986	/	18.9	34.9	80.5	34.7	23.3	46.9	75.1	12.8	36.3	12.6	5.5	11.8	393.3
1987	/	3.7	8.6	55.1	23.4	58.5	34.4	13.6	22.7	12.4	21.8	41.4	3.1	298.7
1988	/	25.6	8.6	19.5	37.4	18.3	38	13.8	32.4	62.2	54.8	1.4	21.5	333.5
1989	/	10.6	3	41.2	18.1	13.6	8	9.1	36.1	50.4	52.6	6.5	72.4	321.6
1990	/	14.2	4	13.6	34.6	117	0.3	30	65.4	84.4	61	12.6	10.3	447.4
1991	/	32.5	117	19.5	21.6	23.5	51.7	74.2	38.8	34.5	15.7	9.4	13.1	451.5
1992	/	18.7	1.4	23.8	21.4	59.5	10.6	56.7	48.6	122	5.6	10.6	1.1	380
1993	/	25	5	19	15	8	71.1	40.2	13.5	39	12	16	27.6	291.4
1994	/	96	78	28	8	50	52	20	7	10	1	4	17	371
1995	/	13.2	49	3.9	30	46	13	50	11	6	46	6.4	13	287.5
1996	/	16	3	1	27	91.8	74	58	57	51	27	5	28	438.8
1997	/	77	11	55	17	39	5	1	87	43	9	2	45	391
1998	/	28	5	3	9	7	26	5	35	38	2	3.5	19	180.5
1999	/	25	28.7	26	68.5	61	24	25.1	9.1	3.4	13	2.6	16.6	303
2000	/	63	8	15	23.1	68.2	38.4	1	10	27	3.2	0.4	1.5	258.8
2001	/	78	28	12	17	60	12	2	3.7	3	4.7	0.4	22.8	243.6
2002	/	7.6	15.3	37.9	36.1	11	5.3	2	38.2	4.9	5.9	13	35.6	212.8
2003	/	6.3	41.4	41.3	54	53.3	45.3	13	17.8	14.8	2.8	5	0.3	295.3
2004	/	38.1	28	39.4	42	6	0.5	29.2	33	97.4	3.7	7.3	51.4	376
2005	/	63.6	48.8	18.5	25.5	2	20.5	12.5	6.8	1.4	35.1	12.2	22	268.9
2006	/	17.3	0.7	18.9	41	49.6	43.4	3.1	47.3	36.5	1.1	19.2	9.9	288
2007	/	32.2	38.3	70	3.5	4.8	26.6	72.6	28.8	31	16.3	12.8	18.2	355.1
2008	/	44.8	74.4	9.8	24	6.1	3.4	5.3	0.4	33.8	33.4	24.1	77.8	337.3
2009	/	68.7	4.5	27.4	29.8	72.2	44	47.6	54.5	12.3	10.7	15.3	0.9	387.9
2010	/	10	52.5	11.4	9.1	16.2	60.6	18.6	34.6	44.8	28.8	5.3	19.3	311.2
2011	/	10.1	29.7	21.9	19.2	12.3	37.2	32.8	56.3	32.1	26.9	30.2	19.9	328.6
2012	/	0.8	9	37	48.8	8.2	30.8	1.7	24.6	16.2	24.3	278	22.6	502
2013	/	16	12	19	47	51.7	42	11	38.2	12.2	7.8	13	4	273.9
2014	/	12	17.5	29	18	20	17	72	24.6	45	45	17.9	11	329

Tableau 3a: Les précipitations moyennes mensuelles enregistrées à la station de Djelfa .

Station de Djelfa		sep	oct	nov	déc	jan	fév	mar	avr	mai	jun	juil	aoù	Annuelle
1975	T°C	20.3	13.6	7.1	4.8	3.8	4.9	6.6	11.1	14.7	20.4	26.7	24	13.17
1976	/	18.9	12.1	6.6	7	3.3	4.8	6	10.9	15.4	12.9	24.3	24.4	12.22
1977	/	19.9	15.1	9.3	7.6	5.8	7.9	10.5	13	15.3	20.4	18.3	23.5	13.88
1978	/	20.5	12.2	6.7	8.7	3.9	9	8.5	11.6	15.2	22.3	25.5	26.4	14.21
1979	/	18.8	15.6	6.9	6.1	7.6	6.9	8.4	10	16.8	22.9	23.2	25.5	14.06
1980	/	21.4	13.3	9.4	2.3	4.9	7	8.3	10.8	13.9	22.5	25.2	36.5	14.63
1981	/	20.4	16.6	9	7.8	2.9	5.4	11.8	12.8	14.8	23.4	25.6	23.8	14.53
1982	/	21.3	13.9	8.3	3.7	5.9	6.1	8.6	10.9	16.8	24.7	27.6	26.2	14.50
1983	/	21.4	15.3	11.3	5.3	3.6	5.5	8.9	13.9	17.2	22.9	26.8	25.8	14.83
1984	/	20.6	13.6	8.9	5	4.77	4.8	7.4	13.9	13.9	22.9	26.9	25.1	13.98
1985	/	20.1	14.5	11.1	5.6	3.8	9.3	6.8	13.7	15.5	24.9	27.6	25.9	14.90
1986	/	20.6	14.9	8.1	4.6	4.5	6.6	7.7	10.8	20	22.1	24.7	26.3	14.24
1987	/	22.9	17.1	8.5	7.7	4.1	6.2	9.4	15.2	17	23.7	26.2	27.2	15.43
1988	/	19.6	15.9	10.5	4.1	6.6	6.2	9	13.5	17.9	21.6	27.4	26.5	14.90
1989	/	21.5	15.7	11.4	8.9	3.8	6.2	10.3	10.9	17.4	20.9	26.1	25.8	14.91
1990	/	23.9	16.2	9.5	4.2	4.8	8.7	9.9	11.3	16.9	24.5	25.5	24.5	14.99
1991	/	21.5	13.6	8.4	4.2	3.9	4.6	9.1	10.1	13.9	22.5	26.8	25.4	13.67
1992	/	21.6	14.8	9.2	5.8	3.3	5	7.2	10.5	15.8	18.6	23.8	25.4	13.42
1993	/	19.7	16.2	9.3	5.8	3.6	4.3	8.6	11.4	17.4	24.5	27.2	26.3	14.53
1994	/	19.8	14.6	10.3	6.1	5.3	7.5	10.9	10.8	10.4	16	28.2	28	13.99
1995	/	19.6	15	10.7	8.3	5	8.6	8.3	10.8	19.1	22.3	27.1	25.4	15.02
1996	/	18.4	13	9.6	7	6.7	4.3	8	10.9	15.2	19.1	24.6	25.4	13.52
1997	/	19.1	14.5	9.5	6.3	5.4	7.6	8.4	11.1	17.7	23.3	26.3	25.8	14.58
1998	/	22	12.4	9	4	4.8	6.4	8.8	12.4	15.1	23.2	27.6	28.5	14.52
1999	/	21.5	17.5	7.5	4.9	4.6	3.8	8.4	13.4	20.4	25.1	26.4	28.4	15.16
2000	/	20.5	13.2	9.7	6.8	2.2	6.5	10.5	13.3	19.3	22.5	27.4	25.2	14.76
2001	/	21.6	19.2	8.9	5.3	5.3	5.6	12.7	12.4	16.9	25.3	28	26.9	15.68
2002	/	20	15.8	9.9	7.2	4.5	7.2	10.4	12.5	17.6	24.2	25.6	24.5	14.95
2003	/	20.9	16.6	9.3	4.6	4.3	4.6	9.8	13.1	18	24.6	28.4	26.2	15.03
2004	/	20.6	17.5	7.8	5.1	5.3	8	10	11.2	13.2	22.9	26.3	26.7	14.55
2005	/	20.1	16.3	9.1	4.7	2.5	3.1	10.3	13.6	21.1	23.7	28.9	26.5	14.99
2006	/	19.5	18.4	10.7	5.9	2.7	4.5	10.5	15.5	19.9	24.5	27.4	26.1	15.47
2007	/	21.6	15.7	8.6	4.9	6.6	8.3	7.5	12.3	17.4	24.5	27.6	26.9	15.16
2008	/	21.3	14.2	7.3	4.2	6.2	7.9	9.8	14.3	17.3	22.2	27.9	26.6	14.93
2009	/	18.9	14.9	10.3	8.1	4.5	5.1	9.3	9.3	17.9	24.3	28.4	27.3	14.86
2010	/	20.9	15.2	9.7	7.5	6.6	8	10.4	13.9	15.5	22.3	28.9	26.9	15.48
2011	/	23.1	14.1	9.1	5.5	6.2	4.9	8.4	14.8	17.2	21.4	26.4	26.8	14.83
2012	/	21.2	15.8	10.7	5.7	4.2	2.2	9.2	11.5	19.3	26.1	28.6	28.3	15.23
2013	/	20.5	13.2	9.7	6.8	2.2	6.5	9.5	13.3	19.3	22.5	27.4	25.2	14.68
2014	/	22.9	17.1	8.5	7.7	4.1	6.2	10.1	15.2	17	23.7	26.6	27.2	15.53

**Tableau 3b:** Les températures moyennes mensuelles enregistrées à la station de Djelfa .

# CHAPITRE IV : HYDROGEOLOGIE

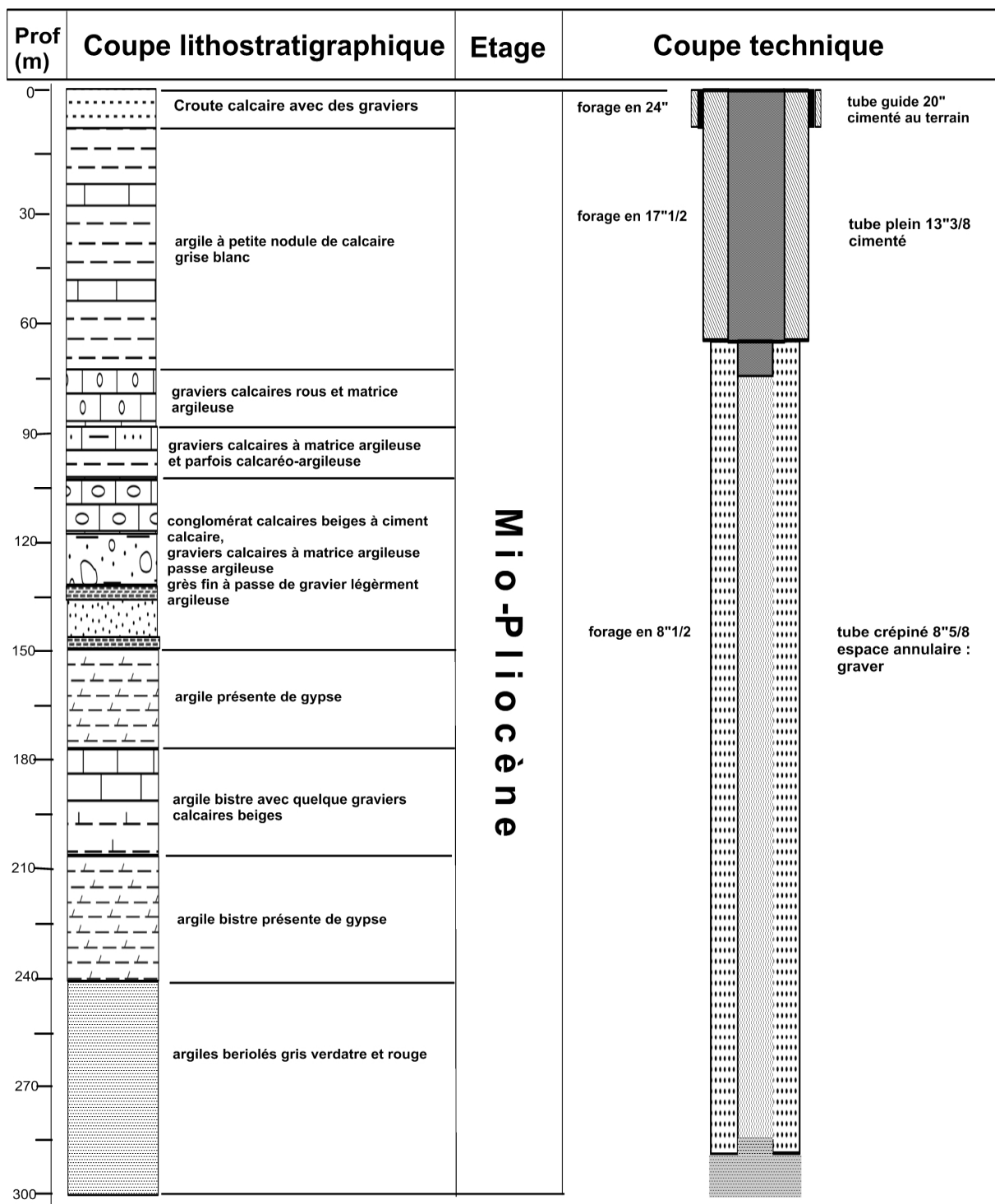
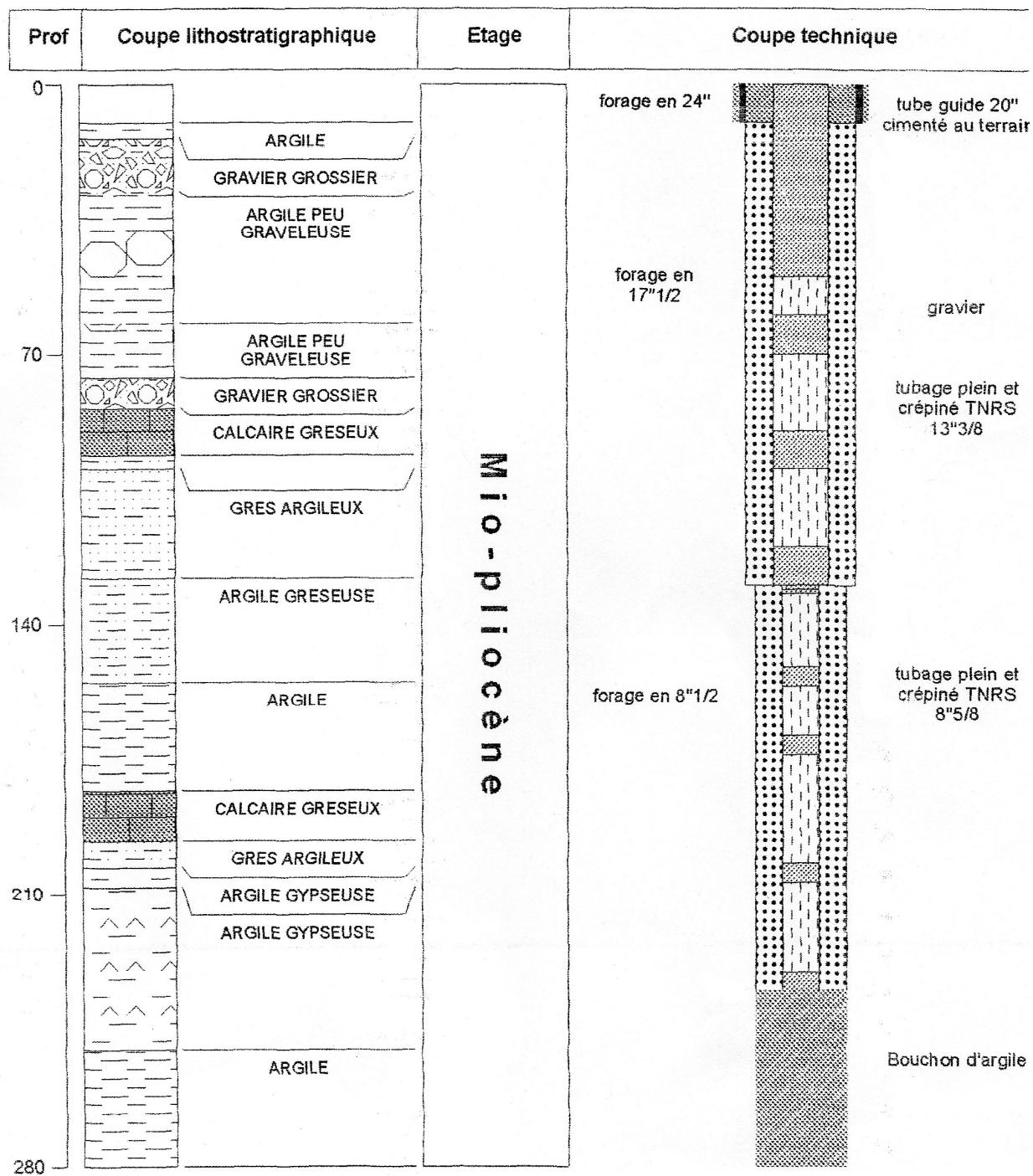


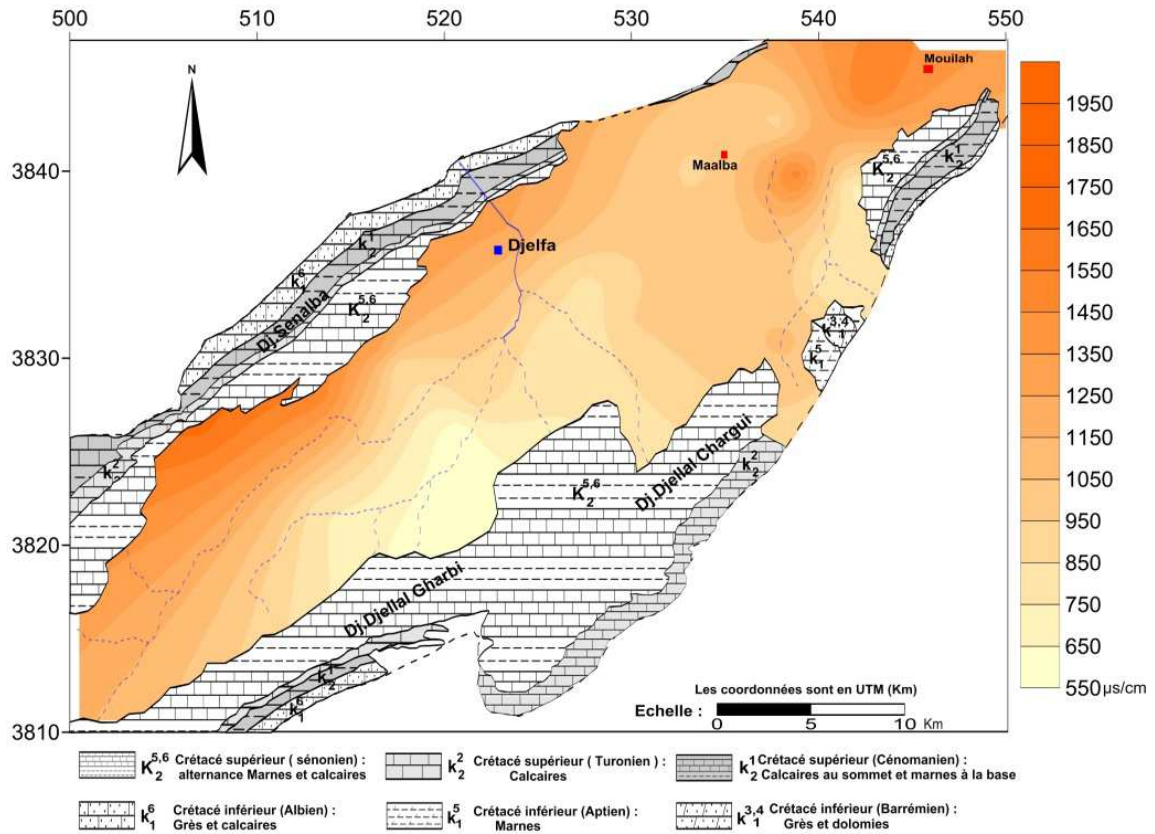
Figure 26a: Forage Maalba F5 , coupe lithostratigraphique et coupe technique



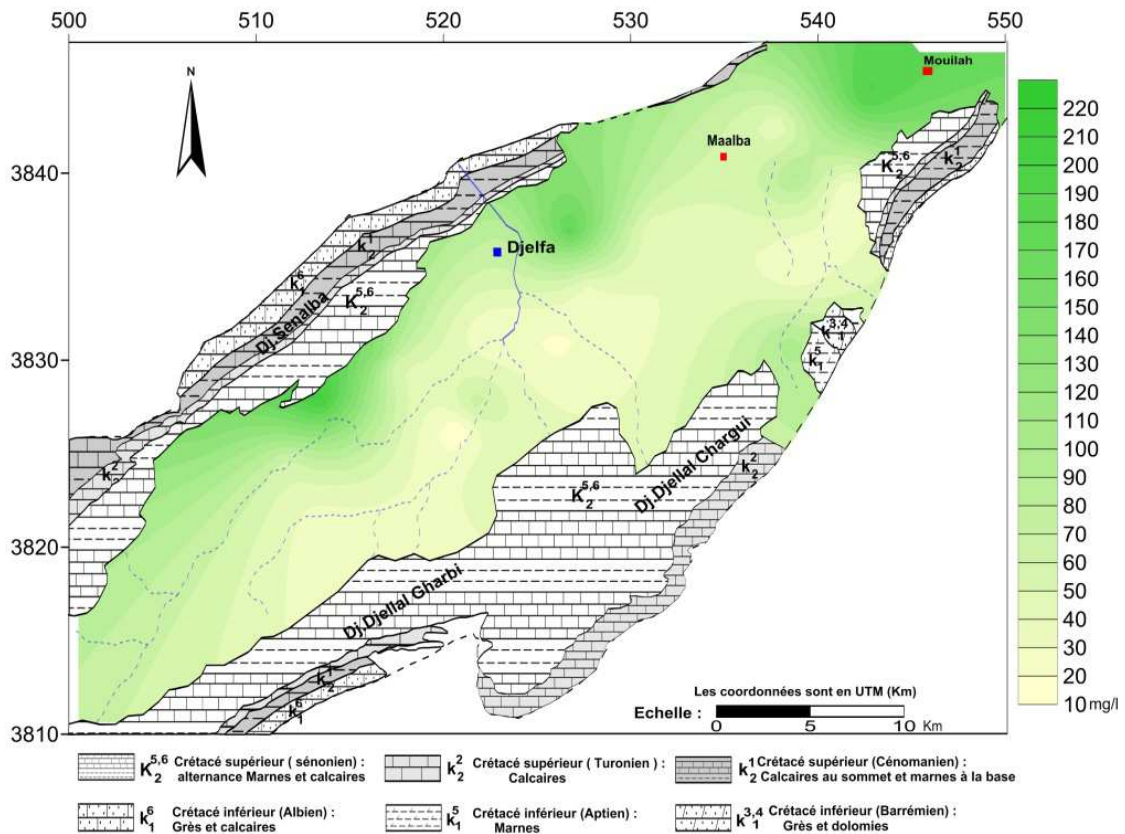
**Figure 28a:** Forage 05 Juillet, coupe lithostratigraphique et coupe technique.



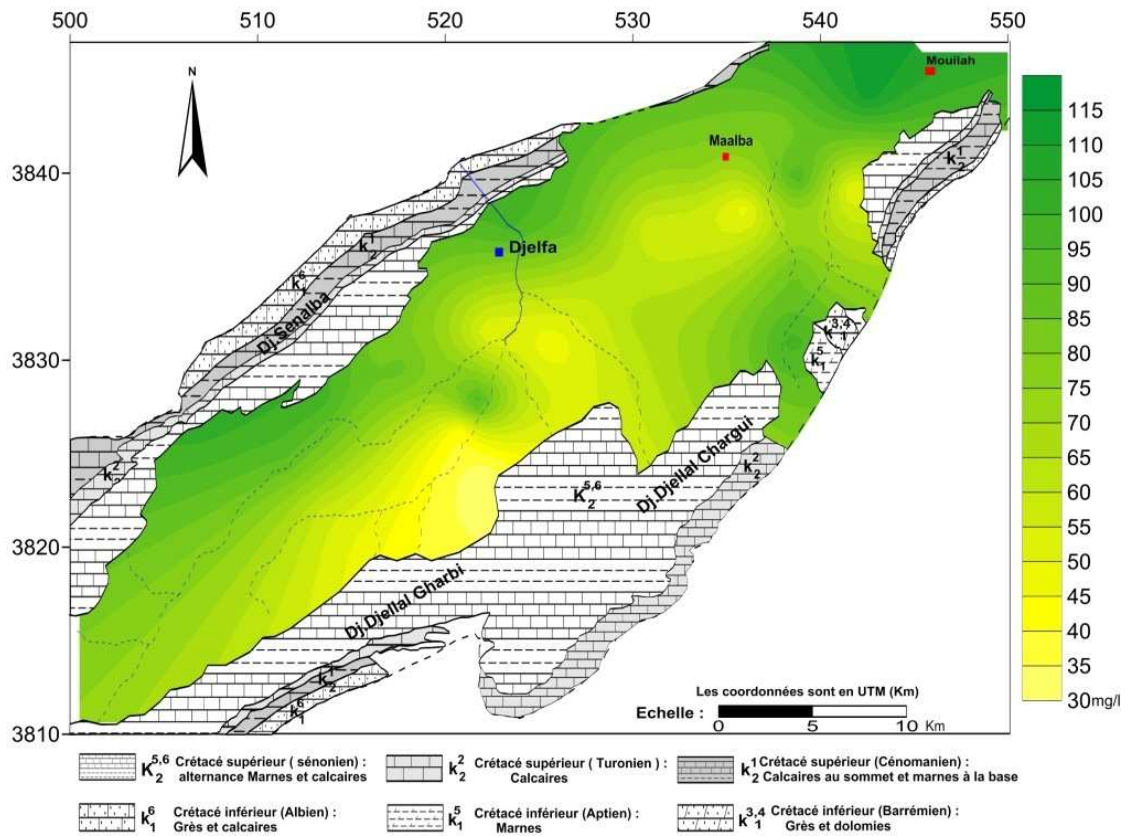
# CHAPITRE V : HYDROCHIMIE



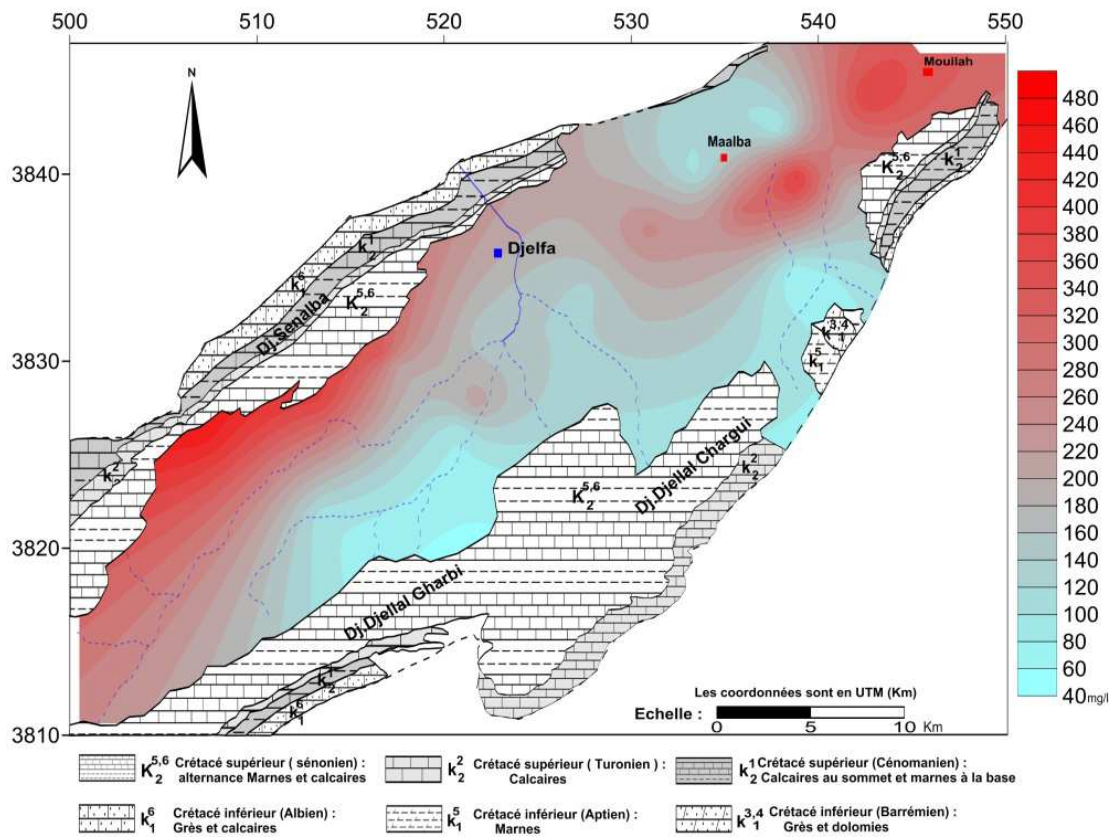
**Figure 31a** : carte des conductivités , Octobre 2014  
(à l'exception des deux points PMS4 et PMS5 )



**Figure 35a** : carte des magnésiums , Octobre 2014  
(à l'exception des deux points PMS4 et PMS5 )



**Figure 41a : carte des chlorures , Octobre 2014**  
(à l'exception des deux points PMS4 et PMS5 )



**Figure 43a : carte des sulfates , Octobre 2014.**  
(à l'exception des deux points PMS4 et PMS5 )

Points d'eau	SAR	% Na	Points d'eau	SAR	% Na
FD2	1.48	24.93	FD4	1.29	26.26
PMA1	1.15	25.39	PMS5	1.04	11.35
PMH1	1.04	23.96	PMS4	1.15	11.92
FMH7	1.58	25.94	PMS10	0.53	8.73
FMH5	0.57	12.91	FMS2	0.54	12.19
FMH4	0.99	16.85	PMS1	0.67	10.40
FMA8	0.88	16.51	PMS3	0.91	13.31
FMA2	0.85	17.63	PMS8	0.44	8.92
FMH2	1.54	35.92	PMS6	0.75	19.60
FMH3	2.12	45.03	PR3	0.84	22.99
FMH6	1.10	23.37	FD7	0.79	14.25
PIEZO	0.88	19.09	PR2	0.63	18.48
FMA5	1.37	30.31			
FD3	1.14	26.43			
PD3	0.71	14.31			

**Tableau 19** : Estimation des paramètres de la qualité de l'eau à l'irrigation (SAR et %Na),  
Octobre 2014

Points d'eau	SAR	% Na	Points d'eau	SAR	% Na
FD2	1.53	24.19	FD4	1.30	25.75
PMA1	1.06	21.33	PMS5	1.12	12.35
PMH1	1.13	25.26	PMS4	1.26	13.31
FMH7	1.48	21.67	PMS10	0.64	11.29
FMH5	0.71	16.23	FMS2	0.66	13.21
FMH4	1.09	18.30	PMS1	0.80	12.45
FMA8	1.06	20.54	PMS3	1.00	14.41
FMA2	0.70	13.90	PMS8	0.39	7.63
FMH2	1.18	28.56	PMS6	0.50	12.41
FMH3	1.94	39.03	PR3	0.70	18.55
FMH6	1.00	19.48	FD7	0.94	15.87
PIEZO	0.88	17.75	PR2	0.51	13.18
FMA5	1.32	27.02			
FD3	1.18	25.99			
PD3	0.81	15.84			

**Tableau 20** : Estimation des paramètres de la qualité de l'eau à l'irrigation (SAR et %Na),  
Avril 2015

