

N°d'ordre :

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université Mohamed Ben Ahmed d'Oran 2**



**Faculté des Sciences de la Terre et de l'Univers**

**Département de Géologie**

**MEMOIRE DE FIN D'ETUDE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER EN  
GEOLOGIE**

**Option : Eau Souterraine et Environnement  
(E.S.E)**

## **THEME**

**Etude hydrogéologique et hydrochimique du sous bassin  
versant de l'Oued Souslem**

Par

*M<sup>elle</sup> Maâtallah Nadia*

**Soutenu le : 27/06/2016 devant le jury :**

*M<sup>elle</sup>. Ablaoui Halima*

*Maître Assistante*

*Présidente de jury*

*Mr. Baïche Abdelkader*

*Maître Assistant*

*Rapporteur*

*Mr. Borsali Toufik*

*Maître Assistant*

*Examineur*

**Oran, 2016**

## ***DEDICACE***

*A l'aide d'ALLAH le tout puissant qui mon éclairé le droit chemin et grâce à la prière de mes parents j'ai pu terminer ce modeste travail.*

*A mon cher Père qui a toujours été près de moi, pour m'écouter et me soutenir. Puisse ce travail exprimer le respect et l'amour que je lui porte.*

*A ma chère Mère qui n'a jamais épargné un effort pour m'aider et m'encourager. Veuillez trouvez en ce travail la consolation et le témoin de la patience et de l'amour.*

*A toute ma famille.*

*A tous mes amis.*

*A tous ceux qui ont confiance en moi.*

*Nadia*

## *Remerciement*

*Avant de présenter mon travail, j'adresse mes remerciements les plus distingués à tous les enseignants du département de géologie de la Faculté des Sciences de la Terre et de l'Univers-Oran-*

*Mon vif remerciement à Monsieur Baiche Abdelkader pour leur entière disponibilité continue et pour tous ses conseils, sa coopération et pour son précieux encadrement.*

*Je tiens à remercier également les membres de jurys, Mlle.Ablaoui.H, Mr.Borsali.T.*

*Je ne manquerai jamais de remercier autant, le directeur général de l'ANRH Mr.Bouabdelli.S, le chef de département de la Faculté des Sciences de la Terre et de l'Univers –Tiaret- Mr. Mouchara.N, le Docteur Zerarka.A, le chef de laboratoire de microbiologie-Tiaret-Mr. Abdelli.M, le doctorant Khelifa.K, l'ingénieur Bouchikhi.L pour leurs aides.*

*Un énorme merci à toutes les personnes de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques, la Direction des Ressources en Eaux, laboratoire des Produits Electro-Chimiques « E.N.P.E.C », laboratoire de contrôle de Tiaret, laboratoire de microbiologie, station météorologique.*

*Je remercie tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*

**TABLE DES MATIERES**

Dédicace

Remerciement

Table des matières

Liste des Figures

Liste des Tableaux

Liste des abréviations

Introduction générale..... 1

**CHAPITRE I : GENERALITES**

1. Situation géographique et géomorphologique.....2

2. Le Réseau hydrographique.....6

3. Cadre géologique.....8

3.1. Trias.....9

3.2. Jurassique.....9

3.2.1. Jurassique inférieur.....9

    a/Domérien.....9

    b/Toarcien.....9

    c/Aalénien.....9

3.2.2. Jurassique moyen.....11

3.2.3. Jurassique supérieur.....11

3.3. Crétacé.....12

3.3.1. Crétacé inférieur.....12

    a/Un Berriasien-Valanginien carbonaté.....12

    b/Un ensemble Valanginien-Albien gréseux.....12

3.3.2. Crétacé supérieur.....	13
a/Le Cénomaniens.....	13
b/Le Turonien.....	13
c/Le Sénonien.....	13
3.4. Le Néogène.....	14
3.5. Le plio-Quaternaire.....	14
4. Aperçu structural.....	14
4.1. Domaine septentrional.....	14
4.2. Domaine méridional (Djebel Nador).....	16
5. Conclusion.....	18

## **CHAPITRE II : HYDROCLIMATOLOGIE**

1. Introduction.....	20
2. Analyse des paramètres climatiques.....	20
2.1. Les précipitations.....	20
2.1.1. Précipitations moyennes mensuelles.....	20
2.1.2. Précipitations saisonniers.....	21
2.1.3. Précipitations annuelles.....	23
2.2. Température.....	24
2.3. Humidité relative.....	25
2.4. L'évaporation.....	26
3. Régime climatique.....	27
3.1. Méthode Pluviothermique de Bagnouls et Gausson.....	27

3.2. Méthode d'Euverte (Ombrothermique).....	29
4. Indices climatiques.....	31
4.1. Indice d'aridité de De Martonne.....	31
4.1.1. Indice d'aridité annuelle.....	31
4.1.2. Indice d'aridité mensuelle.....	32
4.2. Le climagramme d'Emberger.....	34
4.3. Indice de Stewart.....	35
4.4. Indice de continentalité de Kerner.....	36
5. Evapotranspiration et déficit d'écoulement.....	37
5.1. Calcul de l'évapotranspiration potentielle et réelle.....	38
5.1.1. L'évapotranspiration potentielle (ETP).....	38
5.1.2. Evapotranspiration Réelle (ETR).....	39
a. Méthode de Turc.....	39
b. Méthode de Coutagne.....	40
c. Méthode de Wundt.....	40
d. Méthode de P. Verdeil (1988).....	41
e. Méthode de C.W.Thornthwaite.....	42
5.2. Estimation de la réserve facilement utilisable (RFU).....	42
5.3. Le déficit agricole (Da).....	43
5.4. L'excédent (Ex).....	43
5.5. L'écoulement (Ec).....	43
5.6. Coefficient mensuel de l'humidité.....	43
6. Etablissement du bilan hydrique selon Thornthwaite.....	44
6.1. Interprétation du bilan hydrique.....	45

6.2. Etude de ruissellement.....	45
6.2.1. Méthode de Tixeront et Berkallof.....	45
6.3. Etude de l'infiltration.....	46
7. Conclusion.....	47

### **CHAPITRE III : HYDROGEOLOGIE**

1. Aquifères potentiels.....	48
1.1. Le Jurassique.....	48
1.2. Le Tithonique .....	48
1.3. Le Crétacé.....	48
1.4. Le Cénomaniens.....	48
1.5. Le Sénonien.....	48
1.6. Le Miocène.....	48
1.7. Le plio-Quaternaire.....	48
2. Inventaire des points.....	50
3. Piézométrie.....	50
3.1. La carte piézométrique de la nappe alluviale (basses eaux).....	50
3.2. La carte piézométrique de la nappe alluviale (hautes eaux).....	52
3.3. Commentaire des cartes piézométrique.....	53
3.4. La carte piézométrique de la nappe profonde (basses eaux).....	54
3.5. La carte piézométrique de la nappe profonde (hautes eaux).....	55
3.6. Commentaire des cartes piézométriques.....	56

3.7. Le gradient hydraulique.....	56
4. Etude de paramètres hydrodynamiques.....	56
5. Conclusion.....	57

**CHAPITRE IV : HYDROCHIMIE**

1. Introduction.....	58
2. Analyse des données hydrochimiques.....	61
2.1. Paramètres physiques.....	61
2.1.1. PH (potentiel d'hydrogène).....	61
2.1.2. La température.....	61
2.1.3. La conductivité.....	61
2.1.4. La minéralisation.....	61
2.2. Paramètres chimiques.....	63
2.2.1. Cations.....	63
2.2.2. Anions.....	63
3. Classification chimique des eaux.....	66
3.1. Diagramme de Schoeller Berkaloff.....	66
3.2. Diagramme de Piper.....	68
3.3. Classification d'après STABLER.....	69
3.3.1. Faciès Bicarbonaté calcique.....	70
3.3.2. Faciès Chloruré calcique.....	70
3.3.3. Faciès Bicarbonaté magnésien.....	71
4. Etude des rapports caractéristiques.....	71



4.1. Rapport $r \text{ Ca}^{2+}/r \text{ Mg}^{2+}$ .....	72
4.2. Rapport $r \text{ Na}^+/r \text{ K}^+$ .....	72
4.3. Rapport $r \text{ Cl}^-/r \text{ Na}^+$ .....	72
4.4. Rapport $r \text{ SO}_4^{2-}/r \text{ Cl}^-$ .....	72
4.5. Rapport $r \text{ HCO}_3^-/r \text{ SO}_4^{2-}$ .....	72
5. Indice de saturation .....	73
6. Etude statistique des données hydrochimiques .....	75
6.1. Matrice de corrélation .....	76
6.2. Analyse en composantes principales .....	77
6.3. Etude des variables .....	78
6.4. Etude des individus .....	79
7. Evolution des éléments chimiques .....	81
7.1. Carte d'isominéralisation .....	81
7.2. Carte d'isoteneurs en $\text{Ca}^{2+}$ .....	81
7.3. Carte d'isoteneurs en $\text{Mg}^{2+}$ .....	82
7.4. Carte d'isoteneurs en $\text{Na}^+$ .....	83
7.5. Carte d'isoteneurs en $\text{K}^+$ .....	83
7.6. Carte d'isoteneurs en $\text{Cl}^-$ .....	84
7.7. Carte d'isoteneurs en $\text{HCO}_3^-$ .....	84
7.8. Carte d'isoteneurs en $\text{SO}_4^{2-}$ .....	85
7.9. Carte d'isoteneurs en $\text{NO}_3^-$ .....	85
8. Indice d'échange de base (i.e.b.) .....	86

## *Table des matières*

---

9. Qualité des eaux d'irrigation.....87

10. Conclusion.....89

### ***CONCLUSION GENERALE***

Conclusion générale.....90

### ***REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES***

### ***ANNEXES***

*Liste des figures*

<b>Figure n°01</b> : Carte de situation du plateau Sersou.....	2
<b>Figure n°02</b> : Localisation géographique de la zone d'étude : Extrait de la carte topographique de Sougueur.(1/50.000).....	3
<b>Figure n°03</b> : Situation géographique et géomorphologique du secteur d'étude.....	5
<b>Figure n°04</b> : Réseau hydrographique de la zone d'étude.....	6
<b>Figure n°05</b> : Localisation du sous bassin versant d'Oued Souslem.....	7
<b>Figure n°06</b> : Extrait de la carte Géologique de Sougueur (EX-TREZEL) au 1/50.000.....	8
<b>Figure n°07</b> : Coupe lithologique du Lias inférieur, moyen et supérieur.....	10
<b>Figure n°08</b> : Coupe lithologique du Jurassique supérieur.....	11
<b>Figure.09</b> : Corrélation lithostratigraphique dans le Berriasien-Valanginien.....	12
<b>Figure.10</b> : Corrélation lithostratigraphique dans le Cénomanién.....	13
<b>Figure.11</b> : Cadre géologique et structural de la région d'étude (vallée d'Oued Souslem).....	15
<b>Figure.12</b> : Coupe géologique (CC') dans la zone d'étude. (Carte géologique de Sougueur 1/50.000, SDG 1980).....	17
<b>Figure.13</b> : Coupe géologique (BB') dans la zone d'étude. (Carte géologique de Sougueur 1/50.000, SDG 1980).....	17
<b>Figure.14</b> : Coupe géologique synthétique de la zone d'étude.....	19
<b>Figure.15</b> : Histogramme des précipitations moyennes mensuelles des deux stations.....	21
<b>Figure.16</b> : Histogramme des précipitations saisonnières des deux stations.....	22
<b>Figure.17</b> : Précipitations annuelles à la station d'Ain Bouchekif (1986-2015).....	23
<b>Figure.18</b> : Précipitations annuelles à la station de Sougueur (1999-2015).....	23
<b>Figure.19</b> : Températures minimales, moyennes, maximales mensuelles à la station d'Ain Bouchekif (1986-2015).....	25

## *Liste des figures*

---

<b>Figure.20</b> : Humidité mensuelle à la station d'Ain Bouchekif (1986-2015).....	26
<b>Figure.21</b> : L'évaporation moyenne mensuelle à la station d'Ain Bouchekif (1986-2015).....	27
<b>Figure.22</b> : Diagramme Pluviothermique à la station d'Ain Bouchekif (1986-2015).....	28
<b>Figure.23</b> : Diagramme Pluviothermique à la station de Sougueur (1999-2015).....	28
<b>Figure.24</b> : Diagramme Ombrothermique à la station d'Ain Bouchekif (1986-2015).....	29
<b>Figure.25</b> : Diagramme Ombrothermique à la station de Sougueur (1999-2015).....	29
<b>Figure.26</b> : Abaque de l'indice d'aridité annuel De Martonne.....	31
<b>Figure.27</b> : Indice d'aridité mensuelle à la station d'Ain Bouchekif (1986-2015).....	32
<b>Figure.28</b> : Indice d'aridité mensuelle à la station de Sougueur (1999-2015).....	33
<b>Figure.29</b> : Position de la zone d'étude dans le climatogramme d'Emberger.....	35
<b>Figure.30</b> : Abaque de Wundt.....	41
<b>Figure.31</b> : Abaque pour calcul du déficit d'écoulement en ALGERIE P.Verdeil 09/1988 (pour P < 600 mm).....	42
<b>Figure.32</b> : Log hydrogéologique de la zone d'étude (in Feghoul A., 1987).....	49
<b>Figure.33</b> : Carte piézométrique de la nappe alluviale du bassin versant d'Oued Souslem (Décembre 2014).....	51
<b>Figure.34</b> : Carte piézométrique de la nappe alluviale du sous bassin versant d'Oued Souslem (Avril 2015).....	52
<b>Figure.35</b> : Carte piézométrique de la nappe profonde du bassin versant d'Oued-Souslem (Décembre 2014).....	54
<b>Figure.36</b> : Carte piézométrique de la nappe profonde du bassin versant d'Oued-Souslem (Avril 2015).....	55
<b>Figure.37</b> : Carte d'inventaire des points d'eaux.....	58
<b>Figure.38</b> : Distribution des éléments chimiques de la zone d'étude.....	65
<b>Figure.39</b> : Digramme de Schöeller.....	66

<b>Figure.40</b> : Digramme de Schöeller.....	67
<b>Figure.41</b> : Diagramme dePiper.....	68
<b>Figure.42</b> : Variation d'Is Calcite.....	74
<b>Figure.43</b> : Variation d'Is Aragonite.....	74
<b>Figure.44</b> : Variation d'Is Dolomite.....	74
<b>Figure.45</b> : Variation d'Is Gypse.....	75
<b>Figure.46</b> : Variation d'Is Anhydrite.....	75
<b>Figure.47</b> : Etude des variables selon l'axe F1 et F2.....	78
<b>Figure.48</b> : Etude des individus selon l'axe F1 et F2.....	80
<b>Figure.49</b> : Biplot des axes F1 et F2.....	80
<b>Figure.50</b> : Carte d'isominéralisation.....	81
<b>Figure.51</b> : Carte d'isoteneurs en $\text{Ca}^{2+}$ .....	82
<b>Figure.52</b> : Carte d'isoteneurs en $\text{Mg}^{2+}$ .....	82
<b>Figure.53</b> : Carte d'isoteneurs en $\text{Na}^{+}$ .....	83
<b>Figure.54</b> : Carte d'isoteneurs en $\text{K}^{+}$ .....	83
<b>Figure.55</b> : Carte d'isoteneurs en $\text{Cl}^{-}$ .....	84
<b>Figure.56</b> : Carte d'isoteneurs en $\text{HCO}_3^{-}$ .....	84
<b>Figure.57</b> : Carte d'isoteneurs en $\text{SO}_4^{2-}$ .....	85
<b>Figure.58</b> : Carte d'isoteneurs en $\text{NO}_3^{-}$ .....	85

*Liste des Tableaux*

<b>Tableau n°01</b> : Situation géographique des stations d'observations.....	20
<b>Tableau n°02</b> : Les variations des précipitations moyennes mensuelles en (mm) des deux stations (Ain Bouchekif et Sougueur).....	20
<b>Tableau n°03</b> : Précipitations saisonnières.....	22
<b>Tableau n°04</b> : Températures moyennes mensuelles des minimas, des maximas et leur moyenne au niveau de la station d'Ain Bouchekif (1986-2015).....	25
<b>Tableau n°05</b> : Variations mensuelles d'humidité de la station d'Ain Bouchekif (1986-2015).....	25
<b>Tableau n°06</b> : L'évaporation moyenne mensuelle de la station d'Ain Bouchekif (1986-2015).....	26
<b>Tableau n°07</b> : Valeurs du rapport P/T pour la station d'Ain Bouchekif (période : 1986-2015).....	30
<b>Tableau n°08</b> : Indice d'aridité de De Martonne au niveau des deux stations.....	31
<b>Tableau n°09</b> : Les valeurs de I calculées pour la station d'Ain Bouchekif (1986-2015).....	32
<b>Tableau n°10</b> : Les valeurs de I calculées pour la station de Sougueur (1999-2015).....	33
<b>Tableau n°11</b> : Les résultats des indices d'Emberger pour nos stations.....	34
<b>Tableau n°12</b> : Indices de Stewart.....	35
<b>Tableau n°13</b> : Indices de Kerner (la station d'Ain Bouchekif 1986-2015).....	36
<b>Tableau n°14</b> : Les indices climatiques.....	37
<b>Tableau n°15</b> : Résultats de l'ETP obtenus par la formule de «C.W.Thornthwaite» à la station d'Ain Bouchekif (1986-2015).....	39
<b>Tableau n°16</b> : Résultats de l'ETR obtenus par la formule de Turc pour la station d'Ain Bouchekif.....	40

<b>Tableau n°17</b> : Résultats de $\lambda$ pour la station d'Ain Bouchekif (1986-2015).....	40
<b>Tableau n°18</b> : Le bilan hydrique de C.W.Thornthwaite de la station d'Ain Bouchekif (1986-2015).....	44
<b>Tableau n°19</b> : Résultats du ruissellement par la formule de « Tixeront-Berkaloff » pour la station d'Ain Bouchekif (1986-2015).....	46
<b>Tableau n°20</b> : Estimation de l'infiltration par l'équation fondamentale du bilan hydrique de la station d'Ain Bouchekif (1986-2015).....	46
<b>Tableau n°21</b> : Calcul de la transmissivité et du coefficient d'emmagasinement.....	57
<b>Tableau n° 22</b> : Pourcentage d'erreur des analyses chimiques.....	60
<b>Tableau n° 23</b> : Paramètres physiques des points d'eau étudiés.....	62
<b>Tableau n°24</b> : Calcule de la minéralisation.....	62
<b>Tableau n°25</b> : Formules caractéristiques et faciès chimique des eaux souterraines de la zone d'étude.....	69
<b>Tableau n°26</b> : Rapports caractéristiques.....	72
<b>Tableau n°27</b> : Indice de saturation des eaux souterraines de la région d'étude.....	73
<b>Tableau n°28</b> : Paramètres statistiques élémentaires en mg/l.....	76
<b>Tableau n°29</b> : Matrice de corrélation des éléments chimiques.....	76
<b>Tableau n°30</b> : Valeurs propres.....	78
<b>Tableau n°31</b> : Indice chloro-alcalin de la nappe de la région d'étude.....	86
<b>Tableau n°32</b> : Classification de qualité des eaux en fonction des valeurs du S.A.R.....	88

*Liste des abréviations*

**INC** : Institut Nationale des la Cartographie.

**ABH-CZ** : Agence du Bassin Hydrographique Cheliff Zahrez.

**SDG** : Sous Direction de la Géologie.

**ETR** : Evapotranspiration réelle.

**ETP** : Evapotranspiration potentielle.

**C.G.G** : Compagnie Générale de la Géophysique.

**PH** : potentiel d'hydrogène.

**i.e.b** : Indice d'échange de base.

**i.c.a** : Indice Chloro-Alcalin.

**SAR** : Sodium Adsorption Ratio.

**ACP** : Analyse en Composante Principale.



***INTRODUCTION***  
***GENERALE***

## **INTRODUCTION GENERALE**

L'importance de l'eau en tant que support de vie est un facteur régulateur du développement d'un pays. Donc il est nécessaire de quantifier et de gérer la ressource en eau souterraine aussi rigoureusement que possible du point de vue quantitatif et qualitatif. Ainsi, une étude intitulée " Contribution à l'étude hydrogéologique et hydrochimique du sous bassin versant de l'Oued Souslem " nous a été confiée. Elle vise plusieurs objectifs qui sont :

- Caractérisation du sous bassin versant de l'Oued Souslem.
- Analyse des facteurs physique, géologique, climatique et hydrochimique régissant l'écoulement.

Ces éléments et ces paramètres constituent l'objectif principal de cette étude qui s'articule autour de quatre chapitres :

- Le premier chapitre est consacré à l'étude du contexte géologique de la région d'étude et à l'identification de la formation susceptible de contenu (corrélations de quelques logs de forages), ainsi que la nature lithologique du substratum.
- Le deuxième chapitre est consacré à l'évaluation des différents termes du bilan hydrologique en s'appuyant essentiellement sur les relevés pluviométriques et de température effectuée en certains points du réseau de mesure.
- Le troisième chapitre étudie l'hydrogéologie de la région traduit par l'établissement de cartes piézométriques à différentes périodes, précisant ainsi l'évolution du sens d'écoulement et les zones d'alimentation de la nappe.
- En fin, le quatrième chapitre : la connaissance des caractéristiques physico-chimiques des eaux représente une part importante de l'étude, elle permet d'apprécier la qualité des eaux et de suivre l'évolution et la répartition de leurs caractères physico-chimiques et d'en déterminer les faciès chimiques

***CHAPITRE I***  
***GENERALITES***

Le plateau du Sersou dont fait partie notre région d'étude s'incère entre le massif de l'Ouarsenis au Nord et les monts du Nador au Sud (fig.01), il se présente comme une vaste surface tabulaire allongée d'Ouest en Est, correspondant à un synclinal faillé comblé par des dépôts du mio-plio-quaternaire. Nous pouvons distinguer du Nord au Sud trois unités lithostratigraphiques :

- Au Nord, le Miocène marin, formé de marnes grises alternant avec les grès et les calcaires, il s'étale entre l'Oued Nahr Ouassel et le rebord du plateau du Sersou.
- Au Sud, les chaînes du Djebels Réchaiga et Nador qui est un vaste anticlinal, entre ces deux unités s'étend le synclinal du Sersou, constitué de conglomérats, de grès alternant avec des calcaires pulvérulents.

### 1. Situation géographique et géomorphologique

Le bassin versant de l'Oued Souslem couvre une superficie de 854 km<sup>2</sup>, il est limité au Nord par le sous bassin d'Oued Mechti Zerga, au Sud par le Djebel Nador et le sous bassin de l'Oued Touil moyen, à l'Est par le Djebel Réchaiga et le sous bassin d'Oued Touil aval, et à l'Ouest par la haute plaine de Sougueur (fig.02).

L'impluvium s'étend de 35°06'4.8" au 35°11'38.1" de latitude Nord et du 01°29'00" au 01°35'00" de longitude Est.

De point de vue administratif, le sous bassin est limité à l'Ouest par la ville de Sougueur, à l'Est, par Si Abd El Ghani, au Sud-ouest, par Naima et au Sud-est, par Kef Ksar.

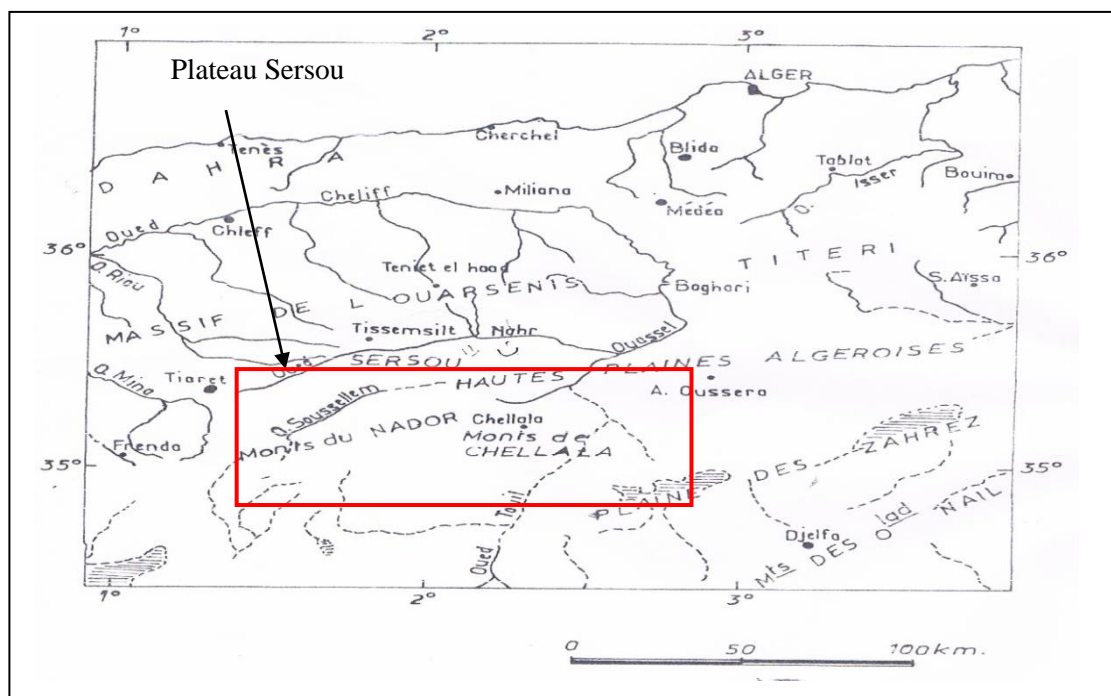
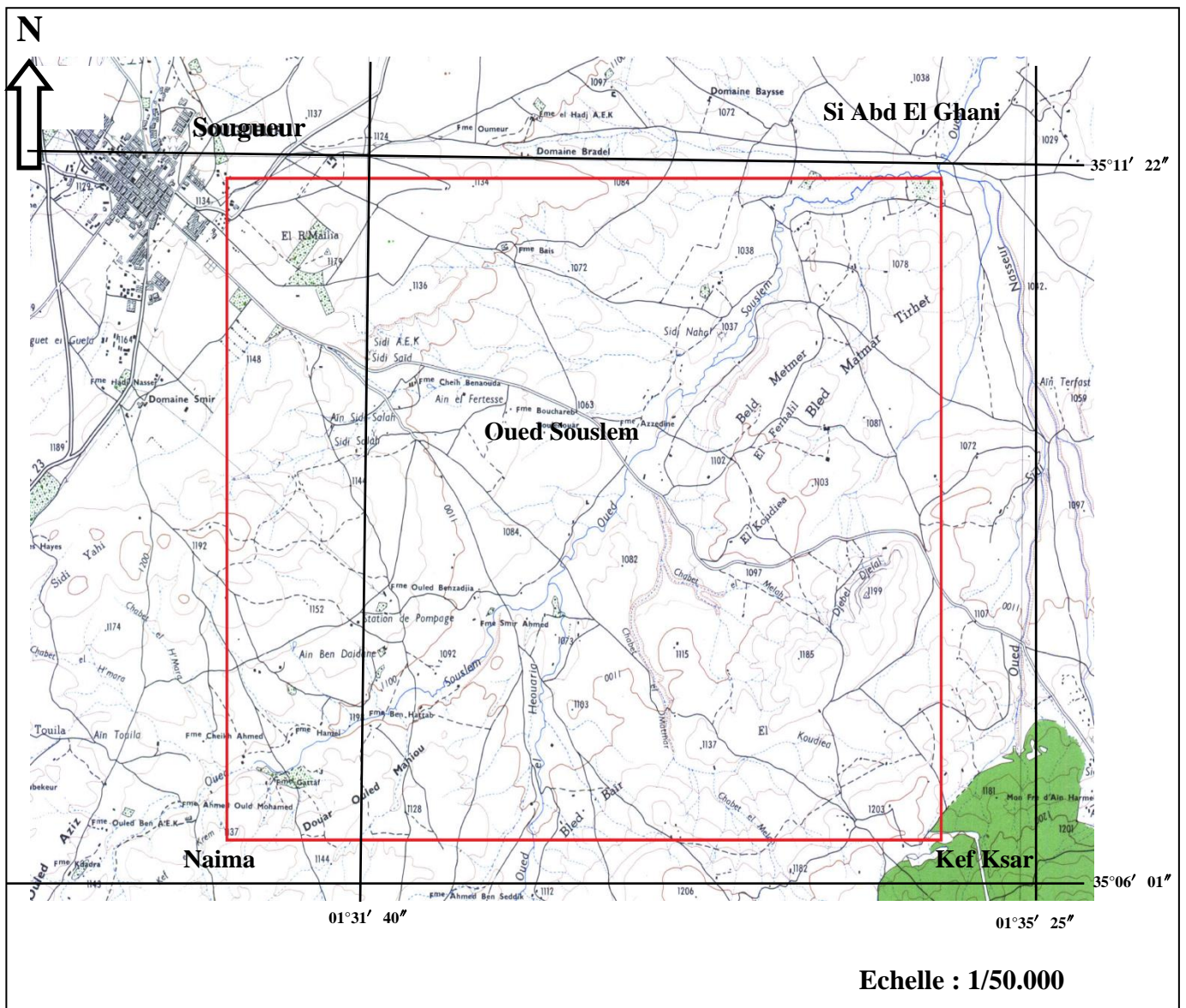
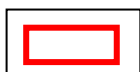


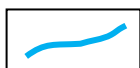
Fig.01 : Carte de situation du plateau Sersou.



Légende :



: Zone d'étude.



: Oued Souslem.

**Fig.02** : Localisation géographique de la zone d'étude : Extrait de la carte topographique de Sougueur.1/50.000., (INC.1984).

Sur le plan géomorphologique, cette zone d'étude est délimitée au Nord et au Nord-est par le plateau du Sersou, à l'Ouest par les hautes plaines de Sougueur et au Sud par les Monts du Nador (Djebel Nador, Djebel Ben N'sour et Djebel Safeh). Ce territoire n'est pas homogène, il se caractérise par une alternance de milieux très contrastés dont les grandes unités sont au nombre de trois :

**\*Le milieu montagnard**

Il est constitué par une série de djebels généralement orientés vers le Sud-Est, peu accentués et aux dénivellations peu importantes conférant à l'ensemble orographique une allure tabulaire ondulée. Ces onduls sont incisés par une série d'Oueds coulants dans des fonds de vallées : il s'agit de l'Oued El Houaria, et Ain Beloulid, Lakhneg, Melah et EL Matmar qui débouchent sur les plaines via l'Oued Souslem.

**\*Les plaines**

Elles se localisent dans la partie Nord de la région d'étude à moins de 1040 m d'altitude et concernent principalement le centre. Il s'agit de la plaine du sidi Nahel et du Sud de la ville de Sougueur. Cette région est caractérisée par une agriculture intense.

**\*Le milieu steppique**

Il est caractérisé par des altitudes élevées (1170 m en moyenne), les plus hautes steppes atteignent 1240 m et les plus basses 1100 m. Cet espace est caractérisé par un climat semi-aride et une forte précipitation.

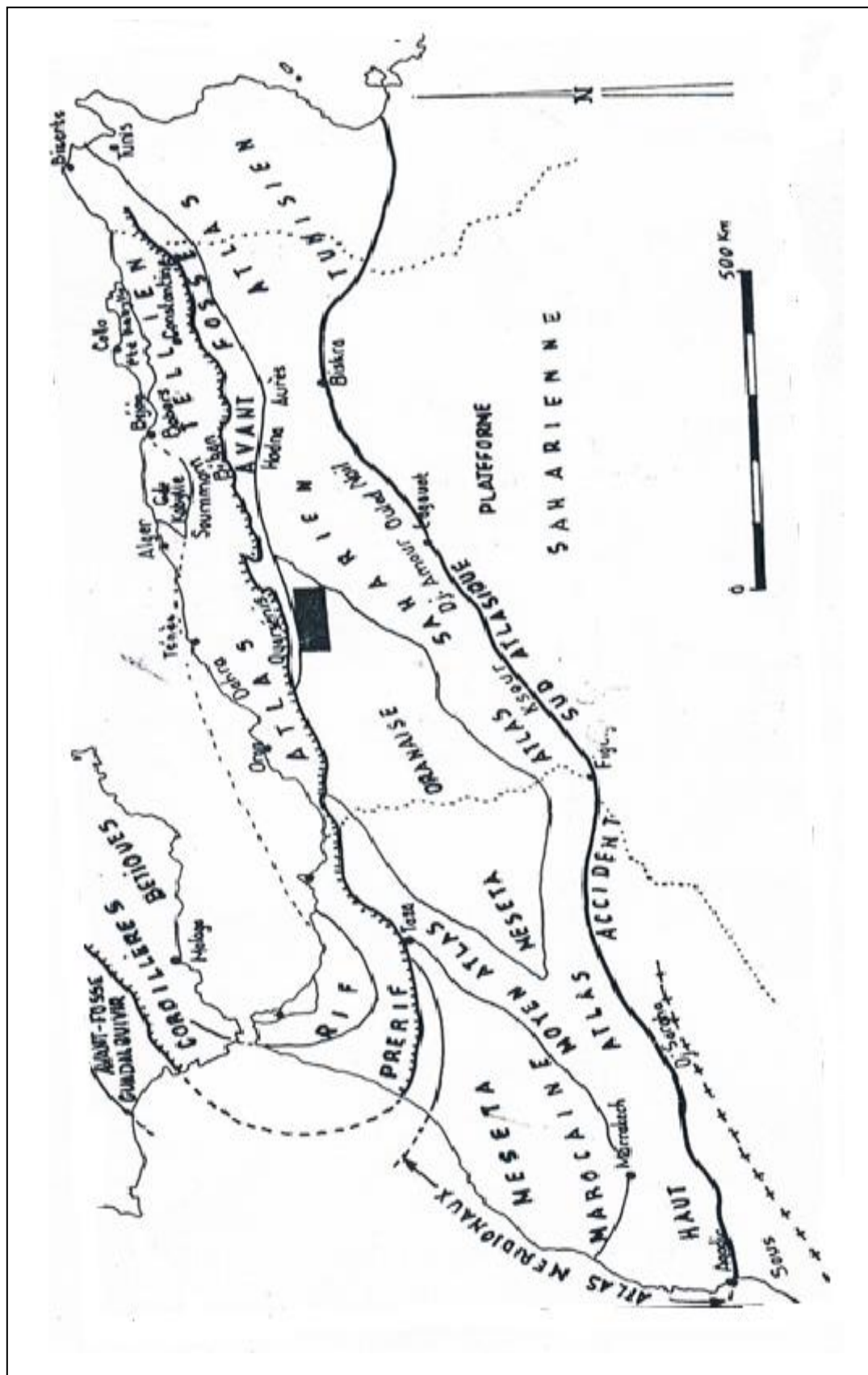


Fig.03 : Localisation géographique et géomorphologique du secteur d'étude (in Feghoul A., 1987).

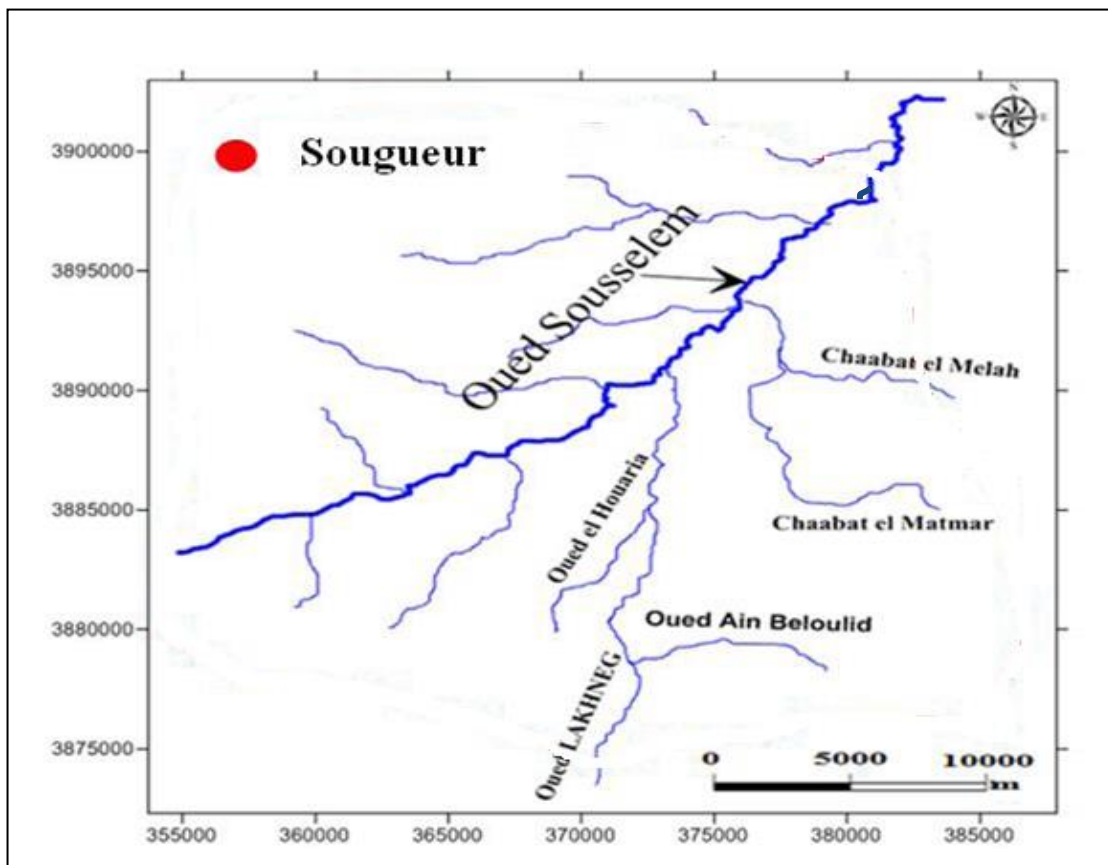
## 2. Le Réseau hydrographique

Ce secteur présente un relief peu accentué, l'écoulement superficiel des eaux se fait d'Ouest en Est avec une pente qui diminue pour devenir nulle au niveau de la zone de Réchaiga (zone marécageuse).

La vallée de l'Oued Souslem draine une superficie de 50 km<sup>2</sup> comprise depuis les hautes terres (monts de Nador) jusqu'à Douar Sidi Nahel, Les principaux affluents prennent naissance à partir des montagnes et se déversent dans l'Oued Souslem (fig.04).Ce sont :

- l' Oued El Houaria, prend naissance à partir des monts de Djebel Nadhor.
- l' Oued Ain Beloulid, prend naissance à partir d'Ain Bouloulid et Kef Ksar.
- l' Oued Lakhneg draine les Monts de Djebel dar ben soitare et djebel Boutchicra.
- Chaabat Melah, prend naissance à partir des Monts de Djebel Djellal.
- Chaabat El Matmar, prend naissance à partir des Monts de Kaf el Moudjahidine.

La surface du sol peut être unie pour une grande partie du lit de l'Oued ou alternativement d'un coté à l'autre du lit en fonction des méandres « terrasse de méandre » ou bien entailles par de petites incisions linéaires lorsque le ruissellement se concentre avec une pente plus forte et des débits plus importants. (ARARIA N., KHELIFA K., 2015).



**Fig.04 :** Réseau hydrographique de la zone d'étude.



L'Oued Souslem s'écoule vers l'Oued Nahr Ouassel (fig.05), ce dernier à son tour s'écoule vers le Nord-Est et traverse successivement (03) wilayas : Tiaret, Tissemsilt et Médéa (MEHAIGUENE M).

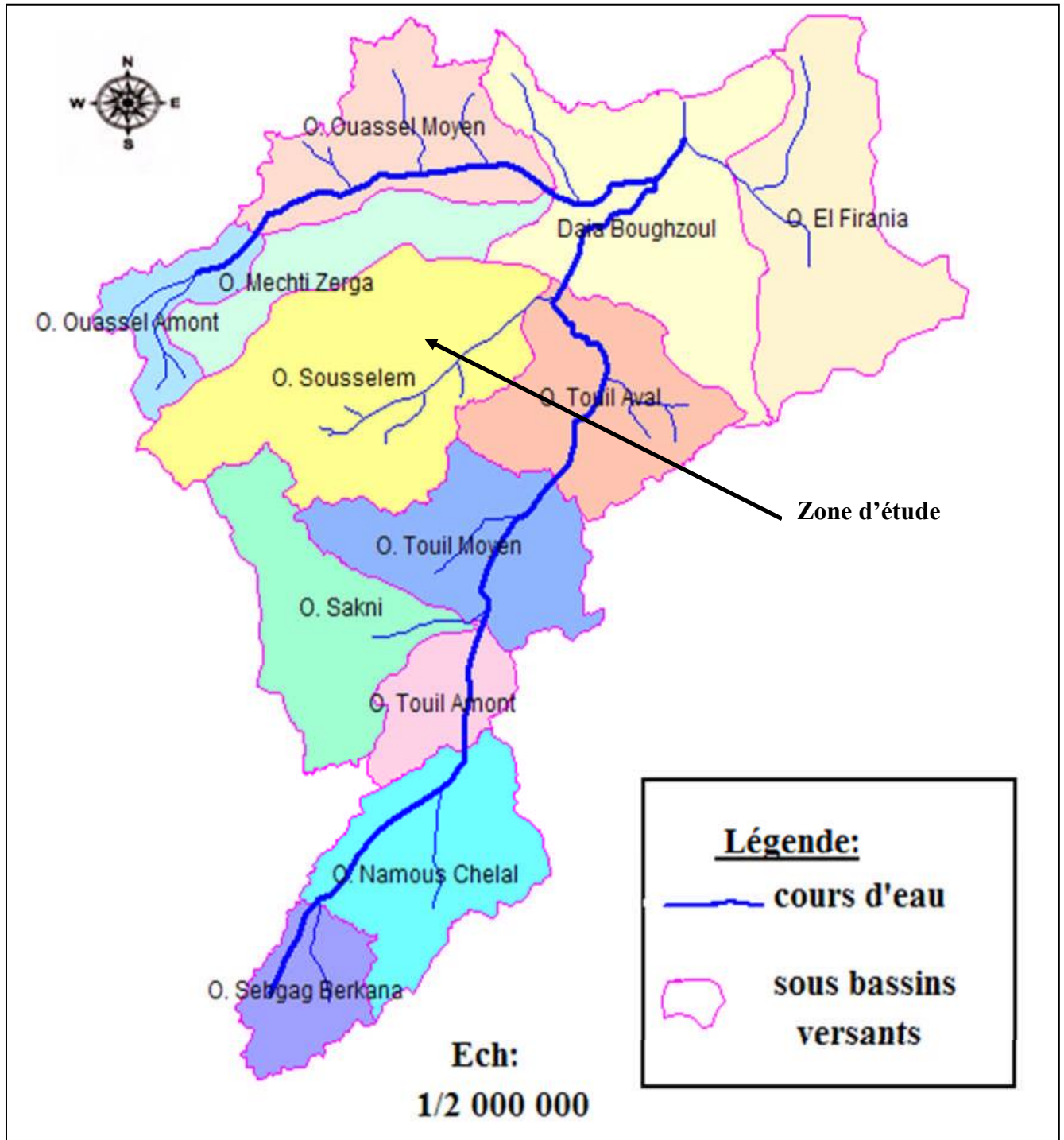
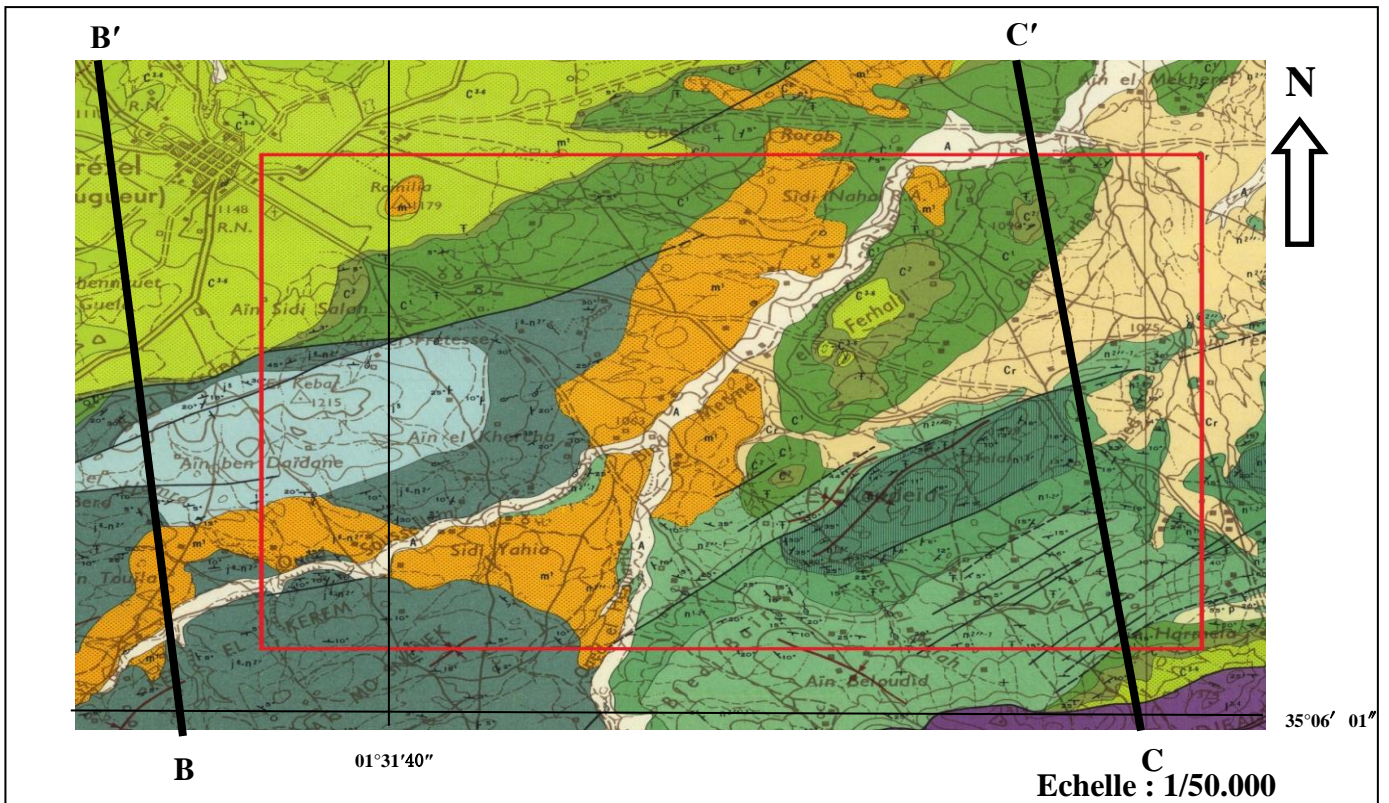


Fig.05 : Localisation du sous bassin versant d'Oued Souslem (ABH-CZ., 2007).

3. Cadre géologique



Légende :

Terrains sédimentaires		
Plio-Quaternaire	Cr A	Croûtes de calcaires. Alluvions récentes.
Miocène Inférieur	m <sup>1</sup>	Grès et des conglomérats en profondeur.
Sénonien	C <sup>3-6</sup>	Grès et des conglomérats de base.
Turonien	C <sup>2</sup>	Dolomies gréseux, grès et des calcaires.
Cénomanién	C <sup>1</sup>	Marnes, argilites, calcaires, dolomies, grès et des conglomérats.
Crétacé Inférieur Gréseux	n <sup>2''-7</sup>	Dolomies gréseux, argiles gréseux, calcaires et des sables, grès.
Crétacé Inférieur Carbonaté	n <sup>1-2'</sup>	Calcaires, marnes et dolomies en gros bancs.
Tithonique–Berriasien-Valanginien	j <sup>6-n2'</sup>	Dolomies et marnes dolomitisées.
Kimméridgien	j <sup>5</sup>	Dolomies, grès et des argiles.

Fig.06 : Extrait de la carte Géologique de Sougueur (EX-TREZEL) au 1/50.000 (SDG, 1980).

Plusieurs géologues ont étudié cette région du plateau du Sersou, comme Ville (1845) et Renou (1848), d'autres se sont intéressés au plateau Sersou comme P.Deleau (1935-1936), J.Savornin (1940-1948), en donnant les bases de la stratigraphie et de la structure (Djebel Nador). En 1970, C.Caratini précisa avec P.Deleau (1970) l'échelle stratigraphique utilisée dans notre étude. Nous avons :

### **3.1. Trias**

Il est formé par des schistes rouges, des calcaires jaunes et un mélange de gypse et de sels gemme visible au Djebel Safeh.

### **3.2. Jurassique**

#### **3.2.1. Jurassique inférieur (fig.07)**

Le lias inférieur repose sur le trias, il est composé par une série de dolomies cristallines, des marnes surmontées de calcaires lités, passant latéralement à des marno-calcaires.

Le lias moyen et supérieur avec :

**a/Domérien :** constitué par une puissante série de calcaires marneux sublithographique et de marnes reposant en concordance sur le lias inférieur où la partie sommitale est composée de calcaires marneux lités.

**b/Toarcien :** formé essentiellement par des marnes grises, des calcaires marneux et des marnes bleues parfois schisteuses.

**c/Aalénien :** représenté par des calcaires à silex et à grains fins bien lités, renfermant des ammonites et des bélemnites.

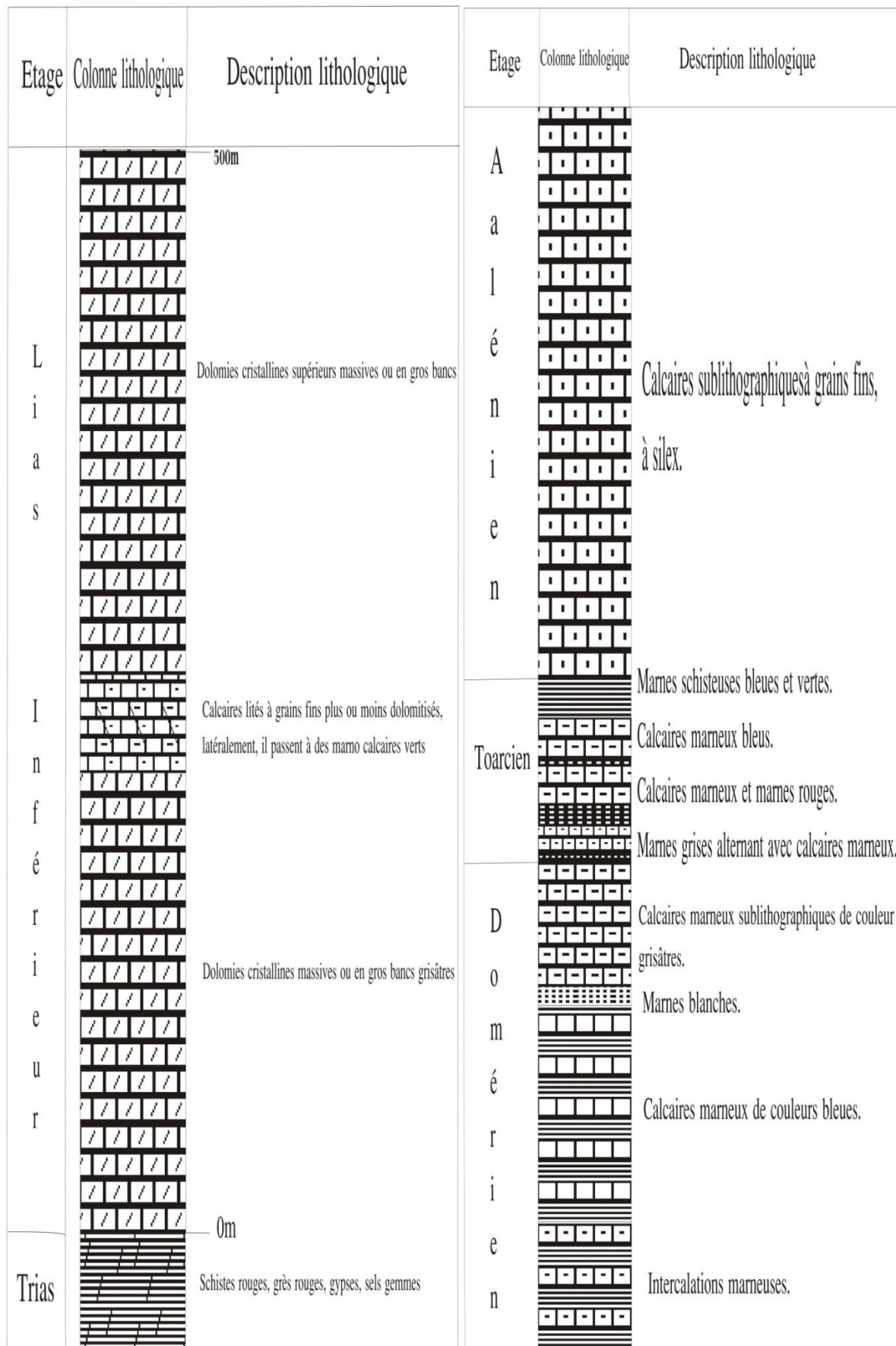


Fig.07 : Coupe lithologique du Lias inférieur, moyen et supérieur (Caratini C., 1970).

3.2.2. Jurassique moyen

Transgressif et discordant sur les calcaires de l'Aalénien, il est formé par une série de grès quartzeux massifs en gros bancs datée du Bajocien et probablement du Bathonien.

3.2.3. Jurassique supérieur

Développé au Djebel Nador, il est constitué :

- A la base par des marnes schisteuses noirs pyriteuses avec intercalations de marno-calcaires et renferme même une faune de céphalopodes.
- A la partie moyenne, par des marnes et des marno-calcaires où P.Deleau a levé la coupe suivante.
- Au sommet, par des dolomies cristallines massives du Kimméridgien à tests de polypiers, à ces dépôts succèdent des calcaires bien lités du Tithonique (fig.08).

Etage	Colonne lithologique	Description lithologique
Portlandien		Calcaires marneux bien lités à grains fins parfois dolomitisés.
Kimméridgien		Dolomies cristallines massives avec gros bancs.
Séquanois		Marnes grises et roses alternant avec des grès en plaquettes.
Quercinien		Marnes grises surmontées de petits bancs de marno calcaires.
Étampien		Dolomies en petits bancs. Marnes grises. Marno calcaires gris bleus.
Rauracien		Marnes bleues. Calcaires marneux plus ou moins dolomitisés. Marnes grises à plaquettes de calcaires détritiques.
		Marnes grises verdâtres à petits plaquettes de calcaires bruns.

Fig.08 : Coupe lithologique du Jurassique supérieur (P.Deleau., 1948).

3.3. Crétacé

Très développé dans cette région avec :

3.3.1. Un Crétacé inférieur

Où seul le Berriasien-Valanginien est présent, constitué par des niveaux rattachés à la formation des « Calcaires de Rémailia » (Auclair D., 1967).

- **Un Berriasien-Valanginien carbonaté** : formé d’une succession de marno-calcaires très épaisse (200 m) (fig.09) (Caratini C., 1970 et Benest., 1985).
- **Un ensemble Valanginien-Albien gréseux** : ce dernier se compose de trois groupes :
  - Groupe gréseux inférieur avec des calcaires et des dolomies (Berriasien-Valanginien).
  - Groupe gréseux carbonaté moyen (Albien) avec plusieurs horizons calcaires et marno-calcaires.
  - Groupe gréseux supérieur (Albien) avec des grès, des argiles gréseux, le toit surmonté par d’autres grès (supérieur).

Cet ensemble diminue très fortement d’Est en Ouest, il passe de 1000 m dans la région de Chellala, à 200 m au niveau de l’Oued Mina (Caratini C., 1970).

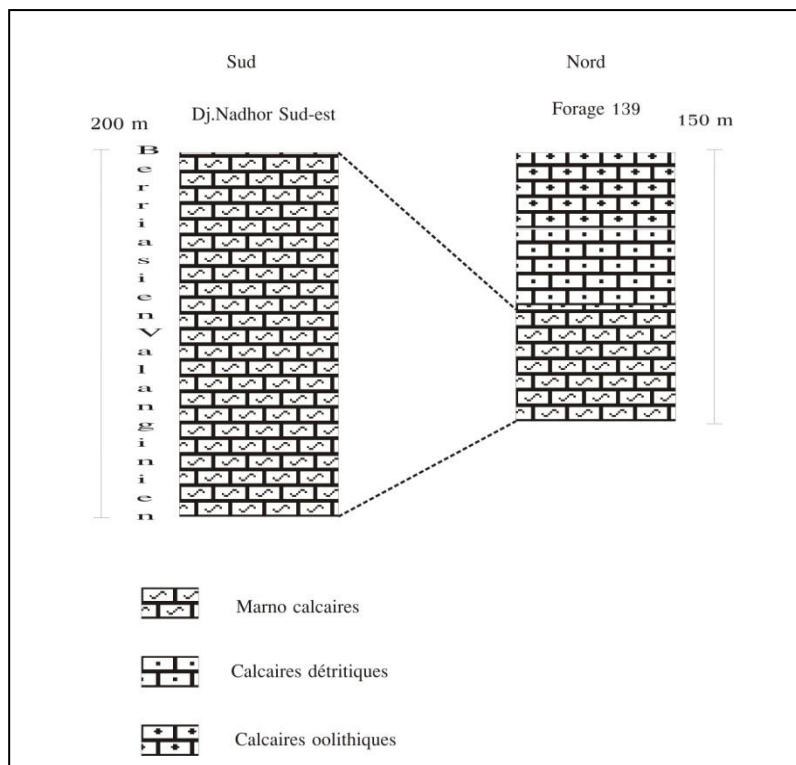


Fig.09 : Corrélation lithostratigraphique dans le Berriasien-Valanginien (Caratini C., 1970).

3.3.2. Crétacé supérieur

Il a été décrit par P.Deleau (1948) et C.Caratini (1970) et synthétisé dans un log géologique effectué dans le sondage mécanique 1776, nous avons d'abords :

**a/Le Cénomaniens** : il affleure sur la rive gauche de l'Oued Souslem, il est formé par des marnes, d'argilites et de calcaires tendres (fig.10).

**b/Le Turonien** : représenté par des dolomies gréseuses, des grès et des calcaires affleurant dans la partie Sud-Ouest sous forme d'une bande le long de l'Oued Souslem. Il repose en concordance sur les terrains Cénomaniens.

**c/Le Sénonien** : très développé dans notre région d'étude, il est composé de calcaires, d'argiles gypseuses, de grès et de conglomérat de base. Une coupe synthétique du Sénonien a été établie au Djebel Nador par P.Deleau montrait des calcaires dolomités alternant avec des marnes blanches à niveau d'huîtres ; des marnes, des grès quartzeux, des poudingues et des galets de dolomies cristallines.

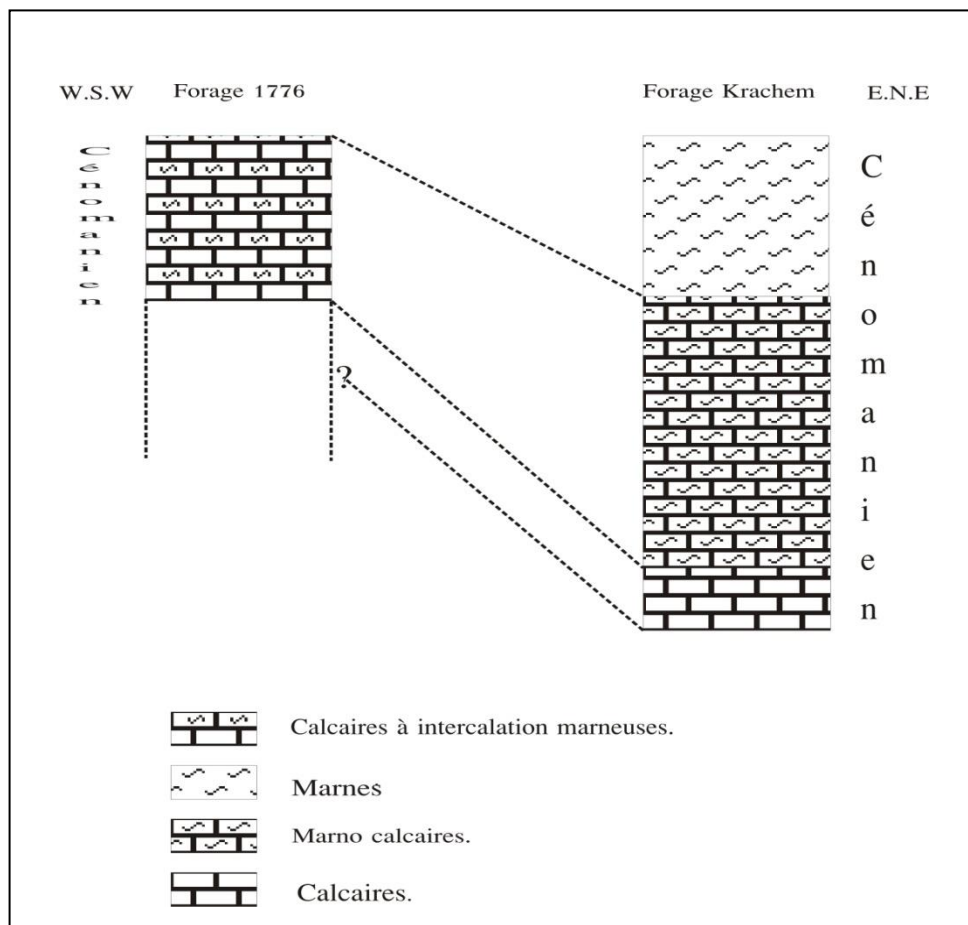


Fig.10 : Corrélation lithostratigraphique dans le Cénomaniens (Caratini C., 1970).

### **3.4. Le Néogène**

Les terrains d'âges Eocène et Oligocène sont absents mais le Miocène inférieur est transgressif sur le Crétacé supérieur, il affleure dans les vallées du Faidja et du haut Souslem, il est formé essentiellement par des grès, des conglomérats, des marnes et des calcaires.

### **3.5. Le plio-Quaternaire**

Les formations du plio-Quaternaires sont constitués par des alluvions récentes le long des cours d'eau (sables limoneux), elles sont recouvertes par des croûtes de calcaires qui peuvent atteindre 2 m d'épaisseur, ils sont caractéristiques des régions méditerranéennes (Tinthoin).

## **4. Aperçu structural (fig.11)**

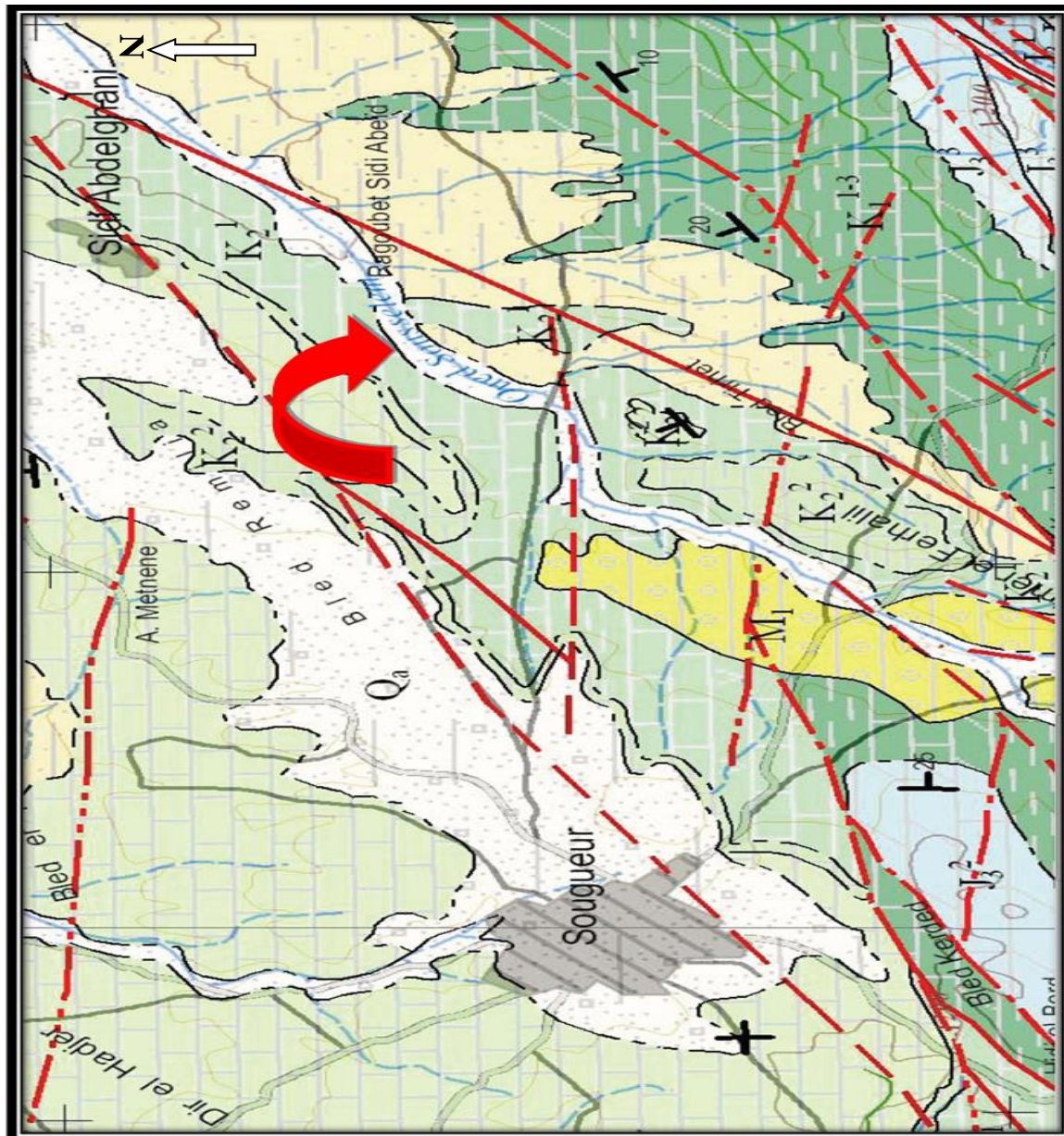
L'examen du schéma structural de notre secteur d'étude fait apparaître l'existence de deux domaines distincts, domaine septentrional et domaine méridional, situés de part et d'autre d'un important accident d'orientation SW-NE dénommé « zone faillée de Harmela ».

### **4.1. Domaine septentrional**

Il correspond à une vaste dépression formée au cours de l'orogénèse alpine avec des failles profondes (**Caratini., 1970**) affectant le substratum, ayant pour résultat la formation de horsts et de grabens.

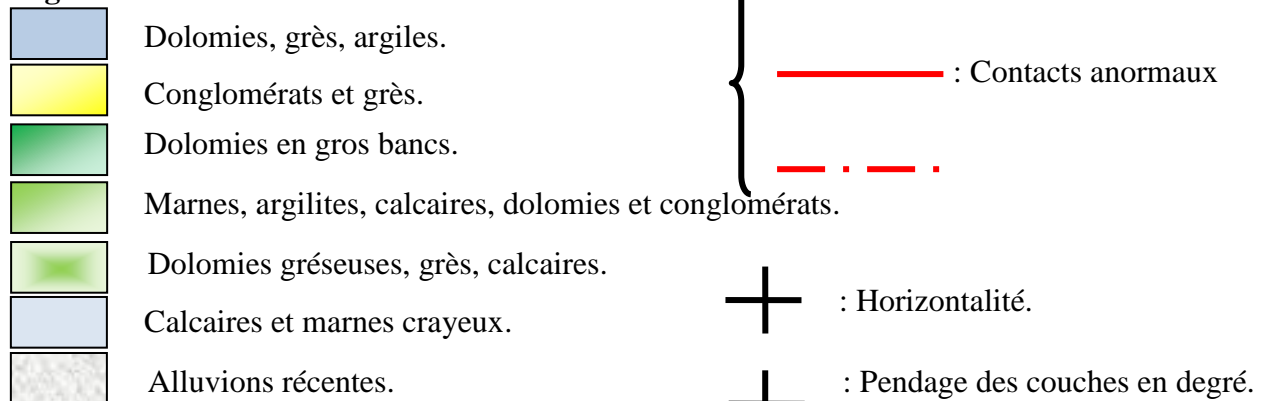
Ces accidents tectoniques affectent les formations jurassiques et provoquent dans les différentes formations carbonatées, une perméabilité de fissures.





Extrait de la Carte géologique de Tiarret échelle 1/200000

**Légende :**



**Fig.11 :** Cadre géologique et structural de la région d'étude (vallée d'Oued Souslem).

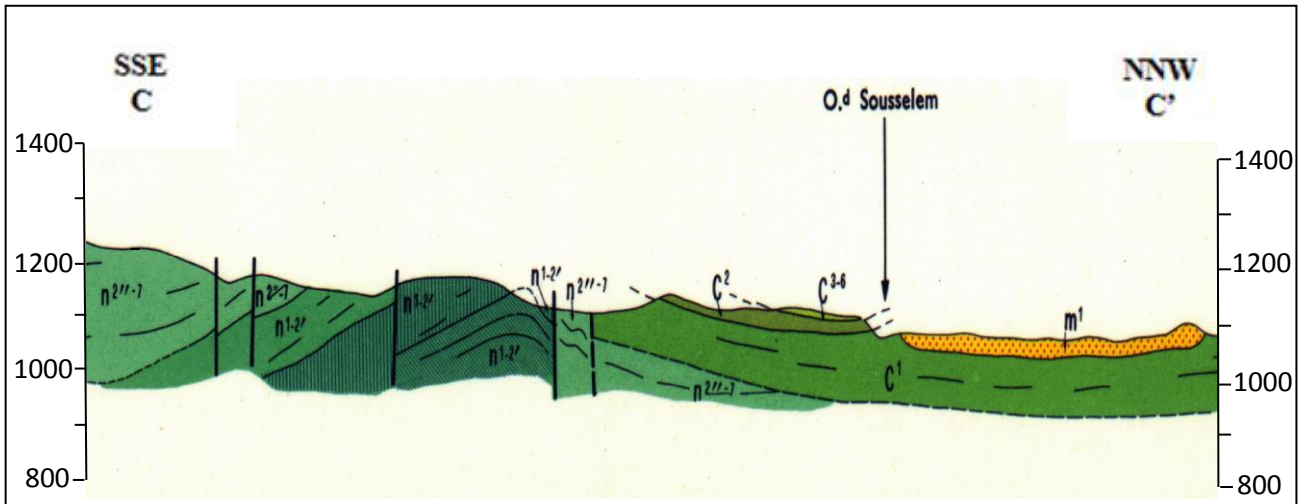
#### 4.2. Domaine méridional (Djebel Nador)

Contrairement au domaine septentrional, le Djebel Nador montre des structures complexes, c'est un anticlinal faillé orienté SW-NE dont le flanc Nord est plus serré que le flanc Sud. L'orogénèse alpine est responsable de la surrection des reliefs et d'une érosion intense (Caratini C., 1970).

L'examen du trait de coupe C C' (fig.12) montre un pli anticlinal orienté NE-SW affecté par des failles verticales et dont le flanc NNW est marqué par des séries à pendage assez modeste. Au niveau de l'Oued Souslem, on note une différence dans la succession des couches, vers SSE, elle est normale et débute par les couches n<sup>2</sup><sup>1</sup>, C<sup>1</sup> et se termine par C<sup>2</sup> et C<sup>3-6</sup> dont les bases sont affectés par des contacts anormaux. Vers le NNW, la couche C<sup>1</sup> est surmontée par du Miocène m<sup>1</sup> qui est discordant et dont l'extension vers le SSE est bloqué par la structure de l'Oued. Le flanc SSE est très accidenté et comprend des séries différentes tant sur le plan lithologique que stratigraphique, avec un pendage des couches assez fort.

La lecture de la deuxième coupe BB' (fig.13) montre une structure synclinale avec un faible pendage et dont le cœur est formé par du Miocène localisé au cœur de l'Oued Souslem.

La terminaison NNW est caractérisée par une structure anticlinale à cœur Jurassique, circonscrite entre deux failles verticales.



La légende :

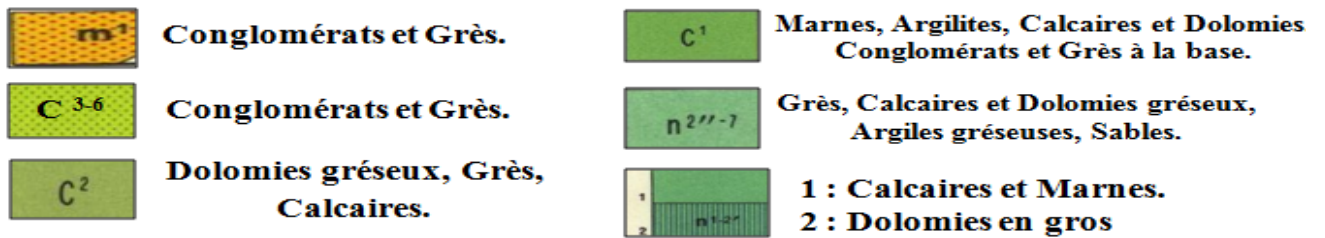
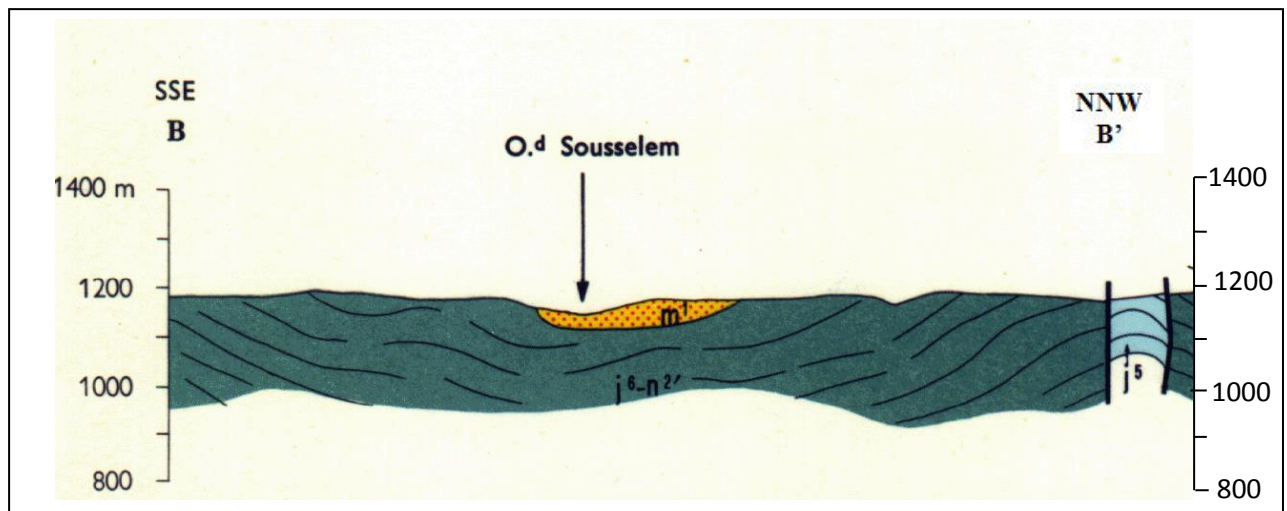


Fig.12 : Coupe géologique (CC') dans la zone d'étude. (Carte géologique de Sougueur 1/50.000, SDG 1980).



La légende :

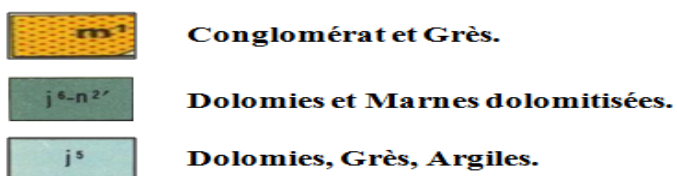


Fig.13 : Coupe géologique (BB') dans la zone d'étude. (Carte géologique de Sougueur 1/50.000, SDG 1980).

**Conclusion**

La zone d'étude est recouverte en majorité par des dépôts hétérogènes du Plio-Quaternaire, avec des pointements de terrains d'âge Jurassique et Crétacé qui se localisent sur les bordures. Il présente des variations d'épaisseur et une grande diversité de faciès. A l'Ouest de notre secteur d'étude, le Plio-Quaternaire repose directement sur le Crétacé qui disparaît à l'Est. Vers le Sud, ce même Plio-Quaternaire se biseaute et repose directement en discordance sur les dépôts du Crétacé (**CARATINI C., 1970**).

Cette région d'étude est très disloquée avec des failles verticales résultant de mouvement de compression dû à la tectonique alpine et des contacts anormaux.

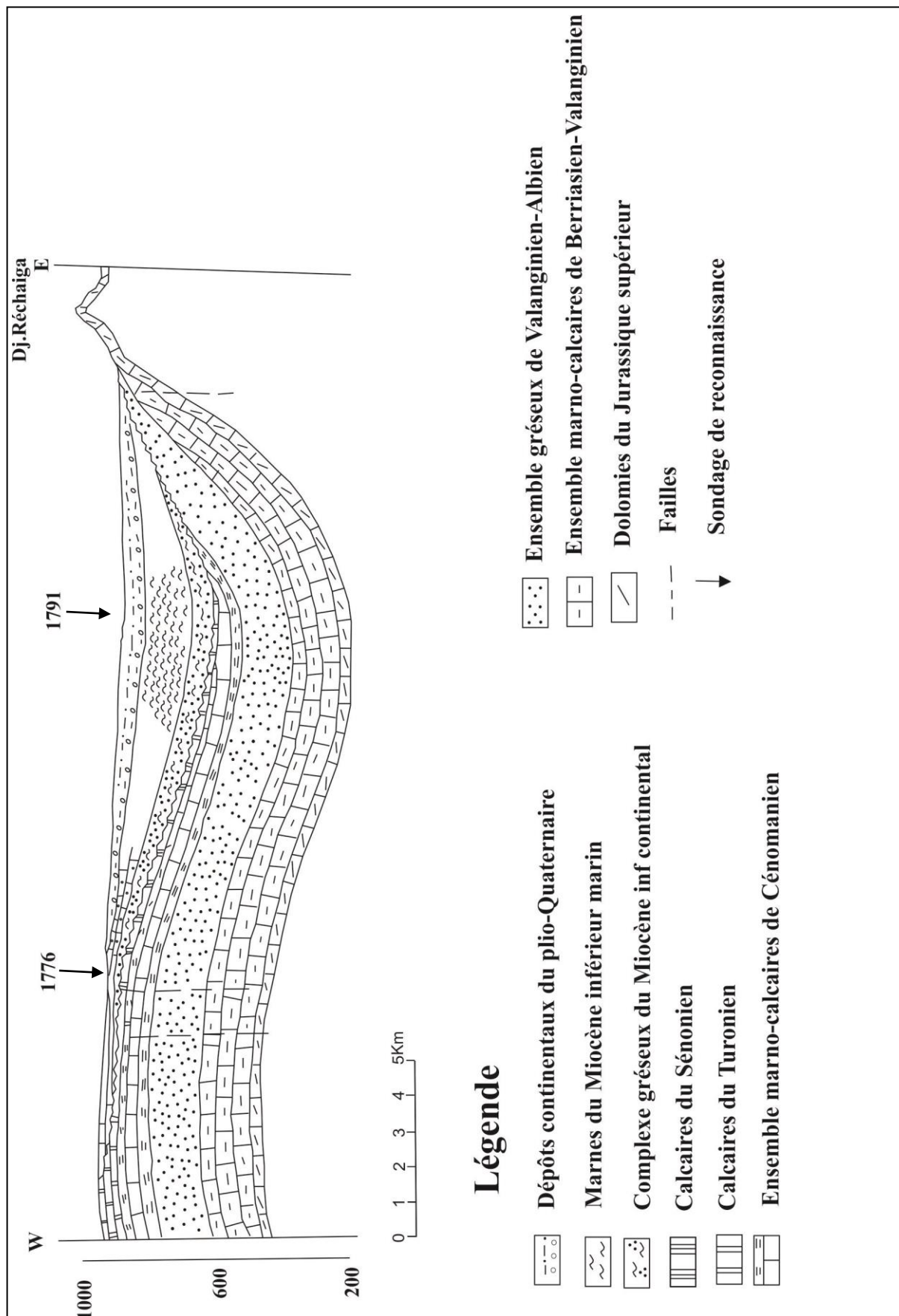


Fig.14 : Coupe géologique synthétique de la zone d'étude (in Feghoul A., 1987).

***CHAPITRE II***  
***HYDROCLIMATOLOGIE***

**1. Introduction**

Les facteurs climatiques jouent un rôle très important dans le comportement hydrologique et hydrogéologique des aquifères, ainsi deux groupes de facteurs interviennent pour fixer le climat :

- Les facteurs géographiques : latitude, altitude, éloignement de la mer, orientation des versants vis-à-vis des vents pluvieux.
- D'autre part, les facteurs purement météoriques, liés au déplacement des masses d'air et des systèmes perturbés (front polaire, front polaire dérivé, front méditerranéen, front des Alizés). Les données climatologiques intéressant notre secteur d'étude proviennent de deux stations : Ain Bouchekif (1986-2015) et Sougueur (1999-2015).

**Tableau n°01** : Situation géographique des stations d'observations.

<b>Stations</b>	<b>X(UTM)</b>	<b>Y(UTM)</b>	<b>Z(m)</b>
Station d'Ain Bouchekif	361 514.01	3 912 160.19	976
Station de Sougueur	365 874.05	3 914 123.29	1050

**2. Analyse des paramètres climatiques**

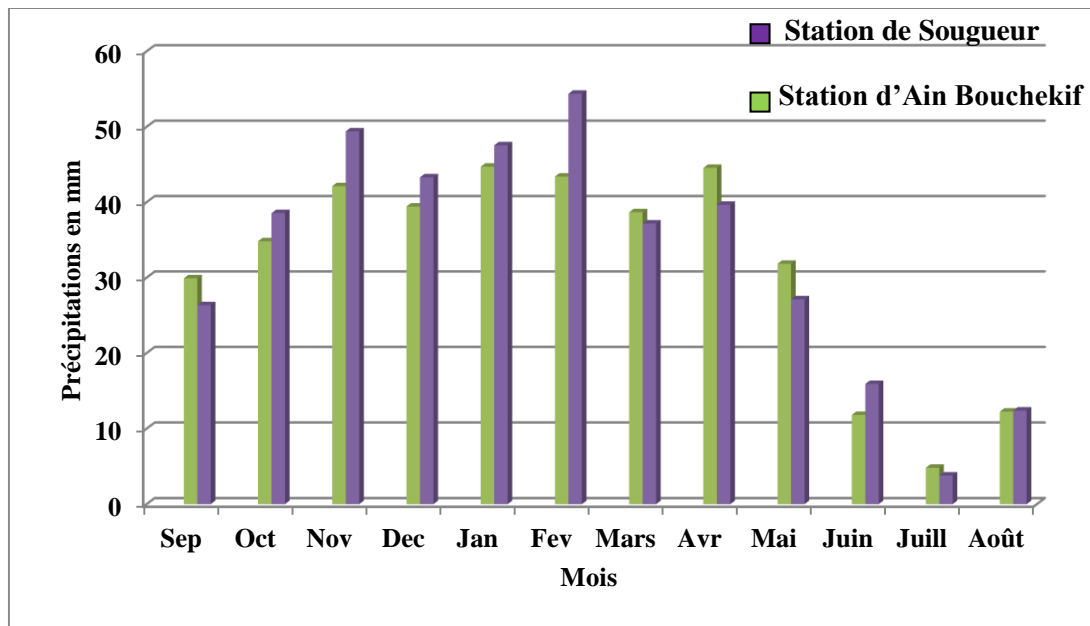
**2.1. Les précipitations** (voir annexe n°01 et annexe n°02)

La pluie est un facteur très important qui conditionne l'écoulement saisonnier et influe directement sur le régime des cours d'eaux, ainsi que celui des nappes.

**2.1.1. Précipitations moyennes mensuelles**

**Tableau n°02** : Les variations des précipitations moyennes mensuelles en (mm) des deux stations (Ain Bouchekif et Sougueur).

<b>Mois</b> <b>Station</b>	<b>Sep</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dec</b>	<b>Jan</b>	<b>Fev</b>	<b>Mars</b>	<b>Avr</b>	<b>Mai</b>	<b>Juin</b>	<b>Juill</b>	<b>Août</b>	<b>Total</b>
<b>Ain Bouchekif</b>	29,90	34,81	42,12	39,41	44,7	43,39	38,66	44,54	31,83	11,80	4,81	12,24	<b>378,26</b>
<b>Sougueur</b>	26,33	38,55	49,38	43,29	47,54	54,38	37,16	39,65	27,12	15,9	3,78	12,38	<b>395,50</b>



**Fig.15** : Histogramme des précipitations moyennes mensuelles des deux stations.

L'histogramme des précipitations mensuelles montre que :

Pour la station d'Ain Bouchekif, le mois le plus pluvieux est le mois de Janvier et le mois de Février pour la station de Sougueur ; une période sèche s'observe pendant les mois de Juin, Juillet pour les deux stations.

### 2.1.2. Précipitations saisonniers

La méthode consiste à grouper les mois trois à trois de sorte que le mois initial de chaque trimestre ou saison contenue soit un solstice, soit un équinoxe. Il en résulte quatre totaux pluviométriques saisonniers qui sont :

Hiver (Janvier, Février, Mars) = 90 jours.

Printemps (Mars, Avril, Mai) = 92 jours.

Été (Juin, Juillet, Août) = 92 jours.

Automne (Septembre, Octobre, Novembre) = 91 jours.

Les précipitations saisonnières par station sont données au tableau n°03 :



Tableau n°03 : Précipitations saisonnières.

Station	Moyenne saisonnière	Automne	Hiver	Printemps	Eté	Indice saisonnier
Ain Bouchekif	mm	106,83	127,5	115,03	28,85	H.P.A.E
	%	28,24	33,70	30,41	7,62	
Sougueur	mm	114,26	145,21	103,93	32,06	H.A.P.E
	%	28,89	36,71	26,27	8,10	

La distribution des précipitations saisonnières sont rapportées sur la figure n°16.

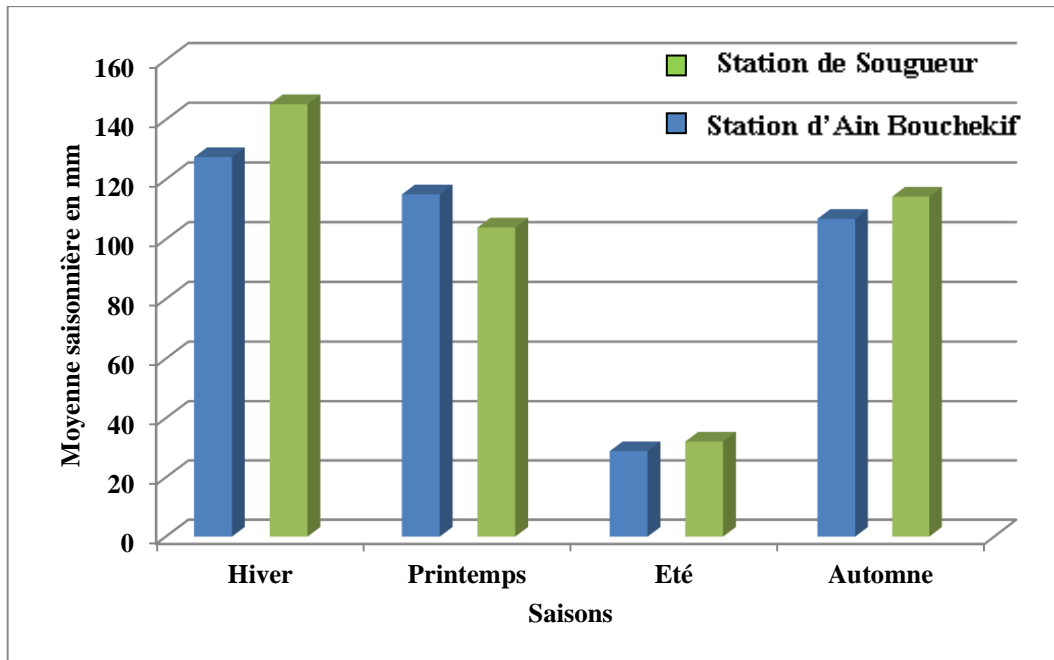


Fig.16 : Histogramme des précipitations saisonnières des deux stations.

Les résultats montrent que l’hiver avec des pourcentages variant de 36,71 % à 33,70 % est la saison la plus pluvieuse. L’été correspond à la saison la plus sèche (8,10 à 7,62 %).

2.1.3. Précipitations annuelles (Voir annexe n°03, annexe n°04)

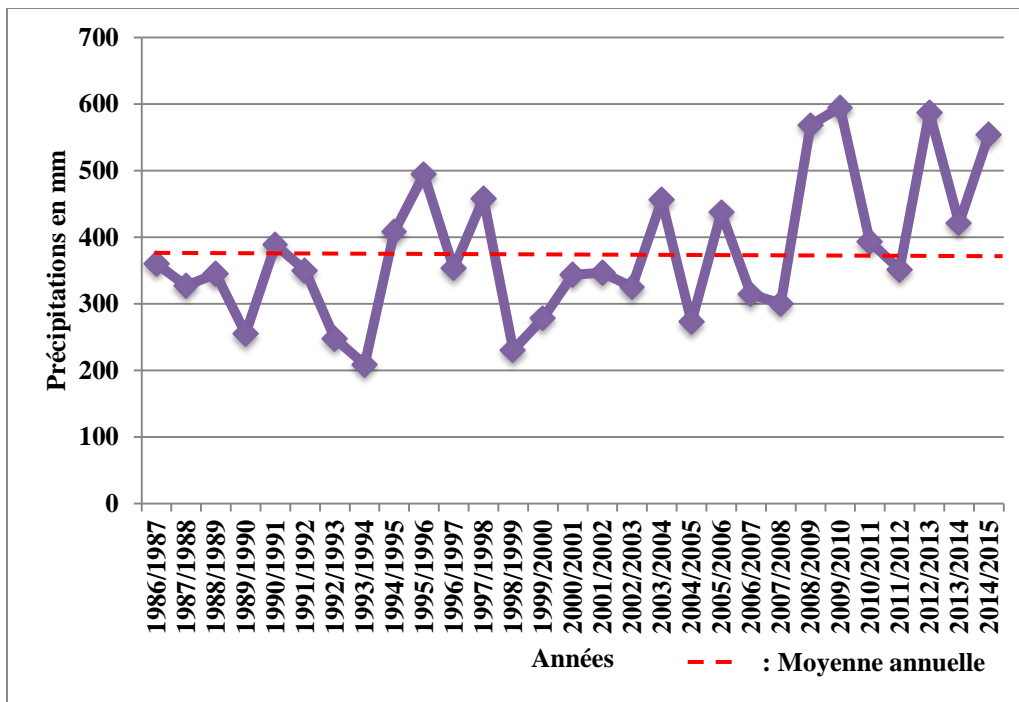


Fig.17 : Précipitations annuelles à la station d'Ain Bouchekif (1986-2015).

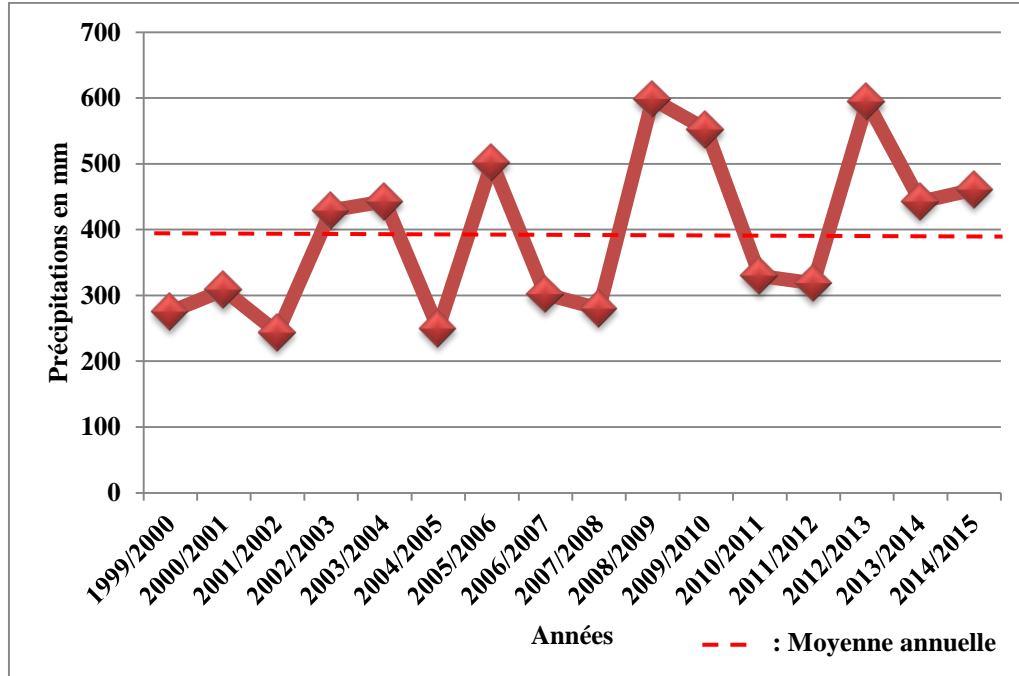


Fig.18 : Précipitations annuelles à la station de Sougueur (1999-2015).

Les figures fig.17 et fig.18 visualise l'évolution de la pluviométrie annuelle sur une période moyenne pour la station d'Ain Bouchekif (1986-2015) et Sougueur (1999-2015) et entre les deux stations, les précipitations varient fortement comme le montre le caractère en dents de scie des profiles pluviométriques annuels.

La variabilité des données des précipitations mensuelles est exprimée par un paramètre permettant de distinguer les années excédentaires de celles déficitaires. C'est le " coefficient pluviométrique " ( $C_p$ ) obtenu par le rapport de la pluviométrie d'une année à la pluviométrie moyenne de toute la série d'observation.

Il est donc en relation proportionnelle avec la pluviométrie et on a :

$$C_p = P/P_{moy}$$

Où :

**$C_p$**  : Coefficient pluviométrique.

**$P$**  : Pluviométrie annuelle de l'année en (mm).

**$P_{Moy}$**  : Pluviométrie moyenne annuelle en (mm).

- Une année est dite excédentaire (AE) Si :  **$C_p > 1$** .
- Une année est dite déficitaire (AD) Si :  **$C_p < 1$** .

Il y a 17 années déficitaires et 12 années excédentaires à la station d'Ain Bouchekif tandis que la station de Sougueur regroupe huit années déficitaires et huit années excédentaires (Voir annexe n°05 et annexe n°06).

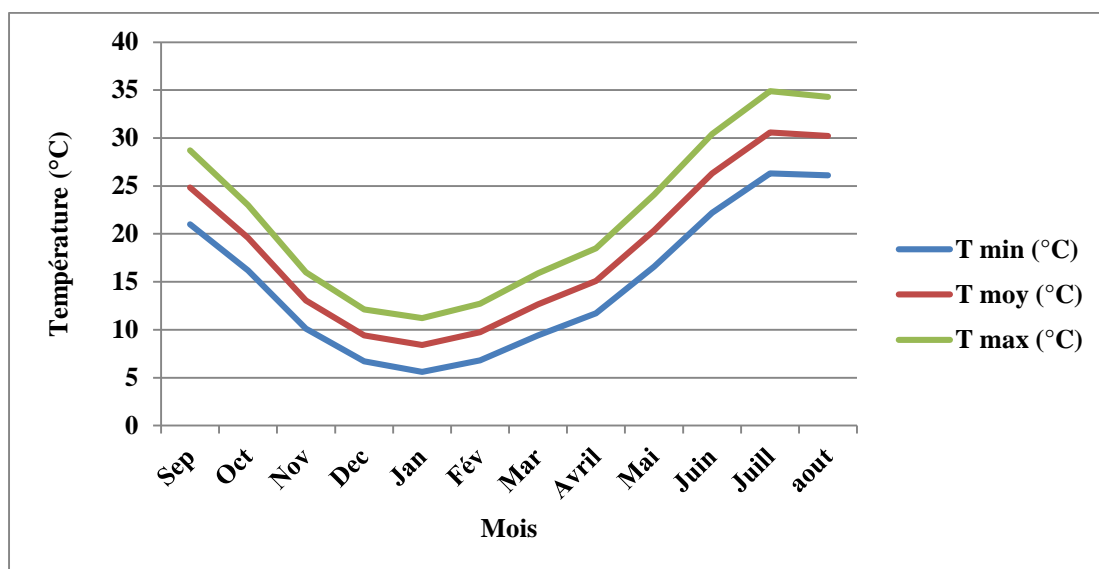
## 2.2. Température

Si elle constitue l'un des éléments majeurs permettant de définir le climat d'une région, pour l'hydrogéologue, la température est en outre l'un des termes essentiels dans la définition du déficit d'écoulement et l'établissement du bilan hydrique. Pour le secteur qui nous intéresse, seule une station a fonctionné durant un temps suffisamment long pour y être prise en compte ; c'est la station d'Ain Bouchekif qui fonctionne depuis 1986 jusqu'à nos jours (tableau n°04).

- Les minimas : de Décembre à Mars, ils sont inférieurs à 10 °C et la valeur la plus basse se présente en Janvier 5 °C (fig.19).
- Les maximas : ils s'échelonnent de 11 °C en Janvier à 34 °C en Juillet (fig.19).
- La température moyenne annuelle est de l'ordre de 18 °C.

**Tableau n°04 :** Températures moyennes mensuelles des minimas, des maximas, et leur moyenne au niveau de la station d’Ain Bouchekif (1986-2015).

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fév	Mar	Avril	Mai	Juin	Juill	aout	Moy
<b>T min (°C)</b>	21	16,2	10,1	6,7	5,6	6,8	9,4	11,7	16,6	22,2	26,3	26,1	<b>14,89</b>
<b>T moy (°C)</b>	24,85	19,6	13,05	9,4	8,4	9,75	12,65	15,1	20,35	26,3	30,6	30,2	<b>18,35</b>
<b>T max (°C)</b>	28,7	23	16	12,1	11,2	12,7	15,9	18,5	24,1	30,4	34,9	34,3	<b>21,81</b>



**Fig.19 :** Températures minimales, moyennes, maximales mensuelles à la station d’Ain Bouchekif (1986-2015).

### 2.3. Humidité relative

La température de l’air, la durée de l’insolation et l’humidité relative de l’air interviennent dans l’estimation de l’évaporation potentielle qui sera soustraite aux précipitations. Ces données physiques sont essentielles pour le calcul du taux d’infiltration de l’eau vers la nappe.

**Tableau n°05 :** Variations mensuelles d’humidité de la station d’Ain Bouchekif (1986-2015).

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fév	Mar	Avril	Mai	Juin	Juill	Août	Moy annuelle
<b>Humidité en(%)</b>	55	65	76	81	79	76	71	67	61	48	39	40	63,16

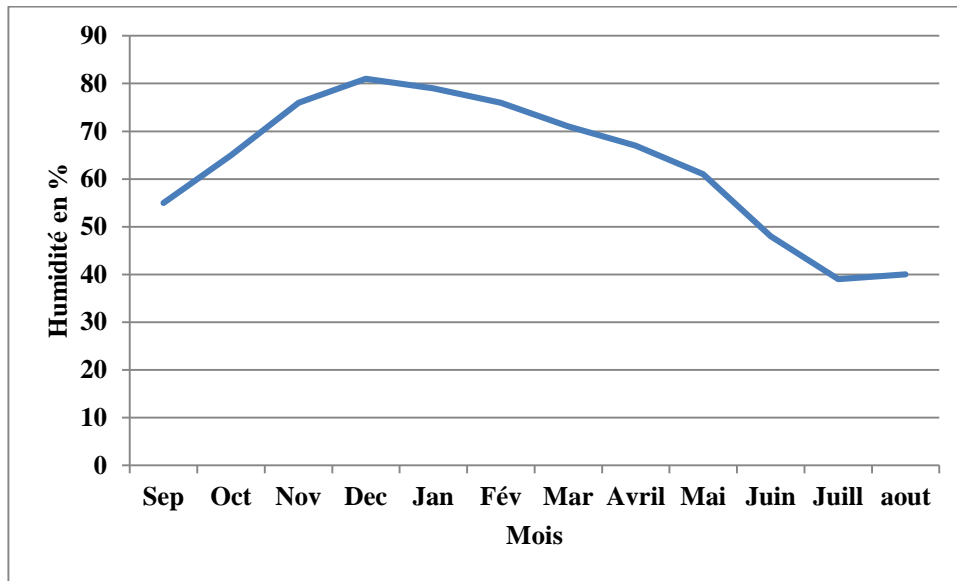


Fig.20 : Humidité mensuelle à la station d’Ain Boucekif (1986-2015).

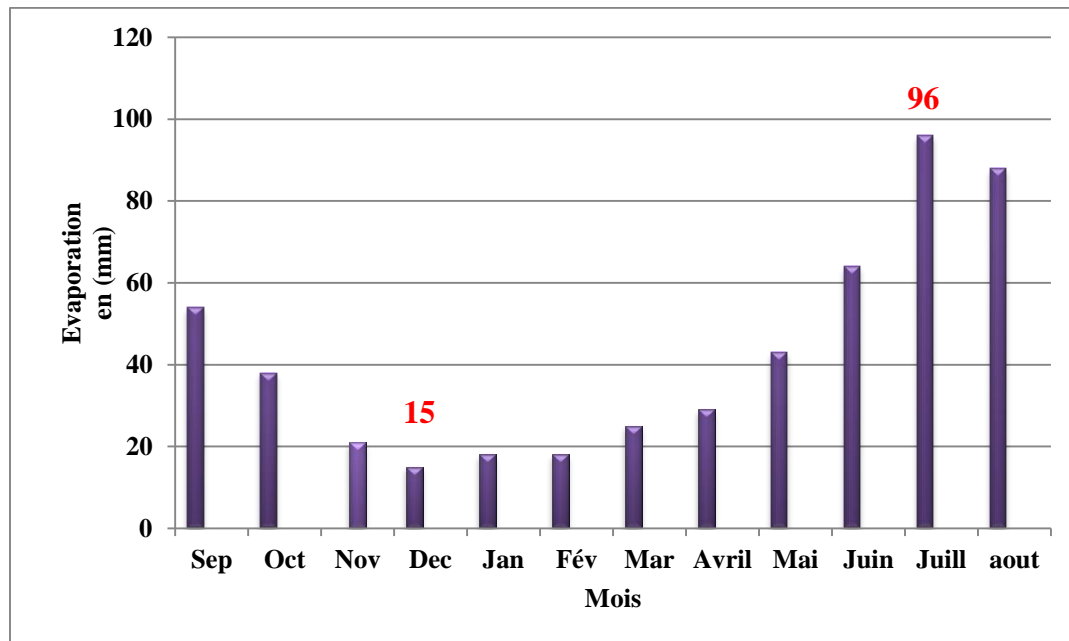
D’après l’histogramme de répartition (fig.20), on remarque que les moyennes mensuelles de l’humidité dans notre région sont au dessus de la médiane (50 %), sauf pour les mois de Juin, Juillet et Août. La moyenne annuelle d’humidité est de : 63,16%.

**2.4. L’évaporation**

L’effet de l’évaporation sur les réserves hydriques est important. Elle est accentuée et favorisée par les vents en périodes sèches, l’évaporation est considérée comme la quantité retranchée de la réserve hydrique et par conséquent elle est prise en compte dans le calcul du volume utile des retenues.

**Tableau n°06** : L’évaporation moyenne mensuelle de la station d’Ain Boucekif (1986-2015).

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juill	aout	Total
<b>Evaporation en (mm)</b>	54	38	21	15	18	18	25	29	43	64	96	88	509



**Fig.21** : L'évaporation moyenne mensuelle à la station d'Ain Bouchekif (1986-2015).

La variation mensuelle est représentée par la (fig.21) et le tableau n°06, avec un minimum en décembre (15 mm), le maximum en Juillet (96 mm). L'évaporation totale annuelle est égale de 509 mm.

### 3- Régime climatique

La notion de climat est extrêmement fluide. A défaut de pouvoir le définir directement, les différents auteurs ayant à s'occuper de cette question ont proposé un certain nombre d'indices permettant par analogie de préciser le domaine de variations des paramètres météorologiques puis les caractérisent.

A notre tour, nous appliquons ces méthodes aux stations retenues d'Ain Bouchekif et de Sougueur :

- ❖ Méthode pluviothermique.
- ❖ Méthode d'Euverte.

#### 3.1. Méthode Pluviothermique de Bagnouls et Gaussen

Pour Gaussen et Bagnouls, un mois sec c'est celui où le total moyen des précipitations exprimé en (mm) est égal ou inférieur au double de la température moyenne exprimé en (°C).

Cette relation permet d'établir un diagramme pluviothermique sur lequel les températures sont portées sur une échelle double des précipitations.

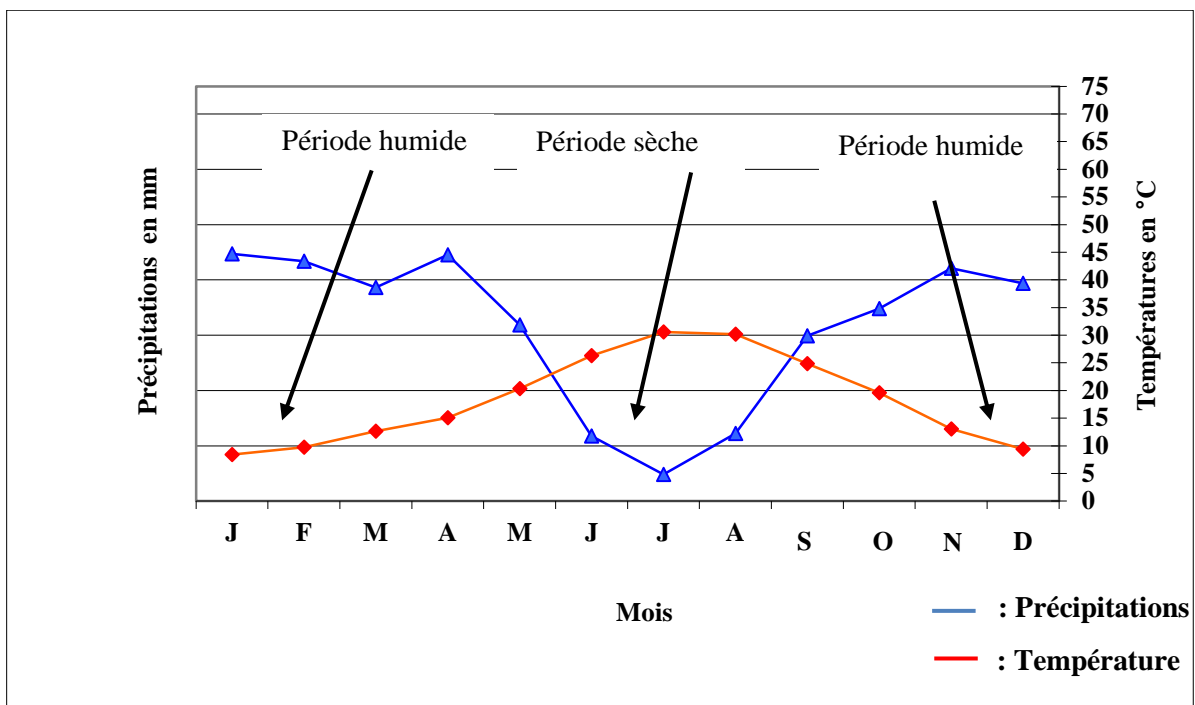


Fig. 22 : Diagramme Pluviothermique à la station d’Ain Bouchekif (1986-2015).

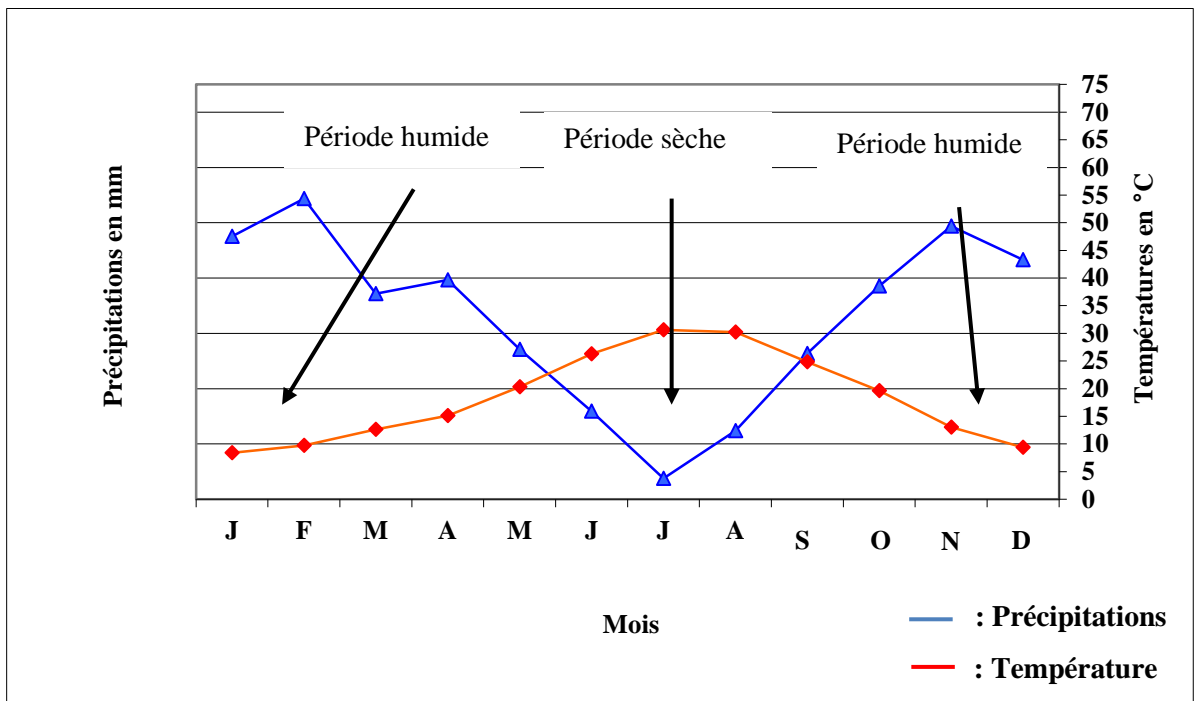


Fig.23 : Diagramme Pluviothermique à la station de Sougueur (1999-2015).

Nous constatons d'après les figures (fig.22, fig.23) que pour les deux stations, la courbe de précipitations se situe au dessus de la courbe thermique d'Octobre au mois de Mai (période excédentaire) tandis qu'au mois de Mai à Septembre, elle se situe au dessous de la courbe thermique définissent ainsi la période déficitaire.

**3.2. Méthode d'Euverte (Ombrothermique)**

Le diagramme Ombrothermique comporte une échelle des températures à progression linéaire et une échelle des précipitations à progression logarithmique.

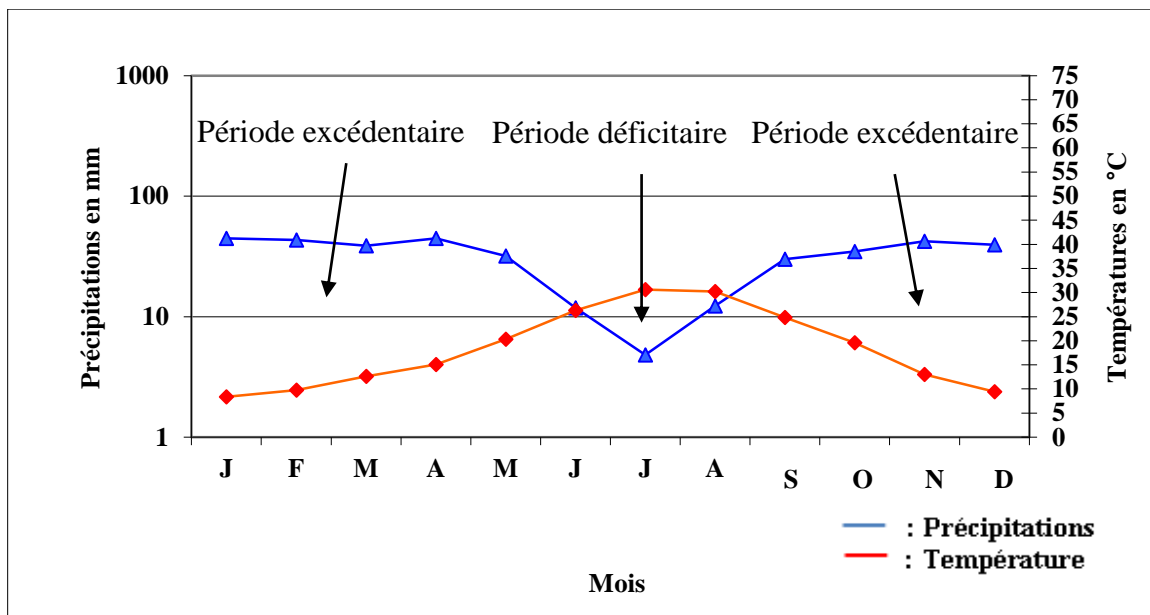


Fig. 24 : Diagramme Ombrothermique à la station d'Ain Bouchekif (1986-2015).

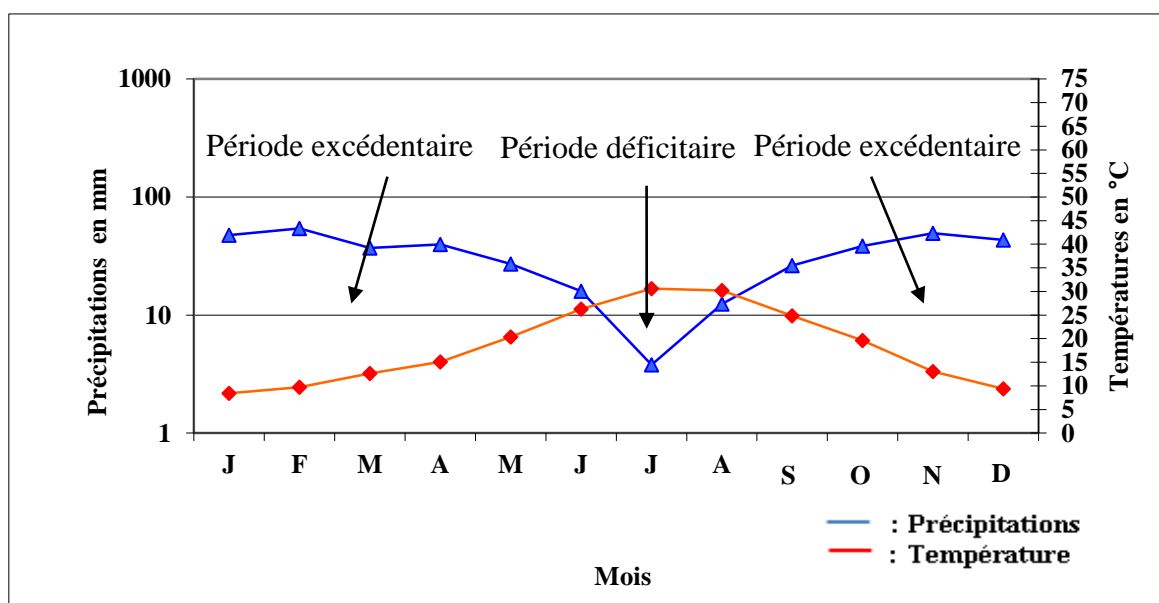


Fig. 25 : Diagramme Ombrothermique à la station de Sougueur (1999-2015).



D'après les figures (fig.24, fig.25), on constate que la période excédentaire commence dès le mois de Septembre jusqu'au mois de Juin, tandis que la période déficitaire s'étale du mois de Juin jusqu'au mois d'Août.

Le rapport P/T établie mensuellement nous permet de définir trois types de régimes :

Si :  $P/T < 1$   $\implies$  Régime très sec « Euméditerranien » (R.T.S).

Si :  $1 < P/T < 2$   $\implies$  Régime sec (R.S).

Si :  $2 < P/T < 3$   $\implies$  Régime sub-humide (R.S.H).

Si :  $P/T > 3$   $\implies$  Régime humide ou de station de montagne (R.H).

**Tableau n°07** : Valeurs du rapport P/T pour la station d'Ain Bouchekif (1986-2015) et la station de Sougueur (1999-2015).

Mois Station	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juill	Août
	<b>S.Ain Bouchekif</b>	1,2	1,77	3,22	4,19	5,32	4,45	3,05	2,94	1,56	0,44	0,15
<b>Régime</b>	R.S	R.S	R.H	R.H	R.H	R.H	R.H	R.S.H	R.S	R.T.S	R.T.S	R.T.S
<b>S.Sougueur</b>	1,06	1,97	3,78	4,61	5,66	5,58	2,94	2,63	1,33	0,60	0,12	0,41
<b>Régime</b>	R.S	R.S	R.H	R.H	R.H	R.H	R.S.H	R.S.H	R.S	R.T.S	R.T.S	R.T.S

4. Indices climatiques

Les indices climatiques une meilleure connaissance du type de climat qui règne dans la région et caractérise aussi le domaine méditerranéen.

4.1. Indice d'aridité de De Martonne

4.1.1. Indice d'aridité annuelle

De Martonne (1923) a défini un indice d'aridité :  $I = P / T + 10$ , dans lequel **P** représente les précipitations moyennes annuelles en mm et **T** les températures moyennes annuelles en °C (tableau n°08).

Tableau n°08 : Indice d'aridité de De Martonne au niveau des deux stations.

Station \ Paramètres	P (mm)	T (°C)	I
Station d'Ain Bouchekif	378,26	18,35	<b>13,34</b>
Station de Sougueur	395,5	18,35	<b>13,95</b>

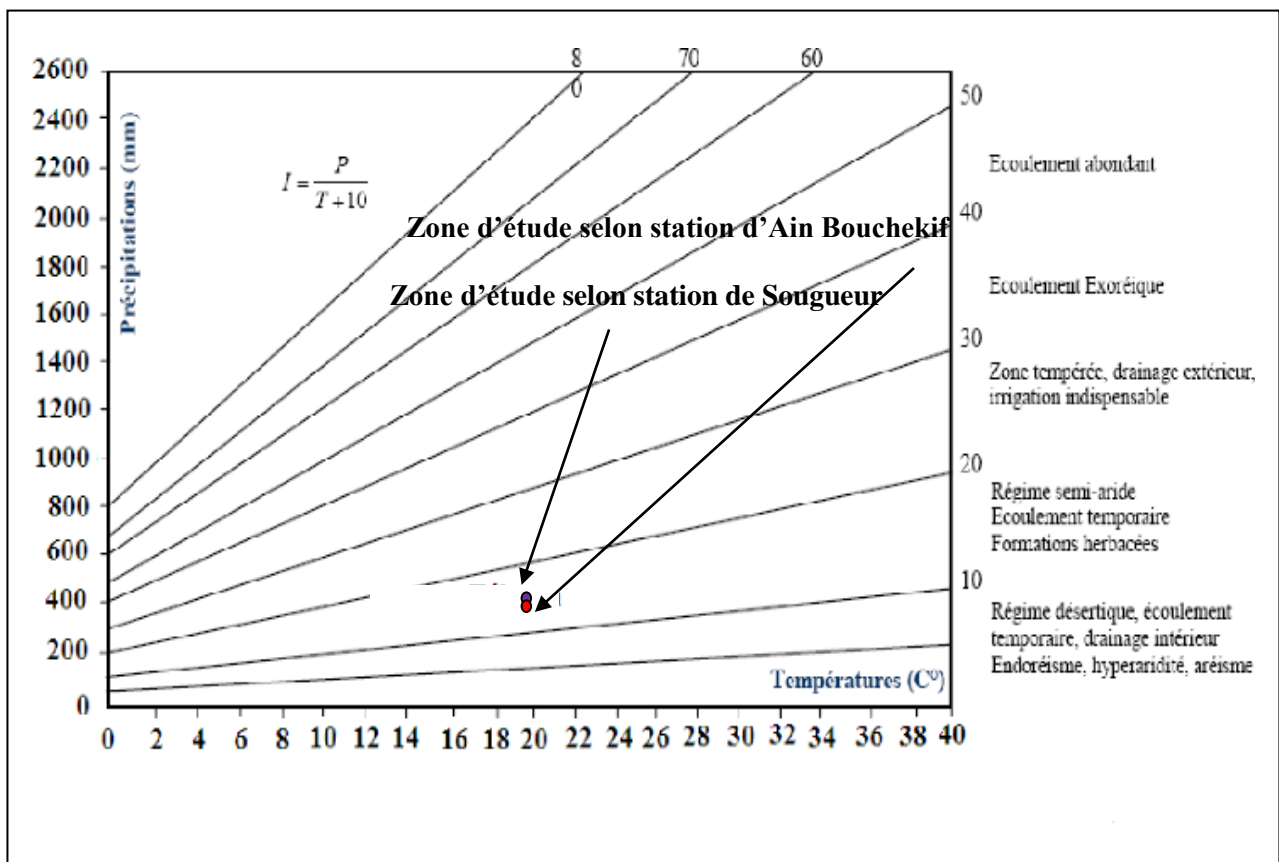


Fig.26 : Abaque de l'indice d'aridité annuel De Martonne.

Les stations dont l'indice calculé est compris entre 10 et 20 sont considérées comme semi-arides, avec des écoulements temporaires et une végétation herbacée.

**4.1.2. Indice d'aridité mensuelle**

Pour préciser cette notion d'aridité, les élèves de De Martonne ont établi la relation :  $I = 12 * P / T + 10$  qui permet de calculer les indices d'aridité à l'échelle mensuelle.

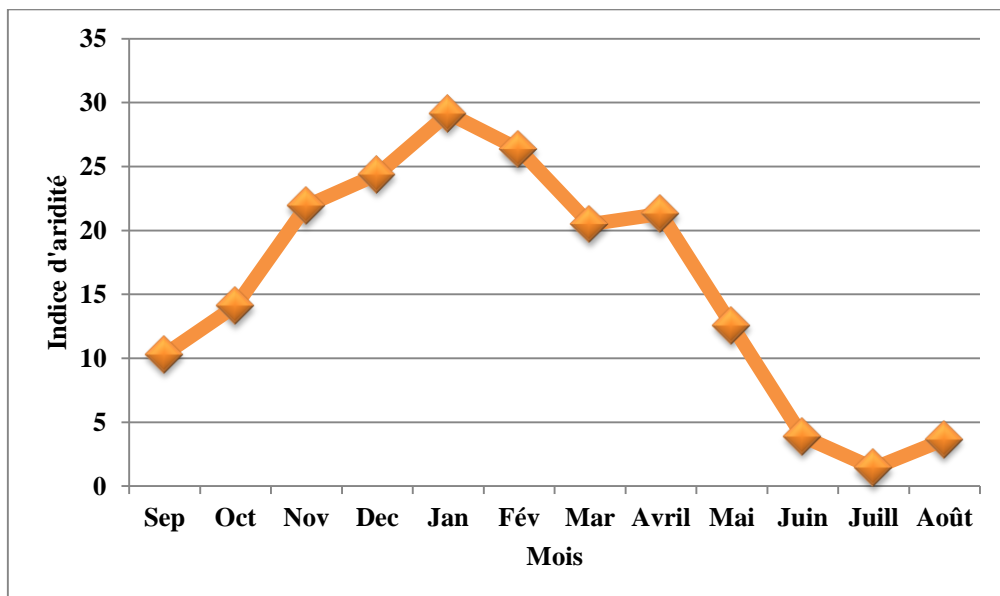
**P** : les précipitations moyennes mensuelles en mm.

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

Après calcul, nous avons obtenus les résultats suivants :

**Tableau n°09** : Les valeurs de I calculées pour la station d'Ain Bouchekif (1986-2015).

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juill	Août
<b>P Moy mensuelle(mm)</b>	29,9	34,81	42,12	39,41	44,7	43,39	38,66	44,54	31,83	11,8	4,81	12,24
<b>T Moy mensuelle en (°C)</b>	24,85	19,6	13,05	9,4	8,4	9,75	12,65	15,1	20,35	26,3	30,6	30,2
<b>Indice d'aridité mensuelle I</b>	10,29	14,11	21,92	24,37	29,15	26,36	20,48	21,29	12,58	3,90	1,42	3,65



**Fig.27** : Indice d'aridité mensuelle à la station d'Ain Bouchekif (1986-2015).

Tableau n°10 : Les valeurs de I calculées pour la station de Sougueur (1999-2015).

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fév	Mar	Avril	Mai	Juin	Juill	Août
<b>P Moy mensuelle(mm)</b>	26,33	38,55	49,38	43,29	47,54	54,38	37,16	39,65	27,12	15,9	3,78	12,38
<b>T Moy mensuelle en (°C)</b>	24,85	19,6	13,05	9,4	8,4	9,75	12,65	15,1	20,35	26,3	30,6	30,2
<b>Indice d'aridité mensuelle I</b>	9,06	15,62	25,70	26,77	31	33,04	19,68	18,95	10,72	5,25	1,11	3,69

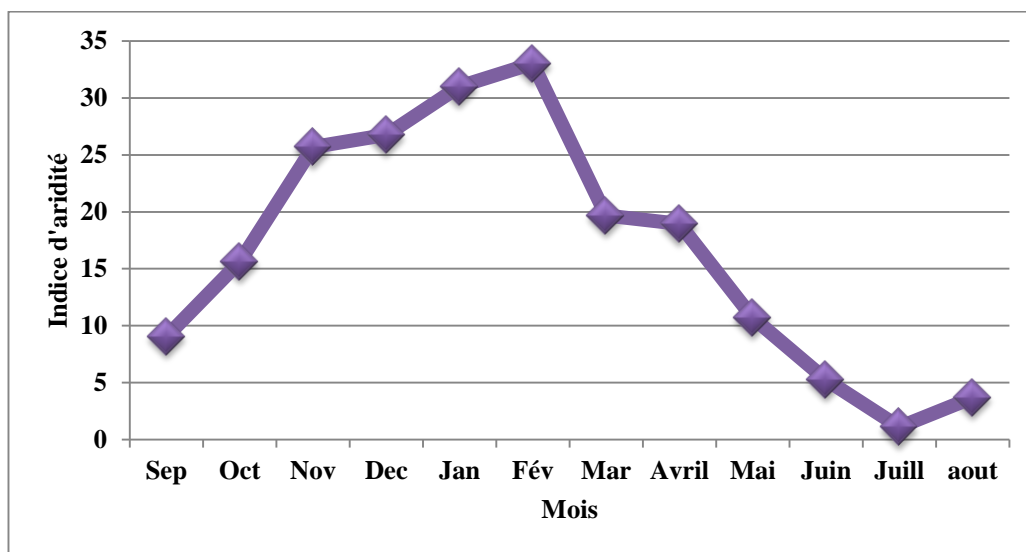


Fig.28 : Indice d'aridité mensuelle à la station de Sougueur (1999-2015).

Quatre périodes bien distinctes apparaissent sur l'une et l'autre station.

1. Pour les mois de Novembre, Décembre, Janvier, Février, Mars et Avril (station d'Ain Bouchekif), l'indice climatique est supérieur à 20, donc sub humide, de même pour la station de Sougueur (Novembre, Décembre, Janvier et Février).
2. Pour les mois de Mai, Septembre et Octobre (station d'Ain Bouchekif), et les mois de Mars, Avril, Mai et Octobre pour la station de Sougueur, période semi-aride pour  $10 < I < 20$ .
3. Pour les mois de Juin et Septembre (la station de Sougueur), le climat est de type désertique, mais il est absent au niveau de la station d'Ain Bouchekif  $5 < I < 10$ .
4. Les mois de Juin, Juillet et Août, nous montre un régime d'hyper-aridité  $I < 5$  à la station d'Ain Bouchekif et Juillet, Août pour la station de Sougueur.

Cette variation d'aridité définit bien le climat méditerranéen, sec en été, doux en hiver.

#### 4.2. Le climagramme d'Emberger

Pour préciser le type climatique qui caractérise la région, Louis Emberger s'est basé sur les limites des aires occupées par les différentes associations végétales.

Il propose d'utiliser la relation suivante :

$$Qz = 2000 * P / M^2 - m^2$$

**P** : les précipitations annuelles moyennes en mm.

**M** : la température des maxima du mois le plus chaud en °K.

**m** : la température des minima du mois le plus froid en °K.

**Qz** : Quotient d'Emberger.

**Tableau n°11** : Les résultats des indices d'Emberger pour nos stations.

Station \ Paramètres	P (mm)	M (°K)	m (°K)	Qz
Station d'Ain Bouchekif	378,26	307,9	278,6	44,02
Station de Sougueur	395,5	307,9	278,6	46,02

Cette valeur est ensuite reportée sur le climagramme qui comporte :

- en ordonnée : les valeurs de " Qz ".
- en abscisse : la moyenne des minima du mois le plus froid.

L'examen des résultats (climagramme de L. Emberger) montre que le climat de la région étudiée est caractérisé par un climat semi aride (fig.29).

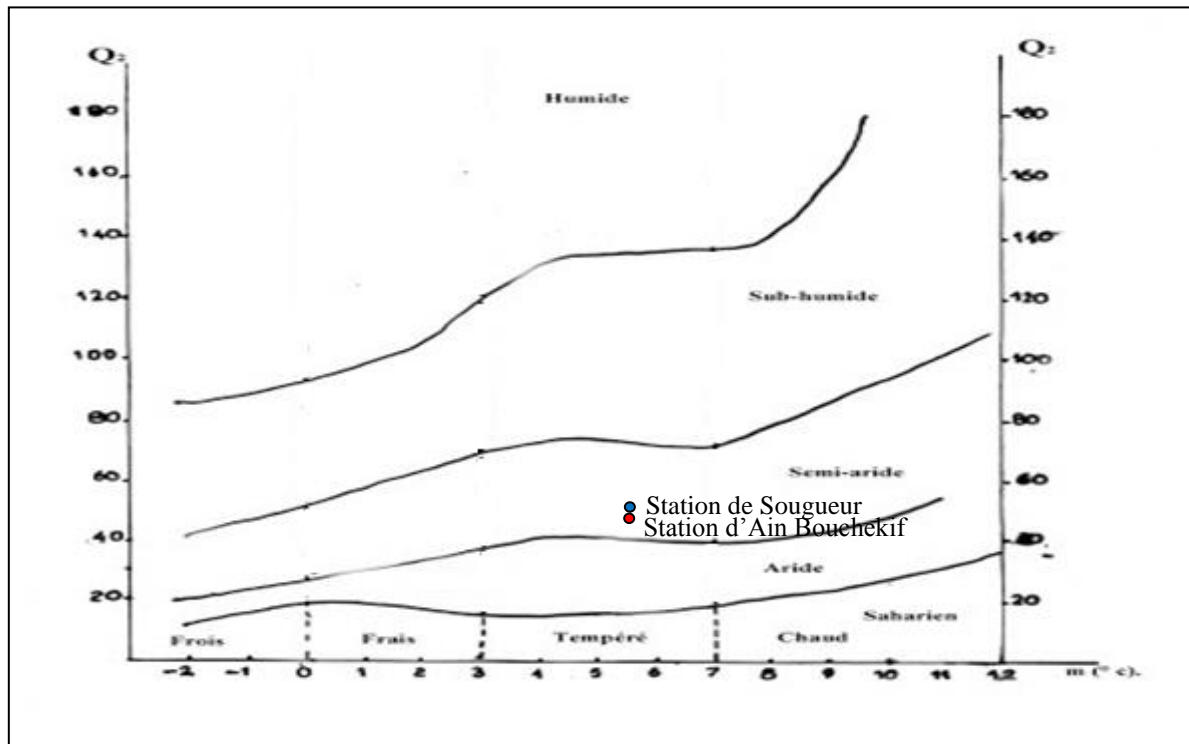


Fig. 29 : Position de la zone d'étude dans le climatogramme d'Emberger.

4.3. Indice de Stewart

Nous tenons compte ici de l'indice pluviométrique calculé par la formule suivante :

$$Q_r = 3,43 * P / (M - m)$$

Avec : **P** : moyennes des précipitations annuelles en mm.

**M** : moyennes des températures maximales du mois le plus chaud en °C.

**m** : moyennes des températures minimales du mois le plus froid en °C.

Nous avons obtenus les résultats suivants :

Tableau n°12 : Indices de Stewart.

Station \ Paramètres	P (mm)	M (°C)	m (°C)	Qr
Station d'Ain Bouchekif	378,26	34,9	5,6	44,28
Station de Sougueur	395,5	34,9	5,6	46,29

Les valeurs de Qr étant compris entre 10 et 50, donc selon Stewart, notre secteur d'étude se situe dans un climat semi-aride.

#### 4.4. Indice de continentalité de Kerner

Kerner a établi cet indice pour mieux connaître l'influence maritime sur une région, c'est-à-dire préciser son degré de continentalité qui est donné par la relation suivante :

$$K_r = 100 T_0 - T_A/A$$

Avec :

**T<sub>0</sub>** : température moyenne d'octobre en °C.

**T<sub>A</sub>** : température moyenne d'avril en °C.

**A** : différence des températures moyennes des mois le plus chaud et le plus froid.

**K<sub>r</sub>** : l'indice de Kerner

**Tableau n°13** : Indices de Kerner (la station d'Ain Bouchekif 1986-2015).

<b>T<sub>0</sub> (°C)</b>	<b>T<sub>A</sub> (°C)</b>	<b>A (°C)</b>	<b>K<sub>r</sub></b>
19,6	15,1	22,2	20,27

Pour le sous bassin versant de l'Oued Souslem **K r = 20,27**. En comparant cette valeur avec celle :

- des zones côtières **Kr > 32**
- des zones des hauts plateaux **Kr > 16**
- des zones de l'Atlas Saharien **Kr > 2**

On constate que notre bassin présente les mêmes caractéristiques des hauts plateaux.

Les indices climatiques calculés par les différentes méthodes aboutissent aux mêmes résultats et définissent un climat méditerranéen semi-aride, caractérisé par un hiver doux et humide, sec et chaud en été. Nous limitons notre conclusion au tableau n°14 qui résume l'ensemble des résultats obtenus à partir des différentes méthodes.

Tableau n°14 : Les indices climatiques.

Indice Station	Echelle mensuelle			Année moyenne		
	Gausсен et Bagnouls	Euverte	De Martonne	Emberger	Stewart	Kerner
<b>Ain Bouhekif</b>	Période excédentaire Oct→Mai Période déficitaire Mai→Sep	Période excédentaire Sep→Juin Période déficitaire Juin→Août	Période sub-humide Nov→Avr Période hyper-aride Juin→Août	Semi- aride	Semi- aride	Hauts plateaux
<b>Sougueur</b>	Période excédentaire Oct→Mai Période déficitaire Mai→Sep	Période excédentaire Sep→Juin Période déficitaire Juin→Août	Période sub-humide Nov→Fév Période hyper-aride Juil→Août	Semi- aride	Semi- aride	Hauts plateaux

### 5. Evapotranspiration et déficit d'écoulement

L'établissement du bilan hydrique d'une région consiste à évaluer la répartition des précipitations reçues sur une surface, entre les différentes composantes suivantes :

Evapotranspiration réelle (ETR), Ruissellement (R) et l'infiltration dans le sous sol (**Castany G. 1982**).

L'équation du bilan hydrique s'exprime par la relation :

$$P = ETR + R + I$$

Avec : **P** : Précipitations moyennes mensuelles en (mm).

**ETR** : l'Evapotranspiration Réelle en (mm).

**I** : infiltration. Si  $I > 0$  les entrées sont supérieures aux sorties.

Si : **I** < 0 les entrées sont inférieures aux sorties.

**R** : Ruissellement moyen annuel en (mm).



En plus des précipitations et de l'écoulement qui sont mesurés aux stations climatologiques et hydrométriques, l'établissement du bilan hydrique nécessite aussi la connaissance du paramètre " évaporation", dont l'approche est plus complexe. Quant au dernier membre de l'équation, l'infiltration efficace, difficile à estimer directement, est déduite après la détermination des 3 autres paramètres (**P, ETR, R**).

Les précipitations et l'écoulement étant connus, nous donnons, ci- dessous, une approche de l'évapotranspiration potentielle et réelle, par des méthodes empiriques.

**Remarque :** Nous avons pris la station d'Ain Bouchekif pour le calcul du bilan hydrique, car elle est la station principale de la région avec une série de mesures assez importante.

### 5.1. Calcul de l'évapotranspiration potentielle et réelle

L'évapotranspiration potentielle (ETP) est la quantité d'eau pouvant être restituée à l'atmosphère par transpiration des êtres vivants et évaporation du sol et des surfaces d'eaux libres, si celui-ci contient en permanence la quantité d'eau suffisante, alors que l'évapotranspiration réelle (ETR) correspond à la quantité d'eau effectivement transpirée et évaporée.

#### 5.1.1. L'évapotranspiration potentielle (ETP)

On utilise la méthode de « **C.W Thornthwate** » pour le calcul de l'évapotranspiration potentielle (ETP), Selon cette méthode, l'estimation de l'ETP s'effectue à l'aide d'une formule empirique permettant de calculer le pouvoir évaporant (en mm) pour chaque mois.

$$\mathbf{ETP = 16 \times (10t / I)^a \times K}$$

Avec:  $\mathbf{a = (6,75 \cdot 10^{-7} \cdot I^3 - 771 \cdot 10^{-7} \cdot I^2 + 1792 \cdot 10^{-5} \cdot I + 0,49239)}$  ;  $\mathbf{I = \sum i}$  ;  $\mathbf{i = (t / 5)^{1,514}}$

Où :

**ETP** : Evapotranspiration Potentielle mensuelle en (mm).

**t** : température moyenne mensuelle en (°C).

**i** : indice thermique mensuel.

**I** : la somme des indices mensuels de l'année.

**K** : facteur correctif intégrant la durée d'insolation.

Les résultats sont portés au le tableau n°15 :

**Tableau n°15** : Résultats de l'ETP obtenus par la formule de «C.W.Thornthwaite» à la station d'Ain Bouchekif (1986-2015).

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fév	Mar	Avril	Mai	Juin	Juill	Août	Total
<b>T (°C)</b>	24,85	19,6	13,05	9,4	8,4	9,75	12,65	15,1	20,35	26,3	30,6	30,2	18,35
<b>i</b>	11,33	7,91	4,27	2,6	2,19	2,75	4,08	5,33	8,37	12,35	15,53	15,22	91,93
<b>ETPnc</b>	118,08	73,28	32,36	16,73	13,35	18,01	30,39	43,38	79,03	132,34	179,42	174,74	911,10
<b>K</b>	1,03	0,97	0,86	0,85	0,87	0,85	1,03	1,09	1,21	1,21	1,23	1,16	/
<b>ETPc (mm)</b>	121,62	71,08	27,83	14,22	11,61	15,31	31,30	47,29	95,62	160,13	220,69	202,69	1019,40

**ETPnc** : ETP non corrigée.

**ETPc** : ETP corrigée.

### 5.1.2. Evapotranspiration Réelle (ETR)

L'évapotranspiration réelle est la quantité d'eau effectivement évaporée et transpirée, elle est toujours égale ou inférieure à l'évapotranspiration potentielle.

Plusieurs méthodes de calcul peuvent être utilisées :

#### a. Méthode de Turc

La formule de Turc est applicable à tous les climats, elle basée sur le calcul de l'évapotranspiration réelle et donnée par la relation :

$$ETR = P / \sqrt{0,9 + (P^2 / L^2)}$$

Avec :

**ETR** : évapotranspiration réelle.

**P** : précipitations moyennes annuelles en mm.

**L** : pouvoir évaporant ( $L = 300 + 25T + 0,05T^3$ ).

**T** : température moyenne annuelle (°C).

**Tableau n°16** : Résultats de l'ETR obtenus par la formule de Turc pour la station d'Ain Bouchekif.

Station	Paramètres	P (mm)	T (°C)	L (°C)	ETR (mm)
Station d'Ain Bouchekif		378,26	18,35	1067,69	374,51

### b. Méthode de Coutagne

D'après Coutagne, le déficit d'écoulement équivalent de l'évapotranspiration réelle est donné par l'expression :

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

**D** = déficit d'écoulement en m.

**P** = précipitation moyenne annuelle en m.

**T** = température moyenne annuelle en °C.

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

- ❖ La formule n'est applicable que pour " P " compris entre :  $1 / 8 \lambda < P < 1/2 \lambda$
- ❖ Lorsque **P** est inférieure  $1/ 2 \lambda$  le déficit d'écoulement est égal à la précipitation.
- ❖ Lorsque **P** est supérieure à  $1 / 8 \lambda$  le déficit d'écoulement est pratiquement indépendant des précipitations et l'expression ci-dessus n'est plus applicable.

**Tableau n°17** : Résultats de  $\lambda$  pour la station d'Ain Bouchekif (1986-2015).

$\lambda$	$1/ 8 \lambda$	$1/ 2 \lambda$
0,29	0,43	1,72

Malheureusement, nous n'avons pas utilisé cette méthode parce qu'elle ne vérifie pas la condition d'application.

### c. Méthode de Wundt

L'hydrogéologue Wundt a établi un abaque modifié par coutagne qui permet d'obtenir une valeur du déficit d'écoulement en fonction de la température moyenne annuelle et des précipitations (fig.30), son application nous a donné pour la station d'Ain Bouchekif **D = 350 mm** et pour la station de Sougueur **D = 362,5 mm**.

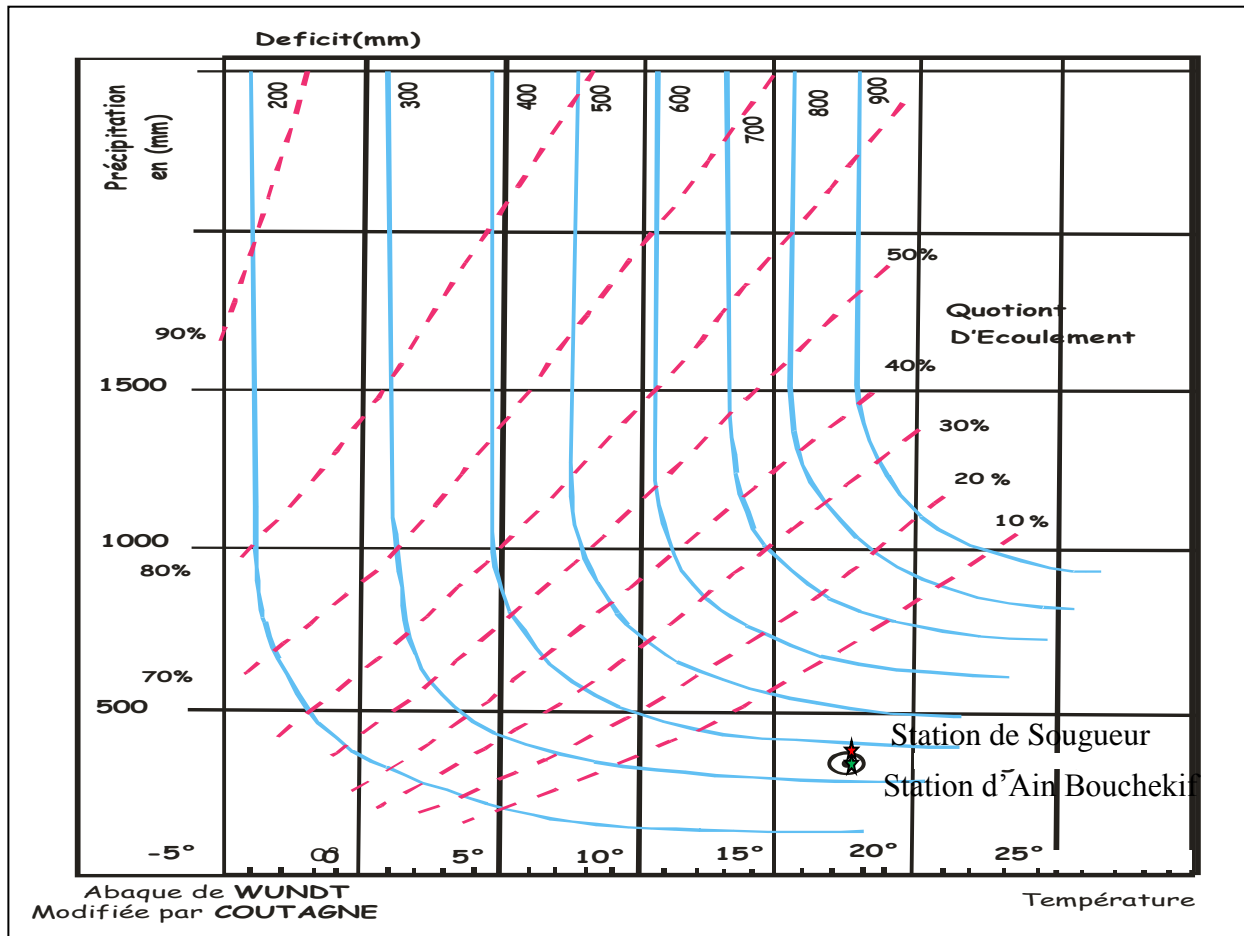
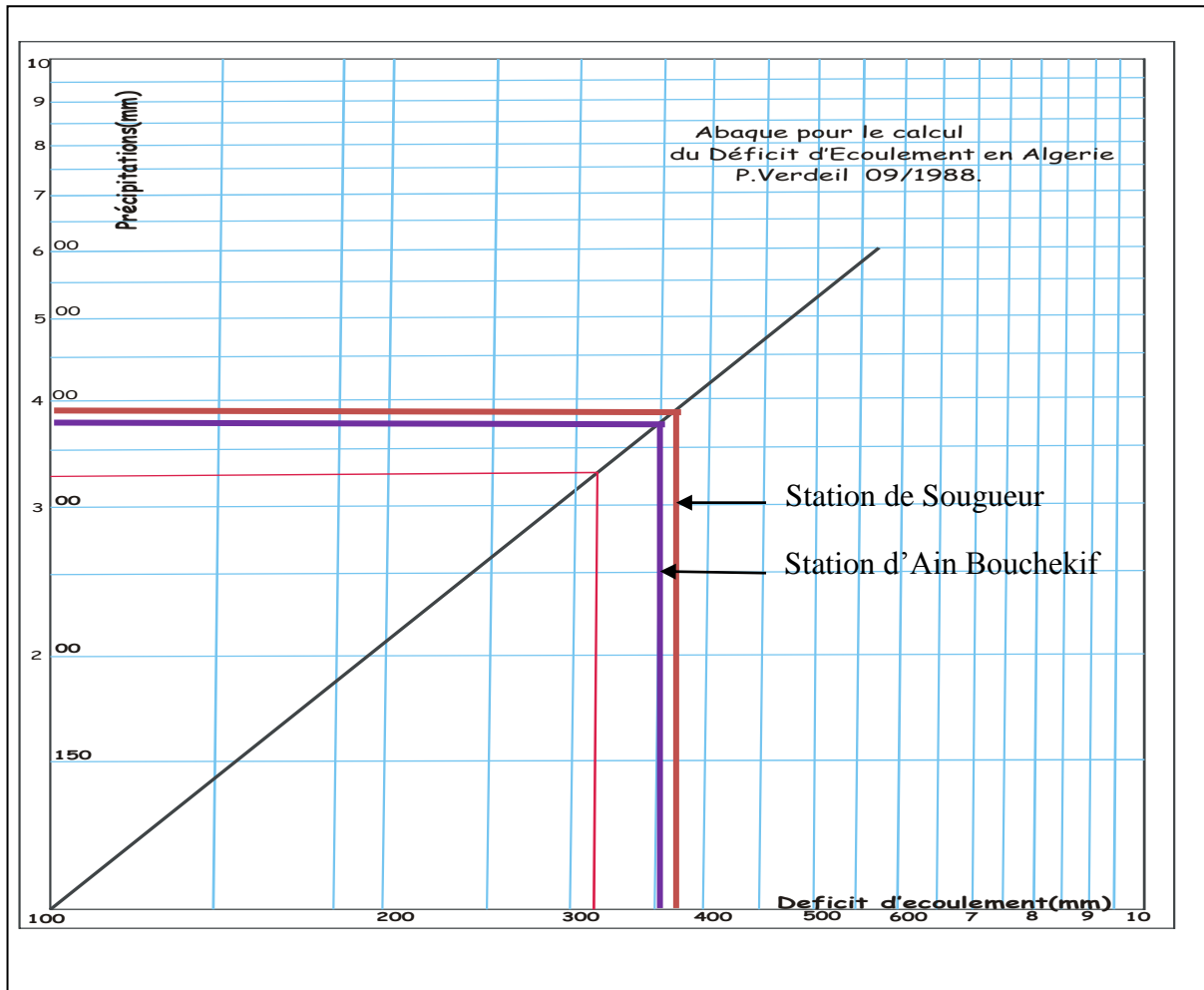


Fig.30 : Abaque de Wundt.

**d. Méthode de P. Verdeil (1988)**

En étudiant le climat de l'Algérie surtout en zones arides et semi-arides P.Verdeil a établi un abaque pour le calcul de déficit d'écoulement à partir des précipitations moyennes annuelles , c'est l'une des méthodes les plus récentes et la mieux adaptée au climat de l'Algérie (fig.31).

Pour la station d'Ain Bouchekif (1986-2015), on obtient à partir de l'abaque un déficit d'écoulement **D = 350 mm** et pour la station de Sougueur (1999-2015) **D = 360 mm**.



**Fig. 31 :** Abaque pour calcul du déficit d'écoulement en ALGERIE P.Verdeil 09/1988 (pour  $P < 600$  mm).

#### e. Méthode de C.W.Thornthwaite

Pour le calcul de l'évapotranspiration réelle, on utilise la méthode de C.W.Thornthwaite, où on distingue deux principaux cas :

- Si  $P - ETP > 0$  ; c-a-d :  $P > ETP$ , dans ce cas  $ETR = ETP$ .
- Si  $P - ETP < 0$  ; c-a-d :  $P < ETP$ , ce cas est encore subdivisé en deux cas :
  - Si  $P + RFU > ETP$  :  $ETR = ETP$ .
  - Si  $P + RFU < ETP$  :  $ETR = P + RFU$ .

#### 5.2. Estimation de la réserve facilement utilisable (RFU)

Elle présente la quantité d'eau emmagasinée dans le sol, son degré de saturation dépend de plusieurs facteurs :

- La nature, la composition lithologique et l'épaisseur de la couche superficielle ;
- La profondeur du niveau piézométrique de la nappe aquifère ;
- Le climat de la région ;
- Le type de la couverture végétale.

L'estimation de ce paramètre a été faite par l'application de la formule de Hallaire 1960 (J.Ricard1979).

$$RFU = 1/3 \cdot D_a \cdot H_e \cdot P$$

**D<sub>a</sub>** : densité apparente du sol.

**H<sub>e</sub>** : humidité équivalente en %, estimée à 20%.

**P** : Profondeur de la couche traversée par les racines, estimée à 50 cm.

### 5.3. Le déficit agricole (Da)

Il représente la différence entre l'ETP et l'ETR, il s'agit de la quantité d'eau qui aurait pu être utilisée par les plantes, par un apport d'eau d'irrigation.

### 5.4. L'excédent (Ex)

Il s'agit d'un volume d'eau en excès qui ne peut être emmagasiné dans la réserve utile et qui va par conséquent alimenter soit l'écoulement soit l'infiltration.

### 5.5. L'écoulement (Ec)

Selon Thornthwaite, la moitié de l'excédent s'écoulent le mois même, le reste s'infiltrant et alimentant le réseau aérien par l'intermédiaire des sources durant les mois.

### 5.6. Coefficient mensuel de l'humidité

C'est un paramètre climatique mensuel, est donné par la relation suivante :

$$C = P - ETP / ETP$$

Dans l'établissement du bilan hydrologique on recherche à quantifier la répartition des précipitations entre l'évapotranspiration potentielle ou évapotranspiration réelle, écoulement (**Ec**) et réserves utiles (**Ru**).

Pour Thornthwaite, la réserve en eau du sol est égale à **50 m**.

D'autre part cette réserve en eau du sol est soumise une grande variabilité à cause d'une erreur dans l'application de la méthode de Thornthwaite.

**6. Etablissement du bilan hydrique selon Thornthwaite**

**Tableau n°18 :** Le bilan hydrique de C.W.Thornthwaite de la station d’Ain Bouchekif (1986-2015).

Mois	Nov	Dec	Jan	Fév	Mar	Avril	Mai	Juin	Juill	aout	Sep	Oct	Moy
<b>P</b>	42,12	39,41	44,7	43,39	38,66	44,54	31,83	11,8	4,81	12,24	29,9	34,81	<b>378,26</b>
<b>ETP<sub>c</sub></b>	27,83	14,22	11,61	15,31	31,30	47,29	95,62	160,13	220,69	202,69	121,62	71,08	<b>1019,4</b>
<b>P-ETP</b>	14,29	25,19	33,09	28,08	7,36	-2,75	-63,79	-148,33	-215,88	-190,45	-91,72	-36,27	/
<b>RFU</b>	14,29	39,48	50	50	50	47,25	0	0	0	0	0	0	/
<b>ETR</b>	27,83	14,22	11,61	15,31	31,30	47,29	79,08	11,8	4,81	12,24	29,9	34,81	<b>320,2</b>
<b>DA</b>	0	0	0	0	0	0	16,54	148,33	215,88	190,45	91,72	36,27	<b>699,19</b>
<b>EX</b>	0	0	22,57	28,08	7,36	0	0	0	0	0	0	0	<b>58,01</b>
<b>Ec</b>	0	0	11,28	19,68	13,52	6,76	3,38	1,69	0,84	0,42	0,21	0,10	<b>57,88</b>

**P** : précipitation moyenne mensuelle en (mm).

**ETP<sub>c</sub>** : évapotranspiration potentielle corrigée en (mm).

**ETR** : évapotranspiration réelle en (mm).

**RFU** : réserve facilement utilisable en (mm).

**EXD** : excédent en (mm).

**DA** : déficit agricole en (mm).

**EC** : écoulement en (mm)

### 6.1. Interprétation du bilan hydrique

- En effectuant le bilan hydrologique selon Thornthwaite, on remarque que l'année hydrologique se démarre en Novembre au moment où les précipitations deviennent supérieures à l'évapotranspiration et où les réserves du sol commencent à se reconstituer.
- L'évapotranspiration potentielle (ETP) atteint son maximum au mois de Juillet avec 220,69 mm, son minimum au mois de Janvier avec 11,61 mm. L'ETP totale est de l'ordre de 1019,4 mm.
- L'évapotranspiration réelle (ETR) totale est de 320,2 mm.
- L'écoulement débute après le remplissage de la RFU (50 mm), au mois de Janvier et se termine à la fin du mois de Mars.
- Le déficit agricole s'étale du mois de Mai jusqu' au mois d'Octobre avec une moyenne annuelle de 699,19 mm.
- L'excédent annuel est égale à 58,01 mm, s'étale à du mois de Janvier jusqu'à mois de Mars.
- L'écoulement annuel est égal à 57,88 mm.
- Selon Thornthwaite, la moitié de l'écoulement est égale au ruissellement ( $R=28,94$ ), l'autre est égale à l'infiltration ( $I=28,94$ ).

### 6.2. Etude de ruissellement

Le ruissellement correspond à l'eau qui s'écoule directement sur le sol au cours d'une averse. Il peut donc être connu de façon exacte par analyse de l'hydro gramme d'un cours d'eau lorsqu'on dispose si non, on utilise des méthodes empiriques qui nous en donnent une valeur approchée.

#### 6.2.1. Méthode de Tixeront et Berkallof

Ces auteurs ont établi une formule qui permet d'estimer le ruissellement moyen annuel.

$$R = P^3 / 3 \cdot ETP^2$$

Avec : **R** : ruissellement en mm.

**P** : précipitation en mm.

**ETP** : évapotranspiration potentielle en mm/an, évaluée par la méthode de Thornthwaite.



**Tableau n°19** : Résultats du ruissellement par la formule de « Tixeront-Berkaloff » pour la station d'Ain Bouchekif (1986-2015).

Paramètres	P (mm/an)	ETP (mm/an)	R (mm/an)
Station d'Ain Bouchekif	378,26	1019,4	17,36

**6.3. Etude de l'infiltration**

Représente la quantité d'eau absorbée par le sol et le sous-sol, pour constituer l'eau de rétention, des eaux souterraines et des écoulements souterrains, et reconstitution des réserves souterraines. A partir de la formule du bilan hydrologique :

$$\boxed{P = ETR + R + I} \quad \Rightarrow \quad \boxed{I = P - (ETR + R)}$$

Avec :

**I** : Infiltration en (mm).

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

**R** : Ruissellement en (mm).

**ETR** : Evapotranspiration réelle annuelle en (mm) selon les différents auteurs.

**Tableau n°20** : Estimation de l'infiltration par l'équation fondamentale du bilan hydrique de la station d'Ain Bouchekif (1986-2015).

Auteurs	P (mm/an)	ETR (mm/an)	R (mm/an)	I (mm/an)
Verdeil	378,26	350	17,36	10,9
Wundt	378,26	350	17,36	10,9
Turc	378,26	374,51	17,36	-13,61

D'après les résultats obtenus, la méthode de Turc ne peut être appliquée dans notre cas. Seules les méthodes de Verdeil et Wundt sont applicables (même infiltration). Ainsi que celle de Thornthwaite où l'infiltration est plus importante.

## **7. Conclusion**

L'étude climatologique du sous bassin versant de l'Oued Souslem permet de distinguer un climat est typiquement méditerranéen semi-aride avec un hiver doux et humide et un été sec et chaud où la température moyenne annuelle est de 18,35 °C et les précipitations moyennes annuelles, sont estimées à 378,26 mm.

L'évapotranspiration potentielle représente 1019,4mm.

L'évapotranspiration réelle est très importante pour Turc (374,51 mm), soit 99 % des précipitations.

Le ruissellement varie entre 17,36 mm (4,58 % des précipitations) pour Tixeront-Berkalof et 28,94 mm (7,65 % des précipitations) pour Thornthwaite.

Pour l'infiltration, seules les méthodes P.Verdeil et Wundt nous donnent des résultats convenables.

***CHAPITRE III***  
***HYDROGEOLOGIE***

### **1. Aquifères potentiels**

L'analyse lithostratigraphique, la prospection géophysique ainsi que les forages réalisés dans cette région ont permis de mettre en évidence un ensemble d'horizons aquifères d'importance différent. Notre zone d'étude occupe une superficie de 90 km<sup>2</sup>.

Les couches aquifères sont :

**1.1. Le Jurassique :** constitué par les dolomies du Kimméridgien ou « **loge** », une nappe importante à proximité des massifs jurassiques (Réchaiga).

**1.2. Le Tithonique :** Les calcaires et les grès du Tithonique sont absents dans notre région d'étude.

**1.3. Le Crétacé :** avec les grès du Berriasien-Aptien-Albien, constitué un niveau important et intéressant sous le recouvrement du Miocène, l'Albien gréseux et sableux peut atteindre une épaisseur de 300 m.

**1.4. Le Cénomaniens :** constitue un important aquifère (sondage).

**1.5. Le Sénonien :** les calcaires du Sénonien comprenant des marnes à intercalations de calcaires et de grès, représentant un aquifère intéressant.

**1.6. Le Miocène :** avec des grès traversés par des forages et des puits et qui alimentent une série de sources.

**1.7. Le plio-Quaternaire :** est un aquifère qui englobe la nappe phréatique du plateau Sersou, elle est isolée des nappes aquifères inférieures par des marnes du Miocène inférieur (**in SAFA A., 1983**).

Etage	Lithologie	Perméabilité d'interstices	Perméabilité des fissures	Semi-perméable	Imperméable
Pliocène récent	Croûtes calcaires, Limons				
Pliocène ancien	Ensemble Fulvio-lacustre				
pliocène	Conglomérats				
Miocène inférieur	Marnes				
Marin	Marnes gréseuses Grès				
Miocène -inf, cont	Grès fins à galets calcaires				
Sénonien	Marno-calcaires Conglomérats				
Turonien	Calcaires et calcaires dolomités Marnes				
Cenomanien	marnes à marno-calcaires				
Valanginien-Albien	Grès avec intercalations de bancs de calcaires gréseux				
Berriasien-valanginien	Intercalations de marnes et de marno-calcaires				
Kimméridgien-Tithonique	Dolomies cristallines				
Bajo-Bathonien	Marnes schisteuses Grès quartzeux				
Aalérien	Calcaires à grains fins				
Toarcien	Marnes et calcaires marneux				
Domérien	Calcaires marneux intercalations de marnes				
Lias-inférieur	Dolomies cristallines massives ou en gros bancs				
Trias	Marnes rouges, schistes, gypses				

Fig.32 : Log hydrogéologique de la zone d'étude (in Feghoul A., 1987).

L'aquifère de la zone d'étude est alimenté par son impluvium et par la ligne de crête de la chaîne du Djebel Nador au Sud, Djebel Réchaiga à l'Est et les hautes plaines de Sougueur à l'Ouest.

## **2. Inventaire des points**

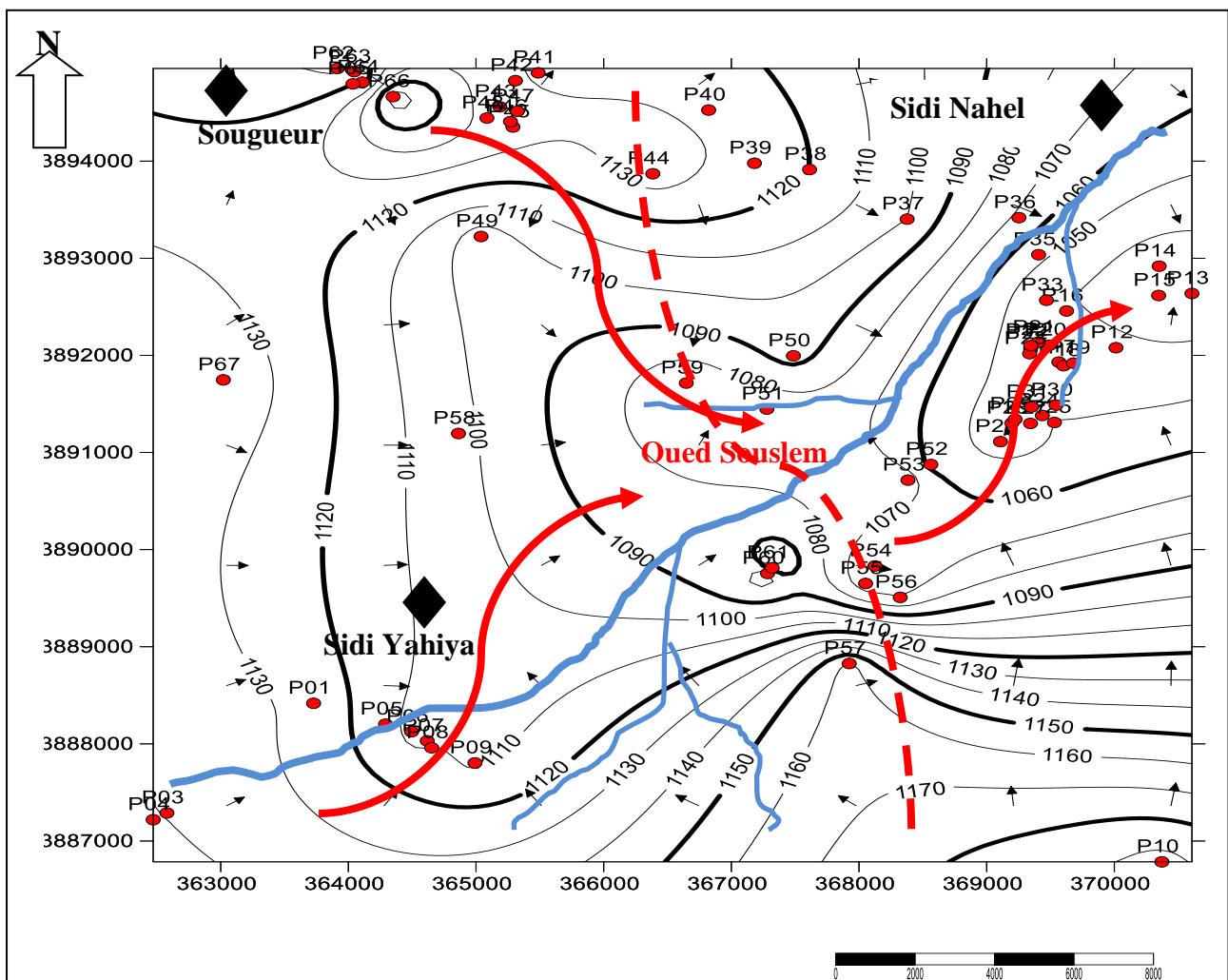
Il existe plusieurs types de captages, sources, puits et forages qui servent à l'alimentation en eau potable des agglomérations, à l'alimentation du bétail, irrigation des terres et à l'alimentation industrielle.

## **3. Piézométrie**

Le but d'une carte piézométrique est de définir le sens d'écoulement des eaux souterraines et de déterminer les zones de convergences et de déduire les relations éventuelles entre l'Oued Souslem et la nappe.

Deux campagnes piézométriques ont été effectuées durant l'année 2014/2015 aussi bien pour la nappe alluviale que la nappe profonde (basses eaux et hautes eaux) (voir annexe 07), sur ces cartes, ont été représentées quelques lignes de courant et les principaux axes de drainages.

### **3.1. La carte piézométrique de la nappe alluviale (basses eaux)**

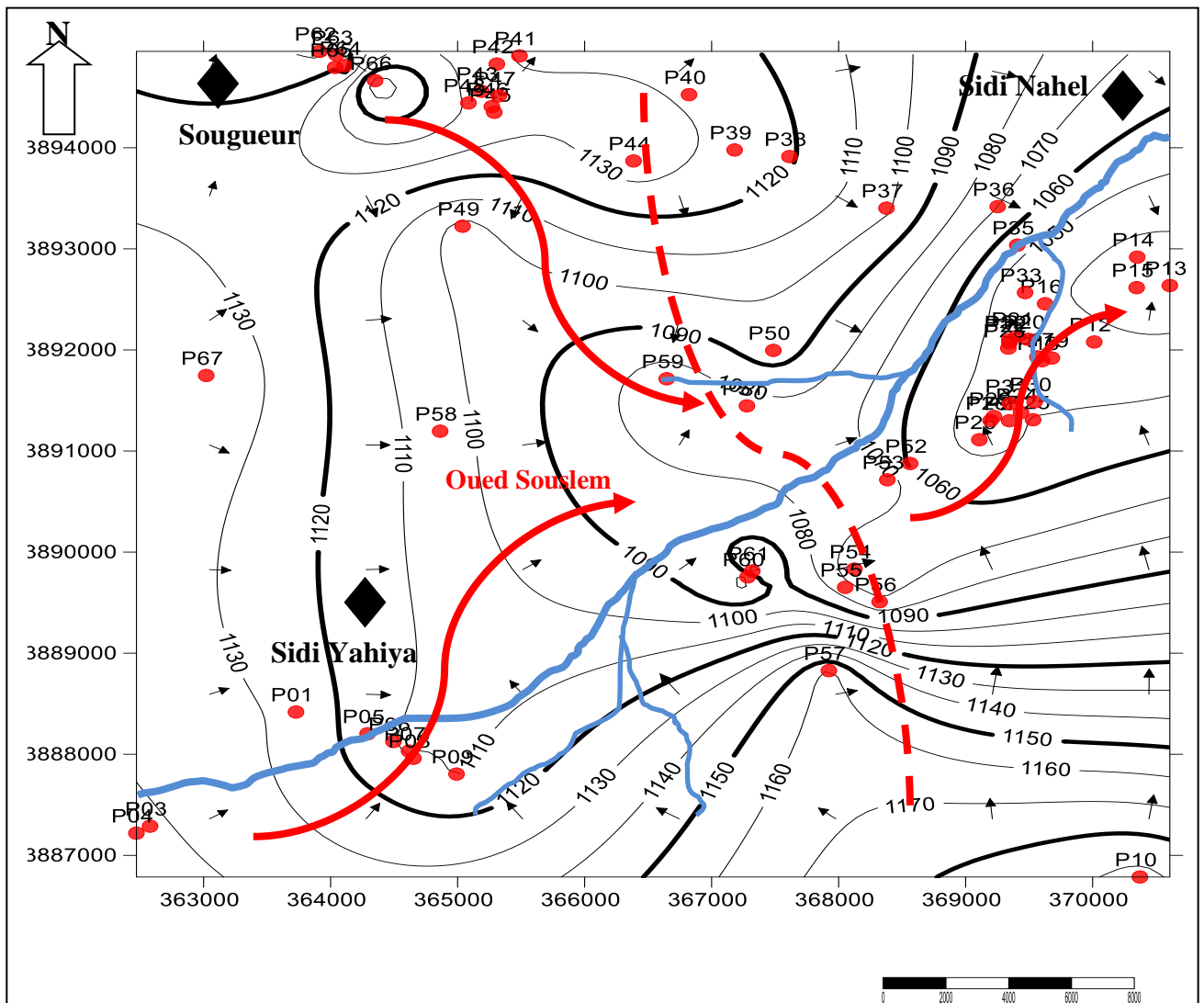


Légende :

- : Ligne de courant.
- 1100 : Courbe hydro isohypse.
- Oued Souslem.
- - - : Zone de partage.
- ↗ : Axe de drainage.
- : P.ots.

Fig.33 : Carte piézométrique de la nappe alluviale du bassin versant d'Oued Souslem (Décembre 2014).

3.2. La carte piézométrique de la nappe alluviale (hautes eaux)



Légende :

- : Ligne de courant.
- : Courbe hydro isohypse.
- : Oued Souslem.
- - - : Zone de partage.
- : Axe de drainage.
- : Puits.

Fig.34 : Carte piézométrique de la nappe alluviale du sous bassin versant d'Oued Souslem (Avril 2015).



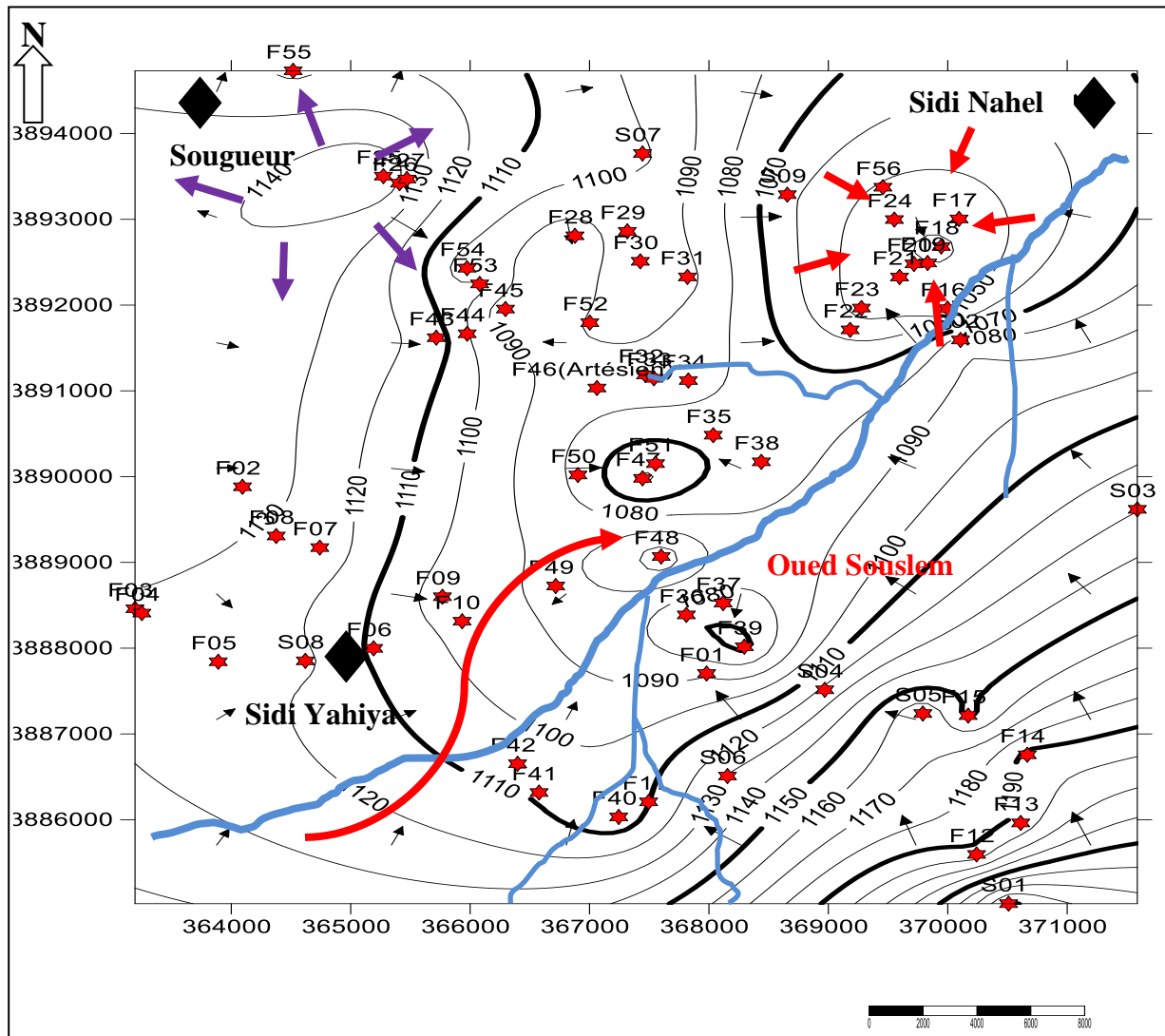
### **3.3. Commentaire des cartes piézométriques**

La morphologie de la nappe alluviale est identique pour les deux périodes (hautes eaux et basses eaux). On peut remarquer l'existence de trois principaux axes, l'un Nord-ouest vers le Sud-est, l'autre Sud-ouest vers le Nord-est et le troisième Sud-ouest vers le Nord-est, ce dernier se calque sur l'écoulement de surface. L'Oued principal (Oued Souslem) draine les eaux de la nappe (la nappe alimente l'Oued).

De l'Ouest en Est, on peut noter un écoulement diffus généralisé, matérialisé par un étalement des courbes hydro isohypses. Cette hydrodynamique de la nappe est conditionnée par des affleurements carbonatés du Crétacé qui encadrent l'aquifère alluviale, contribuant ainsi à la recharge de la nappe.

Nous constatons une dépression vers le Nord-est et une ligne de partage des eaux qui correspond à un axe divergent.

3.4. La carte piézométrique de la nappe profonde (basses eaux)



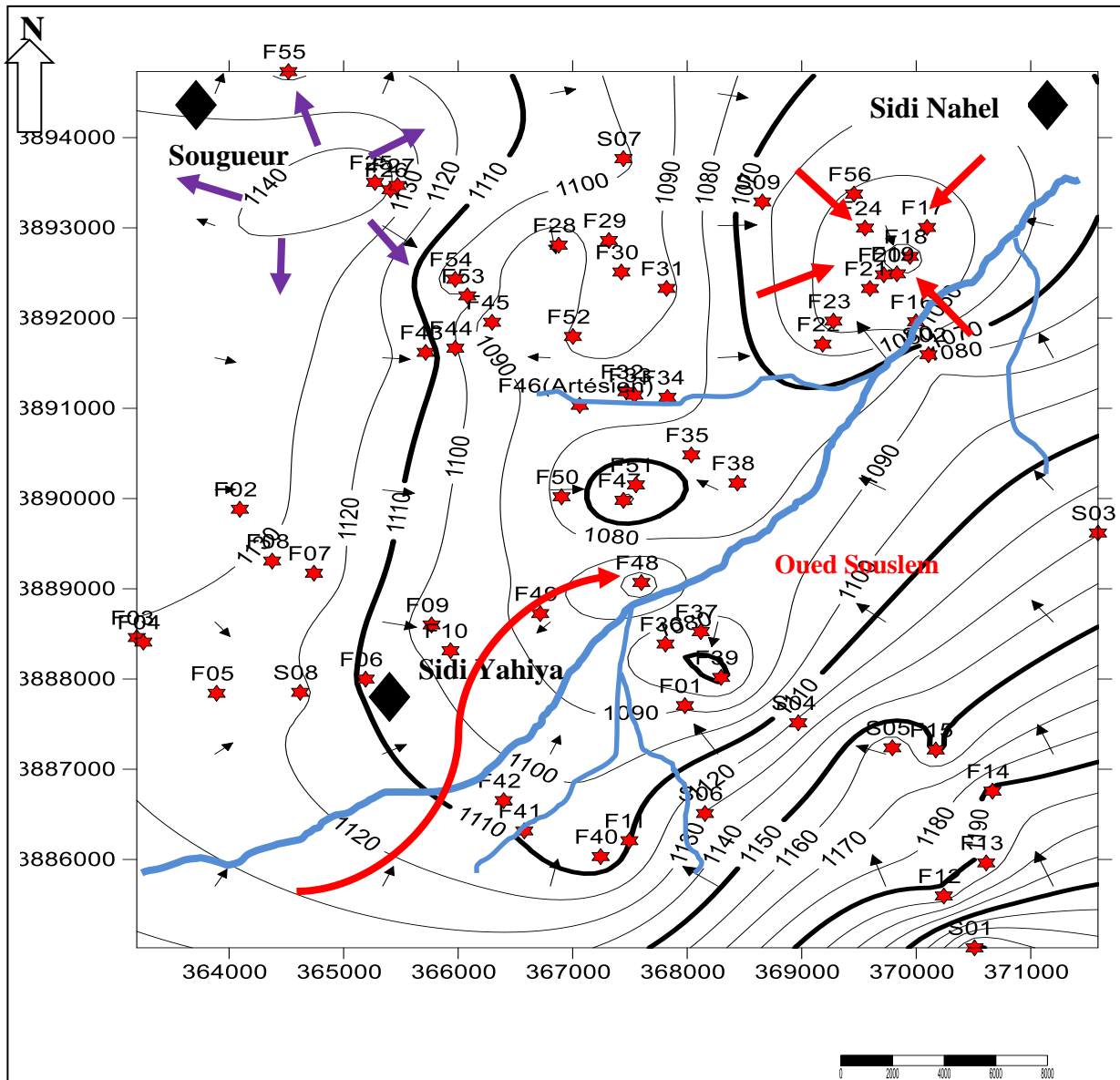
Légende :

- : Ligne de courant.
- : Courbe hydro isohypse.
- : Oued Souslem.
- ↗ : Dôme.
- - - : Zone de partage.
- : Axe de drainage.
- ★ : Forage.

Fig.35 : Carte piézométrique de la nappe profonde du bassin versant d'Oued Souslem

(Décembre 2014).

3.5. La carte piézométrique de la nappe profonde (hautes eaux)



Légende :








-  : Ligne de courant.
-  : Oued Souslem.
-  : Courbe hydro isohypse.
-  : Dôme.
-  : Axe de drainage.
-  : Zone de partage.
-  : Forage.

Fig.36 : Carte piézométrique de la nappe profonde du bassin versant d'Oued Souslem (Avril 2015).

### 3.6. Commentaire des cartes piézométriques

L'écoulement moyen des eaux souterraines reste inchangé pour les deux périodes (hautes eaux et basses eaux) avec des dépressions piézométriques plus marquées en 2015 (Nord-est), cela pourrait être dû au pompage excessif qui se traduit par une surexploitation de cette nappe profonde.

Cependant, on constate que l'écoulement des eaux souterraines pour la nappe profonde présente la même allure que celui de la nappe alluviale vers l'Oued Souslem, cela peut être expliqué par une continuité hydraulique entre les deux niveaux de nappes superposées.

Elle est alimentée par les monts de Nador au Sud et de Réchaiga à l'Est, avec un dôme vers le Nord-ouest qui participe à l'alimentation de cette nappe.

### 3.7. Le gradient hydraulique

$$H_2 - H_1 / L$$

Notons que les lignes de partages des eaux souterraines s'identifient, soit un relèvement du substratum dans les zones des hautes altitudes, soit à des structures faillées non identifiées dans le cas des zones dépressionnaires.

Les valeurs du gradient hydraulique sont variables d'une zone à une autre, cette différenciation est due à l'homogénéité des formations, donc à la perméabilité.

Le gradient est faible au centre ( $3 \cdot 10^{-3}$ ), par contre, il est assez fort au Sud-est (0,01). On constate que la vitesse d'écoulement est plus importante au Sud-est que les autres zones.

## 4. Etude de paramètres hydrodynamiques

Cette étude est très utile, elle permet de caractériser le comportement de la nappe, de tester les conditions aux limites, structures et drainance. Malheureusement, nous n'avons pas pu avoir les données des pompages d'essais et nous nous sommes contentés de reprendre les résultats de Ph.Rognon sur plusieurs essais de pompages surtout de courtes durées qui ont permis de déterminer la transmissivité « T » et le coefficient d'emmagasinement « S ».

**Tableau n°21** : Transmissivité et coefficient d'emmagasinement Ph.Rognon).

<b>Puits</b>	<b>Transmissivité</b>	<b>Coefficient d'emmagasinement</b>	<b>Type de nappe</b>	
<b>P 28</b>	$1,18 \cdot 10^{-3}$	$5,9 \cdot 10^{-3}$	Nappe libre	Absence de piézomètre
<b>P 23</b>	$2,78 \cdot 10^{-4}$	$2,43 \cdot 10^{-3}$	Nappe libre	Absence de piézomètre
<b>F albien</b>	$5 \cdot 10^{-4} / 6 \cdot 10^{-5}$	/	Nappe profonde	/

### 5. Conclusion

Les formations aquifères identifiées sont constituées par des dolomies (Kimméridgien), des calcaires et les grès (Tithonique), un ensemble gréseux (Valanginien-Albien), des calcaires (Turonien), Les formations détritiques (Miocène inférieur) et des dépôts continentaux du plio-Quaternaire.

Les cartes piézométriques que nous avons réalisé montrent une direction générale de l'écoulement vers l'Oued principale (SO-NE, NW-S-E). Elle montre aussi des dépressions et des dômes avec une ligne de partage des eaux du Sud vers le Nord qui suit le sens d'écoulement des eaux de surfaces. La zone d'alimentation est constituée par les différents reliefs ou bombement entourant notre zone d'étude ainsi que par son impluvium.

***CHAPITRE IV***  
***HYDROCHIMIE***

## 1. Introduction

L'analyse hydrochimique des eaux constitue un complément indispensable à l'étude hydrogéologique des nappes, elle permet de suivre l'évolution spatiale des paramètres physico-chimiques, elle permet d'apporter de nombreuses informations sur la nature de l'encaissant et de déterminer leur origine, en les corrélant avec la géologie et la piézométrie.

A cet effet, une campagne d'échantillonnage a été menée sur 15 points d'eaux (puits, forages, sources) en Avril 2016 et analysés au niveau de laboratoire de l'Entreprise Nationale des produits électrochimiques (fig.37), les analyses chimiques ont porté sur les éléments suivants :

Anions:  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ .

Cations:  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ .

Tandis que les paramètres physiques T °C, PH, Conductivité et Minéralisation sont mesurés in-situ (voir annexe n°08).

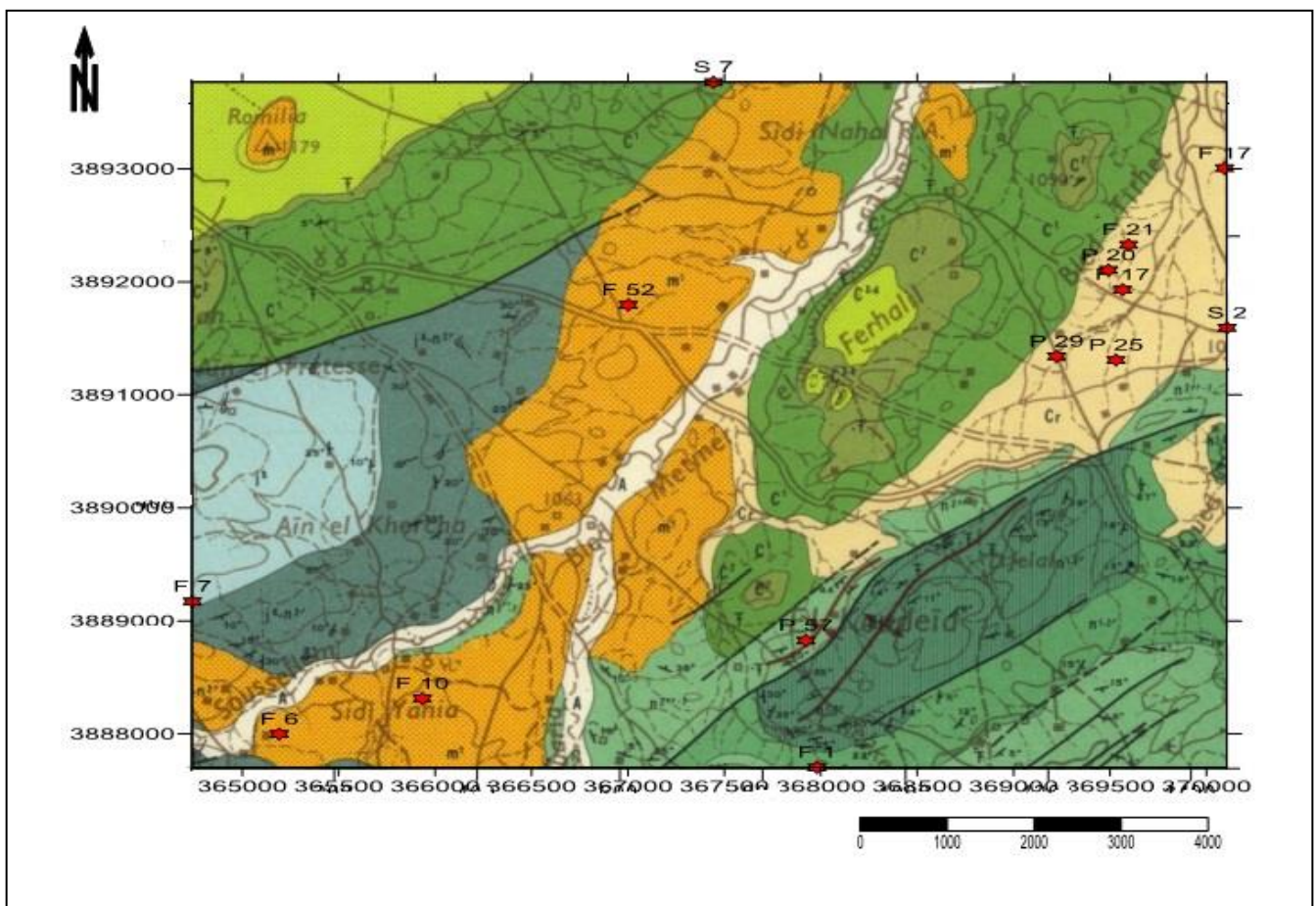


Fig.37 : Carte d'inventaire des points d'eaux.

Pour l'ensemble des échantillons, nous avons établi une balance ionique qui permet de tester la qualité des analyses à partir de la relation suivante :

$$e\% = [(\sum rc - \sum ra) / (\sum rc + \sum ra)] * 100$$

Avec :  $\sum rc$  : Somme des quantités en réaction des cations.

$\sum ra$  : Somme des quantité en réaction des anions.

$e\%$  : Pourcentage d'erreur.

Si :

- $e < 2\%$   $\implies$  l'analyse est bonne.
- $2\% < e < 5\%$   $\implies$  l'analyse est acceptable.
- $e > 5\%$   $\implies$  l'analyse est mauvaise.

Les résultats obtenus sont données dans le tableau n°22 :



Tableau n° 22 : Pourcentage d'erreur des analyses chimiques.

Ouvrage	r Ca	r Mg	r Na	r K	$\sum r^+$	r Cl	r SO <sub>4</sub>	r HCO <sub>3</sub>	r NO <sub>3</sub>	$\sum r^-$	e %	Analyse
F 52	2,94	2,72	2,91	0,56	9,13	2,8	0,73	5,10	0,15	8,77	2,01	Acceptable
S 07	3,39	2,80	3,26	0,38	9,84	3	1,88	4,28	0,29	9,44	2,04	Acceptable
S 02	3,64	1,65	3,52	0,38	9,19	3	0,77	4,34	0,43	8,54	3,65	Acceptable
F 21	6,06	5,92	3,00	0,18	15,16	5,97	1,88	5,98	0,38	14,21	3,25	Acceptable
P 34	3,49	3,29	3,04	0,56	10,39	4,23	1,15	4,25	0,24	9,86	2,61	Acceptable
F 01	3,09	3,21	2,83	0,59	9,72	3,6	0,63	4,94	0,20	9,37	1,83	Bonne
F 06	3,34	2,80	2,78	0,46	9,38	3,4	0,67	4,80	0,21	9,07	1,69	Bonne
P 25	6,43	6,42	3,00	0,23	16,08	8	1,67	5,08	0,87	15,62	1,46	Bonne
P 57	3,99	2,47	3,87	0,54	10,87	4	0,83	5,49	0,26	10,59	1,29	Bonne
F 10	3,24	3,21	3,04	0,49	9,98	3	1,88	4,50	0,23	9,61	1,91	Bonne
P 17	7,14	4,24	3,22	0,59	15,19	6	1,04	7,30	0,23	14,57	2,06	Acceptable
P 20	4,89	1,15	4,30	0,74	11,09	4	2,29	3,60	0,86	10,75	1,53	Bonne
F 17	3,84	2,06	3,70	0,66	10,26	3	1,42	5,40	0,18	9,99	1,31	Bonne
P 29	7,78	2,40	4,83	0,38	15,39	5,8	1,98	6,70	0,17	14,65	2,46	Acceptable
F 07	3,24	2,88	3,04	0,74	9,91	3,2	0,83	4,80	0,21	9,04	4,58	Acceptable

Toute les analyses sont bonnes à acceptables.

**2. Analyse des données hydrochimiques****2.1. Paramètres physiques**

Les mesures de ces paramètres physiques concernent essentiellement, le PH, la conductivité et la température (tableau n°23), tandis que la minéralisation a été calculée à partir de la conductivité (tableau n°24).

**2.1.1. PH (potentiel d'hydrogène)**

Le PH correspond à la concentration d'ions d'hydrogènes ( $H^+$ ), il mesure l'acidité ou la basicité d'une eau.

$$PH = - \text{Log} [H_3O^+]$$

Dans notre région d'étude, les valeurs mesurées du PH restent proches et oscillent entre 7,09 (P 20) et 8,48 (P 25), d'après ces résultats, on constate que les eaux sont basiques.

**2.1.2. La température**

La température joue un rôle très important dans la solubilité des sels et des gaz, donc sur la conductivité électrique, elle régit la quantité d' $O_2$  dissout et son augmentation est en fonction de la profondeur (1°C pour 33 mètres). La température mesurée varie entre 13 et 19,5 °C.

**2.1.3. La conductivité**

Elle est définie, comme la conductance d'une colonne d'eau comprise entre deux électrodes métalliques de 1 cm<sup>2</sup> séparées l'une de l'autre de 1 cm, la conductivité est l'inverse de la résistivité électrique.

La mesure de ce paramètre permet d'évaluer rapidement mais très approximativement la minéralisation globale et suivre l'évolution.

Dans notre secteur d'étude, elle présente des résultats hétérogènes de 905 à 3020  $\mu\text{s}/\text{cm}$ .

**2.1.4. La minéralisation**

Il existe une relation entre la teneur en sels dissous d'une eau et sa conductivité, après calcul, on remarque qu'on a des eaux moins minéralisées et des eaux beaucoup plus minéralisées, les résultats obtenus sont consignés dans le tableau n°24.

Tableau n° 23: Paramètres physiques des points d'eau étudiés.

Paramètres	Paramètres physiques		
Ouvrage	PH	C.E (µs/cm)	Temp (°C)
F 52	7,6	1059	19,5
S 07	7,53	1462	15
S 02	7,65	1144	14,5
F 21	7,58	2550	16,5
P 34	7,98	1106	13
F 01	7,82	985	17,5
F 06	7,7	995	18,5
P 25	8,48	3020	13
P 57	7,73	1518	14
F 10	7,85	905	18
P 17	7,3	2400	15,5
P 20	7,09	1393	15,5
F 17	7,65	1099	17
P 29	7,55	2240	16
F 07	7,74	984	18

Tableau n°24 : Calcul de la minéralisation.

Ouvrage	Minéralisation (mg/l)	Ouvrage	Minéralisation (mg/l)
F 52	803,29	P 57	1151,46
S 07	1108,99	F 10	686,48
S 02	867,77	P 17	1820,50
F 21	1934,28	P 20	1056,65
P 34	838,94	F 17	833,63
F 01	747,16	P 29	1699,13
F 06	754,75	F 07	746,40
P 25	2290,80	/	/

## 2.2. Paramètres chimiques

### 2.2.1. Cations

#### ➤ Le Calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ )

D'après la figure (fig.38), on remarque une seule origine de cet élément qui est liée généralement à la lithologie du terrain, il provient soit d'une dissolution des formations carbonatées ( $\text{CaCO}_3$ ), des dolomies [(Ca, Mg)  $\text{CO}_3$ ], soit des formations évaporitiques. Les teneurs de cet élément dans notre région varient de 43.2 mg/l (F 07) à 156 mg/l (P 29).

#### ➤ Le Magnésium ( $\text{Mg}^{2+}$ )

Il y a une seule origine du magnésium, qui provient de la dissolution des dolomies et des roches évaporitiques. Les teneurs en Mg dans notre région oscillent entre 9,23 mg/l (P 20) à 116,64 mg/l (P 25).

#### ➤ Le Sodium ( $\text{Na}^+$ )

De même pour le sodium, leur origine est liée principalement à la dissolution des formations salifères très soluble ( $\text{NaCl}$ ), il peut provenir aussi de la circulation des eaux dans les sables alluvionnaires, du quaternaire et dont la teneur s'échelonne de 58 mg/l (F 06) à 124 mg/l (F 17).

#### ➤ Le Potassium ( $\text{K}^+$ )

Le potassium est l'élément le moins répandu dans les eaux souterraines, on remarque trois origines d'après la figure, il provient de l'altération des formations argileuses potassiques, de la dissolution des engrais et les rejets domestiques. Sa concentration varie de 4 mg/l (P 20) à 23 mg/l (F 01).

### 2.2.2. Anions

#### ➤ Les Chlorures ( $\text{Cl}^-$ )

Ils sont toujours présents dans les eaux naturelles en proportion très variables, deux origines sont remarquables, ils résultent de la dissolution des sels naturels, par le lessivage des terrains gypseux, marneux ou argileux, par les précipitations. Leurs concentrations sont comprises entre 99,4 mg/l (F 52) à 284 mg/l (P 25).

➤ **Les Bicarbonates ( $\text{HCO}_3^-$ )**

La seule origine des bicarbonates dans notre zone d'étude est liée de la dissolution des roches carbonatées dans l'eau qui est fonction de la tension en  $\text{CO}_2$ , de la température, du PH et de la nature de l'encaissant. Les teneurs sont très élevées et oscillent entre 219,6 mg/l (P 20) à 445,3 mg/l (P 17).

➤ **Les Sulfates ( $\text{SO}_4^{2-}$ )**

Au niveau de la région d'étude, les sulfates ont trois origines, généralement liées au lessivage des formations évaporitiques (gypse, anhydrite), ou des activités agricoles ou de l'utilisation domestique (détergents), leurs concentrations varient de 30 mg/l (F 01) à 110 mg/l (P 20).

➤ **Les Nitrates ( $\text{NO}_3^-$ )**

Plusieurs origines ont été mentionnées dans la figure (fig.38), sont principalement la pluie et les interactions avec le sol et la végétation, leur origine artificielle sont les contaminations par les engrais et les rejets domestiques. Leurs valeurs oscillent entre 9.09 mg/l (F 52) à 54,2 mg/l (P 25).

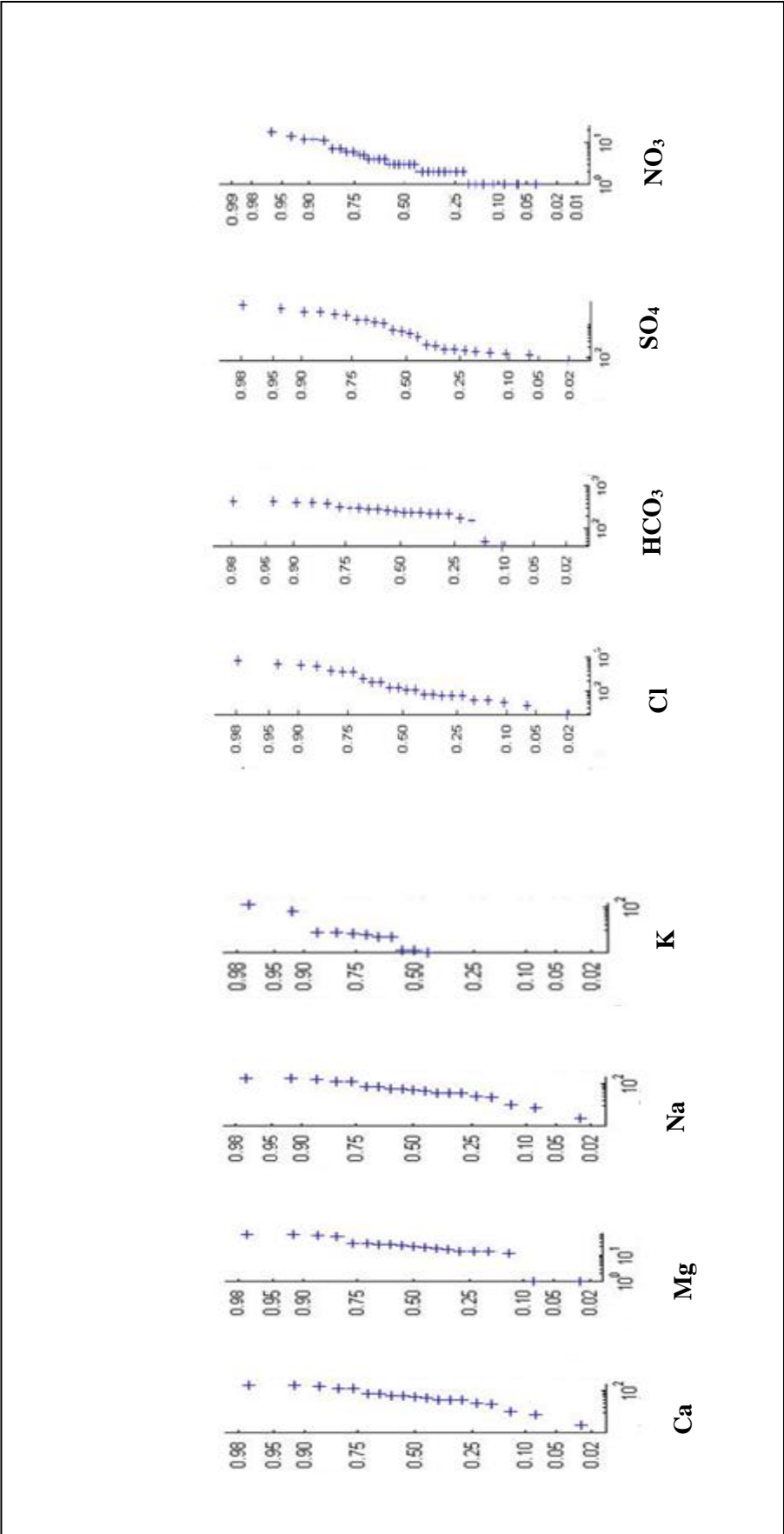


Fig.38 : Distribution des éléments chimiques de la zone d'étude.

3. Classification chimique des eaux

3.1. Diagramme de Schoeller Berkaloff

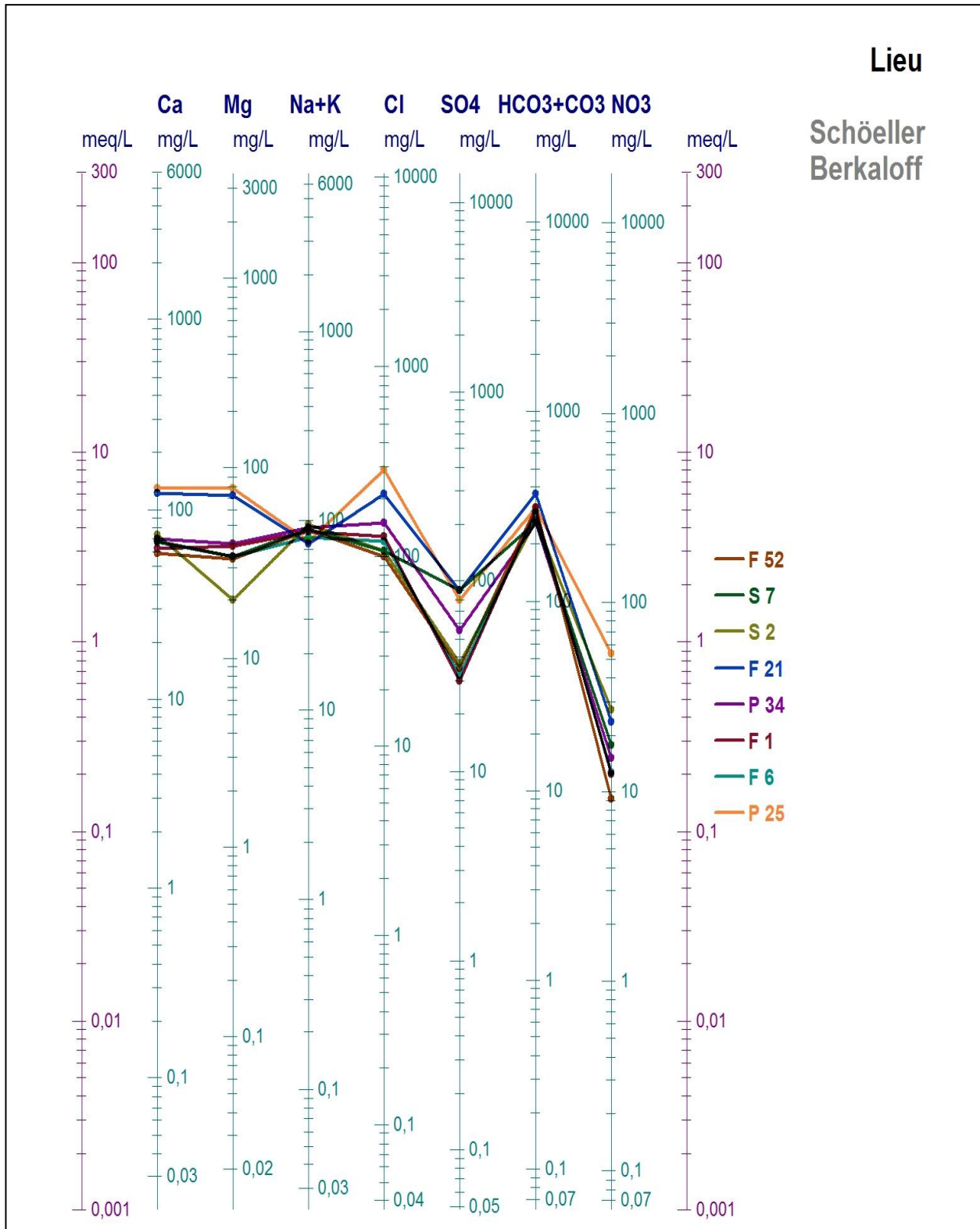


Fig. 39 : Diagramme de Schöeller.

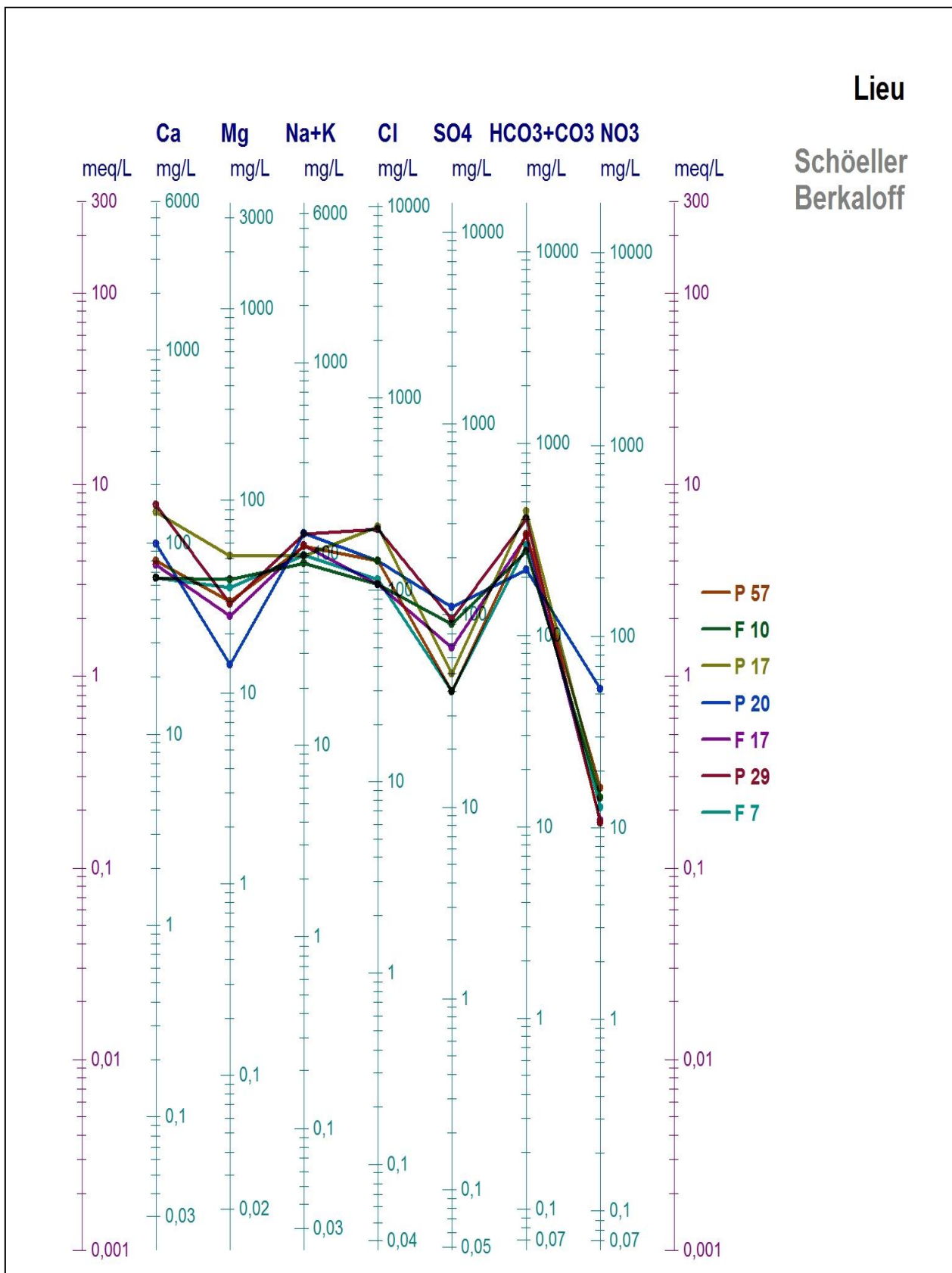


Fig. 40 : Digramme de Schöeller.



Ce diagramme est une représentation graphique à échelle logarithmique qui permet par simple lecture des échelles de déterminer les concentrations des ions dominants et de caractériser les faciès chimiques.

Sur les figures fig.39 et fig.40, nous obtenons, eaux à faciès bicarbonaté calcique magnésien et un faciès chloruré calcique.

### 3.2. Diagramme de Piper

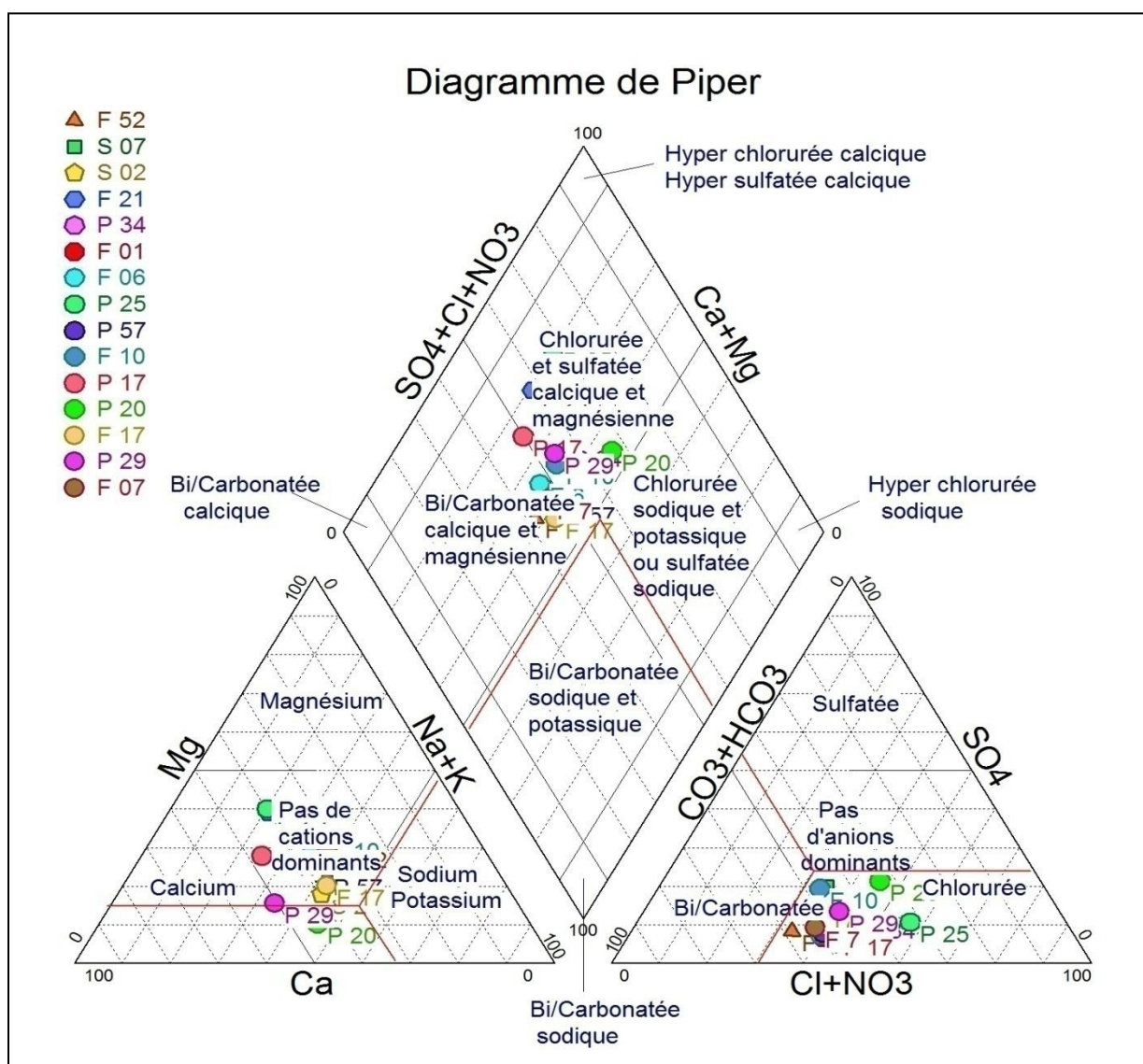


Fig. 41 : Diagramme de Piper.

Cette classification consiste à représenter sur les deux triangles représentant respectivement les anions et les cations. Les points obtenus montrent des faciès bicarbonatées calciques et magnésiennes, chlorurée calcique (fig.41).

## 3.3. Classification d'après STABLER

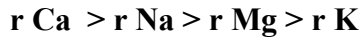
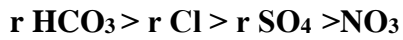
Tableau n° 25 : Formules caractéristiques et faciès chimique des eaux souterraines de la zone d'étude.

Ouvrage	Formule	Faciès chimique de l'eau
F 52	$r \text{HCO}_3 > r \text{Cl} > r \text{SO}_4 > \text{NO}_3$ $r \text{Ca} > r \text{Na} > r \text{Mg} > r \text{K}$	Bicarbonatée calcique
S 07	$r \text{HCO}_3 > r \text{Cl} > r \text{SO}_4 > \text{NO}_3$ $r \text{Ca} > r \text{Na} > r \text{Mg} > r \text{K}$	Bicarbonatée calcique
S 02	$r \text{HCO}_3 > r \text{Cl} > r \text{SO}_4 > \text{NO}_3$ $r \text{Ca} > r \text{Na} > r \text{Mg} > r \text{K}$	Bicarbonatée calcique
F 21	$r \text{HCO}_3 > r \text{Cl} > r \text{SO}_4 > \text{NO}_3$ $r \text{Ca} > r \text{Mg} > r \text{Na} > r \text{K}$	Bicarbonatée calcique
P 34	$r \text{HCO}_3 > r \text{Cl} > r \text{SO}_4 > \text{NO}_3$ $r \text{Ca} > r \text{Mg} > r \text{Na} > r \text{K}$	Bicarbonatée calcique
F 01	$r \text{HCO}_3 > r \text{Cl} > r \text{SO}_4 > \text{NO}_3$ $r \text{Mg} > r \text{Ca} > r \text{Na} > r \text{K}$	Bicarbonatée magnésienne
F 06	$r \text{HCO}_3 > r \text{Cl} > r \text{SO}_4 > \text{NO}_3$ $r \text{Ca} > r \text{Mg} > r \text{Na} > r \text{K}$	Bicarbonatée calcique
P 25	$r \text{Cl} > r \text{HCO}_3 > r \text{SO}_4 > \text{NO}_3$ $r \text{Ca} > r \text{Mg} > r \text{Na} > r \text{K}$	Chlorurée calcique
P 57	$r \text{HCO}_3 > r \text{Cl} > r \text{SO}_4 > \text{NO}_3$ $r \text{Ca} > r \text{Na} > r \text{Mg} > r \text{K}$	Bicarbonatée calcique
F 10	$r \text{HCO}_3 > r \text{Cl} > r \text{SO}_4 > \text{NO}_3$ $r \text{Ca} > r \text{Mg} > r \text{Na} > r \text{K}$	Bicarbonatée calcique
P 17	$r \text{HCO}_3 > r \text{Cl} > r \text{SO}_4 > \text{NO}_3$ $r \text{Ca} > r \text{Mg} > r \text{Na} > r \text{K}$	Bicarbonatée calcique
P 20	$r \text{Cl} > r \text{HCO}_3 > r \text{SO}_4 > \text{NO}_3$ $r \text{Ca} > r \text{Na} > r \text{Mg} > r \text{K}$	Chlorurée calcique
F 17	$r \text{HCO}_3 > r \text{Cl} > r \text{SO}_4 > \text{NO}_3$ $r \text{Ca} > r \text{Na} > r \text{Mg} > r \text{K}$	Bicarbonatée calcique
P 29	$r \text{HCO}_3 > r \text{Cl} > r \text{SO}_4 > \text{NO}_3$ $r \text{Ca} > r \text{Na} > r \text{Mg} > r \text{K}$	Bicarbonatée calcique
F 07	$r \text{HCO}_3 > r \text{Cl} > r \text{SO}_4 > \text{NO}_3$ $r \text{Ca} > r \text{Na} > r \text{Mg} > r \text{K}$	Bicarbonatée calcique

### 3.3.1. Faciès Bicarbonaté calcique

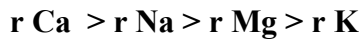
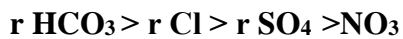
Ce faciès se rencontre au niveau de la majorité des ouvrages (F 52, S 07, S 02, F 21, P 34, F 06, P 57, F 10, P 17, F 17, P 29, F 07), représente 80 % des échantillons ayant le faciès bicarbonaté calcique.

La formule caractéristique est la suivante :



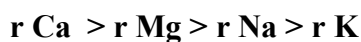
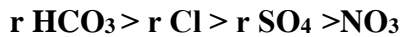
L'analyse de ce faciès d'eau montre la présence de 02 faciès :

Le premier sous faciès représente 58,33 % de la formule caractéristique.



Il est caractérisé par la prédominance des chlorures sur les sulfates et le sodium sur le magnésium. Ce faciès correspond aux ouvrages suivants : F 52, S 07, S 02, P 52, F 17, P 29, F 07.

Le deuxième sous faciès représente 41,66 % de la formule caractéristique.

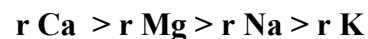
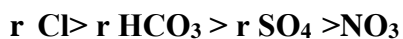


Il est caractérisé par la prédominance des chlorures sur les sulfates et le magnésium sur le sodium. Ce faciès correspond aux ouvrages suivants : F 21, P 34, F 06, F 10, P 17.

### 3.3.2. Faciès Chloruré calcique

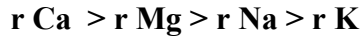
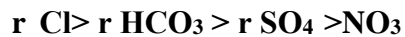
Ce faciès représente 13,33 % des échantillons ayant le faciès chloruré calcique.

La formule caractéristique est la suivante :



L'analyse de ce faciès d'eau montre la présence de 02 faciès :

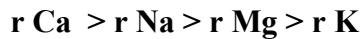
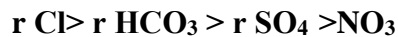
Le premier sous faciès représente 50 % de la formule caractéristique.



Il est caractérisé par la prédominance des bicarbonates sur les sulfates et le magnésium sur le sodium.

Ce faciès correspond au puits P 25.

Le deuxième sous faciès représente 50 % de la formule caractéristique.



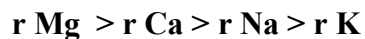
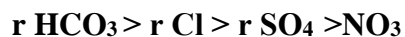
Il est caractérisé par la prédominance des bicarbonates sur les sulfates et le sodium sur le magnésium.

Ce faciès correspond au puits P 20.

### 3.3.3. Faciès Bicarbonaté magnésien

Ce faciès représente 6,66 % des échantillons ayant le faciès bicarbonaté magnésien. Ce faciès correspond au forage F 01.

La formule caractéristique est la suivante :



## 4. Etude des rapports caractéristiques

Les rapports caractéristiques donnent une idée sur la prédominance d'un élément chimique par rapport à l'autre, et de préciser de même le milieu de provenance des eaux souterraines, dans notre cas, nous avons étudié les rapports suivants :



Les résultats obtenus sont rapportées au tableau n°26 :

Tableau n°26 : Rapports caractéristiques.

rCa/rMg	rNa/rK	rCl/rNa	rSO <sub>4</sub> /rCl	rHCO <sub>3</sub> /rSO <sub>4</sub>
1,08	5,16	0,96	0,26	6,99
1,21	8,48	0,92	0,63	2,28
2,21	9,16	0,85	0,26	5,63
1,03	16,71	1,99	0,31	3,19
1,06	5,40	1,39	0,27	3,71
0,96	4,79	1,27	0,17	7,90
1,20	6,03	1,22	0,20	7,20
1,00	13,00	2,67	0,21	3,05
1,62	7,19	1,03	0,21	6,59
1,01	6,25	0,99	0,63	2,40
1,69	5,46	1,86	0,17	7,01
4,25	5,79	0,93	0,57	1,57
1,87	5,54	0,81	0,47	3,81
3,25	12,55	1,20	0,34	3,39
1,13	4,09	1,05	0,26	5,76

#### 4.1. Rapport $r \text{Ca}^{2+}/r \text{Mg}^{2+}$

93,33 % des échantillons sont supérieurs à 01 ce qui caractérise la prédominance des calciums liée à la présence des calcaires sauf pour le forage F 01.

#### 4.2. Rapport $r \text{Na}^+/r \text{K}^+$

Toutes les valeurs de ce rapport sont supérieures à l'unité, ce qui traduit que les eaux de notre région d'étude sont plus sodique que potassique.

#### 4.3. Rapport $r \text{Cl}^-/r \text{Na}^+$

Ce rapport confirme la prédominance des ions chlorures sur les ions sodiques (60 %).

#### 4.4. Rapport $r \text{SO}_4^{2-}/r \text{Cl}^-$

Les résultats de ce rapport sont tous inférieures à l'unité, ce qui traduit par la prédominance des chlorures par rapport aux sulfates.

#### 4.5. Rapport $r \text{HCO}_3^-/r \text{SO}_4^{2-}$

Les résultats sont tous supérieures à l'unité, ce qui confirme la prédominance des ions bicarbonatés sur les ions sulfatés.

### 5. Indice de saturation

L'état thermodynamique du milieu aquifère par rapport à certains minéraux (voir annexe 09).

Ces indices ont été calculés grâce au logiciel Diagramme et sont représentés au tableau n°27.

**Tableau n°27** : Indice de saturation des eaux souterraines de la région d'étude.

Ouvrage	HCO <sub>3</sub> (mg/l)	Is Calcite	Is Aragonite	Is Dolomite	Is Gypse	Is Anhydrite
<b>F 52</b>	311,00	0,4	0,26	0,9	-2,01	-2,23
<b>S 07</b>	261,08	0,3	0,16	0,66	-1,55	-1,77
<b>S 02</b>	264,74	0,47	0,33	0,74	-1,89	-2,11
<b>F 21</b>	365,00	0,7	0,56	1,53	-1,36	-1,58
<b>P 34</b>	259,00	0,76	0,62	1,63	-1,76	-1,98
<b>F 01</b>	301,34	0,62	0,48	1,39	-2,06	-2,28
<b>F 06</b>	292,80	0,52	0,38	1,11	-2	-2,22
<b>P 25</b>	309,88	1,55	1,41	3,23	-1,39	-1,61
<b>P 57</b>	335,00	0,68	0,53	1,28	-1,84	-2,06
<b>F 10</b>	274,50	0,62	0,48	1,38	-1,57	-1,79
<b>P 17</b>	445,30	0,58	0,44	1,07	-1,54	-1,76
<b>P 20</b>	219,60	-0,06	-0,21	-0,62	-1,32	-1,54
<b>F 17</b>	329,40	0,58	0,43	1,02	-1,62	-1,84
<b>P 29</b>	408,70	0,83	0,69	1,29	-1,22	-1,44
<b>F 07</b>	292,80	0,55	0,41	1,18	-1,92	-2,14

Ce tableau et les figures fig.42, fig.43, fig.44, fig.45, fig.46 montrent que l'ensemble des eaux de notre région d'étude sont sous saturées en gypse et en Anhydrite et saturées en calcite, aragonite et dolomite à l'exception du puits P 20 qui est sous saturé.

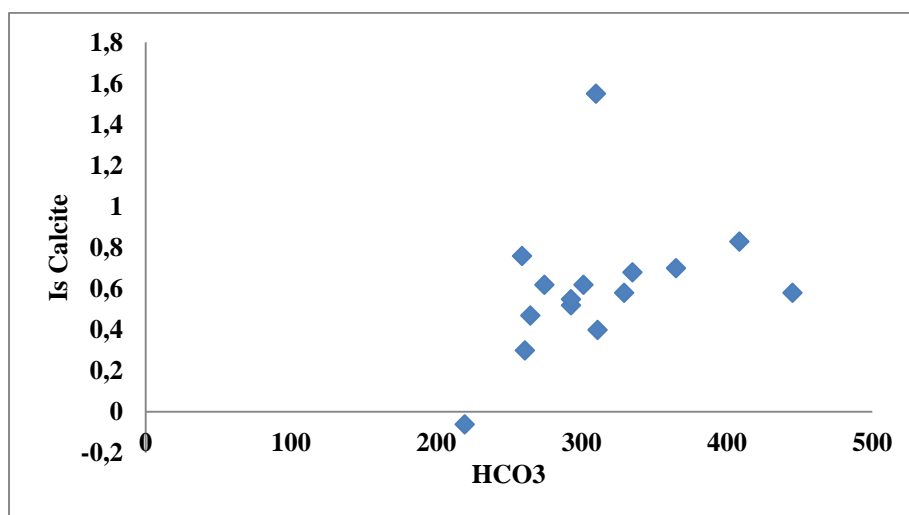


Fig.42 : Variation d'Is Calcite.

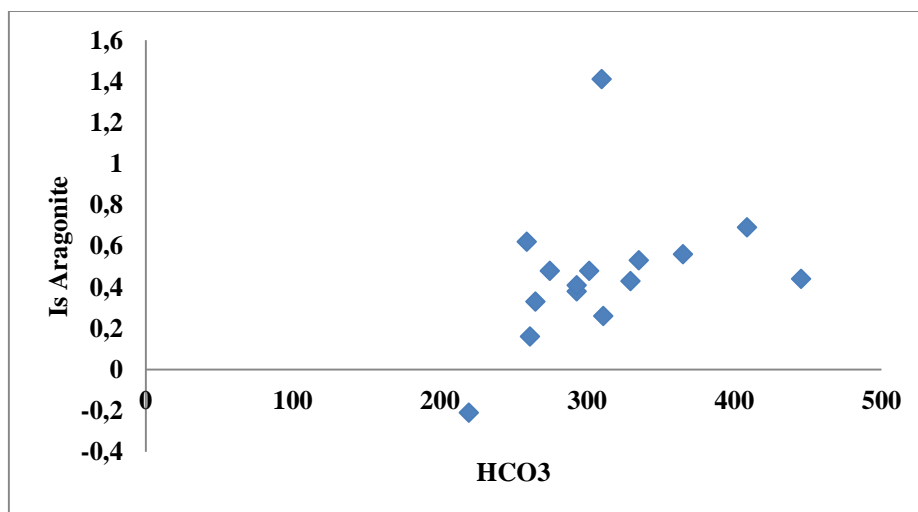


Fig.43 : Variation d'Is Aragonite.

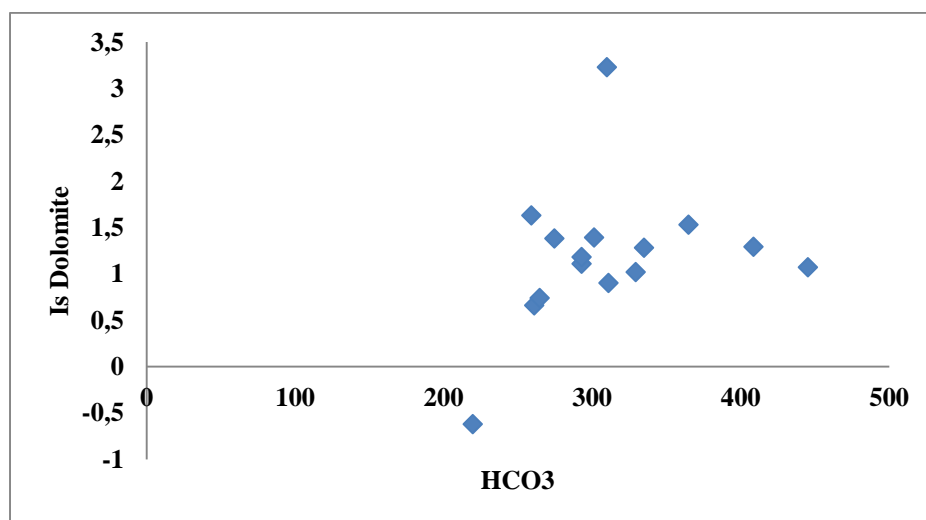


Fig.44 : Variation d'Is Dolomite.

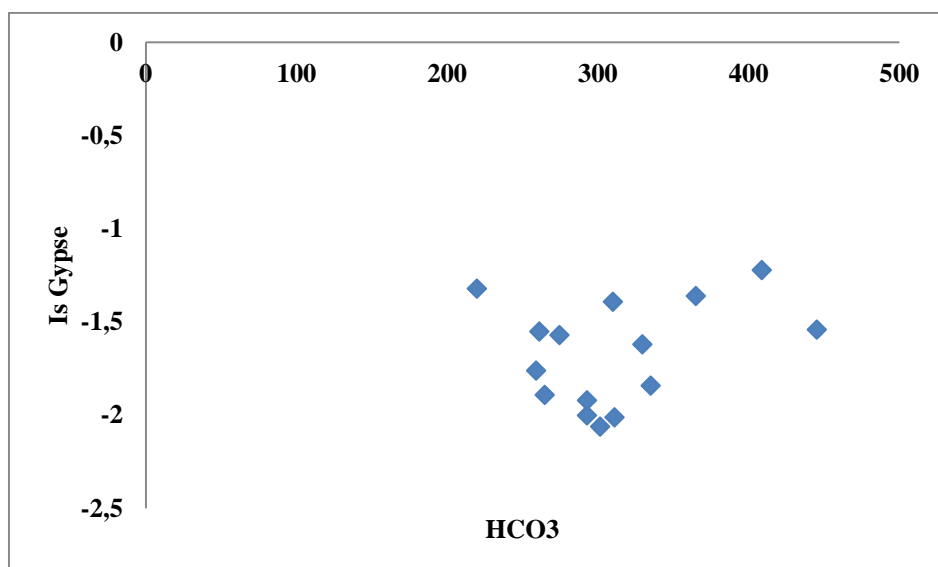


Fig.45 : Variation d'Is Gypse.

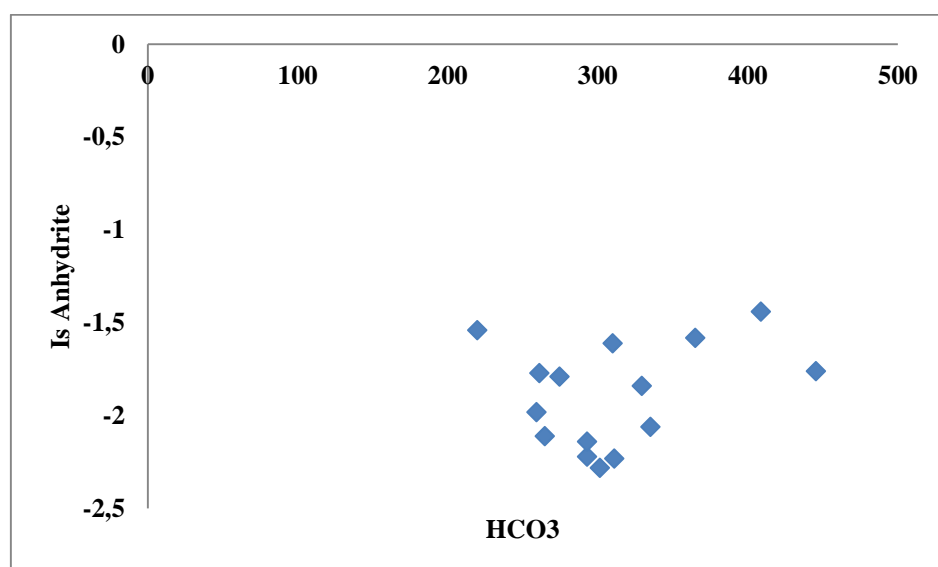


Fig.46 : Variation d'Is Anhydrite.

## 6. Etude statistique des données hydrochimiques

L'analyse en composante principale est une méthode statistique essentiellement descriptive, son objectif est de présenter sous une forme graphique le maximum d'informations contenues dans un tableau de données. Le nombre de variables de base retenues pour l'analyse en composante principale est de 13. Il s'agit des éléments suivants :

$\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ , PH, conductivité, minéralisation et la température.

Les moyennes, minima, maxima et l'écart-type sont donnés sur le tableau ci-dessous :



Tableau n°28 : Paramètres statistiques élémentaires en mg/l.

Variable	Observations	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
Ca	15	59	156	88,92	32,42
Mg	15	14	78	38,24	17,35
Na	15	64	111	77,2	13,53
K	15	7	29	19,53	6,5
Cl	15	99,4	284	149,09	54,65
SO <sub>4</sub>	15	30	110	62,8	27,43
HCO <sub>3</sub>	15	219,6	445,3	311,3	59,27
NO <sub>3</sub>	15	9,09	54,2	20,3	14,38
NO <sub>2</sub>	15	0,009	0,027	0,017	0,005
PH	15	7,09	8,48	7,6	0,3
Cond(μs/cm)	15	905	3020	1524	684,15
Miné	15	686,48	2290,8	1156,01	518,95
T(°C)	15	13	19,5	16,1	1,99

### 6.1. Matrice de corrélation

Les coefficients de corrélations entre les différentes variables sont donnés sur le tableau suivant :

Tableau n °29 : Matrice de corrélation des éléments chimiques.

	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO <sub>4</sub>	HCO <sub>3</sub>	NO <sub>3</sub>	PH	Cond	Miné	T (°C)
Ca	1											
Mg	0,438	1										
Na	0,470	-0,497	1									
K	-0,399	<b>-0,639</b>	0,132	1								
Cl	<b>0,861</b>	<b>0,754</b>	0,111	<b>-0,538</b>	1							
SO <sub>4</sub>	0,473	0,120	0,485	-0,263	0,342	1						
HCO <sub>3</sub>	<b>0,707</b>	0,382	0,172	-0,223	<b>0,530</b>	-0,059	1					
NO <sub>3</sub>	0,308	0,229	0,170	-0,204	0,482	0,479	-0,356	1				
PH	-0,110	<b>0,546</b>	-0,447	-0,403	0,313	-0,192	-0,122	0,124	1			
Cond	<b>0,889</b>	<b>0,722</b>	0,176	<b>-0,624</b>	<b>0,947</b>	0,422	<b>0,590</b>	0,452	0,158	1		
Miné	<b>0,889</b>	<b>0,722</b>	0,176	<b>-0,624</b>	<b>0,947</b>	0,422	<b>0,590</b>	0,452	0,158	<b>1,000</b>	1	
T (°C)	-0,358	-0,207	-0,271	0,299	-0,498	-0,241	0,051	-0,508	-0,275	-0,469	-0,469	1

Le tableau montre de bonnes corrélations entre :

Ca et Cl ( $r = 0,861$ ).

Ca et  $\text{HCO}_3$  ( $r = 0,707$ ).

Ca et conductivité-minéralisation ( $r = 0,889$ ).

Mg et Cl ( $r = 0,754$ ).

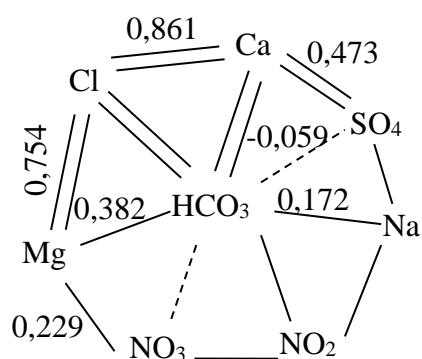
Mg et conductivité-minéralisation ( $r = 0,722$ ).

Cl et conductivité-minéralisation ( $r = 0,947$ ).

Minéralisation et conductivité ( $r = 1$ ).

Il faut noter aussi une assez bonne corrélation entre les bicarbonates et la conductivité ( $r = 0,590$ ) et une corrélation négative entre  $\text{K}^+$  et  $\text{Cl}^-$  ( $r = -0,538$ ),  $\text{K}^+$  et conductivité-minéralisation ( $r = -0,624$ ).

Nous avons représenté les corrélations entre les différents ions sous le schéma suivant :



## 6.2. Analyse en composantes principales

Pour mieux saisir le chimisme, des eaux de la région d'étude, nous avons procédé à une analyse des données des 15 points d'eaux (forages, puits, sources) en composantes principales.

Résultats obtenus au tableau n°30 :

Tableau n°30 : Valeurs propres.

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12
Valeur propre	5,82	2,58	1,80	1,03	0,79	0,44	0,31	0,11	0,04	0,02	0,01	0,001
% variance	44,77	19,88	13,91	7,96	6,14	3,40	2,38	0,88	0,36	0,17	0,10	0,005
% cumulé	44,77	64,65	78,57	86,53	92,67	96,08	98,46	99,35	99,71	99,89	99,99	100

### 6.3. Etude des variables

Au niveau de l'axe 1 (44,78 % de la variance), les éléments  $\text{Cl}^-$ , conductivité, minéralisation,  $\text{Ca}^{2+}$  sont corrélés positivement, alors que la température montre une corrélation négative (fig. 47).

Au niveau de l'axe 2, seul l'ion  $\text{Na}^+$  est corrélé positivement et s'oppose au PH (fig.47), aussi on remarque qu'il y a une contradiction entre le calcium (+) et le magnésium (-).

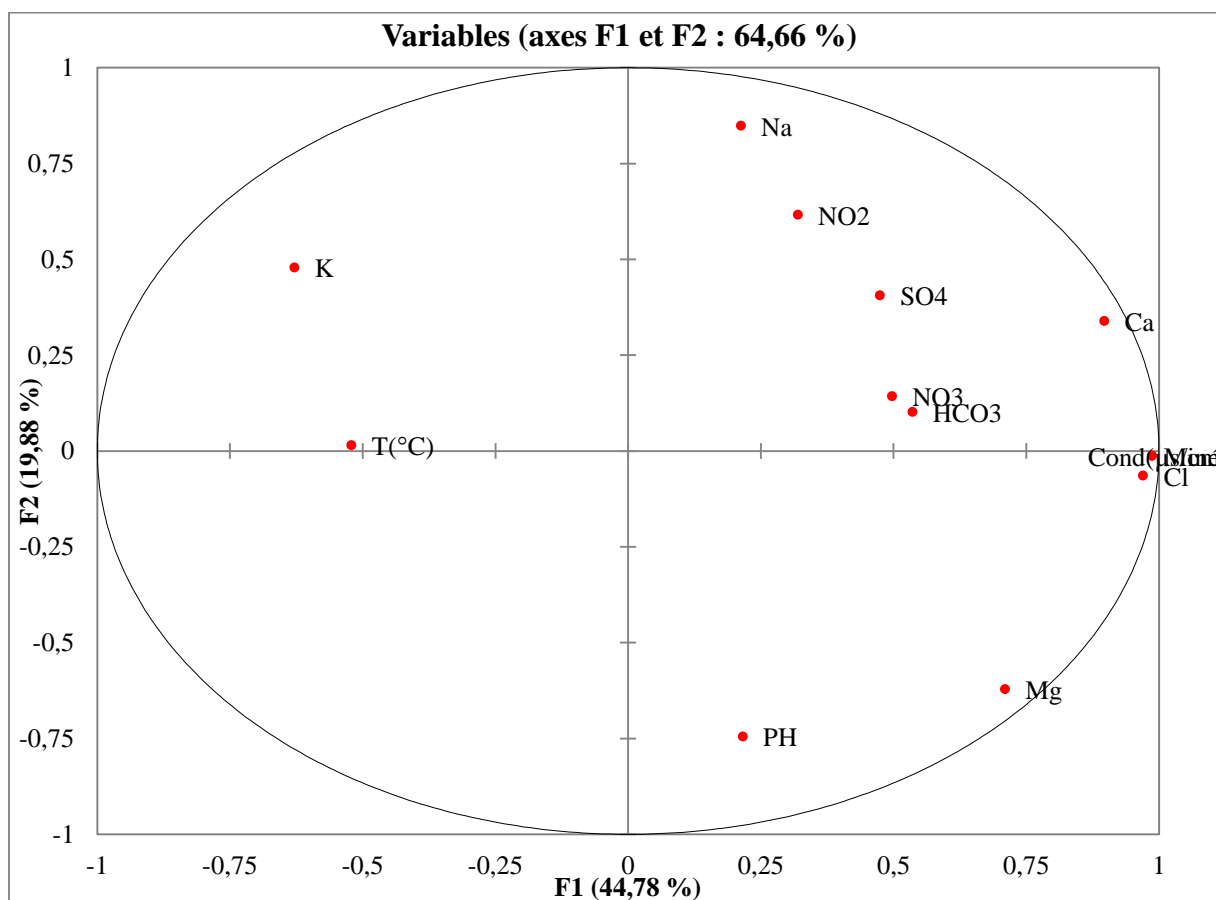


Fig.47 : Etude des variables selon l'axe F1 et F2.

**6.4. Etude des individus**

Dans le plan F1-F2 (64,66 % de la variance).

Les échantillons sont regroupés selon deux zones :

- **Zone 1** : au milieu du plan où sont regroupés des eaux moins minéralisées (P 34, P 29, P 57, F 17, F 01, S 02, S 07, F 07, F 52, F 06) (fig.48, fig.49).
- **Zone 2** : où sont regroupés les eaux beaucoup minéralisées (F 21, P 25, P 29, P 20, P 17) (fig.48, fig.49).

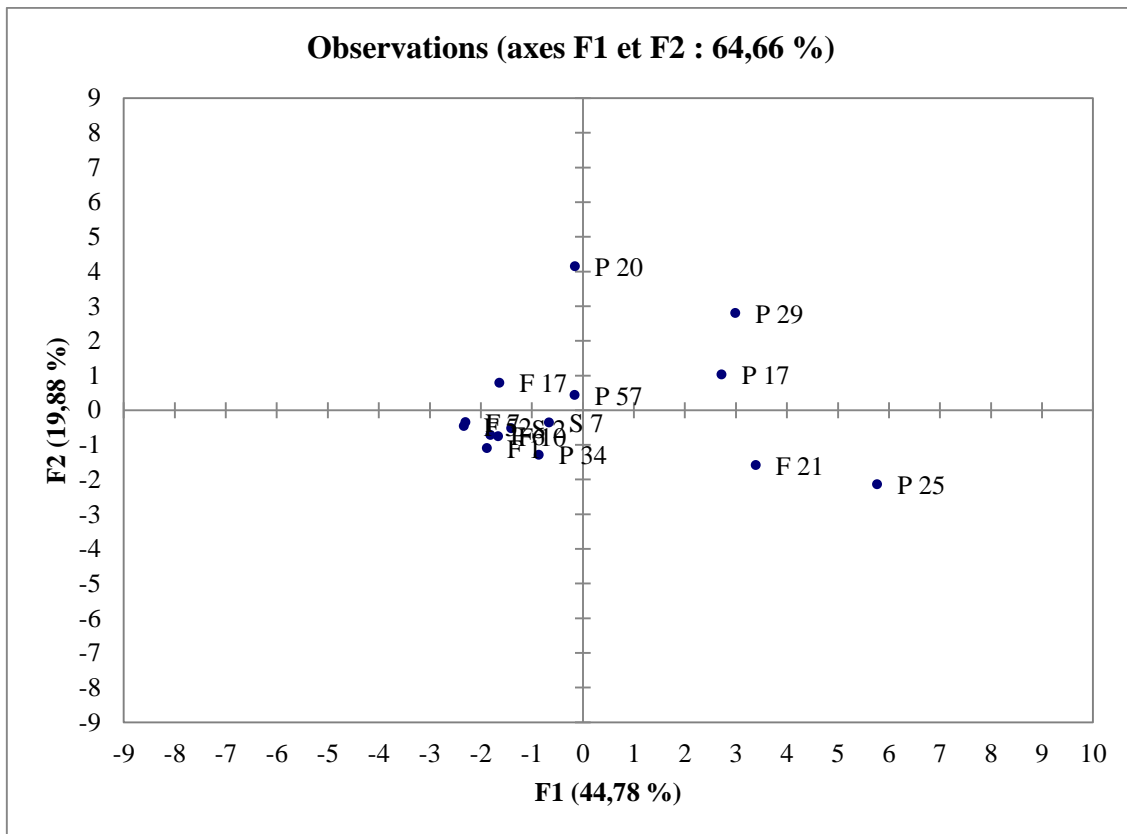


Fig.48 : Etude des individus selon l'axe F1 et F2.

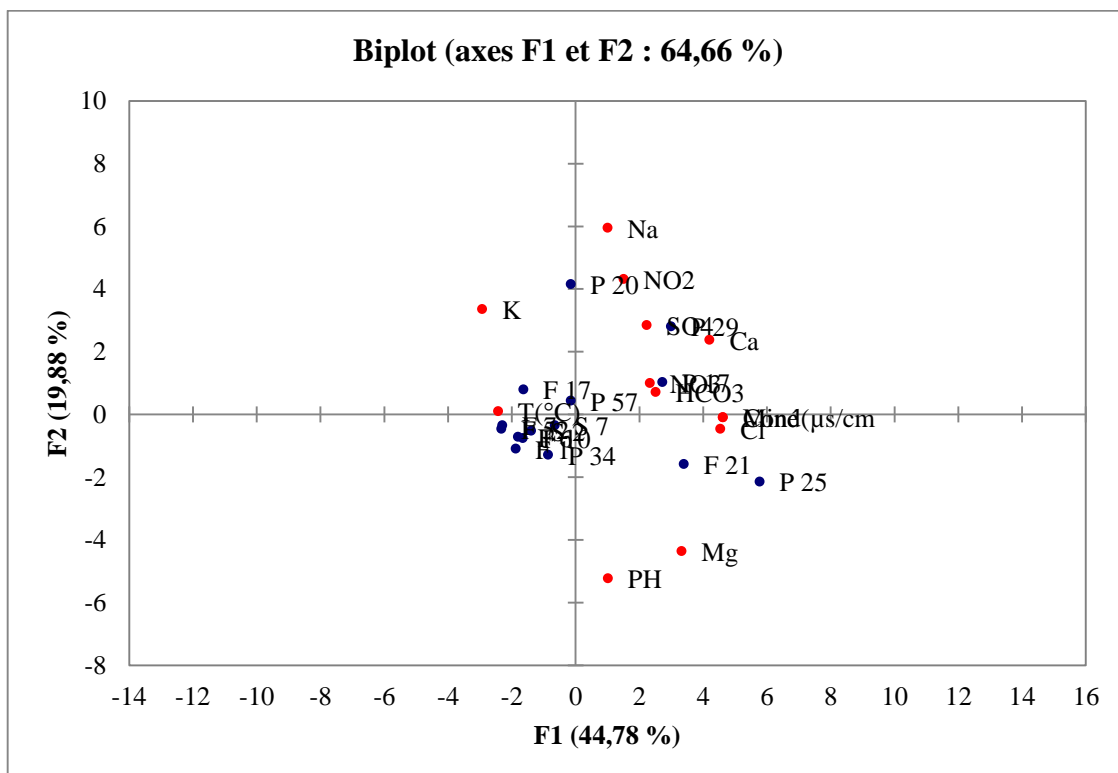


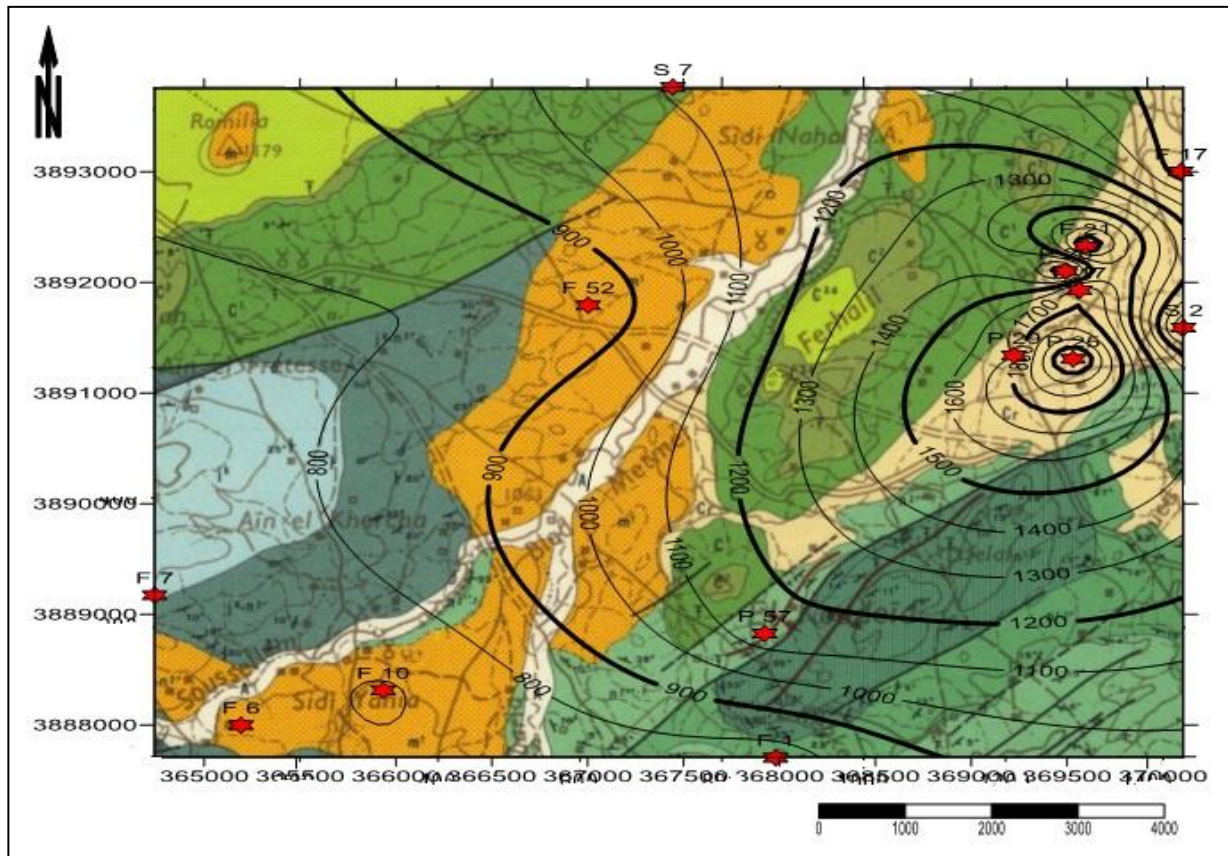
Fig.49 : Biplot des axes F1 et F2.

## 7. Evolution des éléments chimiques

### 7.1. Carte d'isominéralisation

Les valeurs de la minéralisation s'échelonnent entre 600 et 2500 mg/l, la valeur maximale atteint 2290 mg/l au puits P 25 et la valeur minimale atteint 686 mg/l au forage F 10.

Les fortes valeurs de la minéralisation se localisent à l'Est de la zone d'étude et elle suit l'écoulement superficiel (fig.50).



**Fig. 50 :** Carte d'isominéralisation.

### 7.2. Carte d'isoteneurs en $\text{Ca}^{2+}$

Les concentrations en calcium sont fortes à l'Est du sous bassin versant et se diminuent faiblement vers l'Ouest, la valeur maximale est 156 mg/l au puits P 29, la valeur la plus faible est 59 mg/l au forage F 52 (fig.51).

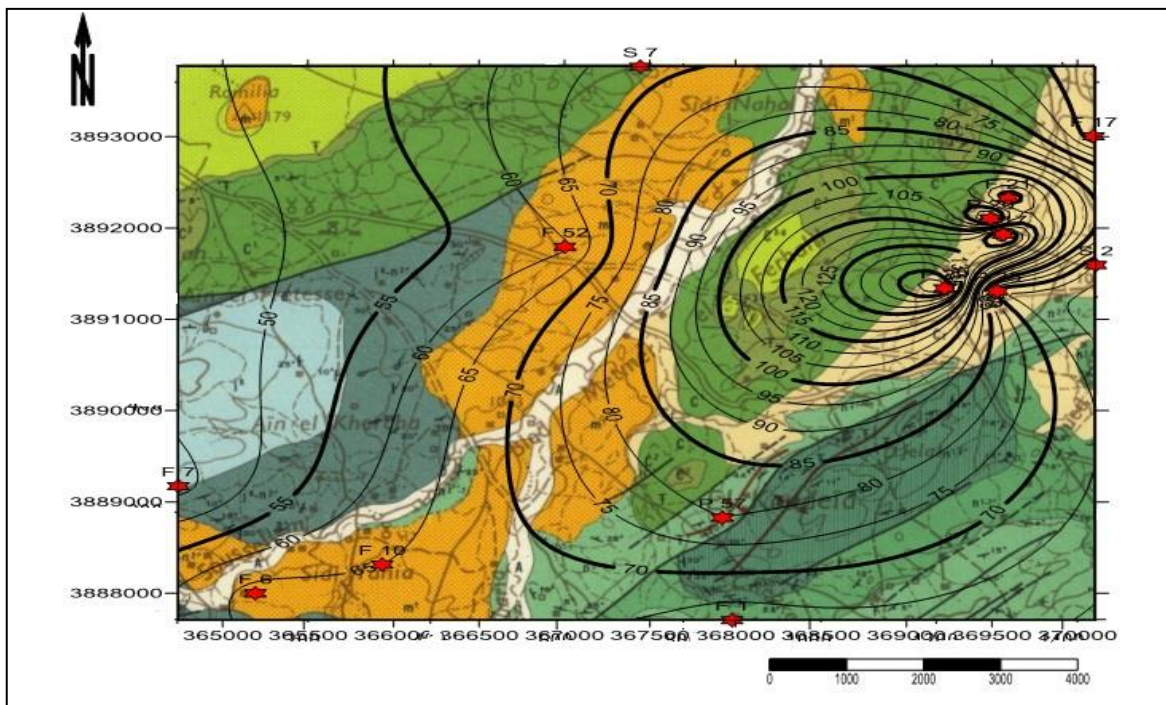


Fig. 51 : Carte d'isoteneurs en  $Ca^{2+}$ .

### 7.3. Carte d'isoteneurs en $Mg^{2+}$

Les concentrations en magnésium sont plus élevées à l'Est et diminuent fortement lorsqu'on déplace vers l'Ouest du sous bassin, la valeur maximale 78 mg/l au puits P 25, la valeur minimale 14 mg/l au puits P 20 (fig.52).

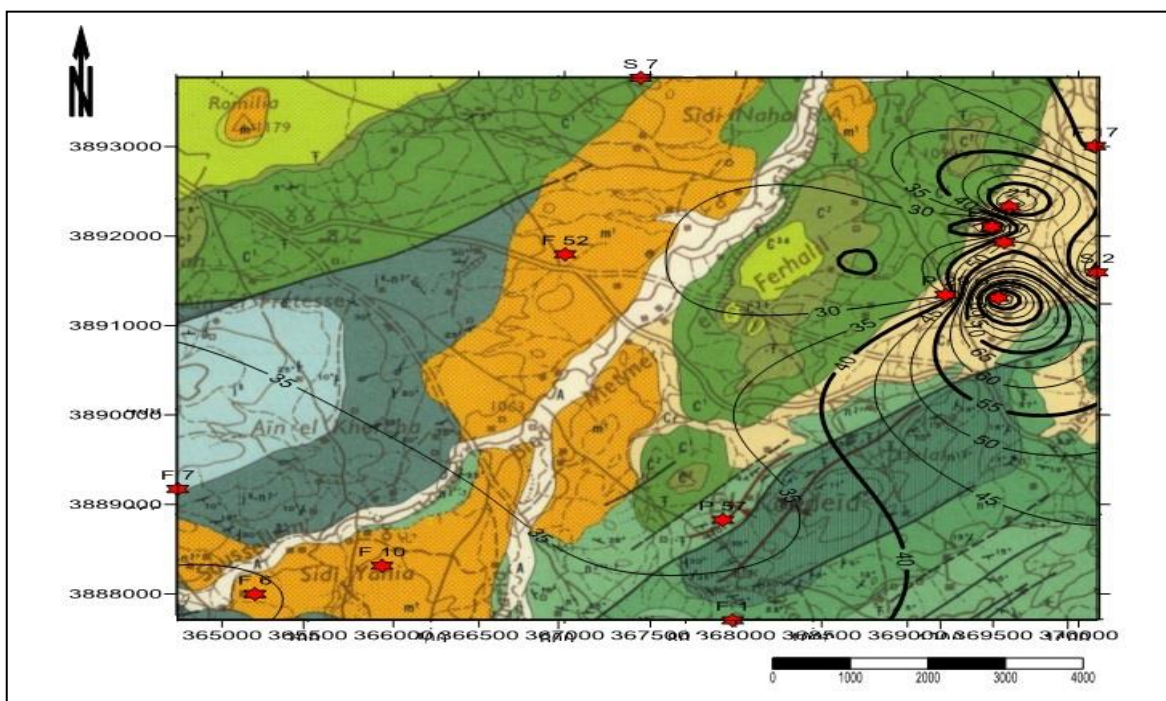


Fig. 52 : Carte d'isoteneurs en  $Mg^{2+}$ .

7.4. Carte d'isoteneurs en Na<sup>+</sup>

Nous remarquons que les concentrations en sodium sont élevées à l'Est du sous bassin, la valeur maximale 111 mg/l au puits P 29, la valeur minimale 64 mg/l au forage F 06 (fig.53).

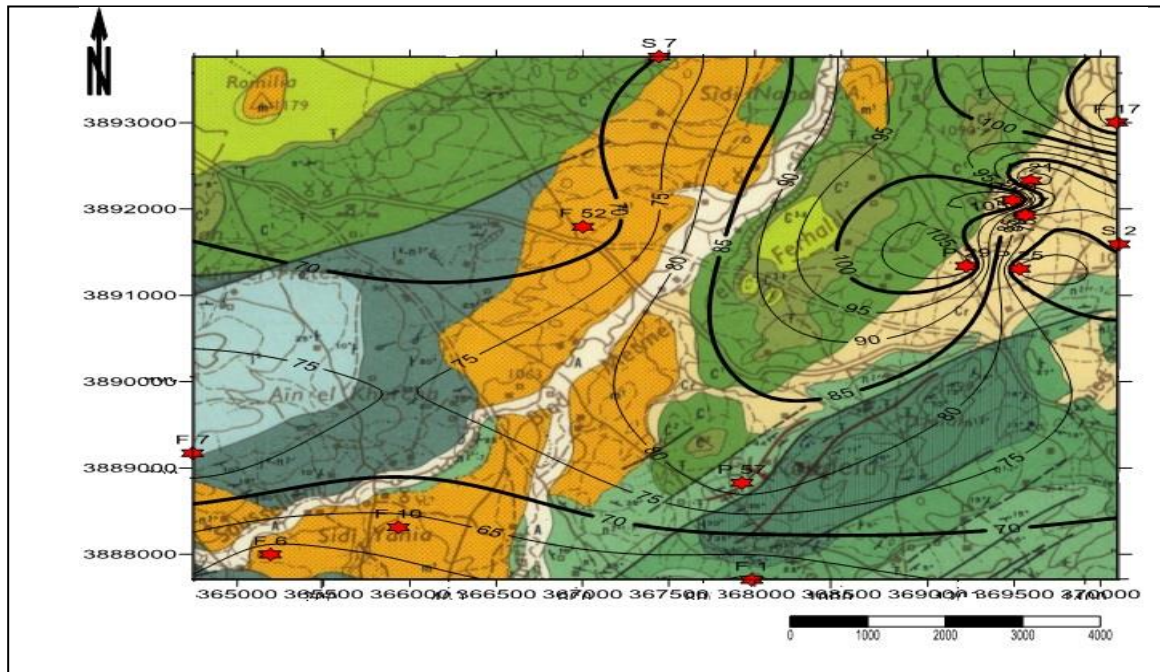


Fig.53 : Carte d'isoteneurs en Na<sup>+</sup>.

7.5. Carte d'isoteneurs en K<sup>+</sup>

Les valeurs du potassium sont importante vers l'Ouest et le Sud-ouest, avec une valeur maximale 29 mg/l au forage F 07 et puits P 20, la valeur minimale 7 mg/l au forage F 21(fig.54).

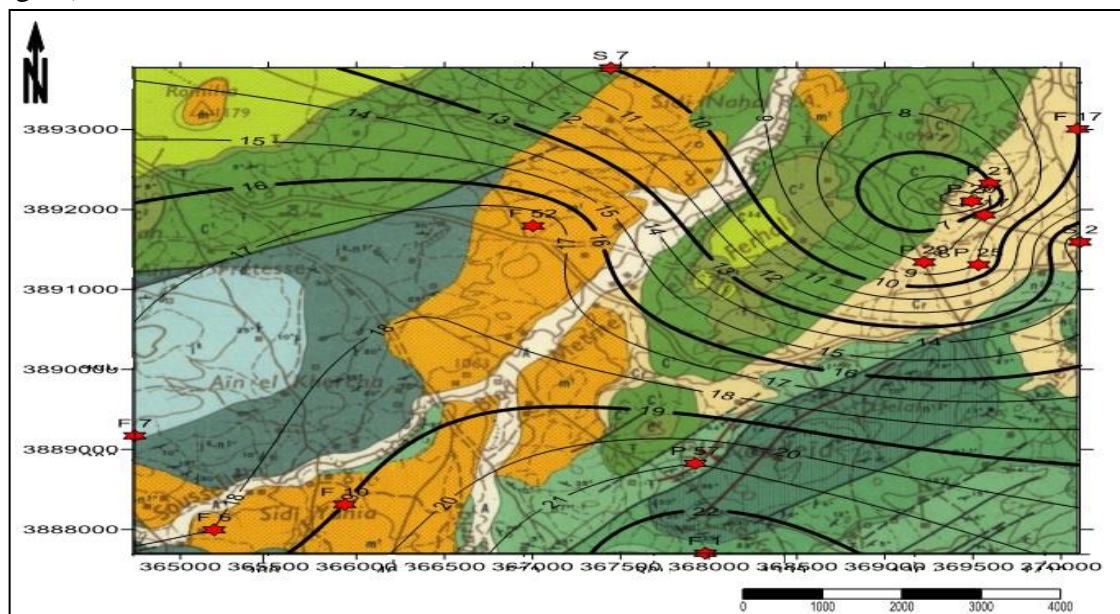


Fig.54 : Carte d'isoteneurs en K<sup>+</sup>.



### 7.6. Carte d'isoteneurs en Cl<sup>-</sup>

Les concentrations en chlorures sont importante et se manifestent surtout à l'Est et se diminuent vers l'Ouest, la valeur maximale 284 mg/l au Puits P 25, la valeur minimale 99,4 mg/l au forage F 52 (fig.55).

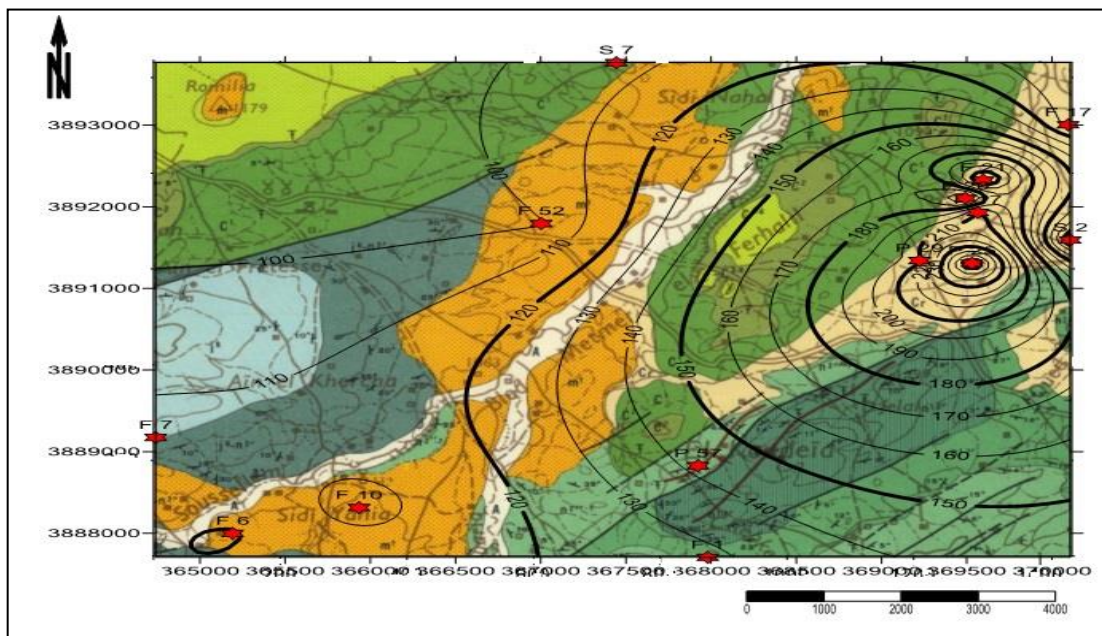


Fig. 55 : Carte d'isoteneurs en Cl<sup>-</sup>.

### 7.7. Carte d'isoteneurs en HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>

Les concentrations en bicarbonates sont les plus fortes, elles se manifestent à l'Est du sous bassin versant et diminuent faiblement vers l'Ouest, la valeur maximale 445 mg/l au puits P 17, la valeur minimale 219 mg/l au puits P 20 (fig.56).

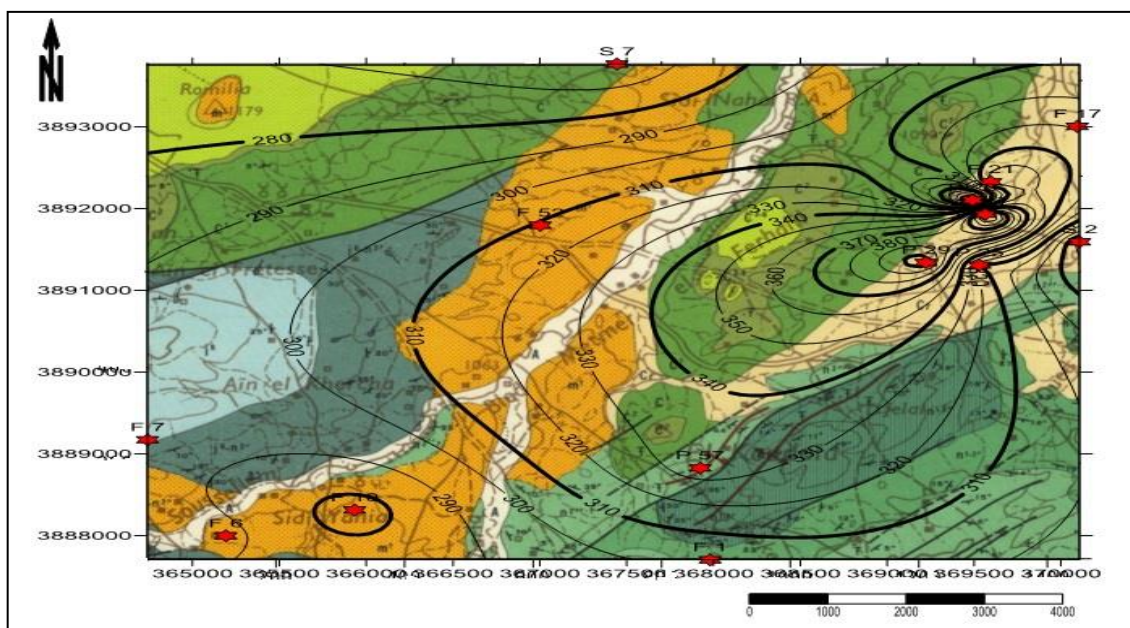


Fig. 56 : Carte d'isoteneurs en HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>.

7.8. Carte d'isoteneurs en  $\text{SO}_4^{2-}$

Les concentrations en sulfates se manifestent à l'Est et au Sud-ouest, la valeur maximale 110 mg/l au puits P 20, la valeur minimale 30 mg/l au forage F 01 (fig.57).

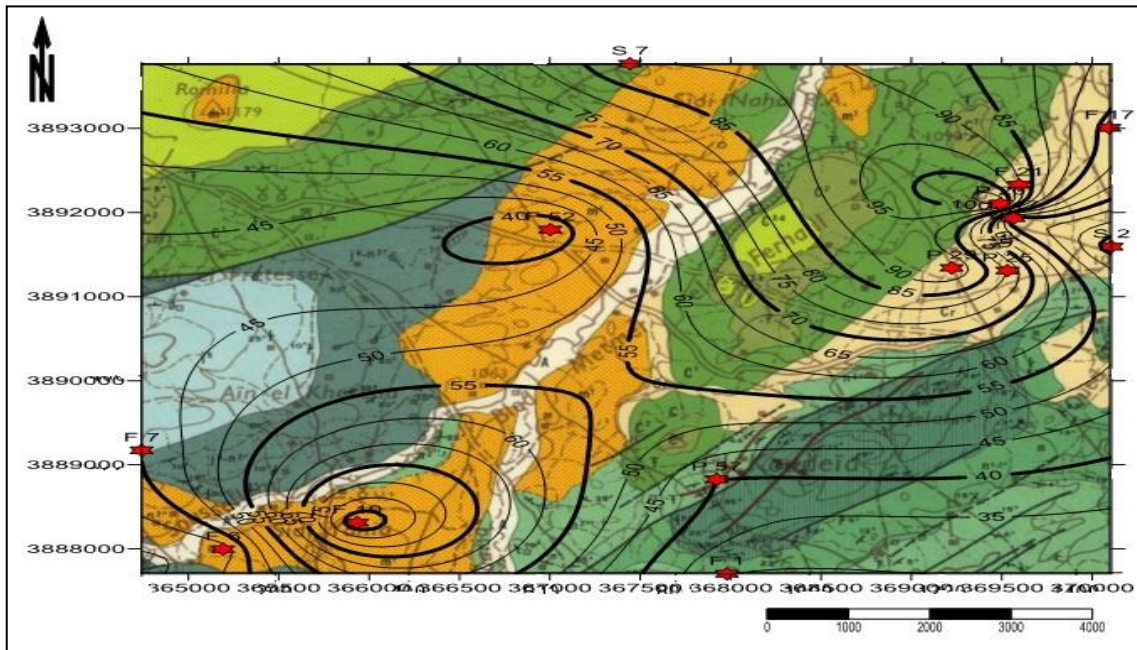


Fig. 57 : Carte d'isoteneurs en  $\text{SO}_4^{2-}$ .

7.9. Carte d'isoteneurs en  $\text{NO}_3^-$

Les valeurs des nitrates sont important surtout à l'Est de la zone d'étude avec une diminution vers l'Ouest, la valeur maximale 54,2 mg/l au puits P 25, la valeur minimale 9 mg/l au forage F 52 (fig.58).

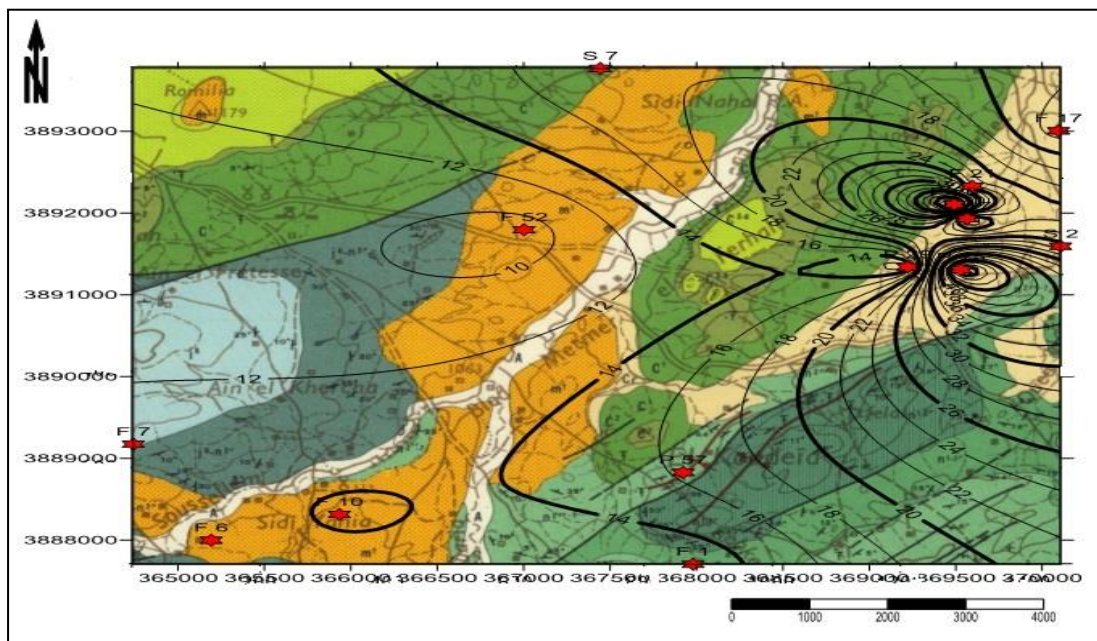


Fig. 58 : Carte d'isoteneurs en  $\text{NO}_3^-$ .

### 8. Indice d'échange de base (i.e.b)

L'indice d'échange de base est le rapport entre les ions échangés et les ions de même nature primitivement existants par la suite, cet indice a été donné indice chloro-alkalin (ica) et d'après Schoeller (1943), cet indice est exprimé par la relation suivante :

$$\text{i.c.a} = [\text{r Cl} - \text{r (Na+K)}] / \text{r Cl}$$

- **i.c.a > 0** : les eaux échangent les ions Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup> contre les ions Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> du terrain encaissant.
- **i.c.a = 0** : il y a équilibre entre la composition chimique de l'eau et de l'encaissant.
- **i.c.a < 0** : l'encaissant libère les ions Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup> et fixe les ions Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> de l'eau.

Dans notre cas, i.c.a est :

**Tableau n°31** : Indice chloro-alkalin de la nappe de la région d'étude.

Puits	i.c.a = $\text{rCl} - (\text{rNa} + \text{rK}) / \text{rCl}$	Puits	i.c.a = $\text{rCl} - (\text{rNa} + \text{rK}) / \text{rCl}$
<b>F 52</b>	-0,24	<b>P 57</b>	-0,10
<b>S 7</b>	-0,22	<b>F 10</b>	-0,18
<b>S 2</b>	-0,30	<b>P 17</b>	0,37
<b>F 21</b>	0,47	<b>P 20</b>	-0,26
<b>P 34</b>	0,15	<b>F 17</b>	-0,45
<b>F 1</b>	0,05	<b>P 29</b>	0,10
<b>F 6</b>	0,05	<b>F 7</b>	-0,18
<b>P 25</b>	0,60		

- i.c.a est positif au niveau des ouvrages F 21, P 34, F 01, F 06, P 25, P 17, P29, c'est-à-dire que les eaux échangent les ions Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup> contre les ions Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> du terrain encaissant. i.c.a est négatif au niveau des ouvrages F 52, S 07, S 02, P 57, F 10, P 20, F 17, F 07, cela veut dire que : l'encaissant libère les ions Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup> et fixe les ions Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> de l'eau.

## 9. Qualité des eaux d'irrigation

L'évolution des paramètres physico-chimiques des eaux influent sur les caractéristiques du sol ce qui aura des répercussions sur le rendement de l'activité agricole. L'étude chimique des eaux pour l'irrigation est nécessaire pour mettre en évidence le danger que présente certains éléments chimiques, pour les plantes qui supportent mal les sols saturés en sodium, une classification des eaux en fonction du pourcentage du sodium absorbé par l'eau (méthode de Richards) permet de bien classer les eaux en fonction de la conductivité électrique et le SAR (Sodium Adsorption Ratio) dans l'eau, défini par la formule suivante :

$$\text{S.A.R} = \frac{\text{r Na}}{\sqrt{(\text{r Ca} + \text{r Mg})/2}}$$

Les valeurs de S.A.R et la conductivité sont rapportées sur le diagramme de classification des eaux d'irrigation qui comporte les classes suivantes :

- **S.A.R ≤ 10** : Les eaux sont excellentes avec peu de risque d'alcalinisation des sols.
- **10 ≤ S.A.R ≤ 18** : Les eaux sont bonnes avec un risque appréciable d'alcalinisation des sols.
- **18 ≤ S.A.R ≤ 26** : Les eaux sont convenables mais peuvent provoquer un risque d'alcalinisation des sols.
- **S.A.R > 26** : Les eaux sont médiocres et présentent un risque d'alcalinisation des sols très fort.

Le tableau n°32 ci-dessous permet de voir après le calcul de S.A.R que la majorité des eaux souterraines de la zone d'étude sont excellentes pour l'irrigation et qui peuvent être utilisées avec peu de risque d'alcalinisation des sols.

La nature et le pourcentage des éléments chimiques dissous dans l'eau présentent une influence sur le type de culture pratiquée.

Le sodium est un élément de base des alcalins et alcalino-terreux jouant un rôle dans le maintien de la perméabilité des sols.

Le pourcentage du sodium (tableau n°32) est un coefficient important dans l'appréciation de la qualité des eaux d'irrigation, il est donné par la formule suivante :

$$\% \text{ Na} = (\text{Na} + \text{K}) * 100 / \text{Ca} + \text{Mg} + (\text{Na} + \text{K})$$

Tableau n°32 : Classification de qualité des eaux en fonction des valeurs du S.A.R.

Ouvrage	% Na	S.A.R	Analyse
F 52	49,17	1,73	Eau excellente
S 07	46,87	1,85	Eau excellente
S 02	50,79	2,17	Eau excellente
F 21	28,20	1,23	Eau excellente
P 34	45,54	1,65	Eau excellente
F 01	46,56	1,60	Eau excellente
F 06	44,81	1,59	Eau excellente
P 25	27,37	1,19	Eau excellente
P 57	50,00	2,16	Eau excellente
F 10	46,11	1,70	Eau excellente
P 17	33,25	1,35	Eau excellente
P 20	53,33	2,49	Eau excellente
F 17	52,11	2,16	Eau excellente
P 29	40,49	2,14	Eau excellente
F 07	49,75	1,75	Eau excellente

Cette méthode fait également intervenir la salinité et le risque d'alcalinisation des sols.

Les résultats obtenus montrent que le pourcentage du sodium compris entre 27,37 % et 53,33 %, la concentration du sodium est importante dans la classification de l'eau d'irrigation car le sodium réduit la perméabilité du sol et habituellement les sols saturés en sodium supportent peu ou pas des végétaux.

## 10. Conclusion

L'étude de la qualité des eaux de la région a été abordée dans le but de mettre en évidence l'aspect qualitatif des eaux souterraines du sous bassin versant d'Oued Souslem.

Les méthodes développées, nous ont permis de déterminer plusieurs facteurs sur la qualité des eaux :

- Le faciès chimique dominant la région d'étude d'après Piper, Schoeller et Stabler pour chaque point d'eau est le faciès bicarbonaté calcique et magnésien issu des eaux en provenance des calcaires et des dolomies caractérisant l'ensemble des points d'eau étudiées (nappe profonde), sauf au niveau des puits P 20 et P 25, le faciès est chloruré calcique (nappe alluviale).
- Une seule origine a été identifiée pour le calcium, le magnésium, le sodium et les bicarbonates, c'est la nature de l'encaissant. Par contre, plusieurs origines ont été marquées pour le potassium, les chlorures, les sulfates et les nitrates (activités agricoles, rejets domestiques, stations d'épurations...).
- Etude des rapports caractéristiques montre une prédominance des calciums et des bicarbonates liée à la présence des calcaires.
- L'analyse en composante principale montre de bonnes corrélations entre : Ca et Cl ; Ca et  $\text{HCO}_3$  ; Ca et conductivité-minéralisation ; Mg et Cl ; minéralisation et conductivité ; Cl et conductivité-minéralisation ; Mg et conductivité-minéralisation.
- Les points d'eaux étudiés sont sous saturés en en gypse et en Anhydrite et saturées en calcite, aragonite et dolomite à l'exception du puits P 20 qui est sous saturé.
- Etude des individus a permis de définir deux zones, l'une correspond aux eaux moins minéralisées qui s'opposent à des eaux beaucoup plus minéralisées.
- Les cartes d'isoteneurs montrent une concentration des éléments chimiques évoluant de l'Ouest vers l'Est en parfaite conformité avec le sens d'écoulement sauf pour le potassium qui prend le sens contraire.
- L'estimation de la qualité des eaux à l'irrigation par la méthode de Richards a montré que les eaux souterraines de la zone d'étude sont de bonne qualité pour l'irrigation.

# ***CONCLUSION GENERALE***

### **Conclusion générale**

Au terme de ce travail, nous pouvons retenir que notre région d'étude qui est le sous bassin de l'oued Souslem est une partie intégrante du Plateau du Sersou qui s'insère entre l'Ouarsenis et les monts du Nador ; il est caractérisé par une vaste surface tabulaire avec un écoulement d'Ouest en Est, cette zone d'étude présente sur le plan lithostratigraphique des formations constituées par des schistes, des dolomies parfois gréseuses des calcaires, d'argiles gypseuses, des conglomérats et des alluvions renfermant des aquifères. Sur le plan structural, deux domaines sont à signaler ; un domaine septentrional correspondant à une dépression à failles profondes et un domaine méridional structure complexe, affecté par des failles verticales.

Dans la partie climatologie, nous nous sommes intéressés tout autant à la distribution des différents paramètres et à leur répartition qu'à l'établissement du bilan hydrique, objet essentiel de toute synthèse hydrogéologique.

Notre région d'étude jouit d'un climat méditerranéen semi aride à hiver doux et humide et à été sec et chaud, avec des précipitations annuelles de l'ordre de 378 mm et une température moyenne de 18°C. L'utilisation des différentes méthodes pour le calcul du bilan a donné des valeurs d'évaporation ou déficit d'écoulement, la méthode de P.Verdeil, de Wundt donne un déficit inférieur aux précipitations et la valeur de l'infiltration est assez faible, estimée à 10 mm/an. Concernant la méthode de Thornthwaite, le ruissellement et l'infiltration est égale à 28 mm.

Malgré le peu d'information disponibles sur l'hydrogéologie de notre région d'étude, nous avons pu tracer quelques cartes piézométriques aussi bien de la nappe alluviale que de la nappe profonde (basses eaux, hautes eaux). Ils ont montré une morphologie identique pour les deux nappes avec deux axes de drainages de direction Nord-ouest vers le Sud-est, l'autre Sud-ouest vers le Nord-est qui se calque sur l'écoulement de surface, une ligne de partage des eaux et une dépression piézométrique au nord-est liée aux pompages excessifs du à la surexploitation des nappes.

L'analyse des données hydrochimique nous a permis de préciser la répartition quantitative des différents éléments et de suivre leur évolution dans l'espace. .

La distribution des éléments chimiques nous montre que tous les ions ont une seule origine sauf les ions K, Cl, SO<sub>4</sub>, et NO<sub>3</sub>.



## *Conclusion générale*

---

La classification des eaux de cette région selon la méthode de Stabler, Piper et Schoeller-Berkaloff montre la prédominance des faciès Bicarbonaté calciques magnésien et chloruré calcique confirmé par les rapports caractéristiques. L'indice de saturation, montre que ces eaux sont sous-saturées en gypse, anhydrite et saturées en calcite, aragonite et dolomite.

Les cartes d'isoteneurs en élément chimique des eaux montre un gradient évoluant de l'Ouest vers l'Est en parfaite conformité avec le sens d'écoulement.

L'analyse en composante principale montre que tous les éléments chimiques sont liés par une bonne corrélation sauf entre Ca et Mg, Na et HCO<sub>3</sub>, Cl et SO<sub>4</sub>, Ca et Na, Na et Cl, Mg et HCO<sub>3</sub>, qui se détache du lot et où nous distinguons deux groupes principaux : les eaux moins minéralisées à gauche de l'axe s'opposant aux les plus minéralisées à droite.

Le regroupement de l'ensemble des résultats statistiques (analyse en composantes principales, étude des variables, étude des individus) exprime les mêmes résultats qui sont quelques fois complémentaires.

***REFERENCES***  
***BIBLIOGRAPHIQUES***

## Références bibliographiques

**ABH-CZ (2007)** : Agence du Bassin Hydrographique Cheliff Zahrez.

**ARARIA N., KHELIFA K., (2015)** : Etude hydrogéologique et caractéristiques hydrochimiques des eaux souterraines de la région de Sougueur. Mémoire de master, université de Tiaret. 89 p.

**AUCLAIR D & BIEHLERJ., (1967)** : Etudes géologiques des hautes plaines oranaises entre Tlemcen et Saida. Publ. Serv. Géol. Algérie Bull. N°34.

**BENEST M., (1981)** : Intercalations de faciès à calpionelles dans des dépôts rythmiques de plate-forme à indices de dessalure. Exemple du Tithonique supérieur carbonaté des Monts de Chellala (avant-pays tellien de l'Ouest algérien).C.R.A cad, Sc., Paris sér, II, t. 292, p. 1287-1290, 2 fig.

**CARATINI C., (1970)**: Etude géologique de la région de Chellala Réibell.Publ.Serv.géol. Algérie, Alger, N.S., n°40, 2t., 311 p106 fig., 18 tab., 9 pl.

**CASTANY G., (1982)** : Hydrogéologie. Objets, méthodes, application PARIS 237p.

**DELEAU P., (1948)** : Etude stratigraphique et paléontologique de Djebel Nadhor.Publ.,Sev.géol.A lgérie, Alger, sér 2, n°17, 126., 25 fig, 6 pl., 1 carte géol.h.t a 1/1000.000.

**DELEAU P., (1948)** : Aperçue sur l'hydrologie du Djebel Nadhor et les Monts de Chellala.

**EMBERGER L., (1942)** : Un projet de classification des climats du point de vue phytogéographie. Bull. Soc. Hist. Nat. Toulouse. France.

**FEGHOUL A., (1987)** : Etude hydrogéologique du bassin versant d'Oued Souslem. Mémoire d'ingénieur d'état, université d'Oran. 130 p.

**LOGICIELS** : Surfer 11, Diagramme, XLSTAT, ARCGIS, Thorn-Cs.xls, Coreldraw.

**MEHAIGUENE M** : Bilan hydrologique et ressources en eau de surface du bassin Cheliff-Zahrez. École nationale supérieure d'Hydraulique Blida – Algérie.

**RODIER J., LEGUBE B., MERLET N et coll., (2005)** : l'Analyse de l'Eau 9<sup>e</sup> édition, Dunod, Paris 1579 p.

**ROGNON Ph.,(1961)** : Remarque sur la campagne de recon. Par sondage eff de Sept. 1959, n°4, 253 A.D ; S.E.S.

**SAFA A., 1983** : Contribution à l'étude hydrogéologique du plateau Sersou. Thèse de magister. Université d'Oran. 235 p.

**SAVORNIN J (1923)** : Etude hydrogéologique du territoire de la commune mixte de Chellala, but serv. Cadre géol. D'Algérie, 3<sup>ème</sup> série, fex 1.

**SCHOELER H., (1943)** : Les eaux souterraines, Bull d'information de l'assistance internationale d'hydrogéologie scientifique, Ed. Masson, Paris, pp 157-210.

**VERDEIL P., (Septembre 1988)** : Abaque pour calcul du déficit d'écoulement en Algérie.

# ***ANNEXES***

Annexe n°01 : Les données climatiques de la station d'Ain Bouhekif (1986-2015).

Année	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juill	Aout	Sep	Oct	Nov	Déc
1986	92,8	77	91	19	7	5,6	0	13	15,7	31,7	30,9	20,2
1987	115,6	77,5	20	7,4	15,1	7,2	16,8	2,2	6,4	59,2	49,9	32,7
1988	34,9	21,9	25	30,8	33,4	31,6	0	1,4	5,1	30	49,7	24,9
1989	15,4	28,4	32	47,1	33,7	17,8	5,8	54,9	13,1	2,2	24,7	20,6
1990	50,9	0,1	23,1	34,6	42,1	34,5	8,7	0,2	23,1	11,2	39,5	60,1
1991	29,7	40,8	119	12,8	24,3	7,1	8	13	19,5	70,8	12,4	13,9
1992	22,7	18,9	48,6	50,9	58,3	11,2	18,3	4,5	13	21,1	19,5	30,8
1993	1,5	30,3	23,2	35,7	59	0	0	13,7	30,6	12	27,8	33,8
1994	29,5	32,5	2,9	23	8,2	0	2,2	6,2	117,9	88,1	13,5	10,3
1995	49,9	12,9	63,5	20,5	3,4	22,5	0	5,3	26,5	20,4	22,8	43,1
1996	59,9	128,1	41,5	63,5	26,1	23,3	29,6	9,7	10,9	15,3	5,7	43,2
1997	55,5	7	0	130	30	0,9	1,9	52,8	87,7	32,8	105,8	38
1998	25,7	29,2	17,2	50,4	65,9	1,5	0	3,9	12,4	7,7	8,8	29,8
1999	56,5	22,1	67	0	11,5	0,5	0,3	13,8	31,9	55,8	25,3	78,7
2000	0,5	0	39	22,4	22	0	0,6	2,1	17,5	21,7	61,6	55,4
2001	96,3	33,2	5,1	33,8	12,4	0,1	1	5,6	46,5	19,6	25,1	38,6
2002	56	14,8	17,9	39,3	49,5	8,1	0,7	30,5	0,5	16,2	60,4	28,3
2003	58,2	59,7	6,3	50	12,6	4,3	2,1	26,4	24	85,2	68	69,9
2004	11,7	38,9	17,3	39,1	66,1	19	5,8	10,5	34	35,8	19,4	63,6
2005	15,7	29,4	41,8	7,1	1,6	18,7	5,4	0	25,6	49,4	54,5	23,3
2006	63,2	61,2	14,2	40,4	75,2	2,4	4,1	23,8	10,3	12,3	6,4	45,8
2007	21,1	56,5	41,3	91,7	15,5	0,5	5,1	7,8	27,7	50,7	38,9	5,9
2008	20,2	29,7	26,9	12,3	62,3	13,4	10,6	1,9	33,6	78,9	50,3	78,8
2009	100,1	32,5	80,4	79,5	21,1	6,9	1,3	4,8	90,4	10,3	50	81,3
2010	57,4	138,6	66,6	14,6	44,1	5,8	0,2	35,3	7,5	47,6	52	22,4
2011	42,4	73,5	26,8	41,6	44,2	32	3,1	0,2	0,1	38,2	75,4	10
2012	11,7	48,7	54,9	89,6	16,2	0,9	0,7	5,2	12,9	52,3	99,3	19,7
2013	88,2	70,6	89,8	96,2	43,6	0,1	7,4	7,3	11,8	0,1	67,3	57,5
2014	60,6	53,4	98,2	3,3	9,6	56,1	0	3	111,1	32,9	56,6	62,4
2015	45,3	68,1	11,9	124,3	16,2	16	0	9	26,3	74,3	20,8	0

**Annexe n°02 : Les données climatiques de la station de Sougueur (1999-2015).**

<b>Année</b>	<b>Jan</b>	<b>Fév</b>	<b>Mars</b>	<b>Avril</b>	<b>Mai</b>	<b>Juin</b>	<b>Juill</b>	<b>Aout</b>	<b>Sep</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Déc</b>
<b>1999</b>	52,5	23,2	69,4	0,3	22	0	2,4	12,8	21,2	47,3	38,2	91,5
<b>2000</b>	0	0	0,9	28,7	12,9	30,3	0	4	18,5	22,8	54,6	43,5
<b>2001</b>	65,9	51,7	4,2	27	4	0	0	16,1	25,7	16,2	19,5	33
<b>2002</b>	10	11,5	13,5	48,7	33,9	1,4	4	26,3	3,5	25,8	59,7	26,3
<b>2003</b>	81,3	84,8	16,4	41,9	11	36,8	4,5	37,5	8,5	81,4	51,8	61,6
<b>2004</b>	20,5	43,4	28,1	46,5	66,9	10,6	8,9	14,9	16	21,3	21,8	67,6
<b>2005</b>	26,5	24,5	38,9	5,9	0	26,6	0,9	0	51,2	102,3	53,7	16,7
<b>2006</b>	101,7	77,7	17,6	21,1	58,4	0,5	0,8	0	20,4	12,8	7,4	47,8
<b>2007</b>	18,1	47,3	44,3	68,2	8,4	0	14,9	12,1	41,2	44,6	26,3	10,4
<b>2008</b>	12,7	23,4	23,4	11,1	59,9	15,4	11,2	0,2	46,9	87,9	50,9	74,6
<b>2009</b>	105,6	35,7	73,8	75	29,9	14,5	2,3	1	109,4	9,9	35,9	68,2
<b>2010</b>	57,4	135,5	48,2	10,3	27,5	19,9	2,3	28	3,5	40,3	51,8	11,6
<b>2011</b>	17	77	24,6	31,6	34,6	30,2	4,6	2,8	1,3	37,9	54,7	11,5
<b>2012</b>	2,9	19	65,9	104,5	10,2	7	2,4	1,1	8	33,4	118,5	10,3
<b>2013</b>	113,7	61,9	82,4	111,2	41,7	0	3,7	8,7	12,3	0,9	75,3	62,1
<b>2014</b>	65,2	55,1	97,2	2,8	10,2	50,2	0	11,2	33,8	32,1	70,1	56
<b>2015</b>	62,2	121,6	15,2	0	24,5	11	0	34,2	32,5	134,3	21,8	0

**Annexe n°03** : Précipitations interannuelles en (mm) de la station d'Ain Bouchekif (1986-2015).

<b>Année</b>	<b>Somme (mm)</b>	<b>Année</b>	<b>Somme (mm)</b>
1986/1987	360,3	2001/2002	346,6
1987/1988	327,2	2002/2003	325
1988/1989	344,8	2003/2004	455,5
1989/1990	254,8	2004/2005	272,5
1990/1991	388,6	2005/2006	437,3
1991/1992	350	2006/2007	314,3
1992/1993	247,8	2007/2008	300,5
1993/1994	208,7	2008/2009	568,2
1994/1995	407,8	2009/2010	594,6
1995/1996	494,5	2010/2011	393,3
1996/1997	353,2	2011/2012	351,6
1997/1998	458,1	2012/2013	587,4
1998/1999	230,4	2013/2014	420,9
1999/2000	278,3	2014/2015	553,8
2000/2001	343,7	<b>P moy interannuelles</b>	<b>378,26</b>

**Annexe n°04** : Précipitations interannuelles en (mm) de la station de Sougueur (1999-2015).

<b>Année</b>	<b>Somme (mm)</b>	<b>Année</b>	<b>Somme (mm)</b>
1999/2000	275	2007/2008	279,8
2000/2001	308,3	2008/2009	598,1
2001/2002	243,7	2009/2010	552,5
2002/2003	429,5	2010/2011	329,6
2003/2004	443,1	2011/2012	318,4
2004/2005	250	2012/2013	593,5
2005/2006	501,7	2013/2014	442,5
2006/2007	301,7	2014/2015	460,7
/	/	<b>P moy interannuelles</b>	<b>395,50</b>



**Annexe n°05 : Coefficients pluviométriques de la station d'Ain Bouchekif (1986-2015).**

<b>Année</b>	<b>CP</b>	<b>Observation</b>	<b>Année</b>	<b>Cp</b>	<b>Observation</b>
1986/1987	0,95	AD	2001/2002	0,91	AD
1987/1988	0,86	AD	2002/2003	0,85	AD
1988/1989	0,91	AD	2003/2004	1,20	AE
1989/1990	0,67	AD	2004/2005	0,72	AD
1990/1991	1,02	AE	2005/2006	1,15	AE
1991/1992	0,92	AD	2006/2007	0,83	AD
1992/1993	0,65	AD	2007/2008	0,79	AD
1993/1994	0,55	AD	2008/2009	1,50	AE
1994/1995	1,07	AE	2009/2010	1,57	AE
1995/1996	1,30	AE	2010/2011	1,03	AE
1996/1997	0,93	AD	2011/2012	0,92	AD
1997/1998	1,21	AE	2012/2013	1,55	AE
1998/1999	0,60	AD	2013/2014	1,11	AE
1999/2000	0,73	AD	2014/2015	1,46	AE
2000/2001	0,90	AD			

**Annexe n°06 : Coefficients pluviométriques de la station de Sougueur (1999-2015).**

<b>Année</b>	<b>Cp</b>	<b>Observation</b>	<b>Année</b>	<b>Cp</b>	<b>Observation</b>
1999/2000	0,69	AD	2007/2008	0,70	<b>AD</b>
2000/2001	0,77	AD	2008/2009	1,51	<b>AE</b>
2001/2002	0,61	AD	2009/2010	1,39	<b>AE</b>
2002/2003	1,08	AE	2010/2011	0,83	<b>AD</b>
2003/2004	1,12	AE	2011/2012	0,80	<b>AD</b>
2004/2005	0,63	AD	2012/2013	1,50	<b>AE</b>
2005/2006	1,26	AE	2013/2014	1,11	<b>AE</b>
2006/2007	0,76	AD	2014/2015	1,16	<b>AE</b>

## Annexe n°07 : L'inventaire des Forages, des Puits et des Sources de notre zone.

F : forage      P : puits      S : source

NP : niveau piézométrique      NS : niveau statique

Forage	X (UTM)	Y (UTM)	Z (m)	NP (2014)	NS	NP (2015)	NS
F01	367 980,15	3 887 704,48	1090	1 088,10	1,90	1 089,20	0,80
F02	364 093,55	3 889 881,91	1175	1 135,60	39,40	1 136,50	38,50
F03	363 193,75	3 888 459,48	1137	1 127,85	9,15	1 128,20	8,80
F04	363 251,22	3 888 409,31	1136	1 128,00	8,00	1 130,00	6,00
F05	363 890,81	3 887 841,95	1125	1 118,30	6,70	1 119,96	5,04
F06	365 191,95	3 887 998,16	1112	1 106,40	5,60	1 108,00	4,00
F07	364 741,09	3 889 172,74	1134	1 125,75	9,00	1 127,25	6,75
F08	364 376,05	3 889 307,61	1145	1 125,00	20,00	1 126,80	18,20
F09	365 767,96	3 888 599,74	1102	1 093,90	8,10	1 094,60	7,40
F10	365 933,35	3 888 313,80	1118	1 096,43	21,57	1 097,70	20,30
F11	367 494,99	3 886 207,83	1115	1 100,70	14,30	1 109,80	5,20
F12	370 241,24	3 885 595,03	1239	1 191,47	47,53	1 193,50	45,50
F13	370 611,13	3 885 962,59	1242	1 190,60	51,40	1 192,70	49,30
F14	370 665,50	3 886 756,80	1206	1 192,90	13,10	1 193,90	12,10
F15	370 170,70	3 887 213,74	1167	1 146,55	20,45	1 147,20	19,80
F16	369 998,23	3 891 958,43	1054	1 042,40	11,60	1 044,00	10,00
F17	370 094,21	3 893 004,72	1045	1 037,65	7,35	1 039,00	6
F18	369 945,37	3 892 683,31	1045	1 036,80	8,20	1 038,00	7,00
F19	369 831,27	3 892 490,83	1042	1 039,90	2,10	1 041,00	1,00
F20	369 717,25	3 892 480,14	1043	1 039,60	3,40	1 040,70	2,30
F21	369 596,12	3 892 327,82	1047	1 041,55	5,45	1 042,60	4,40
F22	369 182,35	3 891 711,34	1053	1 046,25	6,75	1 047,00	6
F23	369 277,12	3 891 965,73	1051	1 045,73	5,27	1 046,70	4,30
F24	369 552,62	3 892 997,10	1053	1 042,00	11,00	1 043,10	9,90
F25	365 273,82	3 893 503,48	1169	1 150,70	18,30	1 151,50	17,50
F26	365 409,23	3 893 421,35	1151	1 136,25	14,75	1 137,00	14,00
F27	365 470,67	3 893 469,74	1150	1 133,95	16,05	1 134,80	15,20
F28	366 877,85	3 892 808,00	1106	1 081,20	24,80	1 082,10	23,90
F29	367 316,37	3 892 860,11	1089	1 074,90	14,10	1 076,00	13,00
F30	367 425,11	3 892 510,32	1085	1 075,00	10,00	1 076,60	8,40
F31	367 819,75	3 892 328,91	1103	1 092,40	10,60	1 093,00	10,00

<b>F32</b>	367 468,98	3 891 184,67	1095	1 082,30	12,70	1 083,20	11,8
<b>F33</b>	367 539,29	3 891 146,67	1095	1 085,00	10,00	1 087,00	8,00
<b>F34</b>	367 827,43	3 891 120,89	1091	1 083,70	7,30	1 085,20	5,80
<b>F35</b>	368 035,79	3 890 483,08	1079	1 071,25	7,75	1 073,00	6,00
<b>F36</b>	367 810,36	3 888 387,94	1079	1 066,90	12,10	1 070,20	8,80
<b>F37</b>	368 118,68	3 888 525,19	1081	1 072,00	9,00	1 074,00	7
<b>F38</b>	368 438,77	3 890 172,17	1076	1 071,95	4,05	1 074,00	2,00
<b>F39</b>	368 296,10	3 888 017,27	1095	1 062,55	32,45	1 066,90	28,10
<b>F40</b>	367 244,27	3 886 032,78	1118	1 095,70	22,30	1 102,45	15,55
<b>F41</b>	366 577,40	3 886 316,80	1127	1 102,15	24,85	1 109,00	18,00
<b>F42</b>	366 397,48	3 886 652,24	1128	1 103,00	25,00	1 109,50	18,5
<b>F43</b>	365 716,51	3 891 620,31	1126	1 113,00	13,00	1 115,65	10,35
<b>F44</b>	365 975,32	3 891 665,78	1126	1 097,80	28,20	1 100,80	25,20
<b>F45</b>	366 295,91	3 891 953,77	1111	1 080,85	30,15	1 081,20	29,80
<b>F46(Art)</b>	367 061,83	3 891 033,48	1096	1 096,00	0,00	1 096,00	0
<b>F47</b>	367 443,78	3 889 980,21	1076	1 056,25	19,75	1 057,00	19,00
<b>F48</b>	367 600,05	3 889 068,91	1114	1 106,75	7,25	1 107,60	6,40
<b>F49</b>	366 716,59	3 888 724,41	1100	1 086,20	13,80	1 088,00	12,00
<b>F50</b>	366 902,68	3 890 018,95	1093	1 076,90	16,10	1 077,60	15,40
<b>F51</b>	367 552,58	3 890 151,18	1084	1 077,40	6,60	1 078,30	5,7
<b>F52</b>	367 002,16	3 891 795,47	1097	1 090,80	6,20	1 091,00	6,00
<b>F53</b>	366 080,07	3 892 246,62	1105	1 102,30	2,70	1 103,80	1,20
<b>F54</b>	365 973,97	3 892 429,99	1124	1 091,80	32,20	1 092,20	31,80
<b>F55</b>	364 517,96	3 894 731,94	1124	1 117,60	6,40	1 118,60	5,40
<b>F56</b>	369 456,85	3 893 374,41	1054	1 047,40	6,60	1 048,30	5,70
<b>S01</b>	370509,07	3885021,16	1273	1273	0	1273	0
<b>S02</b>	370106,86	3891593,27	1088	1088	0	1088	0
<b>S03</b>	371587,15	3889618,6	1130	1130	0	1130	0
<b>S04</b>	368969,86	3887514,49	1123	1123	0	1123	0
<b>S05</b>	369791,26	3887237,67	1170	1170	0	1170	0
<b>S06</b>	368155,21	3886509,44	1131	1131	0	1131	0
<b>S07</b>	367443,52	3893767,27	1102	1102	0	1102	0
<b>S08</b>	364620,13	3887852,61	1122	1122	0	1122	0
<b>S09</b>	368656,05	3893287,39	1062	1062	0	1062	0
<b>Moyenne</b>					<b>12,34</b>		<b>10,83</b>

<b>Puits</b>	<b>X (UTM)</b>	<b>Y (UTM)</b>	<b>Z (m)</b>	<b>NP (2014)</b>	<b>NS</b>	<b>NP (2015)</b>	<b>NS</b>
<b>P01</b>	363 727,30	3 888 417,55	1139	1 127,50	11,50	1 127,70	11,30
<b>P02</b>	363 798 ,12	3 888 511,06	1142	1 131,16	10,84	1 132,20	9,8
<b>P03</b>	362 578,55	3 887 288,58	1145	1 139,33	5,67	1 141,30	3,70
<b>P04</b>	362 471,15	3 887 219,34	1145	1 141,30	3,70	1 142,60	2,40
<b>P05</b>	364 291,17	3 888 202,64	1116	1 113,00	3,00	1 114,80	1,20
<b>P06</b>	364 495,09	3 888 125,64	1113	1 107,79	5,21	1 110,50	2,50
<b>P07</b>	364 617,74	3 888 031,37	1113	1 104,00	9,00	1 108,75	4,25
<b>P08</b>	364 652,11	3 887 959,98	1116	1 112,00	4,00	1 113,55	2,45
<b>P09</b>	364 991,58	3 887 803,93	1111	1 108,20	2,80	1 109,45	1,55
<b>P10</b>	370 372,20	3 886 785,64	1196	1 193,70	2,30	1 193,35	2,65
<b>P11</b>	369 916,24	3 892 064,38	1046	1 041,40	4,60	1 042,20	3,80
<b>P12</b>	370 012,60	3 892 078,40	1050	1 042,32	7,68	1 043,20	6,80
<b>P13</b>	370 607,66	3 892 636,85	1036	1 032,75	3,25	1 033,50	2,50
<b>P14</b>	370 351,05	3 892 917,85	1037	1 033,80	3,20	1 035,50	1,50
<b>P15</b>	370 346,73	3 892 615,93	1039	1 034,75	4,25	1 035,40	3,60
<b>P16</b>	369 625,81	3 892 456,81	1045	1 041,28	3,72	1 042,00	3,00
<b>P17</b>	369 565,10	3 891 930,76	1049	1 046,30	2,70	1 047,20	1,80
<b>P18</b>	369 602,52	3 891 893,25	1051	1 046,30	4,70	1 047,10	3,90
<b>P19</b>	369 678,82	3 891 919,88	1053	1 046,60	6,40	1 047,30	5,70
<b>P20</b>	369 491,69	3 892 104,38	1049	1 045,00	4,00	1 045,80	3,20
<b>P21</b>	369 401,01	3 892 133,42	1051	1 044,10	6,90	1 046,70	4,30
<b>P22</b>	369 344,41	3 892 069,52	1050	1 044,40	5,60	1 045,90	4,10
<b>P23</b>	369 336,07	3 892 017,26	1050	1 044,63	5,37	1 045,95	4,05
<b>P24</b>	369 435,71	3 891 381,06	1053	1 045,35	7,65	1 047,30	5,70
<b>P25</b>	369 530,84	3 891 308,82	1056	1 050,85	5,15	1 051,50	4,50
<b>P26</b>	369 107,89	3 891 111,55	1056	1 046,25	9,75	1 047,00	9,00
<b>P27</b>	369 343,43	3 891 299,19	1052	1 044,80	7,20	1 046,00	6,00
<b>P28</b>	369 196,67	3 891 301,31	1052	1 044,60	7,40	1 045,80	6,20
<b>P29</b>	369 222,55	3 891 340,99	1051	1 044,23	6,77	1 045,20	5,80
<b>P30</b>	369 543,53	3 891 487,35	1052	1 046,00	6,00	1 047,20	4,80
<b>P31</b>	369 350,93	3 891 468,56	1052	1 046,93	5,07	1 047,10	4,90
<b>P32</b>	369 344,86	3 892 100,33	1052	1 045,10	6,90	1 046,20	5,80
<b>P33</b>	369 467,99	3 892 566,93	1046	1 039,50	6,50	1 041,00	5,00

<b>P34</b>	369 467,99	3 892 566,93	1056	1 047,40	8,60	1 048,00	8,00
<b>P35</b>	369 406,43	3 893 036,19	1055	1 052,60	2,40	1 053,1	1,9
<b>P36</b>	369 252,53	3 893 417,42	1070	1 068,10	1,90	1 069,50	0,50
<b>P37</b>	368 376,87	3 893 402,37	1107	1 100,00	7,00	1 101,40	5,60
<b>P38</b>	367 612,63	3 893 912,71	1121	1 120,00	1,00	1 121,00	0,00
<b>P39</b>	367 180,94	3 893 977,58	1134	1 126,00	8,00	1 126,85	7,15
<b>P40</b>	366 822,14	3 894 525,18	1134	1 127,00	7,00	1 128,60	5,40
<b>P41</b>	365 486,99	3 894 908,54	1140	1 128,55	11,45	1 129,30	10,70
<b>P42</b>	365 308,71	3 894 827,99	1141	1 131,85	9,15	1 132,70	8,30
<b>P43</b>	365 185,79	3 894 558,65	1136	1 131,40	4,60	1 133,10	2,90
<b>P44</b>	366 384,91	3 893 869,11	1148	1 134,80	13,20	1 135,45	12,55
<b>P45</b>	365 288,95	3 894 350,66	1146	1 133,80	12,20	1 134,60	11,40
<b>P46</b>	365 269,54	3 894 406,41	1144	1 132,45	11,55	1 133,20	10,80
<b>P47</b>	365 324,27	3 894 513,45	1144	1 132,70	11,30	1 133,35	10,65
<b>P48</b>	365 085,40	3 894 443,05	1148	1 137,00	11,00	1 139,00	9,00
<b>P49</b>	365 039,39	3 893 223,48	1099	1 094,80	4,20	1 095,80	3,20
<b>P50</b>	367 485,90	3 891 994,84	1097	1 094,00	3,00	1 095,50	1,50
<b>P51</b>	367 277,94	3 891 446,31	1077	1 073,70	3,30	1 075,60	1,40
<b>P52</b>	368 562,88	3 890 876,01	1062	1 057,35	4,65	1 058,20	3,80
<b>P53</b>	368 383,38	3 890 715,30	1078	1 075,25	2,75	1 076,50	1,50
<b>P54</b>	368 125,02	3 889 831,61	1068	1 061,50	6,50	1 062,70	5,30
<b>P55</b>	368 051,52	3 889 650,88	1067	1 063,16	3,84	1 064,60	2,4
<b>P56</b>	368 322,82	3 889 508,27	1075	1 070,30	4,70	1 071,65	3,35
<b>P57</b>	367 923,08	3 888 826,94	1163	1 162,70	0,30	1 162,70	0,30
<b>P58</b>	364 862,38	3 891 195,44	1113	1 103,00	10,00	1 105,30	7,70
<b>P59</b>	366 646,67	3 891 714,42	1075	1 072,40	2,60	1 074,00	1,00
<b>P60</b>	367 283,54	3 889 754,53	1074	1 071,90	2,10	1 073,70	0,30
<b>P61</b>	367 319,83	3 889 812,55	1110	1 103,50	6,50	1 104,10	5,90
<b>P62</b>	363 914,12	3 894 953,62	1111	1 107,00	4,00	1 107,80	3,20
<b>P63</b>	364 045,18	3 894 920,84	1118	1 113,40	4,60	1 114,60	3,40
<b>P64</b>	364 109,32	3 894 812,02	1114	1 111,85	2,15	1 113,40	0,60
<b>P65</b>	364 035,70	3 894 794,64	1124	1 119,95	4,05	1 121,00	3,00
<b>P66</b>	364 349,96	3 894 663,58	1177	1 167,10	9,90	1 168,00	9,00
<b>P67</b>	363 020,66	3 891 746,95	1141	1 138,00	3,00	1 139,20	1,80
<b>Moyenne</b>					<b>5,84</b>		<b>4,65</b>

**Annexe n°08 : Résultats d'analyses physico- chimiques des points d'eau étudiés.**

N°	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Na (mg/l)	K (mg/l)	Cl (mg/l)	SO4 (mg/l)	HCO3 (mg/l)	TA (°F)	TA C (°F)	TH (mg CaCo 3/l)	NO <sub>3</sub> (mg/l)	NH <sub>4</sub> (mg/l)	NO <sub>2</sub> (mg/l)	M.O(m g Mno4/l)
F 52	59	33	67	22	99,4	35	311	0	25,4	283,3	9,09	0,012	0,018	74,28
S 07	68	34,02	75	15	106,5	90	261,08	0	21,4	310	17,8	0,008	0,011	75,55
S 02	73	20	81	15	106,5	37	264,7	0	21,7	264,8	26,9	0,005	0,009	73,02
F 21	121,6	71,92	69	7	212	90	365	0	29,9	599,9	23,4	0,003	0,01	72,39
P 34	70	40	70	22	150	55	259	0	21,2	339,6	15,1	0,009	0,013	74,28
F 01	62	39	65	23	127,8	30	301,3	0	24,7	315,4	12,5	0,011	0,017	73,65
F 06	67	34	64	18	120,7	32	292,8	0	24	307,4	12,7	0,014	0,021	69,54
P 25	129	78	69	9	284	80	309,8	0,8	27	643,4	54,2	0,016	0,022	69,23
P 57	80	30	89	21	142	40	335	0	27,4	323,4	16,3	0,013	0,018	75,23
F 10	65	39	70	19	106,5	90	274,5	0	22,5	322,9	14,3	0,008	0,014	74,28
P 17	143,2	51,51	74	23	213	50	445,3	0	36,5	569,9	14,3	0,013	0,023	74,28
P 20	98	14,00	99	29	142	110	219,6	0	18	302,6	53,4	0,015	0,027	73,02
F 17	77	25,00	85	26	106,5	68	329,4	0	27	295,3	10,9	0,009	0,015	73,97
P 29	156	29,16	111	15	205,9	95	408,7	0	33,5	510	10,5	0,011	0,024	74,28
F 07	65	35	70	29	113,6	40	292,8	0	24	306,5	12,8	0,005	0,016	74,28

**Annexe n°09 : Indice de saturation**

Ces indices permettent de déterminer l'état hydrodynamique du milieu aquifère par rapport à certains minéraux.

$$SI = \text{Log} (IAP/K)$$

**IAP** : représente le produit de solubilité exprimé à l'aide des activités.

**K** : la constante d'équilibre relativement à la dissolution du minéral.

Pour le cas la calcite :



Donc le produit d'activité ionique :

$$IAP = a_{\text{Ca}^{2+}} * a_{\text{CO}_3^{2-}}$$

( $a_{\text{Ca}^{2+}}$ : activité de l'ion  $\text{Ca}^{2+}$ )

A l'état d'équilibre thermodynamique, le produit de solubilité de la calcite ( $\text{KCaCO}_3$ )

$$\text{KCaCO}_3 = a_{\text{Ca}^{2+}} * a_{\text{CO}_3^{2-}} / a_{\text{CaCO}_3}$$

Alors, l'indice de saturation exprimé est:

$$SI = \text{Log} (IAP/K_{\text{CaCO}_3})$$

Si :

$SI = 0$  : l'eau est saturée vis-à-vis de la calcite.

$SI > 0$  : l'eau est saturée par rapport à la calcite.

$SI < 0$  : il montre que l'eau est sous-saturée vis-à-vis de la calcite.

De même, les indices de saturation vis-à-vis de la calcite, de l'anhydrite, du gypse, de l'aragonite et de la dolomite sont calculés.

Le calcul des indices de saturation a été fait par le logiciel « Diagramme », les résultats sont classés sur le tableau n°31, et sous forme de graphe (fig.42, fig.43, fig.44, fig.45, fig.46).