

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

BADJI MOKHTAR-ANNABA UNIVERSITY  
UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR-ANNABA



جامعة باجي مختار- عنابة

ANNEE 2015

Faculté des Sciences de la Terre  
Département de Géologie

MÉMOIRE DE MAGISTER

Option: Ressources en Eau et Pollution

*THÈME*

**Déminéralisation des eaux de forage de la région  
d'Ouled Abbès et son impact sur l'environnement  
(Souk Ahras, extrême Nord-Est Algérien)**

Réalisé par

Moncef BOUROUGA

Directeur de Mémoire : Pr. H. CHAFFAI

U.B.M-Annaba

Président du Jury : Pr. L. DJABRI

U.B.M-Annaba

Examineurs: Pr. A. HANI

U.B.M-Annaba

Dr. B. SAAIDIA

U.B.M-Annaba



2014/2015

## SOMMAIRE

|  |          |
|--|----------|
| Dédicaces  |          |
| Remerciements  |          |
| Résumé .....   | 1        |
| Abstract .....   | 2        |
| ملخص .....   | 3        |
| <b>Introduction générale</b> .....                                   | <b>4</b> |
| <b>Chapitre I : Situation géographique et présentation générale</b>  |          |
| 1. Situation Géographique .....                                      | 7        |
| 2. Population .....  | 8        |
| 3. Alimentation en eau potable .....                                 | 9        |
| 4. Hydraulique .....   | 9        |
| 4. 1. Situation hydrique .....                                       | 9        |
| 5. Le milieu physique .....  | 10       |
| 5. 1. La topographie .....   | 10       |
| 5.2. Réseau hydrographique .....                                     | 11       |
| 6. Hydrotechnique .....  | 12       |
| 7. Aperçu pédologique .....  | 13       |
| 8. Environnement économique .....                                    | 14       |
| 8. 1. Agriculture .....  | 14       |
| 8. 2. Élevage .....  | 15       |
| 9. L'irrigation .....  | 16       |
| 10. Les forêts et maquis .....                                       | 16       |
| 11. Environnement .....  | 16       |
| <b>Chapitre II : Cadre géologique</b>                                |          |
| 1. La géologie régionale .....                                       | 18       |
| 1. 1. Introduction .....   | 18       |
| 1. 2. La chaîne Maghrébine .....                                     | 18       |
| 1. 2. A. Le domaine interne .....                                    | 18       |
| 1. 2. B. Le domaine des flyschs .....                                | 19       |
| 1. 2. B. 1. Les flyschs maurétaniens .....                           | 19       |
| 1. 2. B. 2. Les flyschs massyliens .....                             | 19       |
| 1. 2. B. 3. Les flyschs numidiens .....                              | 19       |
| 1. 2. C. Le domaine Externe .....                                    | 19       |
| 1. 2. C.1. Les séries telliennes .....                               | 19       |
| 1. 2. C. 1. a. Les unités ultra-telliennes .....                     | 19       |
| 1. 2. C. 1. b. Les unités telliennes (sensu-stricto).....            | 19       |
| 1. 2. C. 1. c. Les unités péni-telliennes .....                      | 20       |
| 1. 2. C. 2. L'avant pays allochtone .....                            | 20       |
| 1. 2. C.2. a. L'organisation constantinoise .....                    | 20       |
| 1. 2. C.2. b. L'organisation Sétifienne .....                        | 20       |
| 1. 2. C.2. c. L'organisation Algéro-Tunisienne .....                 | 20       |
| 1. 2. C.3. L'avant pays atlastique autochtone et parautochtone ..... | 20       |

|  |    |
|--|----|
| 2. Cadre géologique .....                    | 21 |
| 2. 1. Introduction .....                     | 21 |
| 2. 2. La zone d'étude .....                  | 21 |
| 2. 3. Les Unités lithostratigraphiques ..... | 21 |
| 2. 3. 1. Le Secondaire .....                 | 21 |
| 2. 3. 1. A. Le Trias .....                   | 21 |
| 2. 3. 1. B. Le Crétacé .....                 | 22 |
| 2. 3. 1. B.1. Le Crétacé inférieur .....     | 22 |
| 2. 3. 1. B. 2. Le Crétacé Supérieur .....    | 22 |
| 2. 3. 2. Le Tertiaire .....                  | 22 |
| 2. 3. 3. Le Quaternaire .....                | 23 |
| 2. 3. 3. A. Formations anciennes .....       | 23 |
| 2. 3. 3. B. Formations récentes .....        | 23 |
| 2. 3. 3. C. Formations actuelles .....       | 23 |
| 2. 4. Cadre structural .....                 | 25 |
| 2. 4. A. Le Diapirisme .....                 | 25 |
| 2. 4. B. Les plissements .....               | 25 |
| 2. 4. C. La tectonique .....                 | 25 |
| 3. Conclusion .....                          | 26 |

### Chapitre III : Hydroclimatologie

|  |    |
|--|----|
| 1. Introduction .....  | 28 |
| 2. Les stations de mesure .....  | 28 |
| 3. Les facteurs climatiques .....  | 28 |
| 3. 1. La précipitation .....   | 28 |
| 3. 2. La température .....   | 30 |
| 3. 3. Le vent .....  | 32 |
| 3. 4. L'humidité relative de l'air .....                                 | 32 |
| 4. Les indices climatiques .....   | 33 |
| 4.1. Indice de De Martonne .....   | 33 |
| 4.2. Indice d'aridité mensuel .....                                      | 34 |
| 4.3. Aperçu général sur le climat de la région .....                     | 35 |
| 4.4. Diagramme ombrothermique .....                                      | 36 |
| 4.5. L'évapotranspiration .....  | 38 |
| 4. 5. 1. L'évapotranspiration potentielle (ETP) .....                    | 38 |
| 4. 5. 1. 1. L'estimation de l'évapotranspiration potentielle (ETP) ..... | 38 |
| 4. 5. 2. L'évapotranspiration réelle (ETR) .....                         | 39 |
| 4. 5. 2. 1. Estimation de l'évapotranspiration réelle .....              | 39 |
| b) Formule de Turc .....   | 39 |
| a) Formule de Thornthwaite .....   | 39 |
| c) Formule de Coutagne .....   | 40 |
| 4. 5. 2. 2. Comparaison entre les 3 formules .....                       | 41 |
| 5. Bilan hydrique selon la formule de Thornthwaite .....                 | 41 |
| 5. 1. Interprétation du bilan hydrique .....                             | 43 |
| 6. Conclusion .....  | 46 |

## Chapitre IV: Hydrogéologie

|  |    |
|--|----|
| 1. Introduction .....  | 48 |
| 2. Aperçu sur les aquifères de Sidi Fredj .....                                  | 48 |
| 2. 1. Notion d'aquifère .....  | 48 |
| 2. 2. Nappe superficielle libre du Mio-Plio-Quaternaire .....                    | 48 |
| 2. 3. Nappe karstique profonde des calcaires du Turonien .....                   | 48 |
| 3. Piézométrie .....   | 53 |
| 3. 1. Interprétation de la carte piézométrique des hautes eaux (Mars 2014) ..... | 54 |
| 3. 2. Interprétation de la carte piézométrique des basses eaux (Août 2014) ..... | 55 |
| 4. Potentialités hydriques .....   | 56 |
| 4. 1. Inventaire des sources .....   | 56 |
| 4. 2. Inventaire des puits .....   | 56 |
| 4. 3. Inventaire des forages .....   | 57 |
| 4. 4. Barrage .....  | 59 |
| 4. 5. Zone des chotts .....  | 60 |
| 4. 6. Réseau Hydrographique .....  | 61 |
| 5. Conclusion .....  | 61 |

## Chapitre V :Hydrochimie

|  |    |
|--|----|
| 1. Introduction .....  | 63 |
| 2. Méthodologie .....  | 63 |
| 2. 1. Echantillonnages .....   | 63 |
| 2. 2. Type d'échantillons prélevés .....                               | 63 |
| 2. 3. La période d'échantillonnage .....                               | 63 |
| 2. 4. Lieux d'échantillonnage .....                                    | 64 |
| 3. Moyens et méthodes d'analyse .....                                  | 64 |
| 3. 1. Mesures <i>in situ</i> .....                                     | 64 |
| 3. 2. Analyses au laboratoire .....                                    | 64 |
| 3. 2. 1. Fiabilité des analyses .....                                  | 64 |
| 4. Résultats des mesures et des analyses chimiques de l'eau .....      | 64 |
| 4. 1. Les paramètres physico-chimiques (mesures <i>in situ</i> ) ..... | 64 |
| 4. 1. 1. Température (T) .....   | 64 |
| 4. 1. 2. Conductivité électrique (CE) .....                            | 65 |
| 4. 1. 3. Potentiel d'Hydrogène (pH) .....                              | 66 |
| 4. 1. 4. L'oxygène dissous (OD) .....                                  | 67 |
| 4. 1. 5. Potentiel d'oxydoréduction (Eh) .....                         | 67 |
| 5. Caractéristiques chimiques des eaux souterraines .....              | 68 |
| 5. 1. Nappe superficielle .....  | 68 |
| 5. 1. 1. Faciès chimique .....   | 68 |
| 5. 1. 2. Formule ionique .....   | 68 |
| 5. 1. 3. Diagramme de Piper .....                                      | 69 |
| 5. 1. 4. Diagramme de Schöeller-Berkaloff .....                        | 70 |
| 5. 1. 5. L'outil cartographique .....                                  | 71 |
| 5. 1. 5. 1. Carte du calcium $Ca^{2+}$ .....                           | 71 |
| 5. 1. 5. 2. Carte des bicarbonates $HCO_3^-$ .....                     | 73 |
| 5. 1. 5. 3. Cartes des sulfates $SO_4^{2-}$ .....                      | 74 |

|  |    |
|--|----|
| 5. 1. 5. 4. Carte des Chlorures $Cl^-$ .....                   | 75 |
| 5. 1. 5. 5. Carte du sodium $Na^+$ .....                       | 76 |
| 5. 1. 5. 6. Carte des conductivités électriques (CE) .....     | 77 |
| 5. 2. Nappe des calcaires (Karstique) .....                    | 78 |
| 6. Analyse en composantes principales (ACP) .....              | 81 |
| 6. 1. Analyse du cercle de corrélation .....                   | 82 |
| 6. 2. Analyse de l'espace des individus .....                  | 83 |
| 7. Aptitude des eaux à l'irrigation .....                      | 84 |
| 7. 1. Classification des eaux par la méthode de Richards ..... | 84 |
| 7. 2. Classification des eaux par la méthode de Wilcox .....   | 86 |
| 8. Conclusion .....  | 88 |

## Chapitre VI: Déminéralisation des eaux saumâtres et son impact sur l'environnement

|   |            |
|---|------------|
| 1. Introduction .....   | 90         |
| 2. Aperçu sur les eaux non conventionnelles .....                                 | 91         |
| 2. 1. Les eaux non conventionnelles en Algérie .....                              | 91         |
| 2. 1. 1. Mobilisation et Transfert des Eaux de mer dessalées .....                | 91         |
| 2. 1. 2. Transfert et Mobilisation des Eaux Usées Epurées .....                   | 92         |
| 2. 1. 3. Mobilisation et déminéralisation des Eaux Saumâtres .....                | 93         |
| 3. Déminéralisation des eaux saumâtres .....                                      | 94         |
| 3. 1. Définitions .....   | 94         |
| 3. 1. 1. Les eaux saumâtres .....   | 94         |
| 3. 1. 2. La déminéralisation des eaux .....                                       | 94         |
| 3. 2. Les procédés membranaires .....   | 94         |
| 3. 2. 1. Osmose Inverse (OI) .....  | 94         |
| 3. 2. 2. Nanofiltration (NF) .....  | 94         |
| 3. 2. 3. Ultrafiltration (UF) .....   | 95         |
| 3. 2. 4. Microfiltration (MF) .....   | 95         |
| 4. Principe de l'osmose inverse .....   | 97         |
| 4. 1. Pression osmotique .....  | 97         |
| 4. 2. Osmose inverse .....  | 97         |
| 4. 3. Mécanisme diffusionnel .....  | 98         |
| 4. 4. Membrane semi-sélective .....   | 98         |
| 4. 5. Les membranes .....   | 99         |
| 4. 6. <b>Polarisation et colmatage</b> .....                                      | <b>100</b> |
| 4. 7. Procédé .....   | 100        |
| 4. 8. Application de l'osmose inverse .....                                       | 101        |
| 4. 9. Conclusion .....  | 101        |
| 5. Stations de déminéralisation Ouled Abbas .....                                 | 102        |
| 5. 1. Présentation .....  | 102        |
| 5. 2. Les 2 stations de déminéralisation des eaux par l'osmose inverse (OI) ..... | 103        |
| 5. 2. 1. Description des stations de déminéralisation .....                       | 105        |
| 5. 2. 1. 1. Filtre à cartouche .....  | 105        |
| 5. 2. 1. 2. Pompe à haute pression .....  | 105        |
| 5. 2. 1. 3. Les membranes .....   | 106        |
| 5. 2. 1. 4. Pompe de dosage de l'anti-incrustant .....                            | 106        |
| 5. 2. 1. 5. Dispositif de nettoyage .....   | 106        |
| 5. 2. 1. 6. Réservoir d'eau .....   | 107        |

|   |     |
|---|-----|
| 5. 2. 2. Les paramètres de marche des stations d'OI et qualité de l'eau osmosée | 107 |
| 5. 2. 2. 1. Le taux de conversion Y (%)   | 107 |
| 5. 2. 2. 2. Le taux de rétention TR (%)   | 107 |
| 5. 2. 3 Analyse de l'eau  | 108 |
| 5. 2. 4 Synoptique système d'osmose inverse                                     | 109 |
| 5. 2. 5. Les rejets   | 110 |
| 6. Impact des 2 stations de déminéralisation sur l'environnement                | 111 |
| 6. 1. Impacts environnementaux  | 111 |
| 6. 1. 1. Energie électrique   | 111 |
| 6. 1. 2. Les rejets liquides  | 111 |
| 6. 1. 2. 1. Rejets de la saumure  | 111 |
| 6. 1. 2. 2. Autres rejets   | 113 |
| 6. 2. Contrôle de l'eau des oueds   | 113 |
| 6. 3. Surveillance et contrôle du milieu récepteur                              | 114 |
| 6. 4. Conclusion et recommandations   | 115 |
| <b>Conclusion générale</b>  | 117 |
| <b>Références Bibliographiques</b>  | 120 |

## Liste des figures

| N°<br>Figure | Figures   | Page |
|--------------|---|------|
| 01           | Situation géographique de la commune de Sidi Fredj  | 07   |
| 02           | Pentes de la wilaya de Souk-Ahras (télécharger du site USGS)  | 11   |
| 03           | Réseau hydrographique de la commune de Sidi Fredj   | 12   |
| 04           | Schema structurale des Maghrébides ( M. Durand-Delga et J.M. Fontboté, 1980)  | 18   |
| 05           | Situation et limite de la région de Sidi Fredj.   | 21   |
| 06           | Carte géologique de la région d'étude, reprise par M. BOUROUGA 2014   | 24   |
| 07           | Coupe géologique extraite de la carte de Taoura n° 101 au 1/50000.  | 24   |
| 08           | Ecorche structurale du bassin hydrogéologique de la Taoura (D'après la carte structurale de la chaine alpine Algérie orientale et des confins Algéro-Tunisiens, 1/500 000, Vila 1978) | 26   |
| 09           | Histogramme des précipitations moyennes mensuelles  | 29   |
| 10           | Carte de répartition de la pluviométrie dans la wilaya de Souk-Ahras.<br>(Source :B.N.E.D.E.R, 1999, in I. Guassmi 2009)  | 30   |
| 11           | Histogramme des températures moyennes en °c ; Station Souk Ahras  | 31   |
| 12           | Carte simplifiée des zones bioclimatiques de l'Est Algérien (d'après A.Mébariki, 2005)  | 36   |
| 13           | Diagramme Ombrothermique : Station Taoura.  | 37   |
| 14           | Diagramme Ombrothermique : Station Souk Ahras.  | 37   |
| 15           | Représentation graphique du bilan de Thornthwaite à la station de Taoura.   | 44   |
| 16           | Représentation graphique du bilan hydrologique à la station de Taoura.  | 44   |
| 17           | Représentation graphique du bilan de Thornthwaite à la station de Souk Ahras.   | 45   |
| 18           | Représentation graphique du bilan hydrologique à la station de Souk Ahras.  | 45   |
| 19           | Géologie de la région et positionnement des forages   | 49   |
| 20           | Coupe hydrogéologique (W - E) dans la plaine de Sidi Fredj  | 50   |
| 21           | Coupe hydrogéologique (N - S) dans la plaine de Sidi Fredj  | 51   |
| 22           | Coupe hydrogéologique (NW - SE) dans la plaine de Sidi Fredj  | 52   |
| 23           | Inventaire des points d'eau dans la zone d'étude.   | 53   |
| 24           | Carte piézométrique de la nappe libre Sidi Fredj, hautes eaux, Mars 2014.   | 54   |
| 25           | Carte piézométrique de la nappe libre Sidi Fredj, basses eaux, Aout 2014.   | 55   |
| 26           | Bir Nekhla (P6)   | 56   |
| 27           | Bir El Madjene (P7)   | 56   |
| 28           | Situation des forages dans la zone d'étude.   | 58   |
| 29           | Barrage envasé de Oued Tarfa  | 59   |
| 30           | Chott El Mkimene  | 60   |
| 31           | Chott El Madjene  | 60   |
| 32           | Diagramme de piper (2014)   | 69   |
| 33           | Diagramme de Schöeller-Berkaloff de la nappe superficielle (Mars 2014)  | 70   |
| 34           | Carte de la concentration de Calcium (Ca <sup>2+</sup> ) en mg/l dans la commune de Sidi Fredj (Mars 2014)  | 72   |
| 35           | Carte de la concentration des Bicarbonates (HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) en mg/l dans la commune de Sidi Fredj (Mars 2014)   | 73   |
| 36           | Carte de la concentration des Sulfates (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ) en mg/l dans la commune de Sidi Fredj (Mars 2014)   | 74   |
| 37           | Carte de la concentration des Chlorures (Cl <sup>-</sup> ) en mg/l dans la commune de Sidi Fredj (Mars 2014)  | 75   |
| 38           | Carte de la concentration du Sodium (Na <sup>+</sup> ) en mg/l dans la commune de Sidi Fredj (Mars 2014)  | 76   |
| 39           | Carte de la concentration de la conductivité électrique (CE) en µs/cm dans la commune de Sidi Fredj (Mars 2014)   | 77   |
| 40           | Diagramme de piper de la nappe des calcaires (Mars 2014)  | 78   |

|    |  |     |
|----|--|-----|
| 41 | Diagramme de Schöeller-Berkaloff de la nappe des calcaires (Mars 2014)   | 79  |
| 42 | Histogramme des valeurs propres  | 81  |
| 43 | Cercle de corrélation des variables dans le plan formé par l'axe 1 et l'axe 2.   | 82  |
| 44 | Projection des individus sur le plan formé par les deux premiers axes  | 83  |
| 45 | Classification des eaux destinées à l'irrigation (diagramme de Richards)   | 85  |
| 46 | Classifications des eaux destinées à l'irrigation (diagramme de Wilcox).   | 86  |
| 47 | Ressources en eau de (Source : FAO, Nations unies, 2008)   | 90  |
| 48 | Gamme de filtration (source: www.safewater.org - 2004)   | 96  |
| 49 | Caractéristiques des Processus des Membranes   | 96  |
| 50 | Principe de l'osmose inverse   | 97  |
| 51 | Membrane semi-sélective  | 98  |
| 52 | Schéma d'une membrane d'osmose inverse   | 100 |
| 53 | Schéma détaillé d'unité d'osmose inverse (d'après le site de GLS industrie)  | 101 |
| 54 | Station de déminéralisation des eaux de à l'osmose inverse d'Ouled Abbas   | 102 |
| 55 | Localisation des 2 stations de déminéralisation  | 104 |
| 56 | Composants de la station de déminéralisation à l'osmose inverse (Ouled Abbas)  | 105 |
| 57 | Synoptique de l'unité d'osmose inverse   | 109 |
| 58 | Rejet de la station d'Ouled Abbass   | 110 |
| 59 | Déversement des rejets vers Oued Mellègue  | 110 |
| 60 | Evolution des concentrations des paramètres physico-chimiques des oueds El Maleh et Mellègue en amont et aval des 2 stations de déminéralisations. | 113 |

## Liste des tableaux

| n°<br>Tableau | Tableaux  | Page |
|---------------|---|------|
| 01            | Caractéristiques démographiques de la Commune de Sidi-Fredj   | 8    |
| 02            | Forages implantés dans la commune de Sidi Fredj   | 9    |
| 03            | Occupation des sols   | 14   |
| 04            | L'élevage dans la commune de Sidi Fredj   | 15   |
| 05            | L'irrigation dans la commune de Sidi Fredj  | 16   |
| 06            | Caractéristiques géographiques des stations météorologiques existantes dans la zone d'étude.                                | 28   |
| 07            | Hauteurs moyennes mensuelles des précipitations en mm.  | 29   |
| 08            | Températures moyennes mensuelles en °c à la station de Souk Ahras (1986 – 2013)   | 31   |
| 09            | Relèves mensuelles du vent 2010-2011. Source (SMSA)   | 32   |
| 10            | L'humidité relative moyenne mensuelle (2003 -2013) à la station de Souk Ahras   | 32   |
| 11            | Valeurs de l'indice d'aridité pour les stations de Souk-Ahras et de Taoura et le sud de la région                           | 34   |
| 12            | Indices d'aridité mensuels (I) à la station de Taoura.  | 35   |
| 13            | Les valeurs de l'ETP selon la formule de Thornthwaite   | 39   |
| 14            | L'ETR par la méthode de Turc  | 40   |
| 15            | Résultats de l'ETR par la formule de Coutagne   | 40   |
| 16            | Les résultats de l'ETR selon différentes méthodes   | 41   |
| 17            | Bilan hydrique selon Thornthwaite, Station Taoura   | 42   |
| 18            | Bilan hydrique selon Thornthwaite, Station Souk Ahras   | 42   |
| 19            | Inventaire des sources dans la commune de Sidi Fredj  | 56   |
| 20            | Inventaire des puits dans la commune de Sidi Fredj  | 57   |
| 21            | Inventaire des forages implantés dans la commune de Sidi Fredj  | 57   |
| 22            | Variation de la température en °C des eaux (2014)   | 65   |
| 23            | Variation de la conductivité électrique en µS/cm des eaux (2014)  | 65   |
| 24            | Classification de degré de minéralisation à partir de la conductivité électrique.   | 66   |
| 25            | Variation du pH des eaux aux 2 campagnes (2014)   | 66   |
| 26            | Variation du O2 dissous des eaux aux 2 campagnes (2014)   | 67   |
| 27            | Variation du Eh des eaux aux 2 campagnes (2014)   | 67   |
| 28            | Détermination du faciès chimique des eaux (2014) par la formule ionique.  | 68   |
| 29            | Matrice des corrélations  | 81   |
| 30            | Valeurs propres et pourcentages des axes principaux   | 81   |
| 31            | Caractéristiques de la pompe à haute pression   | 105  |
| 32            | Caractéristiques des membranes  | 106  |
| 33            | Caractéristiques de la pompe d'injection de l'anti-incrustant   | 106  |
| 34            | Paramètres Physico-chimiques de l'eau du forage AOB2, du perméat et le taux de rétention des ions de la station Ouled Abbas | 108  |
| 35            | Paramètres Physico-chimiques de l'eau du forage AZ2, du perméat et le taux de rétention des ions de la station Ain Zargua   | 108  |
| 36            | Paramètres physico-chimiques des eaux de drainage de la station d'Ouled Abbas et du milieu récepteur (Oued Mellègue)        | 112  |
| 37            | Paramètres physico-chimiques des eaux de drainage de la station d'Ain Zargua et du milieu récepteur (Oued El Maleh)         | 112  |

## ***DEDICACES***

*A mes parents auxquels je dois tant et je ne rendrais jamais assez.*

*A mon épouse pour sa patience et ses encouragements*

*A mes deux filles Mayar et Aya*

*A toute ma famille*

## **REMERCIEMENTS**

*Au terme de cette étude, je tiens en premier lieu à remercier Dieu qui m'a permis le retour aux études universitaires après tants d'années, et m'a facilité le travail en mettant dans mon chemin des gens qui m'ont énormément aidé et soutenu.*

*Je tiens tout d'abord à remercier vivement **Pr CHAFFAI Hicham** qui a su bien m'encadrer, pour son soutien indéterminable et sa patience continuelle en cours de la réalisation de ce mémoire.*

*Je remercie également **Pr Djabri Larbi** qui m'a fait l'honneur d'accepter de présider le jury.*

*J'adresse mes remerciements à **Pr A. Hani** et **Dr B. SAIDIA** d'avoir accepté de juger et critiquer ce mémoire, et qu'ils veuillent bien trouver l'expression de ma vive gratitude et mon profond respect.*

*Mes sincères remerciement vont également à **Mr HANCHI Farouk** chef de service ressources en eau mobilisables de la DHW Souk Ahras, d'avoir m'aider à choisir ce thème ainsi pour son soutien.*

*Mes vifs remerciements sont adressés à **Mr Rouiabia Farid** Subdivisionnaire hydraulique à Merahna, ainsi que son équipe pour leur accueil et aide.*

*Un grand merci à **Mr SAYAD Lamine**, Maître Assistant à l'Université Badji Mokhtar, pour son soutien illimité.*

***MERCI** aussi à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin pour la réalisation de ce travail.*

---

## Résumé

La région d'étude est située dans la localité de Sidi Fredj (Wilaya de Souk Ahras) à l'extrême Nord-Est algérien, elle est soumise à un climat semi aride caractérisé par une pluviométrie faible de l'ordre de 350 mm/an

Le recours à la déminéralisation des eaux saumâtres (salinité de 3 à 6 g/l) de deux forages captant la nappe karstique dans deux stations de type membranaire à l'osmose inverse, répond à un besoin d'eau douce qui fait défaut dans cette région. L'origine de cette salinité est géologique, elle est la conséquence du lessivage des formations triasiques gypsifères et évaporitiques très présentes dans la région par les eaux de recharge de la nappe exploitée.

L'avantage de ce genre de station de déminéralisation est la possibilité de disposer d'une eau potable non conventionnelle afin de satisfaire les demandes en AEP des populations locales et de contribuer à la relance économique de la zone de Sidi Fredj.

L'autre aspect qui intéresse cette étude est l'impact que peuvent avoir les rejets liquides chargés de ces deux stations principalement sur les oueds qui les reçoivent et sur l'environnement en général.

**Mots clés :** Sidi Fredj, Déminéralisation, Eau saumâtre, Eau potable, Eau non conventionnelle, Osmose Inverse, Impact, Environnement.

---

## **Abstract**

The study area is located in the town of Sidi Fredj (Souk Ahras Province) in the extreme north-eastern Algeria; it is subject to a semi-arid climate with low rainfall of about 350 mm/year.

The use of demineralization of brackish water (salinity from 3 to 6 g/l) two boreholes serving the karst groundwater in two membrane type stations to reverse osmosis, meets a need that fresh water is lacking in this region. The origin of this geological salinity, it is the result of leaching of Triassic evaporite formations gypsiferous and strong presence in the region by the recharge water of exploited aquifer.

The advantage of this kind of demineralization plant is the possibility of having a non-conventional drinking water to meet the demands of local and EPA contribute to the economic recovery of the area of Sidi Fredj.

The other aspect that concerns this study is the potential impact of liquid discharges responsible for these two stations mainly wadis who receive and the environment in general.

**Keywords:** Sidi Fredj, demineralization, brackish water, Drinking Water, Water unconventional, Reverse Osmosis, Impact, Environment.

## ملخص

تقع منطقة الدراسة في بلدة سيدي فرج (ولاية سوق أهراس) في شمال شرق الجزائر القصوى و تخضع لمناخ شبه قاحل مع قلة الأمطار بحوالي 350 ملم في السنة.

استخدام تحلية المياه المالحة (الملوحة من 3 إلى 6 غرام / لتر) من بئرين يستغلان المياه الجوفية الكارستية في محطتين من نوع غشاء التناضح العكسي اجابنا لنقص المياه العذبة في هذه المنطقة.

أصل هذه الملوحة جيولوجية، هو نتيجة الرشح والتشكيلات الجبسية المتبخرات الترياسي الموجودة بقوى في المنطقة من خلال المياه الجوفية المستغلة. وميزة هذا النوع من تحلية المياه هي إمكانية وجود مياه شرب غير التقليدية لتلبية مطالب المجتمعات المحلية والمساهمة في الترقية الاقتصادية لمنطقة سيدي فرج.

الجانب الآخر الذي يهم هذه الدراسة هو التأثير المحتمل لتصريف السائل عن هذه المحطات على واديين أساسا الذين يتلقون المياه المصرفة والبيئة بشكل عام.

**الكلمات الرئيسية:** سيدي فرج، تحلية المياه قليلة الملوحة ، مياه الشرب، مياه غير تقليدية، التناضح العكسي، تأثير والبيئة.

---

## Introduction générale

Selon le rapport de l'ONU (2008), plus de 1,4 milliards de personnes n'ont pas accès à l'eau potable dans le monde, et la demande à cette ressource indispensable et irremplaçable s'accroît de plus en plus avec l'accroissement économique et démographique continu.

Dans le même rapport l'Algérie se trouve parmi les pays de l'Afrique du nord les plus menacés, elle vit dans une situation de pénurie hydrique et la situation va s'aggraver à l'horizon de 2025.

Pour pallier à ce manque de cette ressource vitale, l'Algérie a adapté d'autres alternatives en investissant dans des grands projets dans le secteur de l'eau, parmi eux le recours à l'utilisation des eaux non conventionnelles, et le dessalement des eaux saumâtres et, a fortiori, de l'eau de mer procure une solution séduisante à cette problématique.

Cette étude avait plusieurs objectifs, une contribution à la connaissance de la zone de Sidi Fredj qui n'a pas eu la chance de réalisation déjà des études de recherches universitaires, ainsi la vulgarisation du procédé membranaire à l'osmose inverse pour la déminéralisation des eaux saumâtres de la nappe Karstique dans la zone d'étude, et enfin l'impact de ces rejets liquides sur les milieux récepteurs.

Le présent mémoire comprend six chapitres, au cours duquel nous avons approfondi les études pour répondre aux objectifs tracés, seront présentés comme suit:

Dans le premier chapitre nous présentons un bref aperçu sur le cadre de la zone d'étude qui se trouve à l'extrême Nord Est Algérien et sur 22 km de frontière Algéro-tunisienne, nous citons aussi ses ressources, potentialités et environnement.

Dans le deuxième chapitre traite la géologie, il décrit les formations à l'affleurement, de ce fait nous remarquons que les formations géologiques allant du trias, crétacé aux formations mio-plio-quadernaire, caractérisé aussi par des phénomènes tectoniques souples et cassants et des manifestations diapiriques.

Dans le troisième chapitre nous essayons de définir les facteurs climatiques, qui influencent d'une façon directe sur les mécanismes des aquifères, et aussi faire ressortir le type de climat qui règne dans notre zone d'étude, l'estimation de l'évaporation et le calcul du bilan hydrologique par la méthode de C.W.Thornthwaite.

---

Dans le quatrième chapitre est consacré à l'hydrogéologie, où nous avons défini les 2 types d'aquifères que possède la zone d'étude, nous avons aussi inventoriés les points d'eau, et effectuer des mesures piézométriques sur ceux de la nappe libre afin de réaliser de cartes piézométriques des basses et hautes eaux, ce qui permis de déduire le sens d'écoulement.

Dans le cinquième chapitre concerne l'hydrochimie, avec une étude de la qualité des eaux des 2 nappes de la région d'étude, ses faciès chimiques et leurs aptitudes à l'irrigation, l'établissement des cartes des concentrations des éléments chimiques majeurs des eaux de la nappe libre, et enfin à l'aide l'analyse en composantes principales, nous avons essayer de décèler les corrélations entres les éléments physico-chimiques.

Dans le sixième chapitre nous avons essayer de vulgariser le procédé de déminéralisation des eaux saumâtres par la technique membranaire et spécialement à l'osmose inverse, utilisé dans les 2 stations de la zone d'étude, et en fin nous avons essayer par le biais des analyses des eaux des oueds Mellegue et El Maleh en amont et en aval par rapport aux points de rejets liquides dans ces oueds voir leurs impact.

---

# *Chapitre I*

*Situation géographique*

*Et*

*Présentation générale*

## 1. Situation Géographique :

La commune de Sidi Fredj s'étend sur une superficie de 201 km<sup>2</sup>, sur 8°06 et 8°21 de longitude Est et 35°57 et 36°13 latitude Nord. Et se localise à l'extrême Nord-Est du territoire Algérien soit un peu plus de 600 km de la capitale Alger, et à 5 km de la frontière algéro-tunisienne et à 32 km au Sud-Est de la ville de Souk Ahras. La commune chevauche la frontière algéro-tunisienne sur 22 km. (**Fig. 1**). Elle fait partie du bassin de l'Oued Mellègue.

Les limites géographiques de la commune sont présentées comme suit :

- Limite Nord : par la commune de Merahna,
- Limite Ouest : par la commune de Taoura,
- Limite Est : par la commune de Haddada et la frontière algéro-tunisienne,
- Limite Sud: par la commune d'Ouenza (wilaya de Tébessa),

La région d'étude a connu, durant ces dernières années, une certaine expansion économique et particulièrement agricole, et ce après l'application du programme national de lutte contre la pauvreté (2002-2007) ainsi que le programme algéro-belge et celui pour la régulation du développement agricole. Ceci a augmenté la demande en eau.

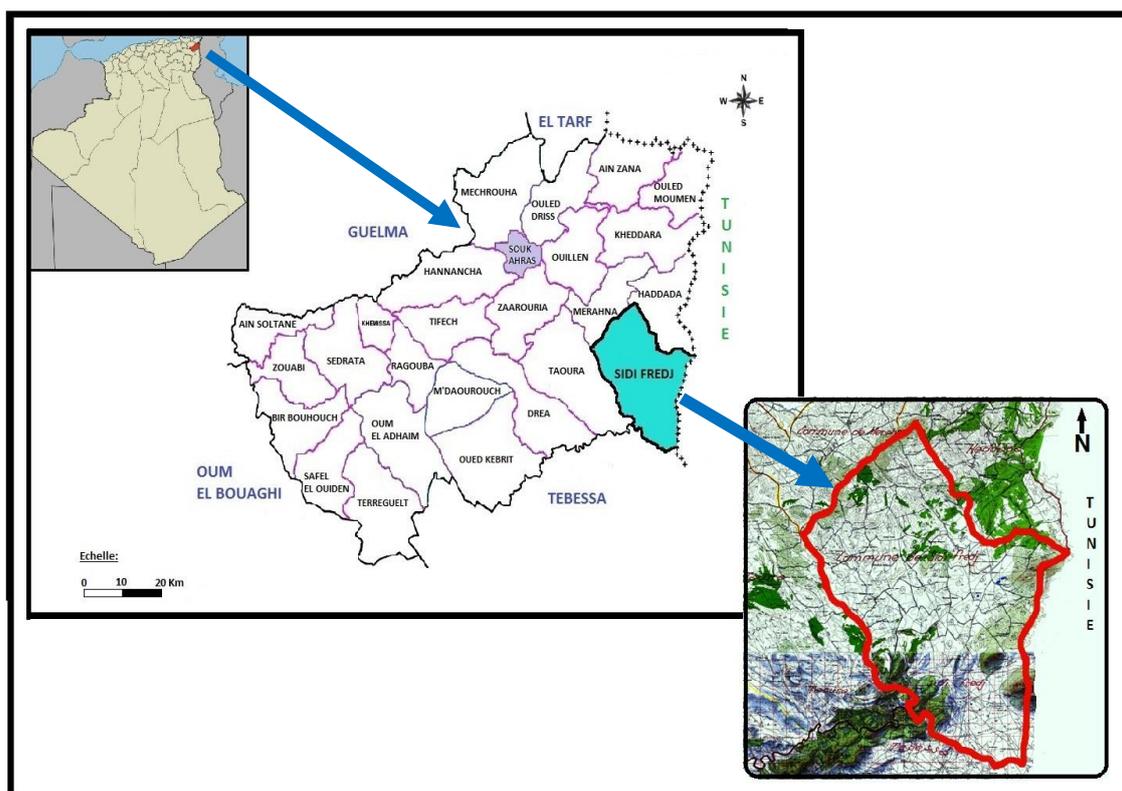


Figure 1: Situation géographique de la commune de Sidi Fredj

## 2. Population :

La région couvre une superficie de 20 097 ha dont le territoire communale se compose des entités suivantes :

- Agglomération Chef-lieu de commune El Bordj.
- Plusieurs regroupements ruraux.

Selon les données du 5<sup>ème</sup> Recensement Général de la Population et de l'Habitat (RGPH) de 2008, la Commune de Sidi-Fredj enregistrait 7497 habitants, répartis sur 17 mechtas implantés généralement sur les principaux axes routiers existants. Près de 80% vivent dans les zones éparées. Le reste de la population, un peu plus de 20% vit donc dans l'agglomération principale d'El Bordj, le Chef-lieu de la commune. Il n'y a pas d'agglomération secondaire dans la commune. Avec 37 habitants/km<sup>2</sup>, la densité de la population reste la plus basse dans toute la Wilaya de Souk-Ahras. La taille moyenne des ménages est de 5,5 personnes.

Ainsi, le 5<sup>ème</sup> RGPH de 2008 indique une décroissance de la population de la commune de -0,6% par an pour la période décennale 1998-2008. En outre, il mentionne une tendance à l'augmentation de la population du Chef-lieu de commune, El-Bordj (1084 habitants en 1998, 1543 habitants en 2008), alors qu'en zones éparées, la population était en régression durant la même période (**Tab. 1**).

**Tableau 1: Caractéristiques démographiques de la Commune de Sidi-Fredj**

| Désignation                                    | Nombre    |           | Taux en 2008 | Estimation 2010 |
|--|-----------|-----------|--------------|-----------------|
|  | 1998      | 2008      |              |                 |
| <b>Population résidente dans la commune</b>    | 7935 hab. | 7497 hab. | -            | 7768 hab.       |
| <b>Taux d'accroissement annuel (1998-2008)</b> | -         | -         | - 0,6%       | -               |
| <b>Agglomération chef-lieu</b>                 | 1084 hab. | 1537 hab. | 21%          | 1631 hab.       |
| <b>Zone éparse</b>                             | 6851 hab. | 5960 hab. | 79%          | 6137 hab.       |

Source: 5<sup>ème</sup> Recensement de la Population et de l'Habitat, 2008 + Estimations DPAT 2010.

### 3. Alimentation en eau potable :

Selon le bilan annuel de l'année 2013 du département d'exploitation de l'Algérienne des eaux (ADE) de la Wilaya de Souk Ahras, sur la population de la commune de Sidi Fredj que 1837 habitants desservies en alimentation en eau potable ce qui représente 22 % du taux de satisfaction de la population de la commune, avec un volume distribué de 82 490 m<sup>3</sup>/an représentant 226 m<sup>3</sup>/j soit une dotation de 120 l/j/h.

Cette situation induit un déficit de satisfaction en eau potable de la population de l'ordre de 78%.

### 4. Hydraulique :

#### 4.1. Situation hydrique

Les ressources actuellement utilisées dans notre zone d'étude sont d'origine souterraine et proviennent principalement puits, sources et forages.

- Elle possède 9 forages exploités, implantés dans le territoire de la commune, comme suit (**Tab. 2**):

**Tableau 2 : Forages implantés dans la commune de Sidi Fredj**

| Nom du forage | Débit en l/s | Qualité |
|---------------|--------------|---------|
| AS1           | 5            | Bonne   |
| AS3           | 5            | Salée   |
| H1            | 22           | Salée   |
| AS4           | 5            | Bonne   |
| AZ3           | 6            | Salée   |
| AZ2           | 6            | Salée   |
| AOB2          | 8            | Salée   |
| M5            | 3.5          | Bonne   |
| KH            | 3            | Bonne   |

- 14 puits généralement localisés dans la moitié Nord de la région, captent les eaux de la nappe superficielle dont la qualité est soit bonne, médiocre ou mauvaise.
- 05 sources fournissant une eau de bonne qualité
- A partir des deux stations de déminéralisation situées au niveau des forages AOB2 et AZ2 respectivement dans les mechtas de Ouled Abbas et Zerga, l'eau traitée est utilisée pour l'alimentation en eau potable réservée à l'usage des locaux mais peut jouer un rôle déterminant dans le développement du secteur de l'irrigation.

- 
- Un petit barrage d'une capacité de 2 Hm<sup>3</sup>, exploité depuis 1996 et actuellement hors service suite à son envasement à 80%.

La partie sud de la région dispose de quantité d'eau importante mais sa mauvaise qualité (salinité élevée) a freiné son exploitation.

## **5. Le milieu physique :**

### **5.1. La topographie :**

Le territoire communal chevauche sur deux ensembles de reliefs (**Fig. 2**) :

- Au Nord, le domaine de l'atlas tellien avec une tendance globale de pente supérieure ou égale à 12% ;

- Au Sud c'est les hauts plateaux avec une tendance globale de pente inférieure à 12%.

**5.1.1. Les reliefs montagneux :** Occupe principalement la zone Nord qui forme un écran naturel sur la zone. L'altitude varie de 800 à 1000 m.

**5.1.2. Les bas piémonts :** Ce sont les glacis polygéniques, ce sont des zones agricoles où l'altitude varie de 600 m à 800 m.

**5.1.3. Les collines centrales :** Forment un cordon naturel entre les deux zones du nord et celle du sud (zone de plaines).

**5.1.4. Les plaines :** Occupe principalement la zone Sud du territoire communale, elle forme une zone d'accumulation des différents oueds.

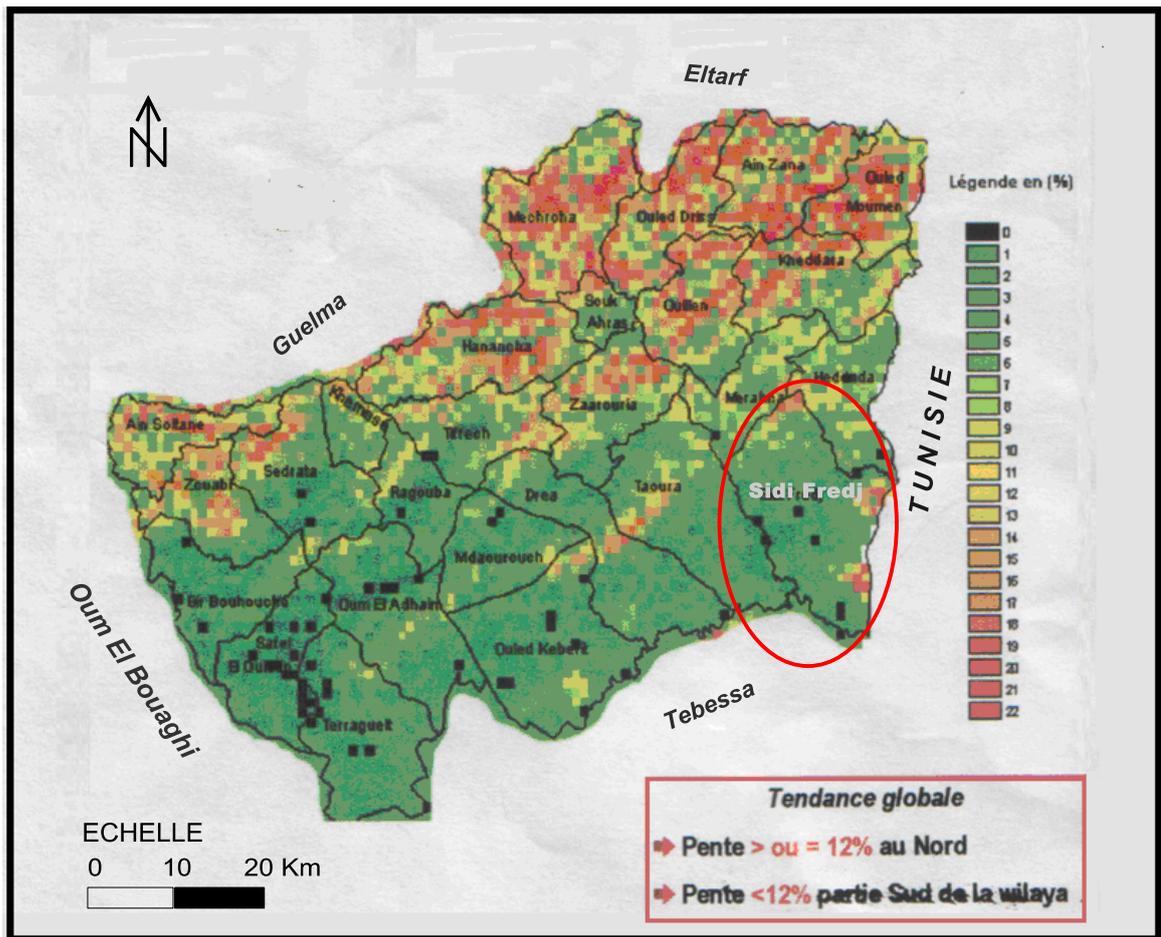


Figure 2 : Pentés de la wilaya de Souk-Ahras (téléchargée du site USGS)

## 5.2. Réseau hydrographique :

La zone d'étude comporte un réseau hydrographique composé principalement de cours d'eau temporaires qui prennent deux directions d'écoulement (**Fig. 3**) : les premiers sont de direction Nord-Est représentés par Hamimine, Zerga et Terfa qui se jettent au petit oued El Maleh. Les seconds ont un écoulement Nord-Sud et sont représentés par réseau de cours d'eau qui rejoignent El Oulija et El Halalif, qui se jettent à leur tour dans les eaux de l'oued Mellègue.

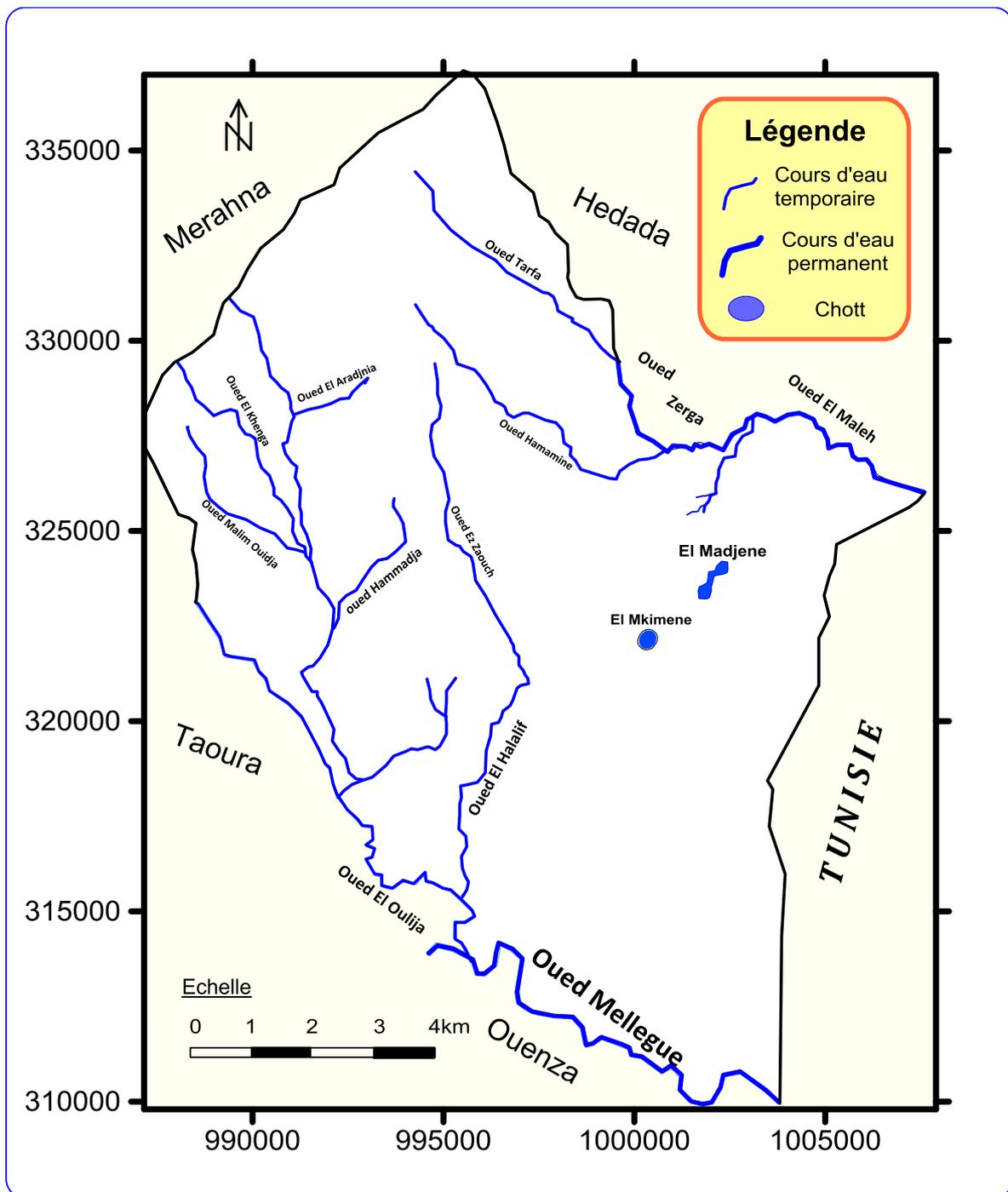


Figure 3: Réseau hydrographique de la commune de Sidi Fredj

## 6. Hydrotechnique :

Le territoire national est divisé en 17 bassins versants, et ce selon la codification de l'agence nationale des ressources hydrauliques (A.N.R.H).

La commune de Sidi Fredj appartient au grand bassin versant de la Medjerda-Mellegue (Code 12) ; elle chevauche sur deux sous bassins, d'oued Mellegue amont (Code 12-04) et celle de l'oued Mellegue aval (Code 12-05).

---

## **7. Aperçu pédologique :**

Les sols inventoriés au niveau du périmètre de Sidi Fredj sont répartis en trois unités pédologiques homogènes appartenant toutes à la classe des sols calcimagnésiques, du groupe des bruns calcaires.

### **7.1. Les sols bruns calcaires modaux :**

Ils occupent la partie Nord-Ouest du périmètre et s'étendent sur une superficie d'environ 1634 ha soit 14.74 % de la superficie totale.

### **7.2. Les sols bruns calcaires halomorphes :**

Les sols bruns calcaires halomorphes occupent une superficie d'environ 8442 ha soit 47.26 % de la superficie.

### **7.3. Les sols bruns calcaires halomorphes et vertique :**

Ces sols occupent les terrasses alluviales de l'Oued Tarfa et l'Oued El Maleh au Nord. Ils s'étendent sur une superficie de 6788 ha soit 38% de la superficie totale.

Le périmètre de Sidi Fredj présente deux zones homogènes :

- **Zone I :**

Elle occupe une superficie de 2634 ha, formée de sol ne présentant pratiquement pas de contraintes majeures à la mise en valeur.

Les sols de cette unité présentent un taux élevé de calcaire (total et actif) et une texture fine à très fine.

Cette zone est formée de sols bruns calcaires modaux, dont l'aptitude est bonne pour les cultures céréalières et fourragères, elle est moyenne à médiocre pour les cultures maraichères et médiocre pour les cultures arboricoles. Par conséquent, ils nécessitent des amendements organiques et une fertilisation minérale.

- **Zone II :**

Elle couvre une superficie de 15230 ha, elle est formée de sols bruns calcaires halomorphes et vertiques.

Les sols de cette zone occupent les parties topographiques basses du périmètre, ils présentent un profil affecté par une certaine salinité et une texture fine. Par conséquent, ces sols nécessitent un apport en matière organique et en éléments fertilisants ainsi qu'une opération de lessivage-drainage.

## 8. Environnement économique :

La population de la commune de Sidi Fredj est à vocation agricole et rurale. En effet, le secteur agricole demeure pratiquement la base de l'activité économique pour la majorité des populations vivant dans les zones éparses (63% de la population active de la commune). Toutefois, bien que les potentialités existent, l'activité de transformation des produits agricoles sur le territoire de commune est encore très peu développée. Celle-ci reste une source importante à considérer avec plus d'attention dans le cadre de l'amélioration des revenus des ménages et du développement de l'emploi.

Le secteur secondaire (industrie + BTP) ne contribue pas beaucoup au pourvoi d'emploi pour la population active de la commune, en raison de l'absence d'unités industrielles sur le territoire de la commune. Seule, la branche BTP de ce secteur assure presque 13% des emplois de la population active de la commune.

Le secteur tertiaire (services, commerces, administrations etc.) occupe la seconde place comme secteur économique, après l'agriculture, en occupant presque 25% de la population active de la commune.

### 8. 1. Agriculture :

Les surfaces de terres agricoles que possède la commune de Sidi Fredj lui donne un aspect rural à vocation agricole où les céréalicultures représentent une prédominance (**Tab. 3**).

**Tableau 03: Occupation des sols**

(Source: DSA de la Wilaya de Souk-Ahras. Campagne 2010-2011)

| Type de culture                         | ha                       |
|---|--------------------------|
| Céréales                                | <b>8 400</b>             |
| Opuntia (« figue de barbarie »)         | <b>plus de 3000</b>      |
| Romarin                                 | <b>plus de 4000</b>      |
| Cultures maraîchères (autoconsommation) |                          |
| Arboricultures<br><i>dont oliviers</i>  | <b>628</b><br><i>500</i> |

## 8. 2. Élevage :

Le potentiel de l'élevage dans la commune de Sidi Fredj reste très limité et ne participe pas d'une manière efficace à promouvoir l'activité économique (**Tab. 4**).

**Tableau 04 : L'élevage dans la commune de Sidi Fredj**

(Source: DSA de la Wilaya de Souk-Ahras. Campagne 2010-2011)

| Type d'animaux              |  | Nombre d'animaux               |
|-----------------------------|--|--------------------------------|
| Petit élevage et aviculture | Poules pondeuses                       | <i>n.d*</i>                    |
|                             | Poulets de chair                       | <i>0</i>                       |
|                             | Dindes                                 | <i>n.d*</i>                    |
|                             | Lapins                                 | <i>100</i>                     |
|                             | Ruches                                 | <i>430</i>                     |
| Grand élevage (2010)        | Bovins<br><i>dont vaches laitières</i> | <i>770</i><br><i>445</i>       |
|                             | Ovins<br><i>dont brebis</i>            | <i>21 200</i><br><i>11 000</i> |
|                             | Caprins<br><i>dont chèvres</i>         | <i>8 250</i><br><i>3 900</i>   |
|                             | Chevaux, ânes, mules                   | <i>n. d.</i>                   |

\* Il existe bien un élevage de dinde et de poules pondeuses, pour la consommation locale ou comme élevage de saison.

Les capacités de production de lait de chèvre et de brebis existent, mais à présent le lait est seulement utilisé pour nourrir les agneaux et pour une consommation familiale, pas de commercialisation ni de tradition de fabrication de fromage ou de yaourt, simplement du petit lait.

## 9. L'irrigation :

Selon le bilan annuel 2013 [Hydraulique agricole PMH] du service Hydraulique et agricole de la wilaya de Souk Ahras, la commune de Sidi Fredj a bénéficié d'une petite partie des terres irriguées, comme le montre le tableau suivant (**Tab. 5**):

**Tableau 05 : L'irrigation dans la commune de Sidi Fredj**

*Source: SHA (service hydraulique agricole: Bilan 2013 )*

| Commune    | Superficie ( ha ) | SAU ( ha ) | Taux SAU ( % ) | Superficie irriguée ( ha ) | Taux d'irrigation ( % ) |
|------------|-------------------|------------|----------------|----------------------------|-------------------------|
| Sidi Fredj | 20 097            | 15 713     | 78.2           | 68.6                       | 0.44                    |

Les eaux d'irrigation sont réparties comme suit:

- Les eaux souterraines pour l'irrigation de 33.6 ha de superficie.
- Les eaux superficielles pour l'irrigation de 30 ha de superficie.
- Autres, pour l'irrigation de 05 ha de superficie.

Dans le cadre du plan quinquenal 2015-2019 et dans l'objectif de renforcer la demande en eau pour l'irrigation, un programme neuf a été proposé pour la construction d'une retenue collinaire prévue pour l'année 2017 .

## 10. Les forêts et maquis :

Les forêts occupent 6429 ha, soit plus de 25% de la superficie totale de la commune, elles se localisent particulièrement dans la partie Nord et Sud de la commune.

Le pin d'Alep est l'espèce dominante de la surface forestière, on signale aussi les programmes lancés depuis 2006 pour le reboisement de 300 ha.

## 11. Environnement :

Le milieu de la commune de Sidi Fredj possède une richesse naturelle importante (montagne, forêts ...), dépourvue de toute sources de pollution par les déchets solides ou atmosphériques vu la non activité industrielle dans son territoire. Mais l'environnement de la commune est exposé à différentes formes de pollution par les rejets liquides: les eaux usées ménagères sont évacuées et rejetées directement dans le milieu naturel (oueds et chaaba) sans traitement préalable.

---

## *Chapitre II*

### *Cadre géologique*

## 1. La géologie régionale

### 1. 1. Introduction

La géologie de l'Algérie du Nord est représentée du Nord vers le Sud par deux chaînes :  
La chaîne alpine dite Maghrébide, qui fait de l'orogénèse alpin et la chaîne Atlasique (Delga 1969)

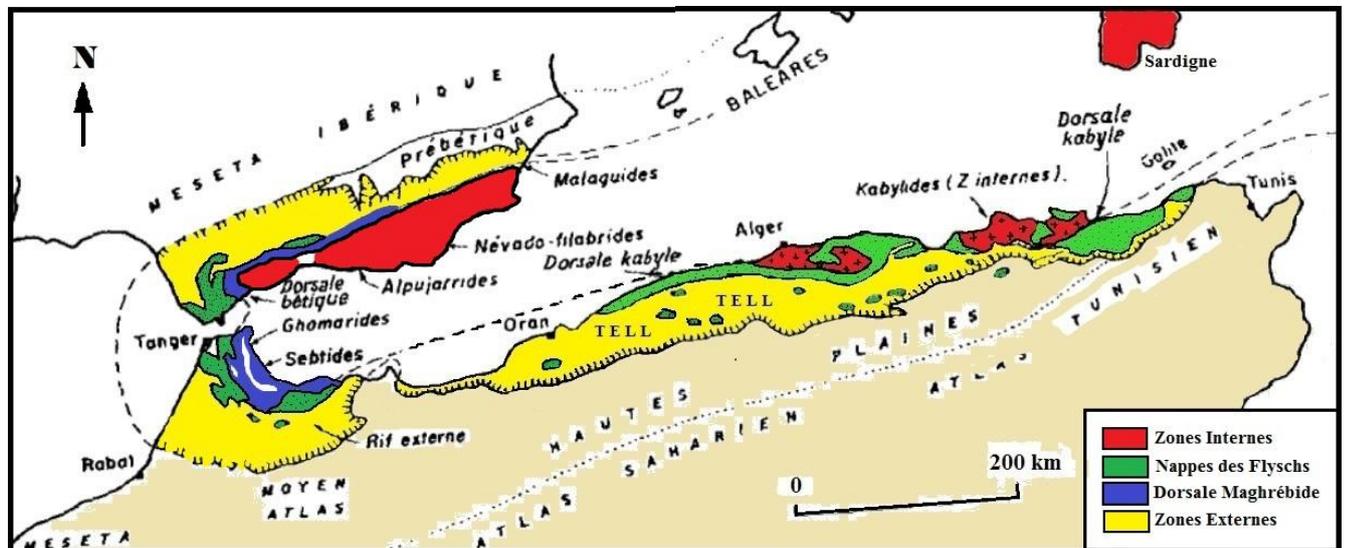


Figure 04: Schéma structurale des Maghrébides ( d'après M. Durand-Delga et J.M. Fontboté, 1980)

### 1. 2. La chaîne Maghrébide

La chaîne Maghrébide est constituée du Nord vers le Sud par trois principaux ensembles: Le domaine interne, le domaine des flysch et le domaine externe (**Fig. 04**).

#### 1. 2. A. Le domaine interne

Appelé aussi **socle kabyle** ou **Kabylide**, est composé de massifs cristallophylliens métamorphiques (gneiss, marbres, amphibolites, micaschistes et schistes) et d'un ensemble sédimentaire paléozoïque (Ordovicien à Carbonifère) peu métamorphique.

Le socle kabyle est bordé au sud par les unités mésozoïques et cénozoïques de la Dorsale Kabyle appelée parfois « **chaîne calcaire** » à cause de l'importance du Jurassique inférieur calcaire.

Le socle est par endroits recouvert en discordance par des dépôts détritiques d'âge Oligocène supérieur – Miocène inférieur, appelés **Oligo-Miocène Kabyle**.

Ce domaine est exceptionnellement étroit et ne dépasse jamais quelques km de largeur.

#### 1. 2. B. Le domaine des flyschs

Il est constitué par un ensemble des nappes à matériel déritique de crétacés-paléogènes qui affleurent dans les zones littorales sur 800 km de long. Il s'agit essentiellement de dépôts de mer profonde mis en place par des courants de turbidités.

---

On distingue du Nord au Sud deux grands groupes de flyschs, les flyschs maurétaniens et les flyschs massyliens auxquels s'ajoutent un troisième groupe de flyschs plus récent, les flyschs numidiens d'âge Oligocène supérieur – Burdigalien inférieur.

### **1. 2. B. 1. Les flyschs maurétaniens**

Sont relativement épais et occupent une position interne dans le domaine des flyschs. Ils sont composés d'alternances de bancs argileux, calcaires et gréseux. Déposées du Crétacé inférieur à l'Eocène.

### **1. 2. B. 2. Les flyschs massyliens**

Occupent une position externe dans le domaine des flyschs et comportent une série péli-to-quartzitique d'âge Crétacé inférieur surmontée par une série péli-to-micro-bréchi-que d'âge Crétacé supérieur.

### **1. 2. B. 3. Les flyschs numidiens**

Constitués de niveaux gréseux d'âge Oligocène terminal- Aquitanien épais de plusieurs centaines de mètres qui reposent sur des argilites versicolores oligocènes. Ces flyschs reposent anormalement à la fois sur les zones internes et sur les zones externes.

## **1. 2. C. Le domaine externe**

En Algérie orientale, le domaine externe comprend les séries telliennes, les séries de l'avant pays allochtone ou parautochtone, et les séries de l'avant pays atlasique autochtone.

### **1. 2. C.1. Les séries telliennes**

Ils sont constitués par un ensemble de nappes allochtones pelliculaires constituées principalement par de marnes d'âge Crétacé moyen à Néogène et qui ont été charriées sur une centaine de km vers le Sud. On distingue du Nord au Sud.

#### **1. 2. C. 1. a. Les unités ultra–telliennes**

A composition marno-calcaires claires typique d'âge Crétacé inférieur;

#### **1. 2. C. 1. b. Les unités telliennes (sensu-stricto)**

Formées de Lias de plate-forme surmonté de Jurassique plus marneux, puis par le Crétacé détritique, devient marneux à argilo-calcaire et enfin, l'Eocène aux marnes épaisses

#### **1. 2. C. 1. c. Les unités péni-telliennes**

Désignent des séries présentant du Lias au Sénonien supérieur, des alternances de faciès telliens et de faciès néritiques. Les formations éocènes riches en nummulites, constituant la couverture de ces séries.

---

### **1. 2. C. 2. L'avant pays allochtone**

Ont été regroupées en trois grands ensembles : une organisation sétifienne, une organisation constantinoise, une organisation Algéro- Tunisienne (Vila, 1980).

#### **1. 2. C.2. a. L'organisation constantinoise**

Regroupe les séries néritiques au Nord, et les séries des Sellaoua au Sud à sédimentation terrigène. Les séries néritiques, épaisse formation carbonatée mésozoïque, faiblement déplacée, chevauchent les écailles des Sellaoua et les unités Sud-sétifiennes. Cet ensemble de formations a été plissé par la phase éocène supérieure.

#### **1. 2. C.2. b. L'organisation Sétifienne**

Constitue l'ensemble allochtone Sud-Sétifien. Les unités sont composées de carbonates mésozoïques à intercalations pélagiques. À l'Est, les séries Sud-Sétifiennes s'intercalent entre l'unité néritique constantinoise et les écailles atlastiques.

#### **1. 2. C.2. c. L'organisation Algéro-Tunisienne**

Elle concerne les avants pays à faciès de sillon plissés et écaillés. Les structures plissées sont rapportées à la phase éocène supérieure. Les plis de grande courbure sont parfois injectés de diapirs d'évaporites triasiques

### **1. 2. C.3. L'avant pays atlastique autochtone et parautochtone**

Comprend « les monts du Hodna et du Belezma, le Nord des Aurès, les hautes plaines d'Oum El Bouaghi et d'Ain Beida, les monts de Souk Ahras et plus au Sud les Djebels Ouasta, Ouenza, Boukhadra, Mesloulou » (Vila, 1980) injectés de diapirs. L'avant pays se distingue par des séries mésozoïques très épaisses de plate-forme subsidente, à intercalations gréseuses (Vila, 1980).

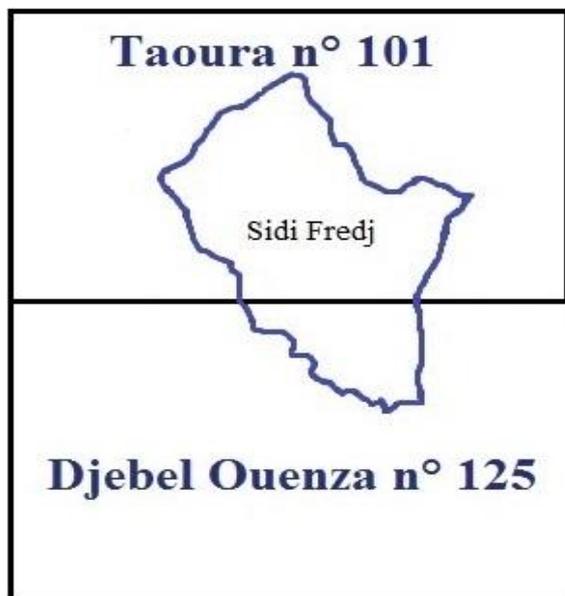
## 2. Cadre géologique

### 2. 1. Introduction

Les recherches géologiques détaillées faites par J.L DAVIDS (1956) sur Les Monts de la Haute Medjerda et l'établissement des cartes géologiques 1/50 000 effectués par KRIVIAKINE, KOVALENKO et VNOUKCHOV en 1986 et celle du DUBOURDIEU s'ajoute aux travaux de J.M VILA (1980) ont permis de tracer les lignes stratigraphiques de la région.

### 2. 2. La zone d'étude

Notre zone d'études fait partie des deux cartes n° 101 de Taoura et n° 125 de djebel Ouenza.



**Figure 05. Situation et limite de la région de Sidi Fredj.**  
(Assemblage des cartes topographiques au 1/50000)  
\* Taoura N° 101  
\* Ouenza N°125

### 2. 3. Les unités litho stratigraphiques

Les unités lithostratigraphique de la région d'étude représentées dans la (Fig. 06) Elle comprend dans l'ordre ascendant suivant :

#### 2. 3. 1. Le Secondaire

##### 2. 3. 1. A. Le Trias

Les formations triasiques affleurent dans notre périmètre d'étude dans les structures diapiriques.

Il apparait au SE (Djebel Kherouba) près de la frontière Algéro-Tunisienne.

Le facies triasique caractérisé par une composition hétérogène de formation grés-gypso-argileuse, de blocs de calcaire, des dolomies, de grés, argiles et marnes.

---

## 2. 3.1.B. Le Crétacé

### 2. 3.1.B.1. Le Crétacé inférieur

Le Crétacé est caractérisé par des formations de l'Aptien qui affleure dans l'anticlinal de Djebel Ladjbel près de la frontière algéro-tunisienne, caractérisé par un faciès marno-gréseux et de l'Albien qui se trouve en bordures du diapir triasique. Il est représenté d'une importante assise de calcaires noirs encadrés de marnes noires.

### 2. 3. 1. B. 2. Le Crétacé supérieur

Le Crétacé supérieur couvre une partie majeure de la zone d'étude, du Cénomaniens au Maestrichtien. Les faciès les plus importants sont: les marnes à intercalation de calcaire et marnes du Cénomaniens (C<sup>1</sup>), des calcaires à minces intercalations de marnes du Turonien (C2) et marno-calcaires et calcaires marneux du Coniacien (C<sup>3</sup>).

- **Cénomaniens:** formé par une importante série de marnes d'épaisseur à plus de 500 m
- **Turonien:** comprend des calcaires à minces intercalations de marnes, son épaisseur oscille entre 100 et 150 m.
- **Coniacien:** caractérisé par une série essentiellement marneuse et argileuse, son épaisseur atteint les 300 m environ.
- **Santonien:** composé de marnes foncées, avec diverse intercalations calcaires, sa puissance est évaluée à 300 m.
- **Campanien:** composé d'une accumulation de marnes foncées, de calcaires et des marnes jaunâtres, son épaisseur oscille entre 160 et 500 m.
- **Maestrichtien:** caractérisé par des calcaires blancs, couverts par une forte accumulation de marnes argileuse. Son épaisseur varie de 150 à 200 m.

### 2. 3. 2. Le Tertiaire

- **Paléocène:** Il est représenté par des marnes noires et d'une intercalation de calcaires marneux gris, d'une épaisseur de 150 m. Le paléocène n'affleure pas dans notre zone d'étude.
- **Miocène inférieur:** Les faciès dominant sont les grès et les marnes de couleur noire associés aux conglomérats et aux calcaires d'épaisseurs irrégulières et variables.
- **Miocène supérieur:** représenté par une alternance régulière de marne et de banc de grès séparés les uns des autres par des conglomérats.

- 
- **Mio-Pliocène:** Un faciès continental représenté par des formations détritiques dont les argiles est le faciès dominant, l'épaisseur des dépôts est de 350 m.

### 2. 3. 3. Le Quaternaire

Selon J.L. DAVIDS (1956), il englobe toutes les formations postérieures à la dernière phase des plissements qui a suivi le dépôt du mio-pliocène continental.

Dans notre zone d'étude, le quaternaire couvre d'importantes superficies. Il se compose en général de formations continentales récentes.

Ils sont représentés par les alluvions, les terrasses fluviatiles, des éboulis et de limons et de la croûte calcaire. Ces dépôts ont été classés en trois groupes

**2. 3. 3. A. Formations anciennes:** Elles sont représentées par:

- **La croûte calcaire :** Représentée par des roches carbonatées, sur des surfaces aplanies, elle est granuleuse, terreuse et poussiéreuse.
- **Cailloutis :** Sont des formations anciennes démantelées par l'érosion.

**2. 3. 3. B. Formations récentes:** Elles sont représentées par:

- **Les alluvions et cailloutis :** Représentées par des galets, les limons sableuse et les argiles, se trouvent dans les terrasses des grands oueds (Mellègue, El Maleh).

**2. 3. 3. C. Formations actuelles :** Elles sont représentées par:

- **Les limons et cailloutis:** Ils proviennent du lessivage de la partie superficielle altérée des marnes (limons) et le transport des éboulis de calcaires (cailloutis).
- **Eboulis :** Ils se trouvent aux pieds des montagnes.

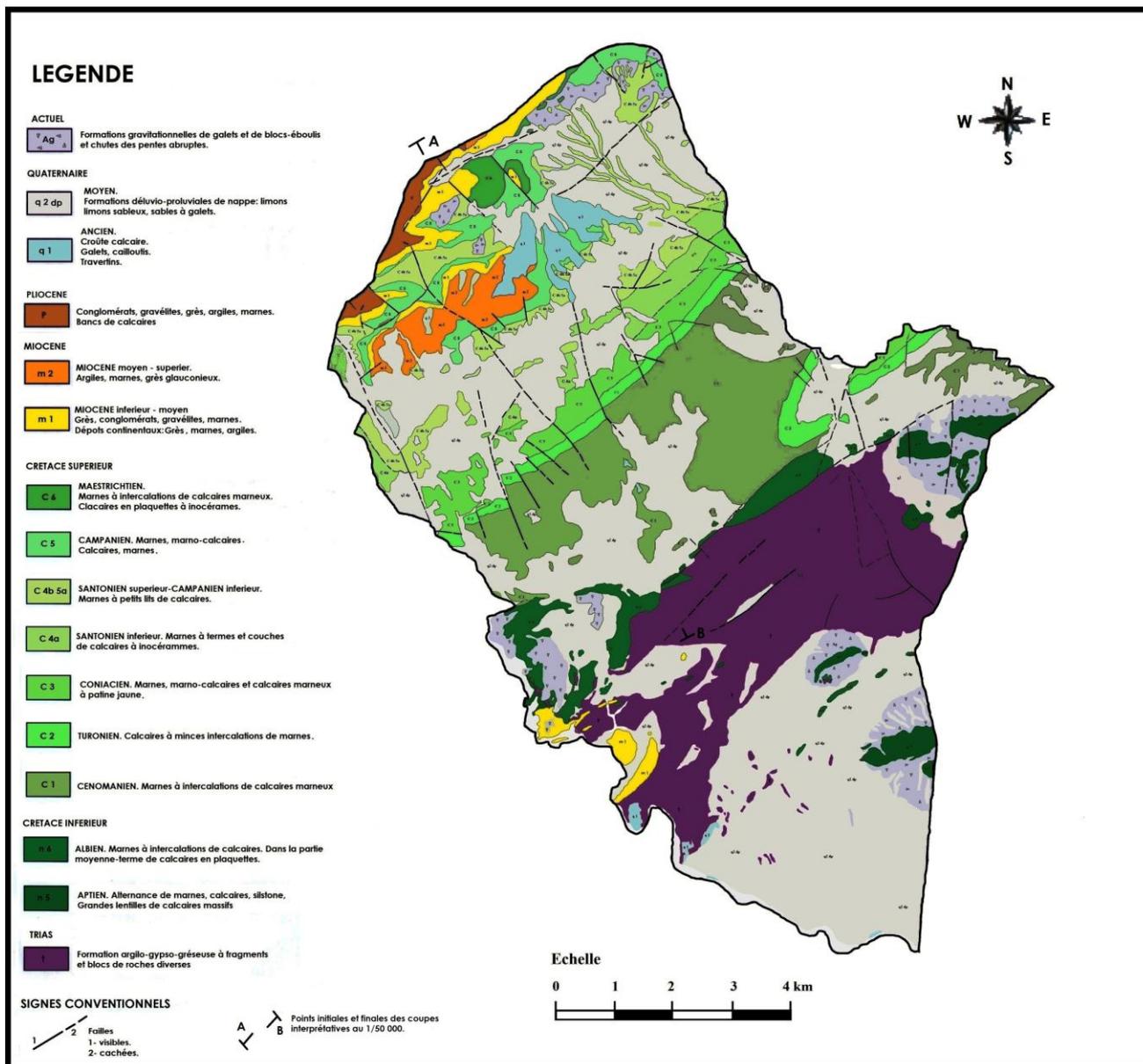


Figure 06: Carte géologique de la région d'étude, reprise par M. BOUROUGA 2014

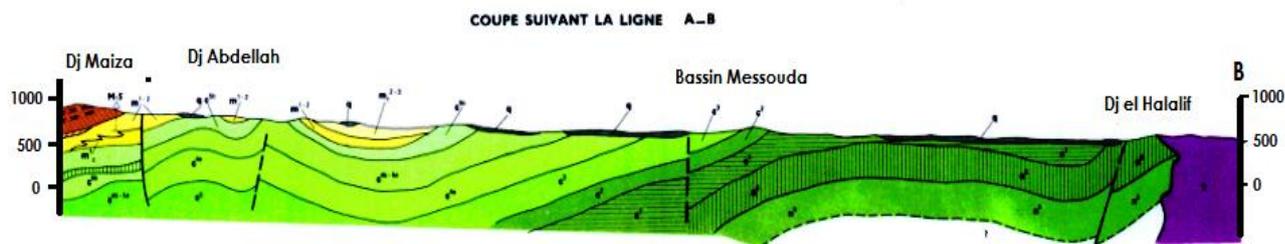


Figure 07: Coupe géologique extraite de la carte de Taoura n° 101 au 1/50000.

---

## **2. 4. Cadre structural**

Trois principaux traits structuraux (**Fig. 08**) dans notre région, représentée par le diapirisme, les plissements et la tectonique cassante.

### **2. 4. A. Le Diapirisme**

Notre zone d'étude fait partie de l'atlas saharien, qui est caractérisé par les diapirs, orientées selon la direction NE-SW (**Fig. 08**), il est connu par l'affleurement des roches de Trias, sous formes de masses chaotiques où dominant le gypse, les argiles et les dolomies ( Vila & al 1993), ainsi que des pointements triasiques localisées au Sud Est de notre région . Les activités diapiriques sont d'âge aptien,

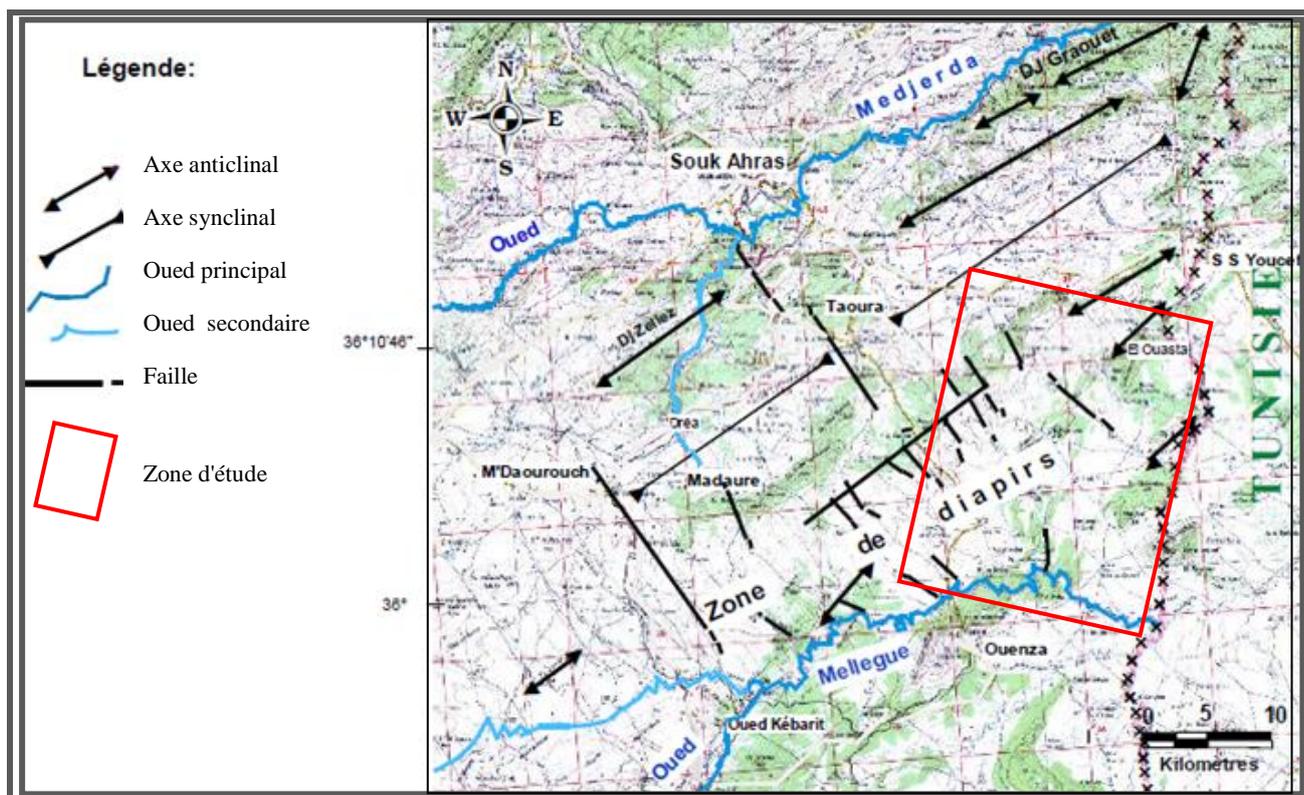
La plupart des diapirs de l'Atlas saharien oriental dessinent une disposition morphologique en dômes percés de direction NE-SW, affleurant sous forme de corps elliptiques étirés, formant un chapelet de masses argilo-gypso-carbonatées.

### **2. 4. B. Les plissements**

Les formations sédimentaires dans son ensemble ont été plissées suivant une direction NE-SW, qui est celle de l'atlas Saharien. Suivant DUBOURDIEU (1956) la série du Mellegue, ces plissements ont eu lieu au cours du paléogène (Eocène supérieur- Oligocène).

### **2. 4. C. La tectonique**

La zone d'étude appartient à l'Atlas saharien (J.M. VILA, 1980). Elle est caractérisée par des éléments tectoniques simples, (plis sous forme d'anticlinaux et de synclinaux) (Toubal, 1993) et par une tectonique cassante (failles) à laquelle s'ajoute une tectonique triasique (**Fig. 08**).



**Figure 08: Ecorche structurale du bassin hydrogéologique de la Taoura (D'après la carte structurale de la chaîne alpine Algérie orientale et des confins Algéro-Tunisiens, 1/500 000, Vila 1978)**

### 3. Conclusion

La zone de sidi Fredj où se focalise notre étude est faite partie de l'avant pays atlasique autochtone à l'extrême Nord Est de l'Algérie, sa partie Sud se trouve dans un domaine de grande complexité structurale qui a connu des éléments tectonique simple et cassante, ainsi que des manifestations diapiriques. Les formations géologiques allant du trias de composition gypso-argileuse, et du crétacé de composition calcaires, dolomies, marnes, calcaire marneux et marno-calcaire, et des formations du mio-plio-quaternaires représentés par des argiles, marnes, grés, des alluvions...

---

## *Chapitre III*

# *HYDROCLIMATOLOGIE*

## 1. Introduction

Dans cette partie, nous nous sommes intéressés aux principaux facteurs indispensables à l'établissement du bilan hydrique, tels que les précipitations, la température et l'évapotranspiration qui permettent d'expliquer les variations des composantes du régime hydrologique et de déterminer le type de climat qui caractérise la région d'étude.

## 2. Les stations de mesure :

La Wilaya de Souk Ahras comporte quatre stations météorologiques (**Tab. 6**). Pour notre région d'étude on s'est basé sur les données de Souk Ahras et celles de Taoura. Ces deux stations sont les plus proches et les mieux représentatives, ce qui explique ce choix.

- La station de Souk Ahras, dispose d'une série d'observation complète de 28 ans (1986 – 2013).
- La station de Taoura est distante de 10 km, elle se trouve à la même latitude que la zone d'étude et totalise une série d'observation de 33 ans (1971 – 2003). Ce poste est à l'arrêt depuis l'année 2004.

**Tableau 6: Caractéristiques géographiques des stations météorologiques de la région**

| Station            | Etat          | Code     | Coordonnées |          |        |        |       |
|--------------------|---------------|----------|-------------|----------|--------|--------|-------|
|                    |               |          | Longitude   | Latitude | X (Km) | Y (Km) | Z (m) |
| Souk Ahras         | Fonctionnelle | 12.01.01 | 7°58'E      | 36°17'N  | 967,25 | 342,25 | 880   |
| Ain Dalia          | Fonctionnelle | 12.01.01 | 7°52'E      | 36°15'N  | 953,30 | 340,40 | 670   |
| Taoura             | Arrêt en 2004 | 12.01.05 | 7°50'E      | 36°53'N  | 900,55 | 331,55 | 685   |
| Ruines de khemissa | Fonctionnelle | 12.01.04 | 7°39'E      | 36°11'N  | 945,50 | 332,50 | 900   |

## 3. Les facteurs climatiques

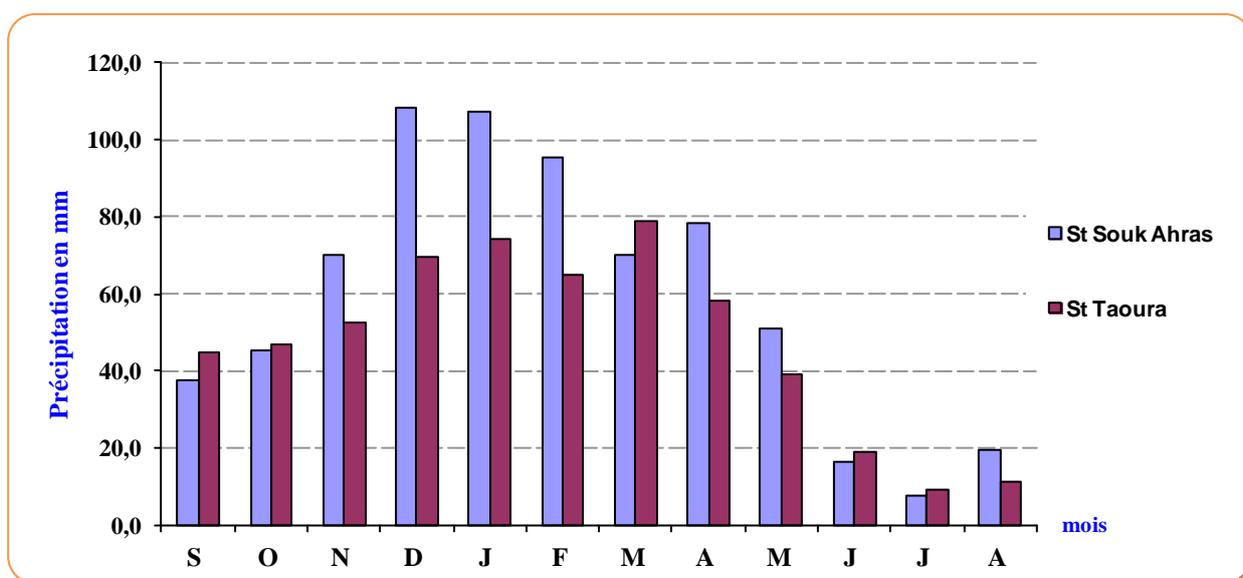
### 3.1. La précipitation

La précipitation est un facteur fondamental pour caractériser le climat d'une région. Elle joue un rôle primordial dans l'alimentation des nappes aquifères et aussi dans le comportement hydrologique des cours d'eau.

Les hauteurs des pluies enregistrées dans les stations : Souk Ahras- Taoura ; sont illustrées dans le tableau (Tab. 7).

**Tableau 7: Hauteurs moyennes mensuelles des précipitations en mm**

| Mois / Station | Sep  | Oct  | Nov  | Dec   | Jan   | Fev  | Mars | Avr  | Mai  | Jui  | Juil | Aout | Cumul |
|----------------|------|------|------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| St Souk Ahras  | 37.5 | 45.0 | 70.2 | 108.2 | 107.3 | 95.4 | 70.0 | 78.2 | 50.8 | 16.1 | 7.5  | 19.4 | 705.4 |
| St Taoura      | 44.8 | 46.6 | 52.5 | 69.7  | 74.1  | 64.8 | 79.1 | 58.2 | 39.1 | 19.1 | 9.3  | 11.3 | 568.6 |



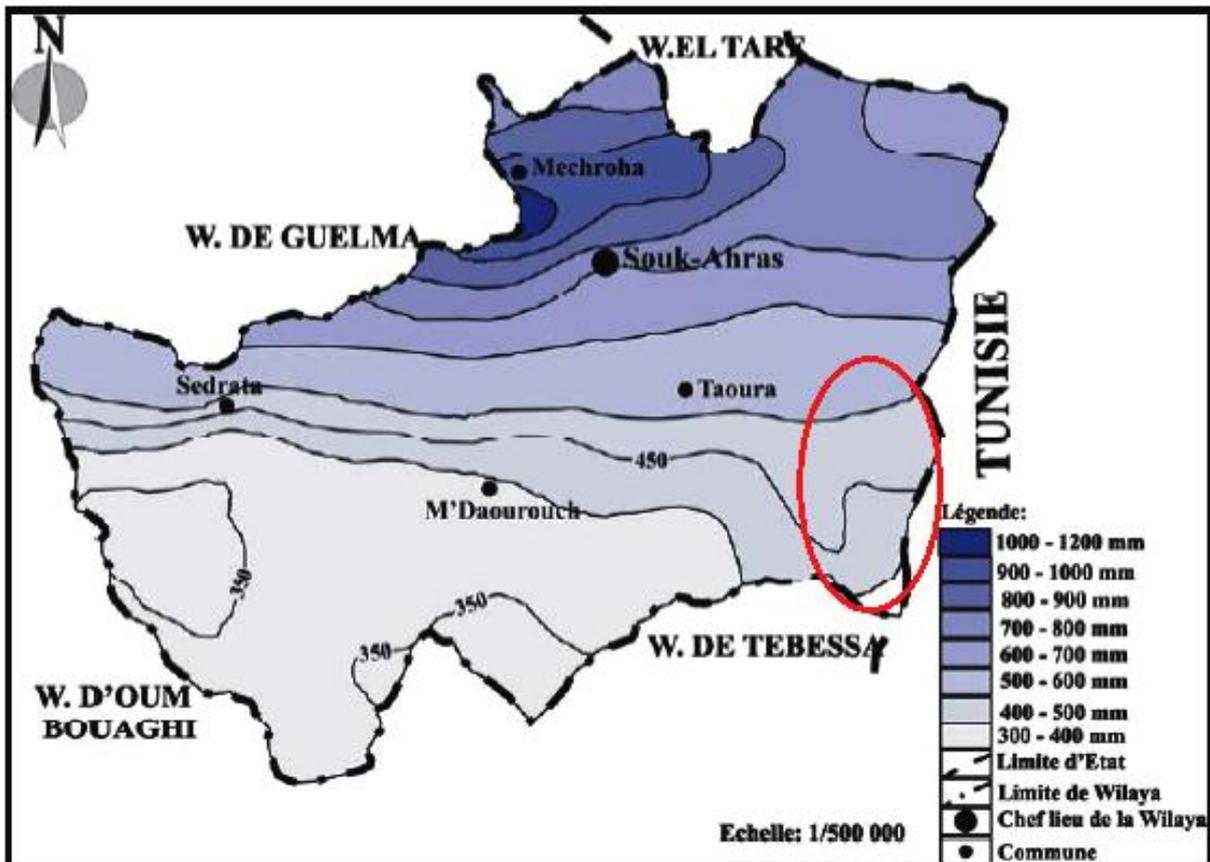
**Figure 9: Histogramme des précipitations moyennes mensuelles**

Le **tableau 7** et la **figure 9** montrent d'une part, que la zone de Taoura qui est près de notre région d'étude est moins pluvieuse que celle de Souk Ahras et d'autre part, elles présentent une variation des précipitations moyennes mensuelles dans les deux stations. Un maximum de l'ordre de 108.2 mm est observé au mois de Décembre à la station de Souk Ahras et un minimum de l'ordre de 7.5 mm caractérise le mois de Juillet. La station de Taoura atteint son maximum de 79.09 mm au mois de Mars et son minimum de 9.28 mm au mois de juillet.

La carte hypsométrique (**Fig. 10**) de la pluviométrie de la wilaya de Souk-Ahras montre que cette zone est caractérisée par une hauteur de précipitation variant de 300 mm au Sud de la

wilaya à M'Daourouche et de 1200 mm au Nord dans la commune d'El Mechrouha qui représente la zone la plus arrosée de la wilaya de Souk-Ahras (I. Guassmi 2009).

Notre région d'étude est marquée par deux zones pluviométriques, au Nord les précipitations sont de 500 à 600 mm et au Sud elles diminuent pour se situer entre 400 et 500 mm.



**Figure 10: Carte de répartition de la pluviométrie dans la wilaya de Souk-Ahras (Source B.N.E.D.E.R, 1999, in I. Guasmi 2009)**

### 3. 2. La température

La température est un facteur important régissant le phénomène de l'évapotranspiration et donc le déficit de l'écoulement annuel et saisonnier, elle intervient dans le développement du rythme biologique des végétaux, et elle facilite l'établissement du bilan hydrique.

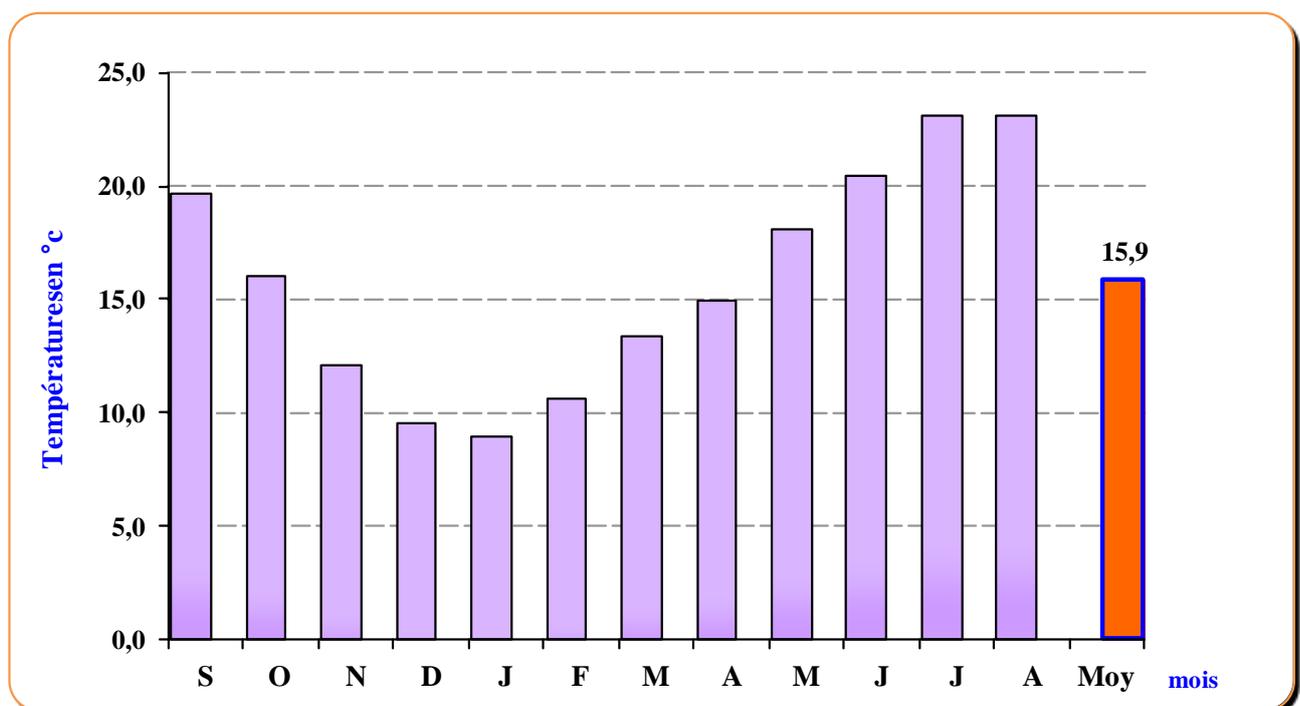
Les données de températures disponibles sont des valeurs moyennes mensuelles observées à la station de Souk Ahras.

**Tableau 8: Températures moyennes mensuelles (°C): Station de Souk Ahras (1986 – 2013)**

| Mois  | Sept | Oct. | Nov. | Déc. | Janv. | Fév. | Mars | Avril | Mai  | Juin | Juil. | Aout | Moy  |
|-------|------|------|------|------|-------|------|------|-------|------|------|-------|------|------|
| T Moy | 19.8 | 16.1 | 12.2 | 9.6  | 9.0   | 10.7 | 13.4 | 15.0  | 18.1 | 20.5 | 22.8  | 23.1 | 15.9 |

D'après le **tableau 8** et la **figure 11** on peut distinguer deux saisons : une froide et l'autre chaude.

Les valeurs mensuelles (**Tab. 8**) indiquent que la zone est caractérisée par une température moyenne annuelle de 15,9°C. Elle descend pendant la saison froide pour atteindre un minima en Janvier de 9.0°C et à la saison chaude avec un maxima de 23,1 °C au mois d'Août.



**Figure 11: Histogramme des températures moyennes en °C à la Station de Souk Ahras**

### 3. 3. Le vent :

Le vent est la conséquence du déplacement de l'air. C'est la résultante des forces de pression. Il est caractérisé par sa vitesse (m/s) et sa direction ou provenance indiquée en degré par rapport au Nord (F. Lebourgeois).

Le vent souffle d'une façon générale du Nord au Sud en hiver et du Sud au Nord en été. Mais ils peuvent prendre plusieurs directions durant la journée. On peut noter de rares directions du vent du Nord vers Sud le matin et vers le Nord-Est le soir avec des vitesses sous-mentionnés (Tab. 9), selon B.N.E.DE.R (2011).

**Tableau 9: Relèves mensuelles du vent 2010-2011 (Source SMSA)**

| Mois    | J   | F   | M   | A   | M   | J   | J   | A   | S  | O   | N   | D   |
|---------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|
| V (moy) | 2.8 | 2.7 | 3.3 | 3.6 | 3.4 | 3.9 | 3.8 | 3.7 | 3  | 3.1 | 3.1 | 2.8 |
| V (max) | 32  | 30  | 37  | 34  | 32  | 37  | 30  | 34  | 27 | 35  | 31  | 34  |

(V moy) : vitesse moyenne du vent; V (max) : vitesse maximale; L'unité en m/s

### 3. 4. L'humidité relative de l'air

L'humidité relative de l'air correspond au rapport de la tension de vapeur réelle observée à la tension de vapeur saturante à la même température.

**Tableau 10: L'humidité relative moyenne mensuelle (2003 -2013), Station de Souk Ahras**

| Mois         | Sept | Oct. | Nov. | Déc. | Janv. | Fév. | Mars | Avril | Mai  | Juin | Juil. | Aout | Moy   |
|--------------|------|------|------|------|-------|------|------|-------|------|------|-------|------|-------|
| Humidité (%) | 63   | 67,9 | 73,3 | 78,4 | 77,8  | 67,9 | 67,3 | 72    | 67,3 | 58,6 | 51,4  | 52,5 | 66,45 |

Le tableau 10 montre que la variation au cours de l'année est significative avec un maximum de 78,4 % au mois de Décembre et un minimum de 51,4 % au mois de Juillet.

## 4. Les indices climatiques

### 4.1. Indice de De Martonne

De Martonne a défini comme fonction climatologique l'indice d'aridité du climat par le quotient: 
$$\mathbf{IM = P / (T+10)} \quad [1]$$

Cet indice permet de caractériser le pouvoir évaporant de l'air à partir de la température.

IM : indice d'aridité annuelle.

P : précipitations moyennes annuelles en mm.

T : températures moyennes annuelles en °C.

L'aridité augmente quand la valeur de l'indice diminue. Une faible aridité correspondant à des pluies abondantes et/ou des températures basses. De Martonne a proposé six grands types de climats selon les valeurs de l'indice annuel.

- Si  $IM < 5$  : climat hyperaride.
- Si  $5 < IM < 7,5$  : climat désertique.
- Si  $7,5 < IM < 10$ : climat steppique.
- Si  $10 < IM < 20$  : climat semi-aride.
- Si  $20 < IM < 30$  : climat tempéré.
- Si  $IM > 30$  : climat Humide (écoulement abondant).

Dans l'objectif d'avoir des résultats qui se rapproche à la réalité, nous avons appliqué cette formule sur 3 points de précipitation moyenne annuelle :

- La station de Souk Ahars, avec  $P = 705.4$  mm.
- La station de Taoura, avec  $P = 568.6$  mm. Elle représente le Nord de notre zone d'étude.
- La valeur moyenne de  $P = 450$  mm au sud de notre zone d'étude, et ce à partir de la carte de distribution pluviométrique dans la Wilaya de Souk Ahras (source B.N.DE.R 1999).

Les résultats de l'application de la formule de De Martonne sont récapitulés dans le **tableau 11**.

**Tableau 11: Valeurs de l'indice d'aridité à Souk-Ahras, Taoura et le sud de la région.**

| Station            | IM<br>(De Martonne) | Type de climat |
|--------------------|---------------------|----------------|
| Station Souk Ahras | <b>27.2</b>         | Tempéré        |

|                               |             |            |
|-------------------------------|-------------|------------|
| St Taoura (Nord de la région) | <b>21.1</b> | Tempéré    |
| Sud de la région              | <b>17.4</b> | Semi aride |

Les résultats de l'indice d'aridité annuel obtenus dans le tab. 11 montre que la zone d'étude est répartie en deux type de climats :

- Au Nord par un climat tempéré, représenté dans les deux stations de Souk Ahras et celle de Taoura. Caractérisé par des étés chauds et secs et des hivers doux et humides
- Au Sud un climat semi aride ou climat de steppe est caractérisé par une saison sèche la majeure partie du temps et par une saison humide.

#### **4.2. Indice d'aridité mensuel:**

L'indice d'aridité mensuel est défini par la relation suivante :

$$\mathbf{I = 12 P / T^{\circ} + 10} \quad [2]$$

I : Indice d'aridité mensuel

P : Précipitations moyennes mensuelles en mm

T° : Température moyenne mensuelle en °C.

L'application de la formule [2] a permis de dresser le tableau ci-dessous (**Tab. 12**) :

**Tableau 12: Indices d'aridité mensuels (I) à la station de Taoura.**

| Mois             | I     | Etage bioclimatique |
|------------------|-------|---------------------|
| <b>Septembre</b> | 16.60 | semi-aride          |
| <b>Octobre</b>   | 19.92 | semi-aride          |
| <b>Novembre</b>  | 27.98 | tempéré             |
| <b>Decembre</b>  | 44.40 | Humide              |
| <b>Janvier</b>   | 51.19 | Humide              |
| <b>Fevrier</b>   | 43.35 | Humide              |
| <b>Mars</b>      | 46.18 | Humide              |
| <b>Avril</b>     | 30.72 | Humide              |
| <b>Mai</b>       | 17.20 | semi-aride          |
| <b>Juin</b>      | 7.31  | Steppique           |
| <b>Juillet</b>   | 3.15  | hyper-aride         |
| <b>Aout</b>      | 3.76  | hyper-aride         |

Selon la classification précédente par **De Martonne**, les mois de décembre, janvier, février, mars et avril présentent un climat humide. Seul le mois de novembre caractérisé par un climat tempéré. Les mois de mai, septembre et octobre sont caractérisés par un climat semi aride, le mois de juin devient steppique, alors qu'aux mois de juillet et août le climat devient hyperaride.

#### **4.3. Aperçu général sur le climat de la région :**

Selon la carte bioclimatique de l'Est Algérien (**Fig. 12**) nous constatons que le climat de la zone d'étude appartient à un milieu de chevauchement climatique, influencé par le climat subhumide au Nord et le climat semi aride au Sud, caractérisé par un hiver relativement tempéré et un été chaud et sec.

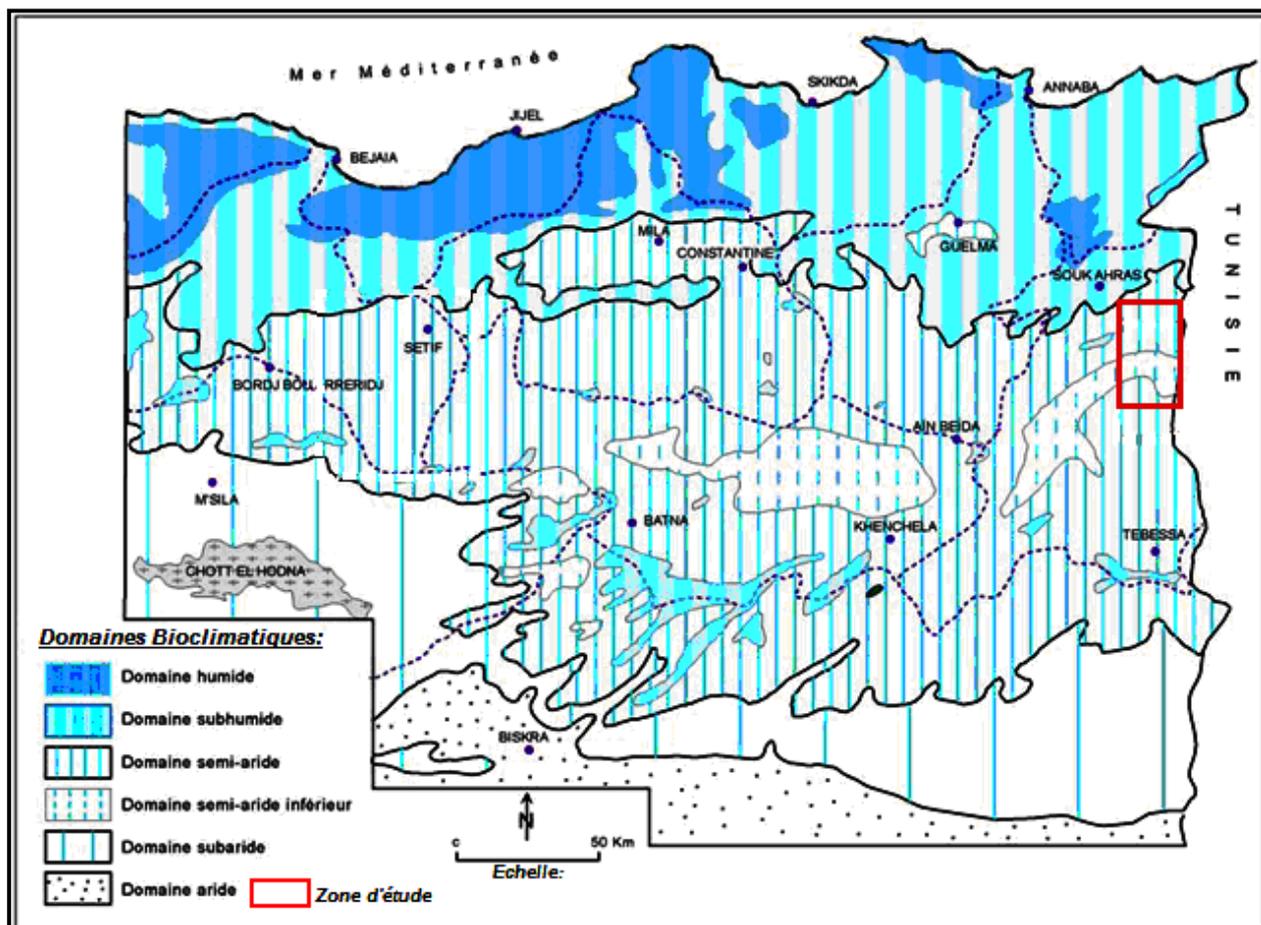


Figure 12: Carte simplifiée des zones bioclimatiques de l'Est Algérien (A. Mébarki, 2005)

#### 4.4. Diagramme ombrothermique :

Le diagramme ombrothermique est une représentation graphique des températures et quantités de précipitations moyennes mensuelles en un lieu donné où :  $P = 2T$

L'intérêt du diagramme ombrothermique est qu'il permet d'un seul coup d'œil de caractériser un climat.

D'après les diagrammes des figures 13 et 14, deux saisons bien distinctes peuvent être déterminées :

- Une saison sèche : qui s'étend du mois de Mai jusqu'au mois de Septembre.
- Une saison humide : qui s'étale du mois de Septembre jusqu'au mois d'Avril.

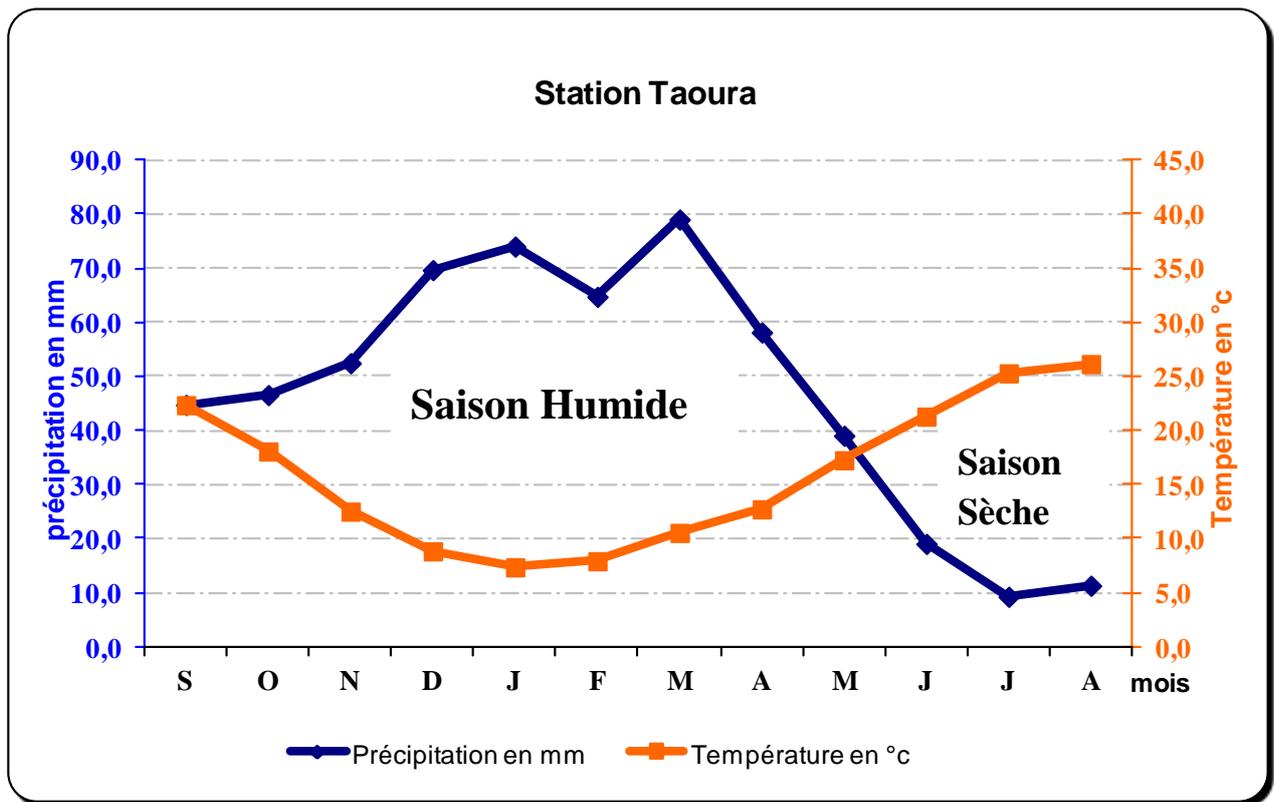


Figure 13: Diagramme Ombrothermique : Station Taoura

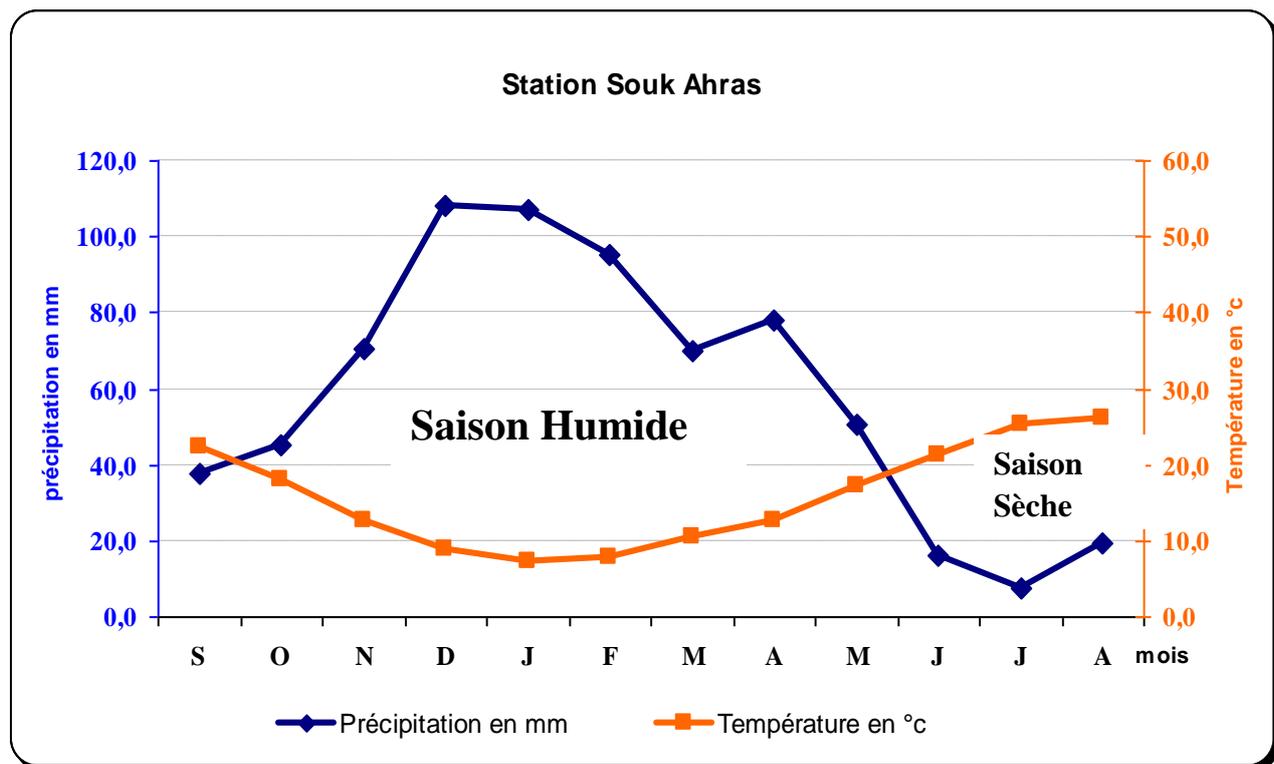


Figure 14: Diagramme Ombrothermique : Station Souk Ahras

---

## 4. 5. L'évapotranspiration

L'évapotranspiration (ET) concerne l'ensemble des processus renvoyant dans l'atmosphère sous forme gazeuse une partie des précipitations (forme liquide). Ce phénomène combine les pertes en eau par évaporation directe d'eau liquide (eau libre ou eau du sol dans les 15 premiers cm environ) et par transpiration de la biomasse. L'évapotranspiration s'exprime en mm d'eau pour une période donnée et peut intervenir à tout moment du cycle de l'eau à condition qu'il y ait assez d'eau à évapotranspirer et une énergie suffisante (Le Bourgeois François, p63). L'évapotranspiration se distingue par:

- L'évapotranspiration potentielle (ETP).
- L'évapotranspiration réelle (ETR).

### 4. 5. 1. L'évapotranspiration potentielle (ETP)

Thornthwaite, en 1948 est le premier à introduire le concept d'évapotranspiration potentielle, dans un contexte de classification du climat : « Il y a une distinction entre le volume d'eau qui est effectivement évapotranspiré et celui qui pourrait être évapotranspiré, s'il était disponible. Lorsque la disponibilité en eau augmente, l'évapotranspiration atteint un maximum qui dépend uniquement du climat. C'est ce que nous pourrions appeler évapotranspiration potentielle (Ludovic Oudin 2004, p23).

#### 4. 5. 1. 1. L'estimation de l'évapotranspiration potentielle (ETP)

Pour l'estimation de l'évapotranspiration potentielle on a utilisé la formule de « *Thornthwaite* ».

##### - Formule empirique de Thornthwaite (Tab. 13)

C.W.Thornthwaite a établi une correction entre la température moyenne mensuelle et l'évapotranspiration mensuelle, cet auteur définit d'abord un indice thermique mensuel (i), où :

$$i = \left[ \frac{T}{5} \right]^{1.5} \quad ; \quad I = \sum_1^{12} i \quad ; \quad a = \left( \frac{1.6}{100} \right) I + 0.5$$

$$ETP = 16 \left( \frac{10T}{I} \right)^a k \quad [3]$$

Avec :

- ETP : Evapotranspiration potentielle en mm.
- T : Température moyenne mensuelle en °C.
- i : Indice thermique mensuel.
- I : Indice thermique annuel.
- K : Coefficient d'ajustement

**Tableau 13: Les valeurs de l'ETP selon la formule de Thornthwaite**

| Mois     | Sept. | Oct. | Nov. | Déc. | Jan. | Fév. | Mars | Avr. | Mai  | Juin  | Juil. | Août  | Total (mm/an) |
|----------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|---------------|
| ETP (mm) | 109.2 | 66.6 | 29.9 | 15.7 | 12.1 | 14.6 | 30.6 | 47.1 | 89.5 | 127.7 | 169.8 | 167.2 | 879.9         |

#### 4. 5. 2. L'évapotranspiration réelle (ETR)

Par définition, on appelle évapotranspiration réelle effective actuelle ou encore déficit d'écoulement (ETR) la somme de l'évaporation et de la transpiration réelle pour une surface donnée et une période définie.

##### 4. 5. 2. 1. Estimation de l'évapotranspiration réelle

On a essayé d'estimer l'évapotranspiration réelle par les formules suivantes :

- Formule de Thornthwaite
- Formule de Turc
- Formule de Coutagne

##### a) Formule de Thornthwaite

Cette méthode est décrite plus loin en détail et les résultats sont représentés dans le tableau du bilan hydrique (**Tab. 17**).

##### b) Formule de Turc (**Tab. 14**)

La formule de *Turc* permet d'évaluer l'évapotranspiration potentielle mensuelle moyenne en tenant compte de la durée réelle de l'insolation.

$$\bullet \quad ETR = \frac{P}{\sqrt{0.9 + P^2 / L^2}} \quad [4]$$

Avec :  $L = 300 + 25 \times T + 0.05 \times T^3$

Tel que :

- P : Précipitations moyennes annuelles (mm)
- T : Températures moyennes annuelles (°C)

- ETR : Evapotranspiration réelle (mm)
- L : Pouvoir évaporant, est une limite vers laquelle tend l'ETR lorsque P devient grand.

A partir de cette méthode les résultats sont récapitulés dans le tableau suivant:

**Tableau 14: L'ETR par la méthode de Turc**

| Station    | P (mm) | T° C | L     | ETR (mm/an) |
|------------|--------|------|-------|-------------|
| Taoura     | 568.6  | 15.9 | 898.5 | 498.6       |
| Souk Ahras | 705.4  | 15.9 | 898.5 | 573.1       |

#### c) Formule de Coutagne (Tab. 15)

Cette formule permet de calculer l'évapotranspiration réelle en faisant intervenir la pluviométrie et la température.

$$ETR = P - \lambda P^2 \quad [5]$$

où  $\lambda = 1 / (0,8 + 0,14T)$ .

Avec :

ETR : évapotranspiration réelle, en (mm/an).

P : précipitation moyenne mensuelle, en (mm/an).

T : température moyenne annuelle, en (°C).

Cette formule n'est valable que si les précipitations sont comprises entre :  $1 / 8\lambda < P < 1 / 2\lambda$ .

L'application de cette formule a donné le résultat représenté dans le tableau suivant :

**Tableau 15: Résultats de l'ETR selon la formule de Coutagne**

| Station    | P (mm) | T° C | $\lambda$ | ETR (mm/an) |
|------------|--------|------|-----------|-------------|
| Taoura     | 568.6  | 15.9 | 0.33      | 461.9       |
| Souk Ahras | 705.4  | 15.9 | 0.33      | 541.0       |

#### 4. 5. 2. 2. Comparaison entre les 3 formules

- La finalité de la comparaison réside dans les écarts décelés lors de l'application des trois méthodes (**Tab. 16**) à fin de donner une meilleure approche à l'estimation de l'ETR. Ce qui par la suite fera ressortir la formule la mieux appropriée à notre région d'étude.
- Il est clair que la formule de Thornthwaite convient aux régions humides de la zone tempérée, contrairement à celle de Turc qui présente un caractère universel.

**Tableau 16: Les résultats de l'ETR selon les différentes méthodes**

| Méthode      | ETR (mm/an)<br>Station Taoura | ETR (mm/an)<br>Station Souk Ahras |
|--------------|-------------------------------|-----------------------------------|
| Thornthwaite | 387.1                         | 393.1                             |
| Turc         | 498.6                         | 573.1                             |
| Coutagne     | 461.9                         | 541.0                             |

#### **5. Bilan hydrique selon la formule de Thornthwaite (Tab. 17):**

- ❖ Le bilan hydrologique établi mensuellement selon la méthode de C.W. Thornthwaite a l'avantage d'estimer pour chaque mois: l'évapotranspiration réelle ETR, la réserve facilement utilisable (RFU), le déficit agricole (Da) et l'excédent (Ex) sont considérés comme des éléments clés en hydrologie, car ils permettent l'estimation des réserves naturelles des aquifères.
- ❖ D'après les études menées par les directions de l'hydraulique de la wilaya (DHW) et de l'agriculture (DSA), la RFU est estimé à 67 mm pour la région de Souk-Ahras.
- ❖ Les paramètres utilisés sont:
  - **T** : Température mensuelle  $^{\circ}\text{C}$
  - **P** : Précipitation mensuelle (mm)
  - **IT**: Indice thermique
  - **RFU**: Réserve facilement utilisable (mm)
  - **K** : Coefficient de latitude
  - **ETR** : Evapotranspiration réelle (mm)
  - **ETP** : Evapotranspiration potentielle (mm)
  - **DA** : Déficit agricole (mm)
  - **EXD** : Excédent (mm)

**Tableau 17: Bilan hydrique selon Thornthwaite, Station de Taoura**

| Mois          | Tp          | IT          | CL   | ETPC         | Pr           | BH            | CH   | VR    | RU   | ETPR         | Def          | Exc          |
|---------------|-------------|-------------|------|--------------|--------------|---------------|------|-------|------|--------------|--------------|--------------|
| S             | 22.4        | 9.5         | 1.05 | 109.2        | 44.79        | -64.4         | -0.6 | 0.0   | 0.0  | 44.8         | 64.4         | 0.0          |
| O             | 18.1        | 6.9         | 0.91 | 66.6         | 46.61        | -20.0         | -0.3 | 0.0   | 0.0  | 46.6         | 20.0         | 0.0          |
| N             | 12.5        | 4.0         | 0.75 | 29.9         | 52.51        | 22.7          | 0.8  | 22.7  | 22.7 | 29.9         | 0.0          | 0.0          |
| D             | 8.8         | 2.4         | 0.70 | 15.7         | 69.74        | 54.0          | 3.4  | 44.3  | 67.0 | 15.7         | 0.0          | 9.7          |
| J             | 7.4         | 1.8         | 0.73 | 12.1         | 74.09        | 62.0          | 5.1  | 0.0   | 67.0 | 12.1         | 0.0          | 62.0         |
| F             | 7.9         | 2.0         | 0.78 | 14.6         | 64.79        | 50.2          | 3.4  | 0.0   | 67.0 | 14.6         | 0.0          | 50.2         |
| M             | 10.6        | 3.1         | 1.02 | 30.6         | 79.09        | 48.5          | 1.6  | 0.0   | 67.0 | 30.6         | 0.0          | 48.5         |
| A             | 12.7        | 4.1         | 1.15 | 47.1         | 58.20        | 11.1          | 0.2  | 0.0   | 67.0 | 47.1         | 0.0          | 11.1         |
| M             | 17.3        | 6.4         | 1.32 | 89.5         | 39.08        | -50.4         | -0.6 | -50.4 | 16.6 | 89.5         | 0.0          | 0.0          |
| J             | 21.3        | 8.8         | 1.33 | 127.7        | 19.07        | -108.6        | -0.9 | -16.6 | 0.0  | 35.6         | 92.0         | 0.0          |
| J             | 25.3        | 11.4        | 1.33 | 169.8        | 9.28         | -160.5        | -0.9 | 0.0   | 0.0  | 9.3          | 160.5        | 0.0          |
| A             | 26.2        | 12.0        | 1.24 | 167.2        | 11.33        | -155.9        | -0.9 | 0.0   | 0.0  | 11.3         | 155.9        | 0.0          |
| <b>Annuel</b> | <b>15.9</b> | <b>72.2</b> |      | <b>879.9</b> | <b>568.6</b> | <b>-311.3</b> |      |       |      | <b>387.1</b> | <b>492.8</b> | <b>181.5</b> |

Tableau 18: Bilan hydrique selon Thornthwaite, Station de Souk Ahras

| Mois          | Tp          | IT          | CL   | ETPC         | Pr           | BH            | CH   | VR    | RU   | ETPR         | Def          | Exc          |
|---------------|-------------|-------------|------|--------------|--------------|---------------|------|-------|------|--------------|--------------|--------------|
| S             | 22,4        | 9,5         | 1,05 | 109,2        | 37,461       | -71,8         | -0,7 | 0,0   | 0,0  | 37,5         | 71,8         | 0,0          |
| O             | 18,1        | 6,9         | 0,91 | 66,6         | 45,007       | -21,6         | -0,3 | 0,0   | 0,0  | 45,0         | 21,6         | 0,0          |
| N             | 12,5        | 4,0         | 0,75 | 29,9         | 70,225       | 40,4          | 1,4  | 40,4  | 40,4 | 29,9         | 0,0          | 0,0          |
| D             | 8,8         | 2,4         | 0,70 | 15,7         | 108,15       | 92,5          | 5,9  | 26,6  | 67,0 | 15,7         | 0,0          | 65,8         |
| J             | 7,4         | 1,8         | 0,73 | 12,1         | 107,29       | 95,2          | 7,9  | 0,0   | 67,0 | 12,1         | 0,0          | 95,2         |
| F             | 7,9         | 2,0         | 0,78 | 14,6         | 95,404       | 80,8          | 5,5  | 0,0   | 67,0 | 14,6         | 0,0          | 80,8         |
| M             | 10,6        | 3,1         | 1,02 | 30,6         | 69,996       | 39,4          | 1,3  | 0,0   | 67,0 | 30,6         | 0,0          | 39,4         |
| A             | 12,7        | 4,1         | 1,15 | 47,1         | 78,182       | 31,1          | 0,7  | 0,0   | 67,0 | 47,1         | 0,0          | 31,1         |
| M             | 17,3        | 6,4         | 1,32 | 89,5         | 50,75        | -38,8         | -0,4 | -38,8 | 28,2 | 89,5         | 0,0          | 0,0          |
| J             | 21,3        | 8,8         | 1,33 | 127,7        | 16,143       | -111,5        | -0,9 | -28,2 | 0,0  | 44,4         | 83,3         | 0,0          |
| J             | 25,3        | 11,4        | 1,33 | 169,8        | 7,475        | -162,3        | -1,0 | 0,0   | 0,0  | 7,5          | 162,3        | 0,0          |
| A             | 26,2        | 12,0        | 1,24 | 167,2        | 19,35        | -147,9        | -0,9 | 0,0   | 0,0  | 19,4         | 147,9        | 0,0          |
| <b>Annuel</b> | <b>15,9</b> | <b>72,2</b> |      | <b>879,9</b> | <b>705,4</b> | <b>-174,5</b> |      |       |      | <b>393,1</b> | <b>486,8</b> | <b>312,3</b> |

---

## ❖ Formule de vérification

Afin de vérifier l'exactitude des résultats, on applique la formule de vérification suivante :

$$P = \sum ETR + \sum EX$$

- Station de Taoura

$$P = 387.1 + 181.5 = 568.6 \text{ mm.}$$

- Station de Souk Ahras

$$P = 383.1 + 312.3 = 705.4 \text{ mm.}$$

Nous constatons que les résultats issus des bilans hydriques sont vérifiés.

### 5. 1. Interprétation du bilan hydrique

- Pour la station de Taoura, l'ETP atteint son maximum au mois de Juillet (169.8 mm) et son minimum au mois de Janvier (12.1 mm), l'excédent (EXD) commence à partir du mois de Décembre et s'étale jusqu'au mois d'Avril avec un maximum au mois de janvier (62.0 mm), l'épuisement du stock commence au mois de Mai et se termine au mois de Juillet avec un déficit agricole maximum au mois de Juillet (**Fig. 15 et 16**).
- Pour la station de Souk Ahras, l'excédent (EXD) commence à partir du mois de Décembre et s'étale jusqu'au mois d'Avril avec un maximum au mois de janvier (95.2 mm), l'épuisement du stock commence au mois de Mai et se termine au mois de Juillet avec un déficit agricole maximum au mois de Juillet (**Fig. 17 et 18**).
- **P = ETR** : les précipitations sont suffisantes pour alimenter le sol, les réserves facilement utilisables ne seront pas alimentées.
- **P < ETP** : le sol utilise ses réserves utiles jusqu'au épuisement de celles-ci, on aura donc un déficit agricole (**Da**) tel que : **Da = ETP - P**
- **P > ETP** alors **ETP = ETR**, on aura donc une quantité d'eau qui sera égale à : **P - ETP** qui va alimenter la **RFU** (réserve facilement utilisable) alors il est plein à l'excédent.

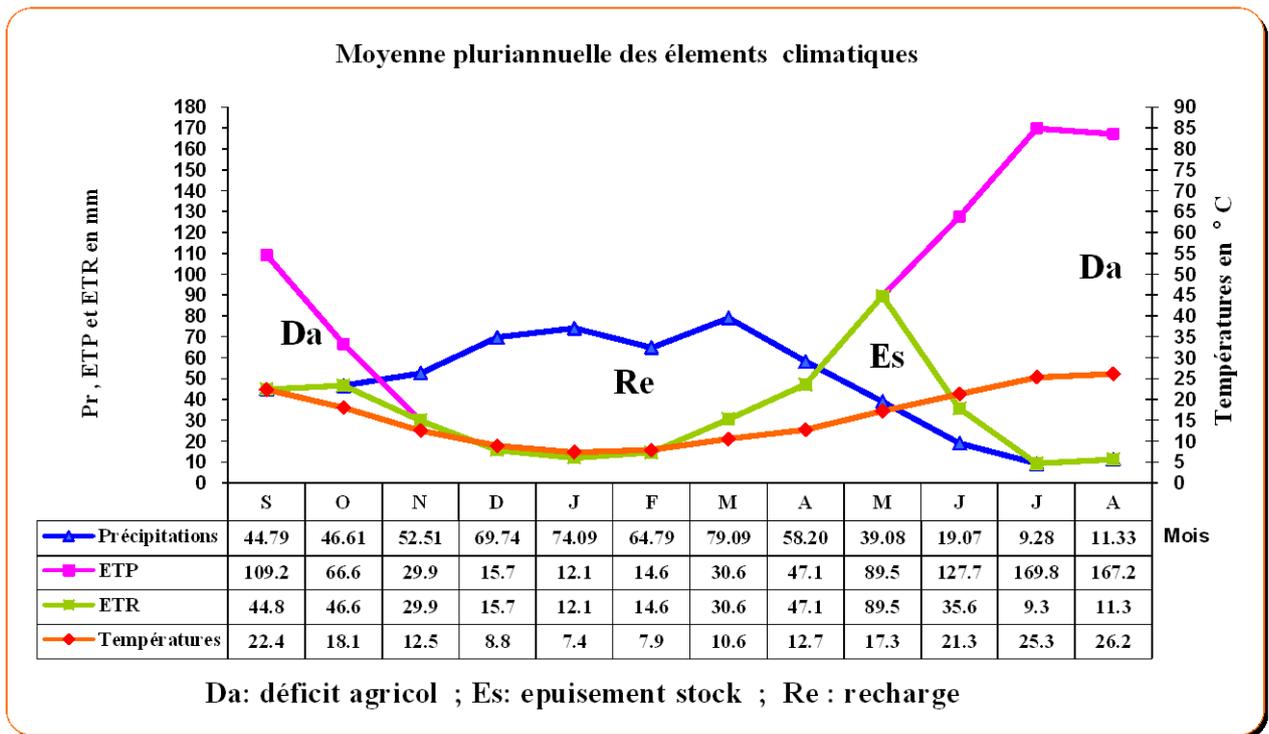


Figure 15: Représentation graphique du bilan de Thornthwaite à la station de Taoura

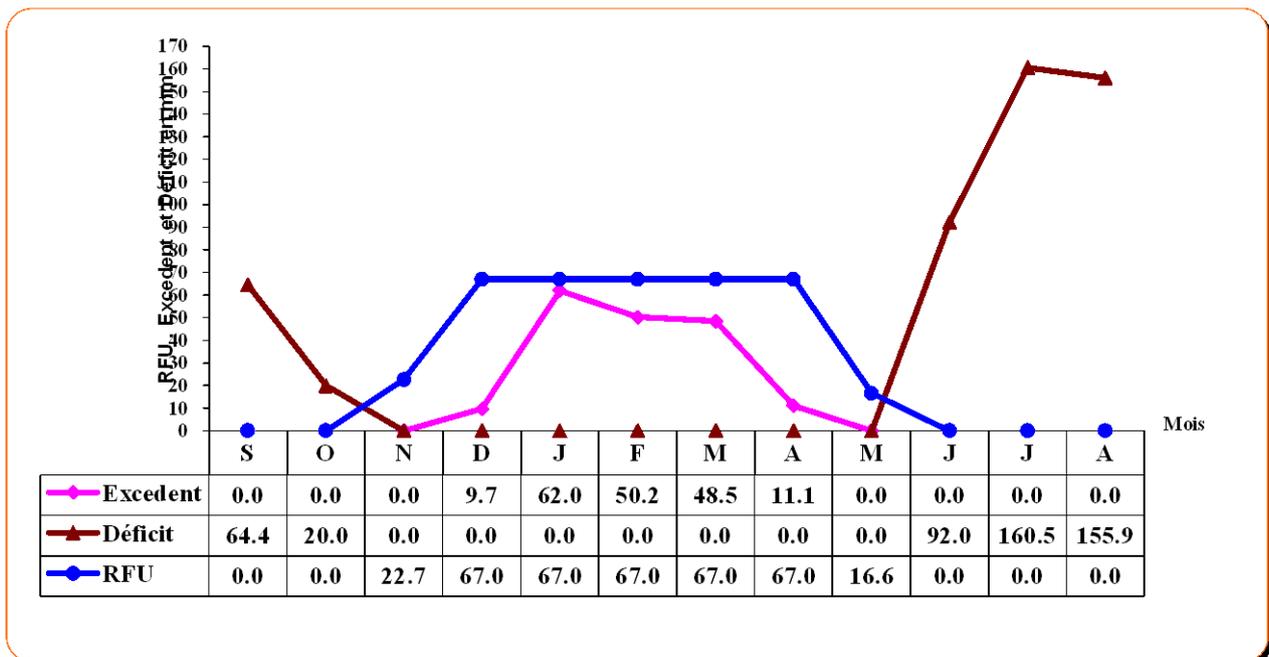


Figure 16: Représentation graphique du bilan hydrologique à la station de Taoura

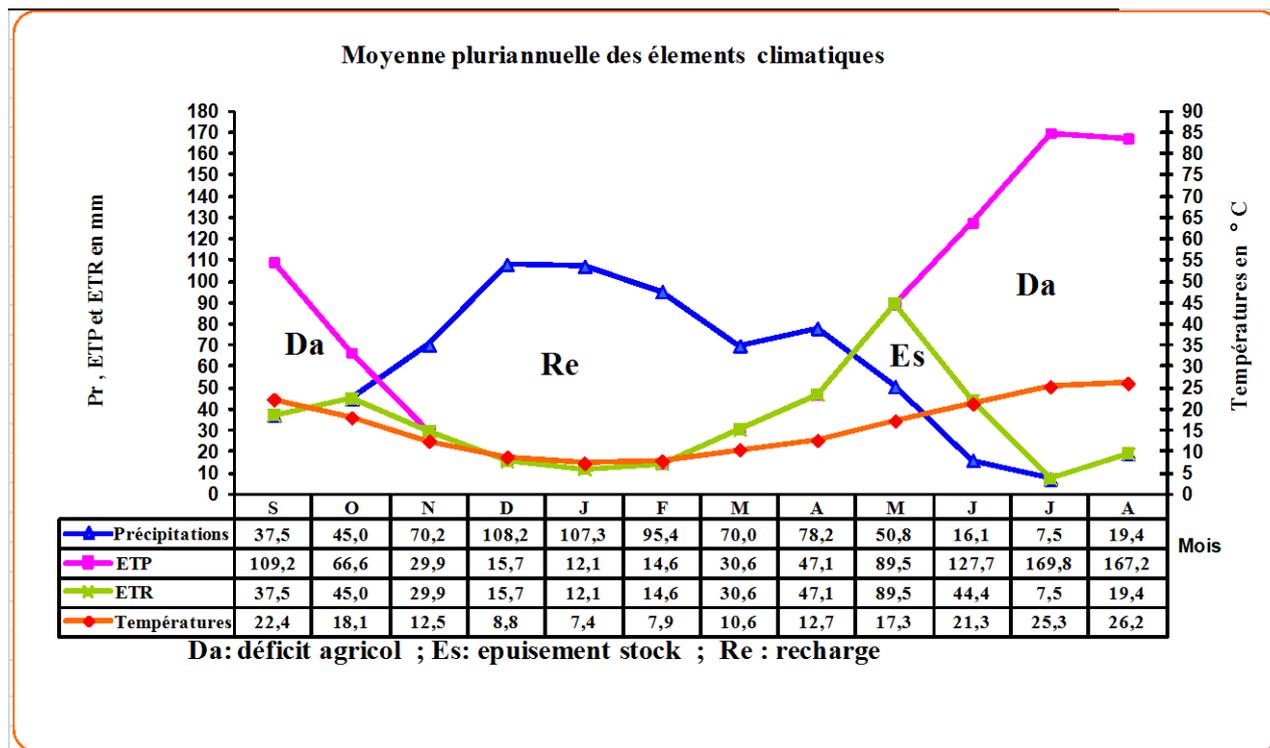


Figure 17: Représentation graphique du bilan de Thornthwaite, Station de Souk Ahras

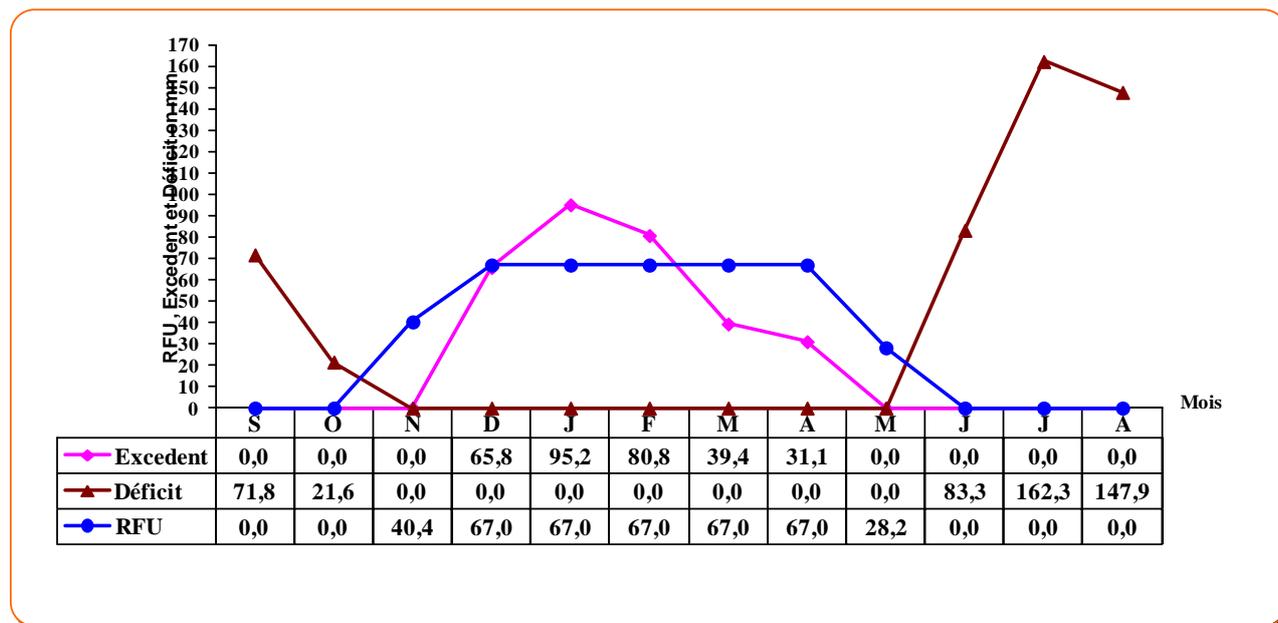


Figure 18: Représentation graphique du bilan hydrologique à la station de Souk Ahras

---

L'établissement des bilans hydrologiques des deux stations montre que la région est définie par deux périodes distinctes :

- Une première déficitaire, où l'alimentation du stock en eau est nulle, cette période s'étend du mois de Mai jusqu'au mois de Novembre, connue par une forte température et une évapotranspiration intense.
- Une deuxième période, représenté par la recharge du stock, allant du mois de Décembre jusqu'au mois d'Avril, connue par une forte pluviométrie et une faible température.

## 6. Conclusion :

- ✚ La région d'étude appartient à un milieu limite du climat tempéré au Nord et un climat semi-aride au sud. Il est caractérisé par deux saisons distinctes, une humide qui s'étale du mois de Novembre jusqu'au mois d'Avril et une autre sèche allant du mois de Mai au mois de Septembre.
- ✚ Ce climat est influencé par :
  - Une précipitation moyenne annuelle de 568.6 mm/an (pour la station de Taoura).
  - Une précipitation moyenne annuelle de 705.4 mm/an (pour la station de Souk Ahras).
  - Une température moyenne annuelle de 15.9 °C.
- ✚ L'estimation du bilan hydrique a montré qu'à partir du mois de Décembre, l'apport considérable de la pluie, la chute de la température et la diminution de l'évapotranspiration permettent la recharge du sol, mais un déficit agricole enregistré à partir du mois de Juin jusqu'au mois d'Octobre.
- ✚ Une R.F.U (réserve facilement utilisable) de 67 mm.
  - Une évapotranspiration potentielle (ETP) de 876.5 mm/an
  - Une évapotranspiration réelle (ETR) de 387.1 mm/an à Taoura et de 393.1 à la station de Souk Ahras.

---

# *Chapitre IV*

## *Hydrogéologie*

---

## 1. Introduction

L'étude hydrogéologique permet la compréhension des processus d'alimentation des aquifères, la circulation des eaux souterraines ainsi que le sens d'écoulement et la variation du gradient hydraulique. Elle a pour objectif de déterminer le mode de gisement et de répertorier les différentes nappes de la zone d'étude.

## 2. Aperçu sur les aquifères de Sidi Fredj

### 2.1. Notion d'aquifère

L'aquifère est une structure géologique perméable contenant de l'eau, comme par exemple, des alluvions de rivière, des granites fissurés, un plateau calcaire, etc.... Issue de l'infiltration, l'eau contenue dans un aquifère circule dans le sous-sol et nourrit une ou plusieurs sources, où se déverse de façon occulte dans un milieu récepteur, mer, lac, cours d'eau ou autre aquifère. Un aquifère est caractérisé par sa géométrie, sa superficie et sa profondeur et par les caractéristiques intrinsèques de la roche dont il est formé, la lithologie, la porosité, la perméabilité, la fracturation, l'homogénéité, etc.... (J. MUDRY 2004).

### 2.2. Nappe superficielle libre du Mio-Plio-Quaternaire

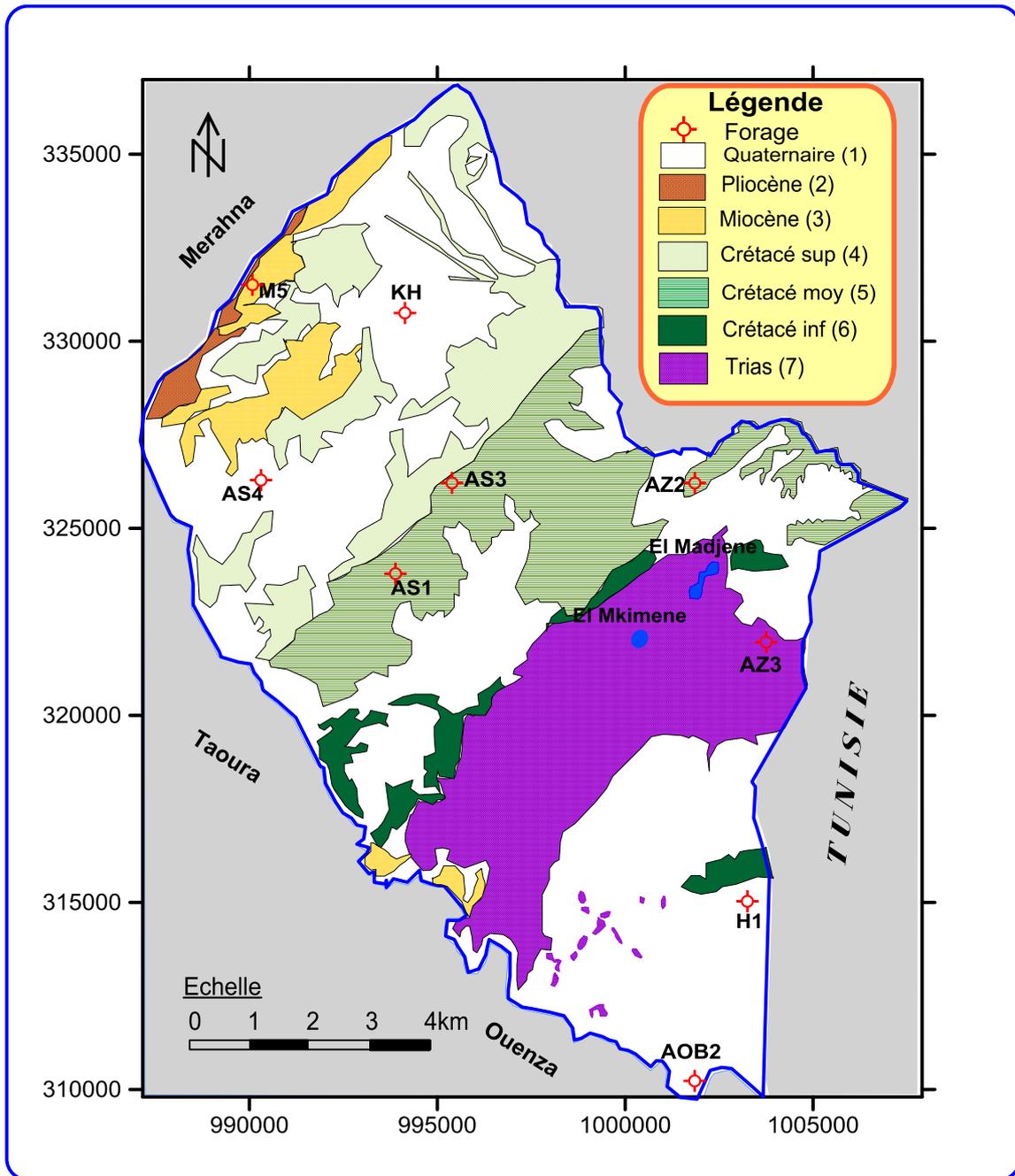
Les eaux sont contenues dans les grès et conglomérats ayant de bonnes propriétés filtrantes. Ils sont déchargés grâce aux sources avec des débits de 0.2 à 1.5 l/s suivant les surfaces de contact avec les masses argileuses et marneuses sous-jacentes (H. Djaba, 2010). Selon L. Davids (1956) : «Si les sources ne sont pas rares dans les monts de la haute Medjerda, elles disparaissent sur le revers Sud, chaîne ou le climat devient plus rude ».

Elles sont contenues aussi dans les limons sableux, les éboulis de calcaires, les graviers argileux, les marnes et cailloutis avec intercalation de calcaire et de dolomie, leur profondeur varie entre 6 et 32 m.

Cette nappe est connue par sa structure particulière présentant des fissures et des fracturations, elle repose sur un substratum marneux et argilo-calcaire.

### 2.3. Nappe karstique profonde des calcaires du Turonien

Les eaux sont contenues principalement dans les calcaires du Turonien, avec une puissance de 100 m en moyenne. Le Turonien repose sur une importante assise marneuse et son toit constitué par des formations marneuses et argileuses.



**Figure 19 : Géologie de la région et positionnement des forages**

- (1) - Alluvions, galets, graviers, sables et limons
- (2) - Conglomérats, gravelites...
- (3) - Grès, conglomérats, argiles
- (4) - (Aptien, Albien): Alternance de marne et de calcaire
- (5) - Calcaire et marno-calcaire
- (6) - Marne et marno-calcaire
- (7) - Argilo-gypso-gréseux

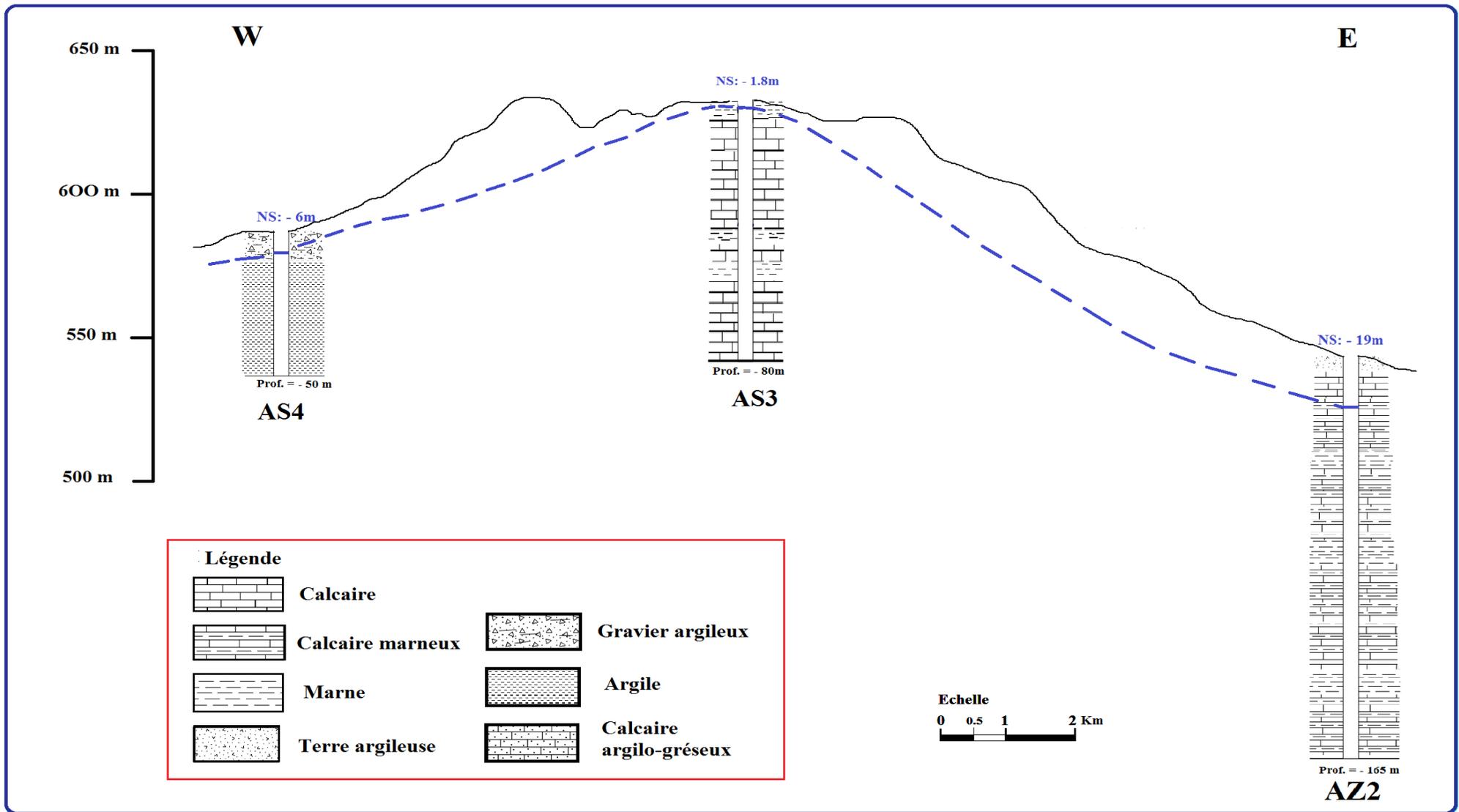


Figure 20: Coupe hydrogéologique (W - E) dans la plaine de Sidi Fredj

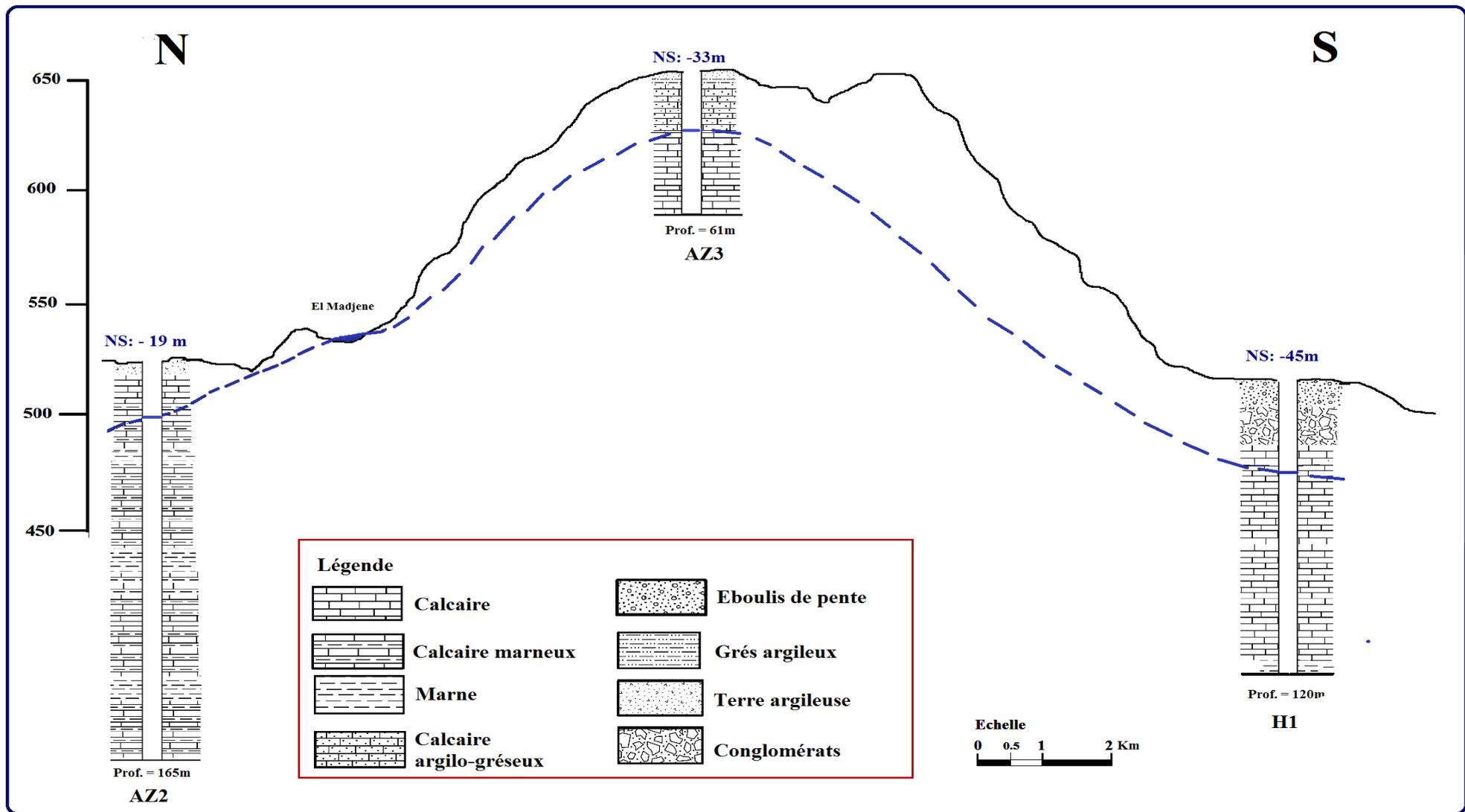


Figure 21: Coupe hydrogéologique (N - S) dans la plaine de Sidi Fredj

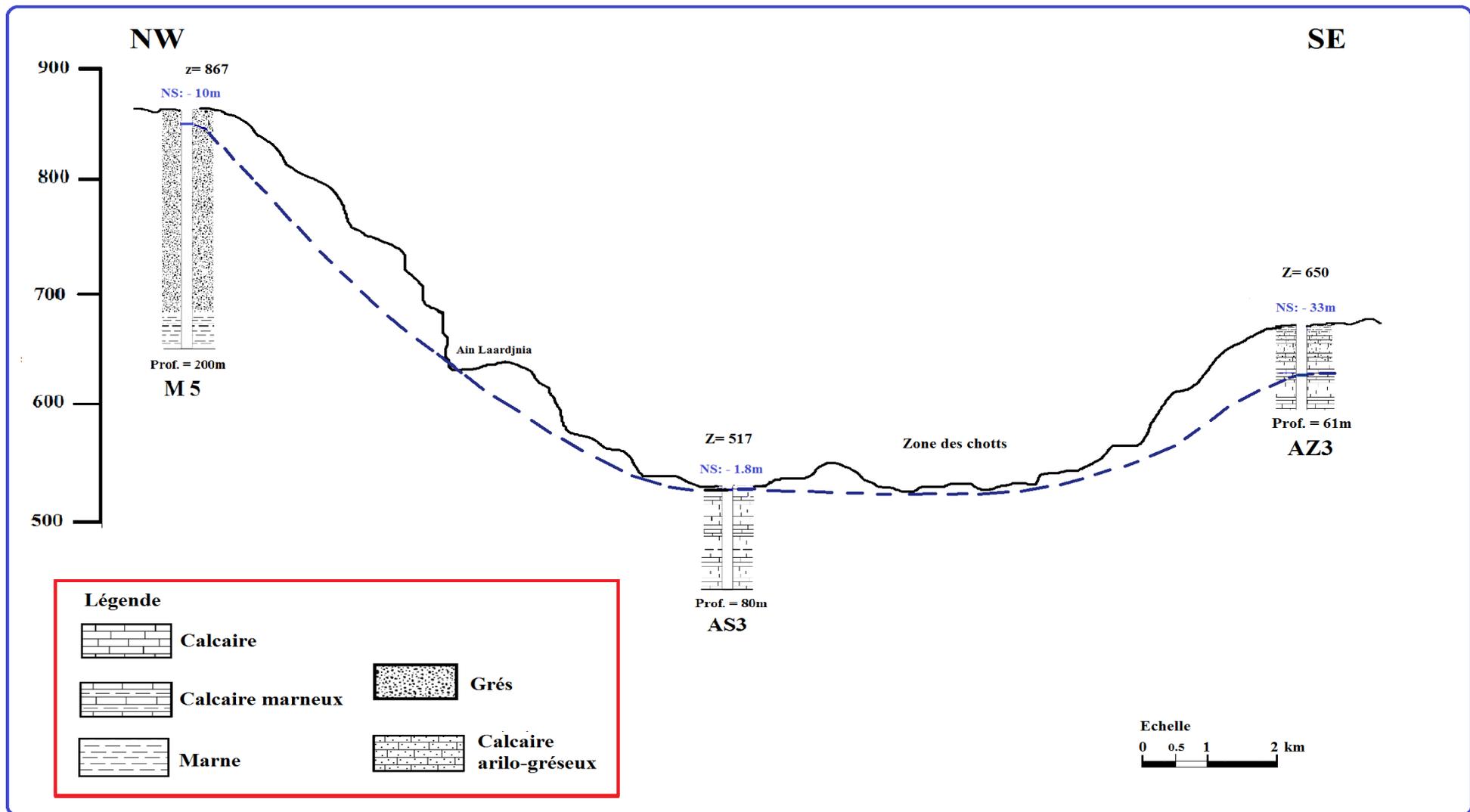


Figure 22: Coupe hydrogéologique (NW - SE) dans la plaine de Sidi Fredj

### 3. Piézométrie :

L'étude piézométrique repose sur un inventaire de 15 points d'eau (10 puits et 5 sources) captant la nappe libre. La plupart des puits datent de la période coloniale et dont certains sont abandonnés à cause de la forte salinité qui les caractérise (Fig. 23).

Deux campagnes piézométriques ont été menées, une pendant la période des hautes eaux (Mars 2014) et l'autre pendant la période des basses eaux (Août 2014). Les mesures ont été réalisées par une sonde piézométrique (marque OTT) de 100 m de longueur avec une double signalisation (sonore et lumineuse).

La cartographie est réalisée à partir des relevés piézométriques par interpolation triangulaire, en utilisant le logiciel Surfer 10 (Golden software, 2012).

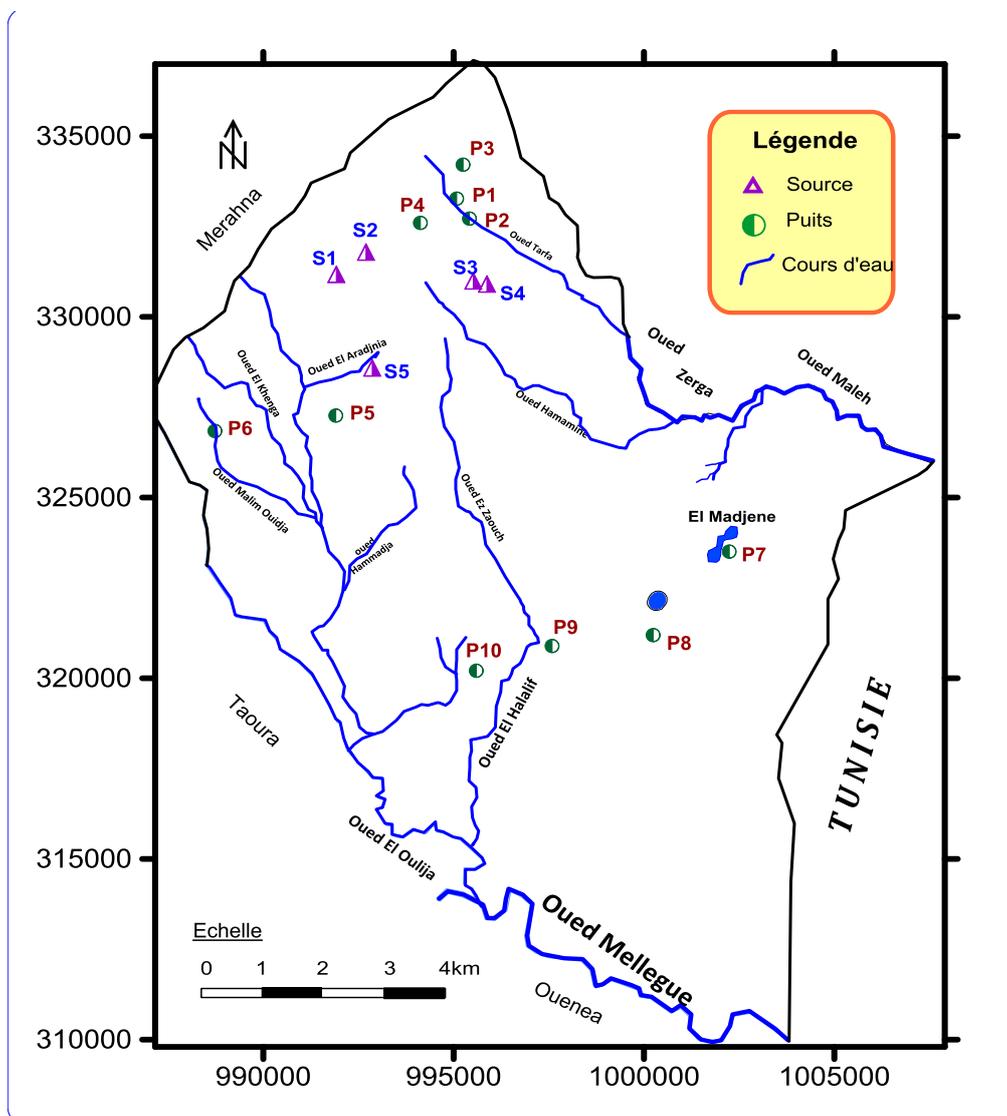


Figure 23: Inventaire des points d'eau dans la zone d'étude

### 3. 1. Interprétation de la carte piézométrique des hautes eaux (Mars 2014):

L'observation de la morphologie de la carte piézométrique des hautes eaux (Mars 2014) de la nappe superficielle (libre), permet de constater que l'écoulement souterrain se fait en général suivant deux directions distinctes : du Nord vers le Sud et du NW vers le S-E (**Fig. 24**). Cette direction coïncide avec la topographie de la région et le sens d'écoulement des eaux dans les oueds.

Les courbes piézométriques sont serrées dans la partie amont affectée par une pente remarquable, elles deviennent espacées dans la plaine.

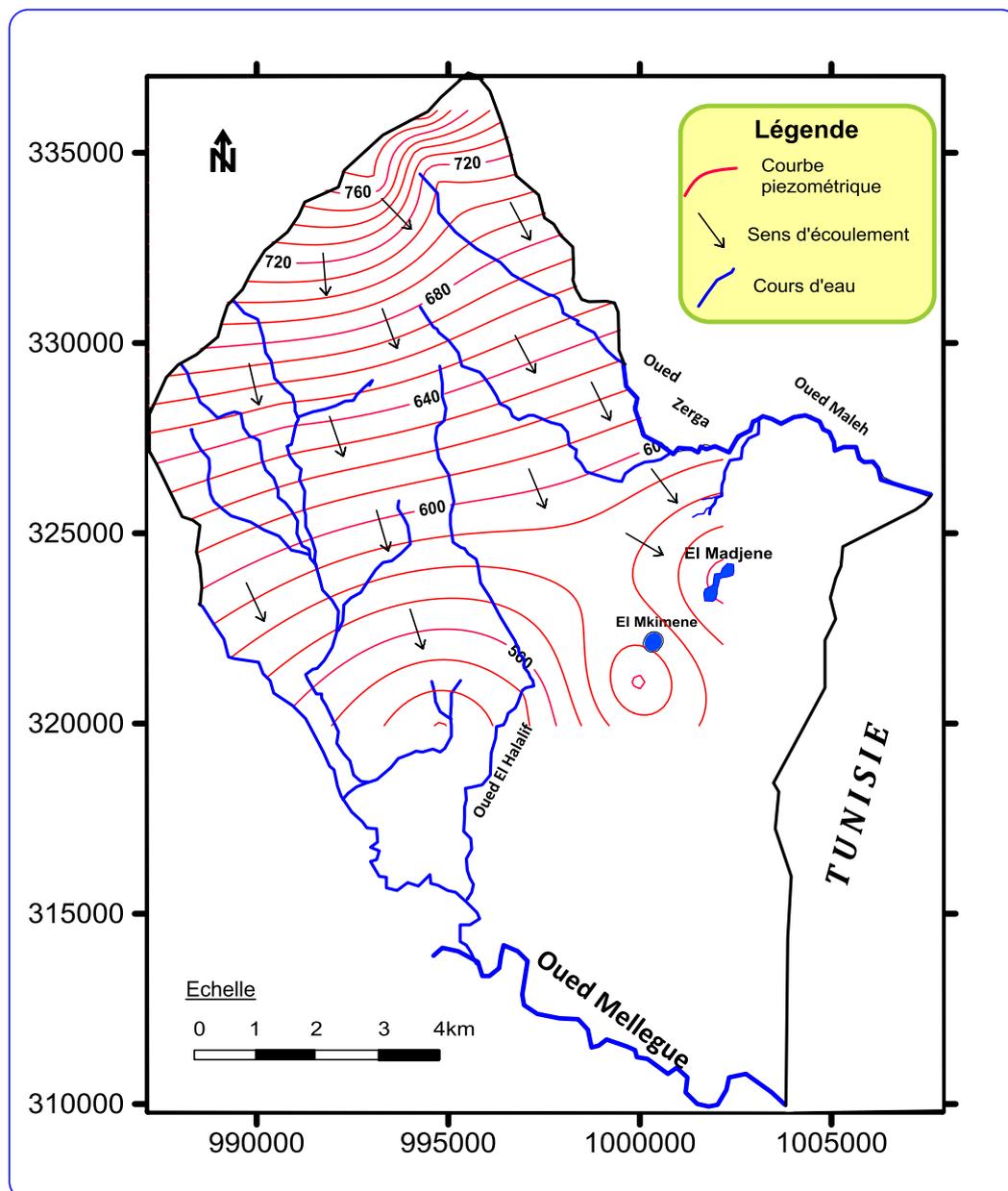


Figure 24 : Carte piézométrique de la nappe libre de Sidi Fredj, hautes eaux (Mars 2014)

### 3. 2. Interprétation de la carte piézométrique des basses eaux (Août 2014) :

L'observation de la morphologie de la carte piézométrique des basses eaux (Août 2014) permet de constater que l'écoulement souterrain se fait en général suivant deux direction : du Nord vers le Sud et du Nord-Ouest vers le Sud-Est (**Fig. 25**) similaire à la période des hautes eaux, avec cependant un rabattement de la nappe entre les deux périodes de l'ordre de 1 à 2 m.

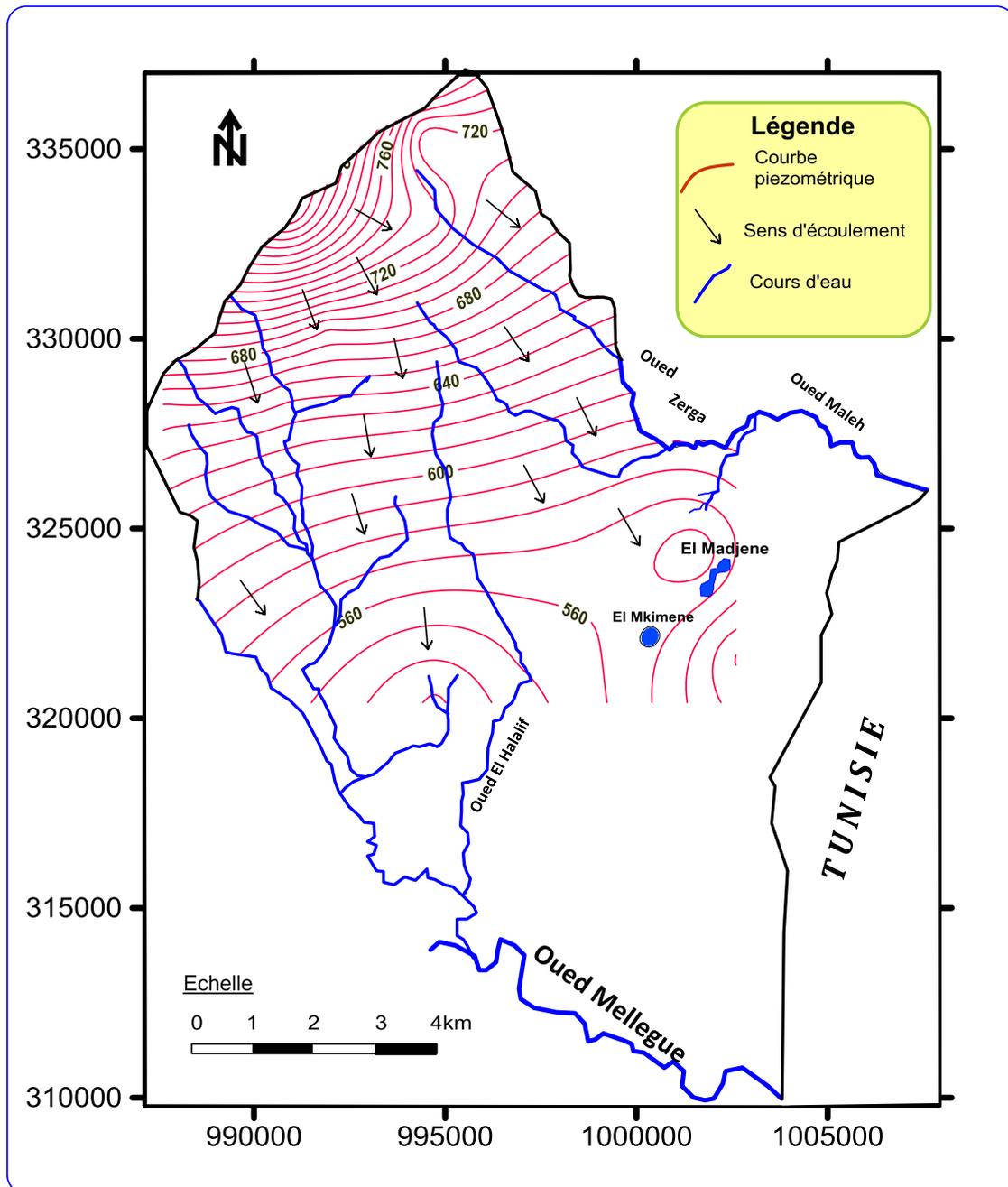


Figure 25 : Carte piézométrique de la nappe libre de Sidi Fredj, basses eaux (Août 2014)

## 4. Potentialités hydriques

### 4. 1. Inventaire des sources

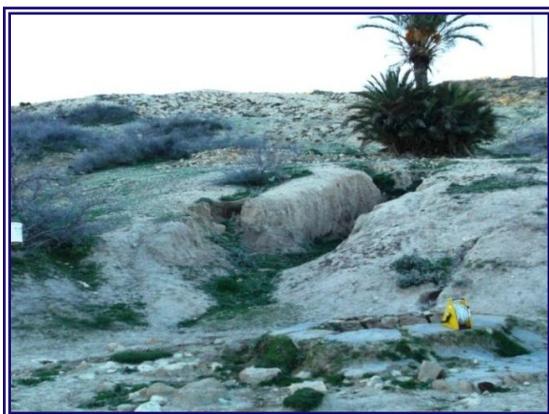
La zone d'étude dénombre 5 sources réparties dans sa partie Nord (**Fig. 23**) caractérisée par des débits allant de 0.1 l/s à 1.5 l/s (**Tab. 19**). Ces sources sont réservées à l'alimentation en eau potable des populations du voisinage.

**Tableau 19: Inventaire des sources dans la commune de Sidi Fredj**

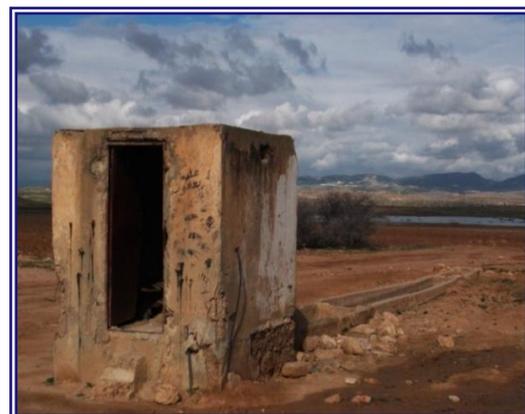
| Nom de la source |    | Coordonnées |         |     | Q<br>l/s | Géologie<br>de la<br>formation | Qualité<br>de l'eau | Destination       |
|------------------|----|-------------|---------|-----|----------|--------------------------------|---------------------|-------------------|
|                  |    | X           | Y       | Z   |          |                                |                     |                   |
| Zaouia           | S1 | 991.861     | 331.176 | 837 | 0.6      | Calcaire                       | Douce               | AEP et<br>Cheptel |
| Mekhenchba       | S2 | 992.654     | 331.789 | 879 | 0.1      | Calcaire                       | Douce               | AEP et<br>Cheptel |
| Oum<br>Touam1    | S3 | 995.515     | 330.995 | 736 | 0.2      | Quaternaire                    | Douce               | AEP et<br>Cheptel |
| Oum<br>Touam2    | S4 | 995.880     | 330.910 | 723 | 0.1      | Quaternaire                    | Douce               | AEP et<br>Cheptel |
| Laaradjnia       | S5 | 992.820     | 328.598 | 682 | 1.5      | Grès<br>Miocène                | Douce               | AEP et<br>Cheptel |

### 4. 2. Inventaire des puits

La région d'étude dispose de 14 puits recensés par la commune. Les mesures ont concerné seulement 10 puits (**Fig.23**) destinés à l'alimentation en eau potable. La plupart des points d'eau n'arrivent pas à satisfaire les besoins des utilisateurs, les rendements étant faibles puisque la majorité ne capte pas la totalité de l'épaisseur saturée de la nappe. Le manque d'entretien de certains puits ou le peu de drainage de ces points d'eau, peuvent expliquer leur faible débit. D'autres, ne sont plus en exploitation vu leur salinité élevée, c'est le cas des puits P7, P8, P9, et P10.



**Figure 26: Bir Nekhla (P6)**



**Figure 27: Bir El Madjene (P7)**

**Tableau 20: Inventaire des puits dans la commune de Sidi Fredj**

| Nom du puits  |     | Coordonnées |         |     |
|---------------|-----|-------------|---------|-----|
|               |     | X           | Y       | Z   |
| Bouhouia 1    | P1  | 995.071     | 333.257 | 740 |
| Bouhouia 2    | P2  | 995.412     | 332.708 | 713 |
| Brinis        | P3  | 995.242     | 334.192 | 797 |
| Bir El Merdja | P4  | 994.103     | 332.590 | 771 |
| Oued Maiza    | P5  | 991.846     | 327.281 | 660 |
| Bir Nekhla    | P6  | 988.621     | 326.858 | 656 |
| El Madjène    | P7  | 1002.346    | 323.534 | 562 |
| Boussiod      | P8  | 1000.315    | 321.234 | 611 |
| Sidi Fredj    | P9  | 997.618     | 320.934 | 556 |
| El M'daouer   | P10 | 995.595     | 320.252 | 537 |

### 4. 3. Inventaire des forages

La zone d'étude totalise neuf (09) forages actuellement en service (**Tab. 21**), ils captent les formations du Mio-Pliocène et les calcaires du Turonien. Deux (02) forages sont équipés pour alimenter une station de déminéralisation à l'osmose inverse, il s'agit des forages (AOB2 et AZ2) dont le taux de salinité est élevé (de l'ordre de 3 à 6 g/L). Cette station de déminéralisation des eaux des ces deux forages fait l'objet de la présente étude.

**Tableau 21: Inventaire des forages implantés dans la commune de Sidi Fredj**

| Nom du forage | Coordonnées     |                |            | Q l/s    | Date de mise en Service | Prof. en m | Géologie de la formation |
|---------------|-----------------|----------------|------------|----------|-------------------------|------------|--------------------------|
|               | X               | Y              | Z          |          |                         |            |                          |
| <b>AS1</b>    | 993.900         | 323.800        | 615        | 5        | 1993                    | 100        | Calcaire du Turonien     |
| <b>AS3</b>    | 995.400         | 326.250        | 630        | 5        | 1997                    | 80         | Calcaire du Turonien     |
| <b>H1</b>     | 1003.250        | 314.950        | 516        | 22       | 2000                    | 120        | Calcaire du Turonien     |
| <b>AS4</b>    | 990.325         | 326.325        | 584        | 5        | 2004                    | 50         | Calcaire Plio-Quater     |
| <b>AZ3</b>    | 1003.750        | 321.950        | 650        | 6        | 2001                    | 61         | Calcaire Aptien          |
| <b>AZ2</b>    | <b>1001.853</b> | <b>326.248</b> | <b>535</b> | <b>6</b> | <b>1992</b>             | <b>175</b> | <b>Calcaire du</b>       |
| <b>AOB2</b>   | <b>1001.850</b> | <b>310.100</b> | <b>434</b> | <b>8</b> | <b>1990</b>             | <b>150</b> | <b>Calcaire du</b>       |
| <b>M5</b>     | 990.100         | 331.600        | 867        | 3.5      | 1981                    | 200        | Grès du miocène inf.     |
| <b>KH</b>     | 994.150         | 330.840        | 760        | 3        | 2004                    | 60         | Calcaire Plio-           |

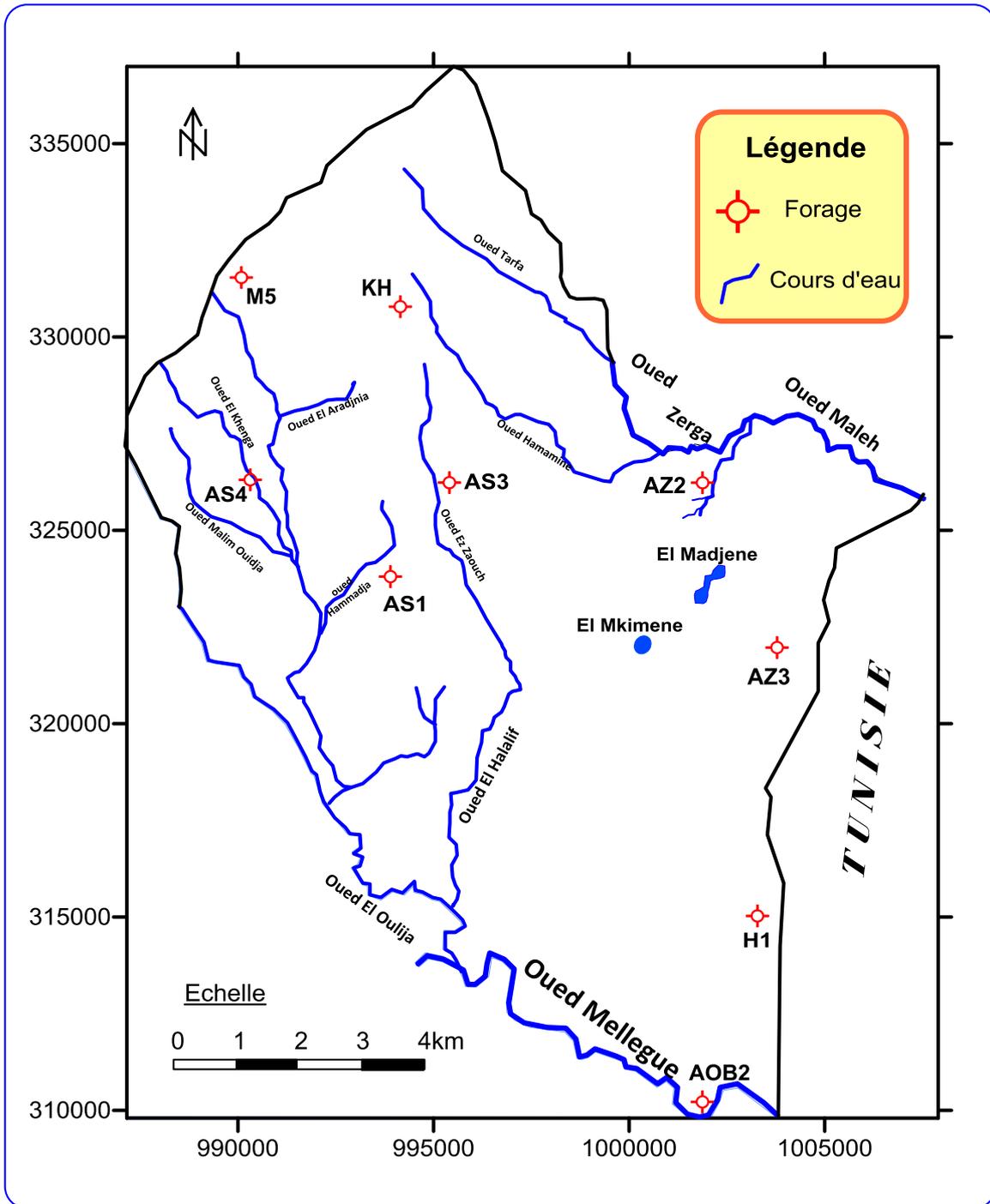


Figure 28 : Situation des forages dans la zone d'étude

#### 4. 4. Barrage

La zone d'étude dispose d'un petit barrage sur l'Oued Tarfa, mis en service depuis 1996, puis réhabilité en 2003 et aujourd'hui abandonné suite à son envasement à 80 % (Fig. 29). Ce petit barrage d'après la fiche élaborée par la PMH de la wilaya de Souk Ahras en date du 20/12/2012 porte les caractéristiques suivantes:

1. Caractéristiques du bassin versant de la retenue
  1. Superficie : 30.10 Km<sup>2</sup>
  2. Apport moyen annuel : 2,30 Hm<sup>3</sup>.
  3. Couverture végétale : moyenne
2. Caractéristiques de la digue
  1. Type de digue: Terre Homogène.
  2. Hauteur de la digue : 20 m.
  3. Type de l'évacuateur de crue : à surface libre.
3. Caractéristiques de la retenue
  1. Capacité : 2,00 Hm<sup>3</sup>.
  2. Volume utile : 1,50 Hm<sup>3</sup>.S
  3. Volume régularisé : 1,50 Hm<sup>3</sup>
4. Données de réalisation
  1. Utilisation actuelle de la retenue: destinée pour l'irrigation.
  2. Superficie irriguée : 30 ha d'arboriculture



**Figure 29: Barrage envasé de l'Oued Tarfa**

---

#### 4. 5. Zone des chotts

Notre terrain d'étude est caractérisé par une zone des chotts, elle se trouve dans sa partie Est près de la frontière Algéro-Tunisienne. C'est une plaine de formations triasiques (argilo-gypseuses), portant les noms d'El Madjène et d'El Mkimène (**Fig. 30 et 31**).



**Figure 30: Chott El Mkimène**



**Figure 31: Chott El Madjène**

---

#### 4. 6. Réseau Hydrographique

La Zone d'étude possède un réseau Hydrographique (**Fig. 28**) caractérisée par l'absence de cours d'eau permanent, elle est limitée au Sud par l'Oued Mellègue et ses affluents qui coulent seulement en période de pluies et demeurent sec en surface. A l'Est, elle est traversée par des petits Oueds tels que l'Oued Zerga et El Maleh qui coulent vers la Tunisie.

D'une manière générale, l'hydrographie de la commune de Sidi Fredj est conditionnée essentiellement par une pluviométrie qui est très faible et se distingue comme suit :

-au Nord de la commune, le relief favorable et les écoulements de surface sont suffisants pour collecter l'eau de pluie qui permet d'alimenter les mares et le barrage de Sidi Fredj;

-au Sud sur les hauts plateaux, les écoulements superficiels des précipitations se concentrent dans des bassins peu profonds (poêles) où ils s'évaporent et causent l'accumulation de sel.

#### 5. Conclusion

La zone d'étude est caractérisée par deux types de nappes : La première superficielle (libre) du Mio-Plio-Quaternaire, d'où on dénombre cinq sources pérennes et une quinzaine de puits, cette nappe se localise principalement à la moitié Nord de la zone d'étude. La deuxième profonde, karstique dans les calcaires du Turonien, captée par six forages d'une profondeur allant jusqu'à 175 m. Deux forages sont équipés pour alimenter une station de déminéralisation à l'osmose inverse afin de réduire leurs teneurs élevées en salinité, il s'agit donc des forages AOB2 et AZ2.

La Zone d'étude possède un réseau Hydrographique caractérisée par l'absence de cours d'eau permanent, limitée au Sud par l'Oued Mellègue et à l'Est par l'Oued El Maleh qui coulent tous les deux vers la Tunisie. Il faut remarquer aussi la présence des zones humides des chotts d'El Madjène et d'El Mkimène).

Les cartes piézométriques réalisées en période des hautes et des basses eaux montrent un écoulement qui se fait en général suivant deux directions : du Nord vers le Sud et du Nord-Ouest vers le Sud-Est coïncidant avec la topographie de la zone d'étude.

---

# *Chapitre V*

## *Hydrochimie*

---

## 1. Introduction

La composition chimique d'une eau joue un rôle important dans la détermination de sa qualité, donc la possibilité de son utilisation pour l'alimentation en eau potable ou d'autres usages (irrigation, industrie...etc.).

Dans l'objectif de connaître l'hydrochimie de la zone d'étude, il a été adapté un plan de travail qui consiste à prélever des échantillons d'eau à partir des puits et des sources captant la nappe superficielle localisée dans la moitié Nord de la région d'étude, ont fait l'objet d'analyses in situ et des prélèvements d'échantillons de quelques forages implantés et exploités dans la dite zone captant la nappe des calcaires et se trouvant dans sa moitié Sud.

## 2. Méthodologie

### 2.1. Echantillonnages

Les exigences de la méthode d'échantillonnage permettent d'avoir une analyse représentative, la méthodologie suivie lors des prélèvements a été selon les critères suivants:

- Types des échantillons prélevés (eaux souterraines ou eaux de surface).
- Périodes d'échantillonnage (hautes eaux et basses eaux).
- Lieux d'échantillonnage (puits, sources, forages, cours d'eau...).
- Paramètres analysés sur terrain.
- Paramètres analysés au laboratoire

### 2.2. Type d'échantillons prélevés

Afin de connaître les paramètres chimiques des eaux de la zone d'étude et de suivre leurs évolutions dans le temps et dans l'espace, des prélèvements ont été effectués sur des puits, des sources, des cours d'eaux et des forages captant les aquifères de la région.

### 2.3. La période d'échantillonnage

Nous nous sommes surtout intéressés aux ressources souterraines qui constituent la principale ressource en eau de cette région. Afin d'étudier et de suivre la variation spatio-temporelle des paramètres physico-chimiques des eaux de la zone d'étude, deux campagnes de prélèvements ont été effectuées sur 13 points d'eau (10 puits et 3 sources) :

- La première durant la période des hautes eaux (Mars 2014).
- La deuxième durant la période des basses eaux (Août 2014).

---

## 2. 4. Lieux d'échantillonnage

Les points de prélèvements sélectionnés concernent la plupart des ressources en eau de la zone d'étude, leur répartition n'est cependant pas homogène et des terrains situés au Sud et au Sud-Est de la région ne dispose pas de point d'eau pour être échantillonnés.

## 3. Moyens et méthodes d'analyse

### 3. 1. Mesures *in situ*

Selon les normes AFNOR (1997 et 2004) et ISO, cinq paramètres physico-chimiques : la température (T), le potentiel hydrogène (pH), le potentiel redox (Eh), la conductivité électrique (CE) et l'oxygène dissous (OD) ont été mesurés *in situ*, à l'aide d'une valise multi-paramètres de terrain de marque Multi340i (WTW).

### 3. 2. Analyses au laboratoire

L'analyse des éléments chimiques s'est limitée aux ions majeurs ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  et  $\text{HCO}_3^-$ ). Les analyses ont été réalisées selon les normes algériennes au laboratoire d'Arcelor Mittal Annaba et celui du contrôle de la qualité (Eurl Fethalah) à Tébessa.

#### 3. 2. 1. Fiabilité des analyses

Le calcul de la balance ionique (BI) permet le calcul de l'erreur, selon la formule :

$$\text{BI} = (\Sigma\text{c} - \Sigma\text{a}/\Sigma\text{c}+\Sigma\text{a}) * 100 \quad [6]$$

Pour une erreur < ou égal à 06 %, nous déduisons que l'analyse est bonne.

## 4. Résultats des mesures et des analyses chimiques de l'eau

### 4. 1. Les paramètres physico-chimiques (mesures *in situ*)

Il s'agit des paramètres facilement mesurables et utiles pour la détermination de la qualité des eaux de la nappe superficielle.

#### 4. 1. 1. Température (T):

Elle joue un rôle important dans l'augmentation de l'activité chimique, bactérienne et de l'évaporation des eaux. Elle varie en fonction de la température extérieure (l'air), des saisons, de la lithologie géologique et de la profondeur de l'ouvrage par rapport à la surface du sol. Les valeurs de la température observées sont résumées dans le **tableau 22**.

**Tableau 22: Variation de la température en °C des eaux (2014)**

| Paramètres                 |            | Nappe libre                              |  |
|----------------------------|------------|--|--|
|                            |            | Prélèvements Hautes eaux<br>(Mars 21014) | Prélèvements Basses eaux<br>(Aout 21014) |
| Paramètres<br>statistiques | Max        | 19                                       | 20,5                                     |
|                            | Moy        | 15,4                                     | 19,6                                     |
|                            | Min        | 9,8                                      | 19                                       |
|                            | Ecart type | 2,5                                      | 0,5                                      |
| Norme                      |            | 25                                       |  |

Le tableau montre que la température dans les hautes eaux oscille entre 9,8 °c et 19 °c, et 19 °c et 20,5 °c en basses eaux, ces valeurs sont inférieures à la norme de potabilité des eaux sur l'ensemble des points d'eau captant la nappe libre. Ces variations sont liées au rythme thermique saisonnier.

#### 4. 1. 2. Conductivité électrique (CE) :

Elle est liée à la présence des espèces ioniques en solution. Les valeurs mesurées ont été corrigées par rapport à une température standard de 25°C. Les résultats obtenus sont résumés dans le **tableau 23**.

**Tableau 23: Variation de la conductivité électrique en µS/cm des eaux (2014)**

| Paramètres                 |            | Nappe libre                              |  |
|----------------------------|------------|--|--|
|                            |            | Prélèvements Hautes eaux<br>(Mars 21014) | Prélèvements Basses eaux<br>(Aout 21014) |
| Paramètres<br>statistiques | Max        | 5310                                     | 5600                                     |
|                            | Moy        | 2463                                     | 2653                                     |
|                            | Min        | 1248                                     | 1265                                     |
|                            | Ecart type | 1341                                     | 1438                                     |
| Norme                      |            | < 400                                    |  |

Les valeurs disponibles présentent des variations assez importantes et oscillent entre **1248** et **5310** µs/cm en hautes eaux, et de **1265** et **5600** µs/cm en basses eaux. Les conductivités les plus élevées sont marquées à la fin des périodes d'été.

Les plus faibles sont enregistrées, pendant la période des hautes-eaux. Ce phénomène peut s'expliquer par le fait que les apports pluvieux de l'hiver provoquent une dilution de l'eau existante. Cependant, les eaux de Sidi Fredj peuvent présenter une minéralisation moyenne, moyennement élevée et très élevées dans les échantillons prélevés dans les eaux de la nappe superficielle (**Tab. 24**).

**Tableau 24: Classification de degré de minéralisation à partir de la conductivité électrique**

| Conductivité électrique<br>( $\mu\text{S/cm}$ ) | Degré de minéralisation | Nappe libre            |                             |
|---|-------------------------|------------------------|-----------------------------|
|   |                         | Hautes eaux 2014       | Basses eaux 2014            |
| <450  | Très faible             | /                      | /                           |
| 450-750   | Faible                  | /                      | /                           |
| 750-1500  | Moyen                   | S1 - S5 - S3 - P5      | S1 - P5                     |
| 1500-2300                                       | Moyennement élevé       | P1 - P2 - P3 - P4 - P6 | P2 - P3 - P4 - P6 - S3 - S5 |
| 2300-3000                                       | Elevée                  | /                      | P1                          |
| > 3000  | Très élevée             | P7 - P8 - P9 - P10     | P7 - P8 - P9 - P10          |

#### 4. 1. 3. Potentiel d'Hydrogène (pH) :

C'est un paramètre qui détermine l'acidité ou l'alcalinité d'une eau ainsi que l'état d'équilibre des éléments chimiques. La majorité des échantillons présentent un pH variant entre 6.95 et 7.6 (**Tab. 25**).

Ce tableau montre que tous les points d'eau se trouvent dans l'intervalle de la norme de potabilité avec des valeurs très proches entre elles.

**Tableau 25: Variation du pH des eaux des deux campagnes (2014)**

| Paramètres              |            | Nappe libre                              |  |
|-------------------------|------------|--|--|
|                         |            | Prélèvements Hautes eaux<br>(Mars 21014) | Prélèvements Basses eaux<br>(Aout 21014) |
| Paramètres statistiques | Max        | 7,6                                      | 7,6                                      |
|                         | Moy        | 7,3                                      | 7,2                                      |
|                         | Min        | 6,95                                     | 6,8                                      |
|                         | Ecart type | 0,22                                     | 0,27                                     |
| Norme                   |            | 6,5 < pH < 8,5                           |  |

#### 4. 1. 4. L'oxygène dissous (OD)

Etant l'un des plus importants indicateurs sur le degré de la pollution des eaux, l'oxygène dissous mesure la concentration du dioxygène dissous dans l'eau et il est exprimé en mg/l ou en pourcentage de saturation. Il participe à la majorité des processus chimiques et biologiques en milieu aquatique.

Les teneurs en OD (**Tab. 26**) variant de 0,9 à 5,2 mg/l en périodes des hautes eaux, et de 0,4 à 0,8 mg/l en périodes des basses eaux, c'est principalement à cause des apports météoriques (pluies), les valeurs les plus élevés sont enregistrés au Nord, dans les terrains présentant une bonne infiltration.

**Tableau 26 : Variation de l'O<sub>2</sub> dissous des eaux des 2 campagnes (2014)**

| Paramètres                 |            | Nappe libre                              |   |
|----------------------------|------------|--|---|
|                            |            | Prélèvements Hautes eaux<br>(Mars 21014) | Prélèvements Basses eaux<br>(Aout 2014) |
| Paramètres<br>statistiques | Max        | 5,2                                      | 0,8                                     |
|                            | Moy        | 2,7                                      | 0,6                                     |
|                            | Min        | 0,9                                      | 0,4                                     |
|                            | Ecart type | 1,5                                      | 0,1                                     |

#### 4. 1. 5. Potentiel d'oxydoréduction (Eh) :

Ce paramètre permet de prévoir l'état des ions chimiques dans l'eau et la direction des réactions chimiques (oxydation ou réduction). Les résultats des mesures *in situ* sont présentés dans le **tableau 27**.

**Tableau 27: Variation de l'Eh des eaux des 2 campagnes (2014)**

| Paramètres                 |            | Nappe libre                              |  |
|----------------------------|------------|--|--|
|                            |            | Prélèvements Hautes eaux<br>(Mars 21014) | Prélèvements Basses eaux<br>(Aout 21014) |
| Paramètres<br>statistiques | Max        | - 6                                      | 20                                       |
|                            | Moy        | - 26,5                                   | - 5,9                                    |
|                            | Min        | - 42                                     | - 40                                     |
|                            | Ecart type | 10,3                                     | 16                                       |

Les valeurs du Eh diminuent du Nord vers le Sud et deviennent très faible au niveau des puits (P7, P8, P9 et P10).

## 5. Caractéristiques chimiques des eaux souterraines

### 5.1. Nappe superficielle

#### 5.1.1. Faciès chimique

La représentation des analyses chimiques par la méthode triangulaire de **Piper** et par la formule ionique détermine les faciès chimiques des eaux des différents prélèvements effectués, ils sont résumés dans le **tableau 28**. On peut noter la prédominance du faciès Bicarbonaté calcique.

#### 5.1.2. Formule ionique

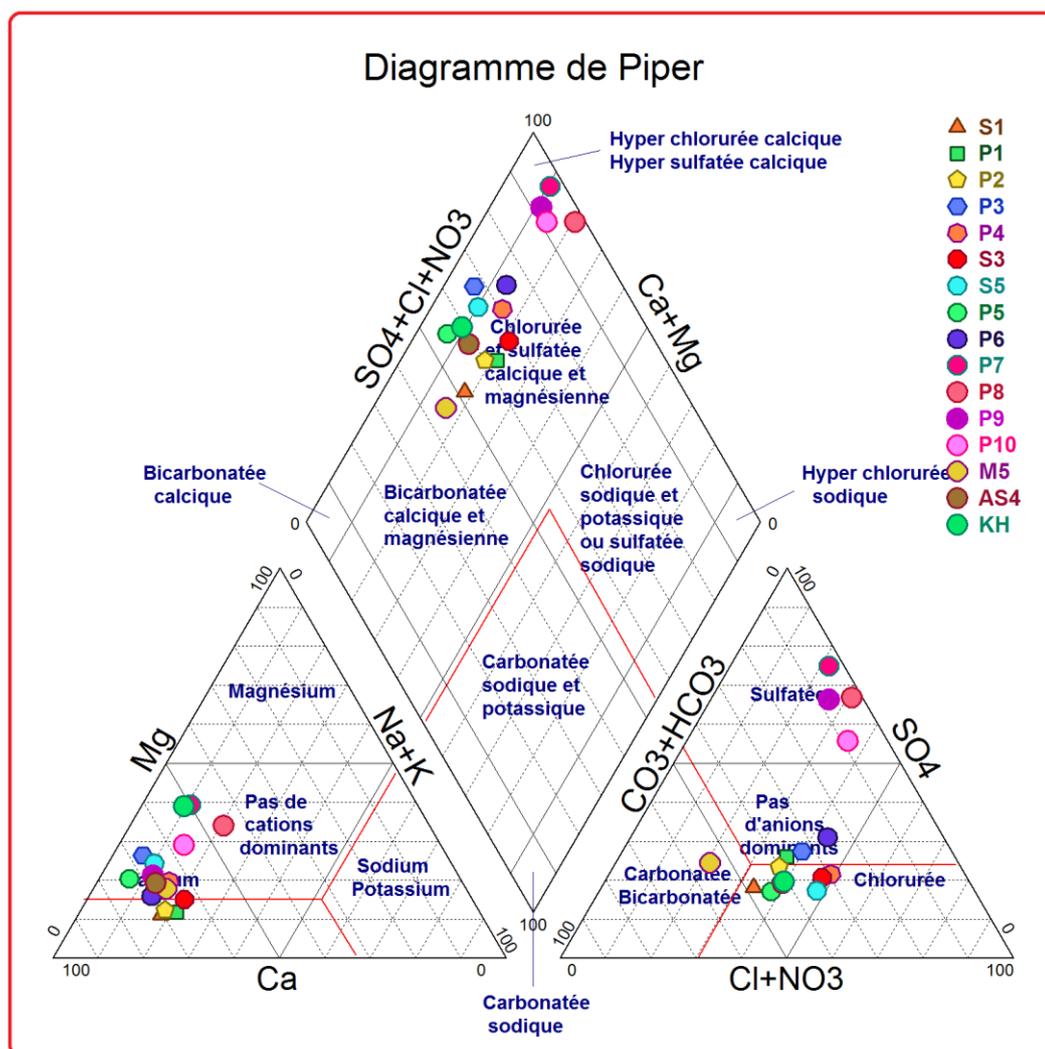
Cette formule à pour but de classer par ordre décroissant les quantités en réaction en (méq/l) des groupes anion et cation. Elle permet de définir les caractéristiques physico-chimiques des eaux de l'aquifère en relation avec sa lithologie et de classer les eaux de même origine (**Tab. 28**).

**Tableau 28: Détermination du faciès chimique des eaux (2014) par la formule ionique**

| Points d'eau | Formule ionique  | Faciès chimique      |
|--------------|--|----------------------|
| S1           | $r\text{HCO}_3^-$ , $r\text{Cl}^-$ , $r\text{SO}_4^{2-}$ $r\text{Ca}^{2+}$ , $r(\text{Na}^+ + \text{k}^+)$ , $r\text{Mg}^{2+}$ | Bicarbonaté calcique |
| P1           | $r\text{HCO}_3^-$ , $r\text{Cl}^-$ , $r\text{SO}_4^{2-}$ $r\text{Ca}^{2+}$ , $r(\text{Na}^+ + \text{k}^+)$ , $r\text{Mg}^{2+}$ | Bicarbonaté calcique |
| P2           | $r\text{HCO}_3^-$ , $r\text{Cl}^-$ , $r\text{SO}_4^{2-}$ $r\text{Ca}^{2+}$ , $r(\text{Na}^+ + \text{k}^+)$ , $r\text{Mg}^{2+}$ | Bicarbonaté calcique |
| P3           | $r\text{Cl}^-$ , $r\text{HCO}_3^-$ , $r\text{SO}_4^{2-}$ $r\text{Ca}^{2+}$ , $r\text{Mg}^{2+}$ , $r(\text{Na}^+ + \text{k}^+)$ | Chloruré calcique    |
| P4           | $r\text{Cl}^-$ , $r\text{HCO}_3^-$ , $r\text{SO}_4^{2-}$ $r\text{Ca}^{2+}$ , $r\text{Mg}^{2+}$ , $r(\text{Na}^+ + \text{k}^+)$ | Chloruré calcique    |
| S3           | $r\text{Cl}^-$ , $r\text{HCO}_3^-$ , $r\text{SO}_4^{2-}$ $r\text{Ca}^{2+}$ , $r(\text{Na}^+ + \text{k}^+)$ , $r\text{Mg}^{2+}$ | Chloruré calcique    |
| S5           | $r\text{Cl}^-$ , $r\text{HCO}_3^-$ , $r\text{SO}_4^{2-}$ $r\text{Ca}^{2+}$ , $r(\text{Na}^+ + \text{k}^+)$ , $r\text{Mg}^{2+}$ | Chloruré calcique    |
| P5           | $r\text{HCO}_3^-$ , $r\text{Cl}^-$ , $r\text{SO}_4^{2-}$ $r\text{Ca}^{2+}$ , $r\text{Mg}^{2+}$ , $r(\text{Na}^+ + \text{k}^+)$ | Bicarbonaté calcique |
| P6           | $r\text{Cl}^-$ , $r\text{HCO}_3^-$ , $r\text{SO}_4^{2-}$ $r\text{Ca}^{2+}$ , $r\text{Mg}^{2+}$ , $r(\text{Na}^+ + \text{k}^+)$ | Chloruré calcique    |
| P7           | $r\text{SO}_4^{2-}$ , $r\text{Cl}^-$ , $r\text{HCO}_3^-$ $r\text{Ca}^{2+}$ , $r\text{Mg}^{2+}$ , $r(\text{Na}^+ + \text{k}^+)$ | Sulfaté calcique     |
| P8           | $r\text{SO}_4^{2-}$ , $r\text{Cl}^-$ , $r\text{HCO}_3^-$ $r\text{Ca}^{2+}$ , $r\text{Mg}^{2+}$ , $r(\text{Na}^+ + \text{k}^+)$ | Sulfaté calcique     |
| P9           | $r\text{SO}_4^{2-}$ , $r\text{Cl}^-$ , $r\text{HCO}_3^-$ $r\text{Ca}^{2+}$ , $r\text{Mg}^{2+}$ , $r(\text{Na}^+ + \text{k}^+)$ | Sulfaté calcique     |
| P10          | $r\text{SO}_4^{2-}$ , $r\text{Cl}^-$ , $r\text{HCO}_3^-$ $r\text{Ca}^{2+}$ , $r\text{Mg}^{2+}$ , $r(\text{Na}^+ + \text{k}^+)$ | Sulfaté calcique     |
| M5           | $r\text{HCO}_3^-$ , $r\text{SO}_4^{2-}$ , $r\text{Cl}^-$ $r\text{Ca}^{2+}$ , $r\text{Mg}^{2+}$ , $r(\text{Na}^+ + \text{k}^+)$ | Bicarbonaté calcique |
| AS4          | $r\text{HCO}_3^-$ , $r\text{Cl}^-$ , $r\text{SO}_4^{2-}$ $r\text{Ca}^{2+}$ , $r\text{Mg}^{2+}$ , $r(\text{Na}^+ + \text{k}^+)$ | Bicarbonaté calcique |
| KH           | $r\text{HCO}_3^-$ , $r\text{Cl}^-$ , $r\text{SO}_4^{2-}$ $r\text{Ca}^{2+}$ , $r\text{Mg}^{2+}$ , $r(\text{Na}^+ + \text{k}^+)$ | Bicarbonaté calcique |

### 5. 1. 3. Diagramme de Piper

Le diagramme de Piper permet la visualisation d'un grand nombre d'analyse et de suivre l'évolution du chimisme de la nappe et des eaux superficielles (**Fig. 32**).



**Figure 32: Diagramme de piper (2014)**

Le diagramme de Piper (**Fig.32**) permet de visualiser les faciès chimiques suivants :

- Le faciès bicarbonaté calcique.
- Le faciès chloruré calcique.
- Le faciès sulfaté calcique.

Au niveau du triangle des cations la plupart des eaux se situent dans la zone calcique, ceci s'explique par le lessivage des eaux bicarbonatées et aussi dans les formations triasiques.

Dans le triangle des anions, la majorité des eaux regroupées au niveau du pôle bicarbonaté appartiennent à la nappe des calcaires fissurés, quelques échantillons tendent vers le pôle  $Cl^- +$

$\text{SO}_4^{2-}$ . Les bicarbonates constituent l'essentiel de la minéralisation des eaux, ils indiquent le lessivage des calcaires surtout dans les périodes pluvieuses. Par contre, la dominance du chlore est le résultat de la présence des formations du trias ou le lessivage agricole. Les sulfates résultent des formations évaporitiques.

#### 5. 1. 4. Diagramme de Schöeller-Berkaloff

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

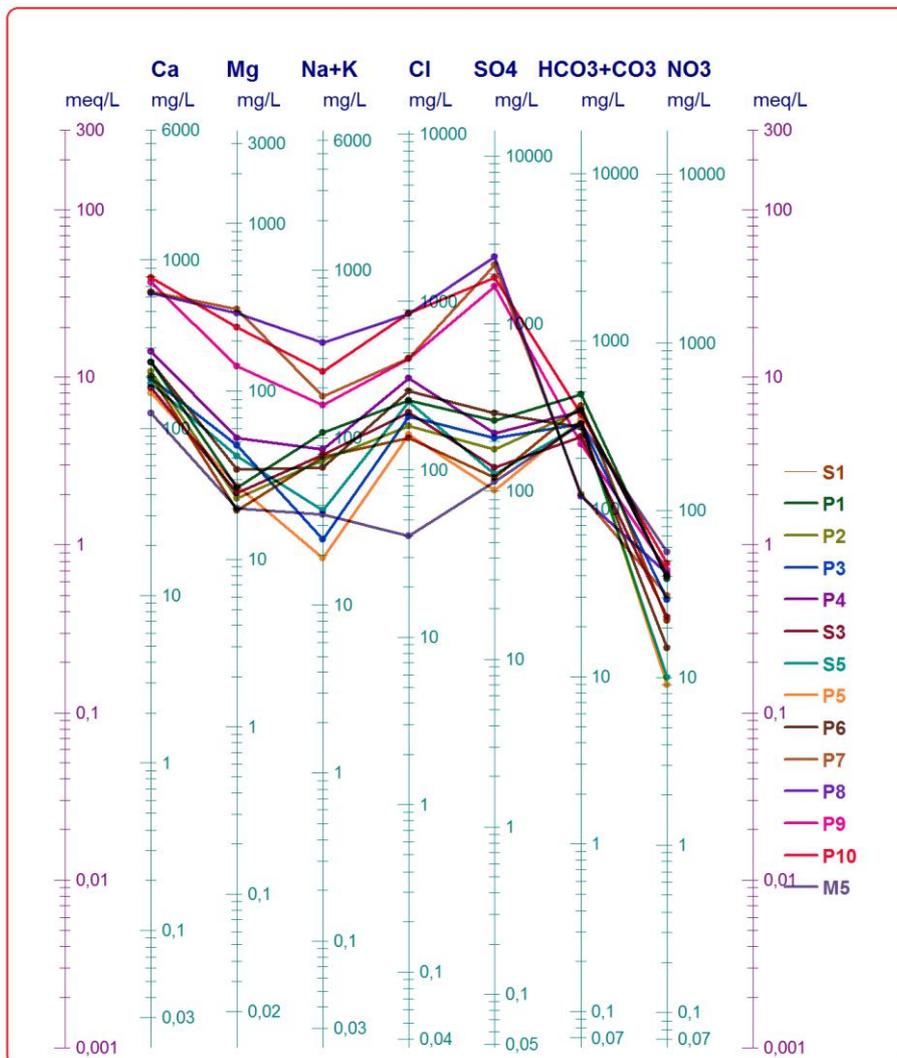


Figure 33: Diagramme de Schöeller-Berkaloff de la nappe libre (Mars 2014)

---

On remarque 3 grandes familles, la première de fortes concentrations en  $\text{HCO}_3^-$  et  $\text{Ca}^{2+}$  est due essentiellement au lessivage des formations bicarbonatées, notamment les calcaires du Turonien. La deuxième famille sulfatée calcique, elle concerne les puits P7, P8, P9 et P10. Ce faciès est typiquement lithologique, il est du au lessivage des pointes triasiques dans la nappe libre. Les fortes concentrations de  $\text{Cl}^-$  et de  $\text{Ca}^{2+}$  ont donné un faciès dominant : le chloruré calcique, les ions chlorures peuvent tirer leur origine soit de la lithologie (les sédiments du Mio-Plio-Quaternaire) ou résulter des activités anthropiques.

### 5. 1. 5. L'outil cartographique

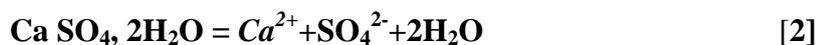
Pour illustrer la répartition des éléments chimiques dans la zone d'étude, nous avons opté pour l'outil cartographique des éléments suivants :  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$  et **CE**. Le choix des ces éléments s'est fait selon son degrés d'importance dans le faciès chimique et leur apport dans la minéralisation des eaux souterraines.

#### 5. 1. 5. 1. Carte du calcium $\text{Ca}^{2+}$

La présence des ions  $\text{Ca}^{2+}$  dans l'eau est liée principalement à deux origines naturelles :

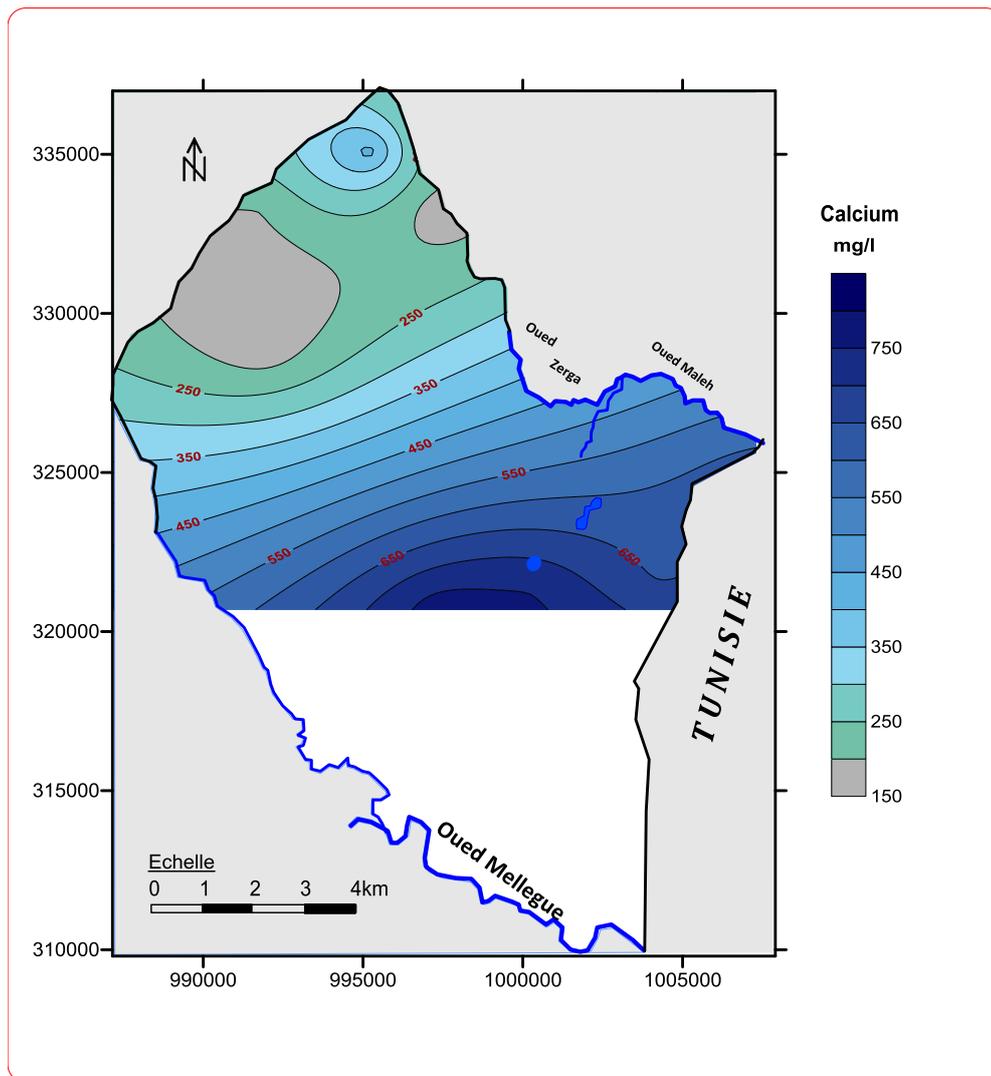
- la dissolution des formations carbonatées ( $\text{CaCO}_3$ )
- la dissolution des formations gypseuses ( $\text{CaSO}_4^{2-}$ )

Selon les réactions [1] et [2]



Ils n'existent pas de limites pour la teneur en calcium, mais une eau dure présente de nombreux inconvénients. L'O.M.S donne des limites pour le  $\text{Ca}^{2+}$  de l'ordre de 100 à 200 mg/l.

La carte réalisée (**Fig. 34**) montre que les concentrations du calcium varient de 150 mg/l au Nord et deviennent de plus en plus élevés en se déplaçant vers le Sud pour atteindre 850 mg/l. Ce constat, permet d'affirmer que les eaux de la nappe sont dans les limites de potabilité au Nord et deviennent impropres à la consommation vers le Sud, marqués par la présence des terrains triasiques. L'ion  $\text{Ca}^{2+}$  peut provenir de la dissolution des formations carbonatées et la dissolution des formations gypseuses.



**Figure 34: Carte de la concentration de Calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) en mg/l dans la commune de Sidi Fredj (Mars 2014)**

### 5. 1. 5. 2. Carte des bicarbonates $\text{HCO}_3^-$

Les bicarbonates résultent de la dissolution des roches calcaires par des eaux chargées en gaz carbonique selon la réaction [3].



La carte des teneurs en bicarbonates (Fig. 35) au niveau de la zone d'étude montre une évolution à la baisse qui va du Nord avec un maximum de 483 mg/l vers le Sud avec 118 mg/l. Les fortes concentrations s'expliquent par le lessivage des calcaires du Crétacé par les eaux d'infiltration et de recharge..

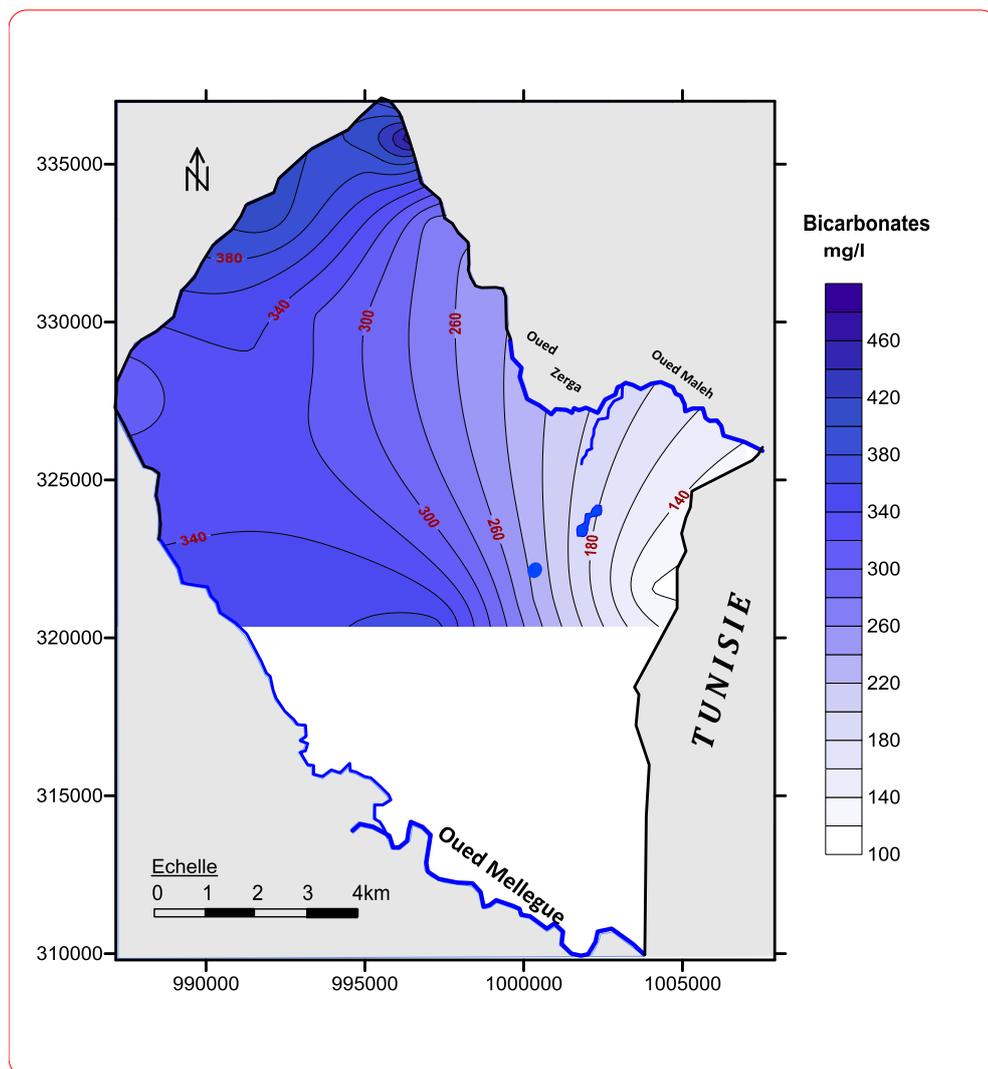
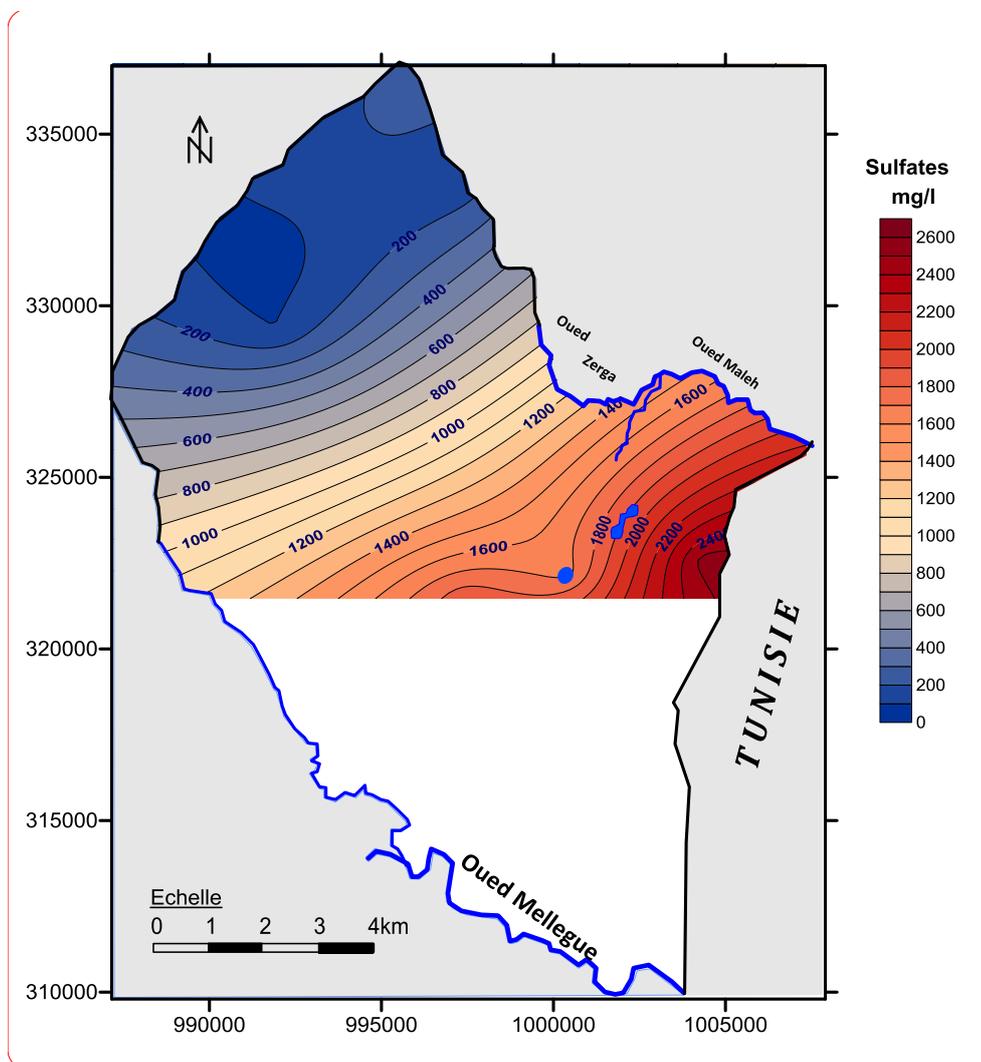


Figure 35: Carte de la concentration des Bicarbonates ( $\text{HCO}_3^-$ ) en mg/l dans la commune de Sidi Fredj (Mars 2014)

### 5. 1. 5. 3. Cartes des sulfates $\text{SO}_4^{2-}$

La présence des ions sulfatés dans l'eau est liée à la dissolution des formations gypsifères, selon la réaction [2]. La carte des teneurs en sulfates (**Fig. 36**) met en évidence deux limites distinctes de concentrations :

- la première variant de 122 mg/l à 294 mg/l dans les points d'eau localisés au Nord et au centre de la zone d'étude et qui sont inférieures à la limite de la norme algérienne de potabilité des eaux (400 mg/l),
- la deuxième variant de 1667 à 2539 mg/l dans les points d'eau localisés sur les formations triasiques en l'occurrence les puits P7, P8, P9 et P10, ces concentrations sont largement supérieures à la norme de potabilité.



**Figure 36: Carte de la concentration des Sulfates ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) en mg/l dans la commune de Sidi Fredj (Mars 2014)**

#### 5. 1. 5. 4. Carte des Chlorures Cl<sup>-</sup>:

L'origine de ces éléments est liée principalement à la dissolution des minéraux salifères, selon la réaction [4].



La teneur moyenne en chlorures des eaux superficielles est de  $361,4 \pm 237,9$  mg/l (minimum = 155,2 mg/l, maximum = 856 mg/l). La carte des teneurs en chlorures (Fig. 37) montre aussi une élévation des concentrations en se déplaçant vers le Sud et le Sud-Est avec le sens d'écoulement des eaux de la région.

Les chlorures sont dangereux pour les personnes atteintes de maladies cardio-vasculaires, dont la norme algérienne de potabilité des eaux est limitée à 500 mg/l. Cette limite est atteinte et elle est même dépassée dans les puits P7, B, P8, P9 et P10 implantés dans les terrains triasiques.

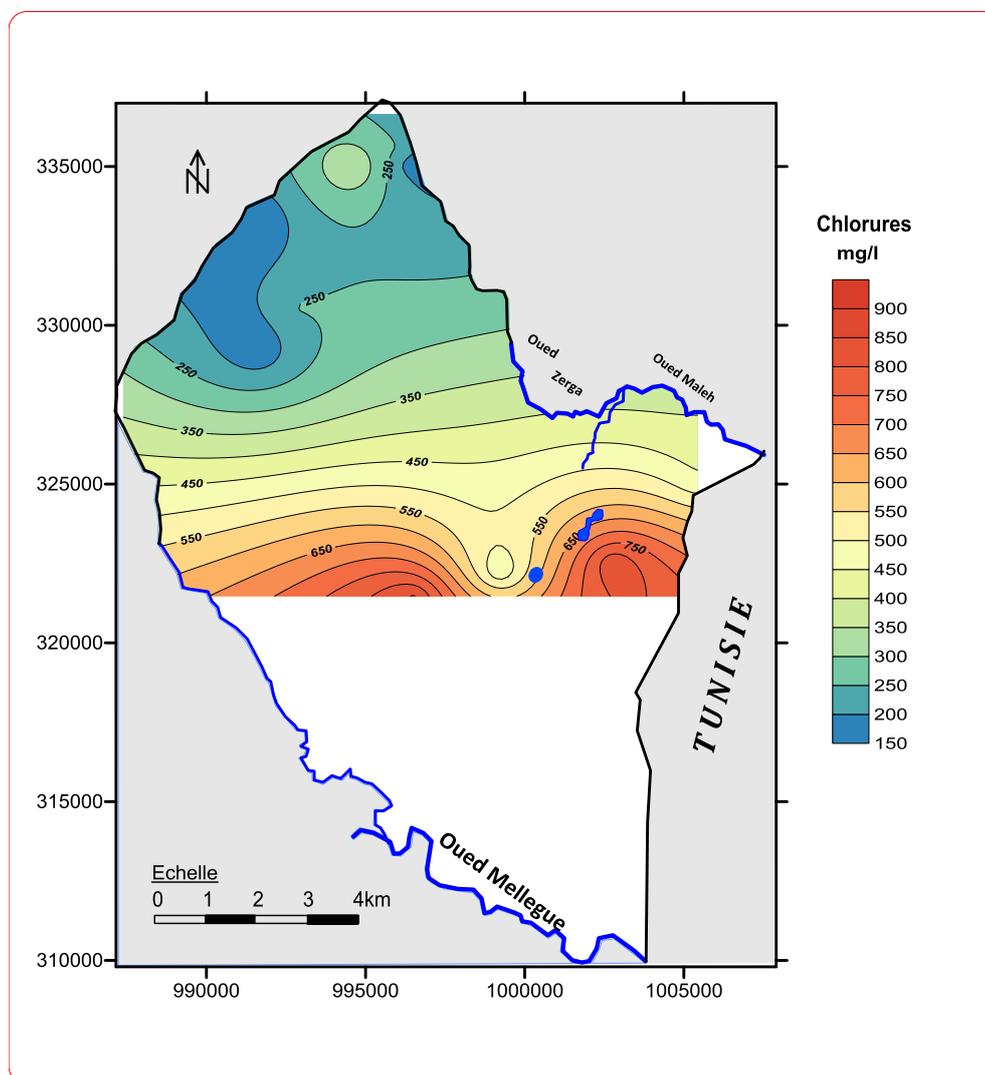


Figure 37: Carte des concentrations des Chlorures (Cl<sup>-</sup>) en mg/l dans la commune de Sidi Fredj (Mars 2014)

### 5. 1. 5. 5. Carte du sodium $\text{Na}^+$

L'origine de ces éléments est liée principalement à la dissolution des formations évaporitiques (salifères) selon la réaction (4). Les teneurs du Sodium sont comprises entre 32 et 280 mg/l et la moyenne est de 89,4 mg/l. Les concentrations deviennent plus élevées en déplaçant vers le Sud et le Sud Est de la région (Fig. 38). Elles suivent la même distribution que celle des chlorures, parce qu'elles sont de la même origine lithologique, celle de la dissolution des formations évaporitiques.

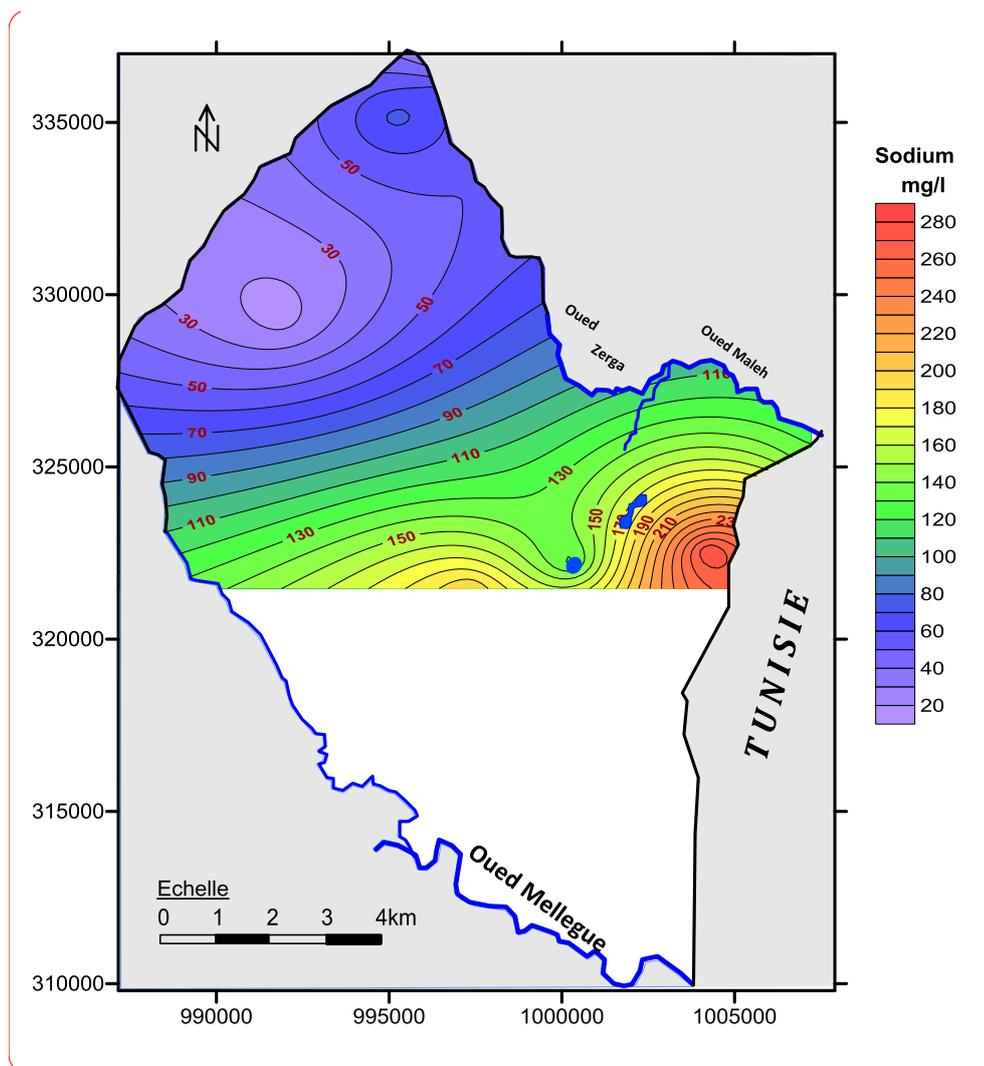
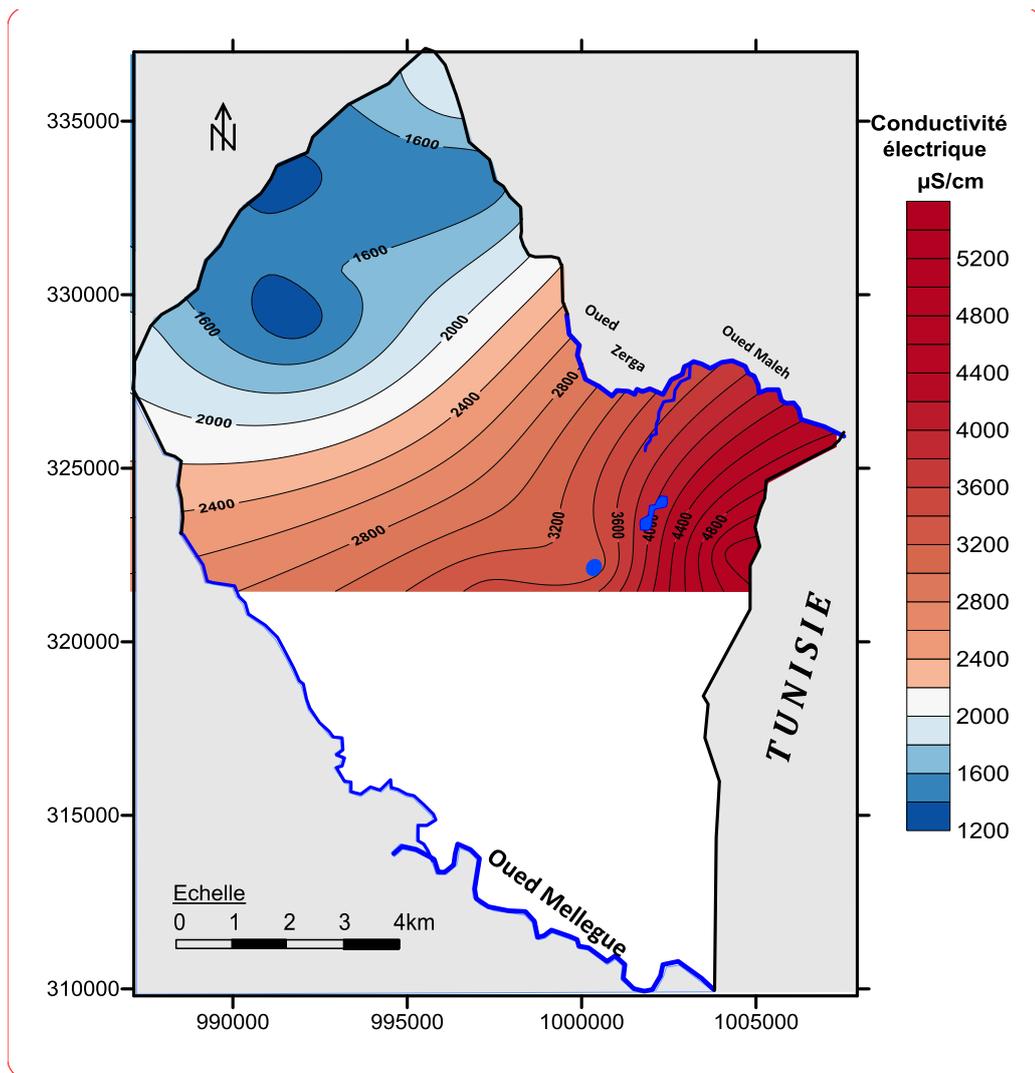


Figure 38: Carte des concentrations du Sodium ( $\text{Na}^+$ ) en mg/l dans la commune de Sidi Fredj (Mars 2014)

### 5. 1. 5. 6. Carte des conductivités électriques (CE)

La carte des conductivités électriques des eaux (**Fig. 39**) de la zone d'étude montre que les valeurs des conductivités électriques deviennent plus élevées en se déplaçant au Sud et au Sud-Est, les zones les plus chargées se localisent dans les formations triasiques au centre et au Sud-Est de la région, où l'on rencontre des valeurs maximales de l'ordre de 5000 $\mu$ S/cm. Cette situation est influencée par les écoulements d'eau qui circule à travers ces formations géologiques et se charge en ions et acquiert ainsi une forte minéralisation. Cependant, la partie Nord présente des conductivités plus faibles inférieures à 2000  $\mu$ S/cm.



**Figure 39: Carte des conductivités électriques (CE) en  $\mu$ S/cm dans la commune de Sidi Fredj (Mars 2014)**

## 5. 2. Nappe des calcaires (Karstique)

Les résultats d'analyses chimiques des cinq forages captant les formations calcaires du Turonien, implantés dans la moitié Sud de la zone d'étude ont été reportés sur les diagrammes de Piper et de Schöeller-Berkaloff (Fig. 40 et 41).

Il ressort de ces représentations que les eaux de la nappe des calcaires appartiennent aux familles des eaux :

- Sulfaté sodique (4point: AS3- H1 -AZ3- AOB2).
- Sulfaté calcique (1point: AZ2).
- Chloruré sodique (1point: AS1).

Ces faciès sont influencés par le lessivage des formations évaporitiques, gypsifères et salifères.

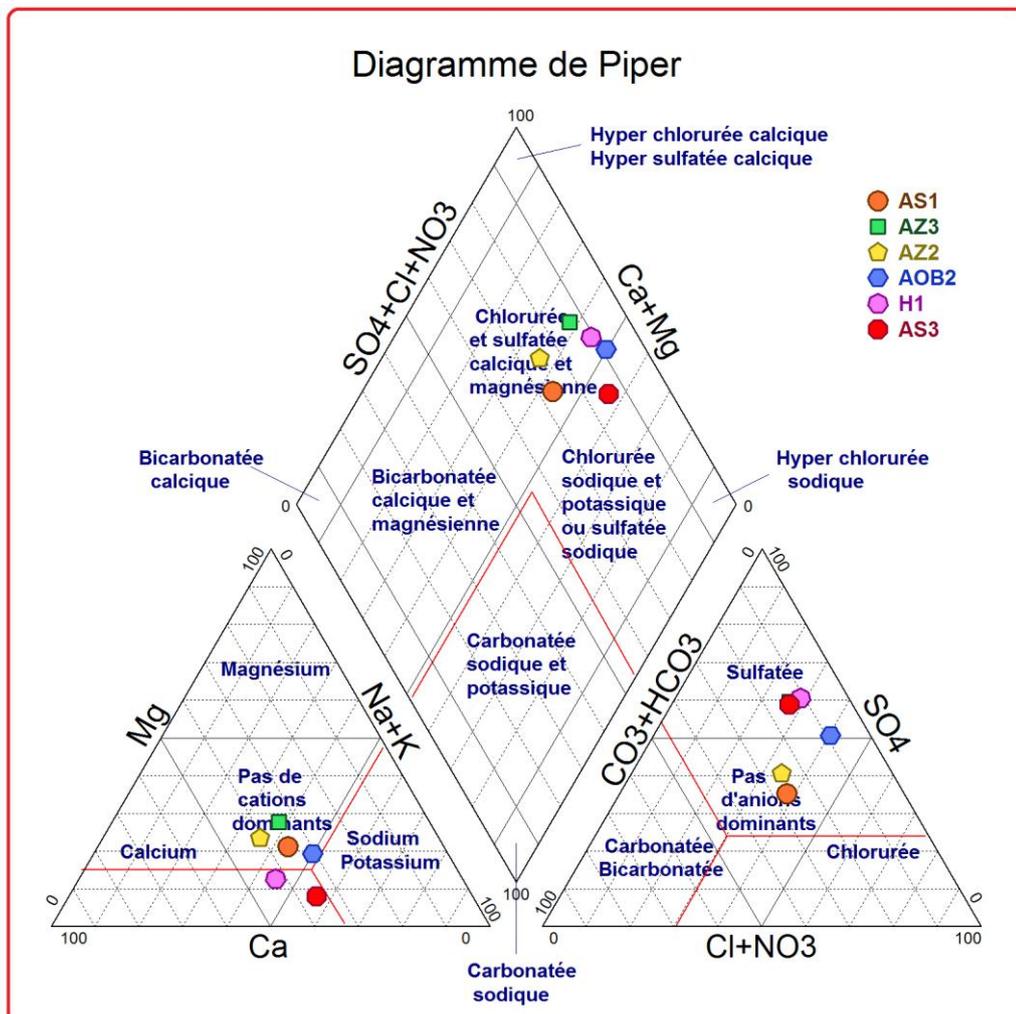
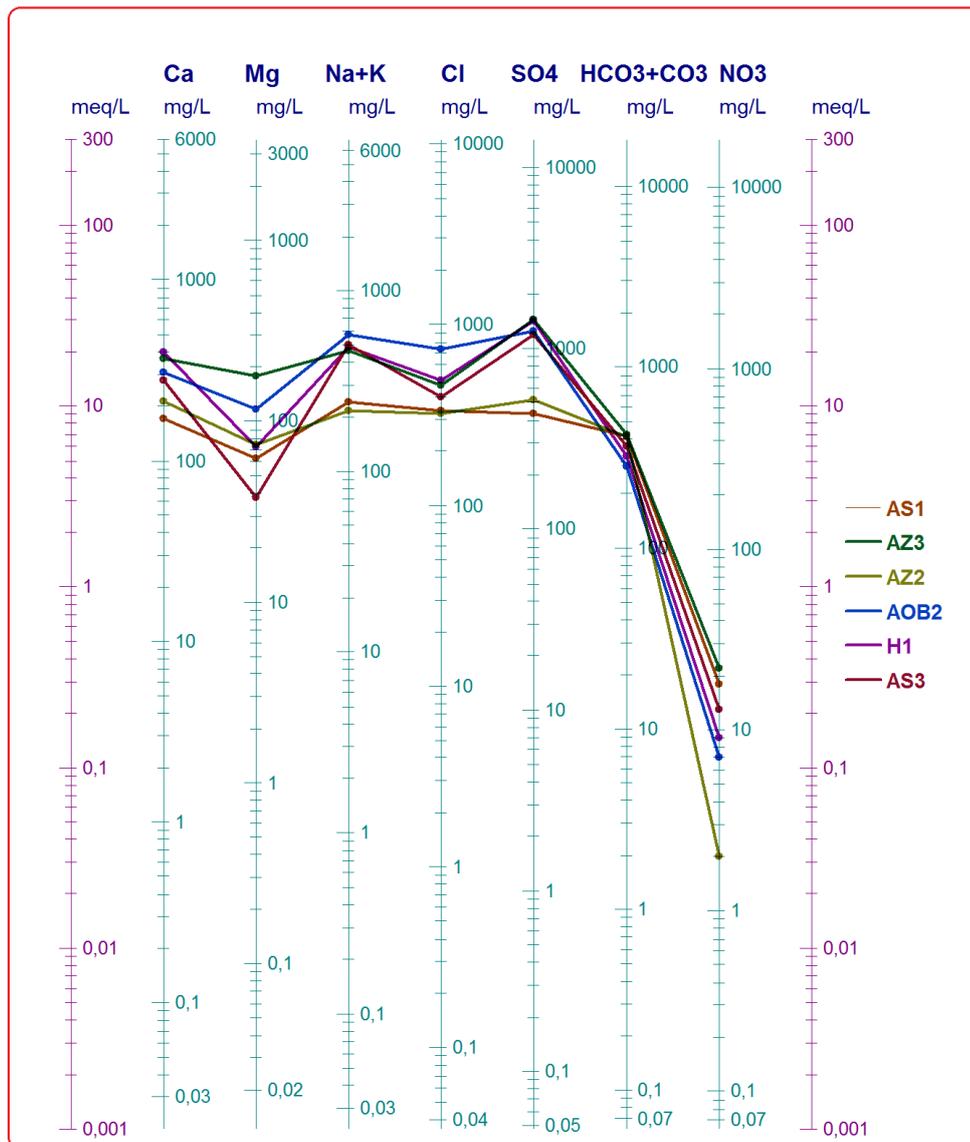


Figure 40: Diagramme de Piper de la nappe des calcaires (Mars 2014)



**Figure 41: Diagramme de Schöeller-Berkaloff de la nappe des calcaires (Mars 2014)**

Le faciès chimiques des eaux est intimement lié à la nature des terrains traversés lors du transit de ces eaux ainsi qu'à la nature du sol. Les deux graphiques, Schöeller-Berkaloff et Piper, sont des représentations qui permettent de caractériser ces faciès chimiques. Ils permettent de faire une approche rapide des résultats analytiques en vue de caractériser facilement les eaux, de suivre leur évolution ou de les comparer à d'autres eaux minérales de composition physico-chimique voisine.

---

La représentation des résultats des analyses sur le diagramme de Schoëller Berkaloff permet de comparer la composition chimique des solutions provenant de différentes origines. Sur ce dernier (**Fig. 41**), la plupart des courbes ont la même allure et montrent deux pics bien accusés : le premier correspond au sulfates et le second au sodium.

La nature lithologique des différentes formations du bassin versant de Sidi Fredj a une influence directe sur les phénomènes hydrologiques. Les deux tiers des terrains affleurant (calcaires, dolomies, etc.) favorisent l'infiltration des eaux pluviales et contribuent à la recharge de l'aquifère karstique.

L'augmentation des valeurs de concentration en éléments chimiques, exprime une minéralisation importante des eaux qui sont dues soit aux facteurs naturels tels que les sels apportés par la pluie (climatique), le sol (pédologie), les zones non saturée et saturées (lithologiques) et d'autres facteurs comme les activités agricoles. Cependant, la nature des roches traversées par l'eau est la plus probable à l'augmentation de ces valeurs. On remarque dans les formations géologiques la présence du gypse du Trias et l'halite qui augmentent la salinité, selon la géologie de la zone et la contribution des eaux de crues qui lessivent les formations triasiques à évaporites.

## 6. Analyse en composantes principales (ACP)

L'analyse en composantes principales " est une représentation synthétique des résultats analytiques car elle met en évidence des phénomènes pas toujours bien perceptible à l'aide des représentations graphiques habituelles ou des corrélations simples" Mudry et Blavoux (1986).

Pour réaliser cette étude, on considère comme variables les teneurs en éléments majeurs ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ) et CE. Cette analyse à été réalisée avec les données de 8 variables sur 22 individus (**Tab. 29**).

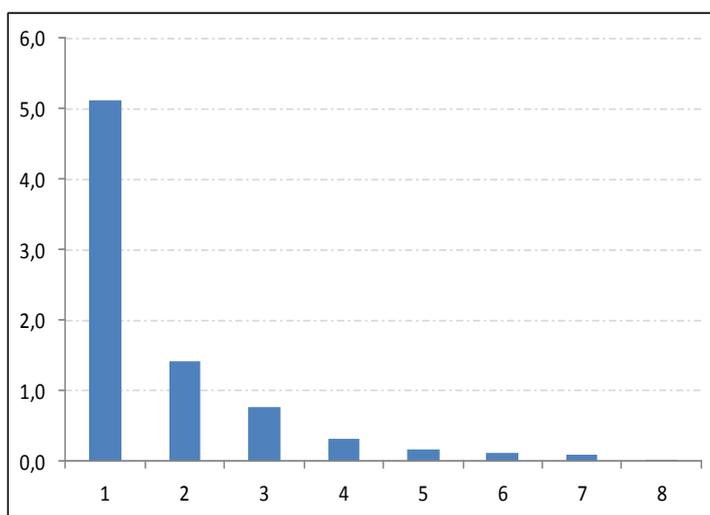
**Tableau 29 : Matrice des corrélations**

|                            | $\text{Ca}^{2+}$ | $\text{Mg}^{2+}$ | $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ | $\text{Cl}^-$ | $\text{HCO}_3^-$ | $\text{SO}_4^{2-}$ | $\text{NO}_3^-$ | CE   |
|----------------------------|------------------|------------------|----------------------------|---------------|------------------|--------------------|-----------------|------|
| $\text{Ca}^{2+}$           | 1,00             |                  |                            |               |                  |                    |                 |      |
| $\text{Mg}^{2+}$           | <b>0,85</b>      | 1,00             |                            |               |                  |                    |                 |      |
| $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ | 0,36             | 0,47             | 1,00                       |               |                  |                    |                 |      |
| $\text{Cl}^-$              | <b>0,79</b>      | <b>0,78</b>      | <b>0,70</b>                | 1,00          |                  |                    |                 |      |
| $\text{HCO}_3^-$           | <b>-0,52</b>     | <b>-0,61</b>     | -0,10                      | -0,39         | 1,00             |                    |                 |      |
| $\text{SO}_4^{2-}$         | <b>0,89</b>      | <b>0,90</b>      | <b>0,63</b>                | <b>0,66</b>   | <b>-0,52</b>     | 1,00               |                 |      |
| $\text{NO}_3^-$            | 0,37             | 0,26             | -0,21                      | 0,05          | -0,14            | 0,15               | 1,00            |      |
| CE                         | <b>0,71</b>      | <b>0,77</b>      | <b>0,70</b>                | <b>0,86</b>   | <b>-0,54</b>     | <b>0,87</b>        | -0,10           | 1,00 |

Une valeur propre représente la variation des individus sur l'axe correspondant. Dans un but de faciliter leur interprétation, ces valeurs sont exprimées en pourcentage des valeurs propres totales.

**Tableau 30: Valeurs propres et pourcentages des axes principaux**

| Axes | Valeur propre | Pourcentage de variance | Pourcentage cumulé |
|------|---------------|-------------------------|--------------------|
| F1   | 5,12          | 64,05                   | 64,05              |
| F2   | 1,41          | 17,66                   | 81,71              |
| F3   | 0,76          | 9,54                    | 91,25              |
| F4   | 0,31          | 3,92                    | 95,16              |
| F5   | 0,15          | 1,92                    | 97,09              |
| F6   | 0,11          | 1,37                    | 98,46              |
| F7   | 0,10          | 1,20                    | 99,67              |
| F8   | 0,03          | 0,33                    | 100,00             |



**Figure 42: Histogramme des valeurs propres**

Le premier axe principal avec une valeur propre égale à 5,12, explique 64,05 % de la variation totale et la seconde composante égale à 1,41 explique 17,66 % de la variance totale (Tab.29 & Fig.42). Les taux de variation sont assez élevés pour les deux premiers axes avec un cumul de 81,71 %. L'interprétation portera sur les deux axes F1 & F2.

### 6. 1. Analyse du cercle de corrélation

L'observation du cercle de corrélation (Fig. 43) formé par les deux axes F1-F2 (81,71 %) de l'informations, l'axe d'inertie principal F1 exprime 64,05 % de l'information, il est défini positivement par la conductivité électrique CE et par les variables  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  et  $\text{SO}_4^{2-}$ , il représente donc un axe de minéralisation, il s'oppose aux eaux bicarbonatées.

L'axe d'inertie F2 exprime 17,66% de la variance, il est déterminé par les bicarbonates et  $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ .

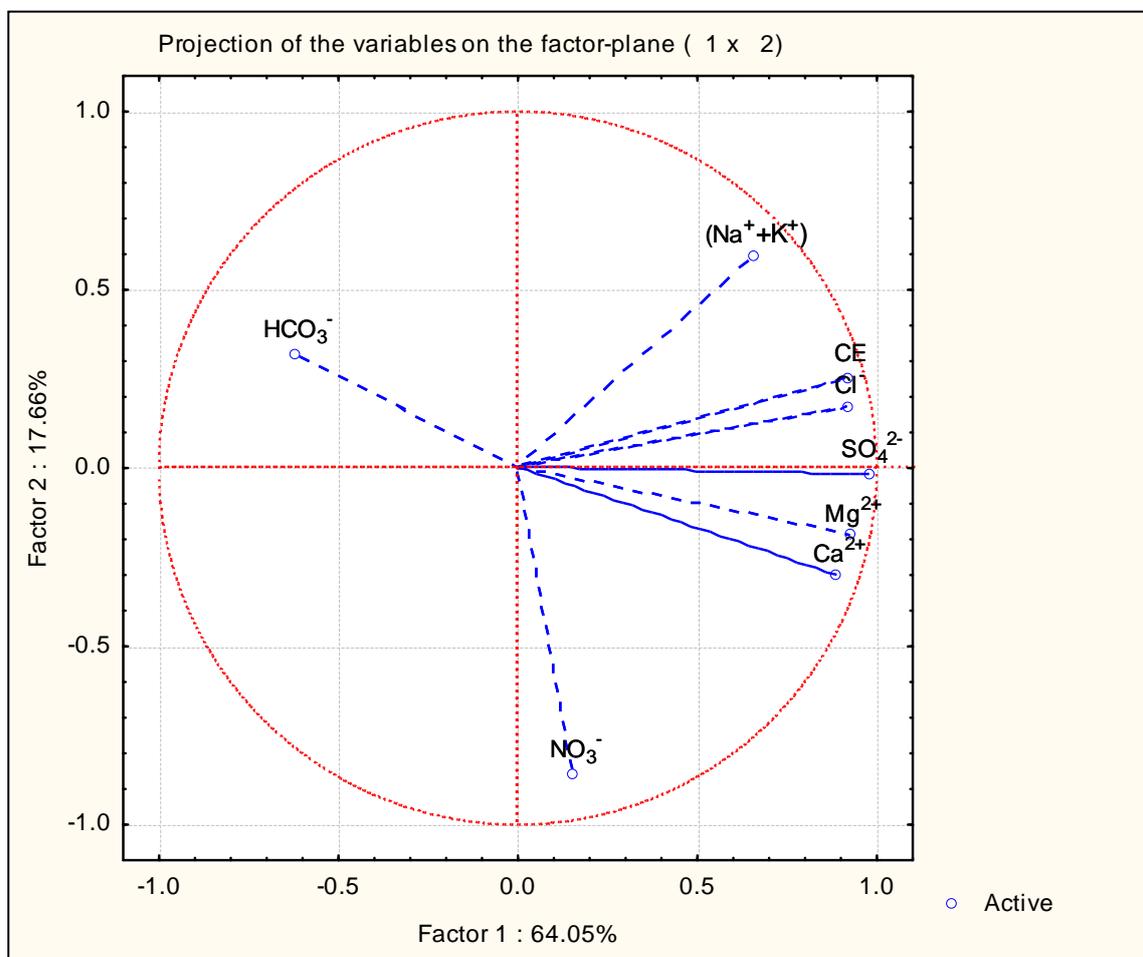


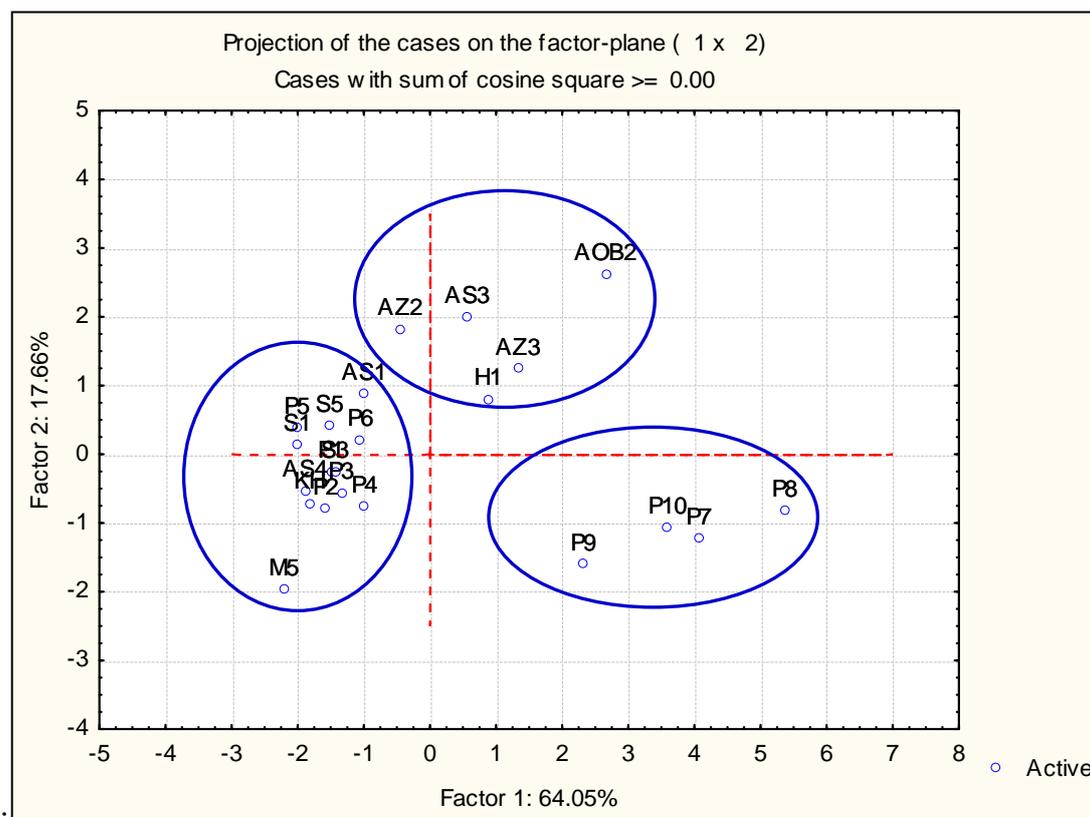
Figure 43: Cercle de corrélation des variables dans le plan formé par l'axe 1 et l'axe 2

## 6. 2. Analyse de l'espace des individus

La projection des individus sur les plans F1-F2 a montré l'existence de trois groupes :

1. Le premier caractérisé par les puits P1 à P6, et sources S1 à S5, ces eaux caractérisent la nappe libre du mio-plio-quaternaire et le forage AS1 dans la nappe karstique.
2. Le deuxième groupe concerne les puits P7 à P10, situés dans la zone des affleurements triasiques de la région, et qui sont à l'origine des faciès chimiques observés.
3. Le troisième groupe se rapporte aux forages AZ2, AZ3, AOB2, H1 et AS3, captent les eaux de la nappe des calcaires. La qualité des eaux dans cette zone demeure directement influencée par les formations évaporitiques.

La (**Fig. 44**) montre l'emplacement des puits, sources et forages captant des eaux à travers des formations géologiques distinctes. Nous pouvons ainsi confirmer l'existence des trois groupes.



**Figure 44: Projection des individus sur le plan formé par les deux premiers axes**

---

## 7. Aptitude des eaux à l'irrigation

La zone d'étude comporte 2 aquifères, l'un libre et l'autre karstique, représentant des masses d'eau transfrontalières entre l'Algérie et la Tunisie.

Le but recherché dans cette partie du travail est de déterminer si ces eaux conviennent à l'irrigation. L'aptitude de l'eau à l'irrigation est fonction non seulement de la concentration totale en sels, mais aussi par le type de sels et les ions qui la constituent. Les principaux paramètres définissant les eaux destinées à l'irrigation sont :

- Salinité: contenu total en sel soluble.
- Sodium: proportion relative des cations sodium ( $\text{Na}^+$ ) par rapport aux autres.
- Alcalinité et Dureté: concentration d'anions Carbonate ( $\text{CO}_3$ ) et bicarbonate.
- pH de l'eau.

Les deux premiers critères sont très importants, car un excès de sel baisse la perméabilité du sol empêchant ainsi le développement des plantes.

Dans le but d'étudier l'aptitude des eaux des 2 aquifères à l'irrigation, l'utilisation du logiciel Diagramme permet de faire appel à:

- la méthode de RICHARDS, il met en évidence différentes classes d'eau qui ont été définies sur la base du taux d'absorption de sodium (**S.A.R**) et sur la concentration de l'eau sous la forme de la conductivité électrique. Le SAR est défini par la relation suivante:

$$\text{SAR} (\%) = \text{Na}^+ / ((\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/2)^{1/2} \quad [7]$$

- La classification de Wilcox fondée sur la conductivité électrique et la teneur en sodium dans l'eau exprimée en pourcentage.

### 7. 1. Classification des eaux par la méthode de Richards

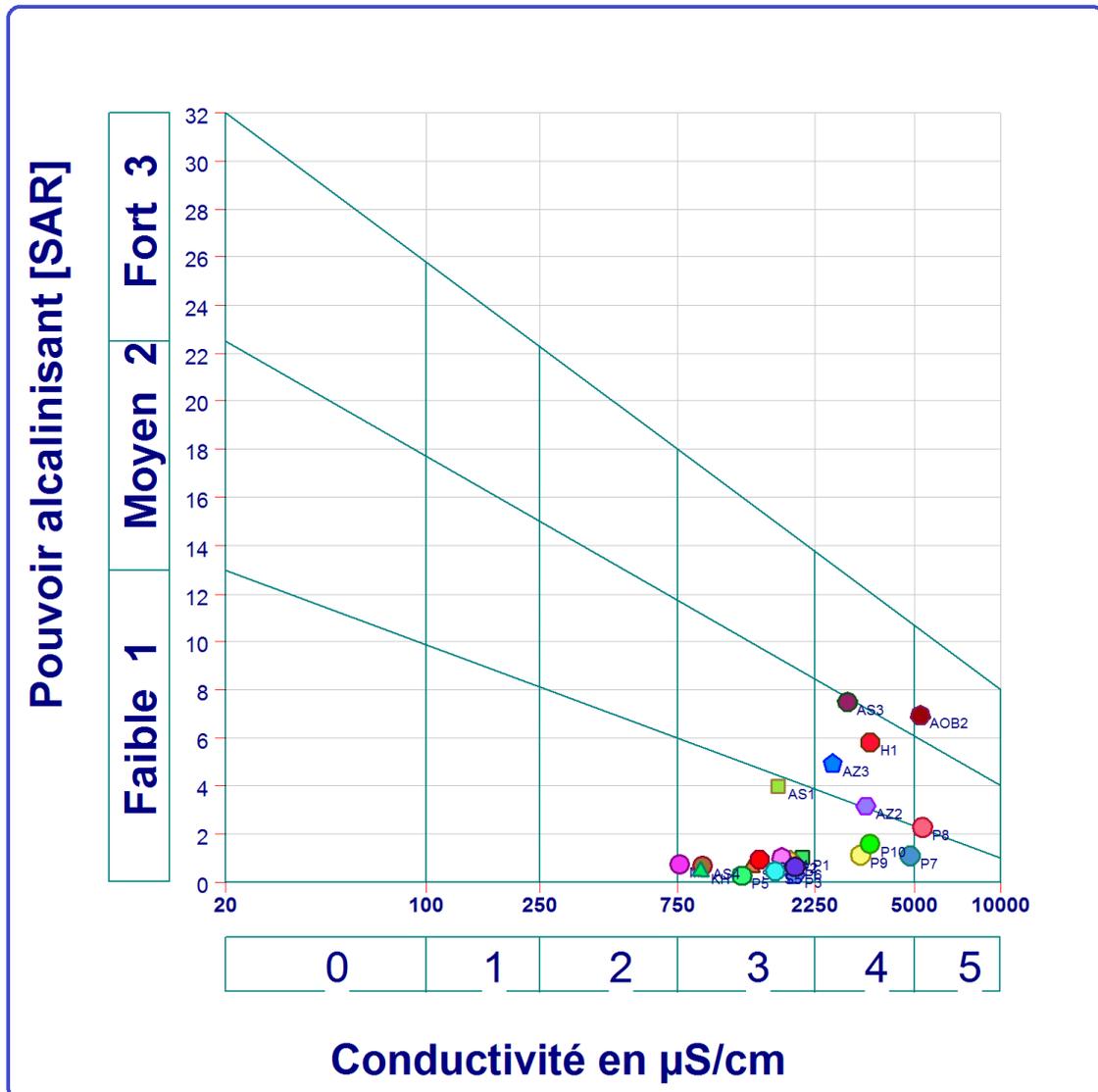
Les valeurs obtenues à partir des échantillons analysés ont été reportés sur le diagramme de Richards (Fig. 45). À partir de la conductivité électrique et la valeur du SAR, on a pu dégager la présence des quatre classes suivantes :

**C3S1 (admissible):** En général, eau convenant à l'irrigation de cultures tolérantes au sel, sur des sols bien drainés. L'évolution de la salinité doit cependant être contrôlée. Dans ce cas les points d'eau sont : les puits captant la nappe libre du P1 à P6 et les sources localisées dans cette zone.

**C4S1 (médiocre):** En général, eau fortement minéralisée pouvant convenir à certaines espèces bien tolérantes aux sels sur des sols bien drainés et lessivés, caractéristiques des puits P7, P8, P9 et P10.

**C4S2 (médiocre):** En général, eau fortement minéralisée pouvant convenir à certaines espèces bien tolérantes aux sels sur des sols bien drainés et lessivés, caractérisés par les eaux des forages qui captent la nappes des calcaires, il s'agit du AZ2, AZ3, AS3 et H1.

**C5S3 (mauvaise) :** Eau ne convenant pas à l'irrigation mais pouvant être utilisée sous certaines conditions, caractéristique des eaux du forage AOB2.



**Figure 45: Classification des eaux destinées à l'irrigation (diagramme de Richards)**

Il ressort de cette classification que les eaux de la nappes libre conviennent à l'irrigation des diverses cultures à l'exception celles implantées sur des terres en relation avec les formations triasiques. Cependant la majorité des eaux de la nappe des calcaires ne conviennent pas à l'irrigation.

## 7. 2. Classification des eaux par la méthode de Wilcox

Le diagramme de Wilcox est basé sur la formule dite pourcentage de  $\text{Na}^+$ , elle s'écrit :

$$\text{Na (\%)} = (\text{Na} / \text{Ca} + \text{Mg} + \text{Na} + \text{K}) * 100 \quad [8]$$

La classification de Wilcox est fondée sur la combinaison de la teneur en sodium dans l'eau et la conductivité électrique, généralement connu en %, cette classification définie cinq classes : excellente, bonne, admissible, médiocre et mauvaise.

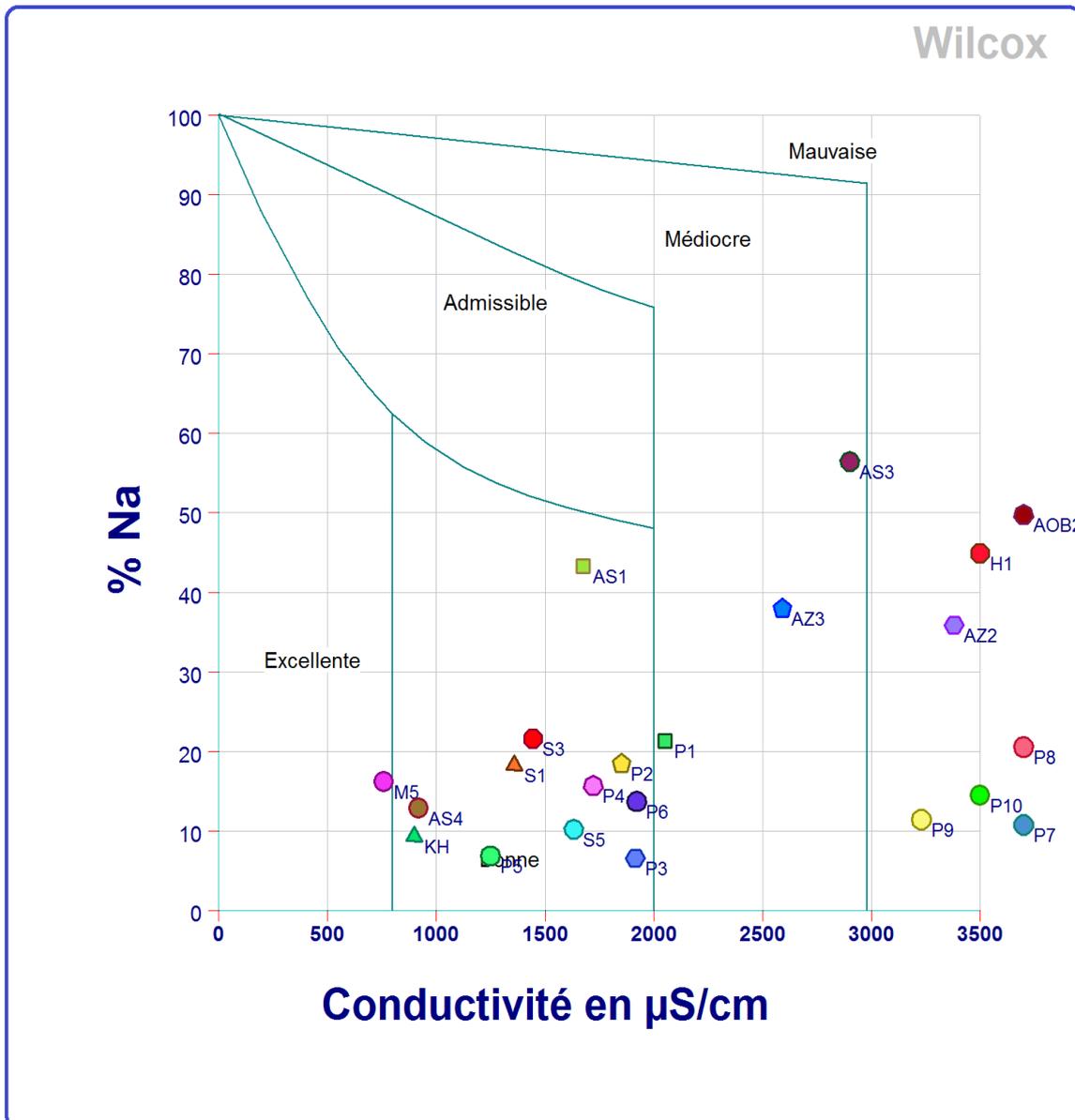


Figure 46: Classifications des eaux destinées à l'irrigation (diagramme de Wilcox)

---

Le diagramme selon la classification de Wilcox à la figure 46, montre que les eaux souterraines des deux nappes appartiennent aux quatre classes suivantes: Excellente, Bonne, Médiocre et Mauvaise.

- **La classe Excellente** : représentée par le forage M5 captant les formations des graviers du Mio-Pliocène au niveau de la nappe libre.
- **La classe Bonne** regroupe les points d'eau captant la nappe libre, à la moitié Nord de la zone d'étude et le forage AS1 de la nappe des calcaires.
- **La classe Médiocre**, représentée par les deux forages de la nappe des calcaires, il s'agit du AS3 et du AZ3.
- **La classe Mauvaise** regroupe les quatre puits de la nappe libre : P7, P8, P9 et P10 localisés dans un terrain triasique et les forages captant la nappe des calcaires, il s'agit de l'AOB2, AZ2 et H1.

---

## 8. Conclusion

L'étude hydrochimique des eaux des deux aquifères qui caractérisent la zone d'étude a permis de conclure ce que suit :

Pour la nappe libre, deux zones se distinguent : la première, située au Nord avec une minéralisation moyenne et la deuxième, très minéralisée est localisée au milieu de la zone avec la présence de formations diapiriques.

Les eaux sont caractérisées par la présence de trois faciès dominants, bicarbonaté calcique, chloruré calcique et sulfaté calcique.

La répartition spatiale des éléments chimiques montre que le chimisme est fortement lié à la lithologie de la nappe et ce suite à la dissolution des formations carbonatées et des formations évaporitiques.

L'évolution des éléments chimiques ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  et  $\text{HCO}_3^-$ ) qui caractérisent les formations géologiques principales de la région a montré la dominance des ions salifères ( $\text{Na}^+$  et  $\text{Cl}^-$ ) et des ions gypsifères ( $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{SO}_4^{2-}$ ) par rapport à ceux carbonatés ( $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{HCO}_3^-$ ) dans l'acquisition de la salinité en rapport avec les formations triasiques.

Pour la nappe des calcaires, les eaux sont caractérisées par la présence de trois faciès dominants, Sulfaté sodique, sulfaté calcique et chloruré sodique. La prédominance des ions ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ) est influencée par les formations évaporitiques.

L'Analyse en composantes principales (ACP) réalisée en utilisant comme variables les teneurs en éléments majeurs ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ +  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  et CE) sur 22 individus, a permis d'observer le cercle de corrélation formé par les deux axes F1-F2 représentant 81,71 % de la variation totale, il montre une corrélation positive entre la conductivité électrique et les variables  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ + $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  sur le premier axe et qui sont responsable de la minéralisation des eaux.

L'étude de l'aptitude des eaux souterraines de la zone d'étude à l'irrigation selon les classifications de Richards et Wilcox a permis de définir que les eaux de la nappes libre conviennent à l'irrigation de diverses cultures à l'exception des terres situées dans la partie ou affleurent les formations triasiques. Les eaux de la nappe des calcaires ne conviennent pas à l'irrigation à l'exception d'un seul point, le forage AS1 situé en amont du terrain triasique.

---

## *Chapitre VI*

### *Déminéralisation des eaux saumâtres*

#### *Et son impact sur l'environnement*

## 1. Introduction

La planète bleue est recouverte à 70% d'eau. L'eau douce ne représente que 3% du volume d'eau global. Sur ces 3%, les deux tiers sont immobilisés sous forme de glaciers ou des glaces polaires. Bref, ne reste que 0,01% d'eau douce disponible. L'ONU compte plus de 1,4 milliards de personnes n'ont pas accès à l'eau potable dans le monde, et la demande en eau s'accroît de plus en plus avec l'accroissement économique et démographique continu.

L'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) considère qu'il y a stress hydrique lorsqu'un être humain dispose de moins de 1 700 m<sup>3</sup> d'eau par an et pénurie lorsqu'il dispose de moins de 1000 m<sup>3</sup> par an. 1,4 milliards de personnes vivent avec moins de 1000 m<sup>3</sup> d'eau par an (source BRGM - 2011). Certains spécialistes prétendent que plus de 3 milliards de personnes souffriront-elles de pénurie d'eau en 2025

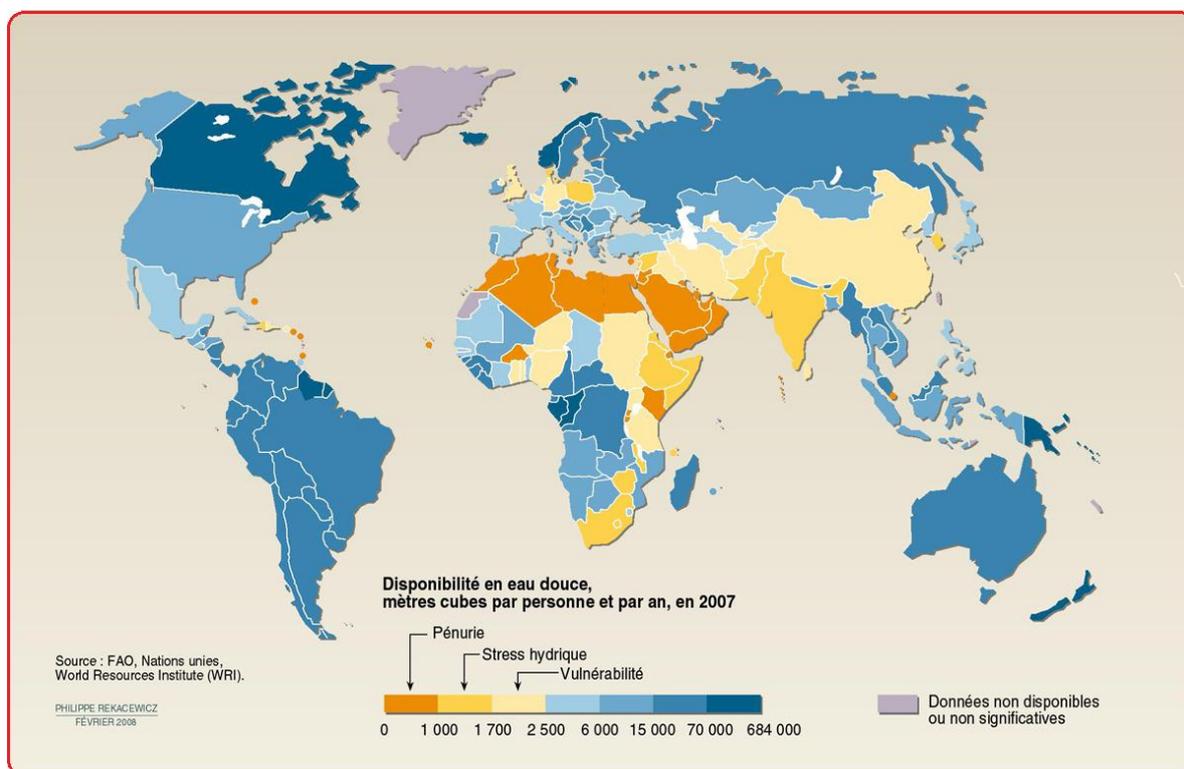


Figure 47: Ressources en eau douce (Source : FAO, Nations Unies, 2008)

Pour pallier aux déficits régionaux en eau conventionnelle en assurant une sécurité future en matière de la mobilisation de l'eau, de nouveaux concepts ont vu le jour, notamment l'utilisation des eaux non conventionnelles

---

## 2. Aperçu sur les eaux non conventionnelles

Les ressources en eau non conventionnelles font partie du domaine public hydraulique naturel et sont constituées de: (Selon **la loi n° 05-12 du 28 Jomada Ethania 1426 correspondant au 4 août 2005 relative à l'eau**).

- les eaux de mer dessalées et les eaux saumâtres déminéralisées dans un but d'utilité publique.
- les eaux usées épurées et utilisées dans un but d'utilité publique ;
- les eaux de toute origine injectées dans les systèmes aquifères par la technique de recharge artificielle.

### 2. 1. Les eaux non conventionnelles en Algérie

L'Algérie en vue d'assurer une sécurité future en matière de mobilisation de l'eau et faire face à la rareté de la ressource devant le phénomène de changement climatique, a tracé un plan d'action qui s'étend de 2010 à 2014, d'où sa situation en fin 2012 est comme suit:

#### 2. 1. 1. Mobilisation et transfert des eaux de mer dessalées

Trente (30) stations de dessalement de l'eau de mer sont en exploitation dont 21 monoblocs réalisée en 2001 et 09 grandes stations mises en service depuis 2005, à savoir : El Kahrama (Oran), El Hamma (Alger), Skikda, Béni Saf (Ain T'émouchent), Souk Tleta et Honaine (Tlemcen), Fouka (Tipaza), Cap Djinet (Boumerdes) et Mostaganem.

Le volume total mobilisé est de 535,55 hm<sup>3</sup>/an, pour satisfaire la demande en eau potable de 5 616 789 habitants.

Quatre (04) autres grandes stations situées dans les grandes villes de : Oran, Chlef, Tipaza et El Tarf, sont en cours et en voie de lancement de travaux :

- Deux (02) projets sont en cours de réalisation : Ténès et Magtaa pour une capacité totale de 700 000 m<sup>3</sup>/j, soit en volume annuel de production estimé à 255,50 hm<sup>3</sup>/an.
- Ténès (Chlef) d'une capacité de 200 000 m<sup>3</sup>/j.
- Magtaa (Oran) d'une capacité de 500 000 m<sup>3</sup>/j.
- Deux (02) projets sont en cours de lancement en travaux : El Chatt (El Tarf) et Oued Sebt (Tipaza) pour une capacité totale de 200 000 m<sup>3</sup>/j, soit en volume annuel 73 hm<sup>3</sup>/an.

---

### **2. 1. 2. Transfert et mobilisation des eaux usées épurées**

Afin de satisfaire les besoins en eau agricole, le plus grand consommateur de l'eau dans les régions déficitaires en ressources en eau conventionnelles, une nouvelle stratégie du ministère des ressources en eau, est celle de la réutilisation des eaux usées épurées. Elle consiste en la mobilisation des eaux usées épurées produites par les stations d'épurations pour la satisfaction des besoins en eau d'irrigation ou autres usages tels que les municipalités et l'industrie.

A l'état actuel, trois (03) projets sont mis en exploitation depuis 2007, situés dans les wilayas de Boumerdes, Bordj Bou Arreridj et Tlemcen. Le volume d'eaux usées épurées est estimé à 9,81 hm<sup>3</sup>/an satisfaisant en irrigation une superficie de près de 1 285 ha. S'ajoutent à ces volumes 79 hm<sup>3</sup>/an d'eaux usées épurées à mobiliser pour l'irrigation de plus de 7 570 ha, dans les wilayas de Constantine, Souk Ahras, Sétif et Oran.

Sept (07) études autres sont achevées, concernant les wilayas de : Alger(2), Ouargla, Mascara, Chlef, Médéa et Saida. Les résultats de ces études ont montré qu'il ya une possibilité de mobiliser 54,43 hm<sup>3</sup>/an d'eaux usées épurées pour satisfaire plus de 9 799 ha.

D'autre part, six (06) autres projets dont les études d'APD et de faisabilité sont en cours (Tipaza, Beni Messous, Skikda, Annaba et Laghouat), vont faire ressortir un volume supplémentaire de 51,36 hm<sup>3</sup>/an qui sera destiné à l'irrigation de 838 ha.

Les deux (02) grands projets structurants en matière de transfert et de mobilisation des eaux usées épurées sont celles de :

- Transfert et mobilisation de 31 hm<sup>3</sup>/an d'eaux usées épurées par la STEP de Baraki (Alger) dans le futur barrage Barek (Blida), pour l'irrigation de 6 000 ha situés dans la Mitidja Est. L'utilisation de cette ressource en eau non conventionnelle soulagera la nappe de la Mitidja.
- Transfert et mobilisation de 42 hm<sup>3</sup>/an d'eaux usées épurées par la STEP de Annaba dans le futur barrage Koudiet Mahcha (Annaba), pour l'irrigation de 1 000 ha (extension 9 000 ha), l'utilisation industrielle pour ArcelorMittal Algérie d'El Hadjar et Fertial.

---

### 2. 1. 3. Mobilisation et déminéralisation des eaux saumâtres

Le volume d'eaux saumâtres mobilisées actuellement est estimé à **510 hm<sup>3</sup>/an** dont **160 hm<sup>3</sup>/an** sont en exploitation pour satisfaire l'alimentation en eau potable.

Douze (**12**) stations sont en exploitation dans les wilayas de : Tlemcen, Oran, Tizi Ouzou, Bejaia, Illizi, Biskra, Ouargla, Médéa et Ain Defla. La production d'eau potable est de **24,2 hm<sup>3</sup>/an**. Aussi, **241 hm<sup>3</sup>/an** d'eaux saumâtres seront déminéralisés à partir d'un volume mobilisé de **464 hm<sup>3</sup>/an** et ce à travers **35** stations et monoblocs de déminéralisation qui sont en phase d'étude et de travaux, inscrites dans différents programmes.

La capacité globale des stations de déminéralisation des eaux saumâtres (SDES) est de **91,5 hm<sup>3</sup>/an**. Le débit global mobilisé en amont dépasse les **428,9 hm<sup>3</sup>/an**.

La situation se présente comme suit :

- En étude: **06 stations** (Tamanrasset 4. El Oued 2) dont 04 SDES dont les études sont achevées (El Oued 2 et Tamanrasset 2) ;
- Etude et réalisation : **01** station (Béchar) ;
- En travaux: **12** stations (Ouargla 10, El Oued et Tamanrasset(ADE));
- Travaux en cours de lancement : **02** station à l'indicatif de l'ADE (Tindouf et Illizi)
- Installation de SDES Monoblocs : **15** stations (El Oued) dont : **01** station achevée et mise en service (C. Réguiba) et **14** stations en cours d'installation.

---

### **3. Déminéralisation des eaux saumâtres**

#### **3. 1. Définitions:**

##### **3. 1. 1. Les eaux saumâtres**

Une eau saumâtre est une eau dont la teneur en sel est sensiblement inférieure à celle de l'eau de mer. La concentration totale de sel dissous y est généralement comprise entre 1 et 10 g/l alors qu'elle est (en moyenne) de 35 g/l pour l'eau de mer. (Définition sur wikipédia), ce sont parfois des eaux de surface mais le plus souvent des eaux souterraines qui sont chargées en sels en traversant les sols. Leur composition dépend donc de la nature des sols traversés. Les principaux sels dissous sont le  $\text{CaCO}_3$ , le  $\text{CaSO}_4$ , le  $\text{MgCO}_3$  et la  $\text{NaCl}$ .

##### **3. 1. 2. La déminéralisation des eaux**

Elle consiste à avoir une eau de faible concentration en sels dissous à partir d'une eau saumâtre ou salée (eau de mer) par des techniques tels que: échangeurs d'ions, la distillation et les procédés membranaire, cette dernière qu'on va se focaliser et qui représente la technique utilisée dans notre thème d'étude.

#### **3. 2. Les procédés membranaires**

La filtration par membranes est une technologie qui s'effectue par différence de pression avec des tailles de pores, variant de poids moléculaire de 100 à 5 microns.

Les technologies de la filtration par membranes sont:

##### **3. 2. 1. Osmose Inverse (OI)**

L'Osmose Inverse est un procédé de haute pression, énergétiquement performant, utilisé pour l'élimination de l'eau par concentration de composés à faible poids moléculaire. L'Osmose Inverse peut aussi être utilisé pour le traitement des eaux usées. Ce procédé est couramment utilisé pour la pré-concentration des produits laitiers ou alimentaires avant l'évaporation, le traitement des condensats des évaporateurs et la purification des eaux de process.

##### **3. 2. 2. Nanofiltration (NF)**

La Nanofiltration est un procédé de filtration unique dont le domaine d'application se situe entre l'Ultrafiltration et l'Osmose Inverse. Elle est conçue pour obtenir une séparation très spécifique de composés à faible poids moléculaire, tels que les sucres, des minéraux dissous et des sels. Ce procédé inclut la déminéralisation des produits laitiers, la récupération des protéines hydrolysées, la concentration des sucres ainsi que la purification des colorants solubles et des pigments.

---

### **3. 2. 3. Ultrafiltration (UF)**

L'Ultrafiltration est un procédé de séparation sélective utilisé pour concentrer et purifier les composés de poids moléculaire moyen ou fort tels que les protéines de lait ou végétales, les glucides et les enzymes. Les domaines d'application sont notamment la concentration des protéines sériques, la concentration et la déminéralisation des gélatines et la clarification des jus de fruit.

### **3. 2. 4. Microfiltration (MF)**

La Microfiltration est un procédé basse pression qui permet de séparer des composés à grand poids moléculaire (éléments en suspension ou éléments colloïdaux) des solides dissous. Ce procédé inclut la récupération de cellules issues de bouillons de fermentation, le fractionnement de protéines de lait, la clarification du sirop de maïs et la récupération de produits chimiques utilisés dans les phases de Nettoyage en Place (NEP).

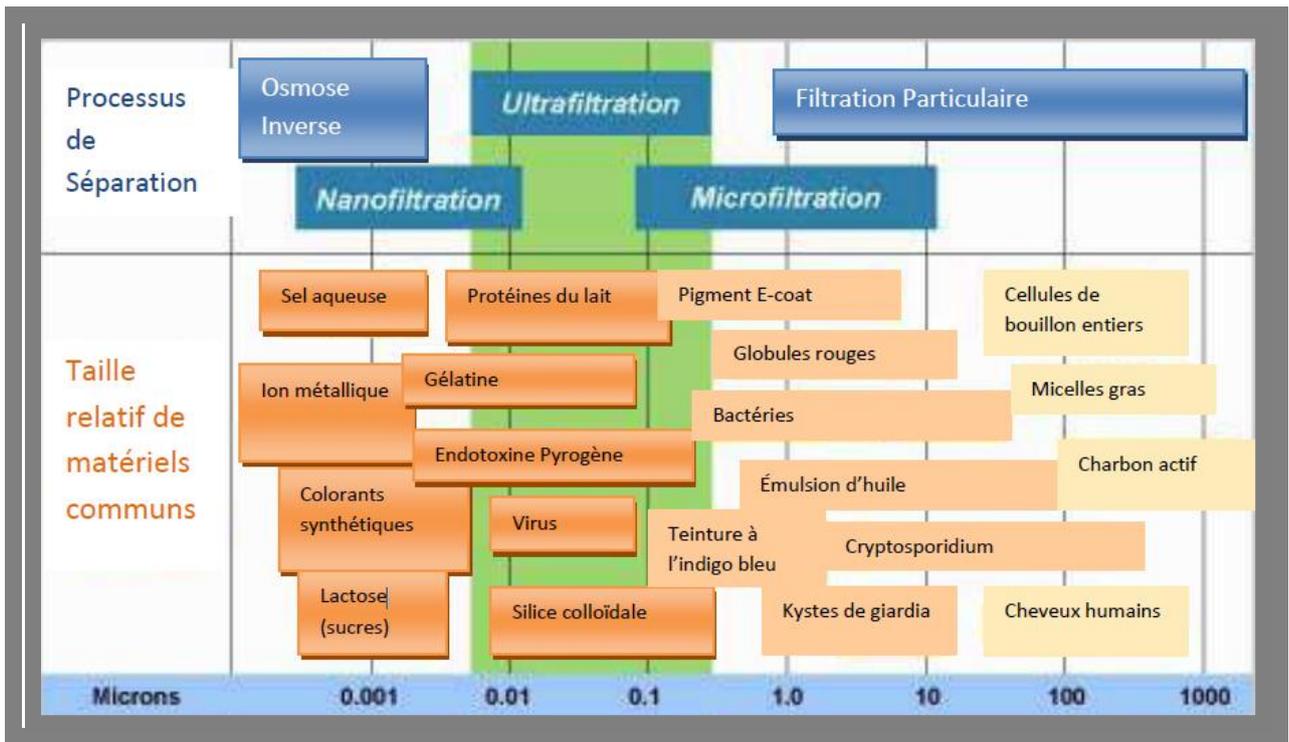


Figure 48: Gamme de filtration (source: [www.safewater.org](http://www.safewater.org) - 2004)

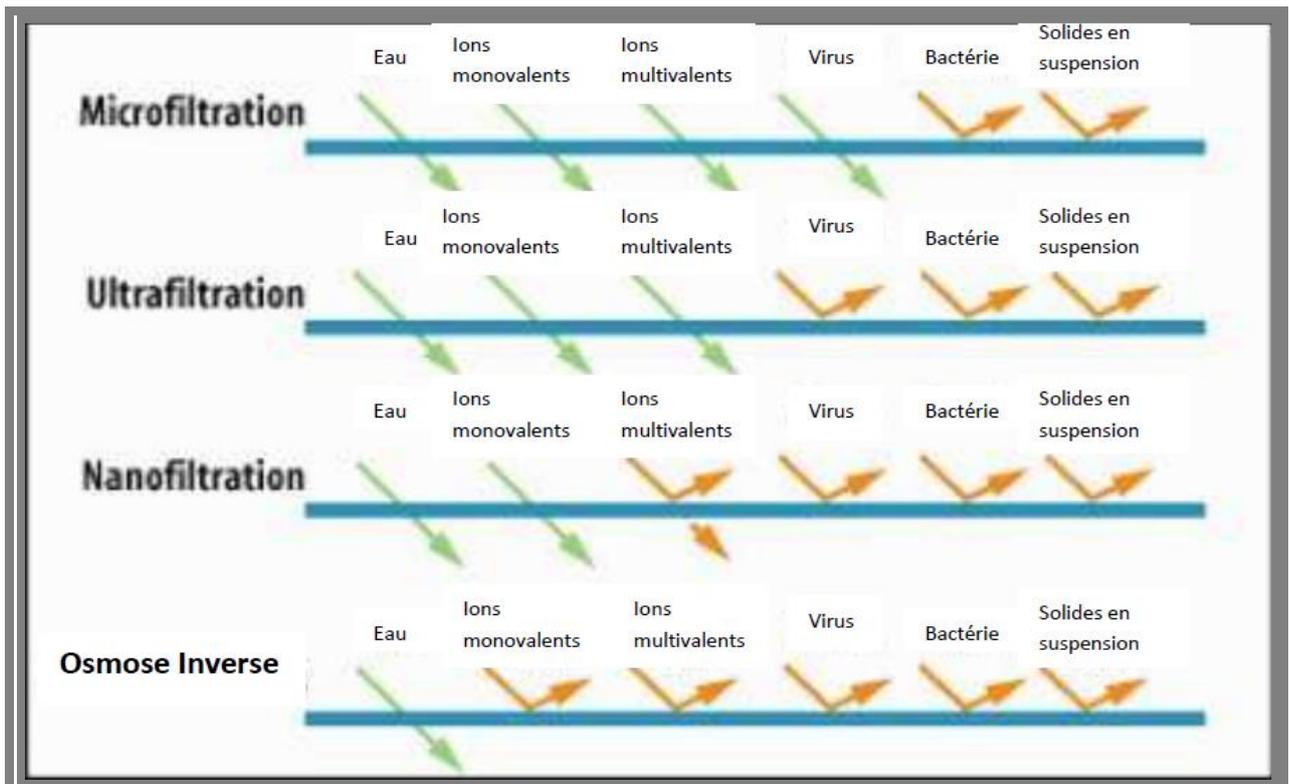


Figure 49: Caractéristiques des Processus des Membranes

#### 4. Principe de l'osmose inverse

L'osmose est le transfert de solvant à travers une membrane sous l'effet d'un gradient de concentration. Si on considère un système à deux compartiments séparés par une membrane semi-sélective et contenant deux solutions de concentrations différentes (**Fig. 50**), l'osmose se traduit par un flux d'eau dirigée de la solution diluée vers la solution concentrée.

##### 4.1. Pression osmotique

Si on applique une pression sur la solution concentrée, la quantité d'eau transférée par osmose va diminuer. Avec une pression suffisamment forte, le flux d'eau va même s'annuler: cette pression est nommée la pression osmotique  $P$  (en faisant l'hypothèse que la solution diluée est de l'eau pure).

##### 4.2. Osmose inverse

Si on dépasse la valeur de la pression osmotique, on observe un flux d'eau dirigé en sens inverse du flux osmotique: c'est le phénomène d'osmose inverse.

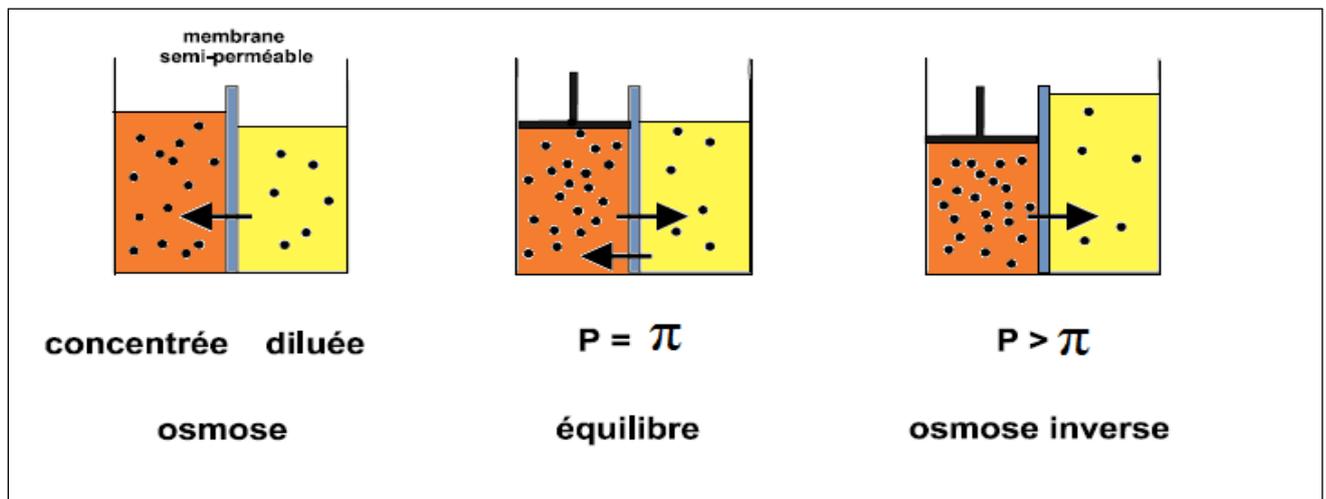


Figure 50: Principe de l'osmose inverse

La pression osmotique des électrolytes est donnée par la relation suivante:

$$\pi = i \cdot C \cdot R \cdot T \quad [9]$$

où  $i$  est le nombre d'espèces d'ions constituant le soluté,  $C$  la concentration molaire du soluté ( $\text{mol.m}^{-3}$ ),  $T$  la température en (K) et  $R$  la constante des gaz parfaits ( $8,31 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ).

$\pi$  est exprimée en pascals. Cette relation est valable pour des solutions diluées.

Exemple: la pression osmotique de l'eau de mer (3 % en masse de chlorure de sodium) à 25 °C est environ de 25 bars.

### 4. 3. Mécanisme diffusionnel

En osmose inverse les transferts de solvant et de soluté se font par solubilisation - diffusion: toutes les espèces moléculaires (soluté et solvant) se dissolvent à travers la membrane et diffusent à l'intérieur de celle-ci comme dans un liquide sous l'action d'un gradient de concentration et de pression. Le transfert ne dépend donc plus de la dimension des particules mais de leur solubilité dans le milieu membranaire. Les séparations sont donc d'origine chimique et sont liées au pouvoir solvant de la membrane.

### 4. 4. Membrane semi-sélective

Une membrane semi-sélective est une membrane permettant certains transferts de matière entre deux milieux qu'elle sépare, en interdisant d'autres ou plus généralement en favorisant certains par rapport à d'autres. L'osmose inverse est un procédé de séparation en phase liquide par perméation à travers des membranes semi-sélectives sous l'effet d'un gradient de pression. L'écoulement s'effectue en continu tangentielllement à la membrane. Une partie de la solution à traiter (débit  $Q_0$ ) se divise au niveau de la membrane en deux parties de concentrations différentes:

- une partie (débit  $Q_p$ ) passe à travers la membrane (perméat)
- une partie qui ne passe pas à travers la membrane (concentrat ou retenat) et qui contient les molécules ou particules retenues par la membrane.

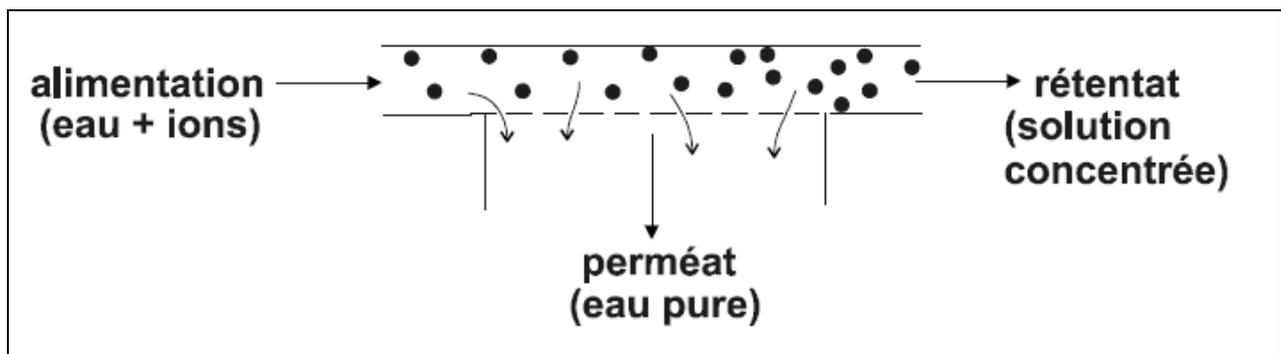


Figure 51: Membrane semi-sélective

La fraction de débit qui traverse la membrane est le taux de conversion  $Y$  défini par la relation:

$$Y = Q_p / Q_0 \quad [10]$$

Le flux de matière intéressant est suivant les cas le perméat (cas de la déminéralisation d'eau) ou le concentrat (concentration de produits alimentaires). Le débit de la solution d'alimentation peut atteindre une valeur 500 fois supérieure à celle du débit de perméat.

---

Lors d'une filtration classique la suspension à traiter est amenée perpendiculairement au milieu filtrant; l'accumulation de matières forme une couche qui diminue la porosité et ainsi le débit de filtration. L'écoulement tangentiel permet au contraire de limiter l'accumulation sur la membrane des diverses espèces (particules, molécules, ions) retenues par cette dernière.

La sélectivité d'une membrane est définie par le taux de rejet  $T_R$  (ou taux de rétention) de l'espèce que la membrane est censée retenir :

$$T_R = C_0 - C_p / C_0 = 1 - (C_p / C_0) \quad [11]$$

où  $C_0$  est la concentration de l'espèce à retenir dans la solution.

et  $C_p$  est la concentration de la même espèce dans le perméat.

Dans le cas de l'osmose inverse, le soluté de référence est souvent le chlorure de sodium (NaCl), la déminéralisation des eaux étant l'application la plus importante. Certaines membranes développées pour le dessalement de l'eau de mer ont un taux de rejet au chlorure de sodium de 99 % environ. D'autres, développées pour le dessalement des eaux saumâtres, présentent un taux de rejet au NaCl de 96 %.

#### 4. 5. Les membranes

Représentent le cœur du système de concentration par osmose inverse, sont le plus souvent fabriqués en acétate de cellulose ou en polymères de synthèse (polyamides, polysulfones). Elles peuvent être planes ou tubulaires (épaisseur de l'ordre de 200  $\mu\text{m}$ ) ou en fibres creuses obtenues en filant des polymères (diamètre intérieur de 25 à 800  $\mu\text{m}$  et diamètre extérieur de 50 à 1000  $\mu\text{m}$ ) Les membranes sont caractérisées par leur qualités de stabilité chimique (pH, oxydants, dichlore ...), de stabilité thermique (important facteur pour les utilisations biologiques où il y a stérilisation en autoclave), de stabilité microbiologique (dégradation bactérienne pour les membranes en acétate de cellulose) et de résistance mécanique. Leur coût intervient dans 40 à 50 % de l'investissement d'une unité d'osmose inverse.

Pour être mises en œuvre les membranes doivent être montés dans des supports appelés modules, une enceinte résistant à la pression est toujours nécessaire. On trouve trois types principaux:

- module spirale: une membrane plane est enroulée autour d'un tube creux collecteur de perméat.
- module tubulaire: une membrane tubulaire est fixée sur un support poreux.
- module à fibres creuses: les fibres en U sont mises en faisceau et assemblées de façon à réaliser l'étanchéité aux deux extrémités du module. Le liquide à traiter circule perpendiculairement à l'axe des fibres tandis que le concentrat est recueilli dans une

enceinte qui enveloppe le faisceau et permet son évacuation à une des extrémités du module. Le perméat s'écoule à l'intérieur de chacune des fibres puis dans un collecteur.

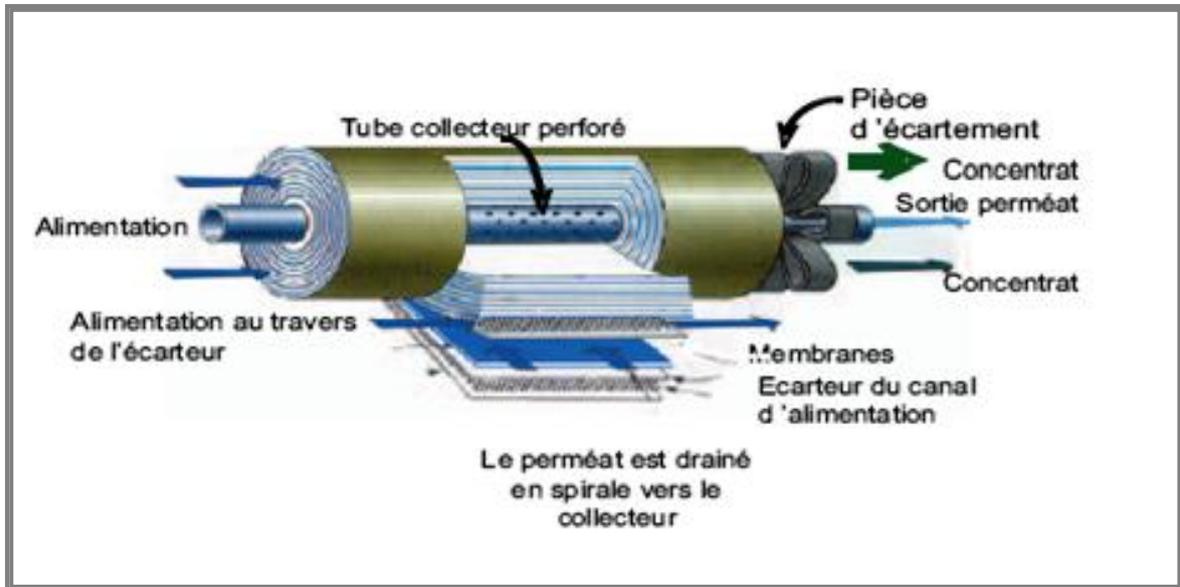


Figure 52 : schéma d'une membrane d'osmose inverse

#### 4. 6. Polarisation et colmatage

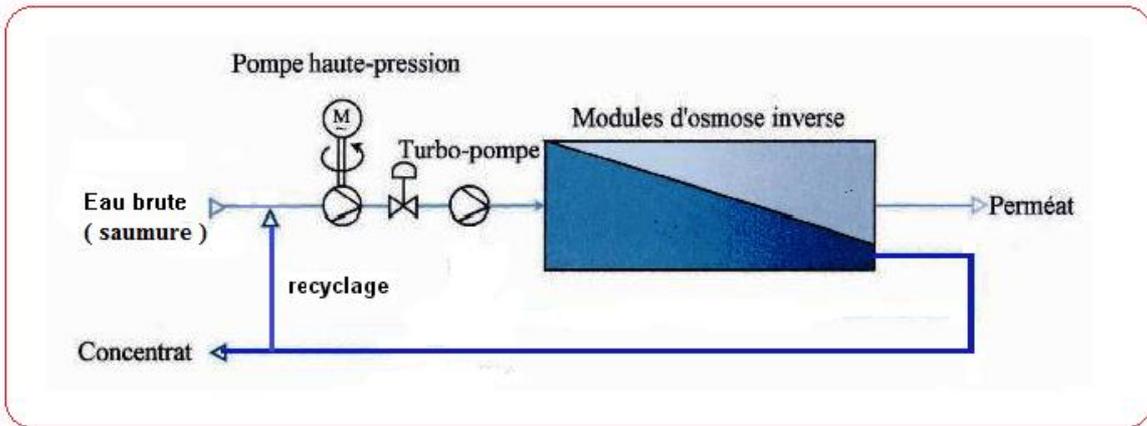
La polarisation, apparaissant en osmose inverse, est un phénomène réversible (disparaissant quand le gradient de concentration s'annule) caractérisé par une accumulation à la surface de la membrane des espèces retenues. La concentration étant à la surface plus élevée que dans le volume de la solution il s'ensuit une augmentation de la pression osmotique près de la membrane et donc une diminution de la pression efficace  $\Delta P - \Delta \pi$  : le flux de perméat va donc diminuer. Le colmatage est possible en osmose inverse. On peut atteindre la limite de solubilité des sels au niveau des membranes et avoir une formation de tartre lors de la déminéralisation d'eaux salines.

#### 4. 7. Procédé

Les unités d'osmose inverse comportent principalement en plus des modules les éléments suivants:

- une pompe à haute pression (40 à 80 bars) pour l'osmose inverse.
- un échangeur de chaleur pour maintenir les liquides aux températures souhaitées.

Les procédés existent en discontinu comme en continu avec dans les deux cas des montages permettant le recyclage des concentrates pour améliorer la séparation. Une étape d'élimination préalable des plus grosses particules est toujours nécessaire.



**Figure 53: Schéma détaillé d'unité d'osmose inverse (d'après le site de GLS industrie)**

#### **4. 8. Application de l'osmose inverse**

Les principales applications de l'osmose inverse sont les suivantes:

- Traitement des eaux: dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres, production de l'eau ultra pure (industries électronique, pharmaceutique, AEP ...).
- Extraction de protéines du lactosérum dans l'industrie laitière.

#### **4.9. Conclusion**

La déminéralisation des eaux saumâtres par les procédés membranaire, notamment l'osmose inverse est devenue une alternative efficace à l'accès à l'eau de bonne qualité que ce soit pour l'AEP que pour l'irrigation, surtout dans les zones à climat semi-aride et aride, dépourvue des ressources en eau conventionnelles, ce procédé s'est imposé ces dernières années vis à d'autres techniques classiques avec les développement qui la connu et son cout qui devient plus bas par rapport aux années précédentes.

## 5. Stations de déminéralisation Ouled Abbas

### 5. 1. Présentation

Dans le cadre du développement local de la commune de Sidi Fredj, qui s'inscrit dans la démarche intégrée de l'état de la lutte contre la pauvreté et l'exclusion dans la Wilaya de Souk Ahras. Le ministère de la solidarité nationale et de la Famille et de la condition de la femme et la coopération Belge au développement ont lancé effectivement un programme en mai 2008 qui touche plusieurs domaines de l'amélioration de vie de la population de la commune à savoir: l'accompagnement scolaire, le secteur des routes, le secteur de la jeunesse, le secteur de santé, le secteur des infrastructures et le secteur de l'eau avec l'installation de deux (02) stations de déminéralisation par osmose inverse pour améliorer l'alimentation en eau potable de certains mechtas (eau saumâtre),



Figure 54: Station de déminéralisation des eaux de à l'osmose inverse d'Oueld Abbas

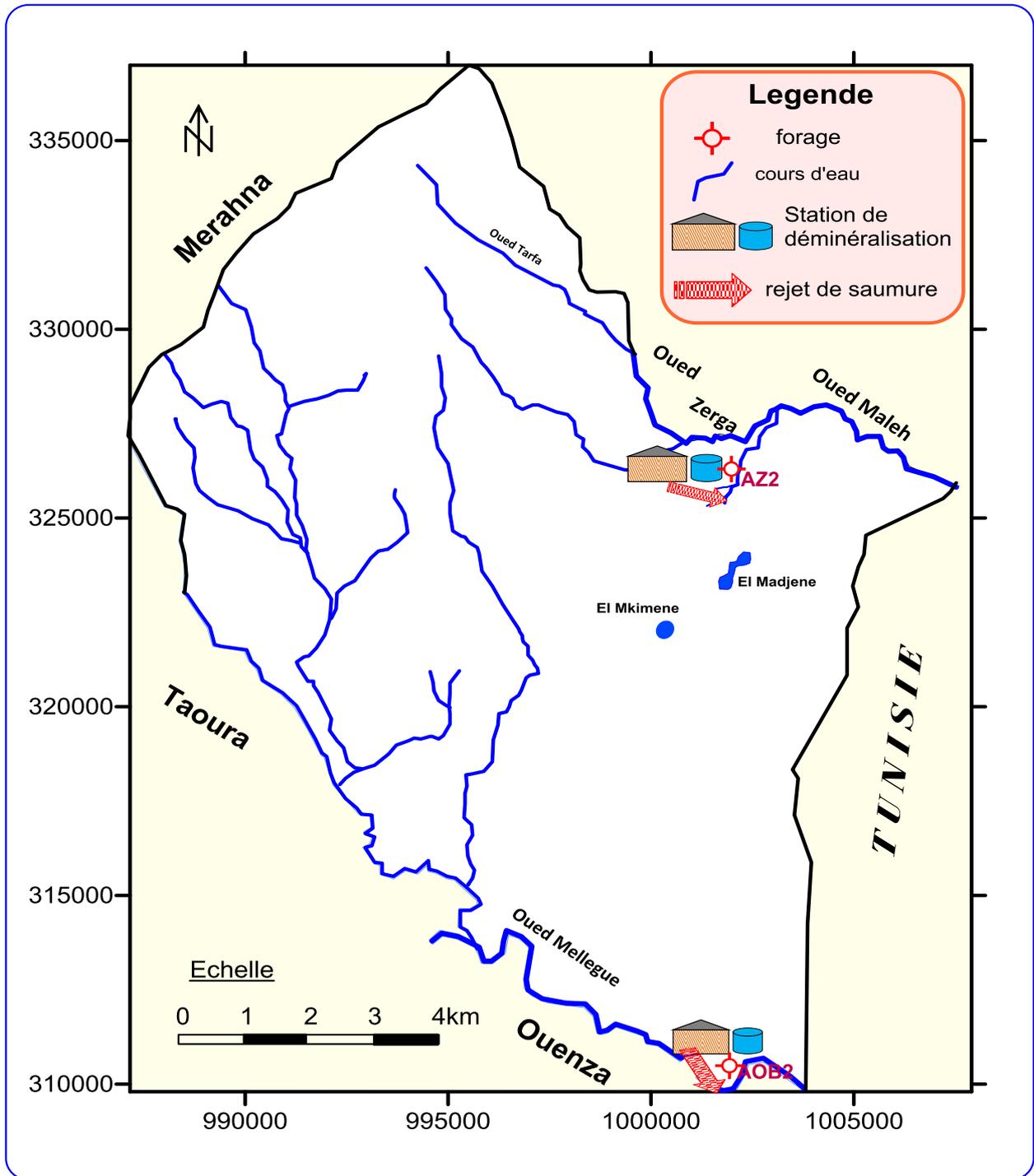
---

## 5. 2. Les 2 stations de déminéralisation des eaux par l'osmose inverse (OI)

- a) **La station d'Ouled Abbas:** à été installée pour traiter l'eau du forage AOB2, au Sud du site d'étude (**Fig. 55**), près de 50 m de l'oued Mellegue, là où il déverse ces rejets. La salinité de l'eau brute à l'entrée de la station est de **5 g/l**, de capacité de production de l'eau douce de **220 m<sup>3</sup>/j** dans 12 heures de marche par jour (débit de permeat = **18.3 m<sup>3</sup>/h**) et un taux de conversion de **83%**.
- b) **La station d'Ain Zargua :** pour traiter l'eau du forage AZ2, à l'Est de la zone d'étude (**Fig. 55**), avec les mêmes capacités de production et performances de celle d'Ouled Abbas. La salinité de l'eau brute à l'entrée de la station est de **3 g/l**, ces rejets se déversent à l'oued El Maleh.

La firme chargé de l'installation des deux (O2) stations de déminéralisation est **Protecno** (water treatment plants & systems, Italie) spécialisé en traitement des eaux, le projet d'installation a commencé en 2008, et leurs mise en service était en 2011.

Le cout d'investissement des 2 stations s'est levé à 110 million de DA, englobe le coût de des installations et équipements, des travaux de géni civil et le tirage des canalisations, avec un financement Algéro-Belge



### 5. 2. 1. Description des stations de déminéralisation

Les principaux composants du système de déminéralisation à l'osmose inverse installés aux deux stations de notre objet d'étude sont énumérés ci-dessous et représentés dans la (fig. 56)

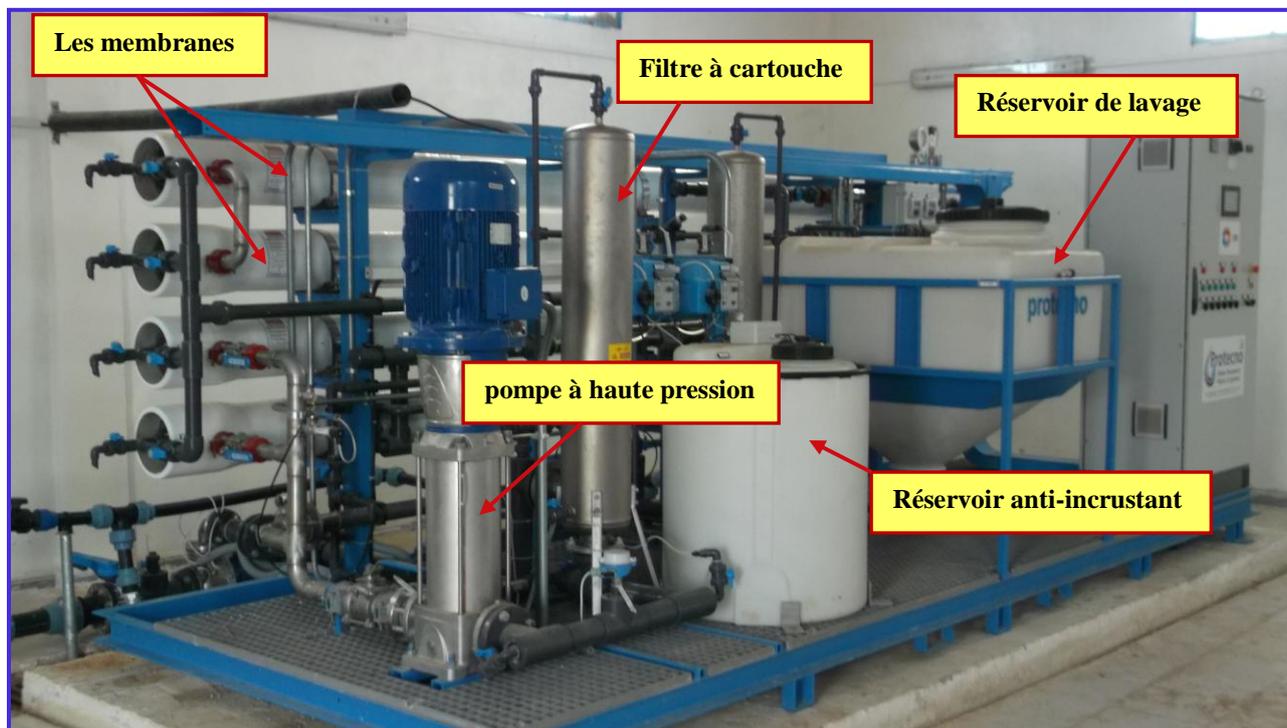


Figure 56: Composants de la station de déminéralisation à l'osmose inverse (Ouled Abbas)

#### 5. 2. 1. 1. Filtre à cartouche

Sert pour capter les impuretés présent dans l'eau de l'alimentation, avec un indice de filtrage à  $5\mu\text{m}$ , est le prétraitement minimum qu'il faut pour le système OI. C'est une précaution pour protéger les pompes à haute pression et les membranes.

#### 5. 2. 1. 2. Pompe à haute pression

L'eau qui sort des filtres à cartouche va directement dans la suction de pompes d'alimentation osmotique, qui le canalise directement sous pression aux membranes osmotiques. La pompe porte les caractéristiques suivantes:

Tableau 31: Caractéristiques de la pompe à haute pression

|   |                        |
|---|------------------------|
| Producteur                              | LOWARA                 |
| Modèle                                  | SV-3306                |
| Flux                                    | 21.7 m <sup>3</sup> /h |
| H                                       | 13.3 bar               |
| Vitesse de rotation                     | 2.900 t/min            |
| Puissance nominale du moteur électrique | 15 KW                  |
| Tension d'alimentation                  | 400 V 50 Hz            |

### 5. 2. 1. 3. Les membranes

C'est le cœur de la station de déminéralisation, a pour objectif d'intercepter les sels minéraux les bactéries et les virus présents dans l'eau, ils sont de nombre de 16 en polyamides 8" avec les caractéristiques suivantes :

**Tableau 32: Caractéristiques des membranes**

|                       |            |
|-----------------------|------------|
| Diamètre              | 8"         |
| Dimension             | 40"        |
| Température en marche | 5 ÷ 45°C   |
| Max. Pression exercée | 28 bar     |
| Tolérance de chlore   | < 0.1 mg/l |
| pH                    | 2 ÷ 11     |

### 5. 2. 1. 4. Pompe de dosage de l'anti-incrustant

L'ajout d'agents anti-incrustant est très important pour le projet et la gestion d'une station d'osmose inverse. Les anti-incrustants les plus courants agissent avec calcium et magnésium carbonates et sulfates, et les anti-incrustants spéciales agissent avec le fer et Silice.

Le réglage du dosage de l'anti-incrustant doit suivre exactement des données analytiques.

Le système de dosage de l'anti-incrustant est composé d'un réservoir de 200 litres et une pompe porte les caractéristiques suivantes:

**Tableau 33: Caractéristiques de la pompe d'injection de l'anti-incrustant**

|                          |         |
|--------------------------|---------|
| Producteur               | ETATRON |
| Flux                     | 1 l/h   |
| Pression en marche       | 10 bar  |
| Matériel de construction | PVC     |
| Tension d'alimentation   | 220 V   |

### 5. 2. 1. 5. Dispositif de nettoyage

Composé d'un réservoir pour préparation la solution de lavage (avec des produits chimiques spécifiques), une pompe pour lavage et après lavage et un filtre à cartouche pour le lavage et après lavage. Ce dispositif a pour rôle le nettoyage des membranes contre le colmatage. Les deux plus fréquents motifs du colmatage d'une membrane sont dus à la contamination biologique et à la précipitation des sels et oxydes qui produisent l'incrustation. La solution de nettoyage après épuisement s'écoule librement et sera drainé dans le canal de l'eau rebutée (rejetée).

---

### 5. 2. 1. 6. Réservoir d'eau

le perméat obtenue (eau bonne), après l'opération de l'osmose inverse sera en suite stockée dans un réservoir de capacité de **400 m<sup>3</sup>**, ce dernier est équipé de pompes pour alimenter un château d'eau pour l'alimentation gravitaire de la population, et une vanne pour remplissage des citernes.

### 5. 2. 2. Les paramètres de marche des stations d'OI et qualité de l'eau osmosée

Durant la mise en service des 2 stations de déminéralisation, et en vue de connaître ses performances, nous avons procédé au:

1. Calcul du taux de conversion **Y**
2. Calcul du taux de rétention **T<sub>R</sub>** des membranes
3. Analyse de l'eau obtenue après l'opération de la déminéralisation (perméat), et voir si ces paramètres physico-chimiques répondent aux normes Algériennes de potabilité, tout en sachant l'analyse de l'eau brute de chaque forage qui les alimentent

#### 5. 2. 2. 1. Le taux de conversion **Y (%)**

calculé suivant la formule [10] :  $Y = Q_P / Q_0$

avec **Q<sub>P</sub>**: débit d'eau du perméat; **Q<sub>0</sub>**: débit d'eau brute,

Les deux stations travaillant chacune avec un débit d'eau brute **Q<sub>0</sub> = 22 m<sup>3</sup>/h** (6 l/s),

le débit de rejet de saumure est de **3.7 m<sup>3</sup>/h**, et le débit du perméat **Q<sub>P</sub> = 18.3 m<sup>3</sup>/h**,

et par conséquent le taux de conversion **Y (%) = 83 %**.

#### 5. 2. 2. 2. Le taux de rétention **T<sub>R</sub> (%)**

calculé par la formule [11] :  $T_R (\%) = 1 - C_P / C_0$

avec **T<sub>R</sub>**: taux de rétention; **C<sub>P</sub>** : la concentration du soluté dans l'eau d'alimentation et

**C<sub>0</sub>**: la concentration du soluté dans le perméat.

Les résultats sont récapitulés dans les (**Tab. 31 et 32**), et montrent que ces valeurs sont comprises comme suit: **83 % > T<sub>R</sub> (%) < 94 %**.

### 5 2. 3. Analyse de l'eau

L'eau obtenue (permeat) après l'opération de déminéralisation dans les 2 stations de très bonne qualité, et ces paramètres répondent tous aux normes algériennes de potabilité, voir (Tab. 34 et 35).

**Tableau 34: Paramètres Physico-chimiques de l'eau du forage AOB2, du perméat et le taux de rétention des ions de la station Ouled Abbas**

| Paramètres Physico-chimiques  | Unité | Eau brute forage AOB2 | Perméat | Norme     | T <sub>R</sub> (%) |
|-------------------------------|-------|-----------------------|---------|-----------|--------------------|
| T                             | °C    | 22.5                  | 23.7    | -         | -                  |
| pH                            | -     | 7.5                   | 7.3     | 6.5 - 8.5 | -                  |
| TDS                           | mg/l  | 5037                  | 410     | -         | -                  |
| CE                            | μS/cm | 6280                  | 739     | 2800      | -                  |
| Ca <sup>2+</sup>              | mg/l  | 420                   | 26.5    | 200       | 93.7 %             |
| Mg <sup>2+</sup>              | mg/l  | 161                   | 10      | 150       | 93.8 %             |
| Na <sup>+</sup>               | mg/l  | 752                   | 112     | 200       | 85.1 %             |
| Cl <sup>-</sup>               | mg/l  | 988                   | 160     | 500       | 83.8 %             |
| HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | mg/l  | 382                   | 61.5    | -         | 83.9 %             |
| SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | mg/l  | 1684                  | 116     | 400       | 93.1 %             |

**Tableau 35: Paramètres Physico-chimiques de l'eau du forage AZ2, du perméat et le taux de rétention des ions de la station Ain Zargua**

| Paramètres Physico-chimiques  | Unité | Eau brute forage AZ2 | Perméat | Norme     | T <sub>R</sub> (%) |
|-------------------------------|-------|----------------------|---------|-----------|--------------------|
| T                             | °C    | 23                   | 24.5    |           | -                  |
| pH                            | -     | 7.2                  | 6.9     | 6.5 - 8.5 | -                  |
| TDS                           | mg/l  | 3200                 | 410     | -         | -                  |
| CE                            | μS/cm | 4650                 | 535     | 2800      | -                  |
| Ca <sup>2+</sup>              | mg/l  | 540                  | 35      | 200       | 93.5 %             |
| Mg <sup>2+</sup>              | mg/l  | 251                  | 16      | 150       | 93.6 %             |
| Na <sup>+</sup>               | mg/l  | 110                  | 17      | 200       | 84.5 %             |
| Cl <sup>-</sup>               | mg/l  | 663                  | 109     | 500       | 83.6 %             |
| HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | mg/l  | 435                  | 71      | -         | 83.8 %             |
| SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | mg/l  | 1148                 | 84      | 400       | 92.7 %             |

#### 5. 2. 4. Synoptique du système d'osmose inverse

Le synoptique du système d'osmose inverse (**Fig. 57**), représente le tableau de bord de l'installation. Il comporte ses équipements et composants, ainsi que les paramètres de marche de cette installation, en plus ces performances (conductivité électrique à l'entrée et à la sortie)

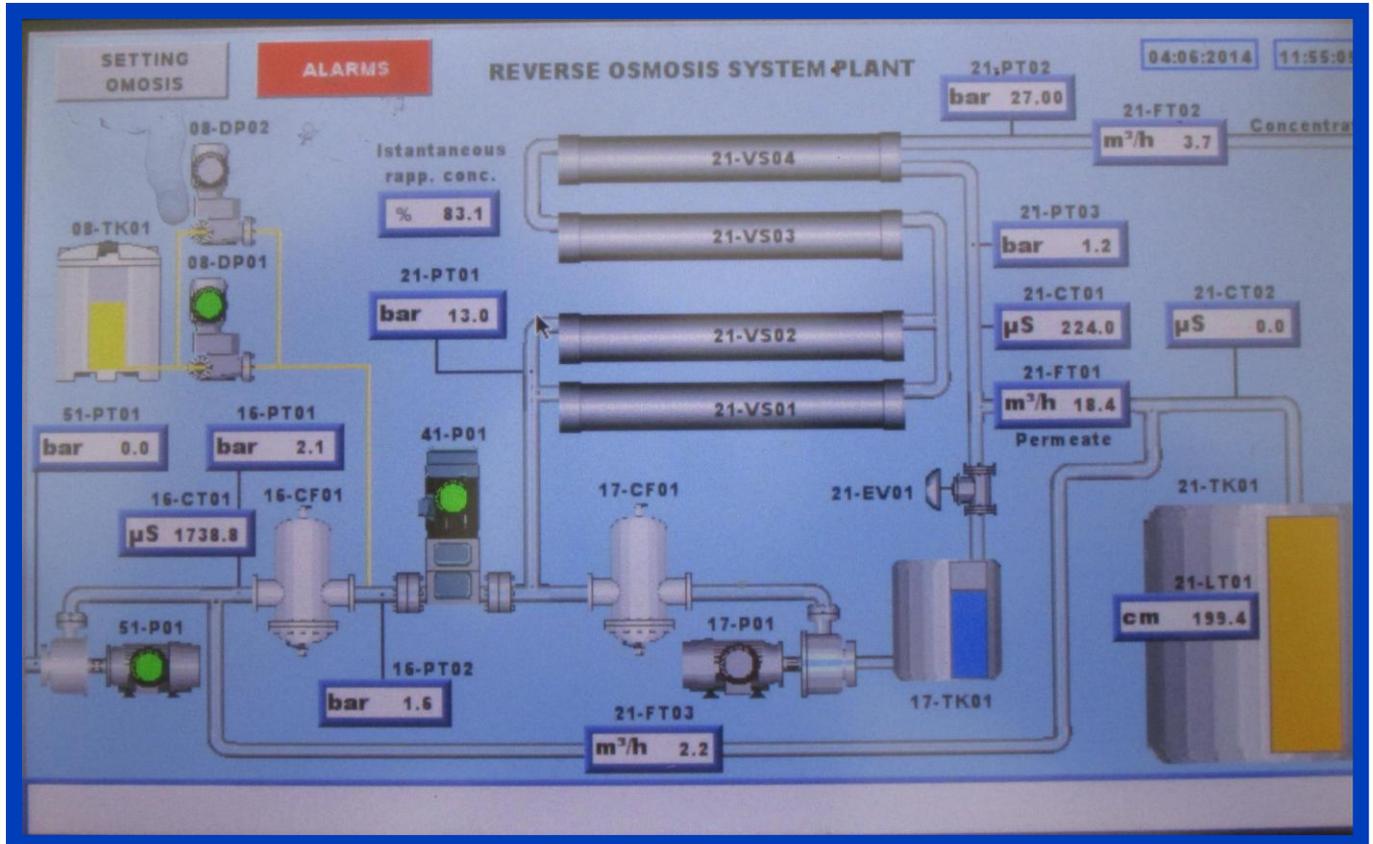


Figure 57: Synoptique de l'unité d'osmose inverse

### 5. 2. 5. Les rejets

Les rejets de chaque station sont représentés par le concentrât de débit de  $3.7 \text{ m}^3/\text{h}$  à raison de 12 heures de marche par jour, ce qui donne un débit journalier de  $44.4 \text{ m}^3/\text{j}$ , plus les rejets du drainage de la solution de nettoyage des membranes, et le produit de conditionnement des eaux à l'entrée (anti-incrustant), tous drainent dans un canal en béton,

Pour la station de Ouled Abbas, l'eau chargée s'écoule directement vers L'oued Mellegue, tandis que pour la station de Ain Zargua, s'écoule vers un canal qui jette sur l'oued El Maleh



Figure 58: Rejets de la station d'Ouled Abbass



Figure 59 : Déversement des rejets vers Oued Mellègue

---

## 6. Impact des 2 stations de déminéralisation sur l'environnement

### 6.1. Impacts environnementaux

L'étude des impacts environnementaux d'une usine de dessalement doit se focaliser notamment sur les deux aspects les plus critiques : les rejets des saumures sur l'écosystème et l'accroissement de la consommation énergétiques par rapport aux autres alternatives de ressources en eau potables. (C.M. Friexa 2009)

Les 2 unités de déminéralisation offre l'avantage aux habitants des mechtas avoisinantes l'accès à l'eau potable après une pénurie atroce, et présente en même temps un alea pour l'écosystème

Ces 2 stations mises à l'étude, sont des installations de petites capacité de production, et par conséquent de petite consommation électrique, et des rejets de saumures à faibles débit.

#### 6.1.1. Energie électrique

Le principal consommateur de l'énergie électrique dans toute la station de l'OI est la pompe à haute pression ( $P = 13$  bars), en plus les autres pompes, l'éclairage et autres, donnant un ratio de consommation électrique de  $1 \text{ kWh/m}^3$ .

#### 6.1.2. Les rejets liquides

Les rejets liquides des 2 stations de déminéralisation à l'osmose inverse sont:

##### 6.1.2.1. Rejets de la saumure

Chaque station rejette quotidiennement un débit de saumure (concentrât) de  $3.7 \text{ m}^3/\text{h}$ , les concentrations de quelques paramètres physico-chimiques des concentrâts sont résume dans les (Tab. 36 et 37), et ceux des milieux récepteurs, il s'agit de l'oued Mellegue pour la station Oued Abbas, et l'Oued El Maleh pour la station Ain Zargua,

Il faut noter aussi que le canal de drainage pour la station de Ouled Abbas, construit en béton rejette sur canal en terre avant d'atteindre l'oued sur environ de **30** mètres, la même chose pour celui de la station Ain Zargua, mais cette fois-ci rejette dans canal de terre distant de environ **500** m avant de d'arriver l'oued El Maleh.

**Tableau 36: paramètres physico-chimiques des eaux de drainage de la station de Ouled Abbas et du milieu récepteur (Oued Mellègue)**

| Paramètres                    | Unité | Concentrât (rejet) | Oued Mellegue |
|-------------------------------|-------|--------------------|---------------|
| T                             | °C    | 23.7               | 17.8          |
| PH                            | -     | 7.2                | 8.04          |
| TDS                           | mg/l  | 6680               | 9223          |
| CE                            | μS/cm | 10254              | 11500         |
| Na <sup>+</sup>               | mg/l  | 1153               | 1987          |
| Cl <sup>-</sup>               | mg/l  | 1403               | 2983          |
| SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | mg/l  | 2563               | 1243          |

**Tableau 37: paramètres physico-chimiques des eaux de drainage de la station de Ain Zargua et du milieu récepteur (Oued El Maleh)**

| Paramètres                    | Unité | Concentrât | Oued El Maleh |
|-------------------------------|-------|------------|---------------|
| T                             | °C    | 24.5       | 20            |
| pH                            | -     | 6.7        | 8.03          |
| TDS                           | mg/l  | 3791       | 4137          |
| CE                            | μS/cm | 7593       | 6700          |
| Na <sup>+</sup>               | mg/l  | 169        | 710           |
| Cl <sup>-</sup>               | mg/l  | 942        | 1245          |
| SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | mg/l  | 1747       | 996           |

Les deux tableaux montrent que les eaux chargées de drainage présentent des taux de salinités inférieurs à celles des oueds où elles déversent, et ce suite aux salinités très élevées des eaux de ces oueds par rapport des rejets, à l'exception des concentrations des ions de SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> qui sont très élevés par rapport à celles des 2 oueds.

Il faut noter aussi que ces eaux chargées rejetées sur le sol avant d'atteindre les oueds, l'infiltration favorise ainsi la concentration des ions dans le sol, cette situation est plus accentuée dans la station de Ain Zargua vu à son éloignement à l'oued El Maleh, d'où la nécessité de prolonger le canal étanche pour éliminer cet aléa.

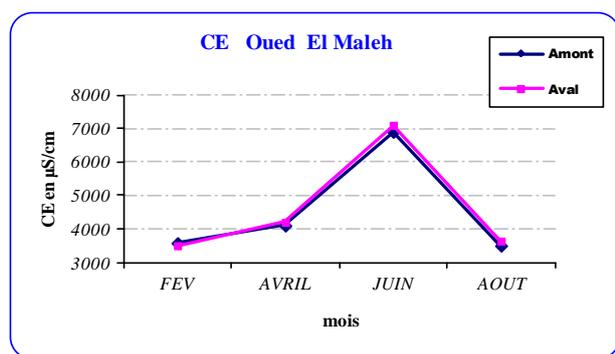
### 6. 1. 2. 2. Autres rejets

Les rejets contiennent aussi des résidus des produits de conditionnement des eaux, utilisés dans ces systèmes à fin d'éviter le l'entartrage des équipements et le colmatage des membranes, ce sont des produits chimiques dosés continuellement dans l'eau brute à l'aide d'une pompe doseuse, de telle sorte d'avoir une concentration de 4 ppm.

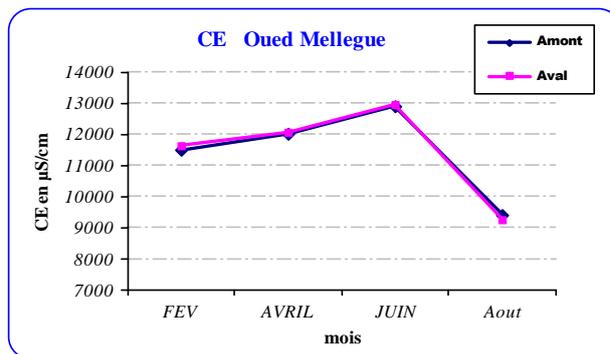
Il y aussi le rejets de produits de nettoyage des membranes, cette opération se fait périodiquement pour débarrasser des impuretés accumulés sur les membranes et qui dégrade ses performances, les symboles des produits chimiques de nettoyage utilisés on peut cités : (NaOH hydroxyde de sodium ; Na-EDTA est le sel de sodium de éthylène diamine tetracétique acide ; Na-DDS est le sel de sodium de dodecylsulphate ; STP est sodium triphosphate ( $\text{Na}_5 \text{P}_3 \text{O}_{10}$ ) ; HCl est acide hydrochlorique ;  $\text{H}_3 \text{PO}_4$  est acide phosphorique...).

### 6. 2. Contrôle de l'eau des oueds

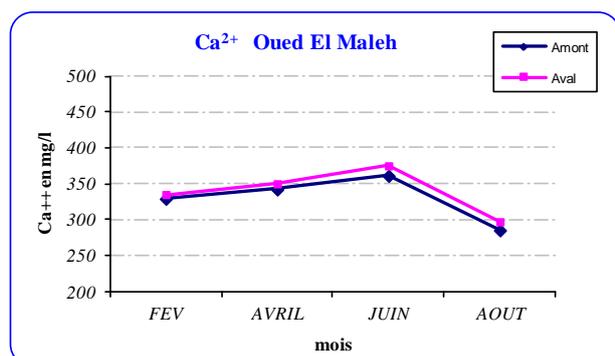
Pour renforcer notre étude, et dans l'objectif de savoir mieux l'influence des rejets liquides chargés sur les eaux des oueds récepteurs El Maleh et Mellegue, nous avons procédé a échantillonné ces eaux en amont et en aval de chacun (100 m de chaque coté) par rapport aux points de rejet des 2 stations de déminéralisation. Quatre (04) séries de prélèvement ont été effectués durant les mois de février, avril, juin et Aout 2014.



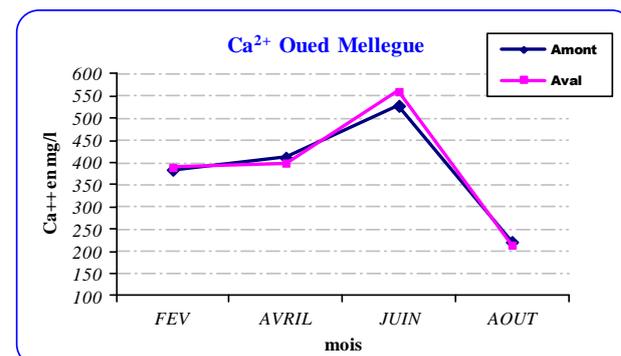
a)



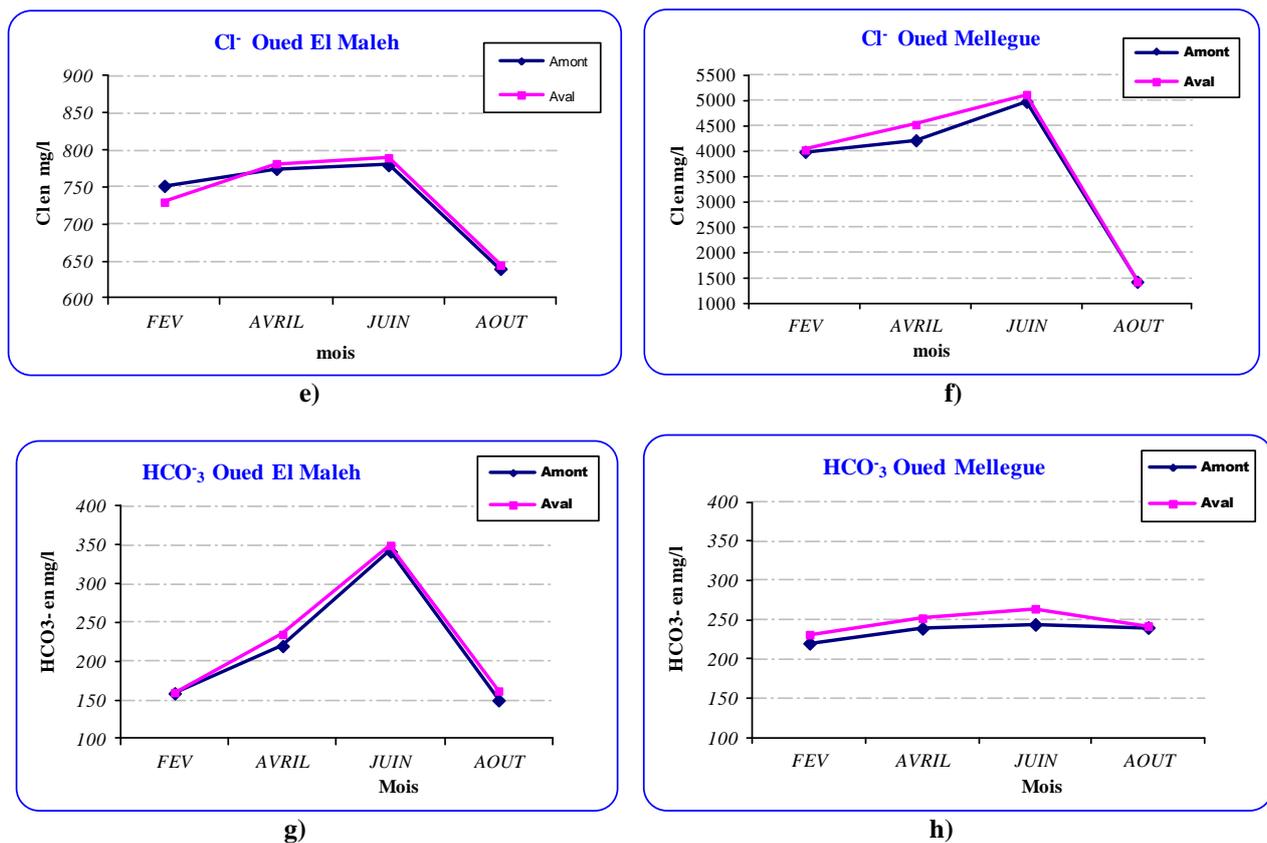
b)



c)



d)



**Figure 60: Evolution des concentrations des paramètres physico-chimiques des oueds El Maleh et Mellègue en amont et aval des 2 stations de déminéralisation**

Les graphes de l'évolution des concentrations des paramètres physico-chimiques, tels que (CE, Ca<sup>2+</sup>, Cl<sup>-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) illustrés dans les (Fig. 60) montrent qu'il n'y a pas de variation notable des concentrations de ces éléments en aval par rapport à l'amont durant cette série de campagnes, les légères variations s'avèrent peu importantes, parce que elle peuvent être naturelle, sachant qu'une partie de ces rejets s'infiltrent dans le sol, il faut noter aussi à la salinité élevée des eaux de ces oueds eux même.

### 6. 3. Surveillance et contrôle du milieu récepteur

Le contrôle périodique du milieu récepteur des rejets liquides des deux stations que ce soit les eaux des oueds et le sol, couvre une grande importance, non seulement de connaître les concentrations des paramètres physico-chimiques, mais aussi permet de savoir leurs évolutions dans le temps et dans l'espace, ceci rentre dans le cadre de monitoring de l'écosystème en aval de ces 2 stations.

Malgré la justification de l'importance du monitoring, ces 2 stations sont dépourvues de programme de contrôle ou de surveillance des rejets et de l'écosystème.

---

#### 6. 4. Conclusion et recommandations

- ✓ L'installation des 2 stations de déminéralisation des eaux saumâtres dans la commune de Sidi Fredj, s'inscrit dans le programme de l'état à l'appui de la lutte contre la pauvreté et l'exclusion dans la Wilaya de Souk Ahras. Ce projet a été financé en coopération Algéro-Belge.
- ✓ Les 2 stations de déminéralisation, utilise les procédés membranaires, à savoir l'osmose inverse, de petite capacité de production de **18.3** m<sup>3</sup>/h de chacune, ont mis en service e 2011, traitant les eaux saumâtres de la nappes des calcaires à partir des forages AOB2 de salinité de **5 g/l**, et le forage AZ2 de salinité de **3 g/l**. chaque station possède 16 modules en polyamides, avec un taux de conversion **Y= 83%**, et un taux de rétention **83% > T<sub>R</sub> < 94%**.
- ✓ Production de débit d'eau de **220** m<sup>3</sup>/j, en raison de 12h de marche par jour pour chacune, cette eau de très bonne qualité donnant la satisfaction de la population bénéficiaire de cette ressource vitale.
- ✓ les rejets du concentrât de salinité élevé, avec un débit de **44** m<sup>3</sup>/j, s'ajoute aux solutions de prétraitement et de nettoyages des membranes dans l'oued Mellegue pour la station d'Ouled Abbas et vers l'Oued El Maleh pour celle de Ain Zargua.
- ✓ Avec l'avantage que fournit l'implantation de ces 2 stations de déminéralisation des eaux saumâtres que possède la région, et l'approvisionnement en eau potable pour la population avoisinante qui sont tant souffert pour arriver à cette ressource vitale avec une satisfaction extrême, ses rejets présentent un impact sur l'environnement, d'où on peut citer
  1. La consommation de l'énergie électrique, d'où la possibilité d'utiliser l'énergie renouvelable solaire, avec l'installation des panneaux solaire sur le toit des stations de déminéralisation, qui peuvent couvrir la consommation en énergie ou une grande partie.
  2. Le rejet simultané de saumure et des produits de conditionnement des eaux, vers les eaux des oueds et l'infiltration d'une partie dans le sol, d'où la nécessité de prolonger le canal étanche afin d'éviter ces infiltrations.
  3. Le rejet des solutions à base de produits chimique pour le nettoyage périodique des membranes.
- ✓ Non disponibilité d'un système de surveillance et de contrôle des rejets et de l'écosystème, d'où l'obligation de le mettre en place.

---

## *Conclusion générale*

---

La présente étude s'est effectuée sur la déminéralisation des eaux saumâtres de l'aquifère karstique du Turonien dans la commune de Sidi FREDJ dans la wilaya de Souk Ahras à l'extrême nord est algérien et chevauche la frontière algéro-tunisienne sur 22 km.

Cette zone appartient au grand bassin versant de la Medjerda-Mellègue (Code 12) ; elle chevauche sur deux sous bassins, d'oued Mellègue amont (Code 12-04) et celle de l'oued Mellègue aval (Code 12-05).

Du point de vue géologique, la zone d'étude fait partie de l'avant pays atlasique autochtone à l'extrême Nord Est de l'Algérie, sa partie Sud se trouve dans un domaine de grande complexité structurale qui a connu des éléments tectonique simple et cassante, ainsi que des manifestations diapiriques. Les formations géologiques allant du trias de composition gypso-argileuse, et du crétaé de composition calcaires, dolomies, marnes, calcaire marneux et marno-calcaire, et des formations du Mio-Plio-Quaternaires représentés par des argiles, marnes, grés, des alluvions...

Du point de vue climatologique, la région d'étude appartient à un milieu de limite du climat tempéré au nord et un climat semi-aride au sud. Il est caractérisé par deux saisons distinctes, une humide qui s'étale du mois de novembre jusqu'au mois de avril, et une autre sèche allant du mois de mai au mois de septembre

Les hauteurs moyennes interannuelles des précipitations varient dans les deux stations, elles sont de 568.6 mm/an (pour la station de Taoura) et de 705.4 mm/an (pour la station de Souk Ahras). La température moyenne annuelle de 15.9 °C.

La R.F.U (réserve facilement utilisable) de 67 mm.

- Une évapotranspiration potentielle (ETP) de 879.9 mm/an
- Une évapotranspiration réelle (ETR) de 387.1 mm/an à Taoura et de 393.1 à la station de Souk Ahras (en application de la formule de Thornthwaite).

Du point de vue hydrogéologique, la zone d'étude abrite deux nappes : l'une superficielle, libre contenue dans des formations du Mio-Plio-Quaternaire. L'examen des cartes piézométriques des hautes et basses eaux met en évidence un écoulement porte deux directions du Nord vers le Sud et du Nord-Ouest vers le Sud-Est, conformément à la topographie de la zone d'étude. L'autre profonde, karstique dans les formations calcaires du Turonien

---

La Zone d'étude possède un réseau Hydrographique caractérisée par l'absence de cours d'eau permanent, limitée au Sud par l'oued Mellègue, et à l'Est par Oued El Maleh, les deux coulent vers la Tunisie, on note aussi la présence d'une zone humide (chotts d'EL Madjene et El Mkimen).

L'étude hydrochimique des deux nappes de la zone d'étude montre que les eaux de la nappe libre sont caractérisées par la présence de trois faciès dominants, bicarbonaté calcique, chloruré calcique et sulfaté calcique. alors que pour la nappe des calcaires les eaux sont caractérisées par la présence de trois faciès dominants, Sulfaté sodique, sulfaté calcique et chloruré sodique. La prédominance des ions ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ) est influencée par les formations évaporitiques.

L'Analyse en composantes principales (ACP) réalisée en utilisant comme variables les teneurs en éléments majeurs ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  et CE) sur 22 individus a montré une corrélation positive entre la conductivité électrique et les variables  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  qui sont responsable de la minéralisation des eaux.

L'étude de l'aptitude des eaux souterraines de la zone d'étude à l'irrigation a permis de définir que les eaux de la nappes libre conviennent à l'irrigation à l'exception des points situées dans la partie ou affleurent les formations triasiques. Les eaux de la nappe des calcaires ne conviennent pas à l'irrigation à l'exception d'un seul point, le forage AS1 situé en amont du terrain triasique.

En ce qui concerne le recours à la déminéralisation des eaux saumâtre par le procédé membranaire à l'osmose inverse, elle donne une alternative pour acquérir cette ressource vitale et irremplaçable. Deux stations de déminéralisation des eaux saumâtres de la nappes des calcaires ont été installées pour traiter les eaux des forages AOB2 et AZ2, donnant chacune un débit d'eau potable  $Q_p = 18.3\text{m}^3/\text{h}$ . Avec l'avantage que fournit l'implantation ces 2 stations, elles présentent un impact sur l'environnement par ces rejets liquides chargés sur les eaux des oueds qui les reçoivent.

---

## *Références Bibliographiques*

A.B.H agence de Bassin hydrographique. 2005. Le bassin versant de la Medjarda-Mellegue. Les Cahiers de l'Agence. Journal n°9. 28 p.

A.N.R.H. Hydrologie de surface J.P. Laborde-2003.191 p.

- 
- A.N.R.H., 1995. Liste des stations climatologique et pluviométrique de l'A.N.R.H et l'O.N.M.
- A.N.R.H., 2002. Atlas des températures et des évapotranspirations de l'Algérie du Nord.
- Agence de l'eau. 1999. Guide technique N°3 : Connaissance et gestion des ressources en eaux souterraines dans les régions karstiques. 40 p.
- Aggoun B. (1993) : Etude hydrogéologique de la région de Terreguelt en vue de l'alimentation en eau potable de la ville de Sedrata. Mémoire d'Ingénieur I.S.T. Université d'Annaba-Algérie.
- Allali Khalil (2005) : Modèle de contrôle optimal de l'utilisation des eaux conventionnelles et non conventionnelles en agriculture. Actes du séminaire Euro Méditerranéen « Les instruments économiques et la modernisation des périmètres irrigués », M.S. Bachta (éd. sci.) Séance 2. Analyse de la demande en eau, 21-22 Novembre 2005, Sousse, Tunisie, 10p.
- Aouadi & Zeghadnia S., (1990) : Approche hydrogéologique de la plaine de Sedrata-Tiffech et estimation approximative des ressources et réserves en eau souterraine. Mémoire d'Ingénieur I. S. T. Université d'Annaba. Algérie
- Aunay B., 2003. Evolution géologique, mise en place de la karstification et thermalisme des aquifères péri-méditerranéen. pp 22.
- Bahir M., Jalal M., Mennani A & Laftouhi N., (2001) : Potentialités hydrogéologiques du synclinal de Kourimat (Bassin d'Essaouira, Maroc). Estudios Geol, pp 47-52.
- Bakalowicz M., 1999. Connaissance et gestion des ressources en eaux souterraines dans les régions karstiques. Guide technique n°3, SDAGE Rhône - Méditerranée- Corse. Agence de l'Eau Rhône - Méditerranée - Corse, Lyon, 40 p.
- Bakalowicz M., 2002. Hydrogéologie karstique. Cours DEA H.H.G.G. Université Paris-6. Caractéristiques et concepts. Méthodes d'exploration, d'exploitation et de gestion active. 278 p.
- Bakalowicz M., 2004. Analyses et interprétations des données hydrochimiques. 61p.
- Bakalowicz M., 2005. Le karst, objet géologique particulier. Caractéristiques et concepts.
- Bakalowicz M., 2005. Notions de base de géologie pour l'hydrogéologie et la géologie de l'environnement. 70 p.
- Bouchaou L., Chauve P., Mudry J., Mania J., Hssissou Y., 1997 . Structure et fonctionnement d'un hydrosystème karstique de montagne sous climat semi-aride: cas de l'Atlas de Beni-Mellal (Maroc). 12 p.
- Bourlier P.Y., Lachassagne P., Desprats J.F & Gille E., (2005) : Nouveaux éléments sur la structure et le fonctionnement hydrogéologiques du plateau basaltique du l'Aubrac (Massif central, France). Première évaluation des potentialités en eau souterraine, publication C.R.Géoscience, 337p.
- Bousnoubra H. (1982) : Etude hydrogéologique du synclinal de Taoura (Souk-Ahras) extrême Nord-Est Algérien. Mémoire de DEA. USTL Montpellier II. France. 45p.
- Bousnoubra H. (1985) : Hydrogéologie de quelques réservoirs karstiques du Nord est Algérien. Synthèse de connaissance actuelle, apport du traitement statistique des données hydrométriques. Thèse troisième cycle USTL. Montpellier II, France. 162p.

- 
- Bousnoubra H. (2002) : Ressources en eaux des régions de Skikda, Annaba, ElTarf, Guelma, Souk-Ahras (N-E Algérien) (Evaluation, gestion et perspective; Vulnérabilité et protection), Thèse de doctorat d'état, 159p.
- B.N.E.D.E.R. (Bureau national des études pour le développement rural), (1999)  
Etude d'aménagement Hydro-Agricole de la Medjerda. Phase I et II.
- Chadi M., 2004. Cadre géologique et structural des séries crétacées néritiques du constantinois (Est- Algérien). Thèse de doctorat. pp17-37.
- CTB ALGERIE & Le ministère de la solidarité Nationale et de la Famille, Plan de développement local 2013-2017 de la Daira de Merahna, 54p.2012.
- David L., 1953. L'âge Pliocène d'une partie des formations continentales de la région de Souk Ahras. pp216-218.
- David L., 1953. L'importance des déplacements tangentiels dans la zone sud-tellienne des environs de Souk Ahras. pp 287-289.
- Djaba H. (2010) : Ressources en eau et perspectives se gestion intégrée dans le bassin versant de Medjerda (Souk-Ahras, Nord-Est d'Algérie) Mémoire de Magistère Universitaire Badji-Mokhtar, Annaba. Algérie 150p.
- Djidel M., (2008) : Pollution minérale et organique des eaux de la nappe superficielle de la cuvette de Ouargla (Sahara septentrional, Algérie). Thèse de doctorat en hydrogéologie. Université Badji-Mokhtar, Annaba, Algérie. 205p.
- Dörfliger N., Jauffret D., Loubier S., 2004. Cartographie de la vulnérabilité des aquifères karstiques en franche-Comité. 137 p.
- Direction des ressources en eau DRE W. Souk Ahras, Service de l'hydraulique agricole, Bilan annuel 2013 Hydro agricole PMH 52p.
- Friane F., (2000) : Ressources et approvisionnement en eau dans la région de Souk-Ahras (Essai de synthèse). Mémoire d'Ingénieur en hydrogéologie. Université Badji-Mokhtar, Annaba, Algérie. 82p.
- Freixa C.M, Benchmarking international en matière de dessalement des aux, Revue HTE, n°142. 2009
- Gaud B. (1976) : Etude hydrogéologique du système aquifère de Annaba- Bouteldja ; synthèse des données actuelles et recherche des conditions de modélisation. Rapport inédit. ANRH. Vol. 2. Algérie. 230p.
- Ghachi A. (1990) : Hydrogéologie et utilisation de la ressource en eau en Algérie. Office des publications universitaires.
- Ghachi A., 1986. Hydrologie et utilisation de la ressource en eau en Algérie, OPU. 512 p.
- Guasmi I. (2009) : Pollution des eaux et pouvoiar auto-épurateur de l'Oued Medjerda (Nord –Est Algérien) Thèse de doctorat d'état, Université Badji-Mokhtar, Annaba, Algérie 198p.
- Kamel F. Optimisation de la consommation énergétique dans la station de dessalement de Zarzis (12,000 m<sup>3</sup>/j), Desalination, 2001, 137, 225.
- Ladlani I., 2006. Contribution à la gestion optimale de la ressource en eau mobilisée «choix de formule empirique pour l'estimation de l'évapotranspiration potentielle "ETP" dans les régions de Tébessa et Annaba». Thèse de Magister. Université de Batna. 171p.
- Lebourgeois F.: Enseignant-Chercheur Cours de bioclimatologie à l'usage des forestiers

- 
- Ludovic O., 2004. Recherche d'un modèle d'évapotranspiration potentielle pertinent comme entrée d'un modèle pluie-débit global, thèse doctorat
- Mebarki A., 1982. Ressource en eau et aménagement en Algérie : le bassin du Kebir Rhumel. O.P. U. Alger.
- Méthodes d'étude et de reconnaissance.107 p.
- Mudry J. Hydrogéologie Objets, méthodes, applications, 2004, 292p
- Mokatel N. (2006) : Qualité des eaux de l'Oued Medjerda, région de Souk-Ahras (Nord-Est Algérien). Mémoire d'Ingénieur en hydrogéologie. Université Badji-Mokhtar, Annaba, Algérie 64p.
- Plaignes V., 2000. Structure et fonctionnement des aquifères karstiques. Caractérisation par la géochimie.302 p.
- Plan de Développement Local 2013-2017 de la Commune de Sidi-Fredj, élaboré par CTB Algérie et le ministère de la solidarité nationale et de la famille, version 1.0 (2012), 54p
- Rodier J., L'Analyse de l'eau, 9 ème édition 2009, DUNOD, 1527p
- Samie G., 1953. Etude hydrologique de la haute –Medjarda. pp106 - 116.
- Savornin J.,1928. Recherches d'eau dans la région de Gambetta. 32 p.
- Techniques de l'ingénieur: articles relatifs à l'ultrafiltration et à l'osmose inverse
- Tlili. M. Le système bidimensionnel urgonien du Mellegue (NE Algérien) Thèse de doctorat 2008, 189p.
- Toubal A. W., (1993) : Etude du forage T1 dans le synclinal de Taoura. Mémoire d'Ingénieur I.S.T Université Badji-Mokhtar, Annaba- Algérie.
- Vila J. M., 1980. La chaîne d'Algérie orientale et des confins Algéro-Tunisiens- thèse pour obtenir le grade de Docteur ès Sciences. 586 p.
- Wildi W., 1983. La chaîne tello-rifaine (Algérie, Maroc, Tunisie) : structure, stratigraphie et évolution du Trias au Miocène, p154.
- www.safewater.org, Ultrafiltration, Nano filtration et l'Osmose Inverse

### **Cartes consultées :**

- Cartes géologique et topographique de Souk-Ahras au 1/200000.
- Carte structurale au 1/500000 de la chaîne Alpine d'Algérie Nord orientale et des confins Algéro-tunisiens-1978.
- Cartes géologique et topographique de Souk-Ahras au 1/50000 avec notice explicative.
- Carte topographique d'Oued Kébarit au 1/50000.
- Carte Pluviométrie de l'Algérie du Nord au 1/500000, ANRH-1993.
- Carte des Évapotranspirations de l'Algérie du Nord au 1/500000, ANRH-2003.
- Carte des Écoulements moyens annuels de l'Algérie du Nord au 1/500000, ANRH-2005.