



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ LARBI TEBESSI TEBESSA

Faculté des Sciences Exactes et des Sciences de la Nature et de la Vie

Département Des Sciences de la terre et de l'univers



THESE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de **DOCTORAT (en sciences)**

Option: Hydrogéologie Appliquée

Impact des rejets urbains et industriels sur la qualité des eaux de surfaces et des eaux souterraines. Cas du Bassin versant Oued El-Hai, région de Batna. Nord-est Algérien

Par

KERBOUB Djawhar

DIRECTEUR DE THESE

Mr. FEHDI Chemseddine

Professeur Univ. De Tébessa

Soutenue publiquement le 16 Octobre 2022 devant le jury composé de :

Président

Mr. GOUAIDIA Layachi

Professeur Univ. De Tébessa

Examineurs

Mr. BAALI Fethi

Professeur Univ. De Tébessa

Mr. HADJI Rihab

Professeur Univ. De Sétif 1

Mr. ZAHRI Farid

M.C.A. Univ. De Sétif 1

Mr. GHRIEB Lassaad

Professeur Univ. De Guelma

Année Universitaire: 2021-2022

ملخص

تقع مدينة القنطرة في الطرف الشمالي لولاية بسكرة وفي الجنوب الجزائري، والتي تعتبر خزان مائي رئيسي خاصة طبقة المياه الجوفية القريبة من السطح والتابعة للحقب الزمنية الميوسين-البليوسين- والرباعي، والتي تستعمل أكثر لأغراض فلاحية خاصة سقي أشجار النخيل التي يصل عددها إلى اثنان وعشرون ألف نخلة (22000) ولكن أيضاً، بأهمية أقل، لأغراض التزود بمياه الشرب أو الصناعات الصغيرة.

خلال مرحلة انخفاض منسوب مياه الطبقة القريبة من السطح، يمثل كل من واد الحي وواد بوبياضة مجري تعبئة سطحية للحوض الهيدروغرافي للمنطقة إضافة إلى مجاري المياه المستعملة لمدينة القنطرة، والتي تصب من مركز المدينة إلى مخرج هذا الحوض. يعتبر تدفق المياه الجوفية ذات أصل الصخر الجيري والذي يعود عمره إلى عهد المايستريشي مهمل والذي يمثل نسبة ضعيفة بالنسبة لمحصول المجاري الأودية السطحية

تتدخل المياه السطحية و الممتلئة في مياه وادي الحي في زيادة منسوب مياه الحوض القريبة من السطح وهذا ما يؤدي إلى رداءة نوعية المياه السطحية والجوفية وهذا بسبب عوامل التلوث الموجودة في وادي الحي الناتجة عن إفرازات السكان، المكب العام وكذلك إفرازات المصانع .

إن الاقتران بين الأدوات الجيولوجية، الهيدروجيولوجية، الهيدروكيميائية، الديناميكية الحرارية، الأدوات الإحصائية والشبكات العصبية والذكاء الاصطناعي ونظام المعلومات الجغرافية لرسم خرائط التعرض للتلوث في دراسة نوعية المياه الجوفية في سهل القنطرة، سمح لنا بتحديد أصل الملوحة وطريقة اكتسابها وتوزيعها في طبقة المياه الجوفية القريبة من السطح (حيث تهيمن الكبريتات وتكون مصحوبة عموماً بالكالسيوم أو المغنيسيوم أو الصوديوم)؛ التلوث عن طريق العناصر المعدنية النادرة (آثار) مثل الحديد والنحاس والرصاص والكروم وعناصر مؤشر التلوث الزراعي، والتي ترتبط بشكل أساسي بالتصريفات من المنطقة الحضرية، وطرر النفايات العامة ومنطقة النشاط (الزراعي والصناعي الصغيرتين)

الكلمات الدالة: طبقة مياه جوفية قريبة من السطح، كيميائية المياه، مسالك مائية، التلوث، القنطرة، بسكرة، الجزائر.

Abstract

The region of El-Kantara located at the northern limit of the Wilaya of Biskra and to the south is Algerian; is the seat of a superficial aquifer of Mi-Plio-Quaternary age whose waters are used much more for the irrigation of some 22,000 palm trees, but also, and of lesser importance, for drinking water and small industry . An arid region where the questions of availability and the deterioration of the quality will arise in an increased way and in particular the problem of the salinity of groundwater.

During low water periods, Oued El-Hai and Oued Boubiada, which flow in the middle of the plain, drain much more wastewater from the town of El-Kantara located upstream from it. The low flow of springs draining the Maastrichtian limestone represents only a small percentage of the total flow of the wadis. These wadis in turn feed the alluvial water table which contributes to the deterioration of the quality of groundwater in addition to surface water following the direct discharge of water from the urban area, the public dump and its industrial zone.

The coupling between the geological, hydrogeological, hydrochemical, thermodynamic, statistical tools, neural networks and artificial intelligence and GIS for mapping the vulnerability to pollution in the study area of the quality of groundwater in the plain of El-Kantara, has allowed to determine the origin of salinity and its mode of acquisition as well as its distribution in space (sulphates dominate and are generally accompanied by Calcium, Magnesium or Sodium); pollution by trace metallic elements (ETM) such as iron, copper, lead and chromium and agricultural pollution indicator elements (traces), which are mainly related to discharges from the urban area, landfill public and the area of activity (agriculture and small industry).

Key words: Aquifer, Hydrochemistry, Rejections, Pollution, El-Kantara, Biskra, Algeria.

Résumé

La région d'El-Kantara se trouvant à la limite Nord de la Wilaya de Biskra et au Sud est algérien ; est le siège d'un aquifère superficiel d'âge Moi-Plio-Quaternaire dont les eaux sont beaucoup plus utilisées pour l'irrigation de quelques 22 000 palmiers, mais aussi, et de moindre importance, pour l'eau potable et la petite industrie. Une région aride où les questions de la disponibilité et la détérioration de la qualité se poseront de manière accrue et notamment le problème de la salinité des eaux souterraines.

En période des basses eaux, Oued El-Hai et Oued Boubiada qui coulent au milieu de la plaine, drainent beaucoup plus les eaux usées de la ville d'El-Kantara se trouvant à l'amont de celle ci. Le faible débit des sources drainant les calcaires maestrichtiens, ne représente qu'un faible pourcentage du débit total des oueds .Ces oueds alimentent à leur tour la nappe alluviale ce qui contribue à la détérioration de la qualité des eaux souterraines en plus de la détérioration des eaux de surfaces suite aux rejets directes des eaux issues de l'agglomération, de la décharge publique et de sa zone industrielle.

Le couplage entre les outils géologique, hydrogéologique, hydrochimique, thermodynamique , statistique, réseaux neurones et intelligence artificielle et GIS pour cartographier la vulnérabilité à la pollution dans l'étude de la qualité des eaux souterraines de la plaine d'El-Kantara, nous a permis, de déterminer l'origine de la salinité et son mode d'acquisition ainsi que sa répartition dans l'espace (les sulfates dominant et s'accompagnent généralement de Calcium, de Magnésium ou de Sodium) ; la pollution par les éléments métallique en trace (ETM) tels que le Fer, le Cuivre, le Plomb et le Chrome et les éléments indicateurs de pollution agricole (trace) ,qui sont en relation surtout avec les rejets de la zone urbaine, la décharge publique et la zone d'activité (l'agriculture et la petite industrie).

Mots-clés : Aquifère, Hydrochimie, Rejets, Pollution, El-Kantara, Biskra, Algérie.

DEDICACES

Je dédie cet humble travail à :

- ❖ La mémoire de mon très cher père « Saleh » le symbole de sagesse et mon modèle; Sans ta présence toute joie n'est qu'illusion éphémère; Sans toi rien ne sera plus comme avant.
- ❖ Ma très chère mère qui est le symbole du sacrifice et de tendresse.
- ❖ Ma très chère femme source du soutien moral, de force et de la confiance. Grâce à elle, les moments de découragement furent rares et brefs.
- ❖ Mes chers enfant Mohammed Kinane et Nayef que Dieu les bénissent ;
- ❖ Tous mes frères et sœurs.
- ❖ Tous les amis intimes de la promotion de l'hydrogéologie appliquée.
- ❖ A toute ma famille.
- ❖ Tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin à réaliser ce travail.

KERBOUB DJAWHAR

REMERCIEMENT

Je remercie Dieu le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il m'a donné durant toutes ces années d'étude.

Au terme de ce travail, il m'est très bien agréable de remercier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin, scientifiquement et moralement à sa réalisation et qui m'ont permis de mener à bien ce travail et ce ne sont pas ces quelques phrases si personnelles soient-elles qui arriveront à leurs exprimer mes sentiments de reconnaissances. J'adresse mes sincères remerciements en particulier à:

- ❖ Monsieur le Professeur **FEHDI Chemseddine** de l'Université de Tébessa, d'avoir accepté de m'encadrer et suivre mon travail de près avec sa rigueur scientifique et ses conseils qui m'ont bien orienté dans l'élaboration de cette thèse. Je le remercie surtout pour sa disponibilité malgré ses responsabilités. Qu'il trouve ici l'expression de ma profonde gratitude.
- ❖ Monsieur le Professeur **GOUAIDIA Layachi** de l'Université de Tébessa, qui a eu la bienveillance d'accepter de juger ce travail et de présider le jury de soutenance.
- ❖ Monsieur le Professeur **BAALI Fethi** de l'Université de Tébessa, d'avoir accepté de juger ce travail. bien voulu assister et juger cette thèse.
- ❖ Monsieur le Professeur **HADJI Rihab** de l'Université de Sétif 1, d'avoir bien voulu assister et juger cette thèse.
- ❖ Monsieur **ZAHRI Farid** Maître de conférences de l'Université de Sétif 1, d'avoir accepté de juger ce travail.
- ❖ Monsieur le Professeur **GHRIEB Lassaad** de l'Université de Guelma, d'avoir bien voulu assister et juger cette thèse.
- ❖ Mes plus vifs remerciements vont également à :
- ❖ Mes Enseignants du département des sciences de la terre et de L'univers de Tébessa et de Batna, notamment : Mr. Kalla Mehdi, Mr Habibi Yahyaoui, Mr Brinis Nafaa ,Mr Derias Tarek et Mr. Mennani Mohammed Redha pour leurs soutiens moraux et leurs accueils chaleureux.
- ❖ Mr Kerboub Abdallah pour ses conseils et son aide scientifique précieux.
- ❖ Mohammed Abdessamed, Djouleh Bilel, Chemekh khemissi et Azizi yacine pour son aide et ses encouragements.

Mes remerciements vont également aux responsables et aux staffs des directions, je cite : l'ANRH de Biskra, DHW de Biskra et de Batna, le centre de recherche scientifique CRSTRA de Biskra, laboratoire de l'hydrogéologie et l'hydraulique de l'université de Batna (madame Fertass et madame Zerguine , a elles je dois beaucoup) et laboratoire de Constantine.

Mes remerciements les plus sincères vont également aux membres de ma famille pour leur soutien moral et leur patience pendant les moments difficiles de la réalisation de ce travail. Grâce à eux, les moments de découragement furent rares et brefs. Qu'ils trouvent ici le témoignage de ma profonde gratitude.

Toute ma reconnaissance à tous les propriétaires des points d'eau qui m'ont autorisé à effectuer sans difficulté des prélèvements d'échantillons et autres mesures.

Et enfin, je tiens à remercier tous les amis qui m'ont aidé et encouragé pour réaliser ce travail, je cite spécialement mes collègues du Département des sciences de la terre de l'Université de Batna, sans oublier les collègues dans le parcours du Magistère et de Doctorat du Département des sciences de la terre de Tébessa.

Merci à tous.

KERBOUB DJAWHAR

Listes des tableaux :

Chapitre I: Cadre général

Tab. I.01: Population du bassin versant d'Oued El –Haï (Monographie 2016).....P:16

Chapitre III : Climatologie

Tab. III.01 : Caractéristiques des stations pluviométriques.....P:48

Tab. III.02 : Résultats des données de la méthode des isohyètes..... P:51

Tab.III.03 : Précipitations moyennes annuelles..... P:53

Tab. III.04: Années sèches et années humides des stations de Biskra et H2..... P:55

Tab.III.05 : Précipitations moyennes mensuelles et saisonnières de la station de Biskra (1991-2015).....P:55

Tab.III.06 : Précipitations moyennes mensuelles et saisonnières de la station d'El-Kantara (1913-1938).....P:56

Tab.III.07 : Précipitations moyennes mensuelles et saisonnières de la H2 (1997-2017)...P:57

Tab.III.08: Nombre de Jours de pluies par Mois.....P:60

Tab.III.09: Coefficient de fréquence et intensité des précipitations à El-Kantara ;(1913-1938)P:60

Tab.III.10: Coefficient de fréquence et intensité des précipitations de Biskra ;(1913-1938)P:60

Tab.III.11: Coefficient de fréquence et intensité des précipitations de Biskra; (1991-2010)P:60

Tab.III.12: La moyenne des températures interannuelles des trois stations Biskra, El-Kantara et H2.....P:62

Tab.III.13 : Vitesses moyennes des vents enregistrées à la station de Biskra Période (1980-2001).....P:64

Tab.III.14: Humidités relatives moyennes enregistrées à la station de Biskra Période (1980-2001).....P:65

Tab.III.15: Variation de l'humidité de station de Biskra. (1991-2015).....P:67

Tab.III.16: Variation de l'humidité de station d'El-Kantara. (1913-1938).....P:68

| | |
|--|------|
| Tab.III.17: Variation de l'humidité de station H2. (1997-2017)..... | P:68 |
| Tab.III.18: Indice D'Aridité de Demartonne (1923)..... | P:70 |
| Tab.III.19: Valeurs d'indice d'aridité mensuel..... | P:70 |
| Tab.III.20: Paramètres de la méthode d'Emberger et les valeurs de Q_2 | P:71 |
| Tab.III.21 : Résultats de l'ETP selon Thornthwaite..... | P:74 |
| Tab.III.22: Estimation de l'évapotranspiration réelle moyenne..... | P:76 |
| Tab.III.23 : Bilan Hydrique de la station d'El-Kantara (1913-1938)..... | P:77 |
| Tab.III.24 : Bilan Hydrique de la station Biskra (1991-2015)..... | P:78 |
| Tab.III.25 : Bilan Hydrique de la station H2 (1997-2017)..... | P:78 |

Chapitre IV : Géomorphologie

| | |
|--|------|
| Tab. IV.01 : La répartition de la surface en fonction de l'altitude..... | P:86 |
| Tab. IV.02 : Paramètres de l'indice de pente..... | P:89 |
| Tab. IV.03 : Classification des reliefs selon l'ORSTROM..... | P:90 |
| Tab. IV.04 : Classification de l'O.R.S.T.O.M.Selon dénivelé spécifique..... | P:91 |
| Tab. IV.05 : Classification de Schum..... | P:92 |
| Tab. IV .06 : Principales caractéristiques géomorphologiques du bassin d'Oued EL-Hai...P:96 | |

Chapitre V : Hydrogéologie

| | |
|--|-------|
| Tab. V.01 : Etat des forages de la nappe Maastrichtienne et la nappe Turonienne destinés à l'irrigation (DHW de Biskra, 2016)..... | P:105 |
| Tab. V.02 : Etat des forages de la nappe Maastrichtienne et la nappe Turonienne destinés à l'alimentation en eau potable (DHW de Biskra, 2016)..... | P:106 |
| Tab. V.03 : Caractéristiques des points d'eau inventoriées..... | P:107 |
| Tab. V.04 : Caractéristiques du pompage d'essai aux puits d'El-Kantara..... | P:114 |
| Tabl. V.05 : Valeurs de Transmissivité calculée par l'approximation logarithmique de Jacob (Auteur, 2022)..... | P:123 |

Chapitre VI : Etude hydrochimique, qualitative et vulnérabilité à la pollution des eaux.

Partie A : Etude hydrochimique et qualitative des eaux

| | |
|--|-------|
| Tab.VI.01: Statistique élémentaire des éléments physiques dans les eaux de la plaine d'El-Kantara..... | P:128 |
| Tab.VI.02: Statistique élémentaire des éléments chimiques majeurs (Cations) dans les eaux de la plaine d'El-Kantara..... | P:129 |
| Tab.VI.03: Statistique élémentaire des éléments chimiques majeurs (Anions) dans les eaux de la plaine d'El-Kantara..... | P:130 |
| Tab.VI.04: Statistique élémentaire des éléments indicateurs de pollution agricole (Substances eutrophisantes) dans les eaux de la plaine d'El-Kantara..... | P:131 |
| Tab.VI.05: Statistique élémentaire des éléments indicateurs de pollution anthropique (Substances eutrophisantes) dans les eaux de la plaine d'El-Kantara..... | P:131 |
| Tab.VI.06: Statistique élémentaire des éléments traces métalliques (ETM) dans les eaux de la plaine d'El-Kantara..... | P:132 |
| Tab.VI.07: Tableau récapitulatif sur la validité des résultats d'analyses chimiques des eaux de la plaine d'El-Kantara..... | P:135 |
| Tab.VI.08: Tableau de qualification de la dureté des eaux de la plaine d'El-Kantara..... | P:139 |
| Tab.VI.09: Tableau récapitulatif du calcul de la minéralisation des eaux de la plaine d'El-Kantara à partir de la conductivité (Rodier, 2009)..... | P:141 |
| Tab.VI.10: Relation entre la minéralisation et la conductivité (Rodier, 2009)..... | P:141 |
| Tab.VI.11: Tableau récapitulatif de la relation entre la minéralisation et la conductivité des eaux de la plaine d'El-Kantara..... | P:142 |
| Tab.VI.12: Tableau récapitulatif des formules caractéristiques et des faciès hydrochimique des eaux de la plaine d'El-Kantara..... | P:166 |
| Tab. VI.13 : Les indices d'échange de base des différents points d'eaux..... | P:174 |
| Tab. VI.13 : Classification des eaux souterraines en utilisant les valeurs de TDS..... | P:176 |
| Tab.VI.14: Classification des eaux en utilisant les valeurs de DHT..... | P:176 |
| Tab. VI.15 : Normes de potabilité de l'O.M.S..... | P:177 |

| | |
|---|-------|
| Tab. VI.16 : Normes de potabilité Algérien (Décret exécutif n ° 11-125 du 22 Mars 2011 JON°18/2011)..... | P:179 |
| Tab. VI.17 : Paramètres de la qualité de l'eau à l'irrigation de la plaine d'El-Kantara (SEP 2011)..... | P:184 |
| Tab. VI.18 : Paramètres de la qualité de l'eau à l'irrigation de la plaine d'El-Kantara (FEV 2012)..... | P:184 |
| Tab. VI.19 : Paramètres de la qualité de l'eau à l'irrigation de la plaine d'El-Kantara (SEP 2014)..... | P:184 |
| Tab. VI.20 : Paramètres de la qualité de l'eau à l'irrigation de la plaine d'El-Kantara (FEV 2015)..... | P:185 |
| Tab. VI.21 : Classification des eaux d'irrigation, d'après J.Servant, 1975 (U.S. Salinity LAB) | P:186 |
| Tab. VI.22: Classification des eaux d'El-Kantara pour l'irrigation d'après l'interprétation des diagrammes de Richards..... | P:186 |
| Tab. VI.23 : Classification des eaux d'El-Kantara pour l'irrigation d'après l'interprétation des diagrammes de Wilcox..... | P:189 |
| TAB .VI.24: Réactions de dissociation de quelques minéraux avec leurs constantes d'équilibres et leurs Enthalpies ΔH d'après Truesdall et Jones, 1974..... | P:223 |
| TAB .VI.25: Indice de saturation (SI) des minéraux présents dans les eaux de la plaine d'El-Kantara (SEP 2011)..... | P:224 |
| TAB .VI.26: Indice de saturation (SI) des minéraux présents dans les eaux de la plaine d'El-Kantara (FEV 2012)..... | P:226 |
| TAB .VI.27: Indice de saturation (SI) des minéraux présents dans les eaux de la plaine d'El-Kantara (SEP 2014)..... | P:228 |
| TAB .VI.28: Indice de saturation (SI) des minéraux présents dans les eaux de la plaine d'El-Kantara (FEV 2015)..... | P:229 |
| TAB .VI.29: Matrice de corrélation des paramètres physico-chimiques mesurés dans les eaux de la plaine d'El-Kantara (SEP 2011)..... | P:232 |
| TAB .VI.30: Matrice de corrélation des paramètres physico-chimiques mesurés dans les eaux de la plaine d'El-Kantara (FEV 2012)..... | P:233 |
| TAB .VI.31: Matrice de corrélation des paramètres physico-chimiques mesurés dans les eaux de la plaine d'El-Kantara (SEP 2014)..... | P:233 |

| | |
|---|-------|
| TAB .VI. 32: Matrice de corrélation des paramètres physico-chimiques mesurés dans les eaux de la plaine d’El-Kantara (FEV 2015)..... | P:234 |
| TAB .VI. 33: Tableau de bord des paramètres physico-chimiques mesurés des eaux de la plaine d’El-Kantara pour la CAH (SEP 2011)..... | P:236 |
| TAB .VI. 34: Tableau de bord des paramètres physico-chimiques mesurés des eaux de la plaine d’El-Kantara pour la CAH (FEV 2012)..... | P:236 |
| TAB .VI. 35: Tableau de bord des paramètres physico-chimiques mesurés des eaux de la plaine d’El-Kantara pour la CAH (SEP 2014)..... | P:237 |
| TAB .VI. 36: Tableau de bord des paramètres physico-chimiques mesurés des eaux de la plaine d’El-Kantara pour la CAH (FEV 2015)..... | P:237 |
| TAB .VI. 37: Valeurs propres des axes et leurs contributions (Variance totale expliquée) (SEP 2011)..... | P:249 |
| TAB .VI. 38: Corrélation entre les variables et les axes (SEP 2011)..... | P:251 |
| TAB .VI. 39: Valeurs propres des axes et leurs contributions (Variance totale expliquée) (FEV 2012)..... | P:254 |
| TAB .VI. 40: Corrélation entre les variables et les axes (FEV 2012)..... | P:255 |
| TAB .VI. 41: Valeurs propres des axes et leurs contributions (Variance totale expliquée) (SEP 2014)..... | P:257 |
| TAB .VI. 42 : Corrélation entre les variables et les axes (SEP 2014)..... | P:259 |
| TAB .VI. 43: Valeurs propres des axes et leurs contributions (Variance totale expliquée) (FRV 2015)..... | P:261 |
| TAB .VI. 44: Corrélation entre les variables et les axes (FEV 2015)..... | P:262 |
| TAB .VI. 45: Matrice de corrélation entre les variables Septembre 2011 et Février 2012)..... | P:273 |
| TAB .VI. 46: Tableau récapitulatif des grandeurs statistiques des paramètres physico-chimiques, des deux classes..... | P:275 |
| TAB .VI. 47: Tableau récapitulatif des critères de la vulnérabilité intrinsèque et spécifique..... | P:287 |
| TAB .VI. 48: Tableau récapitulatif des indices de la méthode de vulnérabilité intrinsèque GOD..... | P:291 |
| TAB .VI. 49: Tableau récapitulatif des intervalles des indices de vulnérabilité intrinsèque GOD et classes correspondantes..... | P:292 |

| | |
|--|-------|
| TAB .VI. 50: Tableau récapitulatif des sept (7) paramètres " DRASTIC " et leur poids... | P:294 |
| TAB .VI. 51: Tableau récapitulatif Notations accordées aux paramètres de la méthode DRASTIC (L'allemand-Barrès, 1994)..... | P:295 |
| TAB .VI. 52: Tableau récapitulatif des Notations et pondérations selon la profondeur... | P:296 |
| TAB .VI. 53: Tableau récapitulatif des Notations et pondérations selon la Recharge..... | P:297 |
| TAB .VI. 54: Tableau récapitulatif des Notations et pondérations selon la nature de la zone saturée (A)..... | P:298 |
| TAB .VI. 55 : Tableau récapitulatif des Notations et pondérations selon la nature du sol (S) | P:299 |
| TAB .VI. 56 : Tableau récapitulatif des Notations et pondérations selon la topographie (T) | P:300 |
| TAB .VI. 57 : Tableau récapitulatif des Notations et pondérations selon Nature de la zone non saturée (vadose) (I)..... | P:301 |
| TAB .VI. 58 : Tableau récapitulatif des Notations et pondérations selon Conductivité hydraulique m/s(perméabilité) (C)..... | P:301 |
| TAB .VI. 59 : Tableau récapitulatif des poids et des poids relatifs des paramètres physico-chimiques..... | P:303 |
| TAB .VI. 60 : Tableau récapitulatif de la Classification de l'eau selon l'IPE..... | P:305 |

Listes des figures :

Chapitre I: Cadre général

| | |
|---|------|
| Fig. I.01 : Situation géographique de la région d'étude..... | P:10 |
| Fig. I.02 Situation du sous bassin versant d'Oued El-Hai par rapport aux grands bassins versants de l'Algérie..... | P:11 |
| Fig. I.03: Carte de découpage administratif du sous bassin d'Oued El-Hai..... | P:12 |
| Fig. I.04 : Carte topographique Bassin versant d'Oued El-Hai..... | P:13 |
| Fig. I.05: Coupes topographiques du bassin versant d'Oued El-Hai..... | P:14 |
| Fig. I.06 : Réseau hydrographique du bassin versant d'Oued El-Hai..... | P:15 |
| Fig. I.07 : Réseau hydrographique de la région d'El-Kantara..... | P:15 |
| Fig. I.08 : Population du bassin versant d'Oued El –Hai..... | P:17 |

Chapitre II : Etude géologique

| | |
|--|-------|
| Fig. II.01 : Carte et coupe structurale schématique de la chaîne des Maghrébides..... | P: 22 |
| Fig. II.02 : Localisation des principaux ensembles géomorphologiques du Nord de l'Algérie et de la Tunisie..... | P :24 |
| Fig. II.03 : La carte structurale du massif de l'Aurès..... | P:26 |
| Fig. II.04 : Colonne lithostratigraphique des Aurès..... | P:27 |
| Fig. II.05 : Carte géologie régional du bassin versant d'Oued El-Hai..... | P:29 |
| Fig. II.06 : La carte structurale du massif de l'Aurès..... | P:31 |
| Fig. II.07 : Extrait de la carte géologique du secteur d'El-Kantara 1/50000..... | P:39 |
| Fig. II.08 : Coupe à l'aval d'El-Kantara..... | P:44 |

Chapitre III : Climatologie

| | |
|---|------|
| Fig.III.01 : Carte de la situation des stations de mesure par rapport le bassin versant d'Oued El-Hai..... | P:49 |
| Fig.III.02 : Carte de la situation de la station de mesure H2 par rapport les autres stations de mesures à l'intérieure du bassin versant d'Oued El-Hai..... | P:50 |
| Fig.III.03 : Carte pluviométrique (Isohyète) du bassin versant d'Oued El-Haï..... | P:52 |
| Fig.III.04 : Cartes des précipitations annuelles moyennes période 1965-1995..... | P:53 |
| Fig.III.05 : Variation des précipitations interannuelles..... | P:54 |
| Fig.III.06 : Variation des précipitations moyennes mensuelles interannuelles de Biskra (1991-2015)..... | P:56 |
| Fig.III.07 : Variation des précipitations mensuelles de la station d'El-Kantara (1913-1938)..... | P:57 |
| Fig.III.08 : Variation des précipitations mensuelles de la station H2 (1997-2017)..... | P:58 |
| Fig.III.09 : Variation des précipitations mensuelles des trois stations..... | P:58 |
| Fig. III.10 : Variation des précipitations saisonnières des trois stations..... | P:59 |
| Fig.III.11 : Carte des températures moyennes annuelles de l'Est Algérien..... | P:61 |
| Fig.III.12 : Variation des températures annuelles de Biskra (1991-2015) et H2 (1997-2017)..... | P:63 |
| Fig.III.13 : Variation des températures moyennes mensuelles interannuelles des trois stations..... | P:64 |
| Fig.III.14 : Diagrammes Pluiothermiques des trois stations..... | P:66 |
| Fig.III.15 : Abaque de l'Indice d'aridité Annuel de Demartonne (1923)..... | P:69 |
| Fig.III.16 : Diagramme d'EMBERGER..... | P:72 |
| Fig.III.17 : Abaque de Wundt pour l'estimation de l'E.T.R..... | P:75 |
| Fig. III.18 : Bilan hydrique des trois stations..... | P:79 |

Chapitre IV : Géomorphologie

| | |
|--|------|
| Fig. IV.01 : Rectangle équivalent du bassin versant d'Oued El-Hai..... | P:87 |
| Fig. IV.02 : Courbe hypsométrique du bassin versant de Oued El-Hai..... | P:89 |

Chapitre V : Hydrogéologie

- Fig. V.01** : Les principales nappes aquifères du bassin versant d'Oued El-Hai.....P:100
- Fig. V.02** : Extrait de la carte géologique du secteur d'El-Kantara 1/50000 et situation des sondages et forage de reconnaissance.....P:102
- Fig. V.03** : Lithologie des sondages et des forages de reconnaissance du secteur d'El-Kantara et essais de corrélation.....P:106
- Fig. V.04** : Esquisse 1 de corrélation entre deux sondages d'orientation SW-NE.....P:106
- Fig. V.05** : Esquisse 2 de corrélation entre deux sondages d'orientation S-N.....P:107
- Fig. V.06** : Log- Hydrolithostratigraphique synthétique d'El-Kantara.....P:108
- Fig. V. 07**: Coupes hydrogéologiques d'orientation NW-SE.....P:110
- Fig. V.08** : Carte d'inventaire des points d'eau 2012.....P:114
- Fig. V.09** : Carte d'inventaire des points d'eau 2017.....P:114
- Fig. V.10** : Carte piézométrique de l'aquifère alluvionnaire de la région d'El-Kantara Sep.2011.....P:115
- Fig. V.11** : Carte piézométrique de l'aquifère alluvionnaire de la région d'El -Kantara Fév.2012.....P:116
- Fig. V.12** : Carte piézométrique de l'aquifère alluvionnaire de la région d'El- Kantara en 2017P:117
- Fig. V.13** : Carte de battement de l'aquifère alluvionnaire de la région d'El –Kantara...P:118
- Fig. V.14** : Carte d'évolution de la piézométrie de l'aquifère alluvionnaire de la région d'El-Kantara entre 2011 et 2017.....P:118
- Fig. V.15** : Carte des conditions aux limites de la région d'El –Kantara.....P:119
- Fig. V.16** : Exemple d'application de la méthode de JACOB sur le puits N°02 (durant la descente) dans la région d'El –Kantara.....P:124
- Fig. V.17** : Exemple d'application de la méthode de JACOB sur le puits N°02 (durant la remontée) dans la région d'El –Kantara.....P:124
- Fig. V.18** : Exemple d'application de la méthode de JACOB sur le puits N°01(durant la descente) dans la région d'El –Kantara.....P:125

Fig. V.19 : Exemple d'application de la méthode de JACOB sur le puits N°01(durant la remontée) dans la région d'El –Kantara.....P:126

Fig. V.20 : Exemple d'application de la méthode de JACOB sur le puits N°17(durant la descente) dans la région d'El –Kantara.....P:127

Fig. V.21 : Exemple d'application de la méthode de JACOB sur le puits N°17(durant la remontée) dans la région d'El –Kantara.....P:128

Chapitre VI : Etude hydrochimique, qualitative et vulnérabilité à la pollution des eaux.

Partie A : Etude hydrochimique et qualitative des eaux

Fig.VI.01 : Carte d'inventaire des points analysés.....P:133

Fig. VI.02 : Taux de l'écart par rapport à la moyenne des variables physico-chimiques mesurées des eaux de la plaine d'El-Kantara.....P:139

Fig. VI.03 : Histogrammes de variation du PH dans les eaux de la plaine d'El-Kantara.....P:142

Fig. VI.04 : Histogrammes de variation Eh dans les eaux de la plaine d'El-Kantara.....P:143

Fig. VI.05 : Histogrammes de variation du DHT dans les eaux de la plaine d'El-Kantara.....P:144

Fig.VI.06 : Histogrammes de variation de la CE dans les eaux de la plaine d'El-Kantara.....P:146

Fig.VI.07 : Histogrammes de variation de la minéralisation dans les eaux de la plaine d'El-Kantara.....P:148

Fig.VI.08 : Histogrammes de variation de l'ion Calcium dans les eaux de la plaine d'El-Kantara.....P:151

Fig.VI.09 : Histogrammes de variation de l'ion Magnésium dans les eaux de la plaine d'El-Kantara.....P:152

Fig. .VI.10 : Histogrammes de variation de l'ion Sodium dans les eaux de la plaine d'El-Kantara.....P:153

Fig.VI.11 : Histogrammes de variation de l'ion Potassium dans les eaux de la plaine d'El-Kantara.....P:154

Fig.VI.12 : Histogrammes de variation des Chlorures dans les eaux de la plaine d'El-Kantara.....P:156

Fig.VI.13 : Histogrammes de variation des Sulfates dans les eaux de la plaine d'El-Kantara.....P:157

| | |
|---|-------|
| Fig.VI.14 : Histogrammes de variation des Bicarbonates dans les eaux de la plaine d'El-Kantara..... | P:158 |
| Fig.VI.15 : Histogrammes de variation des Nitrates dans les eaux de la plaine d'El-Kantara | P:159 |
| Fig.VI.16 : Histogrammes de variation des Nitrites dans les eaux de la plaine d'El-Kantara | P:160 |
| Fig.VI.17 : Histogrammes de variation de l'Ammonium dans les eaux de la plaine d'El-Kantara..... | P:161 |
| Fig.VI.18 : Histogrammes de variation des Orthophosphates dans les eaux de la plaine d'El-Kantara..... | P:162 |
| Fig.VI.19 : Histogrammes de variation du Phosphore dans les eaux de la plaine d'El-Kantara | P:163 |
| Fig.VI.20 : Histogrammes de variation du DBO5 dans les eaux de la plaine d'El-Kantara | P:164 |
| Fig.VI.21 : Histogrammes de variation du DCO dans les eaux de la plaine d'El-Kantara | P:165 |
| Fig.VI.22 : Histogrammes de variation de l'ion Plomb dans les eaux de la plaine d'El-Kantara..... | P:167 |
| Fig.VI.23 : Histogrammes de variation de l'ion Fer dans les eaux de la plaine d'El-Kantara | P:168 |
| Fig.VI.24 : Histogrammes de variation de l'ion Cuivre dans les eaux de la plaine d'El-Kantara..... | P:169 |
| Fig.VI.25 : Histogrammes de variation de l'ion Manganèse dans les eaux de la plaine d'El-Kantara..... | P:170 |
| Fig.VI.26 : Histogrammes de variation de l'ion Chrome et des Chromates dans les eaux de la plaine d'El-Kantara..... | P:171 |
| Fig.VI.27 : Diagramme de STABLER pour la classification des eaux de la plaine d'El-Kantara..... | P:173 |
| Fig.VI.28 : Diagramme de Schoeller –Berkaloff pour la classification des eaux de la plaine d'El-Kantara (période basses eaux)..... | P:174 |
| Fig.VI.29 : Diagramme de Schoeller –Berkaloff pour la classification des eaux de la plaine d'El-Kantara (période hautes eaux)..... | P:175 |
| Fig.VI.30 : Diagramme de PIPER présentation générale..... | P:176 |

| | |
|---|-------|
| Fig.VI.31 : Diagramme de PIPER pour la classification des eaux de la plaine d'El-Kantara (période basse eaux)..... | P:177 |
| Fig.VI.32 : Diagramme de PIPER pour la classification des eaux de la plaine d'El-Kantara (période hautes eaux)..... | P:178 |
| Fig.VI.33 : Diagramme de STIFF pour la classification des eaux de la plaine d'El-Kantara | P:179 |
| Fig.VI.34 : Aptitude des eaux de la plaine d'El-Kantara à l'irrigation selon le Diagramme de Richards (Riverside)..... | P:193 |
| Fig.VI.35 : Aptitude des eaux de la plaine d'El-Kantara à l'irrigation selon le Diagramme de Wilcox..... | P:194 |
| Fig.VI.36 : Cartes des PH des eaux de la plaine d'El-Kantara..... | P:196 |
| Fig.VI.37 : Cartes de conductivité électrique des eaux de la plaine d'El-Kantara..... | P:197 |
| Fig.VI.38 : Cartes de minéralisation des eaux de la plaine d'El-Kantara..... | P:198 |
| Fig.VI.39 : Cartes de résidu sec des eaux de la plaine d'El-Kantara..... | P:199 |
| Fig.VI.40 : Cartes de l'ion Calcium des eaux de la plaine d'El-Kantara..... | P:200 |
| Fig.VI.41 : Cartes de l'ion Magnésium des eaux de la plaine d'El-Kantara..... | P:201 |
| Fig.VI.42 : Cartes de l'ion Sodium des eaux de la plaine d'El-Kantara..... | P:202 |
| Fig.VI.43 : Cartes de l'ion Potassium des eaux de la plaine d'El-Kantara..... | P:203 |
| Fig.VI.44 : Cartes de l'ion Chlorure des eaux de la plaine d'El-Kantara..... | P:204 |
| Fig.VI.45 : Cartes des Sulfates des eaux de la plaine d'El-Kantara..... | P:205 |
| Fig.VI.46 : Cartes des Bicarbonates des eaux de la plaine d'El-Kantara..... | P:206 |
| Fig.VI.47 : Le cycle de l'azote dans le sol (Recous et al, 1997)..... | P:208 |
| Fig.VI.48 : Le cycle de l'azote dans le sol (Recous et al, 1997)..... | P:208 |
| Fig.VI.49 : Le cycle de l'azote dans le sol (Hill, 1991)..... | P:209 |
| Fig.VI.50 : Cartes des Nitrates des eaux de la plaine d'El-Kantara..... | P:210 |
| Fig.VI.51 : Cartes des Nitrites des eaux de la plaine d'El-Kantara..... | P:211 |
| Fig.VI.52 : Cartes des l'azote ammoniacal des eaux de la plaine d'El-Kantara..... | P:212 |
| Fig.VI.53 : Carte des Phosphates(Orthophosphates) des eaux de la plaine d'El-Kantara...P:213 | |

| | |
|--|-------|
| Fig.VI.54: Carte du Phosphore total des eaux de la plaine d'El-Kantara..... | P:214 |
| Fig.VI.55: Cartes de la demande biochimique en oxygène en cinq jours des eaux de la plaine d'El-Kantara..... | P:214 |
| Fig.VI.56: Cartes de la demande chimique en oxygène des eaux de la plaine d'El-Kantara..... | P:215 |
| Fig.VI.57: Cartes du Plomb des eaux de la plaine d'El-Kantara..... | P:216 |
| Fig.VI.58: Cartes du Fer des eaux de la plaine d'El-Kantara..... | P:217 |
| Fig.VI.59: Cartes du Cuivre des eaux de la plaine d'El-Kantara..... | P:218 |
| Fig.VI.60: Carte du Manganèse des eaux de la plaine d'El-Kantara..... | P:219 |
| Fig.VI.61: Carte du Chrome des eaux de la plaine d'El-Kantara..... | P:220 |
| Fig.VI.62: Carte des Chromates des eaux de la plaine d'El-Kantara..... | P:220 |
| Fig.VI.63: Cartes de la Salinité Potentielle des eaux de la plaine d'El-Kantara..... | P:221 |
| Fig.VI.64: Cartes d'aptitude à l'irrigation selon le diagramme de Richard des eaux de la plaine d'El-Kantara..... | P:222 |
| Fig.VI.65: Cartes d'aptitude à l'irrigation selon le diagramme de WILCOX des eaux de la plaine d'El-Kantara..... | P:223 |
| Fig.VI.66: Cartes de potabilité des eaux selon le degré hydrométrique total (D.H.T) des eaux de la plaine d'El-Kantara..... | P:224 |
| Fig.VI.67: Cartes du rapport caractéristique rCa^{2+}/rMg^{2+} des eaux de la plaine d'El-Kantara..... | P:225 |
| Fig.VI.68: Cartes du rapport caractéristique rSO_4^{2-} / rCl^- des eaux de la plaine d'El-Kantara..... | P:226 |
| Fig.VI.69: Evolution des indices de saturation des minéraux des eaux de la plaine d'El-Kantara (SEP 2011)..... | P:231 |
| Fig.VI.70: Evolution des indices de saturation des minéraux des eaux de la plaine d'El-Kantara(FEV 2012)..... | P:233 |
| Fig.VI.71: Evolution des indices de saturation des minéraux des eaux de la plaine d'El-Kantara (SEP 2014)..... | P:233 |
| Fig.VI.72: Evolution des indices de saturation des minéraux des eaux de la plaine d'El-Kantara (FEV 2015)..... | P:236 |

| | |
|---|-------|
| Fig.VI.73: Dendrogramme et tableau de Classification ascendante hiérarchique (C.A.H) des variables des eaux de la plaine d’El-Kantara (SEP 2011)..... | P:244 |
| Fig.VI.74: Dendrogramme et tableau de Classification ascendante hiérarchique (C.A.H) des variables des eaux de la plaine d’El-Kantara (FEV 2012)..... | P:245 |
| Fig.VI.75: Dendrogramme et tableau de Classification ascendante hiérarchique (C.A.H) des variables des eaux de la plaine d’El-Kantara (SEP 2014)..... | P:246 |
| Fig.VI.76: Dendrogramme et tableau de Classification ascendante hiérarchique (C.A.H) des variables des eaux de la plaine d’El-Kantara (FEV 2015)..... | P:247 |
| Fig.VI.76.bis: Dendrogramme et tableau de Classification ascendante hiérarchique (C.A.H) des observations des eaux de la plaine d’El-Kantara (SEP 2011)..... | P:248 |
| Fig.VI.77: Dendrogramme et tableau de Classification ascendante hiérarchique (C.A.H) des observations des eaux de la plaine d’El-Kantara (FEV 2012)..... | P:250 |
| Fig.VI.78: Dendrogramme et tableau de Classification ascendante hiérarchique (C.A.H) des observations des eaux de la plaine d’El-Kantara..... | P:251 |
| Fig.VI.79: Dendrogramme et tableau de Classification ascendante hiérarchique (C.A.H) des observations des eaux de la plaine d’El-Kantara..... | P:251 |
| Fig.VI.80: Courbe des valeurs propres et la matrice des variances expliquées (SEP 2011) | P:256 |
| Fig.VI.81: Projection des variables sur le plan factoriel F1-F2 (SEP 2011)..... | P:258 |
| Fig.VI.82: Projection des individus sur le plan factoriel F1-F2 (SEP 2011)..... | P:258 |
| Fig.VI.83: Courbe des valeurs propres et la matrice des variances expliquées (FEV 2012) | P:260 |
| Fig.VI.84: Projection des variables sur le plan factoriel F1-F2 (FEV 2012)..... | P:262 |
| Fig.VI.85: Projection des individus sur le plan factoriel F1-F2 (FEV 2012)..... | P:262 |
| Fig.VI.86: Courbe des valeurs propres et la matrice des variances expliquées (SEP 2014) | P:264 |
| Fig.VI.87: Projection des variables sur le plan factoriel F1-F2 (SEP 2014)..... | P:266 |
| Fig.VI.88: Projection des individus sur le plan factoriel F1-F2 (SEP 2014)..... | P:266 |
| Fig.VI.89: Courbe des valeurs propres et la matrice des variances expliquées (FEV 2015) | P:268 |
| Fig.VI.90: Projection des variables sur le plan factoriel F1-F2 (FEV 2015)..... | P:270 |

| | |
|--|-------|
| Fig.VI.92: Projection des individus sur le plan factoriel F1-F2 (SEP 2011)..... | P:270 |
| Fig.VI. 93: Représentation d'une SOM, celle-ci comprend 24 cellules (ou neurones), six rangées horizontales, et quatre rangées verticales..... | P:272 |
| Fig.VI. 94: Structure d'une carte topologique auto-organisatrice de Kohonen (SOM)..... | P:273 |
| Fig.VI. 95: Description de l'algorithme d'apprentissage des cartes topologiques auto-organisatrice de Kohonen (SOM)..... | P:275 |
| Fig.VI. 96: Description de l'algorithme d'apprentissage des cartes topologiques auto-organisatrice de Kohonen (SOM) : identification des groupes semblables similaire à une Analyse en Composantes Principales..... | P:277 |
| Fig.VI. 97: Gradient de valeurs des paramètres physico-chimiques sur la carte topologique auto-organisatrice de Kohonen (SOM)..... | P:278 |
| Fig.VI. 98 : Classification des neurones grâce à une classification hiérarchique ascendante, permettant une définition simultanée de zones sur la carte SOM..... | P:280 |
| Fig.VI. 99: Répartition des échantillons sur la carte topologique auto-organisatrice de Kohonen (SOM) à partir des variables physico-chimiques des eaux de la plaine d'El-Kantara..... | P:281 |

Partie B : Vulnérabilité à la pollution des eaux

| | |
|--|-------|
| Fig.VI. 100: Relations entre l'échelle de la carte et la nature des objectifs..... | P:294 |
| Fig.VI. 101: Système empirique GOD pour une estimation rapide de la vulnérabilité d'un aquifère..... | P:296 |
| Fig.VI. 102: Carte de vulnérabilité à la pollution de la nappe Mio-Plio-Quaternaire de la région d'El-Kantara selon la méthode GOD..... | P:297 |
| Fig.VI. 103: Carte de la profondeur d'eau et des indices (ID)..... | P:302 |
| Fig.VI. 104: Carte des indices (IS) selon la nature du sol (S)..... | P:305 |
| Fig.VI. 105: Carte des indices (IT) selon la Topographie (T)..... | P:306 |
| Fig.VI. 106: Carte de vulnérabilité selon la méthode DRASTIC..... | P:308 |
| Fig.VI. 107: Histogrammes de variation de l'indice IPE (PIG) dans les eaux de la plaine d'El-Kantara..... | P:311 |
| Fig.VI. 108: Carte de vulnérabilité selon la méthode IPE (PIG)..... | P:313 |

Table des matières:

| | |
|----------------------------|--------|
| ملخص..... | P:I |
| Abstract..... | P:II |
| Résumé..... | P:III |
| Dédicace..... | P:IV |
| Remerciement..... | P:V |
| Liste des tableaux..... | P:VII |
| Liste des figures..... | P:XIII |
| Table des matières..... | P:XXII |
| Introduction générale..... | P :02 |

Chapitre I: Cadre général

| | |
|---|------|
| 1- Situation géographique... .. | P:10 |
| 2- Situation Administrative..... | P:12 |
| 3- Orographie..... | P:13 |
| 3.1- Les principaux massifs..... | P:13 |
| 3.2- Les piedmonts..... | P:13 |
| 3.3- Les Zones basses..... | P:13 |
| 4- Le réseau hydrographique:..... | P:14 |
| 5- Anthropisation..... | P:16 |
| 5.1-La population..... | P:16 |
| 5.2-Aspect socioéconomique..... | P:17 |
| 5.2.1-Contexte agricole et élevage..... | P:17 |

| | |
|---------------------------------|-------|
| 5.2.2-Contexte Industriel | P:18 |
| 5.2.3-Le tourisme..... | P:18 |
| 5.2.4-Déchets solides..... | P:18 |
| 6-Conclusion..... | P :19 |

Chapitre II : Etude géologique.

| | |
|---|------|
| 1-Introduction | P:21 |
| 2- La géologie régionale..... | P:21 |
| 2.1- Le domaine interne..... | P:22 |
| 2.2- Le domaine des flysch..... | P:23 |
| 2.3- Le domaine externe..... | P:23 |
| 2.3.1- Les séries telliennes..... | P:23 |
| 2.3.2- Les série de l'avant pays allochtone..... | P:25 |
| 2.3.3- Les séries de l'avant pays atlasique autochtone..... | P:25 |
| 3-Géologie du massif de l'Aurès. | P:26 |
| 3.1. Localisation et limites..... | P:26 |
| 3.2-Lithostratigraphie..... | P:27 |
| 3.2.1-Le primaire..... | P:28 |
| 3.2.2- Le secondaire..... | P:28 |
| a- Le Trias..... | P:28 |
| b- Le Jurassique – Berriasien (base du Crétacé)..... | P:28 |
| c- Le Kimméridgien..... | P:32 |
| d- Le Portlandien et le Berriasien..... | P:32 |
| e- Le Crétacé..... | P:32 |
| e.1- Le Crétacé inférieur..... | P:32 |
| e.1.1 - Le Néocomien (indifférencié)..... | P:32 |

| | |
|---|------|
| e.1.2- Le Barrémien..... | P:32 |
| e.1.3 - l’Aptien..... | P:32 |
| e.1.4- l’Albien..... | P:33 |
| e.2- Le Crétacé supérieur..... | P:33 |
| e.2.1 - Le Cénomanién..... | P:33 |
| e.2.2 - Le Turonien..... | P:33 |
| e.2.3- Le Sénonien inférieur (Coniacien, Santanien)..... | P:33 |
| e.2.4- Le Sénonien supérieur (Campanien - Maestrichtien)..... | P:34 |
| 3.1.3-Le Tertiaire..... | P:34 |
| a- Le Danien..... | P:34 |
| b- Le Paléocène..... | P:34 |
| c- L’Eocène..... | P:34 |
| d- Le Miocène..... | P:35 |
| e- Le Pliocène..... | P:36 |
| 3.2.4- Le Quaternaire..... | P:36 |
| 4-Contexte structural..... | P:36 |
| 4.1-Les cassures..... | P:36 |
| 5- Analyse tectonique régionale..... | P:36 |
| 5.1-Structuration de l’Atlas saharién..... | P:37 |
| 5.1.1- La phase Emshérienne..... | P:37 |
| 5.1.2- La phase Atlasique (ou phase pyrénéenne)..... | P:37 |
| 5.1.3-La phase distensive de l’Oligo-Miocène..... | P:37 |
| 5.1.4- La phase Miocène..... | P:37 |

| | |
|---|------|
| 5.1.5-La phase du Pliocène..... | P:38 |
| 5.1.6-La phase Quaternaire..... | P:38 |
| 6-Géologie locale (synclinal d'El-Kantara) | P:38 |
| 6.1-Les principaux traits de la série stratigraphique..... | P:38 |
| 6.1.1-Le secondaire..... | P:38 |
| a- Le Maestrichtien « supérieur » C ^{6b} | P:38 |
| b- Campanien, Maestrichtien « inférieur » C ⁵⁻ | P:38 |
| c-Santonien- C ⁴ | P:40 |
| d-Coniacien- C ³ | P:40 |
| e- Turonien- C ² | P:40 |
| f- Cénomanién..... | P:40 |
| g- Le Trias-t ²⁻³ | P:40 |
| 6.1.2-Le Tertiaire..... | P:40 |
| a- Pliocène P..... | P:40 |
| b. Le Miocène | P:40 |
| c- Eocène Moyen e ⁵⁻⁶ | P:41 |
| d- Eocène Inférieur e ¹⁻⁴ | P:41 |
| 4.1.3-Le quaternaire..... | P:41 |
| a- Raharbien et actuel -q ⁶ | P:41 |
| b- Soltanien -q ⁵ | P:42 |
| c- Tensiftien -q ⁴ | P:42 |
| d- Amérien -q ³ | P:42 |

| | |
|---|------|
| e- Saletien-q ² | P:42 |
| 6.2-Formations récentes..... | P:42 |
| 6.2.1-Les glacis polygéniques..... | P:42 |
| 6.2.2-Les éboulis..... | P:42 |
| 7- Analyse tectonique locale..... | P:42 |
| 7.1-Les Plis..... | P:42 |
| 7.2-Les cassures..... | P:43 |
| 7.3-Les différentes phases tectoniques..... | P:45 |
| 8-Conclusion..... | P:46 |

Chapitre III : Climatologie

| | |
|--|------|
| 1-Introduction | P:48 |
| 1.1-Estimation de la lame d'eau tombée dans le bassin d'Oued El-Hai..... | P:50 |
| 2. Les précipitations..... | P:52 |
| 2.1. Cartes des précipitations annuelles moyennes..... | P:52 |
| 2.2. La pluviométrie moyenne annuelle..... | P:53 |
| 2.3. La pluviométrie moyenne mensuelle interannuelle et saisonnière..... | P:55 |
| 2.4. Etude des précipitations journalières..... | P:59 |
| 3. Les températures..... | P:61 |
| 3.1- Les températures moyennes annuelles..... | P:62 |
| 3.2- Les températures moyennes mensuelles..... | P:63 |
| 4. Le Vent..... | P:64 |
| 5- L'Humidité relative..... | P:65 |
| 6. Types de climat..... | P:65 |
| 7- Le régime climatique..... | P:67 |

| | |
|--|------|
| 7.1-L'humidité (méthode d'Euverte)..... | P:67 |
| 7.2-Indice d'aridité..... | P:68 |
| 7.2.1- Indice d'aridité de De Martonne..... | P:68 |
| 7.2.2-Indice d'aridité mensuelle..... | P:70 |
| 7.3- Le Diagramme D'Emberger..... | P:71 |
| 8. Calcul des paramètres du bilan..... | P:73 |
| 8.1- L'évapotranspiration potentielle ETP..... | P:73 |
| 8.2- L'évapotranspiration réelle ETR..... | P:74 |
| 9- Calcul de ruissellement..... | P:76 |
| 10-Etablissement du bilan hydrique selon la méthode de THORNTHWAITE | P:77 |
| 11-Interprétation des bilans hydriques..... | P:80 |
| A- Le Bilan hydrologique de la station d'El-Kantara..... | P:80 |
| B- Le Bilan hydrologique de Biskra..... | P:80 |
| C- Le Bilan hydrologique de la station H2..... | P:80 |
| 12-Conclusion..... | P:82 |

Chapitre IV : Géomorphologie

| | |
|---|------|
| 1-Introduction..... | P:84 |
| 2-Géomorphologie du bassin versant d'Oued El-Hai..... | P:84 |
| 3-Les paramètres géométriques..... | P:84 |
| 3.1-La superficie | P:84 |
| 3.2-Le périmètre (P) | P:84 |
| 4- Paramètres morphométriques | P:84 |
| 4.1-Indice de compacité de GRAVILLIUS. (Kc) | P:85 |

| | |
|---|------|
| 4.2-Rectangle équivalent | P:85 |
| 4.2.1-Longueur équivalente..... | P:86 |
| 4.2.2-Largeur équivalente | P:86 |
| 5-Hypsométrie | P:86 |
| 5.1-La courbe hypsométrique | P:88 |
| 6-Les indices de pente | P:88 |
| 6.1-Indice de pente de Roche(Ip) | P:88 |
| 6.2-Indice de pente globale (Ig) | P:90 |
| 6.3- Indice de pente moyenne (Im) | P:90 |
| 6.4-Dénivelée spécifique (Ds) | P:91 |
| 7-Les paramètres morphométriques..... | P:92 |
| 7.1-Densité de drainage (Dd) | P:92 |
| 7.2-Le rapport de confluence(Rc) | P:92 |
| 7.3-Le rapport de longueur (Rl) | P:93 |
| 7.4- Coefficient de torrentialité (Ct)..... | P:93 |
| 7.5-La pente moyenne du cours d'eau principal (I) | P:93 |
| 7.6-Temps de concentration (Tc) | P:94 |
| 7.6.1-Formule de GIANDOTTI..... | P:94 |
| 7.6.2-Formule de Ventura | P:94 |
| 7.6.3-Formule de Passini | P:95 |
| 7.7-La vitesse d'écoulement (V) | P:95 |
| 8-Conclusion | P:97 |

Chapitre V : Hydrogéologie

| | |
|--|-------|
| 1-Introduction | P:99 |
| 2- Aperçu général sur l'hydrogéologie et les principales nappes aquifères du bassin d'Oued El-Hai..... | P:99 |
| 3- L'hydrogéologie et les principales nappes aquifères de la plaine d'El-Kantara (zone d'étude)..... | P:101 |
| 3.1-L'outil géologique | P:101 |
| 3.2-L'outil des sondages..... | P:103 |
| 3.3-L'outil hydrogéologique..... | P:107 |
| 4- Hydrogéologie et description des aquifères potentiels Synclinal d'El-Kantara..... | P:109 |
| 4.1- La nappe phréatique du Quaternaire..... | P:109 |
| 4.2- La nappe du Maestrichtien..... | P:109 |
| 4.3- La nappe du Turonien..... | P:111 |
| 5- Etude piézométrique..... | P:112 |
| 5.1-Cartes d'inventaire des points d'eau de la nappe phréatique du Quaternaire..... | P:113 |
| 5.1.1-Carte d'inventaire des points d'eau (2011et 2012)..... | P:113 |
| 5.1.2-Carte d'inventaire des points d'eau (2017)..... | P:114 |
| 5.2-La piézométrie de nappe phréatique du Quaternaire (l'aquifère Alluvionnaire) | P:115 |
| 5.2.1- Carte piézométrique Septembre 2011..... | P:115 |
| 5.2.2- Carte piézométrique Février 2012..... | P:116 |
| 5.2.3.-Carte piézométrique Mai 2017..... | P:117 |
| 5.3-Evolution de la piézométrie entre 2011 et 2017..... | P:117 |
| 6-Les conditions aux limites | P:119 |

| | |
|---|--------------|
| 7-Les caractéristiques hydrodynamique de l'aquifère..... | P:119 |
| 7.1-Essais de pompages effectués dans la plaine d'El-Kantara..... | P:120 |
| 7.2-Interprétation des essais de pompage..... | P:121 |
| 7.3-Interprétation des essais de pompage par l'approximation de Cooper-Jacob | P:121 |
| 7.3.1 Étude de rabattement pendant le pompage (durant la descente)..... | P:122 |
| 7.3.1.1-Conditions d'application..... | P:122 |
| 7.3.1.2-Mode opératoire | P:122 |
| 7.3.2-Étude de rabattement pendant le pompage (durant la remonté) | P:123 |
| 7.4-Application de la méthode de Cooper-Jacob..... | P:123 |
| 7.4. 1- Application de la méthode de Cooper-Jacob sur le puits N°02..... | P:123 |
| 7.4. 2- Application de la méthode de Cooper-Jacob sur le puits N°01..... | P:125 |
| 7.4. 3- Application de la méthode de Cooper-Jacob sur le puits N°17..... | P:126 |
| 7.5-Interprétation des résultats des essais..... | P:128 |
| 9-Conclusion | P:130 |
| Chapitre VI : Etude hydrochimique, qualitative et vulnérabilité à la pollution des eaux. | |
| Partie A : Etude hydrochimique et qualitative des eaux..... | P:132 |
| 1-Introduction | P:132 |
| 2-Matériels et moyens d'analyse..... | P:132 |
| 3-Interprétation des résultats des analyses physico-chimiques..... | P:133 |
| 3.1-Normes de potabilité..... | P:133 |
| 4-Les paramètres physiques et chimiques..... | P:134 |

| | |
|---|-------|
| 4.1-Présentation globale des paramètres physico-chimiques et fiabilité des résultats des eaux d'El-Kantara..... | P:138 |
| 4.2- Etude détaillée des paramètres physiques et chimiques..... | P:141 |
| 4.2.1-Paramètres physiques..... | P:141 |
| 4.2.2-Paramètres chimiques..... | P:150 |
| 4.2.2.1-Eléments chimiques majeurs..... | P:150 |
| 4.2.2.1.1 –Les Cations..... | P:150 |
| 4.2.2.1.2–Les Anions..... | P:155 |
| 4.2.2.2-Les éléments indicateurs de pollution agricole (Substances eutrophisantes) | P:158 |
| 4.2.2.3-Charge en matières organiques (les éléments indicateurs de pollution anthropique) | P:163 |
| 4.2.2.4-Les éléments traces métalliques (ETM) (Les Métaux lourds) | P:166 |
| 5- Les faciès chimiques..... | P:171 |
| 5.1-Détermination des faciès hydrochimiques..... | P:171 |
| 5.1.1-Classification des eaux par l'interprétation du diagramme de STABLER..... | P:171 |
| 5.1.2-Classification des eaux par l'interprétation du diagramme de SCHOELLER BERKALLOF..... | P:174 |
| 5.1.3-Classification des eaux par l'interprétation du diagramme de PIPER..... | P:175 |
| 5.1.4-Classification des eaux par l'interprétation du diagramme de STIFF..... | P:178 |
| 6- Indice d'échange de base (i.e.b) | P:180 |
| 7- Qualité chimique des eaux dans la région d'El-Kantara..... | P:181 |
| 7.1-Etude de potabilité des eaux..... | P:181 |
| 7.1.1-La salinité..... | P:181 |
| 7.1.2- Le degré hydrométrique total (D.H.T) ou la dureté totale..... | P:182 |
| 7.2- Etude de potabilité des eaux selon les normes..... | P:183 |

| | |
|---|-------|
| 7.2.1-Selon l'O.M.S..... | P:183 |
| 7.2.2-Selon les normes du ministère du commerce algérien..... | P:185 |
| 7.3-Aptitude des eaux à l'irrigation..... | P:187 |
| 7.3.1- Introduction..... | P:187 |
| 7.3.2-La Salinité..... | P:188 |
| 7.3.3-Le Sodium..... | P:188 |
| 7.3.4-Calcul et interprétation des paramètres des eaux à usage agricole..... | P:189 |
| 7.3.4.1-Calcul des paramètres des eaux à usage agricole..... | P:189 |
| 7.3.4.2-Interprétation des résultats des diagrammes..... | P:192 |
| 7.3.4.2.1-Diagrammes de Richards..... | P:192 |
| 8- Cartographie hydrochimique..... | P:195 |
| 8.1- Cartographie des paramètres physiques..... | P:196 |
| 8.2- Cartographie des éléments chimiques majeurs..... | P:200 |
| 8.3- Cartographie des éléments indicateurs de pollution agricole (Substances eutrophisantes) | P:207 |
| 8.4- Cartographie des éléments indicateurs de pollution anthropique..... | P:214 |
| 8.4- Cartographie des éléments des éléments traces métalliques (ETM) (Les Métaux lourds) | P:216 |
| 8.5- Cartographie des paramètres caractérisant l'aptitude des eaux à l'irrigation..... | P:221 |
| 8.5 .1- Cartographie de la salinité totale..... | P:221 |
| 8.5 .2- Cartographie de la salinité potentielle (Sp) | P:221 |
| 8.5 .3- Cartographie d'aptitude des eaux à l'irrigation selon le diagramme de Richard..... | P:222 |
| 8.5 .4- Cartographie d'aptitude des eaux à l'irrigation selon le diagramme WILCOX..... | P:223 |
| 8.6- Cartographie de potabilité des eaux selon le degré hydrométrique total (D.H.T) ou la dureté totale..... | P:224 |

| | |
|---|-------|
| 8.7- Cartographie et domaines de variations des rapports caractéristiques..... | P:225 |
| 8.7.1- Cartes du rapport rCa^{2+} / rMg^{2+} | P:225 |
| 8.7.2- Cartes du rapport rSO_4^{2-} / rCl^- | P:225 |
| 8.7.3-Répartition spatiale des faciès chimiques..... | P:227 |
| 9- Etude de l'évolution des minéraux et des éléments dissous (étude de l'indice de saturation (SI)) | P:227 |
| 9.1.1- Théorie de DEBYE-HÜCKEL..... | P:228 |
| 9.1.2- Degré de saturation d'une solution vis-à-vis d'un minéral (indice de saturation) ... | P:228 |
| 9.1.3- Interprétation des résultats..... | P:229 |
| 10- Analyse statistique des données..... | P:236 |
| 10.1- Corrélation entre les paramètres physico-chimiques..... | P:237 |
| 10.2- Classification ascendante hiérarchique (C.A.H) | P:240 |
| 10.2 .1-Objet de la méthode..... | P:240 |
| 10.2 .2-Principe de la méthode..... | P:240 |
| 10.2 .3-Résultat de l'analyse..... | P:241 |
| 10.2 .3.1-Classification des variables: | P:244 |
| -Campagne Septembre 2011..... | P:244 |
| -Campagne Février 2012..... | P:245 |
| -Campagne Septembre 2014 | P:246 |
| -Campagne Février 2015 | P:247 |
| 10.2 .3.2-Classification des observations..... | P:248 |
| -Campagne Septembre 2011..... | P:248 |
| -Campagne Février 2012..... | P:249 |
| -Campagne Septembre 2014 | P:250 |
| -Campagne Février 2015 | P:251 |

| | |
|--|-------|
| 10. 3- Analyse en Composantes Principales (ACP) | P:252 |
| 10. 3.1- But de la méthode..... | P:253 |
| 10. 3.2- Utilisation de l'ACP..... | P:253 |
| 10. 3. 4- L'espace des variables..... | P:254 |
| 10. 3. 5- L'espace des unités statistiques..... | P:254 |
| 10. 3. 6- Traitement de données et interprétation des résultats | P:254 |
| 10. 3. 7- Applications de l'A.C.P. sur les eaux d'El-Kantara et interprétation des résultats..... | P:255 |
| 10. 3. 7 .1-Campagne Septembre 2011..... | P:255 |
| 10. 3. 7 .2-Campagne Février 2012..... | P:259 |
| 10. 3. 7 .3-Campagne Septembre 2014..... | P:263 |
| 10. 3. 7 .4-Campagne Février 2015..... | P:267 |
| 10.4- La méthode des cartes auto-organisatrices de Kohonen (SOM, pour self-organizing maps) des réseaux de neurones artificiels..... | P:271 |
| 10.4 .1-Présentation générale..... | P:271 |
| 10.4 .1 .1-Un réseau de neurones artificiel..... | P:271 |
| 10.4 .1 .2- Présentation et fonctionnement de La carte auto-organisatrice de Kohonen (SOM) | P:272 |
| 10.4 .1 .3- Utilisation des cartes auto-organisatrices (SOM) de Kohonen..... | P:272 |
| 10. 4. 1.4- Principe de la méthode..... | P:273 |
| 10.4 .2-Traitement de données et présentation de l'algorithme d'apprentissage | P:274 |
| 10.4 .2.1-Présentation de l'algorithme d'apprentissage..... | P:274 |
| 10. 4.3- Essai d'application de la méthode des cartes auto-organisatrices de Kohonen (SOM, pour self-organizing maps) sur les eaux d'El-Kantara et interprétation des résultats..... | P:276 |

| | |
|--|-------|
| 10. 4.3 .1- Application de la Classification Ascendante Hiérarchique par SOM (SOM-CHA) sur les eaux d’El-Kantara et interprétation des résultats..... | P:279 |
| 10. 4. 3.2- Principe de la méthode interprétation..... | P:279 |
| 11-Conclusion..... | P:282 |
| Partie B : Vulnérabilité à la pollution des eaux | P:284 |
| 1-Introduction..... | P:284 |
| 2- Notions sur la pollution..... | P:285 |
| 2.1- La pollution de l’eau souterraine..... | P:285 |
| 2.2- Le polluant..... | P:285 |
| 2. 3- Principaux types de polluants..... | P:285 |
| 2. 3.1- Les sels minéraux dissous..... | P:286 |
| 2. 3.2- Les éléments en trace métalliques | P:286 |
| 2. 3.3- Les éléments indicateurs de pollution agricole..... | P:286 |
| 2.4- Origine du chimisme des eaux d’El-Kantara..... | P:286 |
| 2.4 .1- Essais de détermination des apports de la région d’étude..... | P:287 |
| 2.4 .1.1-Les apports anthropiques..... | P:287 |
| 2.4 .1.2-Les rejets (eaux usées, poussières) | P:287 |
| 2.4 .1.2-Les Les apports naturels..... | P:288 |
| 3- Notions sur la vulnérabilité de l’eau souterraine à la pollution..... | P:288 |
| 3.1- Définition..... | P:288 |
| 3.2- Aspects de la vulnérabilité..... | P:289 |
| 3.2.1-Vulnérabilité intrinsèque..... | P:289 |
| 3.2.2-Vulnérabilité spécifique..... | P:289 |
| 3.3- Critères d’évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines..... | P:289 |
| 3.3.1- Critères de la vulnérabilité intrinsèque..... | P:290 |

| | |
|--|-------|
| 3.3.1 .1- Critères relatifs au sol..... | P:290 |
| -La topographie..... | P:290 |
| - Le couvert pédologique..... | P:290 |
| 3.3.1 .2- Critères relatifs à la zone non saturée..... | P:290 |
| -Profondeur de la nappe libre (Epaisseur de la ZNS) | P:290 |
| - Structure de la zone non saturée..... | P:290 |
| - Perméabilité verticale de la zone non saturée..... | P:290 |
| - Amplitude de battement de nappe..... | P:291 |
| 3.3.1.3- Critères relatifs à la zone saturée (ZS) | P:291 |
| -Type de nappe (libre ou captive)..... | P:291 |
| -Paramètres hydrodynamiques de la zone saturée..... | P:291 |
| -Piézométrie..... | P:291 |
| -Direction et sens d'écoulement des eaux dans la nappe..... | P:291 |
| -Type de système hydrogéologique..... | P:291 |
| -Relations nappe/cours d'eau..... | P:291 |
| - Epaisseur de l'aquifère..... | P:291 |
| 3.3.1.4- Critères communs au sol, à la Zone Non Saturée et à la Zone Saturée : | |
| -Fracturation..... | P:291 |
| -La recharge..... | P:292 |
| 3.3.1.5- -Comportement du polluant potentiel..... | P:292 |
| - Capacités dispersives et épuratoires des sols..... | P:292 |
| -Typologie de l'occupation du sol..... | P:292 |
| - Intrusions marines..... | P:292 |
| -Points sensibles..... | P:292 |
| 3.4- Objectifs et échelle de la carte de vulnérabilité..... | P:293 |

| | |
|--|-------|
| 4- Les méthodes d'estimation de la vulnérabilité..... | P:294 |
| 4.1-Vulnérabilité du système aquifère de la plaine d'El-Kantara par les méthodes intrinsèques..... | P:295 |
| 4.1.1- Vulnérabilité du système aquifère de la plaine d'El-Kantara selon la méthode GOD (Foster 1987) | P:295 |
| 4.1.1.1- Présentation de la méthode..... | P:295 |
| 4.1.1.2- Résultat et interprétation la carte de vulnérabilité à la pollution de la nappe Mio-Plio-Quaternaire de la région d'El-Kantara..... | P:296 |
| 4.1.2- Vulnérabilité du système aquifère de la plaine d'El-Kantara selon la méthode DRASTIC..... | P:299 |
| 4.1.2.1- Présentation de la méthode..... | P:299 |
| 4.1.2.2- Les paramètres de la méthode DRASTIC..... | P:299 |
| 4.1.2.3- Système de cotation..... | P:299 |
| 4.1.2.4-Construction de la carte de vulnérabilité..... | P:300 |
| -Profondeur de la nappe (D)..... | P:300 |
| -Acquisition et application des données de la Profondeur de la nappe (D))..... | P:301 |
| -La recharge efficace (R))..... | P:303 |
| -Acquisition et application des données..... | P:303 |
| -Nature de la zone saturée (le type d'Aquifère) (A) | P:303 |
| -Acquisition et application des données..... | P:303 |
| -Type de sol (Milieu sol au-dessus de la zone non saturée) (S) | P:304 |
| Acquisition et application des données..... | P:305 |
| Topographie et pente (T) | P:306 |
| -Acquisition et application des données..... | P:306 |
| -Impact de la zone vadose (nature de la zone non saturée) (I) | P:307 |

| | |
|--|-------|
| -Acquisition et application des données..... | P:307 |
| -La perméabilité "Conductivité hydraulique (C) | P:307 |
| -Acquisition et application des données..... | P:307 |
| 4.2-Vulnérabilité du système aquifère de la plaine d'El-Kantara par les méthodes spécifiques..... | P:309 |
| 4.2.1- Présentation de la méthode de l'Indice de la pollution des eaux souterraines (IPE) (PIG) | P:309 |
| -Poids du paramètre (Wp)..... | P:310 |
| -Poids relatif (RW)..... | P:310 |
| - L'état de la concentration (Sc, pour Status of concentration))..... | P:310 |
| - Qualité globale de l'eau (Ow, Overall water quality))..... | P:310 |
| - Calcul de l'indice de la pollution des eaux souterraines (IPE) (PIG)..... | P:310 |
| - Classification de l'indice de la pollution des eaux souterraines (IPE) (PIG))..... | P:310 |
| 4.2.2- Résultats et discussion de la méthode de l'Indice de la pollution des eaux souterraines (IPE) (PIG) | P:311 |
| 5-Conclusion..... | P:314 |
| -Conclusion générale. | P.316 |
| -Bibliographie..... | P.323 |

INTRODUCTION GENERALE

1. Introduction :

L'existence de toute sorte de vie est liée principalement à la présence de l'eau. Cette dernière est essentielle à la survie et au bien-être de l'être vivant et est indispensable au fonctionnement de nombreux secteurs de l'économie. Les ressources en eau sont inégalement réparties dans l'espace et souffrent des pressions anthropiques qui sont de plus en plus fortes, principalement en raison des activités humaines notamment l'urbanisation, la croissance démographique, l'augmentation du niveau de vie, la concurrence croissante pour les ressources en eau et la pollution. De plus, le changement climatique et les variations des conditions naturelles viennent aggraver cette situation. L'eau douce disponible (0,26 % du globe), seule ressource utilisable, est en quantité invariable alors que la population ne cesse d'augmenter et que la demande en eau est en pleine progression. Répondre à une demande continue et sans cesse croissante en eau requiert des efforts pour pallier la variabilité naturelle et améliorer la qualité et la quantité de l'eau disponible donc la gestion des ressources en eau devrait davantage veiller à accroître les ressources naturelles existantes et à réduire la demande et les pertes en eau. Des technologies plus récentes, telles que le dessalement d'eau de mer et la réutilisation de l'eau, viennent aujourd'hui s'ajouter aux techniques traditionnelles comme la collecte des eaux de pluie et ceux pour augmenter l'approvisionnement en eau.

2. Problématique

La qualité des eaux a connu ces dernières années dans le monde, dans l'Algérie et particulièrement la région d'étude de la plaine d'El-Kantara dans la partie aval du bassin versant d'Oued El-Hai, une grande détérioration, en raison du développement urbain et industriel. Les rejets des agglomérations ainsi que ceux de l'industrie sont souvent déversés directement dans les cours d'eau sans aucun traitement préalable. L'utilisation intensive des engrais chimiques dans l'agriculture ainsi que l'exploitation désordonnée des ressources en eau. Ces derniers produisent une modification chimique de l'eau et la rendent impropre aux usages souhaités.

La région d'El-Kantara se trouvant dans la wilaya de Biskra au Sud-est Algérien, renferme une ressource en eau importante surtout pour l'irrigation. Elle se situe dans la terminaison occidentale du massif des Aurès et s'inscrivant ainsi dans le domaine de l'Atlas Saharien, plus exactement dans la zone de transition entre l'Atlas

Saharien et le Sahara ; qui se caractérise par la rareté et le caractère aléatoire des précipitations qui sont devenues de plus en plus inquiétants.

La région d'étude El-Kantara (partie aval du sous-bassin versant d'Oued El-Haï) se situe au pied du massif des Aurès et entourée par les monts de Bellezma (Guiraud, 1990), (Lafitte, 1939) et (Bellion, 1972). Elle est composée essentiellement de deux types de reliefs :

- Des massifs dont le plus élevé est celui de Dj. Metlili qui atteint 1496 m d'altitude.
- La plaine d'El-Kantara qui s'étale jusqu'au barrage Fontaine des Gazelles qui se marque par la présence de vallées étroites, parfois coupées de gorges, qui montrent une adaptation partielle de l'hydrographie à la structure.

La région d'El-Kantara est caractérisée par un climat steppique semi -aride. La précipitation moyenne ne dépasse pas 261 mm/an et le calcul du bilan hydrique global à l'échelle mensuelle montre qu'il est déficitaire, mais il pourrait être excédentaire s'il était établi à l'échelle journalière.

Ces dernières années, la population et les secteurs de l'agriculture et l'industrie ont connu un épanouissement important ce qui augmente les possibilités de pollution des eaux de surfaces et souterraines, provoque une exploitation excessive et anarchique des ressources en eau souterraines et une détérioration de la qualité des eaux et donc pose le problème de la rareté des ressources hydriques.

Le dernier recensement officiel de 2016 a estimé la population d'El-Kantara à 13902 habitants avec une augmentation de l'ordre de 2.05%. Cette forte concentration de la population entraîne une forte concentration de l'urbanisation, ce qui engendre une grande menace en matière de pollution notamment par les rejets solides et liquides. Le secteur de l'industrie à El-Kantara s'est développé considérablement durant les dernières années. Ce secteur est accusé fréquemment d'être la cause de dégradation de l'environnement. Cette industrie engendre des effluents liquides et des déchets solides, qui sont jetés directement dans les oueds sans aucune forme de traitement ce qui engendre la contamination de l'eau de surface et souterraine. La plupart de ces industries sont de petites entreprises spécialisées dans la fabrication des matériaux de construction (céramique), les aliments et les boissons (les moulins d'Ezibane), le recyclage des batteries, du plastique, le lavage des véhicules, ...

3. Objectifs du travail de recherche :

Cette thèse est en réalité la continuité d'un travail déjà entrepris, dans le cadre du mémoire de magister, sur la plaine d'El-Kantara. Elle vise l'amélioration de la connaissance de l'aquifère Mio-Plio-Quaternaire sur les thèmes suivants:

-Apporter une contribution à ces efforts d'approfondissement de la connaissance des problèmes qui se posent aujourd'hui dans cette région, on s'intéresse de répondre aux besoins domestiques et agricoles accru en eau de la commune d'El-Kantara , et de mettre en œuvre d'une politique de gestion des ressources en eau qui doit être fondée sur une étude hydrodynamique et hydrochimique et surtout le suivis continu (actualisation de l'inventaire et des caractéristiques hydrodynamiques et hydrochimique) des points d'eaux de l'aquifère superficiel de la plaine d'El-Kantara.

- Engager une discussion descriptive sur l'alimentation de l'aquifère, la circulation de l'eau, l'évolution de son chimisme, l'influence des conditions climatiques et hydrogéologiques, dans le but d'apprécier la qualité de l'eau et son aptitude aux différents usages et de proposer une cartographie de la vulnérabilité et du risque de pollution chimique d'un réservoir souterrain, qui constitue un véritable château d'eau pour la région d'El-Kantara.

4. Méthodologie

Ce présent travail de thèse nécessiterait donc, l'acquisition des données quantitatives et qualitatives.

Les données quantitatives ont été acquises tout d'abord en utilisant les documents bibliographiques existants, ensuite à partir d'investigations de terrain et simultanément par la réinterprétation et l'analyse de données des différents outils géologiques, sondages et forages et outils hydrogéologiques. Ces investigations de terrain regroupent une enquête de terrain , des relevés piézométriques et des analyses chimiques pendant quatre campagnes (Septembre 2011/2014 et Février 2012/2015) puis complétée par le rassemblement d'informations collectées au niveau des divers services concernés par ce problème (Agence Nationale des Ressources Hydriques, Directions de l'Hydraulique des Wilaya, Direction des Services Agricoles...) mais aussi les informations recueillis auprès des exploitants.. Elles ont abouti à la constitution d'une base de données.

Cependant, devant la complexité de cet aquifère hétérogène et la dégradation de sa qualité (la salinité) et afin d'aboutir les objectifs susvisés, nous avons jugé très utile d'axer notre travail d'investigation sur une approche principalement qualitative. Cette approche est basée sur l'utilisation des outils classiques représentés par l'hydrochimie et l'utilisation des fameux diagrammes (Piper, Wilcox et Richards) et des outils récents comme la géochimie (les éléments majeurs et éléments en traces), les méthodes statistiques (Diagrammes en boîtes, C.A.H, A.C.P et les cartes auto organisatrices de Kohonen (SOM, pour Self-Organizing Maps) ; font partie de la famille de techniques issues de la recherche en intelligence artificielle appelée « réseaux de neurones artificiels ») appliquées sur les données hydro-chimiques permet une visualisation des résultats plus complète, une classification plus aisée ainsi que de mettre en évidence l'apport des statistiques pour une meilleure interprétation dans le domaine de la chimie des eaux et les systèmes d'information géographiques (GIS). Ces outils ont montré leur efficacité pour appréhender le fonctionnement des systèmes hydrogéologiques complexes. Ils permettent ainsi de :

- De donner une idée sur la qualité chimique des eaux (identifier leurs faciès chimiques, leurs degrés de potabilité, ainsi que leurs aptitudes à l'irrigation) ;
- D'expliquer le chimisme de l'eau qui est le résultat d'un ensemble de mécanismes d'interaction entre l'eau et le réservoir et l'influence de facteurs externes naturels ou anthropique.
- De visualiser à l'aide des cartes en iso-teneurs, la répartition et l'évolution géographique des concentrations en éléments chimiques dissous.

Ce mémoire de thèse, aborde ces différents volets en six chapitres, précédés par une introduction générale qui décrit la problématique du présent travail de thèse, les objectifs visés et la méthodologie suivie.

- Le premier chapitre est consacré aux généralités et à la description générale du bassin versant d'Oued El-Hai et de la région d'étude, pour une meilleure compréhension sur le plan géographique, administratif, population et le contexte Socio-économique.

-Le deuxième chapitre est réservé à l'étude géologique et tectonique régionales ainsi qu'à l'échelle locale de la région d'étude. La lithostratigraphie de la zone d'étude est caractérisée par une série sédimentaire complète, du Trias au Quaternaire. Une

attention particulière sera donnée à l'échelle régionale à la lithologie du massif de l'Aurès et à l'échelle locale au synclinale d'El-Kantara.

-Le troisième chapitre a été consacré à l'étude climatologique de la région étudiée. Malgré le manque de données et l'absence de stations fonctionnelles, cette étude permettra présenter les paramètres climatiques (précipitations et températures) régnants et d'aborder plusieurs calculs pour la mise au point d'un bilan négatif qui ne permet pas une recharge satisfaisante de l'aquifère en question.

-Le quatrième chapitre est relatif l'étude géomorphologique qui sert à quantifier les caractéristiques morphométriques du bassin versant régissant l'écoulement de surface. Cette étude permettra de faire une analyse hydrologique pour mieux connaître le régime hydrologique et la dynamique des matériaux (Erosion).

- Le cinquième chapitre s'articule en deux parties principales. La première partie est consacrée à l'étude de la piézométrie et la deuxième partie est consistée à l'interprétation des résultats des essais de pompages pour identifier la géométrie et les caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère alluvionnaire du Moi-Plio-Quaternaire de la zone étudiée.

- Le sixième chapitre considéré comme le cœur et le volet primordial de ce présent travail de thèse. Il concerne l'interprétation des paramètres physico-chimiques mesurés. En préambule à ce chapitre, les secteurs d'échantillonnages et les analyses développées au cours de ce travail sont présentés. Il est divisé en deux parties principales :

* La première partie qualifiée étude hydrochimique et qualitative des eaux qui présenteront tour à tour:

-Analyse d'ensemble et détaillée des paramètres physico-chimiques: Il s'agit de la présentation des résultats et la comparaison des concentrations en éléments physico-chimiques mesurés aux normes Algériennes et OMS.

-Les faciès chimiques: On présentera les types des familles chimiques des eaux ainsi que leur évolution, origine et répartition dans la plaine.

-Qualité chimique des eaux et cartographie hydrochimique dans la région d'El-Kantara: Cette partie est spécifiée à l'hydrochimie et à analyser l'état de qualité des

eaux de la nappe vis-à-vis de certains paramètres physico-chimiques mesurés pour déterminer leurs aptitudes aux différentes utilisations notamment leurs aptitudes à l'irrigation. Il s'agit de l'utilisation des méthodes qui permettront la classification des eaux de l'aquifère Mio-Plio-Quaternaire selon leurs aptitudes à l'irrigation ainsi que la répartition de ces classes dans la plaine d'El-Kantara.

- L'utilisation des méthodes statistiques et les cartes auto-organisatrices de Kohonen (SOM, pour Self-Organizing Maps) ; font partie de la famille de techniques issues de la recherche en intelligence artificielle appelée « réseaux de neurones artificiels » pour la caractérisation et la classification des eaux de la région d'étude.

- La cartographie hydrochimique permettra de mieux voir la répartition des faciès et des éléments indicateurs de pollution et de salinisation, à savoir les chlorures, les sulfates, les nutriments et les éléments en trace métallique tel que le fer, le cuivre et le plomb.

-La deuxième partie nommée vulnérabilité à la pollution des eaux qui présentera le résultat de l'application de trois méthodes de cartographie de la vulnérabilité, largement expliquées dans la bibliographie et appliquées dans le monde et en Algérie, à savoir la méthode GOD, la méthode DRASTIC et La méthode de vulnérabilité spécifique qualifiée la méthode de l'Indice de la pollution des eaux souterraines (IPE) (PIG).

Et enfin une conclusion générale dans laquelle nous exposerons les résultats obtenus et proposer quelques recommandations.

Ce travail a pu voir le jour grâce à la collaboration de divers cadres et responsables d'organismes publics et privés (accès aux archives pour la constitution de la base de données) : Il s'agit surtout des directions des deux wilaya de Biskra et de Batna ; Direction d'Hydraulique (DHW), Direction des services agricoles (DSA), des agences et organismes nationaux (ANBT (Barrage FDG), ANRH,

Les résultats des interprétations, durant les années de recherche de la présente thèse, ont fait l'objet de trois publications et de trois communications :

Publications :

- D. Kerboub, C. Fehdi, A. El hmaidi, H. Ousmana, Y. Azzi, C. Khemissi (2022): PIG BASED WATER QUALITY ASSESSMENT IN EL-HAI RIVER BASIN, ELKANTARA PLAIN, ALGERIA. Journal of Fundamental and Applied Sciences. 01 January 2022. ISSN 1112-9867
- KERBOUB Djawhar, CHAMEKH .K, FEHDI .C, BOUDOUKHA A. (2016) : APPORT DES S.I.G DANS LA CARTOGRAPHIE DE LA POLLUTION, CAS DE LA PLAINE D'EL- KANTARA, SUD EST ALGERIEN. Larhyss Journal, n°27, Sept 2016. ISSN 1112-3680.
- KERBOUB Djawhar, FEHDI. Ch (2014) : Impact des rejets urbains et industriels sur la qualité des eaux souterraines : cas de la région d'El-Kantara, Sud-est Algérien. Afrique SCIENCE, Vol 10, Issue 1, 2014. ISSN 1813-548X.

Communications :

- KERBOUB Djawhar, CHAMEKH .K, FEHDI .C, BOUDOUKHA A. (2016) : Interprétation des données physico-chimiques par la méthode des composantes principales des eaux de l'aquifère superficiel de la plaine d'El-Kantara partie avale du Bassin versant d'Oued El-Hai, SUD EST ALGERIEN. 1^{er} Colloque international sur la géologie de la chaîne des Maghrébines et des régions voisines CIGCM 2016, Sétif.
- KERBOUB Djawhar, BOUDOUKHA, A, CHAMEKH .K, (2013) : Classification statistique et hydrochimique des eaux de surfaces et souterraines de la plaine d'El-Kantara partie avale du Bassin versant d'Oued El-Hai Wilaya de Biskra Algérie. Séminaire international sur l'Hydrogéologie et l'Environnement SIHE 2013, Ouargla. Novembre 2013.
- BOUDOUKHA A, KERBOUB Djawhar, CHAMEKH .K, (2013) : Impact des rejets urbains et industriels sur la qualité des eaux souterraines : cas de la région d'El-Kantara, Sud-est Algérien Séminaire international sur l'Hydrogéologie et l'Environnement SIHE 2013, Ouargla, Novembre 2013.

Chapitre I : Cadre Général

1-Situation géographique :

La région étudiée se situe au Nord- Est algérien. Elle se trouve dans le territoire, de la Wilaya de Biskra. Elle occupe une partie de la limite Nord de celle-ci et elle se trouve à mi-chemin (50 Km) entre Batna et Biskra. Cette région se trouve au piedmont Sud des Aurès et entre les coordonnées géographiques suivantes :

Latitude $35^{\circ} 37' 53''\text{N}$ et $35^{\circ} 25' 37''\text{N}$

Longitude $5^{\circ} 5' 60''\text{E}$ et $6^{\circ} 14' 53''\text{E}$. (**Fig. I.01**).

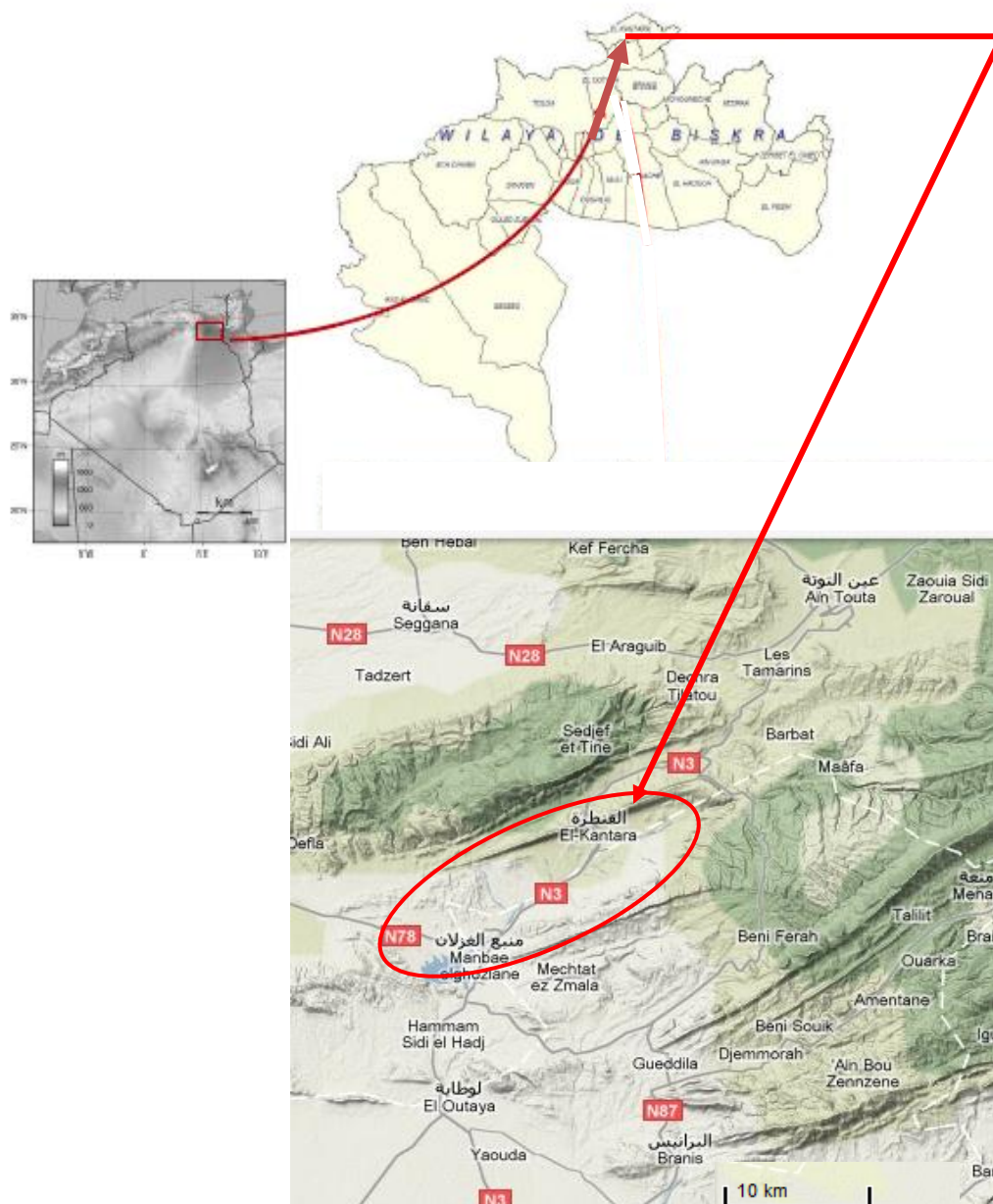
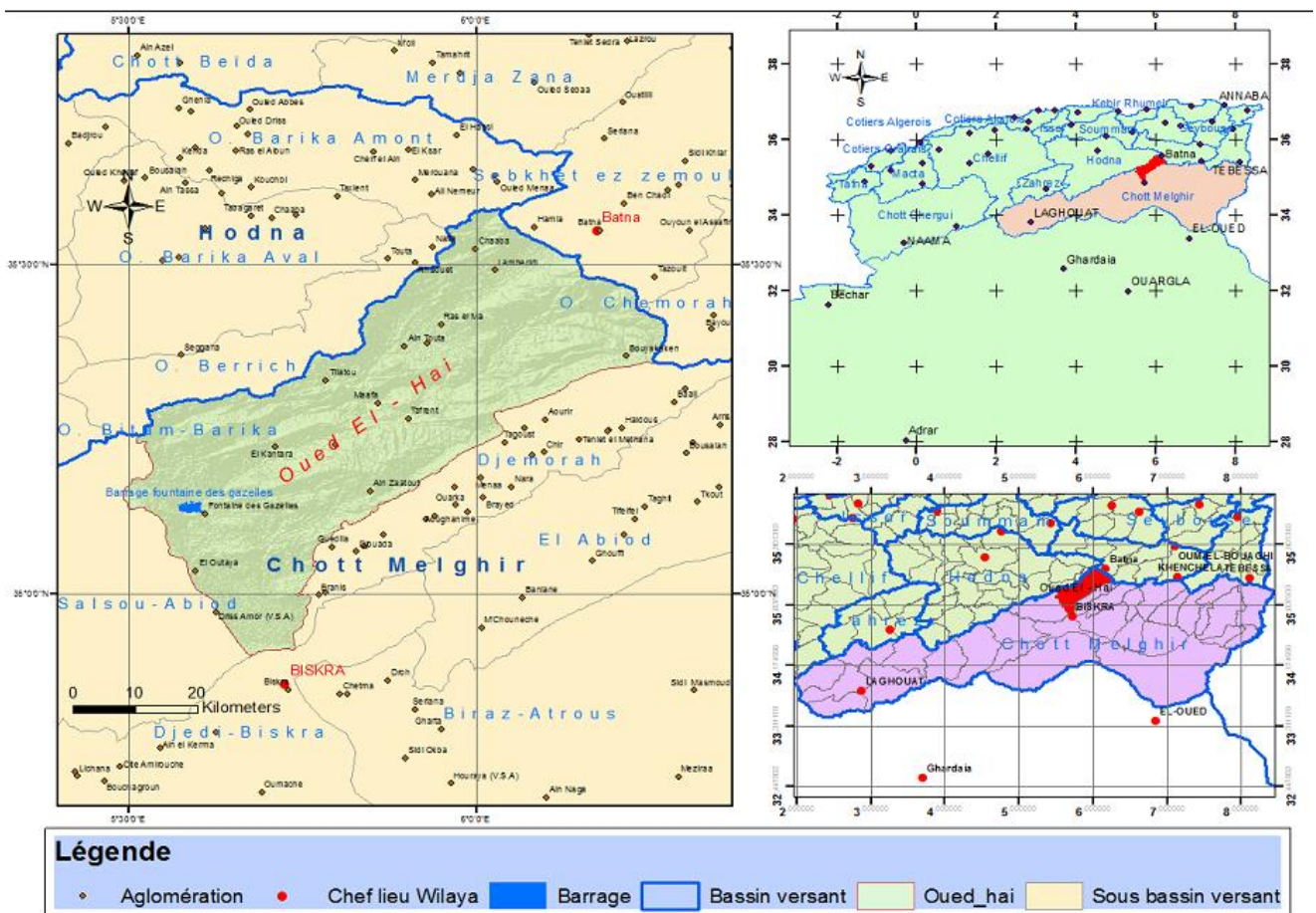


Fig. I.01 : Situation géographique de la région d'étude (Google Map, 2022).

La région étudiée appartient au sous bassin hydrographique d'Oued El-Hai, qui représente une partie du grand bassin versant du Chott Melghir. Il constitue l'un des plus importants cours d'eau dans l'Atlas Saharien oriental (**Fig. I.02**). Il prend sa source dans les massifs des Aurès à une altitude qui dépasse les 2000 m et il rejoint l'Oued Abdi d'ou il prend le nom de l'Oued Biskra qui se débouche dans le Chott Melghir au Sud de Biskra après un parcours de 150 km formant ainsi un système endoréique typique des régions arides et semi-aride. Le sous bassin hydrographique d'Oued El-Hai est limité au Nord par le bassin versant des Hauts plateaux Constantinois, à l'Est par le bassin versant d'Oued Medjerda, à l'Ouest par le bassin versant de Chott Hodna et au Sud par le bassin versant du Sahara (**Fig. I.02**).



| | | | | | |
|----|----------------------|----|--------------------------|----|-----------|
| 01 | CHELIF | 07 | H, PLATEAUX COSTONTINOIS | 13 | SAHARA |
| 02 | COTIER ALGEROIS | 08 | H, PLATEAUX ORANOIS | 14 | SEYBOUSSE |
| 03 | COTIER CONSTONTINOIS | 09 | ISSER | 15 | SOUMMAM |
| 04 | COTIER ORANOIS | 10 | KEBIR RHUMEL | 16 | TAFNA |
| 05 | CHOTT HODHNA | 11 | MACTA | 17 | ZAHREZ |
| 06 | CHOTT MELRHIR | 12 | MEDJERDAH | | |

Fig. I.02 : Situation du sous bassin versant d'Oued El-Hai par rapport aux grands bassins versants de l'Algérie.

Les eaux du sous bassin versant d'Oued El-Hai sont collectées à travers le Barrage de Fontaine des Gazelles qui régularise un volume d'eau autour de 14 Hm^3 par an. La capacité totale du Barrage est de 55 Hm^3 , cette capacité est légèrement diminuée sous l'effet de l'envasement accompagnant les ruissèlements des affluents d'Oued El-Hai, estimé à $0.30 \text{ Hm}^3/\text{an}$. La superficie du sous bassin est estimée à 1660 Km^2 tandis que la superficie de la cuvette du Barrage est autour de $5,66 \text{ km}^2$. Le lac du barrage est situé entre trois communes l'Outaya , El-Kantara dans la wilaya de Biskra et Bitam dans les territoires de la wilaya de Batna (**Fig. I.02**).

2-Situation Administrative :

Sur le plan administratif, le sous bassin versant d'Oued El-Hai est limité au Nord par la daïra de Batna, daïra de Merouna, au Sud par la wilaya de Biskra, à l'Ouest par la daïra de N'gaous, Tamarin et Barika et à l'Est par Tazoult, Arris et Menâa.

Ce sous bassin versant s'étale sur deux wilayas; celle de Batna avec une superficie de 1314 Km^2 , et celle de Biskra avec une superficie de 346 Km^2 d'où une superficie totale est 1660 Km^2 . Il est formé par les communes : El-Kantara, El-Outaya, Djamourah, Ain Zaâtout et Branis, appartenant administrativement à la Wilaya de Biskra; et les Communes de: AinTouta, Maafa, Larbaa, Oued Chaaba, Tilatou, Beni Foudhala El Hakania, Bouzina, Hidoussa, Tazoult, Oued Taga, Seggana et Bitam appartenant administrativement à la Wilaya de Batna (**Fig. I.03**).

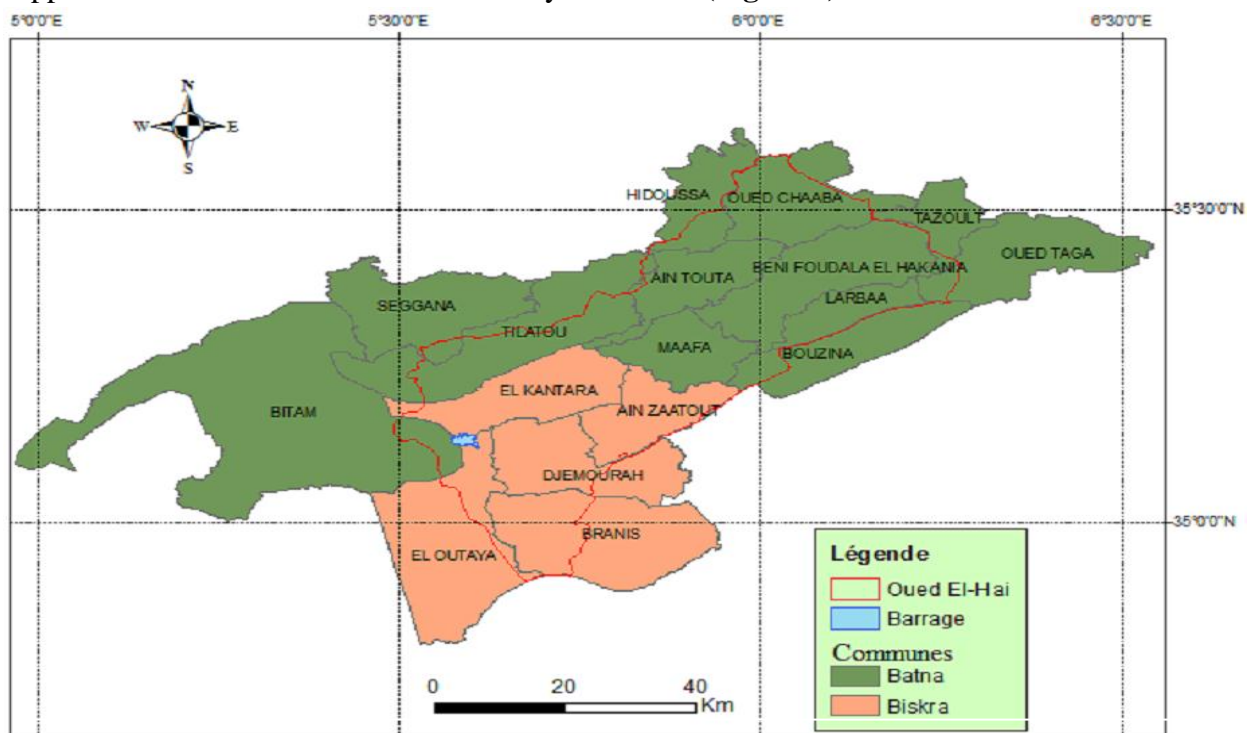


Fig. I.03: Carte de découpage administratif du sous bassin d'Oued El-Hai (Adjaout et Allouche , 2017).

3-Orographie :

La région d'étude se compose de trois types de reliefs (des massifs des piedmonts et des plaines) (Fig. I.04).

3.1-Les principaux massifs:

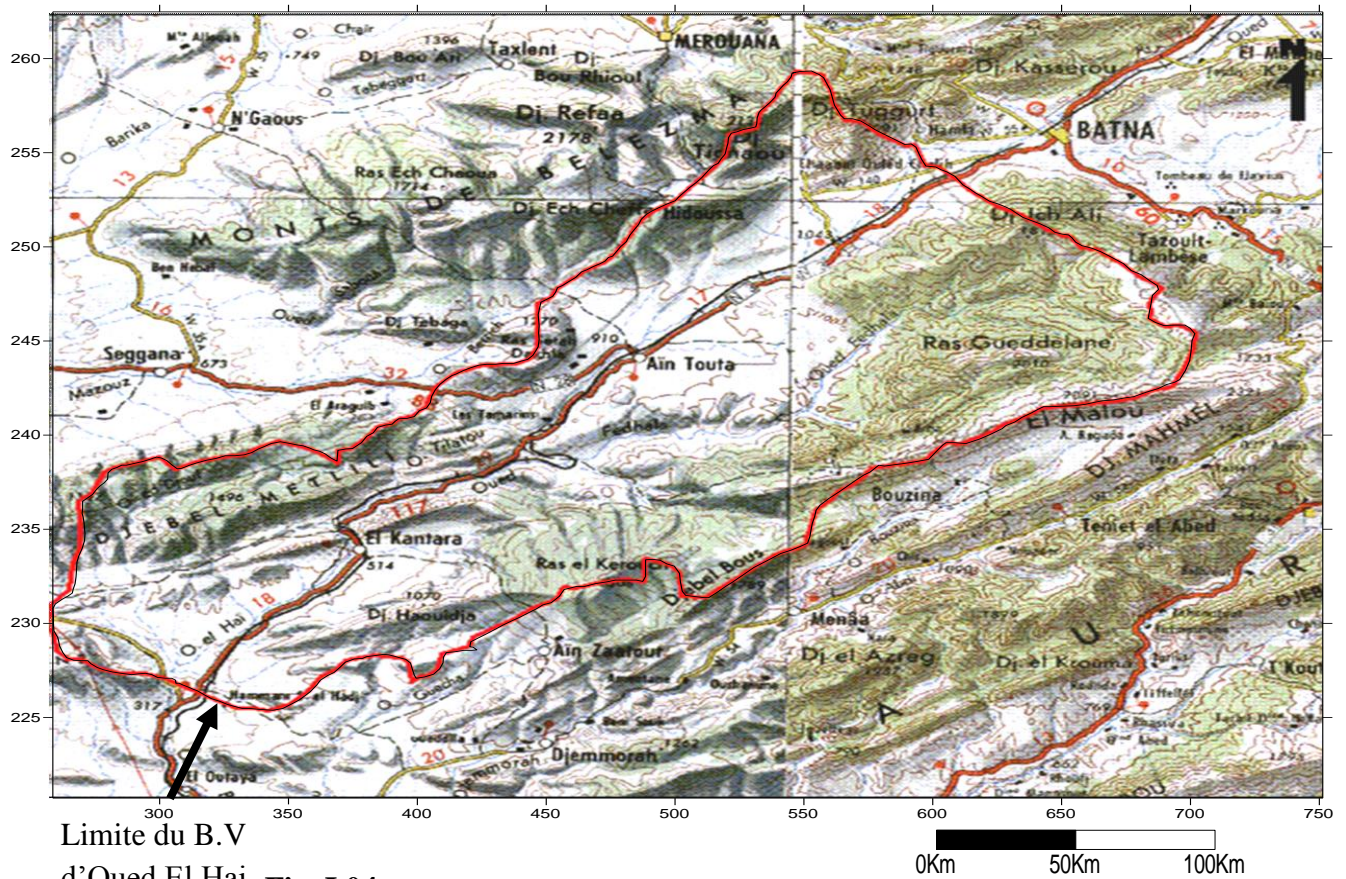
Les principaux reliefs qui entourent la région d'étude sont les monts de Bellezma, avec une altitude maximale de 2091m à Dj.Tuggurt ; au Nord Est on a Dj. Ich Ali qui culmine à 1815m ; au Sud Est on a Dj El Malou, Dj Bous et Ras Guedlane qui culminent respectivement à 2091m, 1789m et 2010m ; au centre Dj.Gruon qui culmine à 1190m ; au Sud on a Dj. Haouidja qui atteint 1070m et au Sud Ouest on a Dj. Metlili qui atteint 1496m.

3.2-Les piedmonts:

Il s'agit d'une surface à pente douce et régulière, étalée au pied d'un ensemble montagneux à l'interface de deux modes opposés, qui sont la plaine et les montagnes, dont les altitudes varient de 800m à 1000m.

3.3-Les Zones basses:

Deux plaines se distinguent, l'une entre Batna et Ain Touta et l'autre au Sud, la plaine d'El-Kantara qui s'étale jusqu'au barrage Fontaine des Gazelles.



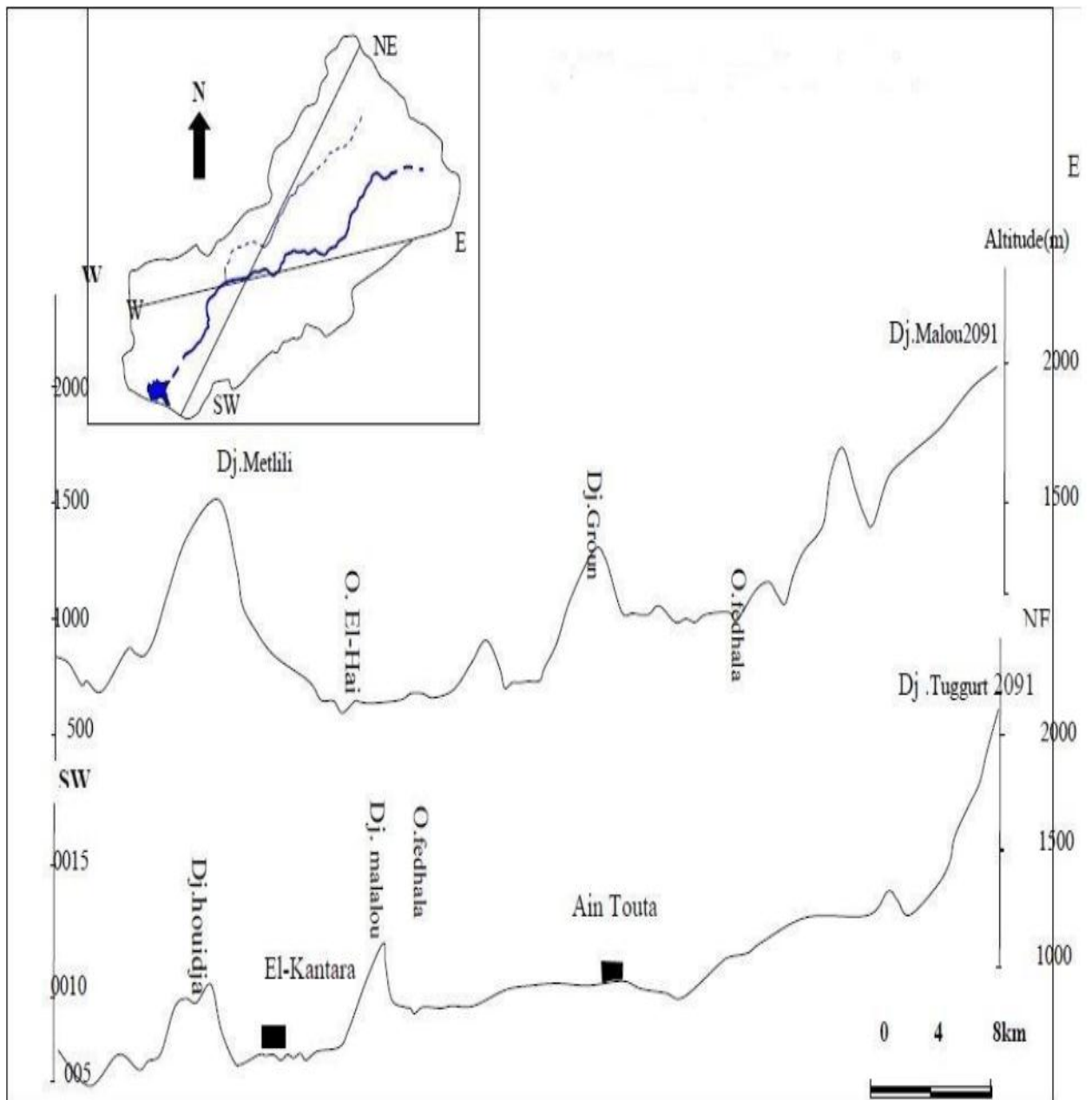


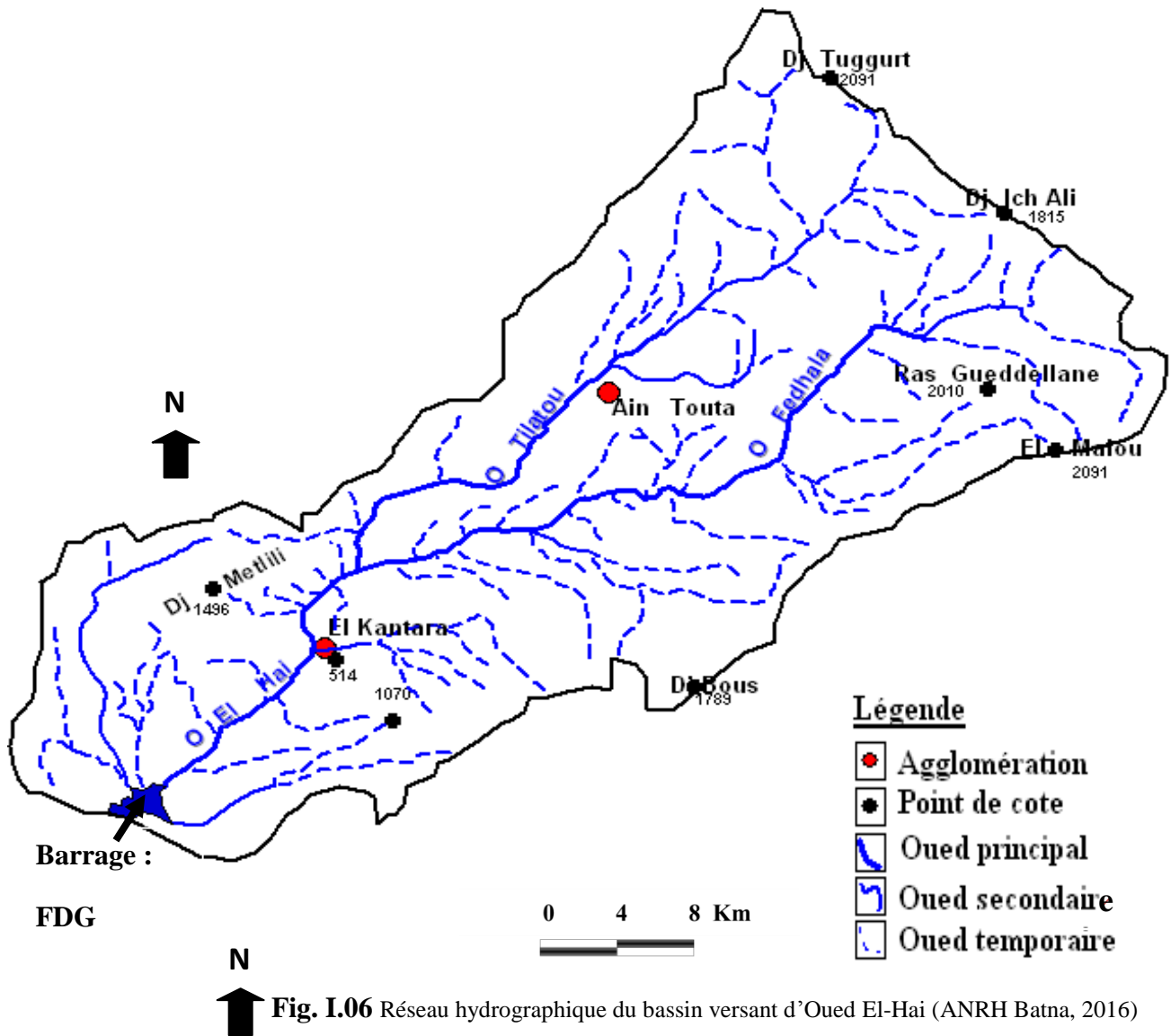
Fig. I.05: Coupes topographiques du bassin versant d'Oued El-Hai (Reghais et Maachi, 2018).

4- Le réseau hydrographique:

La région d'étude est caractérisée par une précipitation moyenne qui influence avec le substratum la nature et l'allure du réseau hydrographique.

On constate l'existence de trois oueds principaux (**Fig. I.06**) et (**Fig. I.07**):

- Oued El-Hai;
- Oued Fedhala et Oued Tilatou qui forment plus bas Oued El-Hai.



5-Anthropisation:

5.1-La population :

Le sous-bassin versant de l'Oued El- Haï compte (Monographie des wilayas de Batna et Biskra) une population totale de 231 890 habitants. On recense 17 agglomérations (12 agglomérations appartenant à la wilaya de Batna et cinq autres à la wilaya de Biskra). En 2008 (Selon les deux monographies 2008 de Batna et Biskra) la région du bassin versant de l'Oued El Haï comptait une population de 196 639 habitants. En 2016, la population de la zone s'élève à 94 129 habitants. Elle est localisée essentiellement à Ain Touta Avec 67569 habitants et à Djamoura avec 15 312 habitants (**Fig. I.08**). Cette forte concentration de la Population entraine une forte concentration de l'urbanisation, ce qui engendre une grande menace en matière de pollution notamment par les rejets solides et liquides.

Tab. I.01 : Population du bassin versant d'Oued El –Haï (Monographie, 2016).

| Wilaya | Commune | superficie en km ² | Population 2008 (RGPH 2008) | Population 2016 (Monographie 2016) | Densité 2016 (Hab/km ²) |
|--------------|--------------|-------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| Batna | AIN TOUTA | 170,99 | 59 904,00 | 67 569,00 | 395,00 |
| | HIDOUSSA | 149,63 | 2 378,00 | 2 430,00 | 16,00 |
| | OUED CHAABA | 245,67 | 7 236,00 | 12 000,00 | 49,00 |
| | BENI FOUDALA | 299,18 | 1 511,00 | 1 936,00 | 6,00 |
| | TILATOU | 381,00 | 3 004,00 | 3 720,00 | 10,00 |
| | SEGGANA | 284,47 | 5 769,00 | 6 966,00 | 24,00 |
| | LARBAA | 99,04 | - | - | - |
| | BOUZINA | 194,47 | 13 383,00 | 13 690,00 | 70,00 |
| | BITAM | 917,54 | 11 855,00 | 14 682,00 | 16,00 |
| | MAAFA | 154,26 | 2 880,00 | 2 832,00 | 18,00 |
| Biskra | EL KANTARA | 239,10 | 11 415,00 | 13 902,00 | 58,00 |
| | DJEMOURAH | 250,80 | 12 574,00 | 15 312,00 | 61,00 |
| | EL OUTAYA | 406,10 | 11 155,00 | 13 603,00 | 33,00 |
| | BRANIS | 370,10 | 4 273,00 | 5 372,00 | 15,00 |
| | AIN ZAATOUT | 170,70 | 3 693,00 | 4 594,00 | 27,00 |
| Total | | 4333.05 | 151030.00 | 178608.00 | 100% |

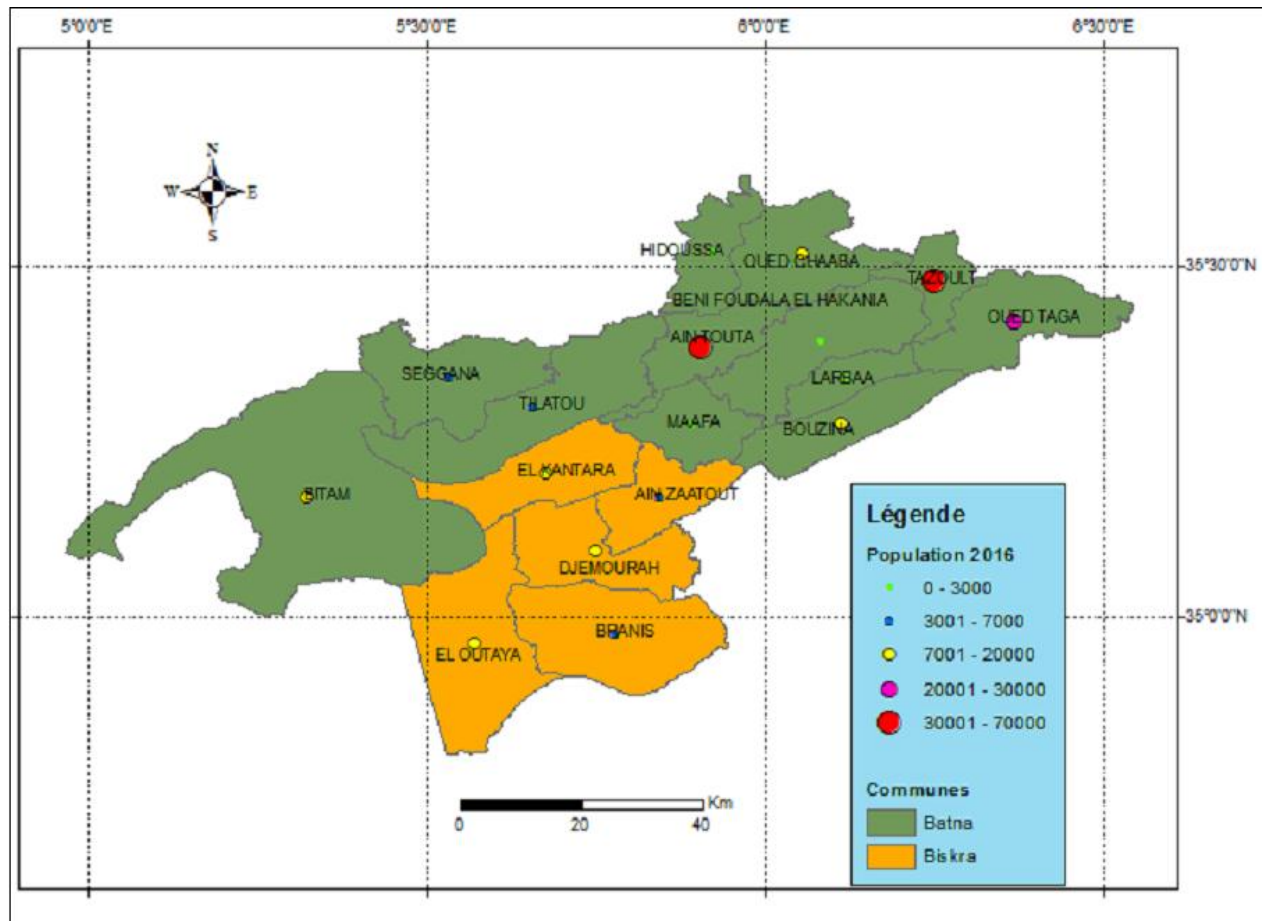


Fig. I.08 : Population du bassin versant d'Oued El-Hai (Monographie, 2016).

5.2-Aspect socioéconomique : L'aspect socioéconomique du bassin versant d'Oued El-Hai est décrit dans cette partie, pour une meilleure connaissance des activités pratiquées dans le bassin. L'agriculture et l'élevage occupent la grande partie, puis le secteur de l'administration, enfin le secteur de l'industrie. Les autres secteurs sont relativement faibles comme le commerce, le transport et le secteur des services. On va cibler uniquement les secteurs consommateurs d'eau notamment l'agriculture et l'élevage comme premier consommateur, l'industrie et le tourisme.

5.2.1-Contexte agricole et élevage : Le bassin versant d'Oued El-Hai dispose d'une superficie agricole utile de 111623 ha (Selon les deux monographies 2016 de Batna et Biskra) ce qui représente 23% de la superficie totale du bassin. La PMH (Petite et moyenne hydraulique) couvre une superficie de 18 074 Ha en 2016. L'agriculture constitue l'une des activités principale du bassin versant. Les terres agricoles du bassin sont principalement irriguées à partir d'eaux souterraines, 95% des superficies irriguées à partir de forages et puits.

L'élevage aussi est trop pratiqué par les agriculteurs du bassin, notamment la région d'Ain Touta et El- Outaya. Avec une production de plus de 95 000 (q/an) de la viande blanche et de plus de 28 000 (q/an) de la viande rouge. La région d'Ain Touta constitue le grand producteur en matière de la viande blanche avec plus de 37 000 (q/an) et plus de 175 000 unités d'œufs (u=1000 œufs), ce qui traduit par une pollution importante sur le long d'Oued El -Hai.

5.2.2-Contexte Industriel : Le tissu industriel est faible dans l'ensemble des communes du bassin, sauf le chef-lieu quelque daïras qui disposent d'une industrie relativement importante. Le type d'industrie pratiquée à travers le territoire de la région d'Oued El-Hai varie entre matériaux de construction et produits alimentaires. L'alimentation en eau industriel se fait essentiellement à partir des forages appartenant à l'institution elle-même, tandis que certaines unités sont connectées seulement au réseau publique, d'autres industries bénéficient d'une alimentation mixte (Réseau AEP et Forage). Les volumes d'eau affectés à l'industrie sont relativement faibles. L'ensemble des rejets industriels se jette directement dans les oueds et leurs affluents drainant la région. Sans aucun processus de traitement et qui présente un risque de pollution pour les eaux de surfaces et les eaux souterraines à faible profondeur.

5.2. 3-Le tourisme : Le potentiel touristique est important, des zones de montagne, canyon, et des sources thermales. L'activité touristique représente l'une des sources importantes de la région.

5.2. 4-Déchets solides :

L'étude la plus récente a estimé qu'El-Kantara génère 4.92 tonnes par jour de déchets solides. (Monographie de Biskra 2008).

6-Conclusion :

La région d'étude El-Kantara (partie avale du sous-bassin versant d'Oued El-Haï) se situe au pied du massif des Aurès et entourée par les monts de Bellezma. Elle est composée essentiellement de deux types de reliefs :

- Des massifs dont le plus élevé est celui de Dj. Metlili qui atteint 1496m d'altitude.
- La plaine d'El-Kantara qui s'étale jusqu'au barrage Fontaine des Gazelles qui se marque par la présence de vallées étroites, parfois coupées de gorges, qui montrent une adaptation partielle de l'hydrographie à la structure.

Ces dernières années, la population, les secteurs de l'agriculture et l'industrie ont connu un épanouissement important ce qui augmente les possibilités de pollution des eaux de surfaces et souterraines et pose le problème de la rareté des eaux.

Le dernier recensement officiel de 2016 a estimé la population d'El-Kantara à 13902 habitants avec une augmentation de l'ordre de 2.05%. Cette forte concentration de la population entraîne une forte concentration de l'urbanisation, ce qui engendre une grande menace en matière de pollution notamment par les rejets solides et liquides. Le secteur de l'industrie à El-Kantara s'est développé considérablement durant les dernières années. Ce secteur est accusé fréquemment d'être la cause de dégradation de l'environnement. Cette industrie engendre des effluents liquides et des déchets solides, qui sont jetés directement dans les oueds sans aucune forme de traitement ce qui engendre la contamination de l'eau de surface et souterraine. La plupart de ces industries sont de petites entreprises spécialisées dans la fabrication des matériaux de construction (céramique), les aliments et les boissons (les moulins d'Ezibane), le recyclage des batteries, du plastique, le lavage des véhicules, ...

Chapitre II : Etude géologique

1. Introduction :

L'eau, au contact des terrains, se charge en divers éléments qui vont influencer sa qualité. Certains de ces éléments sont présents naturellement dans le sol et la roche, et vont définir la qualité « naturelle » de l'eau brute, d'autres ont une origine anthropique. Ainsi l'eau à l'état naturel peut contenir :

- ✚ De la matière organique ;
- ✚ Des éléments dissous provenant des terrains traversés (calcium, magnésium, sodium, potassium, bicarbonates, sulfates, chlorures, métaux lourds, ...) ;
- ✚ Des particules en suspension.

De ce fait, la connaissance des caractéristiques structurales et lithologiques des terrains étudiés permet d'expliquer certains paramètres chimiques des eaux qui s'y trouvent. Pour définir ces caractéristiques, on procède à l'analyse des formations géologiques présentes dans le secteur étudié susceptible, d'influencer la qualité des eaux superficielles et souterraines.

2. La géologie régionale :

La région d'étude présaharienne se rapporte à l'Atlas Tunisien séparé de l'Atlas Saharien par le massif des Aurès avec un point culminant à Dj.Chelia 2328 m. Pour mieux comprendre le contexte géologique de la région, on abordera la structure générale de la branche Sud de la chaîne Alpine appelée « les Maghrébides » et on développera les grands traits géologiques du massif de l'Aurès.

L'Algérie est subdivisée en deux unités tectoniques majeures de part et d'autre de l'accident Sud Atlasique :

- ✚ Le Nord de l'Algérie appartenant au domaine Alpin, constitué de reliefs jeunes modelés au cours du Tertiaire.
- ✚ La plate forme Saharienne où la tectonique est moins prononcée. Elle est située au Sud de l'Algérie Alpine et appartient au Craton Nord Africain. Elle comprend un socle Précambrien sur lequel repose en discordance une puissante couverture sédimentaire, structurée au Paléozoïque en plusieurs bassins sédimentaires. Ces derniers sont délimités par différents éléments tectoniques et dans lesquels la lithostratigraphie est plus ou moins complète.

De nombreuses études faites sur la chaîne Alpine des Maghrébides (M.D. Delga, 1964 ; J.M. Vila, 1980 ; W. Wildi, 1983 ; J.P. Bouillin et R. Guiraud 1990) montrent

que cette dernière est constituée de grands ensembles structuraux qui se subdivisent en trois grandes familles qu'on peut distinguer du Nord vers le Sud et qui sont respectivement (**Fig. II.01**) et (**Fig. II. 02.**):

- Le domaine interne ;
- Le domaine des flysch ;
- Le domaine externe.

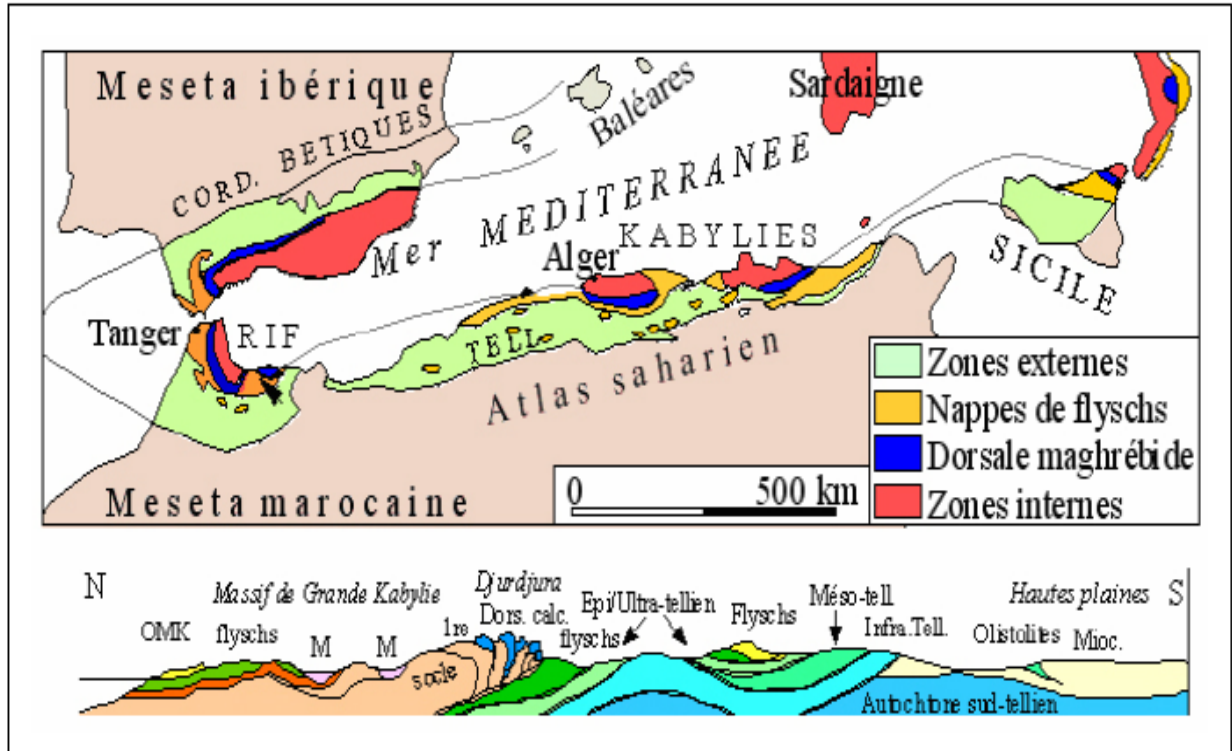


Fig. II.01 : Carte et coupe structurale schématique de la chaîne des Maghrébides (Durant, 1969).

2.1. Le domaine interne:

Appelé aussi domaine Kabyle est situé au Nord de la petite Kabylie, il est issu de la dilacération de la plaque d'Alboran et comprend les formations cristallophylliennes (des gneiss à intercalations de marbres et d'amphibolites, des schistes, des phyllades, et des porphyroïdes ocellés) du socle Kabyle et la Dorsale Kabyle ou Chaîne calcaire qui constitue la couverture sédimentaire Mésozoïque et Tertiaire du socle Kabyle. Les formations du domaine interne affleurent en Algérie en trois pointements amygdalaires qui sont représentés par les massifs du Chenoua à l'Ouest, de Grande Kabylie au centre et de Petite Kabylie à l'Est (Delga D. M., 1955) et (Raoult J.F., 1974).

2.2. Le domaine des flysch:

Situé au Sud de la Petite Kabylie, il est caractérisé par des formations de plaines abyssales (J. P. Bouillin, 1986), d'âge Néocomien à Aquitaniens (N. Kazitani, 1986). Les Flysch en Algérie sont subdivisés en trois types principaux, d'âge Crétacé à Paléogène qui sont : le flysch Mauritanien, le flysch Massilien et le flysch Numidien :

-Les flysch Mauritanien de type « Guerrouche » : qui sont grésopélitiques qui comporte un Crétacé inférieur.

-Les flysch Massilien de type « schisto quartziteux » : qui sont des séries Albo-Aptien.

-Le flysch Numidien : Il occupe la position structurale la plus haute de l'édifice Alpin, il affleure dans la région de Jijel et d'El-Milia à l'Ouest et dans la région de Collo et de Skikda à l'Est. Il comprend de bas en haut.

- ❖ Des argiles sous-Numidiennes, de teinte verte, rouge ou violacée de l'Oligocène.
- ❖ Des grés Numidiens de l'Aquitaniens en banc épais, à quartz roulés très hétérogènes.
- ❖ Des marnes et argiles supra-Numidiennes à silexites du Burdigalien inférieur.

2.3. Le domaine externe : Il est représenté par les séries Telliennes, les séries de l'Avant pays allochtone (J.M. Vila, 1980) et les séries de l'Avant pays atlasique autochtone.

2.3.1. Les séries Telliennes : Elles ont été scindées par les phases tectoniques Tertiaires en trois unités dont les limites coïncident à peu près avec les lignes paléogéographiques du Crétacé, du Paléocène et de l'Eocène (W. Wildi, 1983).

- ◆ La nappe épi-Tellienne (ultra-Tellien) : Cette nappe affleure dans la région d'Oued Zanati entre Constantine et Guelma, caractérisée par une lithostratigraphie d'âge Crétacé à abondance carbonatée.

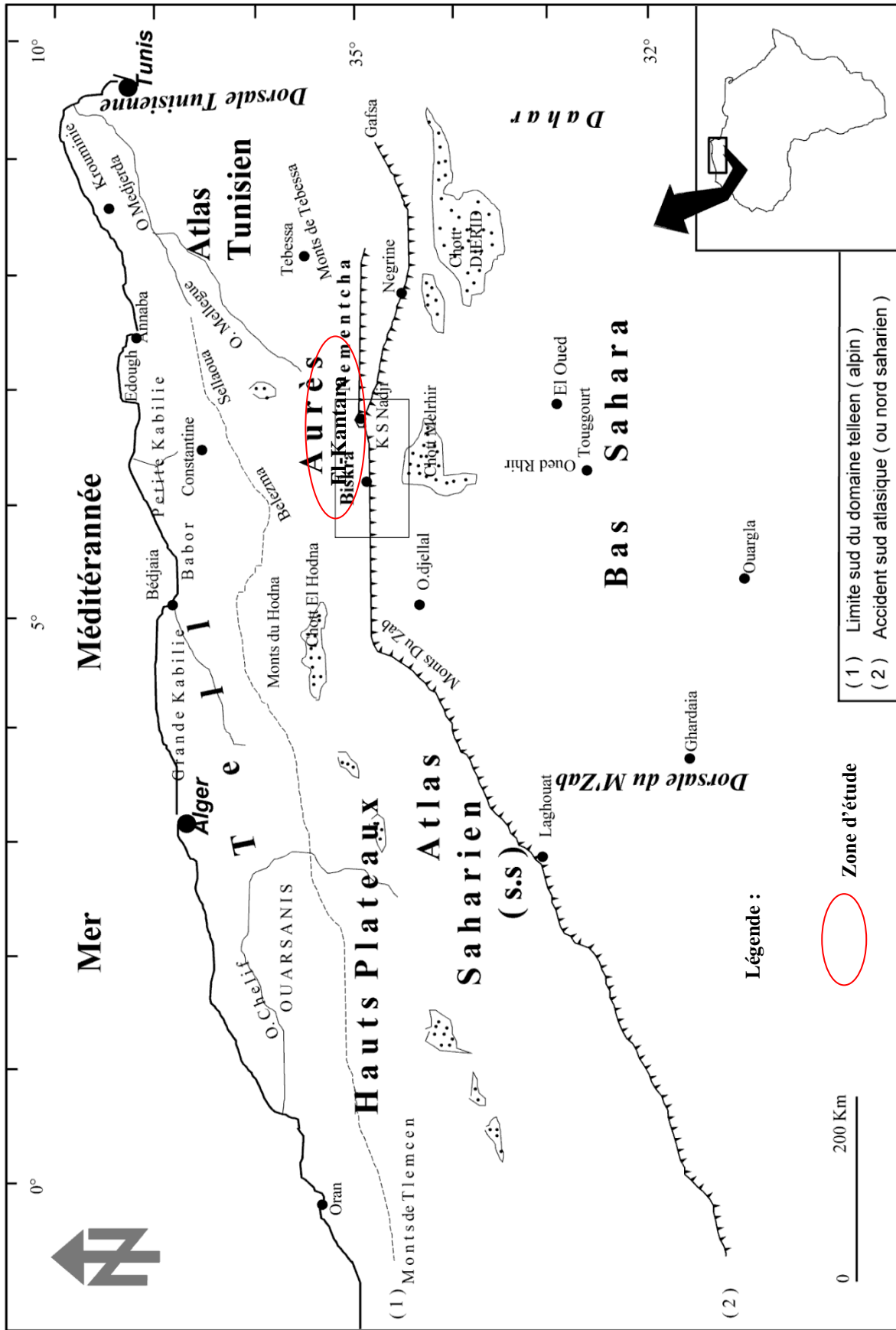


Fig. II.02 : Localisation des principaux ensembles structuraux du Nord de l'Algérie et de la Tunisie (Guiraud., 1990).

◆ La nappe méso-Tellienne : Elle affleure dans la région de Sétif et elle est caractérisée essentiellement par un matériel vaseux d'âge Sénonien inférieur à Eocène supérieur.

◆ La nappe infra-Tellienne (péni-Tellien) : Elle apparaît en lambeaux charriés sur les massifs Néritiques, formée par une séquence des carbonates et de vase allant du Lias au Paléocène.

2.3.2. Les séries de l'Avant pays allochtone :

Elles ont été regroupées en trois grandes familles :

- L'organisation Sétifienne qui présente un caractère de plate forme.
- L'organisation Constantinoise qui englobe les séries Néritiques Constantinoises caractérisées principalement par des formations carbonatées allant du Jurassique supérieur au Sénonien transgressif au Nord et les séries des Sallaoua au Sud.
- L'organisation Algéro-tunisienne.

2.3.3. Les séries de l'Avant pays atlasique autochtone :

- L'on y trouve avant-pays "stable" et de comportement tectonique rigide (Hauts-Plateaux Algéro-marocains et Meseta marocaine);
- L'Avant-pays parautochtone plissé et écaillé de type Atlasique qui borde l'Atlas Tunisien au Nord (écailles du sillon Nord Tunisien et unités de Sellaoua), qui se trouvent en avant des Hauts-Plateaux des confins Algéro-marocains.
- L'Avant-pays autochtone plissé, à séries sédimentaires Mésozoïques épaisses: Atlas Tunisien, Atlas Saharien, Monts du Hodna, de Bélezma et de l'Aurès, Moyen-Atlas marocain; (R. Guiraud, 1973).

Les monts des Aurès prolongent l'Atlas saharien vers le Nord-est. Ils se présentent sous forme d'une série de synclinaux et anticlinaux de direction ENE (Guiraud, 1990). Sa jonction avec le Hodna se fait par l'intermédiaire des monts du Belezma (dans sa partie occidentale) et avec la plaine d'El Outaya et Biskra par l'intermédiaire des djebels Metlili, El Azreg...(dans sa partie méridionale). Dans le cadre régional de notre étude on va essayer de développer la géologie du massif des Aurès.

3-Géologie du massif des Aurès :

3.1. Localisation et limites : La région d'étude appartient aux monts des Aurès, qui font partie de la chaîne de l'Atlas Saharien. Ce massif de l'Aurès est compris dans le triangulaire Batna, Biskra et Khenchla et s'étend entre les parallèles 34° - 45' et 35° - 30' Nord et les longitudes 5° - 45' et 7° à l'Est du méridien international (**Fig. II.03**).

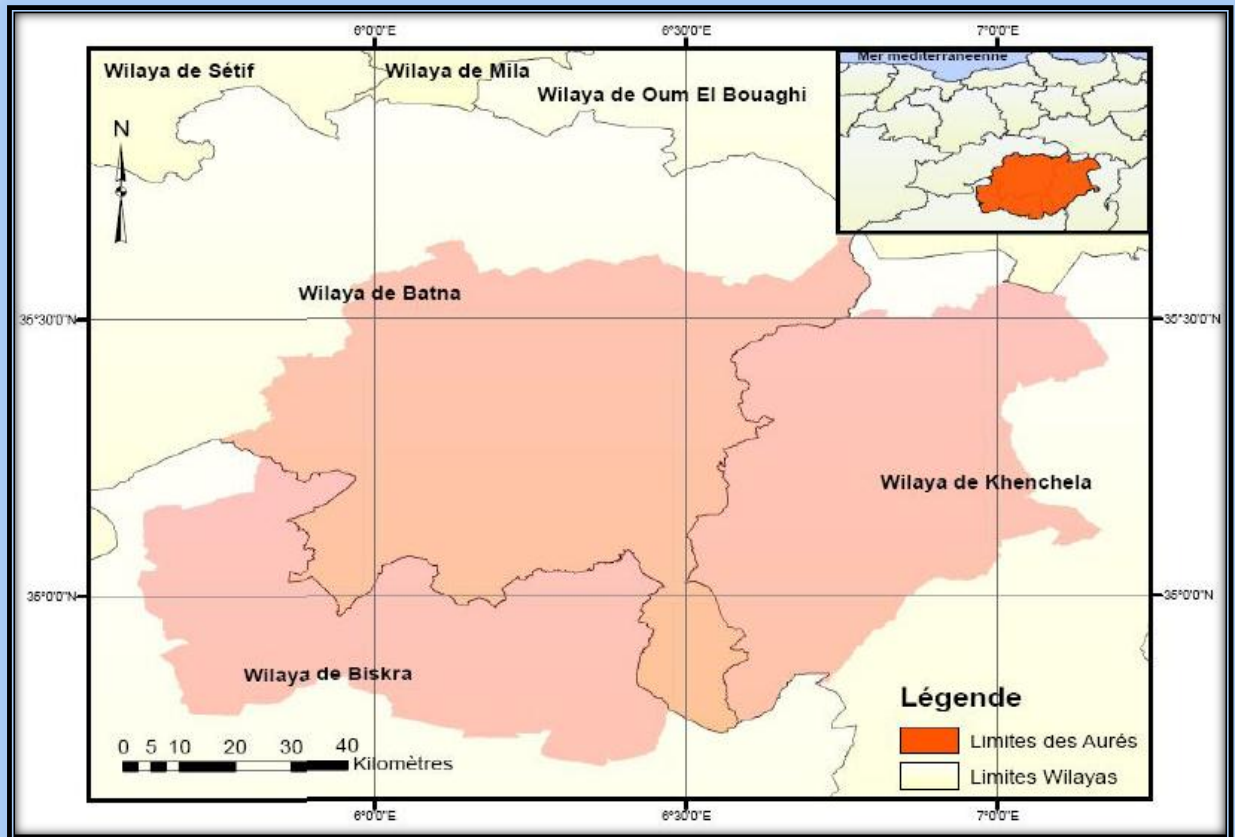


Fig. II.03 : Carte de localisation du massif des Aurès (Adjaout et Allouche , 2016)

Le massif des Aurès correspond au prolongement oriental des monts des Ouled Nail .Il est limité au Nord par le bassin Néogène de Timgad qui s'étend de Batna jusqu'à Khenchla, à l'Est par les monts des Nementcha, à l'Ouest par le bassin Néogène du Hodna, et au Sud par la plate forme Saharienne (**Fig. II.02**).

Il regroupe les terrains allant du Jurassique au Plio-Quaternaire et les accidents (plis, failles) sont importants.

3.2-Lithostratigraphie :

Les descriptions lithostratigraphiques sont inspirées en grande partie des travaux antérieurs, notamment ceux consacrés à l'étude des monts des Aurès (Laffitte 1939, Guiraud 1990, Ballais 1972), l'analyse stratigraphique (faite par l'équipe de Sonatrach –Division Exploration en Septembre 2000) concerne surtout : l'Aptien, l'Albien, le Cénomaniens, le Turonien, le Sénonien, le Paléocène - Eocène et le Miocène et les notices des cartes géologiques au 1/50000e (du Merouana et d'El-Kantara). Donc du point de vue litho stratigraphique, le massif des Aurès est caractérisé par une série sédimentaire complète, du Trias au Quaternaire (**Fig. II.04**),(**Fig. II.05**) et (**Fig. II.06**).

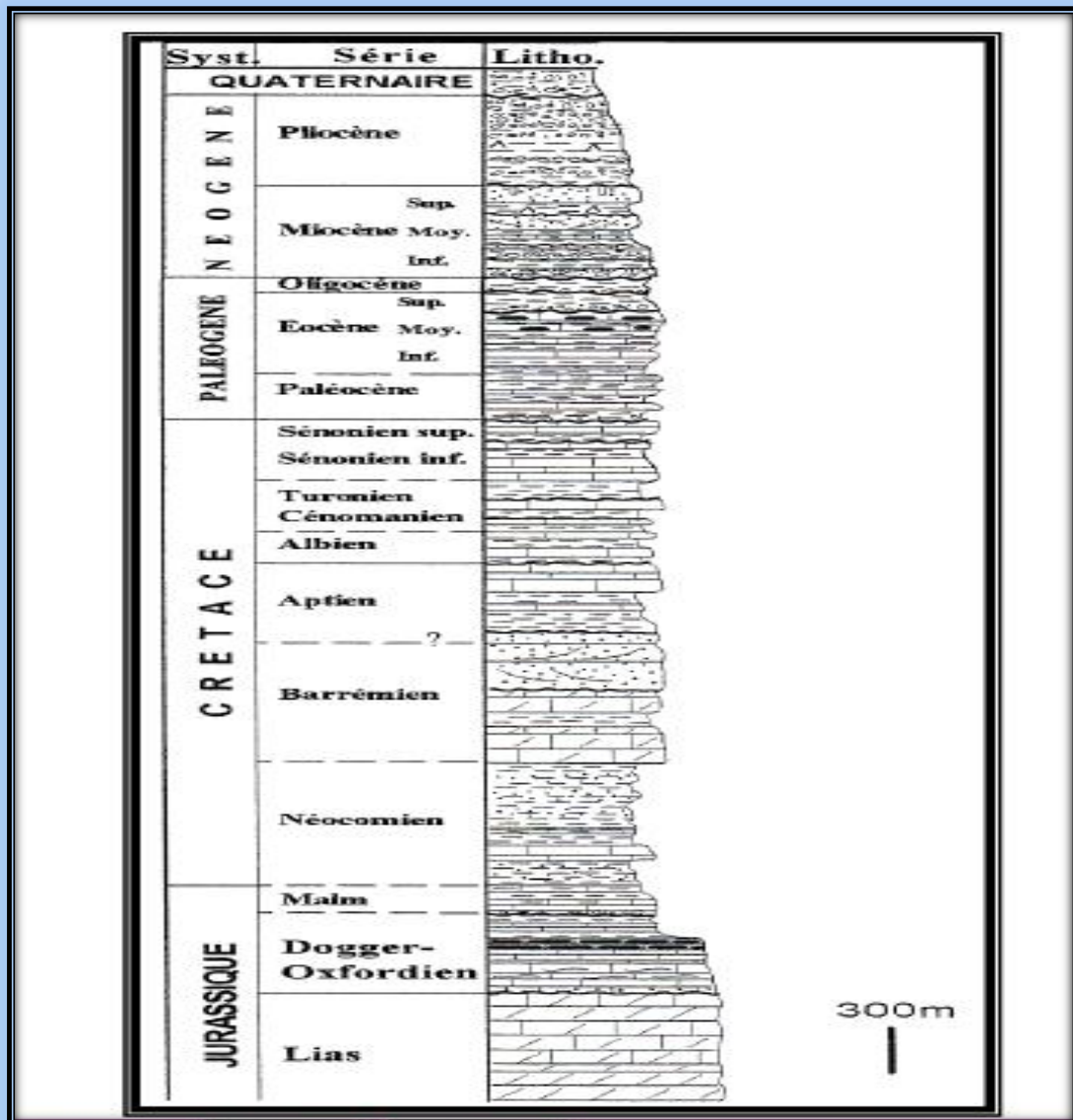


Fig. II.04 : Colonne lithostratigraphique des Aurès (Marmi et Guiraud, 2006).

3.2.1-Le Primaire : Le paléozoïque comporte dans les régions Autochtones de l'Algérie du Nord, des roches sédimentaires, principalement détritiques semble-t-il, des roches éruptives et plus rarement des roches métamorphiques.

✚ Aucun terrain antérieur au Trias n'affleure dans le massif des Aurès.

3.2.2- Le Secondaire : Est représenté essentiellement par le Crétacé, localement du Jurassique (cœur de l'anticlinal Dj El-Azreg), les calcaires marquant les reliefs alors que les marnes occupent les fonds de vallées en général.

a- Le Trias : Constitue les plus anciennes formations reconnues dans la région. Il occupe toujours à l'affleurement une position structurale anormale ou injecté au sein des séries encaissantes à la faveur de failles. Il est formé d'argiles gypsifères et salifères et englobant des amas de roches diverses de l'ensemble de la couverture post-triasique. Parmi les affleurements Triasiques reconnus on cite :

-Celui de Maafa : Ce pointement est caractérisé par des marnes bariolées rouges, quartz bipyramides, des bancs de gypses et les dolomies noires qui lui donne un aspect particulier.

-Celui de Mena : Présente des argiles violettes et rouges, des gypses fibreux, le tout associé à des dolomies sans fossiles.

-Celui de Narah : Analogue à ceux de Mena, montre des marnes bariolées avec la présence de calcaires marneux jaunes.

-Celui de Medina : Montre des marnes bariolées, des gypses fibreux et des blocs de cargneules.

b- Le Jurassique – Berriasien (base du Crétacé) :

Le Jurassique - Berriasien, puissant de 900 m environ, affleure au niveau du Djebel El Azreg. Le Lias est inconnu en position normale et quand on le rencontre, il est emballé dans le Trias sous forme de lambeaux.

Il est composé de schistes tendres (Mena, centre Aurès) à la surface dans lesquelles apparaissent des empreintes de Posidonomyes, attribuées à Steinmannia bornivoltz (Guillaume). Deux Ammonites appartenant au genre Pbyloceras y ont été découvertes par Laffitte (1939).

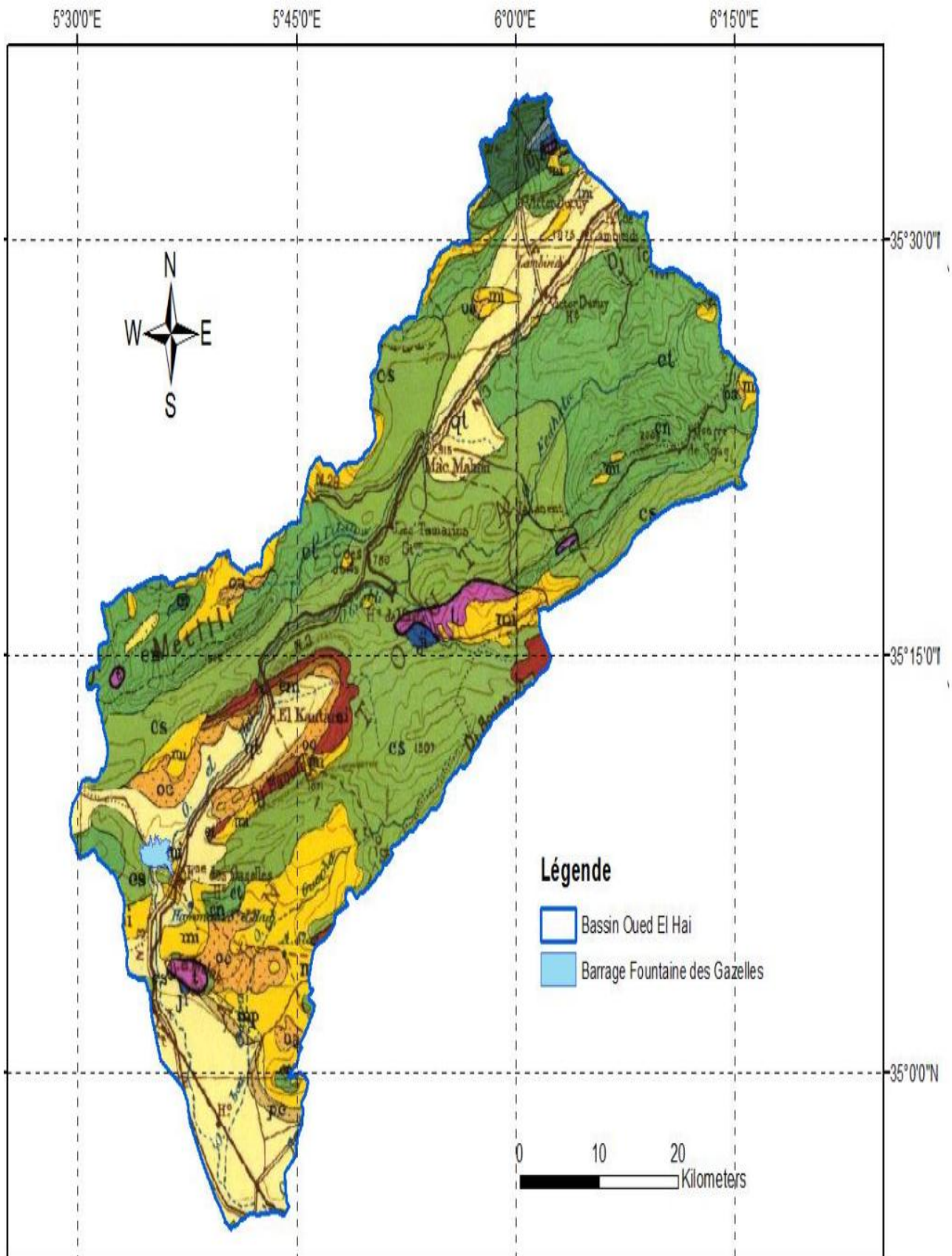


Fig. II.05 : Carte géologique régional du bassin versant d'Oued El-Hai (In Reghais et Maachi, 2017).

Légende :

| TERRAINS SÉDIMENTAIRES | | | |
|------------------------|--|---|--|
| A | Alluvions actuelles: laas, marécages, dayas, chotts, sabbhas, limons et croûtes gypso-salines | ko | Cambro-Ordovicien |
| D | Dunes récentes | ks | Acadien |
| qt | Quaternaire continental: alluvions, regs, terrasses | ki | Géorgien |
| qm | Quaternaire marin: plages anciennes et formations dunaires consolidées qui les accompagnent | kx | Conglomérat de base du Géorgien |
| qc | Calabrien: grès marins et formations dunaires associées | x | Primaire non subdivisée |
| qv | Villafranchien: calcaires lacustres, argiles à lignite, couches rouges | x _{3a} | Précambrien supérieur { schistes et grès congglomérats |
| pV | Pliocène continental et Villafranchien non séparés (pV) | x ₃ | |
| pe | Pliocène continental: poulingués, calcaires lacustres | x ₂ | Précambrien moyen: schistes et séricitoschistes |
| p | Pliocène marin congglomérats, marnes bleues, mollasses, grès et formations dunaires subordonnées | TERRAINS MÉTAMORPHIQUES | |
| mp | Pontien (localement équivalent du mc) | | Métamorphisme faible de c ₁ et c ₂ (Région d'Oran) |
| ms | Miocène terminal marin et lagunaire: couches à Tripoli, marnes à gypse | | Métamorphisme de contact |
| mm | Miocène supérieur marin: calcaires, grès, argiles | | Micaschistes, schistes satinés |
| mo | mc Miocène continental antépontien | | Gneiss |
| mi | | | Pyramites |
| oa | Aquitainien continental (pouvant inclure localement la base du Burdigalien) | | Calcaires métamorphiques (caloschistes, apolins) |
| oc | Oligocène continental (pouvant inclure localement l'Eocène sup. continental) | | Amphibolites, pyroxénites, grenatites, etc... |
| o | Oligocène marin incluant localement l'Eocène supérieur | ROCHES IGNÉES | |
| em | Eocène moyen marin | | Granites, granodiorites |
| ec | Eocène moyen et inférieur continental | | Microgranites, microgranodiorites |
| ei | Eocène inférieur marin | | Diorites, gabbros, dolérites |
| cs | cs Crétacé supérieur marin | | Rhyolites, dellénites, dacites et tufs associés |
| csc | | | Andésites et tufs associés |
| csm | csm Crétacé supérieur marin non subdivisé | | Basaltes et tufs associés |
| em | em Crétacé moyen (marin ou lagunaire) | | Phonolites |
| cm | | | Serpentines |
| en | divisé éventuellement en et Turonien cn Cénomaniens | | Roches associées au Trias (diorites, ophites, gabbros, etc...) |
| c | c Crétacé marin non subdivisé | | |
| ci | Crétacé inférieur (Vraconien à Berriasien) | | |
| cir | | ci faciès marins normaux | |
| cic | | cir - récifaux ou subrécifaux cic - continentaux ou lagunaires | |
| cj | Crétacé et Jurassique non séparés | | |
| js ₃ | je Jurassique sup. et moyen | | js ₃ Portlandien et Kimmeridgien (pouvant inclure localement le Berriasien) |
| js ₂ | | | js ₂ Lusitanien |
| jms | jms Jurassique sup. et moyen marins non séparés | | js ₁ Oxfordien et Callovien |
| js ₁ | | | |
| jm | jm Jurassique moyen (pouvant inclure localement l'Aalénien supérieur) | | |
| jt | ii. Aalénien et Triasien | | |

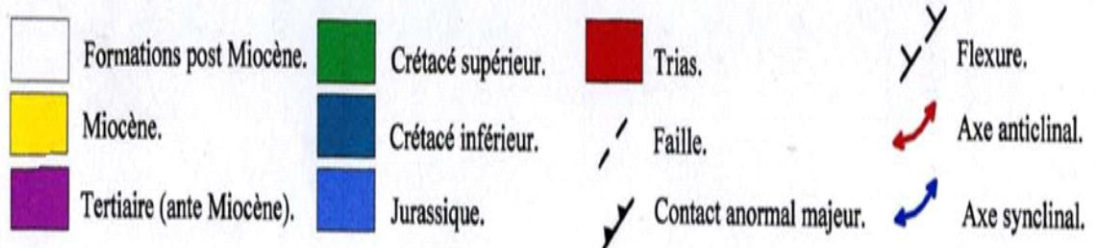
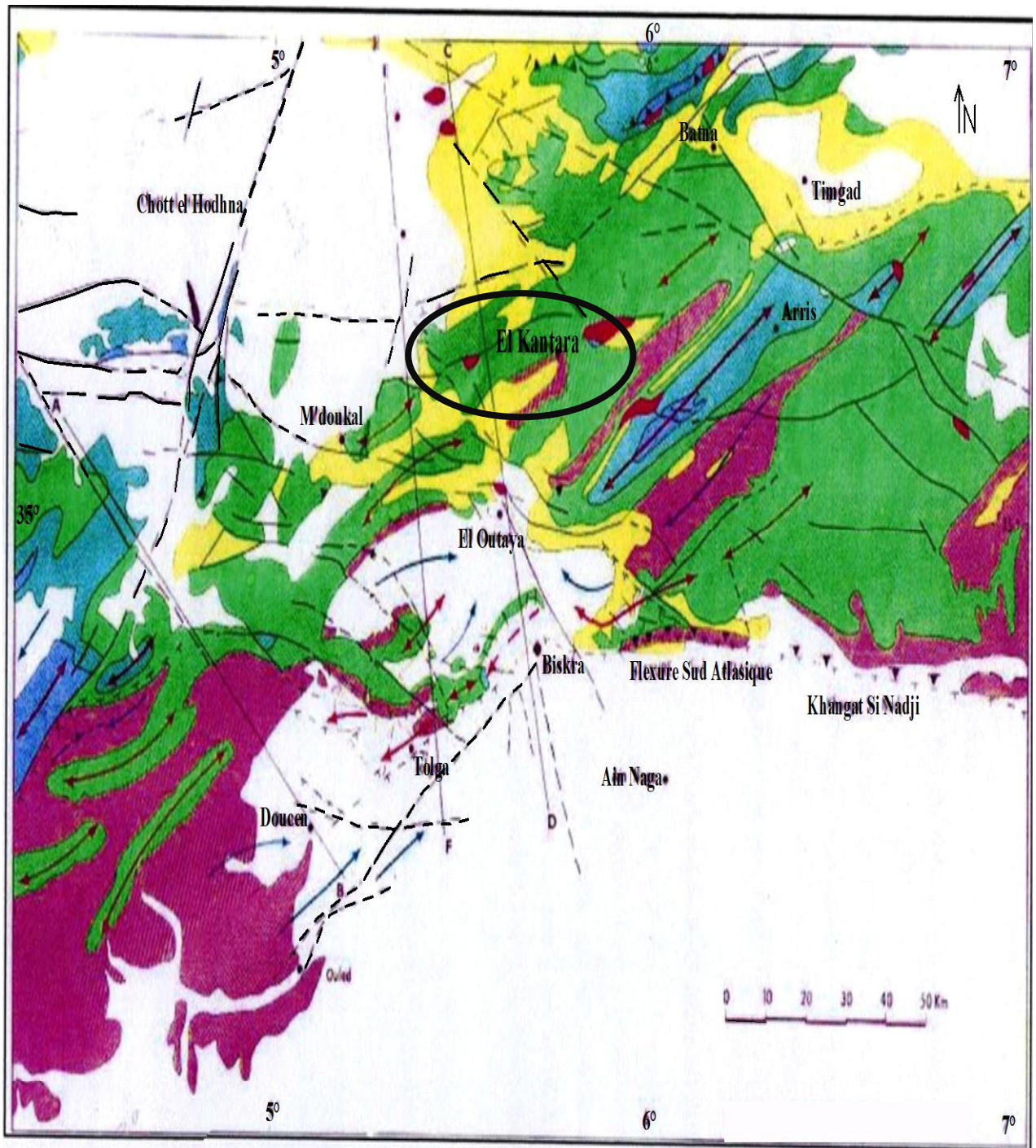


Fig. II.06 : La carte structurale du massif de l'Aurès (In Rihani ,1980)

Le Kimméridgien - Portlandien - Berriasien apparaît au cœur de l'anticlinal de Djebel El-Azreg .Le Kimméridgien est bien différencié, contrairement au Portlandien et le Berriasien où la rareté des fossiles et les faciès analogues rendent difficile leur reconnaissance.

c- Le Kimméridgien : Il s'agit des terrains les plus anciens reconnus en position normale dans le massif des Aurès où ils forment une boutonnière entre les vallées de l'Oued Abdi et de l'Oued Labiod (anticlinal de Dj El-Ezereg). Il se scinde en deux ensembles bien distincts avec :

- Un ensemble carbonaté basal, d'une épaisseur de 250 à 300 m,
- Un ensemble marneux sommital, d'une épaisseur de 400 m,

d- Le Portlandien et le Berriasien :

Cet ensemble d'une épaisseur de 250 à 300 m, se présente sous deux faciès bien distincts formant entre eux un passage latéral progressif avec un faciès calcaro-marneux au NW et un faciès dolomitique au SW du massif Aurésien.

e- Le Crétacé :

e.1- Le Crétacé inférieur : Il constitue l'essentiel des affleurements au Djebel Ichmoul ainsi qu'au flanc Sud de l'anticlinal du Djebel El-Azreg. D'une manière générale, le Crétacé inférieur est argilo-gréseux. Néanmoins, il admet des intercalations carbonatées ou dolomitiques marines. On y distingue :

e.1.1 - Le Néocomien (indifférencié) :

Il constitue l'essentiel des affleurements du Dj. Ichmoul, Chélia, ainsi que le flanc Sud de l'anticlinal du Dj. El-Azreg.

e.1.2- Le Barrémien :

Il est marqué par l'enrichissement de la série en matériel détritique, représenté essentiellement par des grès quartzitiques massifs et d'argiles, donnant un aspect externe rougeâtre (Lié à une très forte oxydation, typique d'un milieu continental).

e.1.3 - L'Aptien :

Il est constitué par une série de bancs de calcaires massifs d'échelle métrique à décamétrique, de couleur gris clair à gris sombre riche en Orbitolines, en alternance

avec des marnes grises. Au sommet, l'Aptien est surmonté par des grés quartzitiques massifs. L'épaisseur totale de l'Aptien est de l'ordre de 250 m.

e.1.4- l'Albien :

Au niveau de la vallée d'Arris, l'Albien inférieur est constitué par une alternance de bancs de grés fins, décimétriques à métriques, strato-croissants, de couleur gris-blanc, et d'argiles de couleur gris-vert friables parfois indurées avec de fins passages de calcaires et de marnes noires.

Au niveau des régions d'El-Houdjadj et Médina (Ichmoul), l'Albien supérieur est caractérisé par une alternance de calcaires massifs et de marnes annonçant la grande transgression cénomaniennne qui affectât toute la région. L'épaisseur moyenne de l'Albien est estimée à environs 190 m.

e.2- Le Crétacé supérieur :

e.2.1 - Le Cénomanienn :

Il affleure surtout au niveau des régions d'Arris et d'El Houdjadj où il surmonte les faciès Albiens. Il est représenté essentiellement par des marnes vertes à grises, tendres, rarement fossilifères, à fines passées calcaires parfois marneuses. Par contre au niveau de la région d'Inoughissène, le faciès s'enrichit légèrement en fossiles, notamment des Oursins et des foraminifères. L'épaisseur moyenne du Cénomanienn est d'environ 1000 m par endroits comme à l'anticlinal du Dj El-Azreg.

e.2.2 - Le Turonien :

Il affleure latéralement sur le flanc Sud de l'anticlinal du Dj. El-Azreg, et constitue les premières crêtes, visibles à Arris, Ichmoul et Tabendout, et surmonte ainsi les marnes cénomaniennes. La limite entre les deux étages n'est pas bien définie, toutefois, on peut la placer avec l'apparition des premiers bancs massifs de calcaires.

Le Turonien est généralement constitué par des barres massives de calcaire à rotalidés, à lamellibranches et à intercalations de marnes. Son épaisseur peut être estimée à environ une centaine de mètres.

e.2.3- Le Sénonien inférieur (Coniacien, Santonien) :

A Inoughissène et à Tighanimine, il est représenté par une alternance monotone de calcaires massifs à échelle métrique à décamétrique, des marnes qui deviennent de plus en plus abondantes vers le sommet de la série. Le Sénonien inférieur renferme souvent une faune pélagique à l'échelle du bassin, seulement ici, il n'a pas été

possible d'identifier cette faune. Il est difficile de placer une limite lithologique entre ces étages, du fait de la similitude des faciès. Son épaisseur totale est de l'ordre de 600 m environ.

e.2.4- Le Sénonien supérieur (Campanien - Maestrichtien) :

La ville de Tighanimine montre un affleurement du Sénonien supérieur dans lequel on observe un contraste lithologique évident entre le Campanien et le Maestrichtien.

-Le Campanien, de 200 m d'épaisseur environ, montre une série marneuse à intercalations calcaires devenant gypseuses à l'Ouest, avec des Ammonites, des Oursins et des Huîtres. Par contre, à l'Est, des foraminifères benthiques dominent.

-Le Maestrichtien_(porte d'El-Kantara), puissant de 150 m environ, est constitué par une série marno-calcaire à la base, surmontée par des calcaires massifs beiges à rares passages marneux.

3.2.3-Le Tertiaire :

a- Le Danien : Est représenté dans le Sud et l'Est de l'Aurès par des sédiments phosphatés à épaisseur variable. Les calcaires, de moindre importance sont inséparables de ceux du Maestrichtien. Ensuite, l'émersion qui s'est dessinée à l'El-Kantara a favorisé la formation des marnes rouges lagunaires.

b- Le Paléocène :

Cet étage n'a pas été bien identifié (par l'équipe de la Sonatrach) néanmoins au niveau de la région de Tighanimine, on observe une série ne dépassant pas une cinquantaine de mètres, composée essentiellement de marnes à fins passages calcaires, pouvant être attribués au Paléocène.

c- L'Eocène :

Contrairement au Paléocène, les dépôts Eocènes sont très développés à l'échelle de toute la région. En effet, ils constituent le cœur du synclinal de Ghassira, avec des calcaires massifs bioclastiques à Nummulites, fortement fracturés, montrant des laminations planes et contenant des nodules de silex. Des niveaux de marnes viennent s'intercaler dans l'ensemble.

Au sommet, la série évolue progressivement vers des faciès à tendance continentale, composés de grès moyennement fins et d'argiles rouges à fines passées gypseuses (Lutétien supérieur) rattachées à l'installation d'un milieu lagunaire.

L'Eocène peut se subdiviser en deux séries :

– Une série marneuse qui comprend l'Eocène inférieur et moyen : la mer recouvre les Aurès pendant cette période d'une manière assez uniforme puis des couches marines se déposent au Nord-ouest et au Sud-est ; celles-ci passent à des calcaires lacustres et des sédiments rouges dans la région d'El-Kantara.

– Une série continentale qui comprend l'Eocène supérieur et l'Oligocène, qui passe dans l'axe de certains synclinaux (Rhassira et El-Kantara) en concordance avec le Lutétien à la base et le Burdigalien au sommet.

Cette série se caractérise par deux sortes de dépôts :

- Marnes et grès rouges dans les synclinaux (El-Kantara et Bouzina) évoquant la sédimentation dans des bassins fermés.
- Les poudingues indiquent l'action d'une érosion vive surtout à la fin de l'Oligocène ; celle-ci a déblayé en certains points, 600 m de sédiments, laissant ainsi le Burdigalien reposer directement sur le Jurassique, c'est lors de cette période que se sont produits en effet, les plissements principaux qui relèvent la série secondaire à la verticale.

d- Le Miocène :

Il est constitué par des grès et des conglomérats à grains fins et moyens avec de rares passages argileux (Kef Laarous). Au niveau de Taghit au Nord de Tifelfel, les conglomérats deviennent grossiers au sommet de la série. L'épaisseur moyenne du Miocène est évaluée à plus de 1000 m. Le Miocène est scindé en deux séries principales :

*Une série marine du Burdigalien- Miocène inférieur : la mer a recouvert tout le massif, mais peu après, elle n'a subsisté que dans les bassins du périphérique du massif. Des molasses gréseuses et des grès se sont déposés dans le bassin de Timgad (versant Nord) et des molasses calcaires et des marnes dans la cuvette d'El-Outaya. Au début de cette période la crête du Dj. Metlili qui sépare la cuvette d'El-Outaya et celle de Hodna a émergé.

*Une série continentale qui regroupe le Miocène supérieur et le Pliocène : cette série est formée à la base par des argiles rouges, qui n'existent pas dans tout le massif des Aurès, mais seulement dans le synclinal de Bouzina. Tandis que la cuvette El-Outaya et la bordure des Ziban sont constituées par des argiles rouges à la base ; des grès ou des sables bruns ou rouges et des poudingues rouges au sommet.

e- Le Pliocène :

Il surmonte le Miocène avec un faciès continental.

3.2.4- Le Quaternaire :

Il est représenté par des éboulis, des cônes de déjections et les terrasses qui marquent des époques stationnaires du creusement de la vallée et de formation des dunes ; qui sont répandues surtout aux bordures du massif des Aurès, où ils forment des grandes unités alluviales qui constituent les sièges de nappes phréatiques. En revanche, dans le centre du massif, ces unités sont très localisées et peu étendues.

4-Contexte structural :

Les structures majeures du massif des Aurès sont du Nord au Sud et d'Ouest en Est :

- Axe anticlinal de Dj AHMAR- Dj METLILI et ICH ALI
- Axe anticlinal MAKRIZANE- BIR FERAH– IGUEDLENE
- Le synclinal de BOUZINA
- Axe anticlinal du Dj EL AZREG- ICHMOUL- Dj CHELIA
- Le synclinal de RHASSIRA
- Axe anticlinal TAKTIOUT- TOUBOUNT –KHENCHLA

4.1- Les cassures :

Les cassures sont nombreuses dans le massif des Aurès, où elles montrent des directions variables. On les regroupe en trois familles principales :

- Nord-Sud et Nord Est-Sud Ouest : décrochements senestres.
- Est-Ouest : décrochements senestres et dextres.
- Nord Ouest-Sud Est : décrochements dextres.

Les Aurès présentent une tectonique salifère, soulignée par des pointements du Trias extrusif, mis en place à la faveur d'accidents importants, notamment à Menaa ,Nara et Ichmoul (Sonatrach, 2000).

5- Analyse tectonique régionale :

La région d'étude appartient à la terminaison des monts des Aurès, qui fait partie de la chaîne de l'Atlas saharien dont on peut définir les principaux types de plis et les accidents en tenant compte de la structuration de l'Atlas saharien, qui est le résultat d'une tectonique polyphasée dont on essayera de dresser un bref aperçu (**Fig. II.04**).

5.1- Structuration de l'Atlas saharien :

La tectogenèse de l'Atlas saharien, comprend un certain nombre de phases tectoniques que l'on essayera de décrire brièvement :

5.1.1- La phase Emshérienne :

Elle débute à la fin du Turonien et se poursuit au Sénonien. Elle intéresse principalement le domaine pré-atlasique (entre le Chott chergui , les monts du Hodna et l'Atlas saharien occidental). Cette phase se manifeste en général, par des plis Est-Ouest accompagnés de cassures Nord Ouest, Nord Est ou Est Nord Est, avec des compressions qui peuvent être de direction NNW – SSE à Nord Sud (Guiraud ,1990), à l'aide d'une opération rétro tectonique sur la carte de Boutaleb montre que la déformation Emshérienne donne des plis Nord Ouest-Sud Est.

Ces structures sont bien représentées dans l'Atlas saharien (feuille d'Ain Rich au 1/200.000, 1972).

5.1.2- La phase Atlasique (ou phase pyrénéenne) :

Elle se produit au Lutétien (Eocène moyen). Elle est caractérisée par des plis coffrés à périclinaux coniques orientés Nord Est-Sud Ouest à ENE – WSW, les failles sont parfois parallèles à l'axe des plis, mais la plupart sont obliques avec une direction Est-Ouest, NW-SE et WNW-ESE, (Guiraud, 1990) et (Kazi-Tani, 1986).

5.1.3-La phase distensive de l'Oligo-Miocène :

Elle est postérieure à la déformation fini Eocène, qu'elle la recoupe et elle est antérieure à celle du Langhien inférieur (Miocène moyen). Cette phase, purement distensive, créât des grabens, tels que celui d'El-Madher, au djebel Bouarif (Kazi-Tani, 1986).

5.1.4- La phase Miocène :

Cette phase n'a produit que de faibles déformations. Elle est caractérisée par le redressement et la déformation des conglomérats du Tertiaire de la phase atlasique (Guiraud, 1990).

5.1.5-La phase du Pliocène :

Elle est la plus importante, elle intéresse surtout la fin du Pliocène. Les plis sont souvent orientés ENE-WSW.

5.1.6-La phase Quaternaire :

Elle est à l'origine des grabens subméridiens (Kazi-Tani, 1986)

6-Géologie locale (synclinal d'El-Kantara):

Le secteur d'El-Kantara se situe dans la terminaison occidentale du massif des Aurès (Est Algérien), au Sud du môle constantinois et à soixante dix kilomètres environ au Nord de la ville de Biskra. Il correspond à une large dépression synclinale limitée par le relief faillé du Djbel Metlili au Nord, et Djebel Haouidja, au Sud, à aspect semi-désertique.

6.1-Les principaux traits de la série stratigraphique :

Sa cartographie a été réalisée de manière détaillée par J.L.Ballais (**Fig. II .04**), selon la nomenclature marocaine .Il s'agit globalement de dépôts alluviaux, des travertins et des éboulis.

6.1.1-Le Secondaire : constitué essentiellement de terrains d'âge Crétacé supérieur et d'affleurement de Trias par endroit.

a- Le Maestrichtien « Supérieur » C^{6b} :Il correspond à des calcaires massifs dont la puissance tend à diminuer d'Est en Ouest (épaisseur maximale 350 m environ).Il s'agit de faciès zoogènes à Algues, polypiers, Inocérames...

b- Campanien, Maestrichtien « Inférieur » C^{5-6b} : Il s'agit d'une très puissante formation à dominance marneuse et comporte quelques passées gypseuses ou

carbonatées. La faune est abondante mais peu variée : Lumachelles d’Huîtres et nombreux Oursins.

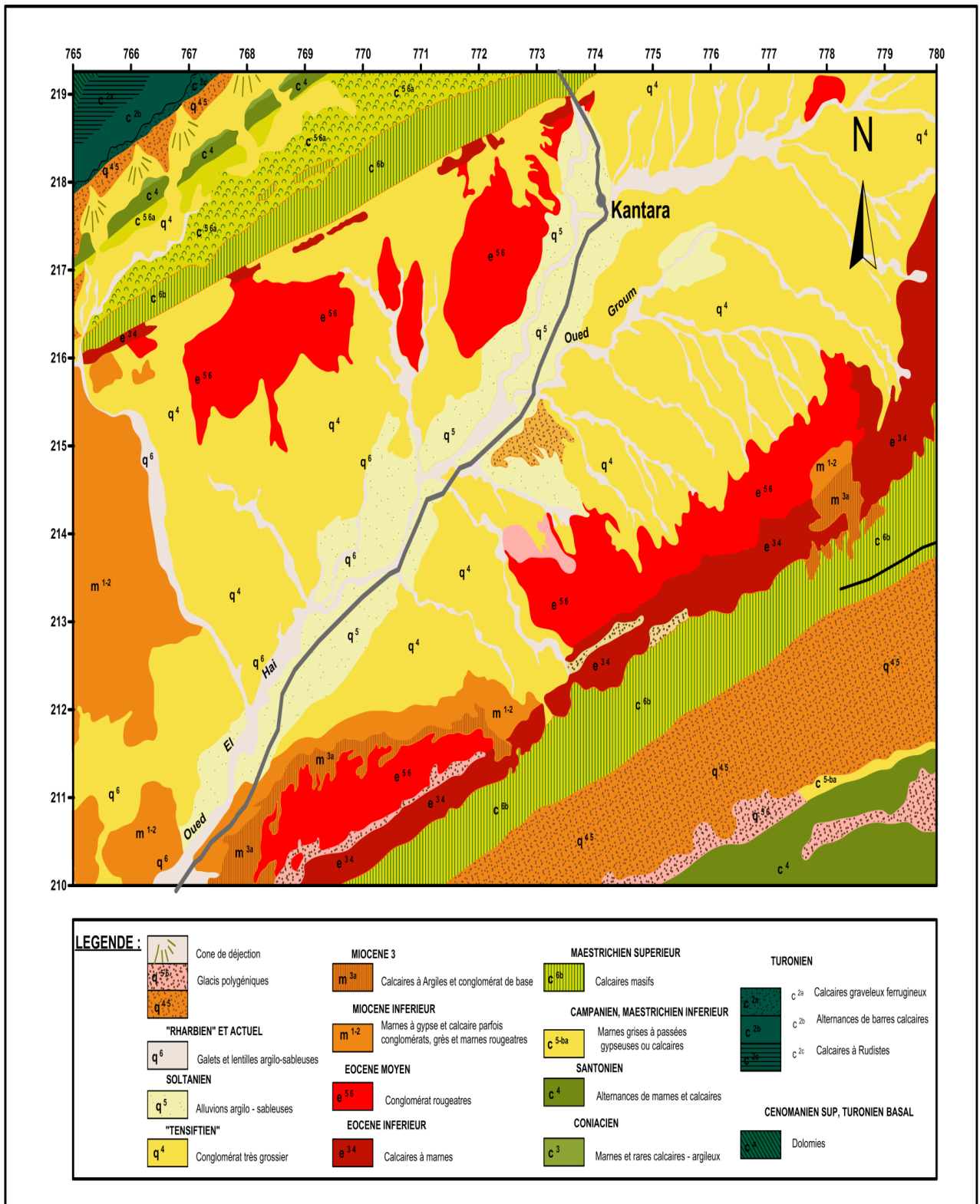


Fig. II.07 : Extrait de la carte géologique du secteur d’El-Kantara 1/50000 (modifié Kerboub, 2022)

c-Santonien- C⁴ : Il comporte des alternances de marnes grises et de calcaires à silex et Inocérames ; une barre de calcaire formant un niveau repère sur le pourtour du Djebel Metlili. Aussi, la présence de quelques intercalations gypseuses très peu épaisses et de granules glauconieux au sein de certains bancs carbonatés. La faune est abondante : Inocérames très abondants et de grande taille ; Oursins et Lamellibranches et quelques Ammonites bien localisées.

d-Coniacien- C³ : Il s'agit d'une formation puissante à dominance marneuse ; il existe cependant de rares et minces intercalations calcaires sur le flanc méridional du Djebel Metlili mais deviennent plus importantes au voisinage du Dra EZ Zemla et du Djbel Merkizane.

e- Turonien- C² : Il est essentiellement constitué par des calcaires à rudistes, en bancs massifs séparant quelques combes marneuses dans lesquelles on peut trouver des Oursins, des Gastéropodes, des Polypiers et quelques Ammonites. Sur les flancs du Djebel Metlili le Turonien est scindé en trois ensembles lithologiques : des calcaires à rudistes et à silex parfois bréchoides à la base ; des alternances marno-calcaires et en fin des calcaires graveleux ferrugineux.

f- Cénomaniens : En général, il est formé par des dolomies saccharoïdes blanches de 60 m d'épaisseur ; des formations calcaire-marneuses épaissent de 300 à 400 m sur Djebel Metlili et des marnes grises de 200 à 250m d'épaisseur.

g- Le Trias-t²⁻³ : Il affleure toujours en positions anormale. Il est représenté dans la région par des montagnes de sel qui affleurent dans deux endroits sous forme de diapir : au Sud-Ouest de Djbel Metlili et dans la région d'El-Outaya, ces montagnes sont caractérisées par des formations évaporétiques du Trias supérieur (sel, gypse, argile) et du Trias moyen (dolomies noires).

6.1.2-Le Tertiaire : il est représenté par

a- Pliocène P : Il s'agit de formations gréseuses épaissent de plusieurs dizaines de mètres. Elles comprennent à la base, quelques bancs de grés relativement tendres, blancs-rosâtres, à petits galets, alternées avec des passées de marnes gréseuses rosâtres. Au-dessus viennent des bancs gréseux plus massifs.

b. Le Miocène :

b.1-Miocène 4 –m⁴ : Il est caractérisé par des marnes brunes ou rougeâtres qui deviennent très gypseuse dans le bassin de Djemmorah.

b.2-Miocène 3 –m³ : Il correspond à des marnes gris violacés et des conglomérats à galets parfois très grossiers.

b.3-Miocène inférieur -m¹⁻² : Formé par de puissantes séries conglomératiques reposant en discordance nette sur les terrains plus anciens. Ces formations détritiques sont généralement grossières, mais elles admettent cependant des passées argilo-gréseuses. Aux environs de Djemmorah, le Miocène inférieur est scindé en deux entités distinctes :

- Miocène 2, marno-calcaire : peu épais situé à l'Ouest de Gueddila.
- Miocène 1, conglomératique : épais et nettement déformé, situé au Nord de Djemmorah.

c- Eocène Moyen e⁵⁻⁶ : Il correspond probablement à une puissante formation conglomératique, grossière et rougeâtre, mal datée .Il présente de minces horizons gypseux.

d- Eocène Inférieur e¹⁻⁴ : La série Eocène débute par une formation à dominance marneuse, très peu épaisse ; les niveaux très rubéfiés, au voisinage du Djebel Metlili qui devait alors être émergé, admettent quelques passées carbonatées gréseuses ou conglomératiques. Pour l'essentiel, il s'agit, d'une formation calcaro-marneuse qui comporte parfois de fines passées argilo-gréso-conglomératiques ou gypseuses. La plupart des niveaux carbonatés sont fossilifères et fournissent des gastéropodes, des Lamellibranches et des Miliolidés. Si la majeure partie est d'origine marine, il existe cependant quelques intercalations lacustres (calcaires à Cératodes) signalées par R.Lafitte (1939).

6.1.3-Le Quaternaire : est représenté par

a- Raharbien et actuel –q⁶ : formé par de gros galets peu roulés et des argilo-sableuse, localisés étroitement dans le lit majeur des oueds.

b- Soltanien -q⁵ : formé par une couverture alluviale et une terrasse épaisse de 7 à 10m, comprend à la base, un conglomérat épais de 1.50m et au dessus, des lentilles limono-argileuses rougeâtres. La couverture alluviale varie de 1m à 5m d'épaisseur d'amont en aval.

c- Tensiftien -q⁴ : constitué essentiellement par des galets peu roulés, non stratifiés.

d- Amérien -q³ : formé par des galets non stratifiés plus grossiers qui se localisent dans les piémonts. Sur les argiles gypseuses comprises entre le Djbel Hachichina et le Djebel el Melah d'El Outaya, il porte un encroûtement gypseux plus dur que celui de « Tensiftien ».

e- Saletien-q² : Il se localise à l'ouest d'El-Kantara. Il est caractérisé par une couverture alluviale qui ne dépasse pas 50cm d'épaisseur mais renferme des blocs plats qui atteignent 3m de long.

6.2-Formations récentes:

6.2.1-Les glacis polygéniques : Il en existe deux types, fort différents. Le premier se localise au Sud d'El-Kantara, montre encore des restes de l'encroûtement du glacis « tensiftien » recouvert par les alluvions et de la terrasse « Soltanien ». Le second entre les Djebels Hachichina et Gueraat el Guetoul, se localise à la ligne de partage des eaux entre l'oued de Biskra et le Bled Ed Daya.

6.2.2-Les éboulis : Ils occupent les pieds des escarpements de calcaires Maestrichtiens très diaclasés du Djbel Haouidja-Nador, Kolea et Djar Ed Dechra et des calcaires Turoniens du Djebel Metlili. Ils sont polygéniques (gravité pure ou assisté par ruissèlement ou neige).

7-Analyse tectonique locale :

7.1-Les Plis :

L'examen attentif de la feuille d'El-Kantara montre que la région d'étude se situe entièrement dans le domaine atlasique. En outre, le passage des structures des Aurès à celles de la région de M'Doukal-Biskra (Guiraud, 1973), dont il est facile de constater la disparition des plis amples et réguliers des Aurès, tronqués au niveau d'une importante zone de fracture d'orientation générale NW-SE.

En effet, la région d'étude est constituée par des structures de direction atlasique affectée par des failles transversales et longitudinales. Parmi ces structures on cite :

-L'anticlinal de dj. Metlili

-Le synclinal d'El-Kantara

✚ **L'anticlinal de Djebel Metlili (NE-SW) (Fig. II.05):** c'est un vaste pli coffré d'âge anté-Miocène qui a été repris par les mouvements post-Miocène caractérisé par :

-Le flanc Sud qui est plus redressé que le flanc Nord ;

-Les terrains Miocènes du versant Nord sont affectés par une flexure ;

-Plusieurs Tronçons due à de nombreuses failles ENE-WSW et l'effondrement de la voûte a été provoqué par l'accident directionnel Souk Ahras-Batna.

✚ **Le synclinal d'El-Kantara :** c'est un synclinal court et très régulier, c'est plutôt une cuvette légèrement asymétrique (**Fig. II.06**). Il est caractérisé par :

-Les couches du flanc Nord qui ont un pendage plus fort que celles du flanc Sud (de 70° à 80° sur le versant Nord ; 30° à 45° sur le versant Sud).

-Le cœur de ce synclinal est constitué par des formations, éocènes, miocènes et quaternaires (Laffitte, 1939).

-Les crêtes des calcaires Maestrichtiens ont été nivelées à par le stade de pénéplanation Oligocène qui s'est abaissé ici en dessous du Miocène.

7.2-Les cassures :

La feuille d'El-Kantara montre que la région d'étude est parcourue par de nombreux accidents, ainsi que Djebel Metlili. Les plus importants s'orientent selon les directions NW-SE à E-W. Il peut s'agir de failles normales, inverses ou décrochements. Parmi ces accidents tectoniques on cite :

- ❖ **Accident NW-SE Metlili Ouest :** Cette partie présente une structure en gradins qui est le résultat d'un faisceau de failles de direction NW-SE ; à jeu dextre et qui se prolongerait au Sud vers Biskra- El Outaya.

- ❖ **Accident NW-SE Metlili Est** : La conséquence de cet accident est les affleurements du Trias de la région de Menaa et Maafa (Bellion ,1972).

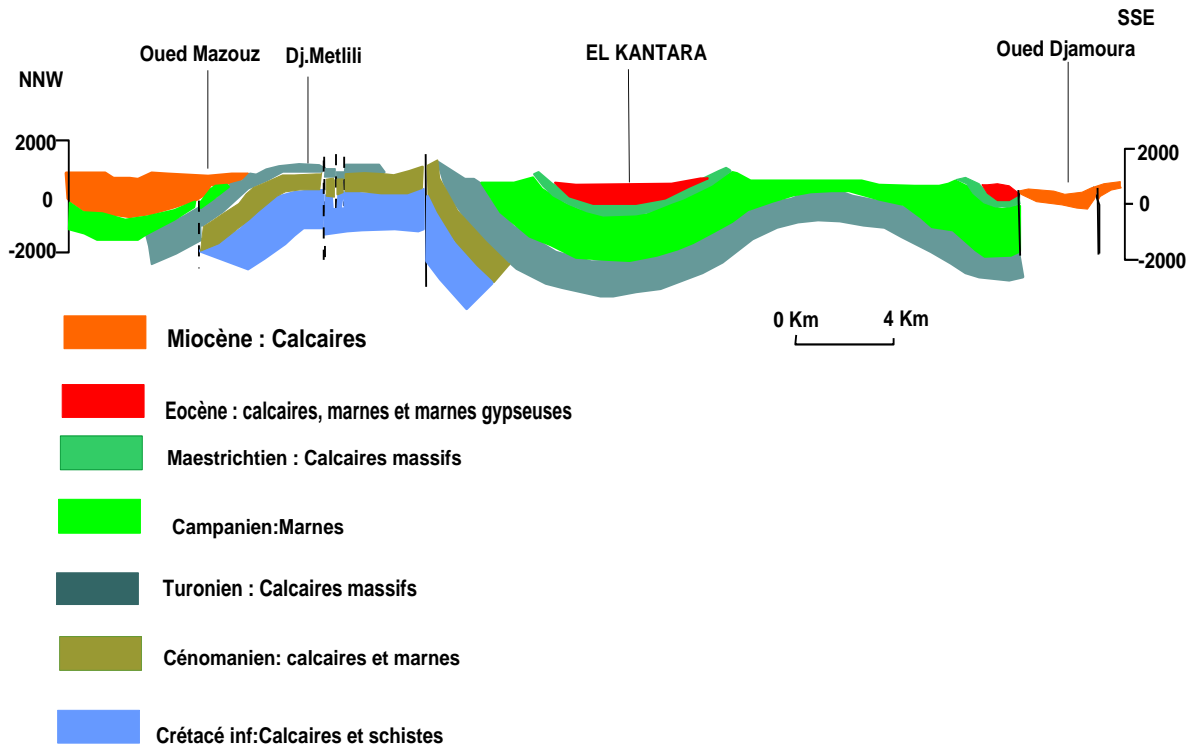


Fig. II.08 : Coupe à l'aval d'El-Kantara (Guiraud, 1973) (modifiée, 2012).

- ❖ **Accident NW-SE Metlili Sud** : Cet accident limite à l'Ouest l'anticlinal de Metlili ; passe par la plaine d'El-Outaya et fait partie d'un grand accident transversal nommé géosuture Hodna–Aurès (Guiraud,1973) ou encore accident d'El-Outaya (Kazitani, 1986).
- ❖ **Accident NW-SE Souk Ahras-Batna** : Il se manifeste par la faille qui a provoqué l'effondrement de la voûte de l'anticlinal du Djebel Metlili et qui met en contact le Miocène et le Turonien du flanc Nord du Djebel Ich Ali.
- ❖ **Accidents E-W** : Ils se manifestent dans plusieurs structures des Aurès. Parmi lesquelles on cite :
 - La faille de direction E-W limitant le Cénomaniens du Turonien sur le flanc Sud de l'anticlinal d'Ich Ali.
 - La faille Arbâa-Maafa responsable des affleurements triasiques au niveau de Maafa et Arbâa.

- ❖ **Les pointements Triasiques** : Ils correspondent à des extrusions de types pseudo-diapirique du Djbel El Melah d'El-Outaya, dans les zones de convergence de plusieurs accidents importants. Les séries encaissantes sont fortement rebroussées à leur contact.

7.3-Les différentes phases tectoniques : Les déformations enregistrées sur la feuille d'El-Kantara relèvent de deux phases principales :

- La phase de compression pyrénéo-atlasique, d'âge Eocène moyen à supérieur. Elle est caractérisée par de vastes plis Aursiens, de direction N60°E.
- La phase s'est produite après le dépôt des séries néogènes : Elle se localise dans la moitié Sud-Occidentale de la feuille. Elle se manifeste par de nombreuses cassures importantes et notamment la faille inverse qui met en contact l'éperon du Djbel Melou Youssef avec le bassin de Djammourah, ainsi que le décrochement de Bled Salaouine qui décale de façon dextre Djbel Merkizane (Guiraud ,1970).

8-Conclusion :

Il ressort que la région d'étude fait partie de la chaîne des Maghrébides et elle appartient à la série de l'avant pays atlasique autochtone.

D'un point de vue lithostratigraphique, la région d'étude est caractérisée par une série sédimentaire complète, du Trias au Quaternaire.

D'un point de vue structural, la région est affectée par l'action conjuguée de plusieurs phases tectoniques de style et d'extension variables dont la tectogenèse majeure se situe durant l'Eocène moyen (phase atlasique). Cette phase a engendré de vastes plis (concentrique orientés entre N 40 et N 60° E) et de nombreux accidents à la faveur desquels des pointements triasiques ont vu le jour. Ceci a été suivi d'une phase de rajeunissement des reliefs à l'Oligocène. Les accidents montrent des directions très variées et leur répartition n'est pas homogène dans l'ensemble du domaine atlasique.

La géologie de la région a permis de constater qu'il existe une grande partie des formations d'alluvions et des calcaires perméables, permettant la création de nappes alluviales et de possibles aquifères karstiques. Tandis que le reste des formations argileuses et marneuses, ont une faible perméabilité jouant ainsi le rôle de substratum imperméable permettant le ruissellement des eaux de surface.

Chapitre III : Climatologie

1-Introduction :

Les facteurs climatiques jouent un rôle déterminant sur le régime d'un cours d'eau et dans la réalimentation des nappes aquifères.

L'établissement d'un bilan hydrique est fonction de plusieurs facteurs tels que : la précipitation avec sa distribution dans le temps et dans l'espace, l'humidité, le ruissellement, l'infiltration et l'évaporation.

La détermination de ces paramètres est possible en utilisant des formules empiriques (ETR, ETP, R,...) et des mesures sur terrain de température et de précipitation.

Pour établir le bilan de la région d'étude, on a utilisé les données tirées principalement des travaux et des annuaires établis par : **(Tab.III.01) et (Fig.III.01)**.

- Seltzer (1946) : « Le climat de l'Algérie ; données recueillies entre 1913 et 1938, (station pluviométrique d'El-Kantara).

-Reghais Azzedine et Maachi Faris (2018) : « Contribution à l'étude du dimensionnement des périmètres de protection du Lac du Barrage de Fontaine des Gazelle (Wilaya de Biskra) ; données recueillies entre 1997 et 2017» (station pluviométrique se situe très proche d'El-Kantara Nommée H2 entre 1997 et 2017).

- Agence Nationale des Ressources Hydriques et l'Office National de la Météorologie (station pluviométrique de Biskra).

Tab. III.01 : Caractéristiques des stations pluviométriques.

| Station | Code | X | Y | Z(m) | Observations |
|------------|----------|-------------|-------------|------------|----------------------------------|
| El-Kantara | 06-12-06 | 773.450(Km) | 218.300(Km) | 540.000(m) | Couvre la partie Nord du terrain |
| H2 | / | 5°,65252 | 34°,9646 | / | Couvre la partie Sud du terrain |
| Biskra | 06-14-16 | 777.000(Km) | 178.000(Km) | 120.000(m) | Couvre la partie Sud du terrain |

Pour faire une meilleure étude climatologique et assurer une bonne représentation des conditions climatiques sur la totalité du bassin versant d'Oued El-Hai et surtout à l'échelle de la région d'étude. Nous avons utilisé les données (Précipitations,

Température) enregistrées au niveau des différentes stations représentatives situées à l'intérieure et à l'extérieure du bassin versant (**Tab.III.01**) et (**Fig.III.02**).

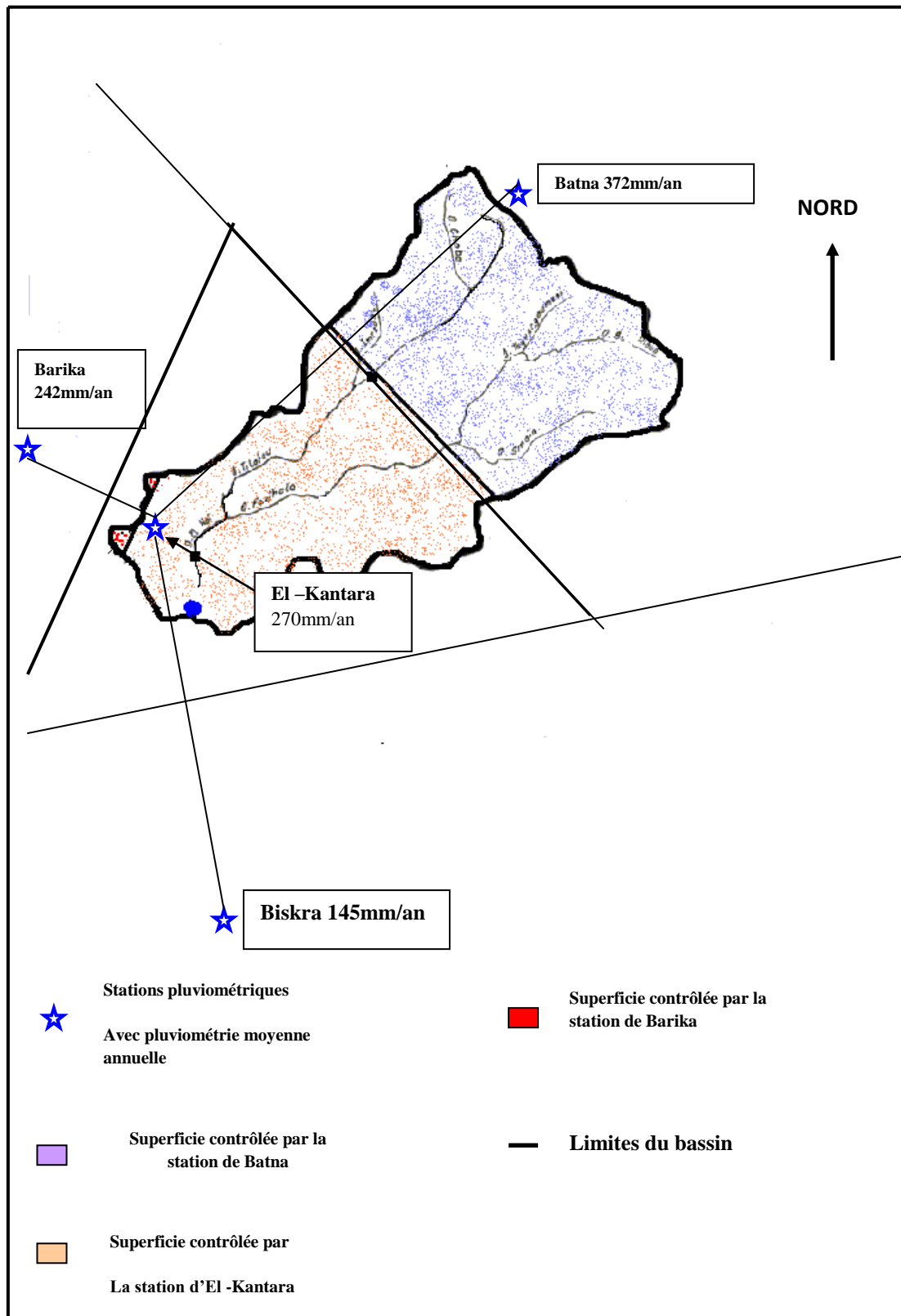


Fig.III.01 : Carte de la situation des stations de mesure par rapport le bassin versant d'Oued El-Hai (In Mekaouci, 2014)

A l'extérieur du bassin versant d'Oued El-Hai on note la présence de 4 stations. Par contre à l'intérieure, il n'existe qu'une seule station pluviométrique celle d'El-Kantara qui est hors service.

Vue le manque et les difficultés pour avoir des données climatiques, on a utilisé les données de la station d'El-Kantara, les données de la station H2 (chargés des sites appropriés et avec l'utilisation des SIG et la télédétection entre 19976 / 2017; elle est proche de la station d'El-Kantara) et celles de la station de Biskra (**Fig.III.02**).

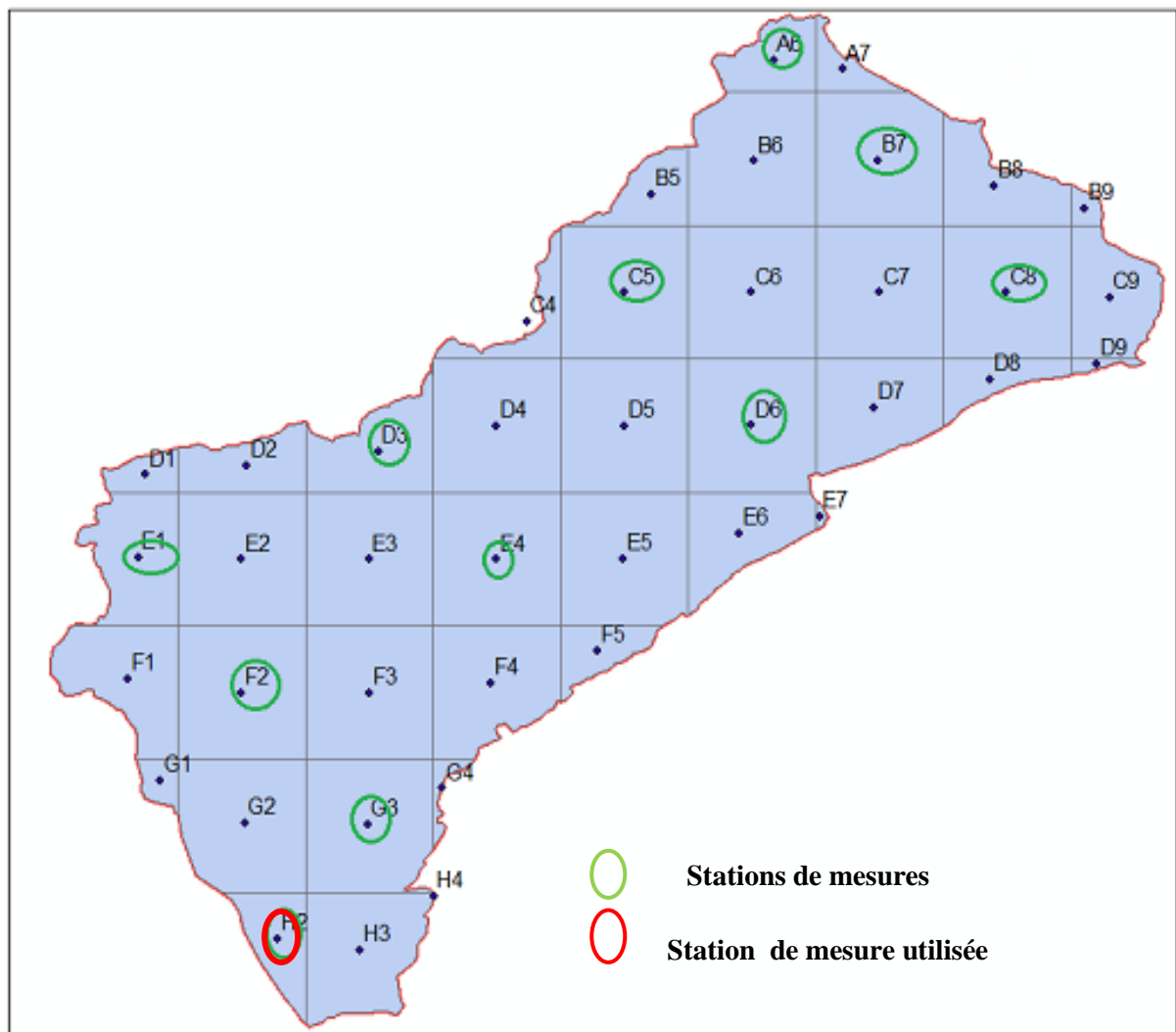


Fig.III.02 : Carte de la situation de la station de mesure H2 par rapport les autres stations de mesures à l'intérieure du bassin versant d'Oued El-Hai (Reghais et Maachi ,2018).

1.1-Estimation de la lame d'eau tombée dans le bassin d'Oued El-Hai

Pour estimer la lame d'eau moyenne, on a utilisé la méthode des isohyètes.

- Méthode des isohyètes :

L'étude partielle qui a permis le calcul de la lame d'eau moyenne a été consignée dans le (Tab. III.02) et (Fig.III.03).

On mesure les surfaces comprises entre deux courbes isohyètes (Fig.III.03) successives, on suppose que la hauteur de pluie tombée sur cette surface est égale à la moyenne des valeurs des deux Isohyètes qui la délimitent .La lame d'eau tombée sur le bassin versant d'Oued El-Hai est calculée par la formule suivante :

$$Pan = \frac{\sum_{i=1}^9 Pi . Si}{St} \quad \text{où}$$

Pi : précipitation moyenne entre deux isohyètes

Si : surface partielle entre deux isohyètes

St : surface totale du bassin versant

$$\text{Soit : } Pan = \frac{599600}{1660} = 361.20 \text{ mm/an} \approx 362 \text{ mm/an}$$

Tab. III.02 : Résultats des données de la méthode des isohyètes

| N° | Pluviosité (mm) | Pi (mm) | Si (Km ²) | Pi.Si |
|--------------|-----------------|---------|-----------------------|---------------|
| 01 | <250 | 225 | 75 | 16875 |
| 02 | 250 – 275 | 262 | 300 | 78600 |
| 03 | 275 – 300 | 287 | 490 | 140630 |
| 04 | 300 – 350 | 325 | 390 | 126750 |
| 05 | <350 | 375 | 631 | 236625 |
| TOTAL | | | | 599600 |

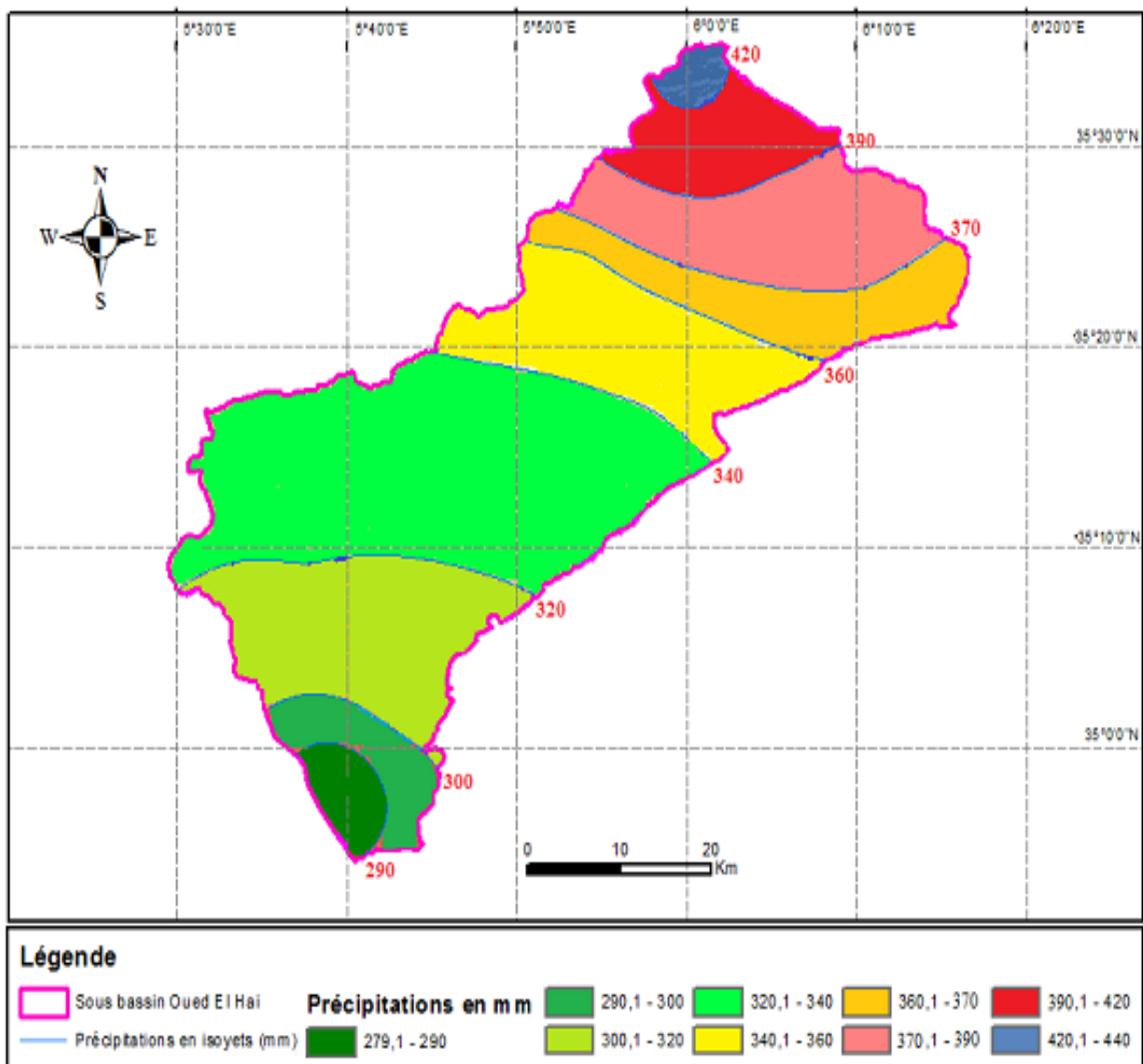


Fig.III.03 : Carte pluviométrique (Isohyète) du bassin versant d’Oued El-Haï (Reghais et Maachi ,2018).

2. Les précipitations :

On entend par précipitations la hauteur de la lame d’eau recueillie par le pluviomètre, quelque soit l’origine de cette eau, pluie, neige, grêle, ou autres formes de condensation. Nous intéresserons dans cette étude uniquement aux précipitations liquides (pluies), qui constituent le facteur majeur dans le comportement hydrologique et hydrogéochimique de la région.

2.1. Cartes des précipitations annuelles moyennes : D’après la carte des précipitations de l’Algérie du Nord (**Fig.III.04**), établi par l’Agence Nationale des Ressources Hydriques (ANRH) pour la période 1965-95, on peut constater que la région étudiée est caractérisée par une pluviométrie comprise entre 100 et 300mm.

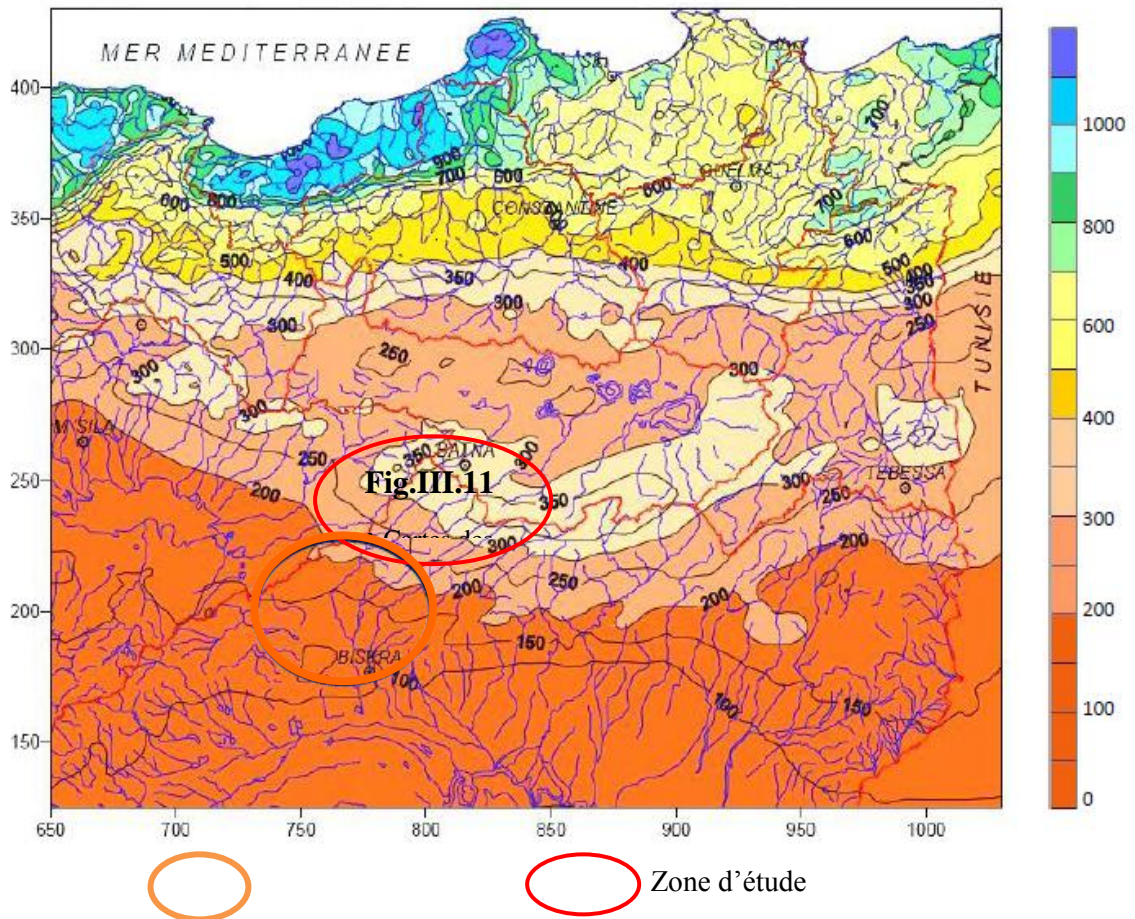


Fig.III.04: Cartes des précipitations annuelles moyennes période 1965-95. (ANRH; 2003).

2.2. La pluviométrie moyenne annuelle : On dispose de données se ramenant à des épisodes différentes de trois stations (**Tab.III.03**). La station d'El-Kantara et la station H2 qui se trouvent à l'intérieur du sous bassin versant d'Oued El-Hai, dont les données s'étalent respectivement sur la période allant de 1913 à 1938 et de 1997 à 2017, et la station de Biskra qui se situe à l'extérieur dont les données s'étalent de 1991 à 2015.

Tab.III.03 : Précipitations moyennes annuelles.

| Station | période | Source des données | Moyenne annuelle (mm) |
|------------|------------|---|-----------------------|
| El-Kantara | 1913/1938 | P.Seltzer (climat de l'Algérie) | 261 |
| H2 | 1997 /2017 | Reghais Azzedine et Maachi Faris (2018) | 220 |
| Biskra | 1991/2015 | ANRH Biskra | 134 |

Le tableau (Tab.III.03) récapitule les précipitations moyennes interannuelles pour les périodes citées auparavant, enregistrées aux postes de Biskra, H2 et d'El-Kantara et qui sont représentées graphiquement par la figure (Fig.III.05.). On remarque que la précipitation est irrégulière. Elle varie respectivement entre un minimum de 37,7 mm pour l'année 2014 et 113,51 mm en 2017, et un maximum de 294.1 mm en 2004 et 393,17mm se rapportant à l'année 2004 au niveau des stations de Biskra et H2.

En gros. Le régime pluviométrique dans le bassin versant d'Oued El-Hai est caractérisé par l'irrégularité interannuelle.

Cette irrégularité interannuelle exprimée par le rapport : P/P_{moy}

Où P : précipitation moyenne annuelle en mm ;

P_{moy} : précipitation moyenne interannuelle en mm.

Si : $P/P_{moy} < 1$ _____ année sèche;

$P/P_{moy} > 1$ _____ année humide.

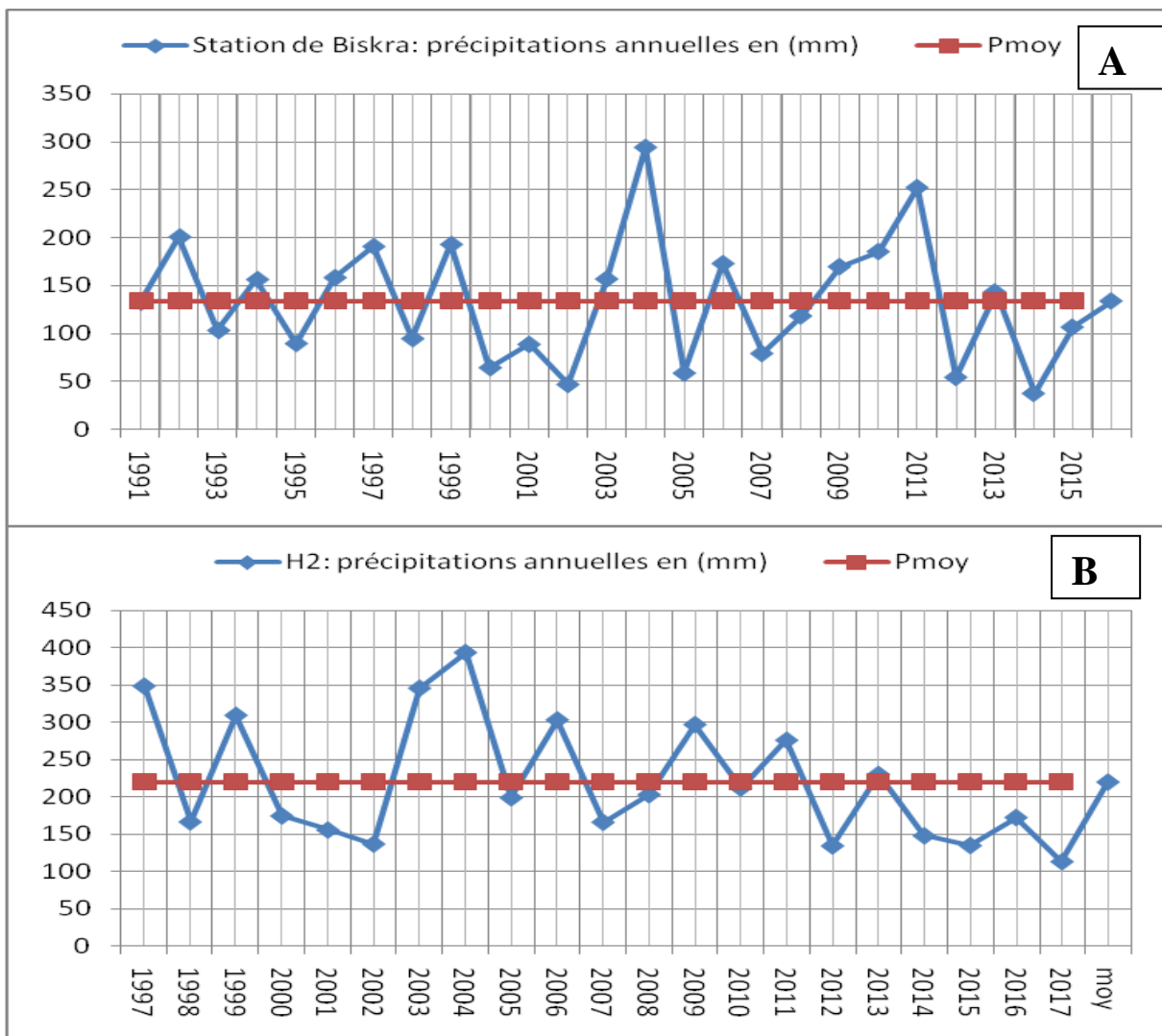


Fig.III.05 : Variation des précipitations interannuelles

Le classement des années humides et sèches et leurs caractéristiques pour la période 1991/2015 de la station de Biskra et pour la période 1997/2017 de la station H2 est consigné dans le tableau (**Tab.III. 04**).

Tab. III.04: Années sèches et années humides des stations de Biskra et H2

| Stations | Pmoy annuelle mm | Année sèche | | | Année humide | | | Intervalle de variance |
|---------------|------------------------|-------------|--------|-------|--------------|--------|-------|---------------------------|
| | | nbre | Pmin | Année | nbre | pmax | Année | Pmax- Pmin |
| Biskra | 134 | 13 | 37,7 | 2014 | 12 | 294.1 | 2004 | 256,4 |
| H2 | 220 | 13 | 113,51 | 2017 | 08 | 393,17 | 2004 | 279,66 |

2.3. La pluviométrie moyenne mensuelle interannuelle et saisonnière :

A-Station de Biskra :

L'analyse du tableau (**Tab.III.05**), montre que pendant l'été, on ne reçoit que 7,51mm soit 5.6% (la saison sèche) tan disque l'automne avec 48,27mm soit 36,01% (la saison la plus pluvieuse) , alors que le reste des saisons, la région reçoit des quantités très proche de 38,73mm à 39,52 soit 28,90% à 29,49% de la précipitation totale.

Tab.III.05 : Précipitations moyennes mensuelles et saisonnières de la station de Biskra (1991-2015).

| Saisons | Automne | | | Hiver | | | Printemps | | | Eté | | | Total |
|---|--------------|--------------|--------------|--------------|-------|------|-----------|-------|------|------|-------|------|--------|
| Mois | Sep. | Oct. | Nov. | Déc. | Jan. | Fév. | Mars | Avril | Mai. | Juin | Juil. | Août | / |
| Moyenne Mensuelle Interannuelle mm | 15,44 | 16,29 | 16,54 | 10,24 | 18,86 | 9,63 | 15,95 | 14,47 | 9,10 | 3,85 | 0,72 | 2,94 | / |
| PS (mm) | 48,27 | | | 38,73 | | | 39,52 | | | 7,51 | | | 134,03 |
| % | 36,01 | | | 28,90 | | | 29,49 | | | 5,60 | | | 100% |

Le graphe de la figure (**Fig.III.06**) montre que la station de Biskra reçoit un minimum de 0,72 mm en Juillet et un maximum de 18,86 mm en Janvier durant la période 1991-2015.La moyenne mensuelle est égale à 11.17mm .

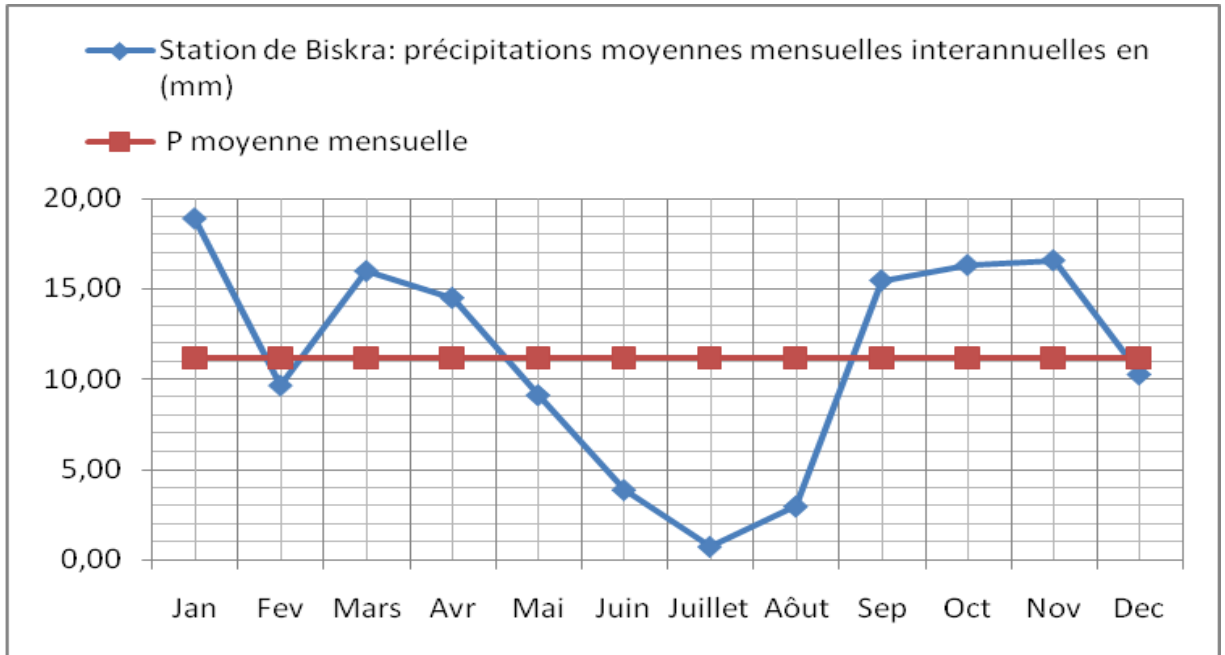


Fig.III.06 : Variation des précipitations moyennes mensuelles interannuelles de Biskra (1991-2015)

B-Station d’El-Kantara :

La variation des précipitations mensuelles a été représentée dans le tableau (**Tab.III.06**)

Le graphe de la figure (**Fig.III.07**) montre que la station d’El-Kantara présente un minimum de 10 mm en Août et un maximum de 32 mm en Octobre durant la période 1913-1938. La moyenne mensuelle est égale à 21. 75mm .

Pour le régime saisonnier :

La saison pluvieuse est l’Hiver avec 82 mm soit 31,42% de la précipitation totale.

La saison sèche est l’été 45mm soit 17,24% de la précipitation totale

Tab.III.06 : Précipitations moyennes mensuelles et saisonnières de la station d’El-Kantara (1913-1938).

| Saisons | Automne | | | Hiver | | | Printemps | | | Eté | | | Total |
|------------------------------------|---------|------|------|-------|------|------|-----------|-------|------|-------|-------|------|-------|
| Mois | Sep. | Oct. | Nov. | Déc. | Jan. | Fév. | Mars | Avril | Mai. | Juin | Juil. | Août | / |
| Moyenne Mensuelle Interannuelle mm | 17 | 32 | 27 | 31 | 28 | 23 | 28 | 11 | 19 | 13 | 22 | 10 | / |
| PS (mm) | 76 | | | 82 | | | 58 | | | 45 | | | 261 |
| % | 29.12 | | | 31.42 | | | 22.22 | | | 17.24 | | | 100% |

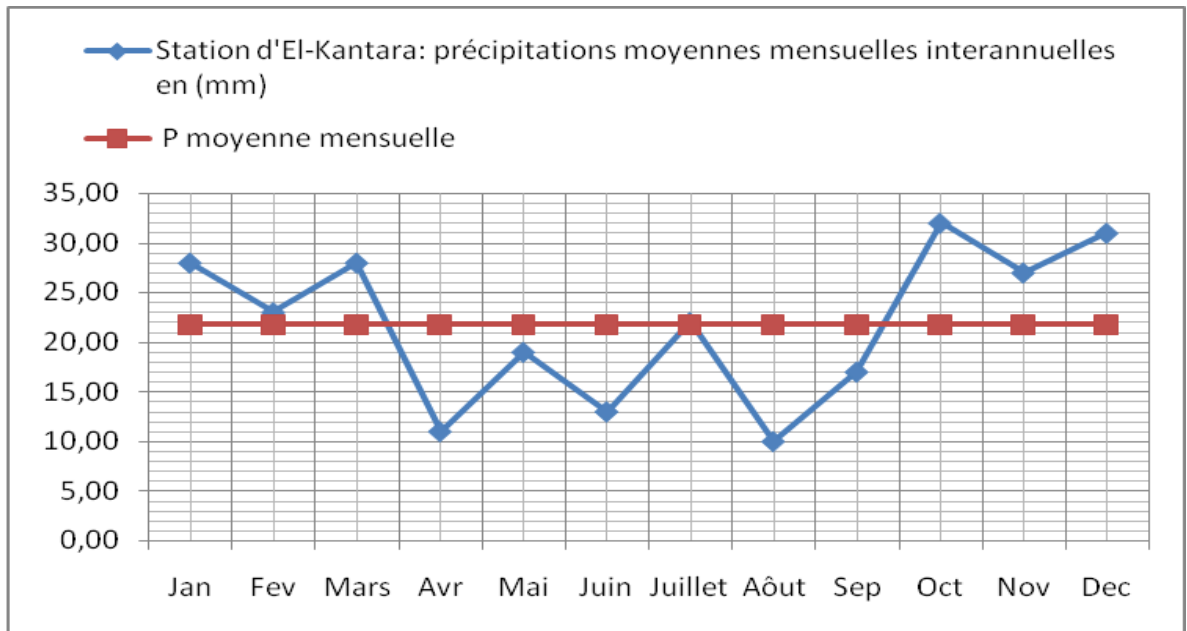


Fig.III.07: Variation des précipitations mensuelles de la station d’El-Kantara (1913-1938)

C-Station H2 :

La variation des précipitations mensuelles a été représentée dans le tableau (**Tab.III.07**)
 Le graphe de la figure (**Fig.III.08**) montre que la station H2 présente un minimum de 2,69 mm en Juillet et un maximum de 28,74 mm en Septembre durant la période 1997-2017. La moyenne mensuelle est égale à 21.14mm

Pour le régime saisonnier :

La saison pluvieuse est l’Hiver avec 93.32mm soit 36,79% de la précipitation totale.

La saison sèche est l’été avec 23.99mm soit 9,46% de la précipitation totale.

Tab.III.07 : Précipitations moyennes mensuelles et saisonnières de la H2 (1997-2017).

| Saisons | Automne | | | Hiver | | | Printemps | | | Eté | | | Total |
|------------------------------------|---------|------|-------|-------|-------|------|-----------|-------|------|-------|-------|-------|--------|
| Mois | Sep. | Oct. | Nov. | Déc. | Jan. | Fév. | Mars | Avril | Mai. | Juin | Juil. | Août | / |
| Moyenne Mensuelle Interannuelle mm | 28,74 | 21,9 | 20,84 | 19,3 | 26,02 | 48 | 16,9 | 26,74 | 21,2 | 9,79 | 2,69 | 11,51 | / |
| PS (mm) | 71,48 | | | 93,32 | | | 64,84 | | | 23,99 | | | 253,63 |
| % | 28,18 | | | 36,79 | | | 25,56 | | | 9,46 | | | 100% |

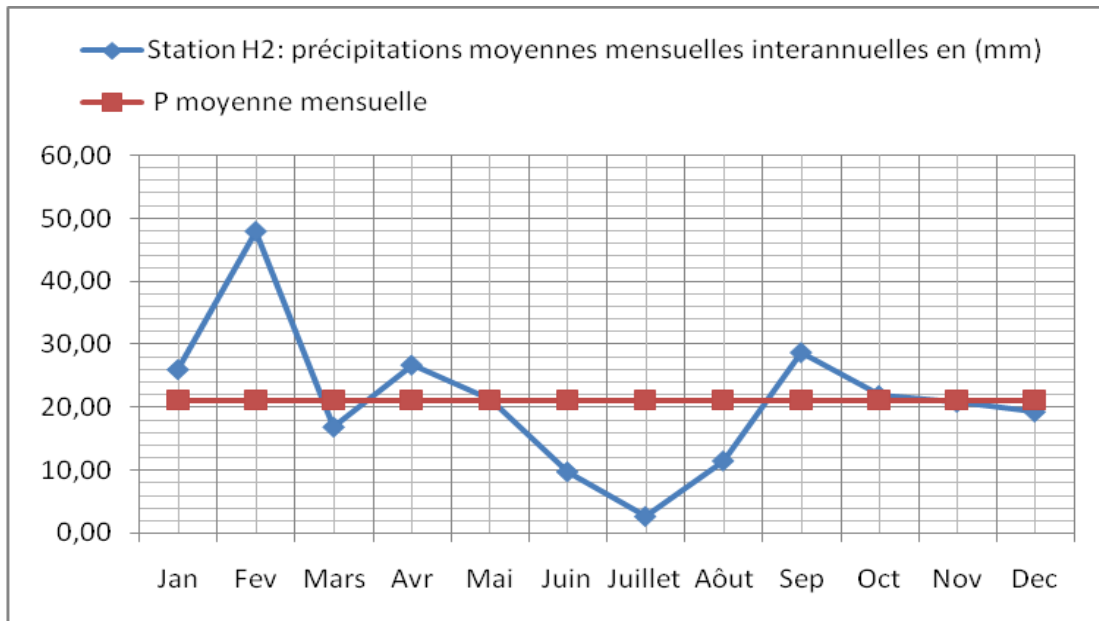


Fig.III.08 : Variation des précipitations mensuelles de la station H2 (1997-2017)

Les précipitations moyennes mensuelles interannuelles pour les périodes cités auparavant, enregistrées aux postes de Biskra, H2 et d'El-Kantara sont représentées graphiquement par la figure (**Fig.III.09**). On remarque que la précipitation est irrégulière. Elle varie entre un minimum de 0,72 mm en Juillet au niveau du poste de Biskra, et un maximum de 48 mm en Février se rapportant à la station H2.

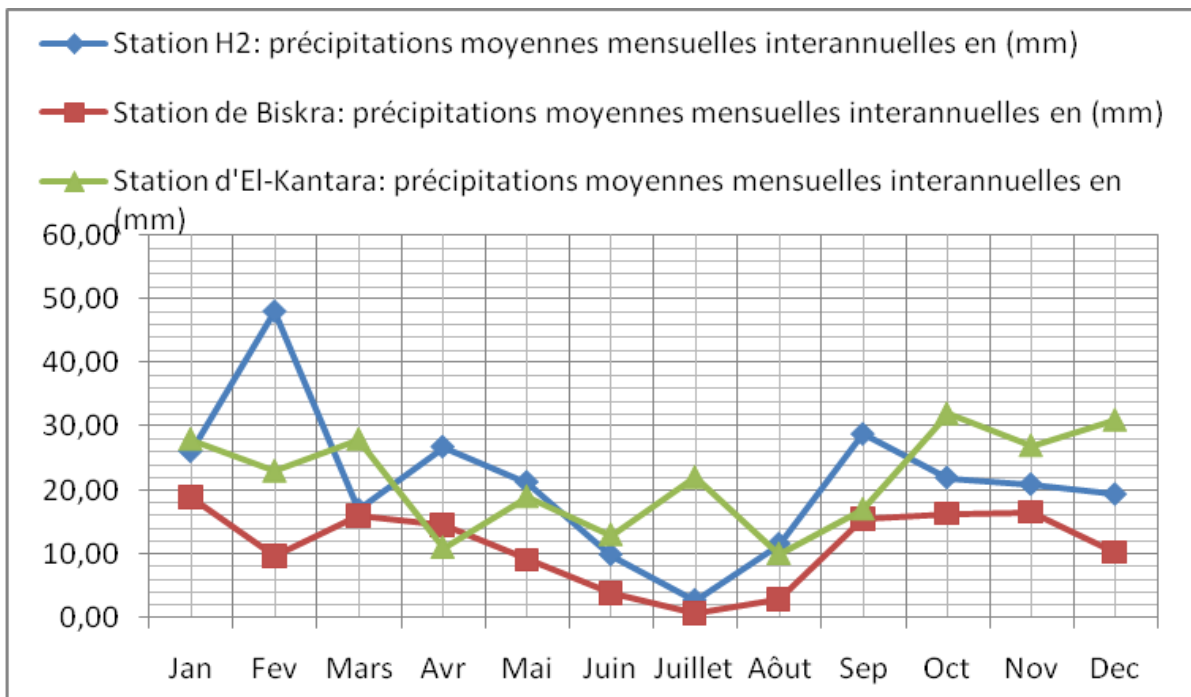


Fig.III.09 : Variation des précipitations mensuelles des trois stations

Malgré la grande variabilité des précipitations au niveau du bassin versant. En revanche, cette variabilité tend à être faible surtout entre la station H2 et la station d'El-Kantara.

A partir de l'analyse du graphe de la figure (Fig.III.10), on peut constater que les pluies sont toujours les plus importantes en Automne avec 93,32 mm à la station de H2 et 82mm à la station d'El-Kantara. En revanche, l'Eté reste la saison la moins pluvieuse dans les trois stations.

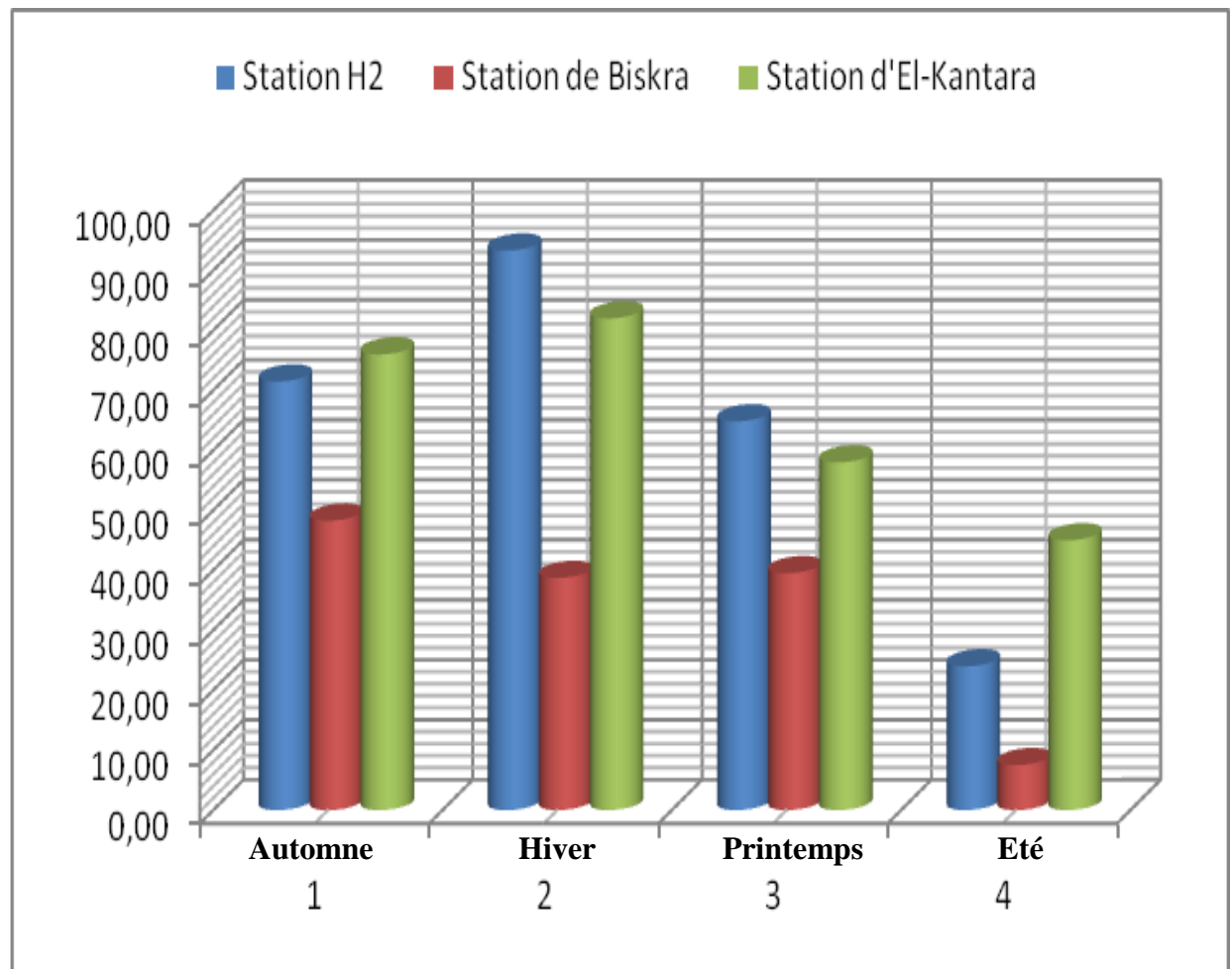


Fig. III.10 : Variation des précipitations saisonnières des trois stations

2.4. Etude des précipitations Journalières :

On utilise les données relatives à la période 1913-1938 pour les deux stations de Biskra et d'El-Kantara et de 1991-2010 pour la station de Biskra. Le Tableau (Tab.III.08) représente le nombre moyen de jours de pluies par mois.

Tab.III.08: Nombre de Jours de pluies par Mois.

| Stations | Jan | Fév | Mar | Avr | Mai | Jui | Juil | Août | Sep | Oct | Nov | Déc | Année |
|---------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|-----|-----|-----|-----|-------|
| El-Kantara 1913/1938 | 5 | 5 | 6 | 4 | 4 | 3 | 2 | 10 | 4 | 5 | 6 | 5 | 59 |
| Biskra 1913/1938 | 4 | 3 | 5 | 2 | 3 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | 4 | 3 | 37 |
| Biskra 1991/2010 | 16 | 19 | 19 | 16 | 15 | 16 | 9 | 17 | 20 | 18 | 18 | 19 | 202 |

On définit :

- Coef de fréquence =
$$\frac{\text{Jours de pluies du Mois}}{\text{Jours du mois}}$$

-Coef d'intensité =
$$\frac{\text{Précipitation Mensuelle}}{\text{Nbre Jours de pluie}}$$

Les résultats sont reportés aux tableaux (**Tab.III.09**, **Tab.III.10** et **Tab.III.11**).

Tab.III.09: Coefficient de fréquence et intensité des précipitations à El-Kantara ;(1913-1938)

| El-Kantara 1913-1938 | Jan | Fév | Mar | Avr | Mai | Jui | Juil | Août | Sep | Oct | Nov | Déc |
|-------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-----|-------|
| Coef de fréquence | 0.16 | 0.16 | 0.19 | 0.13 | 0.13 | 0.1 | 0.06 | 0.32 | 0.13 | 0.161 | 0.2 | 0.161 |
| Coef d'intensité | 5.6 | 4.6 | 4.67 | 2.75 | 4.75 | 4.33 | 11 | 1 | 4.25 | 6.4 | 4.5 | 6.2 |

Tab.III.10: Coefficient de fréquence et intensité des précipitations de Biskra ;(1913-1938)

| Biskra 1913-1938 | Jan | Fév | Mar | Avr | Mai | Jui | Juil | Août | Sep | Oct | Nov | Déc |
|---------------------|------|------|------|------|-----|------|------|------|------|-------|------|-------|
| Coef de fréquence | 0.13 | 0.11 | 0.16 | 0.07 | 0.1 | 0.07 | 0.06 | 0.1 | 0.1 | 0.097 | 0.13 | 0.097 |
| Coef d'intensité | 4.25 | 3.33 | 3.8 | 5 | 5 | 4 | 1 | 1 | 5.67 | 5 | 5.5 | 6 |

Tab.III.11: Coefficient de fréquence et intensité des précipitations de Biskra; (1991-2010)

| Biskra 1991-2010 | Jan | Fév | Mar | Avr | Mai | Jui | Juil | Août | Sep | Oct | Nov | Déc |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Coef de fréquence | 0.516 | 0.655 | 0.612 | 0.533 | 0.483 | 0.533 | 0.29 | 0.548 | 0.666 | 0.58 | 0.6 | 0.612 |
| Coef d'intensité | 1.626 | 0.598 | 0.832 | 1.141 | 0.743 | 0.28 | 0.198 | 0.201 | 0.821 | 0.756 | 1.177 | 0.661 |

A la station d'El-Kantara les pluies sont plus fréquentes en mois d'août et plus intense en mois d'octobre et décembre.

A la station de Biskra pour la période (1913/1938) les pluies sont plus fréquentes en mois de Mars et plus intenses en mois de décembre et pour la période (1991/2010) les pluies sont plus fréquentes en mois de septembre et février plus intenses en mois de Janvier.

3. Les températures :

La température est le second facteur après la précipitation qui influence le climat d'une région. Ce paramètre joue un rôle essentiel dans l'évaluation de l'évaporation, l'évapotranspiration et le déficit d'écoulement qui intervient dans l'estimation du bilan hydrologique. D'après la carte des températures moyennes annuelles de l'Est Algérien réalisée par l'A.N.R.H, (**Fig.III.11**) on constate que la température moyenne annuelle de la station d'El-Kantara et de Biskra varie respectivement entre 17.72 et 22.95°C°.

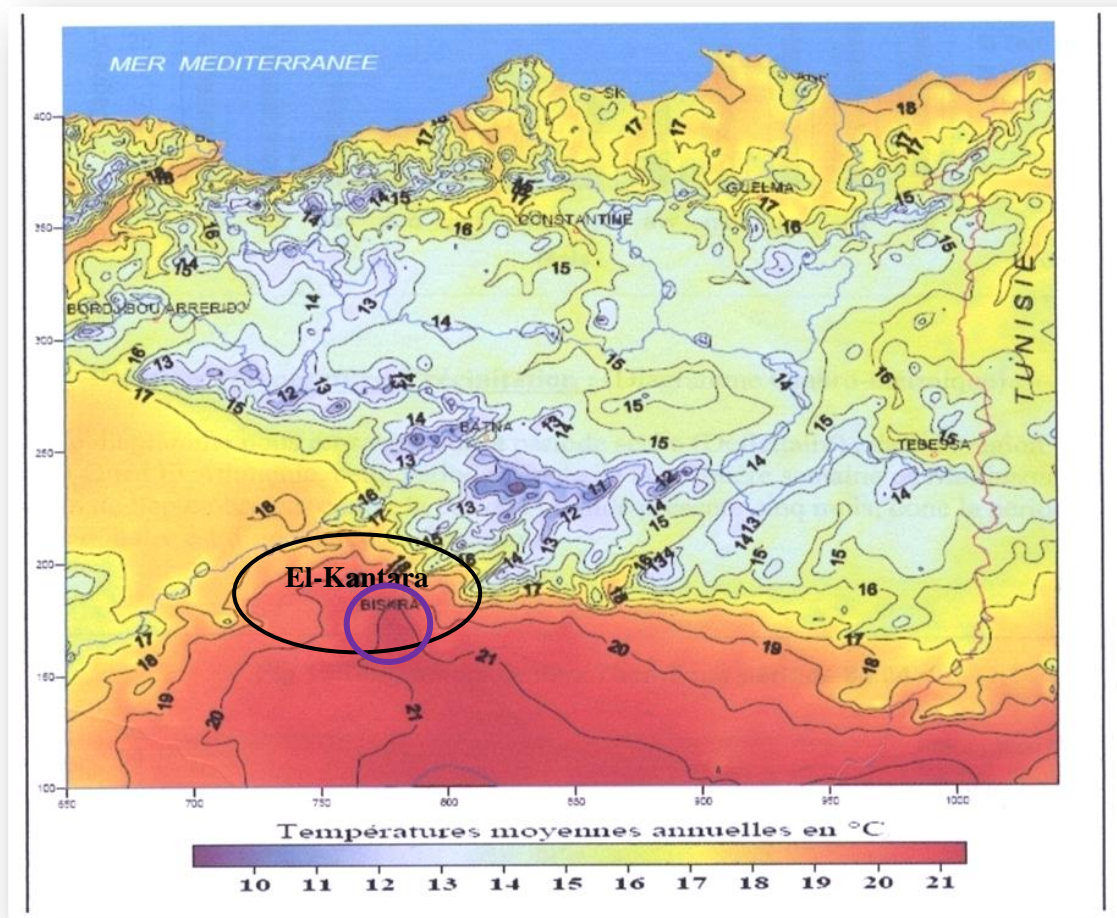


Fig.III.11 : Carte des températures moyennes annuelles de l'Est Algérien (ANRH, 2003).

On dispose des données des trois stations :

- El-Kantara sur une période de 35 ans (1913/1938) ;
- La station H2 sur une période de 21ans (1997/2017) ;
- Biskra sur une période de 25 ans (1991/2015).

3.1- Les températures moyennes annuelles :

Le tableau (**Tab.III.12**) présente la moyenne interannuelle des températures pour les trois stations. L'analyse de la figure (**Fig.III.12**), montre une légère variation de la Températures annuelle .Elle présente une moyenne interannuelle respectivement de l'ordre de 22.95°C et 27.26°C au niveau de la station de Biskra et la station H2 .

A-Station de Biskra :

Le graphe de la figure (**Fig.III.12.A**) montre que la station de Biskra présente un minimum égal à 21.59 °C pour l'année 1996, et un maximum de 32.06 °C se rapportant à l'année 2009.

B-Station H2 :

Le graphe de la figure (**Fig.III.12.B**)montre que la station H2 présente un minimum égal à 26.28 °C pour l'année 2004, et un maximum de 28.21 °C se rapportant à l'année 2001.

Tab.III.12: La moyenne des températures interannuelles des trois stations Biskra, El-Kantara et H2

| Station | période | Source des données | Moyenne annuelle (C°) |
|------------|-----------|---|-----------------------|
| El-Kantara | 1913-1938 | P.Seltzer (climat de l'Algérie) | 17.72 |
| Biskra | 1991-2010 | ANRH Biskra | 22.95 |
| H2 | 1997-2017 | Reghais Azzedine et Maachi Faris (2018) | 27,26 |

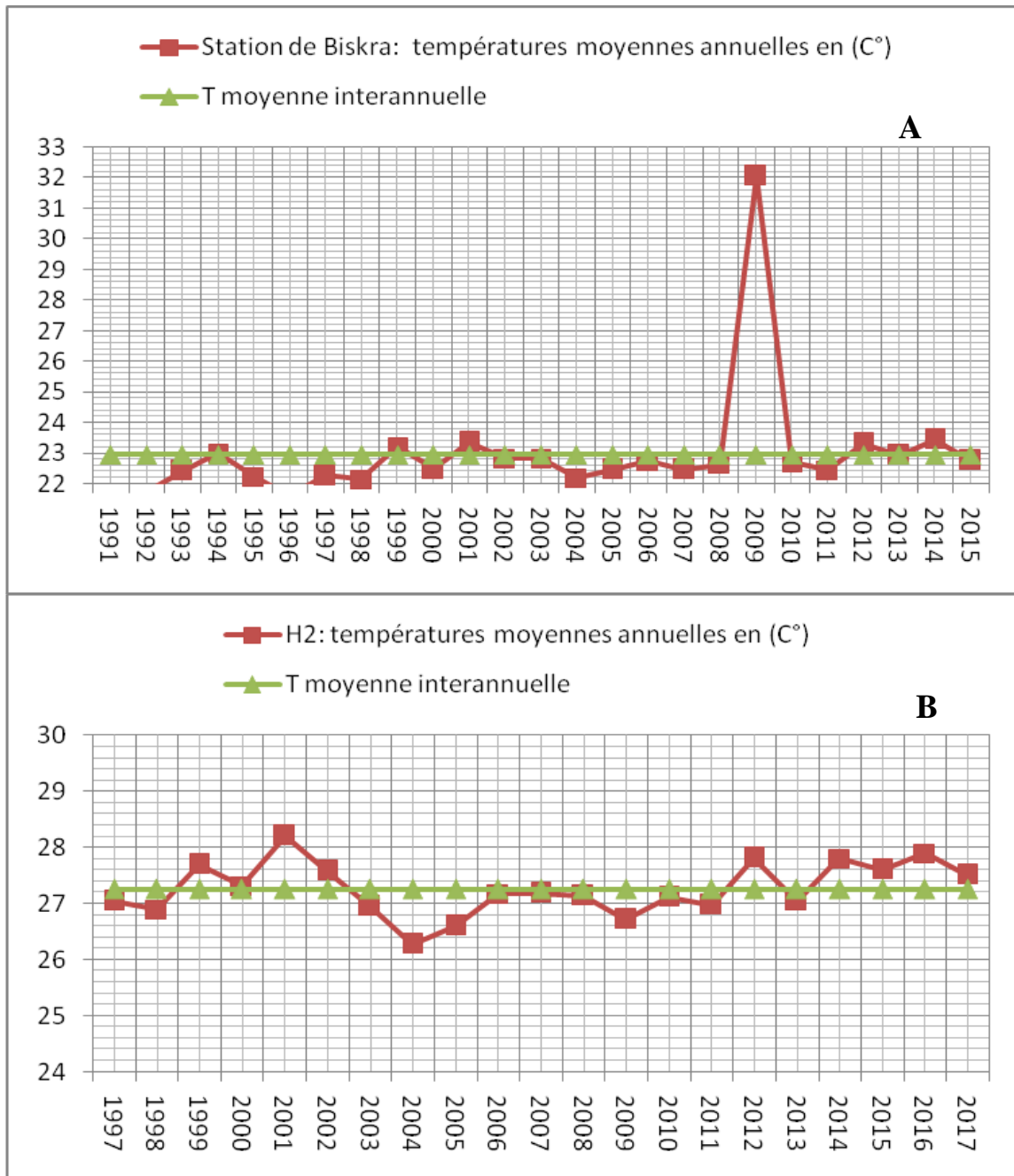


Fig.III.12 : Variation des températures annuelles de Biskra (1991-2015) et H2 (1997-2017)

3.2- Les températures moyennes mensuelles :

La figure (**Fig.III.13**) présente la variation des températures moyennes mensuelles interannuelles. Pour les stations El-Kantara et H2 le mois le plus chaud est le mois de Juillet avec (40,15°C) pour H2 et (28°C) pour El-Kantara. En revanche, pour la station de Biskra le mois le plus chaud est le mois d’Août avec (34,09°C) . Tandis que le mois le plus froid est le mois de Janvier avec (11,78°C) pour Biskra, pour H2 (15,66°C) et (7 °C) pour El-Kantara.

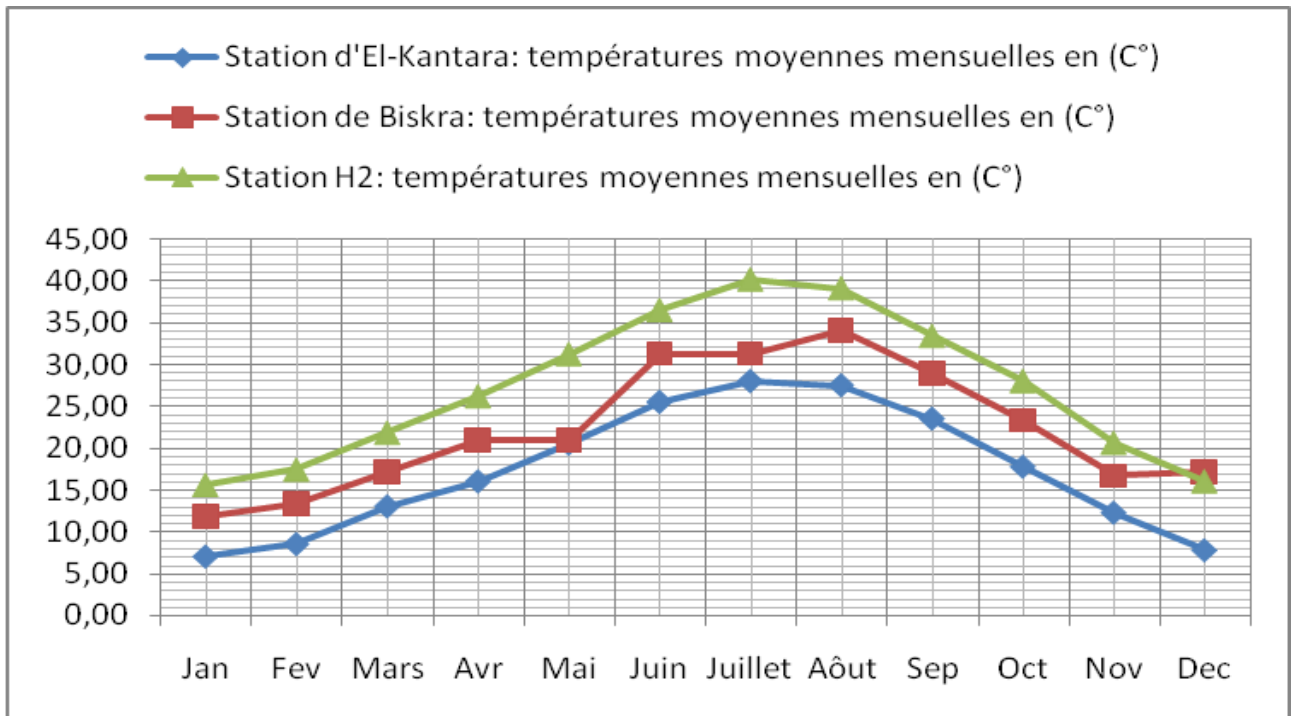


Fig.III.13: Variation des températures moyennes mensuelles interannuelles des trois stations.

4. Le Vent :

Les vents sont fréquents et répartis sur toute l'année avec des vitesses moyennes mensuelles de 4.5 m/s .Les vitesses maximales sont enregistrées aux mois d'avril et mai avec respectivement 5.7 et 5.5m/s (**Tab.III.13**).

Durant la saison sèche (juin, juillet, août et septembre), les vents dominants sont de direction sud-est. Durant cette période, souffle le sirocco pendant 58 jours/an en moyenne.

Pendant la saison hivernale, les vents de direction nord-est sont dominants, amenant de l'humidité du Nord.

Tab.III.13 : Vitesses moyennes des vents enregistrées à la station de Biskra Période (1980-2001).

| Mois | Jan | Fev | Mar | Avr | Mai | Juin | Juil | Août | Sep | Oct | Nov | Déc | Moy annuelle |
|---------------------|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|-----|-----|-----|-----|--------------|
| Vitesse moyenne m/s | 4.2 | 4.5 | 4.7 | 5.7 | 5.5 | 4.6 | 4.2 | 4 | 4 | 4 | 4.1 | 4 | 4.5 |

5. L'Humidité relative :

Ce paramètre est relativement faible dans la région de Biskra, la moyenne est de 42.9%. Cette faiblesse s'explique par l'aridité du climat et la dominance des masses d'air chaud du Sahara. Les valeurs moyennes mensuelles sont insérées dans le (Tab.III.14).

Tab.III.14: Humidités relatives moyennes enregistrées à la station de Biskra Période (1980-2001).

| Mois | Jan | Fev | Mar | Avr | Mai | Juin | Juil | Août | Sep | Oct | Nov | Déc | Moy annuelle |
|------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|--------------|
| Humidité relative en % | 53.9 | 50.3 | 44.7 | 38.8 | 34.4 | 31.9 | 27.7 | 30.6 | 39.7 | 48.2 | 53.5 | 58.5 | 42.9 |

6. Types de climat :

Les valeurs des précipitations et des températures enregistrées au niveau de la station de Biskra sur une période de 25 ans , de la station H2 pendant 21 ans et la station d'El-Kantara durant 35 ans, permettent l'établissement des diagrammes Pluiothermiques (ombrothermiques) .

Ce sont des digrammes qui permettent d'avoir une idée sur les périodes sèches et humides d'une région donnée. Pour Gausse et Bagnouls un mois est sec, lorsque sa pluviométrie totale en (mm) est égale ou inférieure au double de la température moyenne en (°C) correspondante ($P \text{ (mm)} \leq 2 T \text{ (°C)}$).

A partir de l'analyse des diagrammes ombrothermiques de Gausse et Bagnouls de la figure (Fig.III.14), nous pouvons constater :

- Qu'au cours de la période de 25 ans, la région de Biskra est soumise à une période Sèche durant toute l'année (Fig.III.14.A);
- Durant la période de 21ans, la station H2 est aussi soumise à une période Sèche durant toute l'année (Fig.III.14.C) ;
- Pendant la période de 35 ans, la région d'El-Kantara est soumise à une période Sèche de 7 à 8 mois, qui va du mois de Mars jusqu'au mois de Novembre (Fig.III.14.B).

Donc la région d'El-Kantara a un climat moins aride que celui de la station H2 et celle de Biskra.

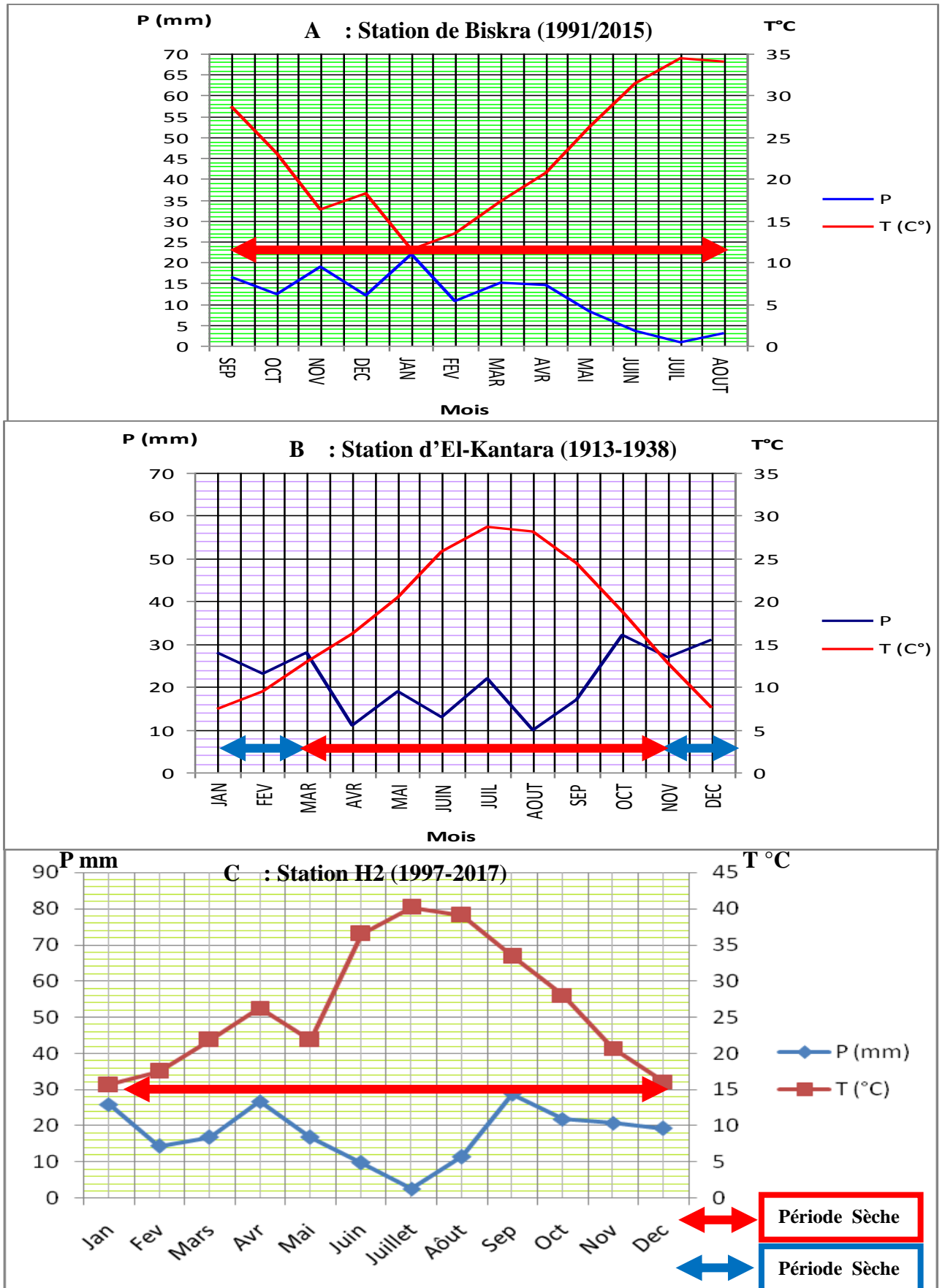


Fig.III.14: Diagrammes Pluviothermiques des trois stations

7- Le régime climatique :

A fin de préciser les conditions climatiques de la région de notre étude ; nous avons utilisé plusieurs méthodes proposés par des climatologues, des morphologues, des géographes et des botanistes. Les plus connus sont ceux d'E.de Martonne (1926), E. Emberger (1932), C.W. Thornthwaite (1948), J. Dubief (1950), R. Capot-Rey (1951), H. Gaussen, F. Bagnouls (1952) et P. Birot (1953).

7.1-L'humidité (méthode d'Euverte) :

L'humidité du sol est basée sur le rapport entre la précipitation moyenne mensuelle et la température mensuelle interannuelle. La méthode définit quatre types de régimes qui sont :

- Un régime très sec : $P/T < 1$;
- Un régime sec : $1 < P/T < 2$;
- Un régime subhumide : $2 < P/T < 3$;
- Un régime humide : $P/T > 3$.

L'application d'une telle méthode a permis de dresser les tableaux (**Tab.III.15**), (**Tab.III.16**) et (**Tab.III.17**).

* **Pour la station de Biskra**, le résultat du tableau (**Tab.III.15**) montre que tous les mois présentent les caractéristiques d'un régime très sec, sauf le mois de Janvier qui présente les caractéristiques d'un régime sec avec une valeur de (**1.60**). Ce qui est en concordance avec le résultat de la méthode pluviothermique.

Tab.III.15: Variation de l'humidité de station de Biskra. (1991-2015)

| Station | Mois | Sep | Oct | Nov | Déc | Jan | Fév | Mar | Avr | Mai | Juin | Juil | Août |
|---------------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|-------|
| Biskra 1991/2015 | P | 15,43 | 16,28 | 16,54 | 10,25 | 18,85 | 9,63 | 15,5 | 14,7 | 9,09 | 3,85 | 0,72 | 2,94 |
| | mm | | | | | | | | | | | | |
| | T°C | 28,96 | 23,31 | 16,66 | 17,16 | 11,78 | 13,33 | 17,16 | 20,98 | 26,26 | 31,3 | 34,5 | 34,09 |
| | P/T | 0.53 | 0.70 | 0.99 | 0.59 | 1.60 | 0.72 | 0.90 | 0.70 | 0.34 | 0.12 | 0.02 | 0.08 |

* **Pour la station d'El-Kantara**, L'analyse des données du tableau (**Tab.III.16**) relatives à la station d'El Kantara, montre que les mois de Septembre, Avril, Mai, Juin, Juillet et Août présentent les caractéristiques d'un régime très sec. Le mois d'Octobre présente les caractéristiques d'un régime sec.

Les mois de Novembre, Février et Mars présentent les caractéristiques d'un régime subhumide. Les deux mois restants Décembre et Janvier présentent les caractéristiques d'un régime humide. On confirme alors ce qui a été dit haut pour le type de climat qui règne dans la région d'El-Kantara.

Tab.III.16: Variation de l'humidité de station d'El-Kantara. (1913-1938)

| Station | Mois | Sep | Oct | Nov | Déc | Jan | Fév | Mar | Avr | Mai | Juin | Juil | Août |
|-------------------------|------|------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|------|
| El-Kantara 1913-1938 | P mm | 17 | 32 | 27 | 31 | 28 | 23 | 28 | 11 | 19 | 13 | 22 | 10 |
| | T°C | 24,5 | 18,75 | 12,75 | 7,5 | 7,45 | 9,45 | 12,9 | 16,2 | 20,5 | 25,75 | 28,75 | 28,1 |
| | P/T | 0.69 | 1.70 | 2.11 | 4.13 | 3.75 | 2.43 | 2.17 | 0.67 | 0.92 | 0.50 | 0.76 | 0.35 |

* **Pour la station H2** , L'analyse des données du tableau (**Tab.III.17**) montre que les mois de Septembre, Octobre, Mars, , Mai, Juin, Juillet et Août présentent les caractéristiques d'un régime très sec. Les mois de Novembre, Décembre, Janvier, et Avril présentent les caractéristiques d'un régime sec. Le mois de Février présente les caractéristiques d'un régime d'un régime subhumide. On confirme alors ce qui a été présenté en haut la méthode pluviométrique.

Tab.III.17: Variation de l'humidité de station H2. (1997-2017)

| Station | Mois | Sep | Oct | Nov | Déc | Jan | Fév | Mar | Avr | Mai | Juin | Juil | Août |
|-----------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| H2 1997-2017 | P mm | 28,74 | 21,90 | 20,84 | 19,30 | 26,02 | 48,00 | 16,90 | 26,74 | 21,20 | 9,79 | 2,69 | 11,51 |
| | T°C | 33,43 | 28,05 | 20,69 | 16,11 | 15,66 | 17,50 | 21,87 | 26,25 | 31,25 | 36,50 | 40,15 | 39,10 |
| | P/T | 0,86 | 0,78 | 1,01 | 1,20 | 1,66 | 2,74 | 0,77 | 1,02 | 0,68 | 0,27 | 0,07 | 0,29 |

7.2-Indice d'aridité :

L'aridité peut s'exprimer quantitativement par des différents indices d'aridité conventionnels et empiriques, la plu part des rapports hydro-thermiques sont fondés sur des grandeurs moyennes de précipitations et de températures, qui sont utilisés pour définir les degrés d'aridités et les conditions d'écoulement fluvial.

7.2.1- Indice d'aridité de De Martonne (1923) :

En 1926 Martonne avait établi un indice en fonction des températures et des précipitations.

Il est défini par la relation suivante : $I = P/T + 10$

Où:

P : précipitation moyenne interannuelle (mm)

T : température moyenne interannuelle (°C)

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

- $I < 5$: Climat hyper aride.
- $5 < I < 7.5$: Climat désertique.
- $7.5 < I < 10$: Climat steppique
- $10 < I < 20$: Climat semi-aride.
- $20 < I < 30$: Climat tempéré

L'application de cette méthode aux stations a permis d'obtenir les résultats qui sont

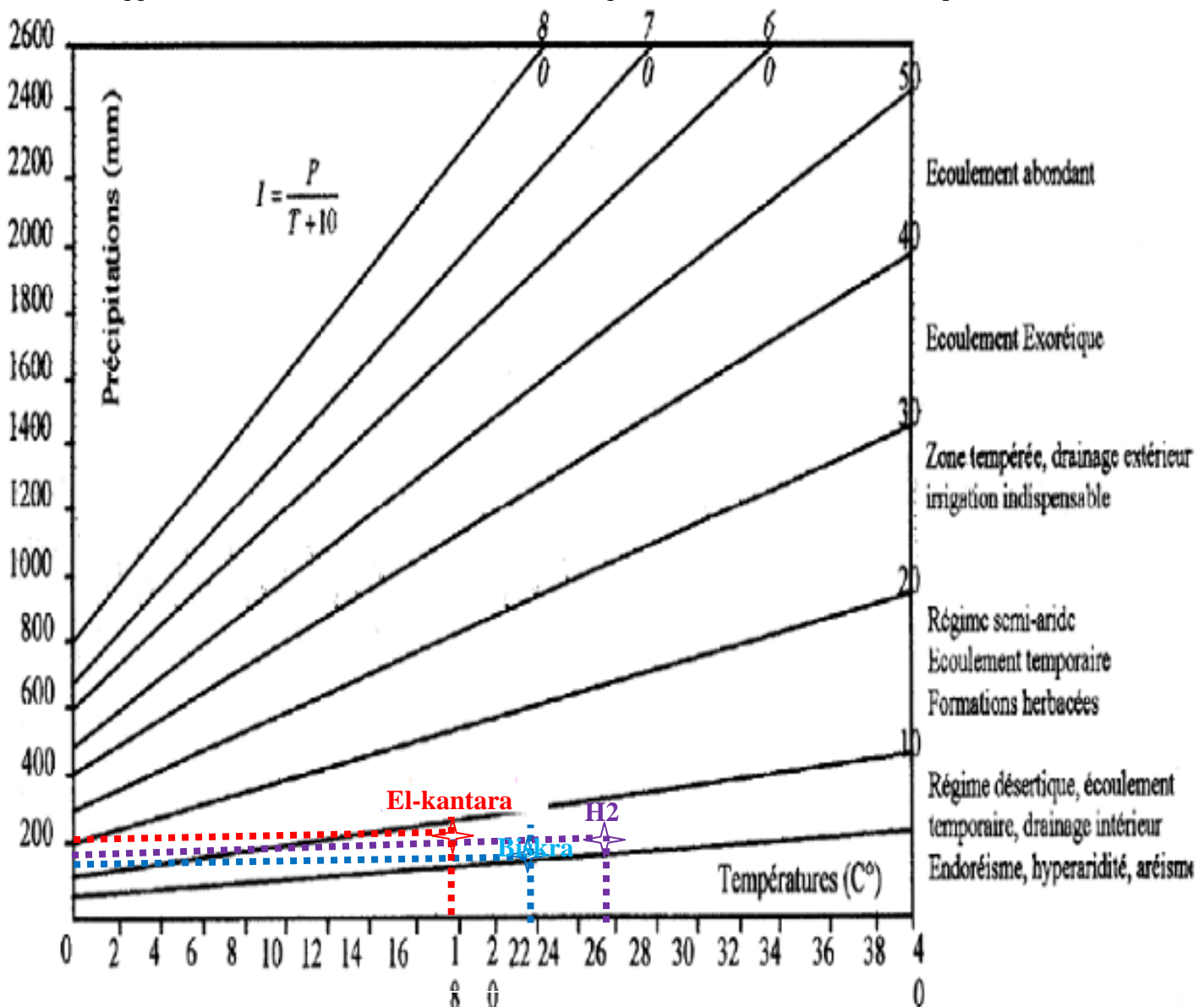


Fig.III.15: Abaque de l'Indice d'aridité Annuel de Demartonne (1923).

été consignés dans le tableau (Tab.III.18) et la figure (Fig.III.15). On constate que le régime climatique de Biskra est de type Hyperaride, celui de la station H2 est désertique alors qu'El-Kantara a un climat Steppique.

Tab.III.18: Indice D'Aridité de Demartonne (1923).

| Stations | P mm | T°C | I | Régime climatique |
|------------|--------|-------|------|-------------------|
| El-Kantara | 261 | 17.72 | 9.41 | Climat Steppique |
| Biskra | 134 | 22.95 | 4.07 | Climat Hyperaride |
| H2 | 220,05 | 27,26 | 5,90 | Climat désertique |

7.2.2-Indice d'aridité mensuelle:

L'indice d'aridité mensuel i est donné par la formule : $I = 12.P/T + 10$

Avec:

P : précipitation moyenne mensuelle interannuelle (mm)

T : température moyenne mensuelle interannuelle (°C)

Les valeurs de l'indice d'aridité mensuel sont reportées au tableau (**Tab.III.19**) .

-Pour la station de Biskra les mois de Février, Mai, Juin, juillet, Août, Septembre et Décembre présentent les caractéristiques d'un climat Hyperaride. Les mois de Mars, Avril, Octobre et Novembre jouissent d'un climat désertique. Le mois de Janvier présente d'un climat semi-aride.

-Pour la station d'El Kantara, les mois de Février, Mai, Juin, Juillet, Août, et Octobre présentent les caractéristiques d'un climat Hyperaride. Les mois de Mars, Avril et Septembre, un climat Désertique. Les mois de Novembre et Décembre jouissent d'un climat steppique alors que le mois de Janvier présente un climat Semi-aride.

Tab.III.19: Valeurs d'indice d'aridité mensuel.

| Stations | Mois | jan | Fév | Mar | Avr | Mai | Jui | juil | Août | Sep | Oct | Nov | Déc |
|------------|------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Biskra | I | 10,39 | 4,95 | 7,05 | 5,61 | 3,52 | 1,12 | 0,21 | 0,80 | 4,75 | 5,87 | 7,45 | 4,53 |
| El-Kantara | I | 19.3 | 14.2 | 14.7 | 5.04 | 7.48 | 4.36 | 6.81 | 3.15 | 5.91 | 13.4 | 14.2 | 21.3 |
| H2 | I | 12,17 | 20,95 | 6,36 | 8,85 | 6,17 | 2,53 | 0,64 | 2,81 | 7,94 | 6,91 | 8,15 | 8,87 |

-Pour la station de H2 les mois de Juin, juillet et Août présentent les caractéristiques d'un climat Hyperaride. Les mois de Mars, Mai et Octobre jouissent d'un climat désertique. Les mois d'Avril, Septembre, Novembre et Décembre se caractérisent par

un climat steppique. Les mois de Janvier et Février présentent d'un climat semi-aride.

7.3- Le Diagramme D'Emberger :

Pour situer le climat de la région, on peut également utiliser le diagramme d'Emberger qui est un abaque comportant, en ordonnées les valeurs de Q_2 donnés par la relation :

$$Q_2 = 200 P / (M^2 - m^2)$$

Avec : P : Précipitation moyenne annuelle en mm ;

M : Moyenne des températures maximales du mois le plus chaud exprimée en degré absolu ($^{\circ}\text{k}$) ;

m : Moyenne des températures minimales du mois le plus froid exprimée en degré absolu ($^{\circ}\text{k}$), ($T^{\circ}\text{k} = T^{\circ}\text{c} + 273,2$) ;

En abscisse la moyenne des minima de la saison froide (en $^{\circ}\text{C}$)

Après calcul nous obtenons les résultats reportés dans le tableau (Tab.III.20) et

Figure (Fig.III.16).

Tab.III.20: Paramètres de la méthode d'Emberger et les valeurs de Q_2 .

| Stations | P mm | M | | m | | Q ₂ |
|-------------------|------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|----------------|
| | | $^{\circ}\text{C}$ | $^{\circ}\text{K}$ | $^{\circ}\text{C}$ | $^{\circ}\text{K}$ | |
| Biskra | 134 | 34.49 | 307.69 | 11.78 | 284.98 | 1,99 |
| El-Kantara | 261 | 28.75 | 301.95 | 7.45 | 280.65 | 4.206 |
| H2 | 220 | 40,15 | 313,35 | 15,66 | 288,86 | 2,98 |

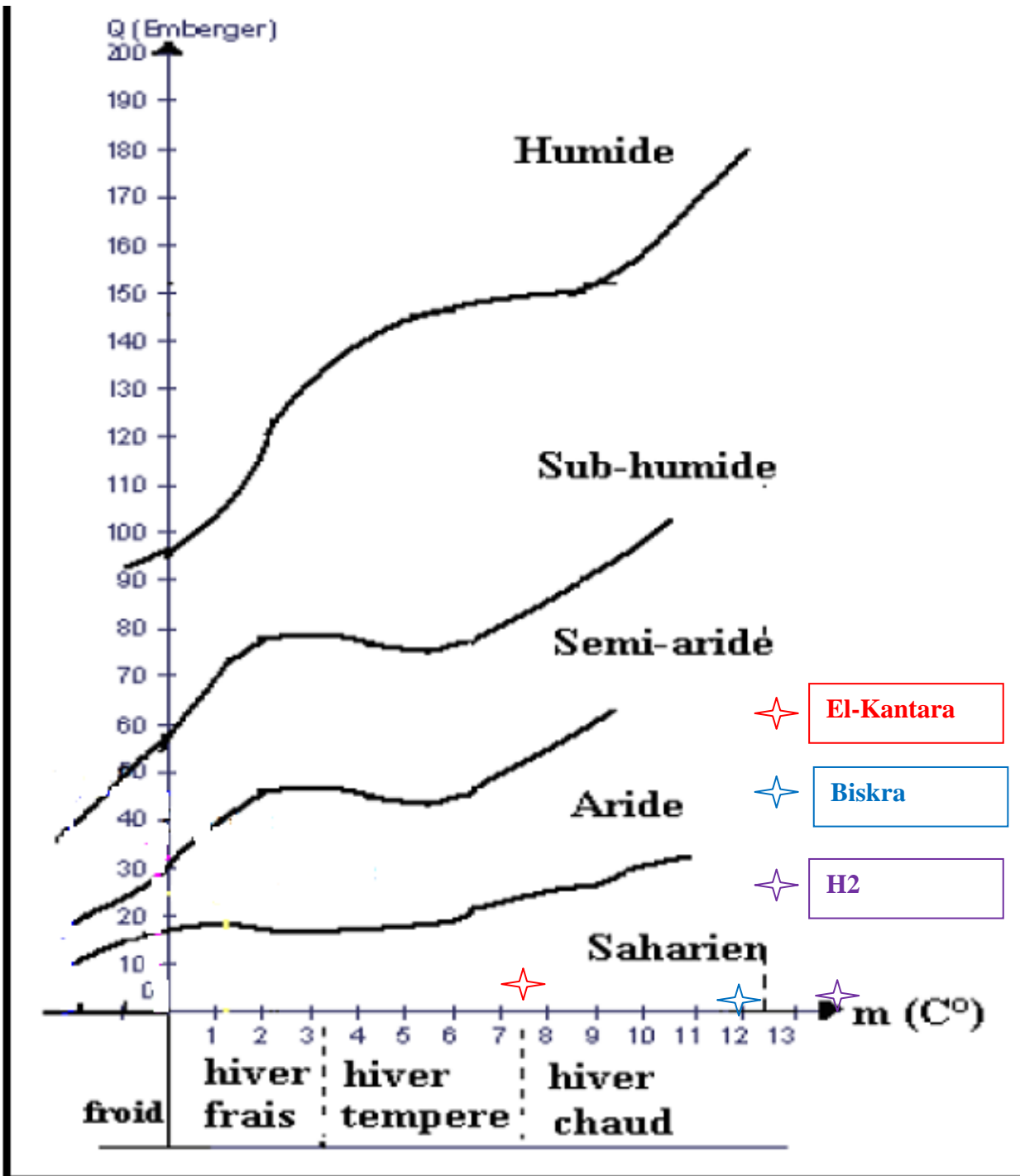


Fig.III.16 : Diagramme d'EMBERGER.

L'application de cette méthode permet de dire que toutes les stations se situent dans la zone climatique Saharienne à hiver chaud.

8. Calcul des paramètres du bilan:

Le bilan hydrique consiste à évaluer la répartition de différents paramètres du bilan de l'eau dans une région, à savoir l'écoulement, l'infiltration et l'évaporation, dont ce dernier paramètre est le plus important et qui conditionne l'abondance ou le déficit en eau pour la végétation.

Le bilan hydrique exprime le processus que suit une quantité d'eau arrivant au sol par précipitation ou neige avant de se retourner à l'atmosphère.

Le bilan hydrologique naturel peut se calculer par la formule suivante:

$$P=E+R+I$$

Avec :

P : Précipitations moyennes annuelles en mm.

E : ETR moyenne annuelle en mm.

R : Ruissellement moyen annuel en mm.

I : Infiltration moyenne annuelle en mm.

8.1- L'évapotranspiration potentielle (ETP) :

L'ETP est un facteur déterminant dans l'évaluation du bilan hydrique. Ce paramètre peut être estimé par plusieurs méthodes comme celle de Thornthwaite.

8.1.1. Formule de Thornthwaite (1948) :

ETP (mm) = 16 (10 T/I)^a avec :

ETP : Evapotranspiration mensuelle;

T: Température moyenne mensuelle (en °C) ;

I : Indice thermique annuelle, $I = \sum i$

i: Indice thermique mensuel, déterminé par l'expression : $i = \left(\frac{T}{5}\right)^{1,514}$

a : Coefficient calculé par la formule : $a = \left(\frac{1,6}{100}\right)I + 0,5$

L'application de cette formule permet d'avoir des résultats qui est de consignés dans le tableau (**Tab.III.21**).

Tab.III.21 : Résultats de l'ETP selon Thornthwaite.

| Station | Méthode | Jan | Fév | Mar | Av | Mai | Jui | Juill | Août | Sep | Oct | Nov | Déc | Année |
|-------------|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|---------|
| El- Kantara | ETP Thornthwaite | 12 | 19 | 34 | 52 | 82 | 127 | 157 | 150 | 116 | 66 | 33 | 12 | 859 |
| Biskra | ETP Thornthwaite | 15,38 | 20,75 | 38,23 | 62,17 | 62,17 | 163,70 | 163,70 | 201,27 | 135,64 | 80,22 | 35,59 | 38,23 | 1017,05 |
| H2 | ETP Thornthwaite | 14.41 | 20.32 | 40.46 | 71.13 | 121.9 | 196.99 | 264.45 | 243.66 | 150.15 | 87.13 | 34.09 | 15.73 | 1260.42 |

Quelque soit la méthode, on remarque que l'ETP dans la majorité des cas est supérieure aux précipitations ce qui induit un déficit agricole.

8.2- L'évapotranspiration réelle (ETR):

L'ETR est la quantité d'eau réellement évaporée .Elle dépend des conditions naturelles et de la quantité d'eau disponible dans le sol. Le calcul peut se faire à l'aide de plusieurs formules.

8.2.1. Formule de Turc :

$$\text{ETR mm} = P / \sqrt{0.9 + P^2 / L^2} \text{ avec :}$$

P : précipitations annuelles moyennes (mm)

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

T : températures annuelles moyennes (C°)

Donc :

- **Pour la station de Biskra** : P = 134 mm ; T = 22.95 C° ; L= 1478,14

$$\diamond \text{ ETR} = 140,6 \text{ mm}$$

- **Pour la station d'El-Kantara**: P = 261 mm ; T = 17.72 C° ; L= 1021,2

$$\diamond \text{ ETR} = 265,65 \text{ mm}$$

- **Pour la station de H2** : P = 220,05 mm ; T = 27,26 C° ; L= 1994,35

$$\diamond \text{ ETR} = 231,36 \text{ mm}$$

8.2.2. Méthode de Wundt :

L'abaque de Wundt (1937) modifié par Coutagne (1954) permet de déduire la valeur de l'E.T.R en prenant en considération la température moyenne annuelle et les précipitations annuelles. La représentation des données climatiques sur l'abaque de

Wundt (Fig.III.17) a permis d'avoir les valeurs d'ETR pour chaque station qui sont comme suit :

- **Pour la station de Biskra** : P = 134 mm ; T = 22.95 C° donc ETR = 280 mm

- **Pour la station d'El-Kantara**: P = 261 mm ; T = 17.72 C° donc ETR = 200 mm

- **Pour la station de H2** : P = 220,05 mm ; T = 27,26 C° donc ETR = 300 mm

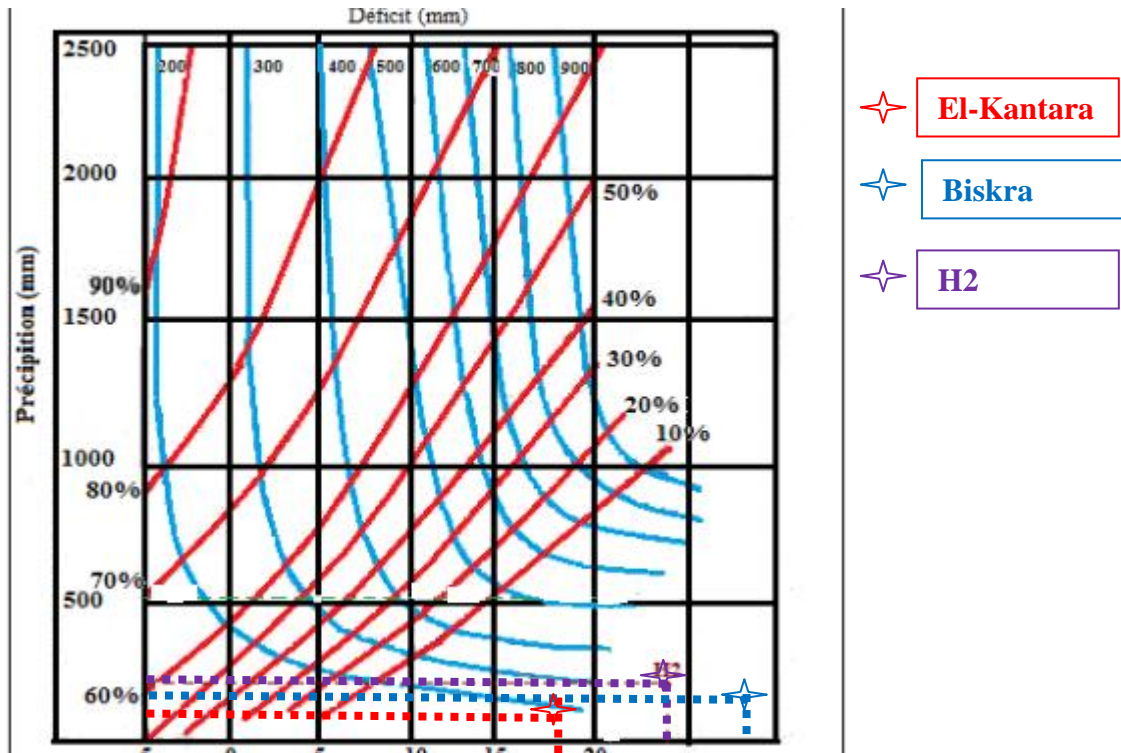


Fig.III.17 : Abaque de Wundt pour l'estimation de l'E.T.R

8.2.2. Méthode de Thornthwaite :

Pour le calcul d'ETR, deux cas se présentent :

- Si $P > ETP \Rightarrow ETR = ETP$
- Si : $P < ETP$: - $P + RFU > ETP \Rightarrow ETR = ETP$
 - $P + RFU < ETP \Rightarrow ETR = P + RFU$

On prend la réserve facilement utilisable égale à 11 mm pour la station de Biskra et 22 mm pour la station d'El-Kantara (In Brinis ,2011) et 30 mm pour la station H2 (In Reghais Azzedine et Maachi Faris ,2018).

L'application de cette méthode a permis d'avoir les résultats consignés dans le tableau (Tab.III.22).

Tab.III.22: Estimation de l'évapotranspiration réelle moyenne.

| Stations | T C° | P mm | ETR (mm) Turc | ETR.Turc = (%) des P | ETR(mm) Wundt | ETR .Wundt = (%) des P | ETR (mm) Thornth. | ETR (mm) Thornth.= (%) des P. | Moyenne (mm) |
|-------------------|-------|--------|---------------------|----------------------------|------------------|---------------------------|-------------------------|-------------------------------------|-----------------|
| El-Kantara | 17.72 | 261 | 265.65 | 102.10 % | 200 | 76,63% | 244 | 93.49 % | 236,55 |
| Biskra | 22.95 | 134,03 | 140.6 | 104.93 % | 280 | 208 ,96% | 134 ,03 | 100% | 184,88 |
| H2 | 27,26 | 220,11 | 231,36 | 105,14% | 300 | 136 ,33% | 220,11 | 100% | 250,49 |

8.3-Calcul de ruissellement (R) :

La loi de TIXERON-BERKALOFF (1960), nous permet d'estimer le ruissellement à partir de la précipitation moyenne annuelle et de l'ETP, calculée selon THORNTHWAITE.

Elle concerne surtout les régions ayant un climat aride et semi-aride comme le cas de notre zone d'étude.

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

R : ruissellement en (mm) ;

P : précipitation moyenne annuelle en (mm) ;

ETP : calculée par la méthode de THORNTHWAITE en (mm) .

Application numérique :

-**Pour la station de Biskra** : P = 134 mm ; ETP = 1017,05 mm

❖ R = 0,78 mm

- **Pour la station d'El-Kantara**: P = 261 mm ; ETP = 859 mm

❖ R = 8,03 mm

- **Pour la station de H2** : P = 220,05 mm ; ETP = 1260.42 mm

❖ R = 2,24mm

Calcul de l'infiltration (I) : L'infiltration est calculée par la formule suivante :

$$P = ETR + I + R \quad \text{d'où} \quad I = P - ETR - R$$

R : ruissellement en (mm) ;

P : précipitation moyenne annuelle en (mm) ;

ETR : calculée par la méthode de THORNTHWAITE en (mm)

Application numérique :

- **Pour la station de Biskra** : P = 134 mm ; ETR = 134,03 mm et R = 0,78 mm

❖ I = 0 mm

- **Pour la station d'El-Kantara**: P = 261 mm ; ETR = 244 mm et R = 8,03 mm

❖ I = 8,97 mm

- **Pour la station de H2** : P = 220,05 mm ; ETR = 220.11 mm et R = 2,24mm

❖ I = 0 mm

9. Etablissement du bilan hydrique selon la méthode de THORNTHWAITE :

Un bilan hydrique est le résultat chiffré de la comparaison des précipitations totales tombées dans une région et l'évapotranspiration potentielle (ETP) évaluée en laboratoire. Le bilan de Thornthwaite fait intervenir l'ETP et les précipitations.

- **Pour la station d'El-Kantara**:

Tab.III.23 : Bilan Hydrique de la station d'El-Kantara (1913-1938)

| | Sep | Oct | Nov | Déc | Jan | Fév | Mars | Avr | Mai | Jui | Juil | Aoû | Total |
|---------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|-----|------|------|------|-------|
| T°C | 24 | 18 | 13 | 7 | 7 | 9 | 13 | 16 | 20 | 26 | 29 | 28 | 17,5 |
| P mm | 17 | 32 | 27 | 31 | 28 | 23 | 28 | 11 | 19 | 13 | 22 | 10 | 261 |
| ETP mm | 116 | 66 | 33 | 12 | 12 | 19 | 34 | 52 | 82 | 127 | 157 | 150 | 860 |
| P-ETP | -99 | -34 | -6 | 19 | 16 | 4 | -6 | -41 | -63 | -114 | -135 | -140 | / |
| ETR mm | 17 | 32 | 27 | 12 | 12 | 19 | 34 | 27 | 19 | 13 | 22 | 10 | 244 |
| REU mm | 0 | 0 | 0 | 19 | 22 | 22 | 16 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | / |
| Ex mm | 0 | 0 | 0 | 0 | 13 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 17 |
| D mm | 99 | 34 | 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 25 | 63 | 114 | 135 | 140 | 616 |

-Pour la station de Biskra :**Tab.III.24 : Bilan Hydrique de la station Biskra (1991-2015)**

| | Sep | Oct | Nov | Déc | Jan | Fév | Mars | Avr | Mai | Jui | Juil | Août | Total |
|-------------------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|-------|--------|---------|---------|---------|---------|
| Pmm | 15,44 | 16,29 | 16,54 | 10,24 | 18,86 | 9,63 | 15,95 | 14,47 | 9,10 | 3,85 | 0,72 | 2,94 | 134 ,03 |
| ETP mm | 135,64 | 80,22 | 35,59 | 38,23 | 15,38 | 20,75 | 38,23 | 62,17 | 62,17 | 163,70 | 163,70 | 201,27 | 1017,05 |
| P-ETP | -120,2 | -63,93 | -19,05 | -27,99 | 3,48 | -11,12 | -22,28 | -47,7 | -53,07 | -159,85 | -162,98 | -198,33 | / |
| REU mm | 0 | 0 | 0 | 0 | 3,48 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | / |
| ETR mm | 15,44 | 16,29 | 16,54 | 10,24 | 15,38 | 13,11 | 15,95 | 14,47 | 9,10 | 3,85 | 0,72 | 2,94 | 134 ,03 |
| D mm | 120,2 | 63,93 | 19,05 | 27,99 | 0 | 7,46 | 22,28 | 47,7 | 53,07 | 159,85 | 162,98 | 198,33 | 882,84 |
| Ex mm | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

- Pour la station de H2**Tab.III.25 : Bilan Hydrique de la station H2 (1997-2017)**

| | Sep | Oct | Nov | Déc | Jan | Fév | Mars | Avr | Mai | Jui | Juil | Août | Total |
|-------------------|---------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|
| Pmm | 28,74 | 21,9 | 20,84 | 19,3 | 26,02 | 14,48 | 16,9 | 26,74 | 21,2 | 9,79 | 2,69 | 11,51 | 220,11 |
| ETP mm | 150,15 | 87,13 | 34,09 | 15,73 | 14,41 | 20,32 | 40,46 | 71,13 | 121,9 | 196,99 | 264,45 | 243,66 | 1260,42 |
| P-ETP | -121,41 | -65,23 | -13,25 | 3,57 | 11,61 | -5,84 | -23,56 | -44,39 | -100,7 | -187,2 | -261,76 | -232,15 | / |
| REU mm | 0 | 0 | 0 | 3,57 | 15,18 | 9,34 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | / |
| ETR mm | 28,74 | 21,9 | 20,84 | 15,73 | 14,41 | 20,32 | 26,24 | 26,74 | 21,2 | 9,79 | 2,69 | 11,51 | 220,11 |
| D mm | 121,41 | 65,23 | 13,25 | 0 | 0 | 0 | 14,22 | 44,39 | 100,7 | 187,2 | 261,76 | 232,15 | 1040,31 |
| Ex mm | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

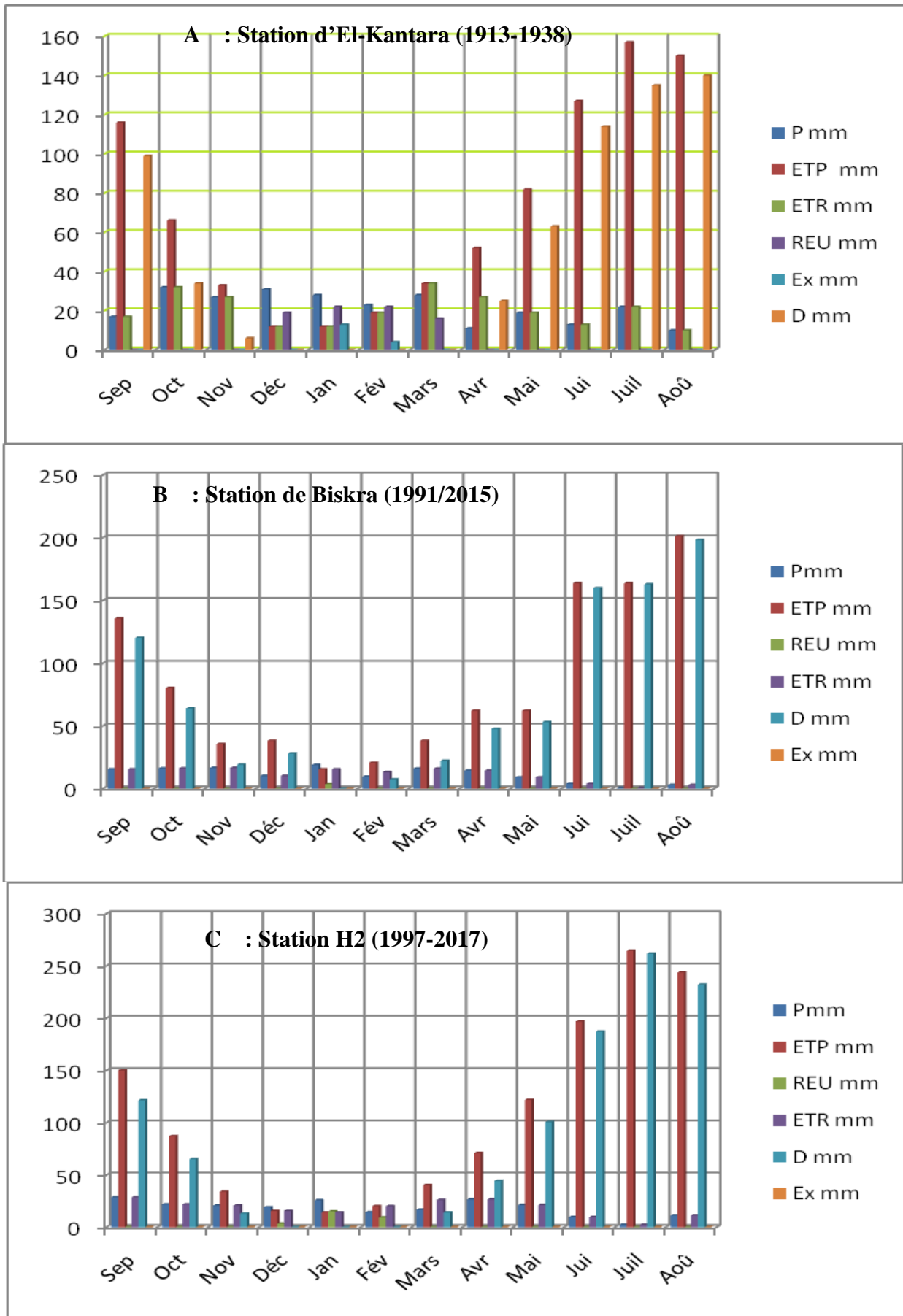


Fig. III.18. : Bilan hydrique des trois stations

11-Interprétation des bilans hydriques :

A- Le Bilan hydrologique de la station d'El-Kantara :

L'analyse du bilan hydrique de la station d'El-Kantara voir la figure (**Fig. III.18.A**) et le tableau (**Tab.III.23**) montre que :

-Pour la période allant de 1913 à 1938, la hauteur des précipitations est 261mm ; qui atteint leur maximum au mois d'Octobre (32 mm) et leur minimum au mois d'Aout (10 mm). L'ETP est maximale au mois de Juillet (157mm) et atteint son minimum aux mois de Janvier et Décembre (12mm). Par ailleurs L'ETR est de l'ordre 244 mm alors que l'excédent est de l'ordre de 17mm qui représente respectivement 93.49 % et 6.51% des précipitations. Pour l'excédent il n'apparaît que pendant les mois de Janvier et Février. Ce qui explique la longue période du déficit agricole.

B- Le Bilan hydrologique de Biskra :

L'analyse du bilan hydrique de la station Biskra voir la figure (**Fig. III.18.B**) et le tableau (**Tab.III.24**) montre que :

-Pendant la période allant de 1991 à 2015, la hauteur des précipitations est 134 ,03mm. Le maximum est atteint au mois de Janvier (18 ,86 mm) et le minimum au mois de Juillet (0,72 mm). L'ETP atteint son maximum au mois d'Août (201,27mm) et le minimum au mois de Janvier (15,38mm). Par ailleurs L'ETR est de l'ordre 134 ,03 mm alors que l'excédent est nul qui représente respectivement 100 % et 0% des précipitations. Ce qui montre un déficit agricole durant toute l'année.

C- Le Bilan hydrologique de la station H2 :

L'analyse du bilan hydrique de la station H2 voir la figure (**Fig. III.18.C**) et le tableau (**Tab.III.25**) montre que :

-Pour la période allant de 1997 à 2017, la hauteur des précipitations est 220,11mm ; qui atteint leur maximum au mois de Septembre (28,74 mm) et leur minimum au mois de Juillet (2,69 mm). L'ETP est maximale au mois de Juillet (264,45mm) et atteint son minimum aux mois de Janvier (14,41mm). Par ailleurs L'ETR est de l'ordre 220,11mm alors que l'excédent est de l'ordre de 17mm qui représente respectivement 93.49 % et 6.51% des précipitations. Alors que l'excédent est nul qui représente

respectivement 100 % et 0% des précipitations. Ce qui montre un déficit agricole durant toute l'année.

12-Conclusion :

Les stations climatologiques utilisées pour caractériser les paramètres climatiques du bassin versant d'Oued El- Hai et de la région d'étude sont représentatives.

Les précipitations moyennes annuelles ne dépassent pas 261 mm/an pour la station d'El-Kantara, 220mm pour la station H2 et 134 mm/an pour la station de Biskra.

Globalement, l'étude des précipitations saisonnières montre que les pluies sont toujours les plus importantes en Hiver avec 93,32 mm soit 36,79% de la précipitation totale à la station de H2 et avec 82 mm soit 31,42% de la précipitation totale à la station d'El-Kantara tandis que l'automne avec 48,27mm soit 36,01% est la saison la plus pluvieuse dans la station de Biskra. L'Eté reste la saison la moins pluvieuse dans les trois stations

Les moyennes mensuelles des températures des trois stations montrent que Janvier est le mois le plus frais de l'année et le mois de Juillet est le mois le plus chaud.

Les résultats des indices d'aridité mensuels et annuels (Indice de Demartonne (1923)), nous a permis de ranger les stations les étages climatiques comme suit :

-La région d'El-Kantara est caractérisée par un climat steppique avec des tendances sahariennes caractérisées par une saison sèche qui va du mois de Mars jusqu'au mois de Novembre.

-La région de Biskra est caractérisée par un climat hyperaride avec des tendances sahariennes caractérisées par une saison sèche qui s'étale sur toute l'année.

Le calcul du bilan hydrique montre que les bilans globaux à l'échelle mensuelle sont généralement déficitaires, mais ils pourraient être excédentaires s'ils étaient établis à l'échelle journalière.

Le calcul de l'évapotranspiration réelle par les méthodes de Turc, Wundt, et Thornthwaite a donné une valeur moyenne importante pour chaque station : 236,55mm dans la station d'El-Kantara, 184,88mm dans la station de Biskra et de 240.60 mm à la station H2.

Le sol ne laisse percoler qu'une quantité très faible de l'ordre de 0 à **8.97** mm, qui représente une moyenne de **(3.44 %)** des précipitations, cela traduit que l'alimentation directe de la nappe par les eaux de précipitation est très faible.

Chapitre IV : Géomorphologie

1-Introduction :

L'étude géomorphologique sert à quantifier les caractéristiques morphométriques du bassin versant régissant l'écoulement de surface. Le bassin versant a une fonction de collecteur, il collecte les pluies et les transforme en débit selon les conditions climatiques et les caractéristiques physiques du bassin versant.

Nous allons dans ce chapitre passer en brève ces différentes caractéristiques.

2-Géomorphologie du bassin versant d'Oued El-Hai :

Oued El-Hai prend son origine sur les flancs Sud de l'Atlas Saharien selon le découpage hydrologique en vigueur en Algérie, il fait partie du bassin N° 6 (Chott Melghir). Le bassin versant d'Oued El-Hai est allongé selon une direction NE –SW.

Les principaux Oueds drainant le bassin versant d'Oued El-Hai sont : Oued Hassi Ben Tamtam, Oued Tilatou, Oued Imeroual, Oued Fedhala, Oued Smail, Oued Bouaine, Oued Taguergoumt, Oued Chaaba, Oued Ksour.

Les données géométriques et morphométriques sont calculées directement à partir des cartes topographiques au 1/50 000 de Batna, Tazoult, Menaâ, Ain Touta, les Tamarins, E-Kantara et N'Gaous (In Mekaouci,2014).

3-Les paramètres géométriques :

3.1-La superficie (S) :

La surface topographique est le paramètre le plus important, elle permet de contrôler plusieurs phénomènes hydrologiques (apport, volume de précipitations ou infiltration...).

La superficie du bassin versant d'Oued El-Hai est mesurée à l'aide d'un planimètre, soit 1660 Km².

3.2-Le périmètre (P) :

Le périmètre du bassin versant d'Oued El-Hai est mesurée à l'aide d'un Curvimètre, soit 193 Km.

4- Paramètres morphométriques :

La forme du bassin versant influence fortement l'écoulement global et notamment le temps de réponse du bassin versant. C'est la configuration géométrique projetée sur

un plan horizontal. Un bassin versant allongé ne réagira pas de la même manière qu'un bassin ramassé s'ils sont placés dans les mêmes conditions météorologiques.

4.1-Indice de compacité de GRAVILLIUS. (Kc)

L'indice est établi en comparant le périmètre du bassin versant à celui d'un cercle de même surface. Plus cet indice se rapproche de l'unité et plus le bassin versant a une forme ramassée et plus le temps de concentration du bassin est court. Ce paramètre est estimé à l'aide de la formule suivante :

$$Kc = 0.28 \frac{P}{(S)^{1/2}}$$

Avec

P : périmètre du bassin versant en (Km)

S : superficie du bassin versant en (Km²)

L'application d'une telle formule a donné le résultat suivant :

$$Kc = 0.28 \frac{190}{(1660)^{1/2}} = 1.32$$

Selon la valeur de Kc, le bassin versant a une forme bien déterminée. Ainsi :

⇒ Si $Kc \leq 1$: implique que le bassin versant à une forme circulaire.

⇒ Si $Kc = 1.12$: implique que le bassin versant à une forme carrée.

⇒ Si $Kc > 1.12$: implique que le bassin versant à une forme allongée.

Donc le bassin versant d'Oued El Hai est allongé et se rapproche d'un rectangle, ce qui induit un temps de concentration plus long.

4.2-Rectangle équivalent :

C'est une transformation purement géométrique en un rectangle de dimension L et l ayant la même surface que le bassin versant considéré.

Le rectangle équivalent sert à comparer les bassins entre eux en prenant en considération l'écoulement, tout en supposant qu'ils possèdent la même superficie et le même périmètre.

Les courbes de niveau sont des droites parallèles aux petits côtés du rectangle et l'exutoire est l'un de ces petits côtés.

4.2.1-Longueur équivalente:

Ce paramètre est calculé à l'aide de la formule suivante :

$$L = \frac{Kc\sqrt{s}}{1.12} \left[\left(1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.128}{Kc} \right)^2} \right) \right]$$

Ce qui nous donne une longueur : $L = 73.43km$

4.2.2-Largeur équivalente :

La largeur du rectangle est calculée à l'aide de la formule suivante :

$$l = \frac{Kc\sqrt{s}}{1.12} \left[\left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.128}{Kc} \right)^2} \right) \right]$$

Ce qui nous donne une largeur : $l = 22.6Km$

Ces résultats ont permis de tracer la Figure 01.

5-Hypsométrie :

Le relief joue un rôle primordial dans l'écoulement et le transport des matériaux. La répartition altimétrique de la superficie du bassin versant est représentée dans le **Tab. IV.01** :

Tab. IV.01 : La répartition de la surface en fonction de l'altitude.

| Altitudes (m) | Si (Km ²) | Si (%) | Si (%) C | Hi | Si*Hi |
|---------------|-----------------------|--------|----------|---------|-----------|
| 350-400 | 10,2 | 0.61 | 0.61 | 375 | 3825 |
| 400-600 | 178,38 | 10.75 | 11.36 | 500 | 89190 |
| 600-800 | 175,71 | 10.58 | 21.94 | 700 | 122997 |
| 800-1000 | 535,47 | 32.26 | 54.2 | 900 | 481923 |
| 1000-1200 | 304,64 | 18.35 | 72.55 | 1100 | 335104 |
| 1200-1400 | 136,4 | 8.22 | 80.77 | 1300 | 177320 |
| 1400-1600 | 166,4 | 10.02 | 90.79 | 1500 | 249600 |
| 1600-1800 | 122 | 7.35 | 98.14 | 1700 | 207400 |
| 1800-2000 | 29,2 | 1.76 | 99.9 | 1900 | 55480 |
| 2000-2091 | 1,6 | 0.10 | 100 | 2045.5 | 3272,8 |
| Totale | 1660 | 100 | | 12020.5 | 1726111,8 |

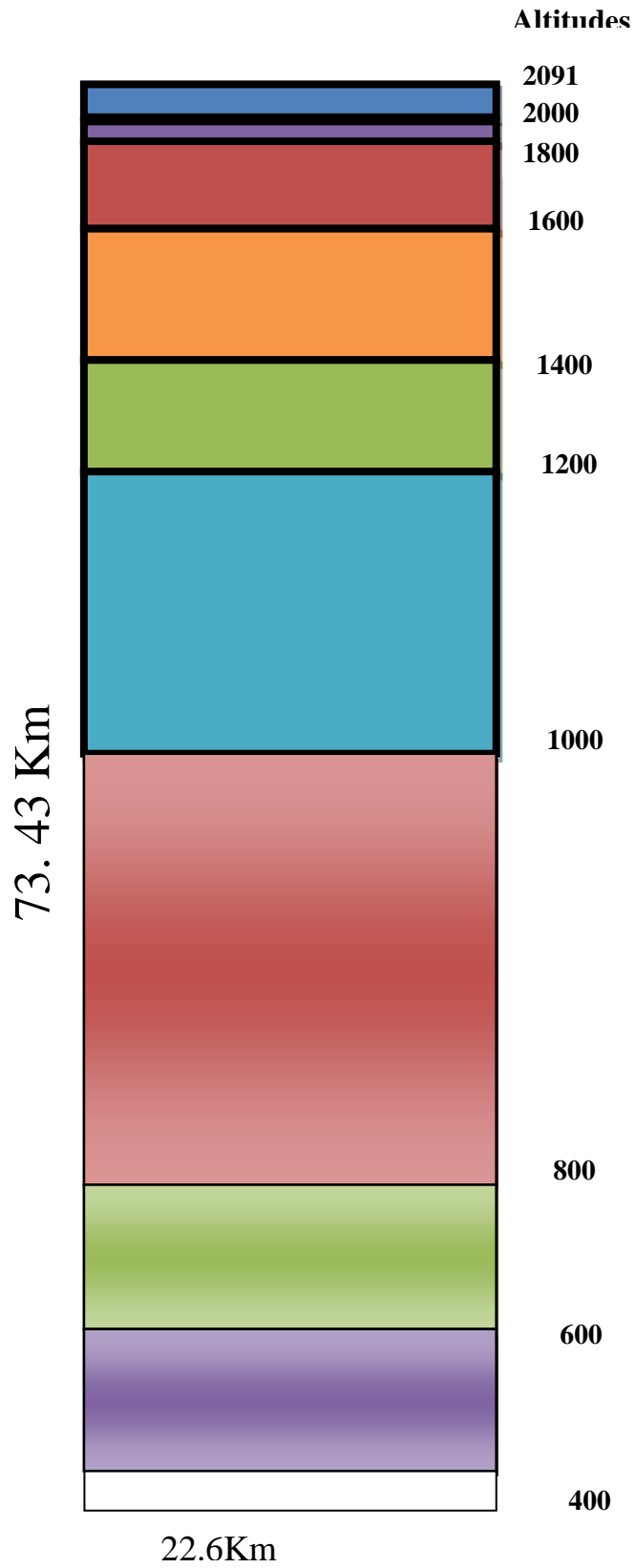


Fig. IV.01 : Rectangle équivalent du bassin versant d'Oued El Hai (Kerboub, 2012).

5.1-La courbe hypsométrique :

Pour le relief, on utilise la courbe hypsométrique, celle-ci renseigne sur la répartition de la surface en fonction de tranche d'altitude. L'altitude est reportée en ordonnée alors que la surface correspondante est reportée en abscisse

La courbe hypsométrique du bassin versant de Oued El-Hai montre une allure irrégulière.

A partir de cette courbe on détermine les paramètres altimétriques :

- Altitude à 5% : $H_{5\%}=1690\text{m}$
- Altitude à 50% : $H_{50\%}=980\text{m}$
- Altitude à 95% : $H_{95\%}=520\text{m}$
- L'altitude maximale est obtenue directement des cartes topographiques, elle correspond au point culminant : $H_{\text{max}}=2091\text{m}$
- L'altitude minimale correspond à l'exutoire : $H_{\text{min}}=350\text{m}$.
- L'altitude moyenne : $H_{\text{moy}}=1039,83\text{m}$.

6-Les indices de pente :

Le but de ces indices est de caractériser les pentes d'un bassin et de permettre des comparaisons et des classifications. Les indices de pente se déterminaient à partir de la courbe hypsométrique du bassin.

6.1-Indice de pente de Roche(I_p) :

Ce paramètre est estimé à l'aide de la formule suivante :

$$I_p = \frac{1}{\sqrt{L}} \sum_{i=1}^n \sqrt{a_i \cdot D_i}$$

Avec

L : Longueur équivalente

a_i : Fractions de surfaces entre les deux courbes de niveau.

D_i : Dénivelée.

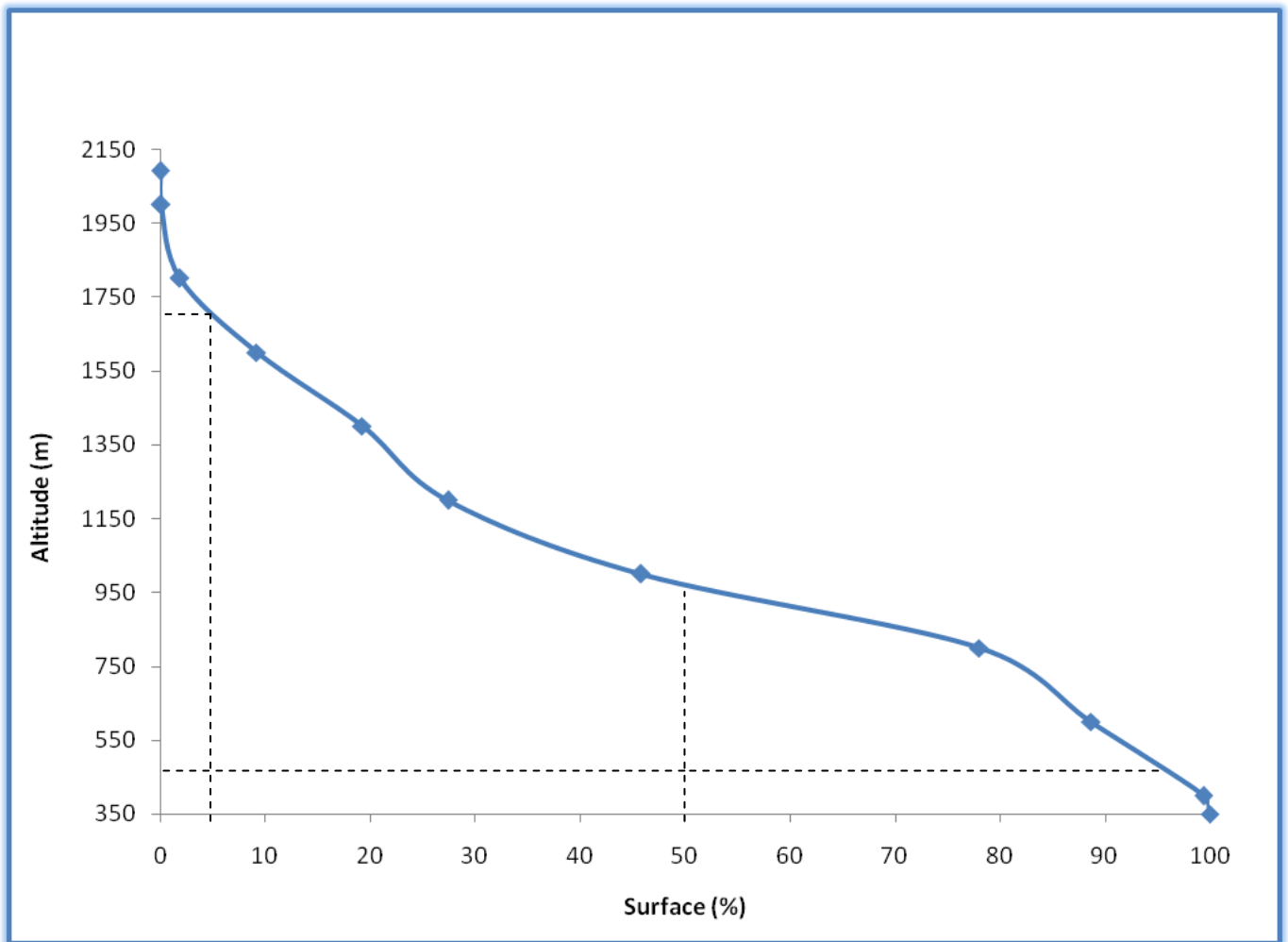


Fig. IV.02 : Courbe hypsométrique du bassin versant de Oued El-Hai (Kerboub, 2012).

L'application de formule ci-dessus nécessite l'établissement du tableau ci dessous

Tab. IV.02 : Paramètres de l'indice de pente.

| Altitudes (m) | Di(m) | $(a_i * D_i)^{1/2}$ |
|---------------|-------|---------------------|
| 2091-2000 | 91 | 9.1 |
| 2000-1800 | 200 | 18.76 |
| 1800-1600 | 200 | 38.34 |
| 1600-1400 | 200 | 44.76 |
| 1400-1200 | 200 | 40.54 |
| 1200-1000 | 200 | 60.58 |
| 1000-800 | 200 | 80.32 |
| 800-600 | 200 | 46 |
| 600-400 | 200 | 43.36 |
| 400-350 | 50 | 5.52 |

Ces différentes étapes permettent d'avoir le résultat suivant : $I_p=0.44$.

6.2-Indice de pente globale (Ig) :

L'indice de pente globale est déterminé, à partir de la courbe hypsométrique en éliminant les valeurs extrêmes, de manière à ne garder que 90 % de l'aire du sous bassin. Pour cela on utilise la formule suivante :

$$I_g = \frac{D}{L} = \frac{H_{5\%} - H_{95\%}}{L}$$

D : La dénivelée entre la hauteur de 5% et la hauteur 95%

L : Longueur du rectangle équivalent

Ce qui nous donne : $I_g = (1690-520)/73.43=15.93\text{m/km}$

L'ORSTOM: classe les reliefs selon la valeur de I_g en différents catégories Tab. IV.03.

Tab. IV.03 : Classification des reliefs selon l'ORSTROM.

| | |
|-------------------|------------------------------|
| relief assez fort | $I_g > 35 \text{ m/km}$ |
| relief fort | $20 < I_g < 35 \text{ m/km}$ |
| relief modéré | $I_g < 20 \text{ m/km}$ |

Selon la valeur de I_g , on peut dire que le relief du bassin versant de Oued El Hai est modéré.

6.3- Indice de pente moyenne (Im):

La pente moyenne est une caractéristique importante du bassin, elle donne une bonne indication sur le temps de ruissellement des eaux.

Par définition **Im** est exprimé par le rapport :

$$I_m = (H_{\max} - H_{\min})/L \text{ Avec:}$$

H_{\max} : l'altitude maximale du bassin versant (m) ;

H_{\min} : l'altitude minimale du bassin versant (m) ;

L : longueur du rectangle équivalent (km).

Ce qui nous donne **Im = 23.70 m/km**

6.4-Dénivelée spécifique (Ds) :

L'indice I_g décroît pour un même bassin, lorsque la surface augmente, il est donc difficile de comparer des bassins de taille différente, d'où la nécessité de l'introduction de la dénivelée spécifique (DS). Ce paramètre est définie comme étant le produit de l'indice de pente globale par la racine carrée de la surface du bassin versant .Cet indice indique l'état de relief et il est donné par la formule suivante :

$$D_s = I_g * \sqrt{S}$$

avec

I_g : indice de pente globale

S : la surface du bassin versant

L'application de cette formule permet d'avoir le résultat suivant :

$D_s = 649.04$ m. L'ORSTROM a classé le relief selon cet indice Tab. IV.04.

Tab. IV.04 : Classification de l'O.R.S.T.O.M.Selon dénivelé spécifique.

| | | |
|----------------|---------------------|--------------------|
| R ₁ | Relief très faible | $D_s < 10m$ |
| R ₂ | Relief faible | $10 < D_s < 25m$ |
| R ₃ | Relief assez faible | $25 < D_s < 50m$ |
| R ₄ | Relief modéré | $50 < D_s < 100m$ |
| R ₅ | Relief assez fort | $100 < D_s < 250m$ |
| R ₆ | Relief fort | $250 < D_s < 500m$ |
| R ₇ | Relief très fort | $D_s > 500m$ |

D'après la classification de l'O.R.S.T.O.M. Le relief du bassin versant d'Oued El Hai est très fort.

7-Les paramètres morphométriques :

Le tableau IV.05 récapitule la classification de Schum, la longueur et le nombre des talwegs dans le bassin versant d'Oued el Hai :

Tab. IV.05 : Classification de Schum

| Ordre | Nombre Nx | Longueur Lx (Km) | Longueur moyenne (Lx/Nx) |
|-------|-----------|------------------|--------------------------|
| 1 | 10004 | 2848 | 0.284 |
| 2 | 2242 | 1311 | 0.584 |
| 3 | 457 | 696 | 1.522 |
| 4 | 103 | 261 | 2.533 |
| 5 | 20 | 115 | 5.75 |
| 6 | 5 | 77.5 | 15.5 |
| 7 | 1 | 61.5 | 61.5 |

7.1-Densité de drainage (Dd):

La densité de drainage est étroitement liée à deux facteurs :

la lithologie et les précipitations. Cet indice permet d'apprécier l'importance du réseau hydrographique dans le bassin versant, les géomorphologies l'appellent, densité des talwegs, densité de drainage.

Elle exprime la longueur moyenne du réseau hydrographique sur une superficie de 1Km² du bassin versant. C'est à dire le rapport de la longueur totale de tous les cours d'eau sur la superficie du bassin versant. En utilisant la formule suivante :

$$Dd = \sum_{i=1}^n \frac{Lx}{S} \quad \text{On aura :}$$

$$Dd = \frac{5370}{1660} = 3.23(km/ Km^2)$$

7.2-Le rapport de confluence (Rc) :

Ce paramètre est estimé à l'aide de la formule suivante :

$$Rc = \frac{Nx}{Nx + 1}$$

Avec

Rc : le rapport de confluence

N_x : Nombre de talweg d'ordre (x)

N_{x+1} : Nombre de talweg d'ordre (x+1).

Ce qui nous permet d'avoir : Rc=4.436

7.3-Le rapport de longueur (RI) :

C'est le quotient de la longueur moyenne des cours d'eau d'ordre (x+1) par celle des cours d'eau d'ordre (x).soit :

$$RI = L_{x+1}/L_x = 2.05$$

7.4- Coefficient de torrentialité (Ct):

Il est estimé par la formule suivante :

$$Ct = Dd.Fi$$

Avec

Dd: Densité de drainage

Fi: Fréquence de talwegs d'ordre 1

Le calcul de la densité des talwegs élémentaires ou fréquence des oueds élémentaires se fait de la manière suivante :

$$Fi = \frac{N_1}{S}$$

N₁: nombre de talwegs d'ordre 1 (N₁=10004)

S: Superficie du bassin versant, soit

$$Fi = \frac{10004}{1660} = 6.02$$

La valeur du coefficient de torrentialité est grande ce qui montre que l'écoulement dans les talwegs d'ordre 1 est de grande torrentialité ce ci est due à la forte pente qui caractérise de ce bassin versant, et à la présence des terrains imperméables.

7.5-La pente moyenne du cours d'eau principal (I) :

Cet indice est une caractéristique importante qui renseigne sur la topographie du bassin, l'exprime le rapport entre la différence d'altitude des points maximum et minimum du talweg principal sur sa longueur.

$$I = \frac{dH}{Lp} = (2091-350)/85.5=20.36 \text{ m/Km}$$

7.6-Temps de concentration (Tc) :

C'est le temps parcouru par une particule d'eau pour s'écouler depuis l'élément (point) hydrographiquement le plus éloigné, jusqu'à l'exutoire. Plusieurs formules permettent de calculer ce paramètre.

7.6.1-Formule de GIANDOTTI

Le temps de concentration est estimé selon Giandotti par la formule suivante :

$$Tc = \frac{4\sqrt{s} + 1.5Lp}{0.8(H_{moy} - H_{min})^{1/2}}$$

Avec

Tc : temps de concentration (heures)

Lp : longueur du talweg principal (85.5 km)

Hmin : altitude minimale (350 m)

Hmoy : altitude moyenne (1039.83m):

Ce qui nous donne :

$$Tc = \frac{4\sqrt{1660} + 1.5 \times 85.5}{0.8(1039.83 - 350)^{1/2}} = 13.86 \text{ heures}$$

7.6.2-Formule de Ventura :

Ventura a estimé le temps de concentration par la formule suivante :

$$Tc = 76.3 \sqrt{\frac{s}{Ig}} = 76.3 \sqrt{1660 / 15.93} = 778.8 \text{ mn}$$

Avec

T_c : temps de concentration en minutes

I_g : Indice de pente globale (m/Km) soit

$$T_c = 12.98 \text{ heures}$$

7.6.3-Formule de Passini :

Une troisième estimation du temps de concentration est donnée par Passini à l'aide de la formule suivante :

$$T_c = 64.8 \frac{\sqrt[3]{Lp.s}}{I_g}$$

On aura donc : $T_c=15.30$ heures

On remarque que les trois formules aboutissent au même résultat. Ce qui nous permet d'avoir une valeur moyenne de :

$$\frac{13,86 + 12,98 + 15,30}{3} = 14,04 \text{ heures}$$

7.7-La vitesse d'écoulement (V) :

Ce paramètre est estimé à l'aide de la formule suivante :

$$V=Lp/T_c=85.5/14.04=6.08 \text{ Km/h}$$

Les différents paramètres morphométriques du bassin versant de Oued El Hai sont regroupés dans le tableau IV.06.

Tab. IV .06 : Principales caractéristiques géomorphologiques du bassin d'Oued EL- Hai

| N° | Paramètres | Unités | Symboles | Valeurs |
|----|----------------------------------|-------------|----------|---------|
| 01 | Longueur du talweg principal | <i>km</i> | Lp | 85.5 |
| 02 | Superficie du bassin versant | $(km)^2$ | S | 1660.0 |
| 03 | Périmètre du bassin versant | <i>km</i> | P | 193 |
| 04 | Altitude maximale | <i>m</i> | Hmax | 2091.0 |
| 05 | Altitude moyenne | <i>m</i> | Hmoy | 1039.83 |
| 06 | Altitude minimale | <i>m</i> | Hmin | 350.0 |
| 07 | Altitude 5 % | <i>m</i> | H5% | 1690 |
| 08 | Altitude 95% | <i>m</i> | H95% | 520 |
| 09 | Indice de compacité de GRAVILUS | - | Kc | 1.32 |
| 10 | Longueur du rectangle équivalent | <i>km</i> | L | 73.43 |
| 11 | Largeur du rectangle équivalent | <i>km</i> | <i>l</i> | 22.6 |
| 12 | Indice de pente global | <i>m/km</i> | Ig | 15.93 |
| 13 | Indice de pente de Roche | - | Ip | 0.14 |
| 14 | Dénivelé spécifique | <i>m</i> | DS | 649.04 |
| 15 | Densité de drainage | $(km)^{-1}$ | Dd | 3.23 |
| 16 | Coefficient de torrencialité | - | Ct | 0.26 |
| 17 | Temps de concentration | <i>h</i> | Tc | 14.33 |

8-Conclusion :

En terme hydrologique nous pouvant dire que :

Le bassin versant d'oued EL-Hai est situé dans une zone entourée par les reliefs avec une superficie de 1660km² et de forme rectangulaire.

La distribution des altitudes du bassin versant oued EL-Hai montre que la majeure partie de ce bassin (32.26%) est située entre 800 et 1000m.

Le réseau hydrographique de ce bassin versant est bien développé avec une densité de drainage de 3.23km/km² où dominant les formations du Quaternaire.

L'écoulement ne se fait qu'à la faveur des précipitations et que l'écoulement de base et inexistant ce qui pose le problème de l'alimentation de l'aquifère.

Chapitre V : hydrogéologie

1-Introduction :

L'hydrogéologie également nommée hydrologie souterraine et plus rarement géohydrologie, est la science qui étudie l'eau souterraine. Elle s'occupe de la distribution et de la circulation de l'eau souterraine dans le sol et les roches, en tenant compte de leurs interactions avec les conditions géologiques et l'eau de surface.

La détermination des caractéristiques hydrogéologiques est une opération indispensable pour la connaissance et l'identification des aquifères, cependant elle reste tributaire de l'existence et de la disponibilité de l'information.

2- Aperçu général sur l'hydrogéologie et les principales nappes aquifères du bassin d'Oued El-Hai :

La structure géologique du bassin d'Oued El-Hai est caractérisée par la présence de quatre principales unités hydrogéologiques qui forment la ressource primordiale pour les différentes utilisations de l'eau (industrie, irrigation,...) (**Fig. V.01**) :

- **La première unité hydrogéologique** : C'est la nappe phréatique du Quaternaire. Elle se caractérise par des alluvions anciennes et actuelles.

-**La deuxième unité hydrogéologique** : Est le remplissage du Mio-Plio-Quaternaire et d'Eocène.

- **La troisième unité hydrogéologique** : Est composée par des Calcaires massifs fissurés du Maestrichtien.

- **La quatrième unité hydrogéologique** : Est constituée par des Calcaires massifs fissurés du Turonien.

A. La plaine d'Ain Touta : Est composé de deux horizons productifs dont le principal est constitué par le remplissage alluvionnaire.

A.1- La nappe des alluvions : La nappe est constituée par des Limons, des Argiles, des Gravieres, et des Galets de Calcaire, l'épaisseur de la nappe est variable (50 m au centre jusqu'à 1 m sur les bords). La nappe est exploitée essentiellement par des puits tandis que le seul forage se situe à **Fegoucia**.

L'alimentation s'effectue directement par les pluies à travers l'impluvium, et probablement par les oueds El Ksour et Ain Arouss. Une alimentation latérale et verticale par les Calcaires

Turonien de la région de Tafrent et une alimentation verticale par les Calcaires du Coniacien Santonien est possible.

Les essais de pompage par palier réalisés par **C. Berthon (1971)** avec des débits de 27.5 l/s, 36.5 l/s, et 47.5 l/s sur le seul forage de la plaine de Ain Touta, montre que la perméabilité des Alluvions est de l'ordre de 4.10^{-4} m/s et la transmissivité est comprise entre $1.3 \cdot 10^{-3}$ et $2.9.10^{-2}$ m²/s.

A.2- Les calcaires du Turonien de Bled Tafrent: Les calcaires du Turonien très fissurés constituent un réservoir important, mais leur extension sous la plaine semble interrompue par des failles. Il est difficile en l'état actuel des connaissances de dire si ces calcaires ont subi un affaissement, et ont été rejetés vers de grandes de profondeurs importantes.

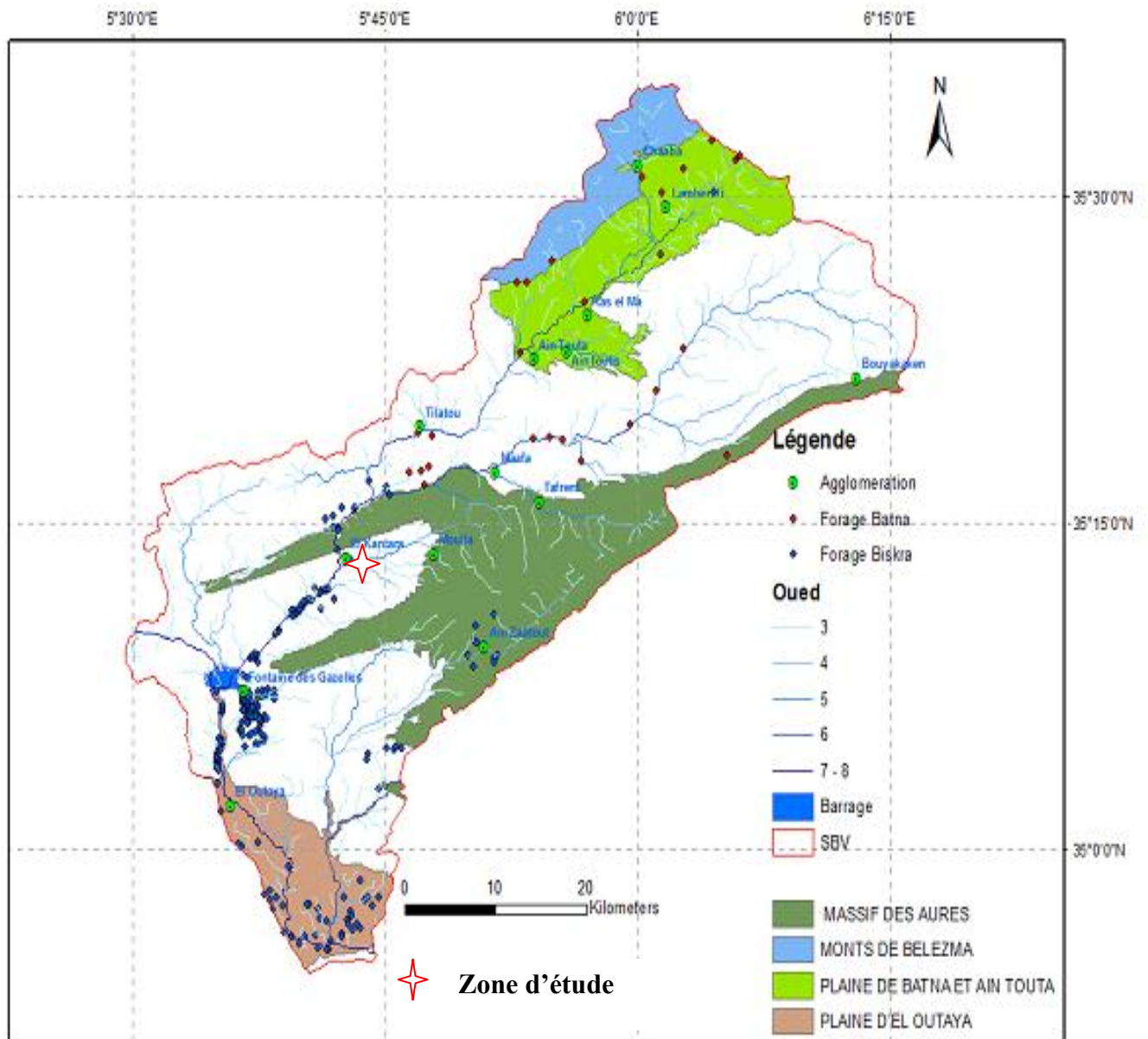


Fig. V.01 : Les principales nappes aquifères du bassin versant d'Oued El-Hai (Reghaï et Maachi, 2018)

B- Le massif des Aurès : L'hydrogéologie des vallées Aurasiennes a été bien décrite, qui signale l'existence de deux synclinaux, ceux de Bouzina et de Rhassira, dans lesquels il a été identifié trois aquifères.

B.1- Aquifère du complexe Oligo-Eocène : Il est très hétérogène du point de vue lithologique. Il peut passer des grès à des Marnes et Calcaires Gypseux, ce qui explique les variations de débits (forage de Bouzina 1 fournit un débit de 50 l/s en artésien, tandis que le forage Bouzina 2 ne fournit que 10 l/s).

B.2- Aquifère du Maestrichtien : Il est formé par des Calcaires perméables à porosité de fracture et de chenaux. La position structurale de ces calcaires dans le synclinal de Bouzina empêche tout accès à la machine de forage ce qui les rendent inexploitable. Au niveau du synclinal de Rhassira, plusieurs forages ont été réalisés sur les flancs du synclinal, mais aucun n'a atteint les Calcaires.

C- La plaine d'El-Outaya : L'aquifère du Mio-Plio-Quaternaire représente la plus importante ressource d'irrigation pour cette plaine. C'est un aquifère complexe par sa composition lithologique hétérogène et peut être qualifié selon les études géologiques comme un réservoir multicouche.

D- Le Synclinal d'El-Kantara : qui représente la zone d'étude.

3- L'hydrogéologie et les principales nappes aquifères de la plaine d'El-Kantara (zone d'étude) :

Afin de préciser la nature et la géométrie du système aquifère de la plaine d'El-Kantara, nous avons repris et réinterprété les données relatives à la géologie, à l'hydrogéologie proprement dite à l'aide des outils suivants : L'outil géologique, l'outil des sondages et l'outil hydrogéologique.

3.1-L'outil géologique :

La Région d'El-Kantara a fait l'objet de plusieurs études géologiques, dont les travaux ultérieurs entre 1939 et 1986 sont surtout axés sur la géologie structurale : R.Laffitte (1939), Bellion(1972), R.Guiraud (1973),N.Kazitani (1986) et A.Yahyaoui (1990).

Ces études montrent que l'échelle stratigraphique de ces terrains s'étale du Secondaire au Quaternaire. L'aquifère superficiel dont il est question d'étude se trouve dans les alluvions du

Mio-Plio-Quaternaire dont les formations Quaternaires occupent la plus grande superficie (Fig. V.02) .

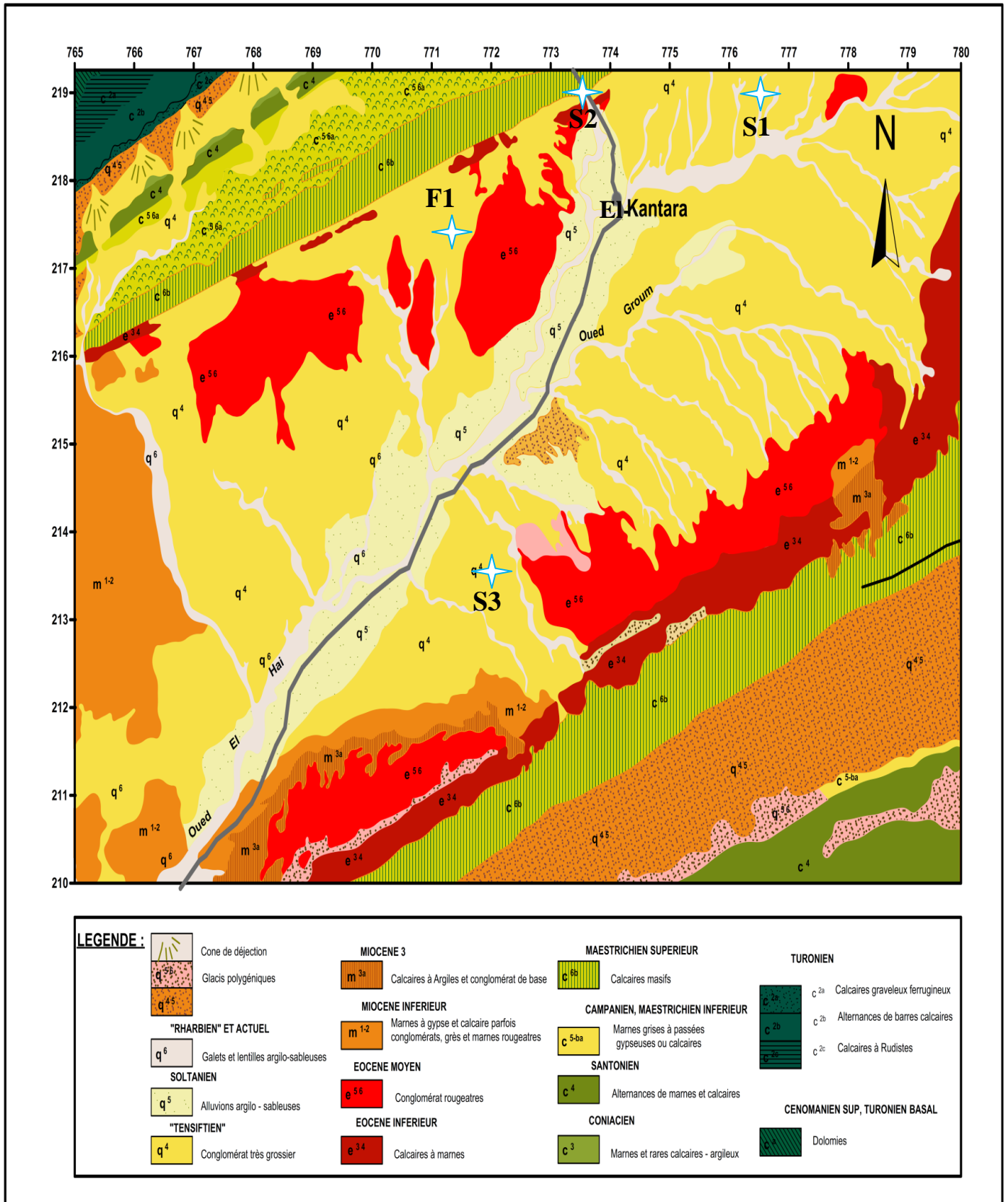


Fig. V.02 : Extrait de la carte géologique du secteur d'El-Kantara 1/50000 et situation des sondages et forage de reconnaissance (Auteur, 2022)

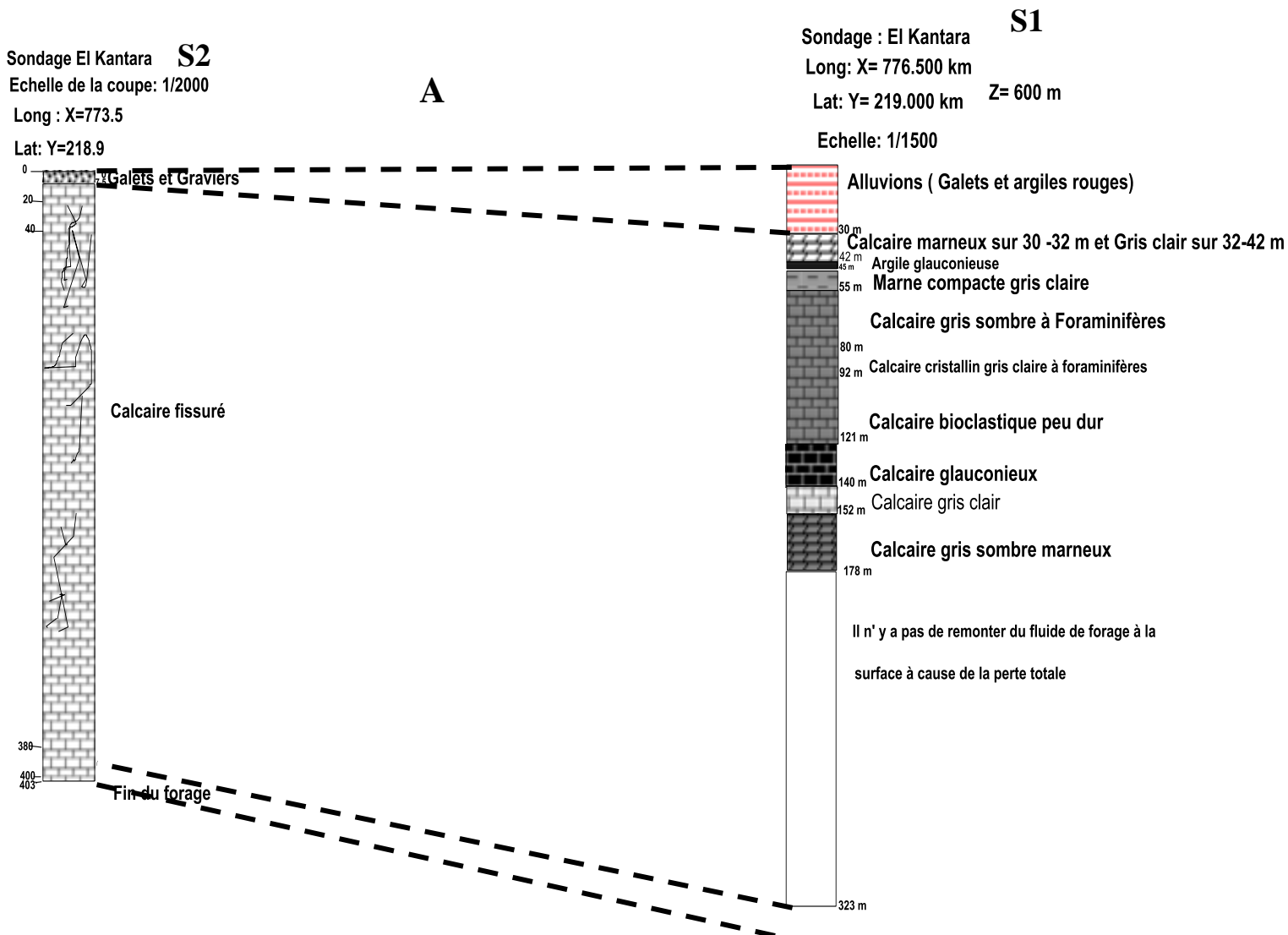
-Le quaternaire : Il s'agit d'une série de terrasses épaisses constituées essentiellement par des conglomérats, des lentilles limono-argileuses rougeâtres et de gros galets.

-Le Miocène : Il est formé de puissantes séries de conglomérats avec des passés argilo-gréseuses et des marno-calcaires.

-Le pliocène : il est constitué essentiellement par des formations gréseuses et des galets.

3.2-L'outil des sondages :

Plusieurs sondages de reconnaissance ont été réalisés ainsi que des forages d'exploitation de la Direction Hydraulique de la Wilaya de Biskra [Fig. V.03(A,B,C,D,E,F)] , nous a permis de réaliser des essais de corrélation pour faire une reconnaissance précise concernant la lithostratigraphie, l'extension et la géométrie des dépôts de la zone d'étude [Fig. V.03(A,B,C,D,E,F)] , (Fig. V .04) et (Fig. V .05) .

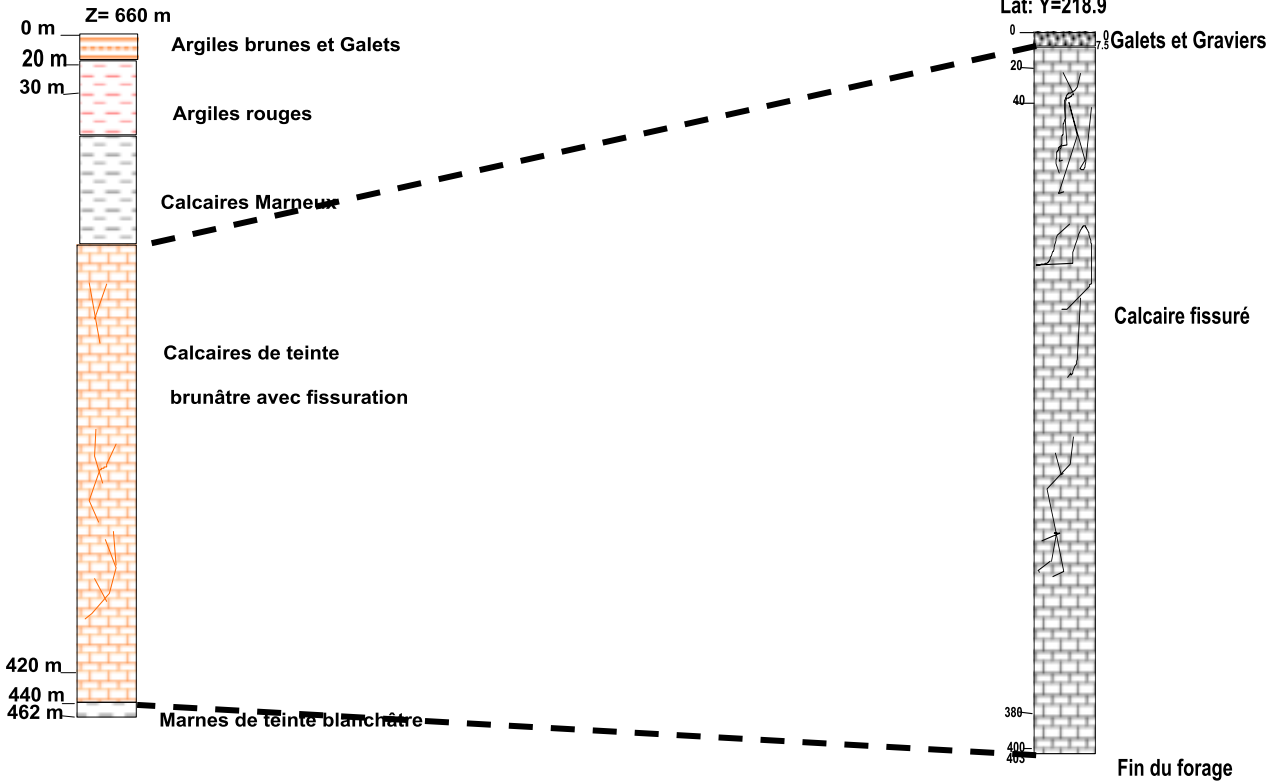


S3

Sondage El-Kantara -AEP-1
Echelle 1/2000
X=772.200 Y=213.500

B

Sondage El Kantara
Echelle de la coupe: 1/2000
Long : X=773.5
Lat: Y=218.9



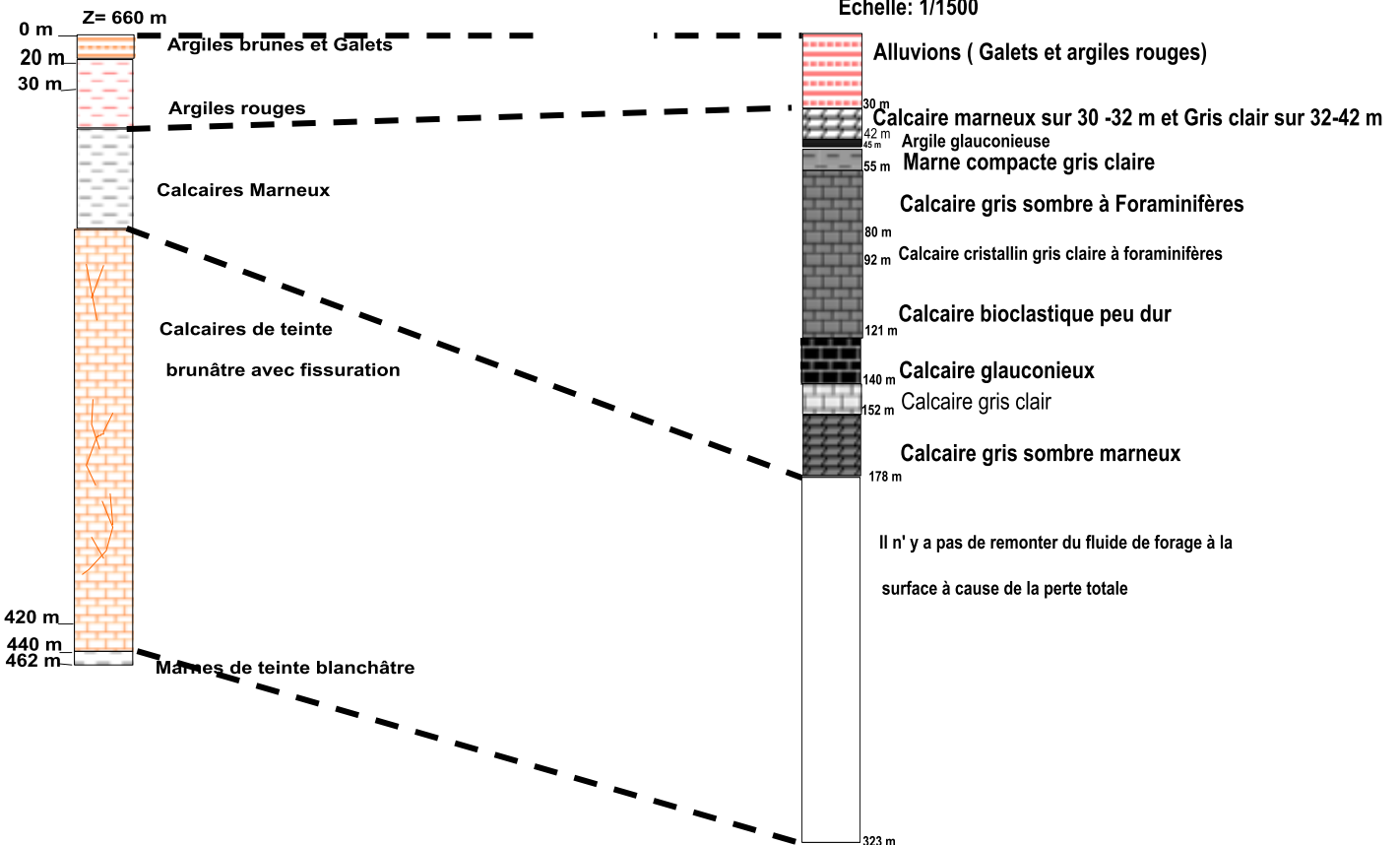
Sondage El-Kantara -AEP-1
Echelle 1/2000
X=772.200 Y=213.500

S3

C

Sondage : El Kantara
Long : X= 776.500 km
Lat: Y= 219.000 km
Echelle: 1/1500

Z= 600 m S1



Forage: el Kantara village rouge n° 3

X= 771.230

Y= 217.3

Z= 420m

F1

D

Sondage : El Kantara

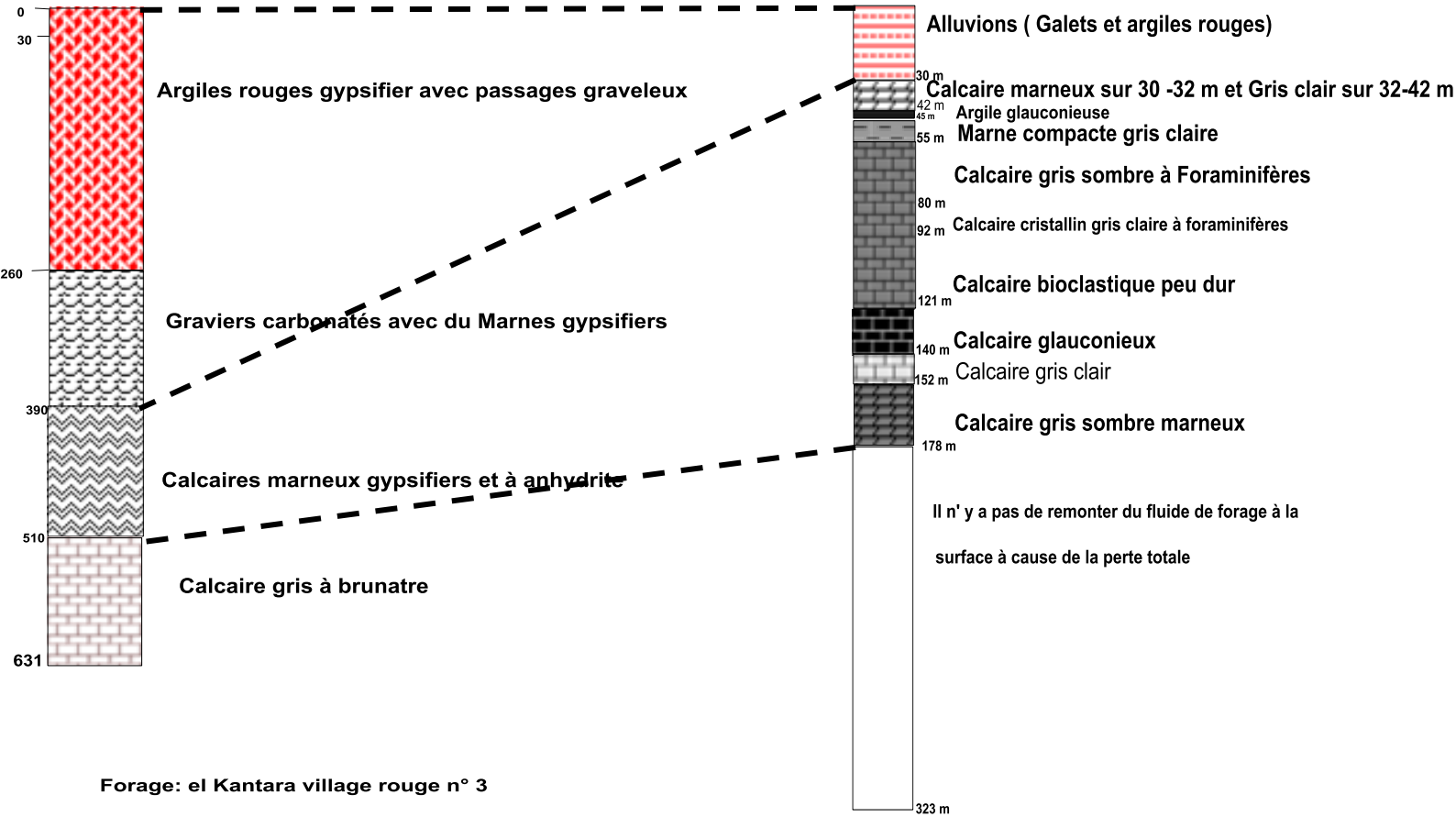
Long: X= 776.500 km

Lat: Y= 219.000 km

Z= 600 m

S1

Echelle: 1/1500



Forage: el Kantara village rouge n° 3

X= 771.230

Y= 217.3

Z= 420m

F1

E

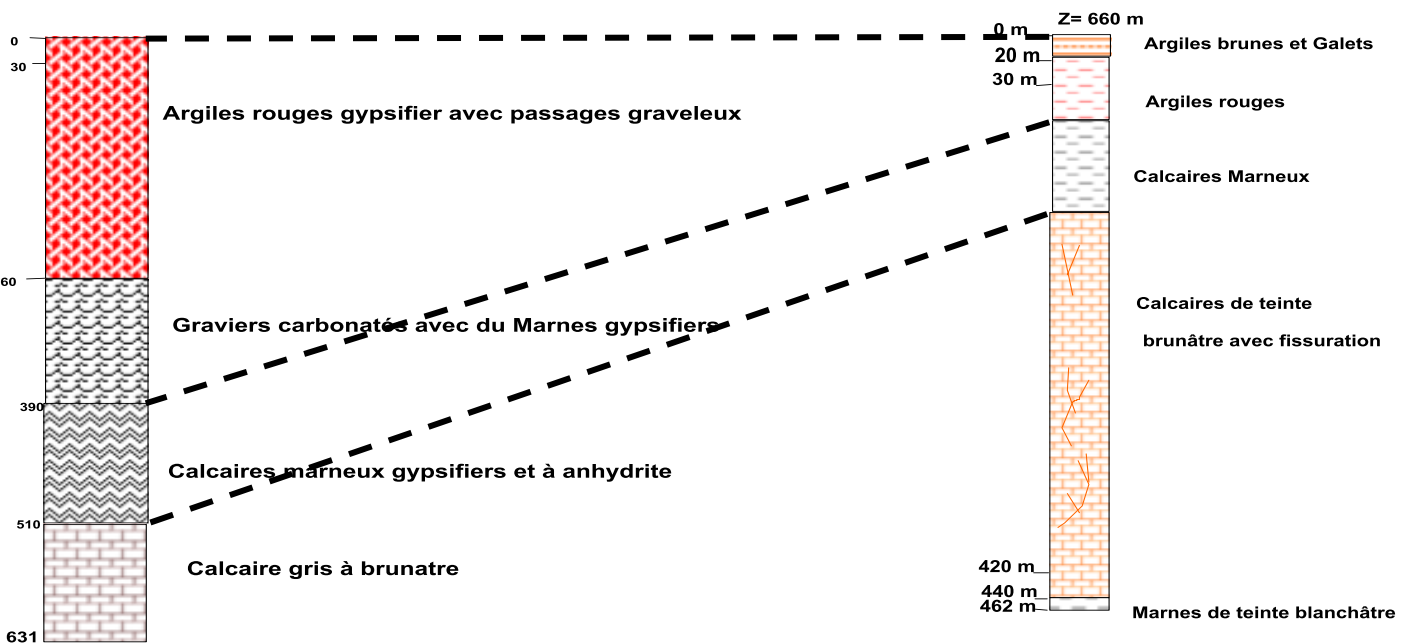
Sondage El-Kantara -AEP-1

Echelle 1/2000

X=772.200

Y=213.500

S3



Forage: el Kantara village rouge n° 3

F

S2

X= 771.230

Y= 217.3

Z= 420m

F1

Sondage El Kantara

Echelle de la coupe: 1/2000

Long : X=773.5

Lat: Y=218.9

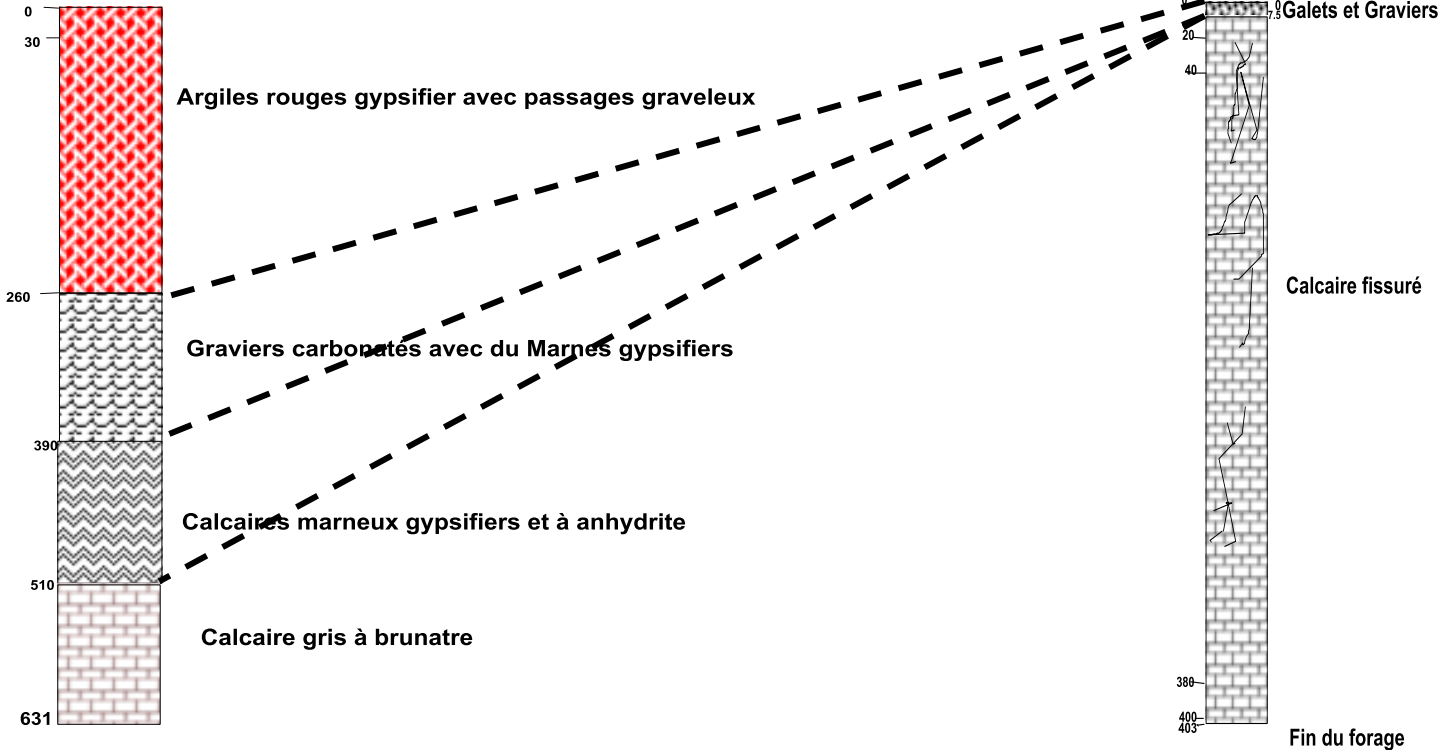


Fig. V.03 : Lithologie des sondages et des forage de reconnaissance du secteur d'El-Kantara et essais de corrélation (Auteur, 2022)

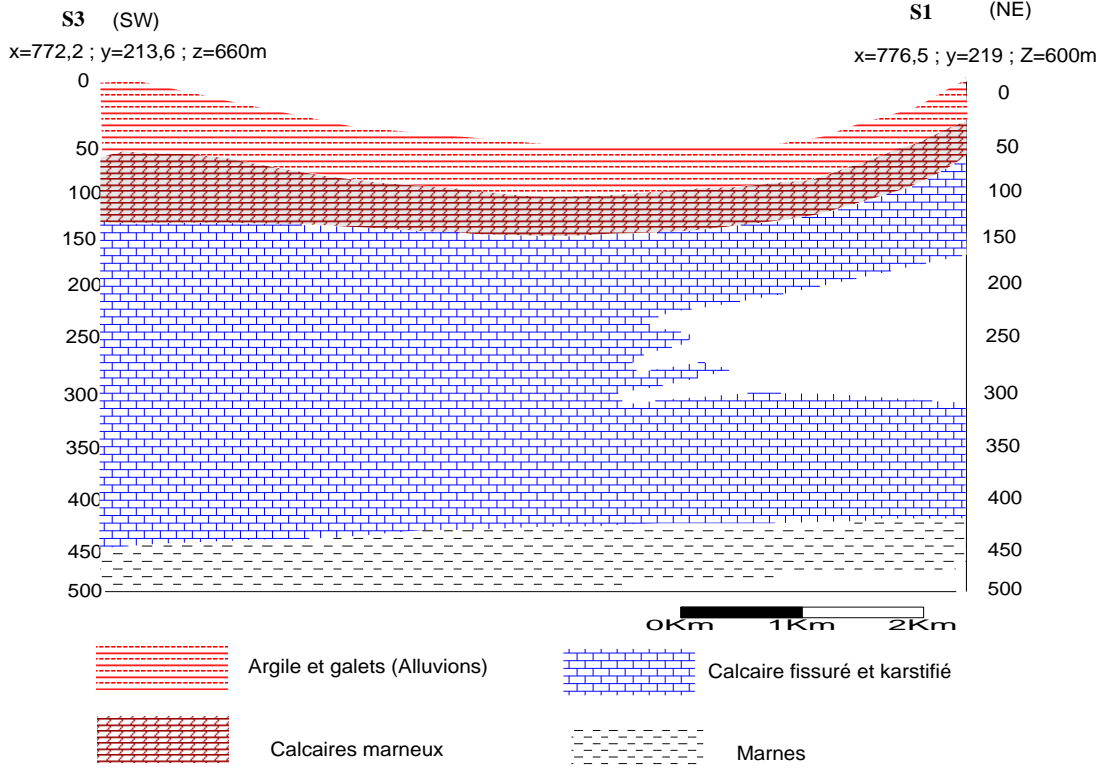


Fig. V.04 : Esquisse 1 de corrélation entre deux sondages d'orientation SW-NE (Auteur, 2022)

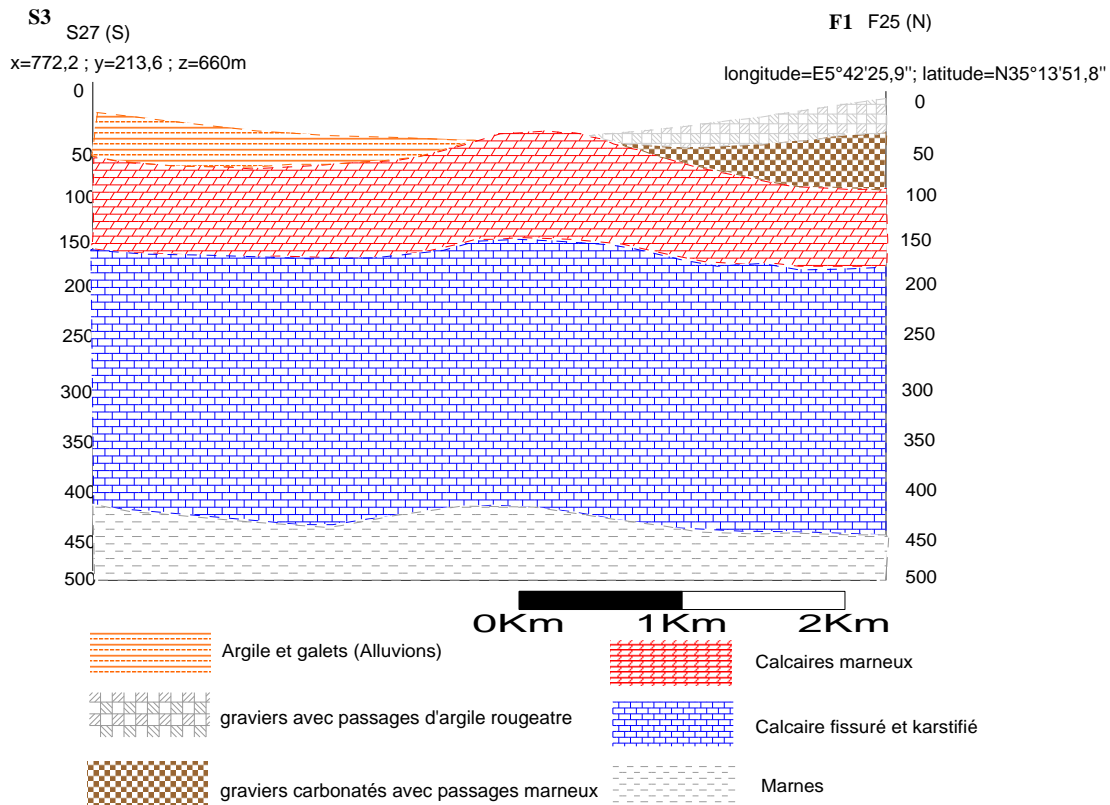


Fig. V.05 : Esquisse 2 de corrélation entre deux sondages d'orientation S-N (Auteur, 2022)

3.3-L'outil hydrogéologique :

L'étude lithostratigraphique a deux objectifs principaux. Le premier est la connaissance des principales formations constituant la zone d'étude et le deuxième est la détermination et le repérage des réservoirs potentiels essentiels et les écrans qui les séparent. La nomenclature des réservoirs peut englober des formations d'âges et de lithologies différentes tandis que, le terme écran désigne une couche ou plusieurs couches imperméables, puissantes et ayant une extension considérable.

Dans cette optique, on a basé sur la description géologique des terrains ainsi que les caractéristiques hydrogéologiques de chaque formation, on a pu établir le Log Hydrolithostratigraphique (**Fig.V.06**), qui synthétise et combine les caractéristiques géologiques et hydrogéologiques de chaque étage.

D'après le Log Hydrolithostratigraphique synthétique (**Fig.V.06**), on a pu délimiter un certain nombre de formations dont la composition lithologique permet de leur conférer le caractère de réservoir potentiel.

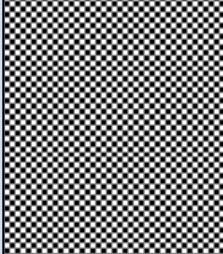
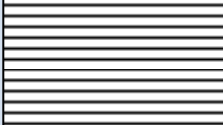
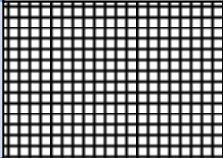

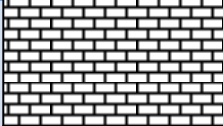

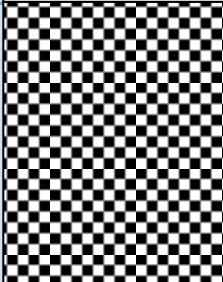
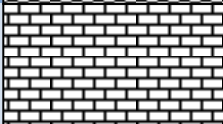
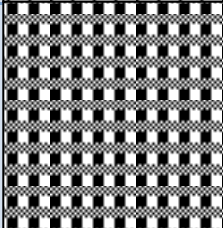
| Ere | système | lithologie épaisseur | Log stratigraphique | Hydrogéologie | |
|-------------|---------------------------|---|--|-------------------------|---------------------|
| | | | | Perméabilité | Type de nappe |
| Quaternaire | - | alluvions anciennes et actuelles |  | Zone perméable | Phréatique |
| Tertiaire | Oligocène | Marnes |  | Zone imperméable | Substratum |
| | Eocène | au sommet des calcaires marneux |  | Zone semi- perméable | Substratum |
| | | La base des marnes gypseuses |  | Zone imperméable | - |
| Secondaire | Maestrichtien | Calcaires massifs |  | Formations fissurées | Nappe Supérieure |
| | Campanien | Marnes |  | Zone imperméable | Substratum |
| | Santonien et Coniacien | Alternance de calcaires marneux, calcaires massifs et de schistes |  | Zone semi- perméable | - |
| | Turonien | Calcaires massifs |  | Formations fissurées | Nappe Inférieure |
| | Cénomaniien | Marnes et marnes gypseuses avec des calcaires marneux |  | Zone imperméable | Substratum |

Fig.V.06 : Log- Hydrolithostratigraphique synthétique d'El-Kantara (Auteur, 2012)

4- Hydrogéologie et description des aquifères potentiels Synclinal d'El-Kantara :

L'analyse des outils géologiques (cartes et colonnes lithologiques), sondages et forages et outils hydrogéologiques (Log- Hydrolithostratigraphique) a permis d'établir trois coupes hydrogéologiques (**Fig.V.07**) et de mettre en évidence les trois unités hydrogéologiques suivantes :

- ✓ La nappe phréatique du Quaternaire ;
- ✓ La nappe du Maestrichtien ;
- ✓ La nappe du Turonien.

4.1- La nappe phréatique du Quaternaire :

Ce sont des alluvions anciennes et actuelles d'âge quaternaire, poudingues, sables, croûtes calcaires d'Oued El-Kantara. Ces alluvions reposent en majeure partie sur les assises imperméables de l'Oligocène et de l'Eocène. La nappe phréatique qui se forme à la base des alluvions quaternaires, malgré un substratum imperméable, est très pauvre en eau et de faible importance. Cette nappe est exploitée par un certain nombre de puits qui peuvent atteindre 30m de profondeur et dépassent largement le niveau du thalweg d'Oued El-Hai.

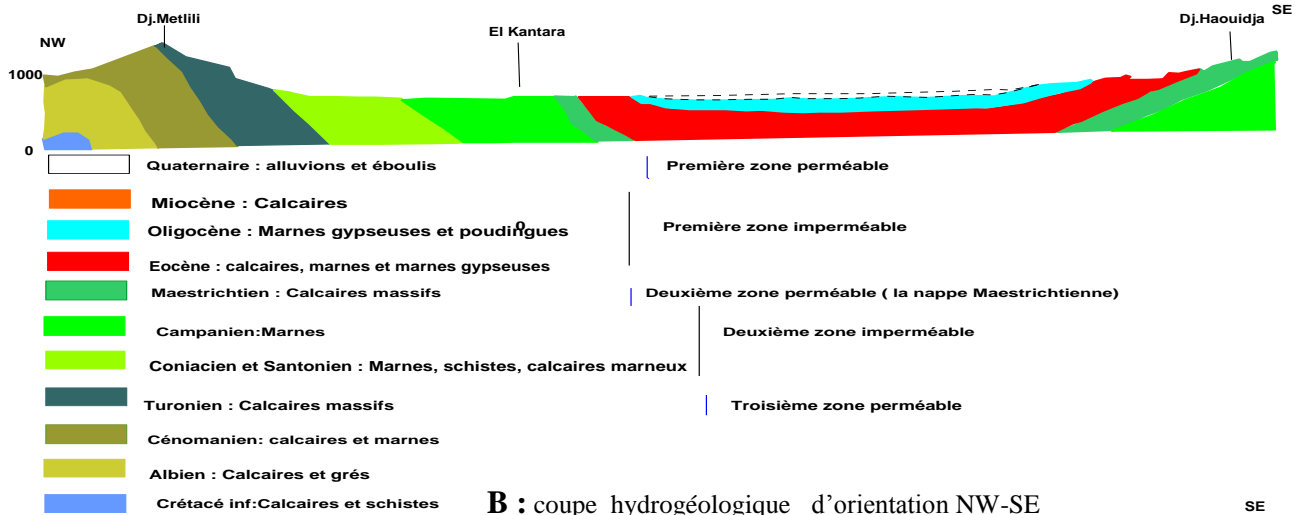
Alimentation de la nappe:

Pour ce qui concerne l'alimentation, En général l'alimentation de la nappe se fait par les précipitations c'est-à-dire par l'infiltration des oueds (Oued El-Kantara ou Oued El-Hai).

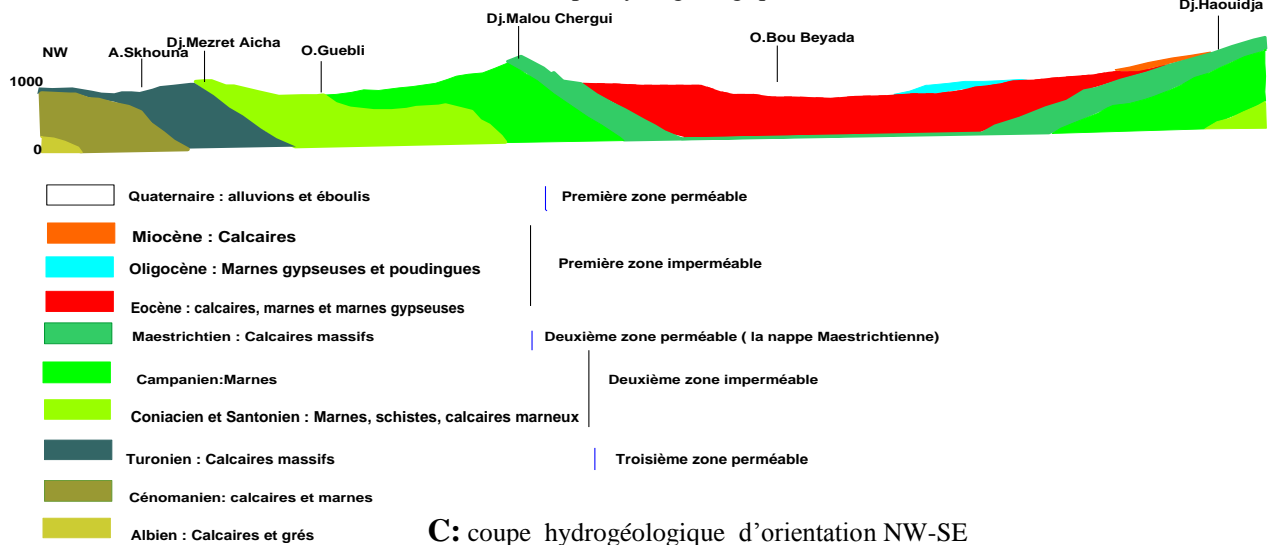
4.2- La nappe du Maestrichtien (Tab. V.01 et Tab. V.02) :

La nappe du Maestrichtien est de faible importance par son extension et la structure de la région au niveau du synclinal d'El-Kantara. Elle est constituée par des calcaires massifs perméables par fissuration. La hauteur piézométrique de cette nappe Maestrichtienne est supérieure à la côte des gorges. Jadis il existait dans les gorges de très faibles sources dans Oued El-Kantara, mais actuellement le niveau hydrostatique de la nappe est en baisse et devenu au-dessous du sol et les sources ont cessé d'exister. La nappe est caractérisée par une faible capacité et ne fournira pas un gros débit. Elle peut être exploitée, mais elle nécessite des pompes d'essais.

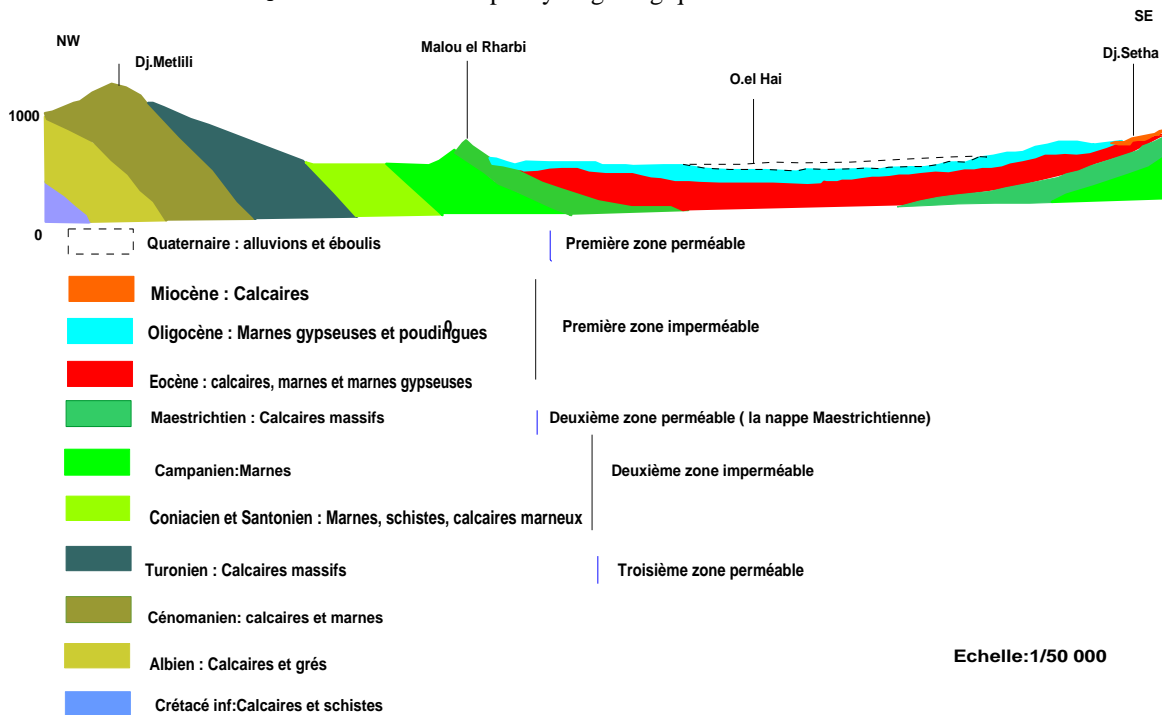
A : Coupe hydrogéologique d'orientation NW-SE



B : coupe hydrogéologique d'orientation NW-SE



C: coupe hydrogéologique d'orientation NW-SE



Echelle: 1/50 000

Fig. V. 07: Coupes hydrogéologiques d'orientation

✚ Alimentation de la nappe:

Le bassin d'alimentation de ces calcaires par rapport à l'Oasis d'El-Kantara est de très faible superficie. Il forme un triangle à l'Est de l'Oasis limité par le Djebel Malou Chergui au Nord-Ouest, le Djebel Mamalou au Nord et le Djebel Kroucha à l'Est, ce qui donne une surface de 16 km² en tout.

4.3- La nappe du Turonien (Tab. V.01 et Tab. V.02) :

Ce sont des calcaires massifs fissurés, d'une grande épaisseur, plusieurs centaines de mètres. Elle est considérée la plus importante par son extension au niveau du synclinal d'El-Kantara. L'aquifère du Turonien renferme une nappe importante, la preuve fournie par la belle source, dite Ain Skhouna émergeant dans le thalweg du même nom, à 7 km en amont d'El-Kantara. Une autre manifestation est celle d'Ain Chebaba à 10 km au Sud-ouest de l'Oasis.

✚ Alimentation de la nappe:

La nappe du Turonien semble plus importante que celle du Maastrichtien. La superficie des affleurements du Turonien est grande, autant vers le Nord-est que vers le Sud-ouest, ce qui indique que le bassin d'alimentation est donc important. D'autre part, avec le massif montagneux du Djebel Metlili, il forme la bordure Sud-est de la plaine du Hodna c'est-à-dire un autre bassin d'alimentation important.

Tab. V.01 : Etat des forages de la nappe Maastrichtienne et la nappe Turonienne destinés à l'irrigation (DHW de Biskra, 2016)

| COMMUNE | NOM DU FORAGE | DESTINATION | DATE DE REALISATION | CORDONNEES | | | PROFONDEUR | AQUIFERE | DEBIT INITIALE L/S | DEBIT EXPLOITE L/S | NIVEAU STATIQUE | NIVEAU DINAMIQUE | OBSERVATION |
|------------|--------------------------|-------------|---------------------|-------------|-------------|-----|------------|---------------|--------------------|--------------------|-----------------|------------------|---------------------|
| | | | | X | Y | Z | | | | | | | |
| EL KANTARA | EL KANTARA N° 01(PICINE) | IRRIGATION | 1977 | 05 42 10.60 | 35 13 49.50 | 650 | 403 | MAASTRICHTIEN | 40 | 10 | 7 | 110 | |
| | G.C.A 1 (SOUANA) | IRRIGATION | 2002 | 05 37 47.00 | 35 11 39.00 | 485 | 1000 | MAASTRICHTIEN | 16 | / | 104 | / | Equipement exploité |
| | G.C.A 2 (ELGAOUS) | IRRIGATION | 2002 | 05 41 54.90 | 35 15 19.80 | 624 | 900 | TURONIEN | 35 | / | / | / | Nom équipé |
| | G.C.A 3 (ELGAOUS) | IRRIGATION | 2002 | 05 41 25.80 | 35 15 12.90 | 635 | 495 | TURONIEN | 15 | / | / | / | Nom équipé |
| | SKHOUNE | IRRIGATION | 2007 | 05 44 2.40 | 35 16 55.30 | 605 | / | TURONIEN | | / | / | / | Nom équipé |

Tab. V.02 Etat des forages de la nappe Maastrichtienne et la nappe Turonienne destinés à l'alimentation en eau potable (DHW de Biskra, 2016)

| COMMUNE | NOM DU FORAGE | DESTINATION | DATE DE REALISATION | CORDONNEES | | | PROFONDEUR | AQUIFERE | DEBIT INITIAL | DEBIT EXPLOITE | NIVEAU STATIQUE | NIVEAU DINAMIQUE | OBSERVATION | |
|------------|----------------------------------|--------------|---------------------|-------------|-------------|-----|------------|---------------|---------------|----------------|-----------------|------------------|--------------------|--|
| | | | | X | Y | Z | | | | | | | | |
| EL KANTARA | EL KANTARA N°2 05 juillet est | A.E.P | 1987 | 05 42 51.10 | 35 13 57.30 | 606 | 438 | MAASTRICHTIEN | 40 | 10 | 80 | 180 | | |
| | EL KANTARA N°3 05 juillet | A.E.P | 1989 | 05 43 35.90 | 35 14 14.70 | 600 | 323 | MAASTRICHTIEN | / | 10 | 80 | 200 | | |
| | EL KANTARA N°4 AEP | A.E.P | 2004 | 05 42 24.00 | 35 13 49.30 | / | 350 | MAASTRICHTIEN | 15 | 15 | 111 | 127 | | |
| | EL KANTARA N°3 08 Mai | A.E.P | 1995 | 05 42 46.50 | 35 13 39.40 | 650 | 500 | MAASTRICHTIEN | 13 | 10 | 80 | 180 | | |
| | TOTAL EL KANTARA (AEP) | | | | | | | | 68 | 45 | | | | |
| | EL KANTARA N°5 08 Mai | NON EXPLOITE | 2004 | 05 41 33.10 | 35 13 32.90 | 577 | 330 | MAASTRICHTIEN | 13 | / | 114 | 120 | TRAVAUX ACHEVEMENT | |

5-Etude piézométrique :

La mesure du niveau des eaux souterraines est d'une importance fondamentale dans l'hydrogéologie. Le niveau des eaux souterraines de l'aquifère peut être utilisé pour plusieurs raisons, la construction d'une carte piézométrique qui est nécessaire afin de connaître l'extension de l'aquifère, la direction et la vitesse de l'écoulement des eaux souterraines, ainsi que leur zones d'accumulation. La mesure de niveau des eaux souterraines est effectuée à l'aide d'une sonde dont le capteur est réactif à la conductivité de l'eau. Lorsque la sonde atteint le niveau de l'interface air/eau, un contact électrique est établi entre deux tiges métalliques, déclenchant un signal sonore et lumineux.

Les mesures obtenues permettent d'établir une carte piézométrique. L'étude de cette dernière nous permet de connaître :

- la forme de l'écoulement de la nappe ;
- Le sens de l'écoulement général ;
- La profondeur de la surface piézométrique ;
- Figurent également les conditions aux limites hydrodynamiques.

5.1-Cartes d'inventaire des points d'eau de la nappe phréatique du Quaternaire :

Plusieurs campagnes ont été entreprises par ANRH en (2008), L'auteur en (2011 et 2012) et ABHS en 2017 ont permis d'établir deux (02) cartes d'inventaires des points d'eau (Fig. V.08) et (Fig. V.09).

5.1.1-Carte d'inventaire des points d'eau (2011et 2012) :

La région comporte 21 puits traditionnels avec des diamètres qui varient entre 3 à 4m, équipés par des pompes horizontales (Tab. V.03), dont la profondeur varie entre 5m et 35m. Ils sont beaucoup plus localisés dans la partie Sud du terrain figure (Fig. V.08) et (Fig. V.09). La région est traversée par oued El-Hai (cours d'eau principal) qui ne coule qu'à la faveur des précipitations et draine les eaux usées de la ville en général.

Tab. V.03 : Caractéristiques des points d'eau inventoriées

| Points d'eau | z(m) | Septembre 2011 | | Février 2012 | | Profondeur (m) |
|--------------|------|----------------|-------|--------------|-------|----------------|
| | | N.S(m) | H(m) | N.S(m) | H(m) | |
| 1 | 450 | 9,5 | 440,5 | 7,5 | 442,5 | 13,8 |
| 2 | 450 | 17 | 425 | 8 | 442 | 22 |
| 3 | 445 | 6,8 | 438,2 | 7,7 | 437,3 | 10 |
| 4 | 435 | 2 | 430,5 | 2,5 | 432,5 | 4,5 |
| 5 | 450 | 24 | 426 | 9,5 | 440,5 | 34,5 |
| 6 | 440 | 23 | 407 | 10 | 430 | 31 |
| 7 | 430 | 17,9 | 401,6 | 10,5 | 419,5 | 23 |
| 8 | 473 | 8,7 | 455,9 | 8,4 | 464,6 | 13 |
| 9 | 470 | 4 | 461,3 | 4,7 | 465,3 | 7,5 |
| 10 | 415 | 7,4 | 407,6 | 5 | 410 | 12,5 |
| 11 | 480 | 3 | 475 | 2 | 478 | 5,2 |
| 12 | 428 | 9,7 | 412,3 | 6 | 422 | 14 |
| 13 | 430 | 7,5 | 422,5 | 5 | 425 | 14 |
| 14 | 455 | 7,6 | 447,4 | 8 | 447 | 14 |
| 15 | 455 | 3,5 | 447,8 | 3,7 | 451,3 | 8 |
| 16 | 418 | 4 | 411 | 3 | 415 | 10 |
| 17 | 450 | 6 | 444 | 6,5 | 443,5 | 8,6 |
| 18 | 470 | 7,5 | 462,5 | 9 | 461 | 15 |
| 19 | 435 | 13 | 411 | 11 | 424 | 17 |
| 20 | 430 | 8 | 414,5 | 7,5 | 422,5 | 18 |
| 21 | 490 | 3,7 | 486,3 | 5,1 | 484,9 | 18,5 |

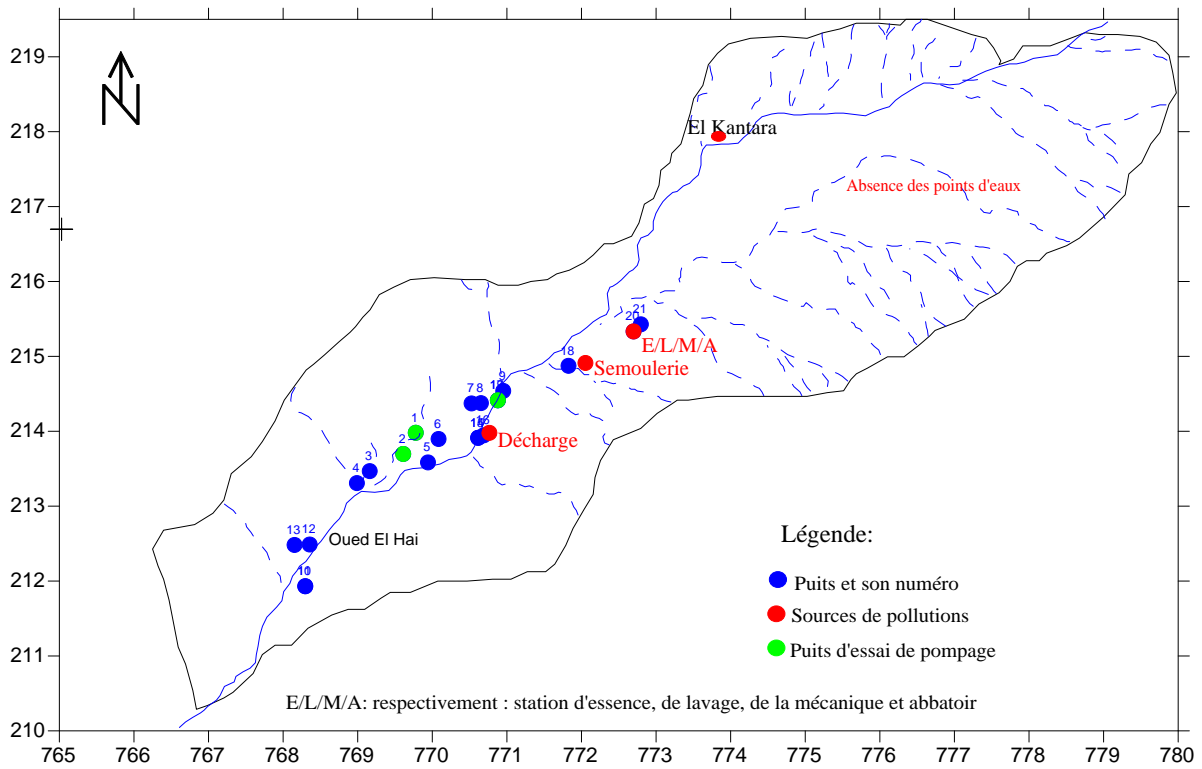


Fig. V.08 : Carte d'inventaire des points d'eau (Auteur, 2012)

0Km 1Km 2Km

5.1.2-Carte d'inventaire des points d'eau (2017) :

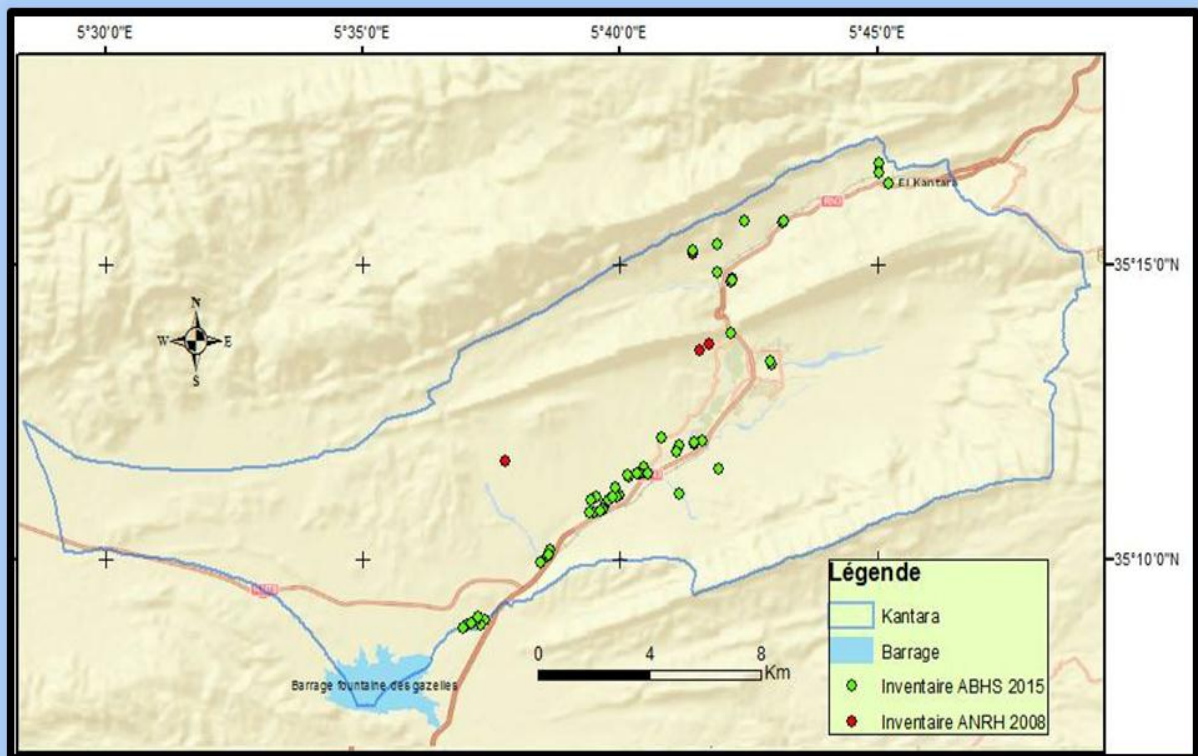


Fig. V.09 : Carte d'inventaire des points d'eau (Adjaout et Allouche, 2017).

Il convient de remarquer à travers ces deux cartes d'inventaire que les points d'eau dans la commune d'El-Kantara sont en nette augmentation, vu l'explosion des besoins entraînée par la croissance démographique et la demande en nette croissance dans tous les secteurs et principalement l'agriculture.

5.2-La piézométrie de nappe phréatique du Quaternaire (l'aquifère Alluvionnaire):

Les cartes piézométriques ont été établies à partir des mesures des profondeurs d'eau (niveaux statiques) et des cotes altimétriques prises respectivement à l'aide d'une sonde piézométrique et d'un GPS. L'équidistance des courbes piézométriques est de 05 à 10 mètres.

5.2.1.-Carte piézométrique. Septembre 2011 :

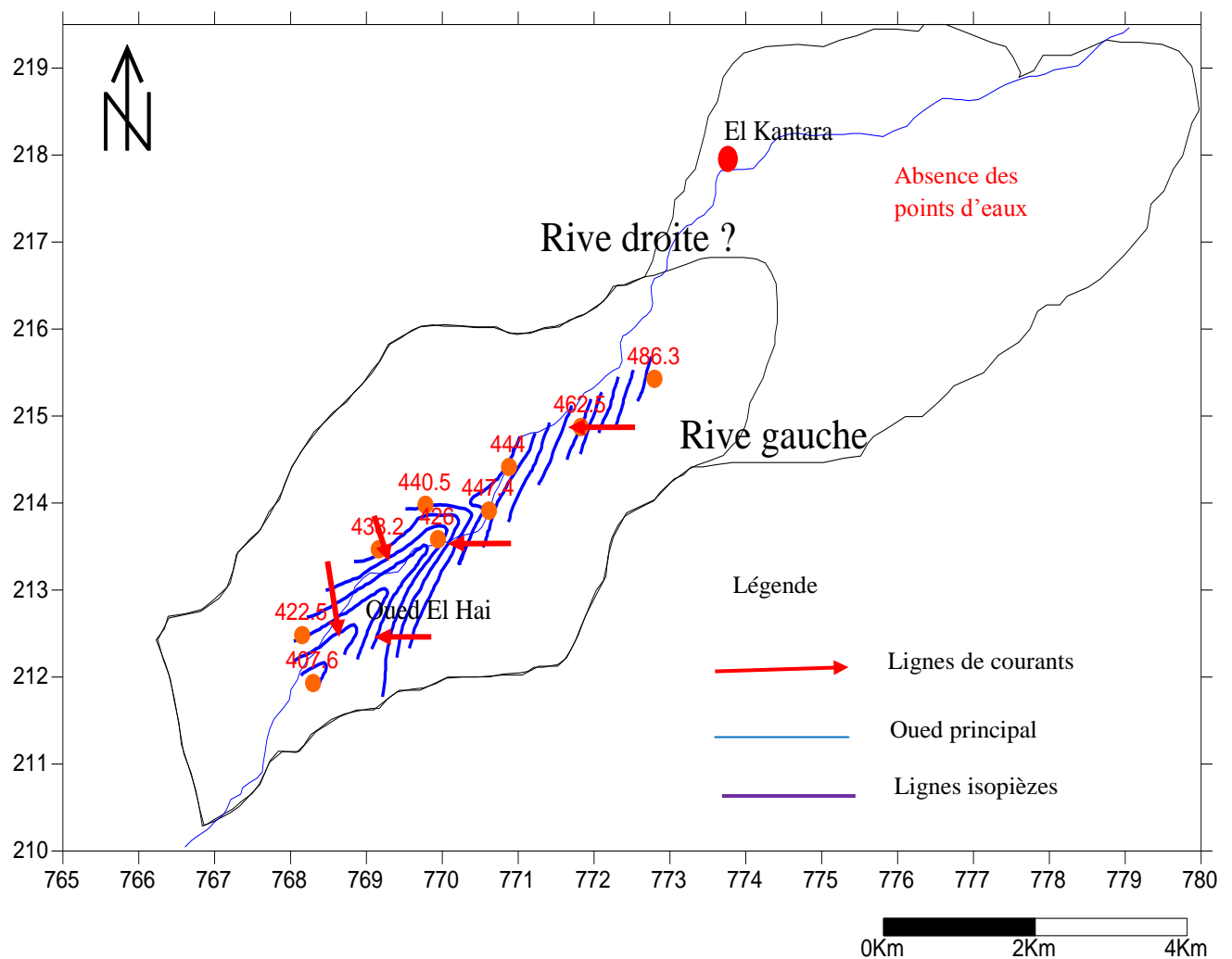


Fig. V.10 : Carte piézométrique de l'aquifère alluvionnaire de la région d'El Kantara Sep.2011. (Auteur, 2012).

L'observation de la morphologie de la carte piézométrique de la période des basses eaux (Septembre 2011) permet de constater que l'écoulement souterrain se fait, en général, suivant la direction NE-SW (**Fig. V.10**). L'axe de drainage des eaux souterraines coïncide sensiblement avec le parcours de l'Oued El Hai qui draine les eaux de surface. On note une augmentation remarquable du gradient hydraulique notamment dans la partie centrale; avec des courbes isopièzes serrés témoignant de l'importance de la vitesse d'écoulement. Par contre la bordure Est de la plaine d'El-Kantara est caractérisée par des courbes espacées signifiant un écoulement lent.

5.2.2-Carte piézométrique. Février 2012 :

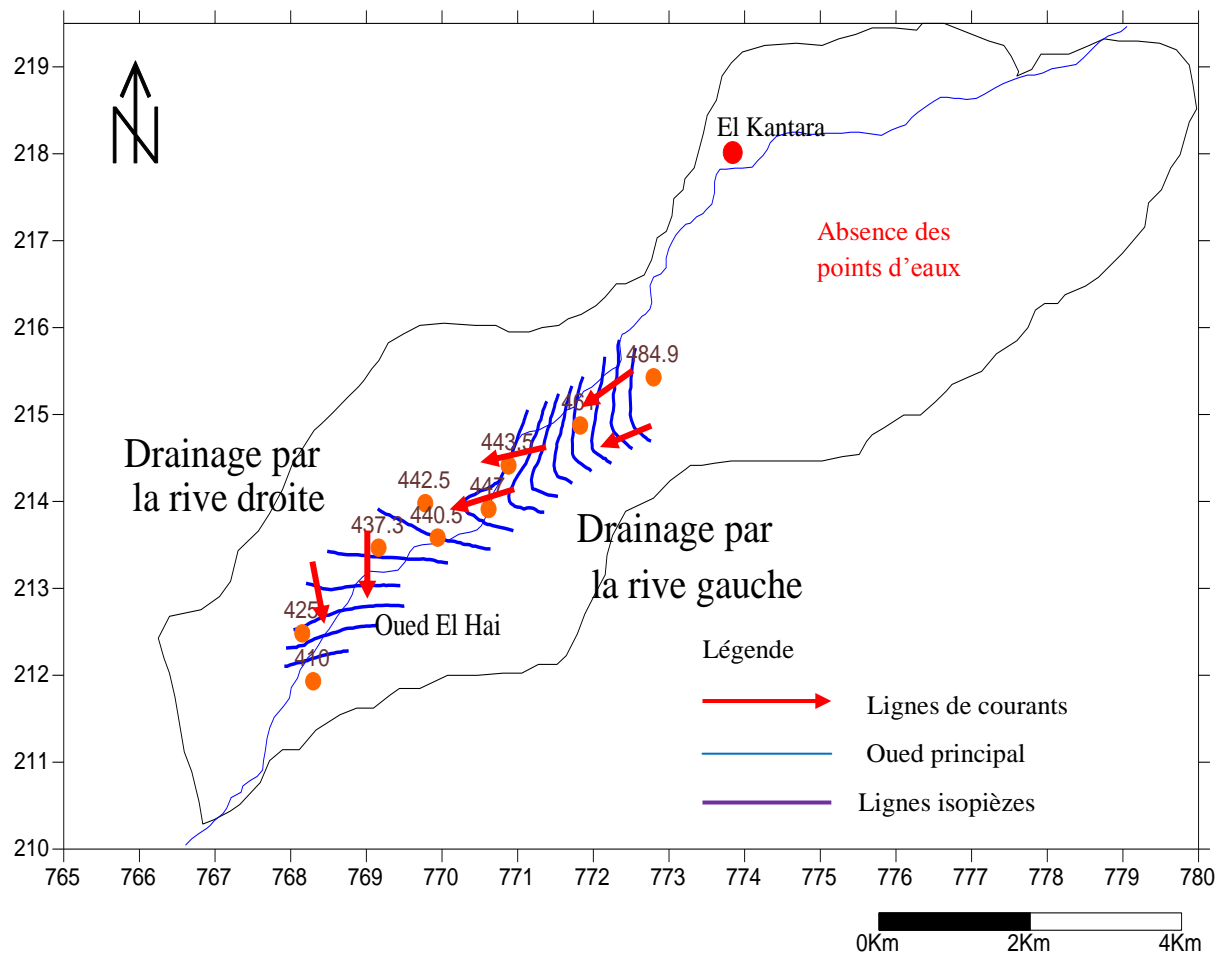


Fig. V.11 : Carte piézométrique de l'aquifère alluvionnaire de la région d'El -Kantara Fév.2012. (Auteur, 2012).

L'examen de la morphologie de la carte piézométrique de la période des hautes eaux (Février 2012) conduit aux mêmes constatations que celles signalées dans la carte précédente de la période des basses eaux, ce qui traduit le même régime d'écoulement (**Fig. V.11**). Cependant, on note une augmentation des cotes piézométriques des puits par rapport à la période précédente, due à la recharge de la nappe suite à la forte pluviométrie.

5.2.3.-Carte piézométrique Mai 2017 :

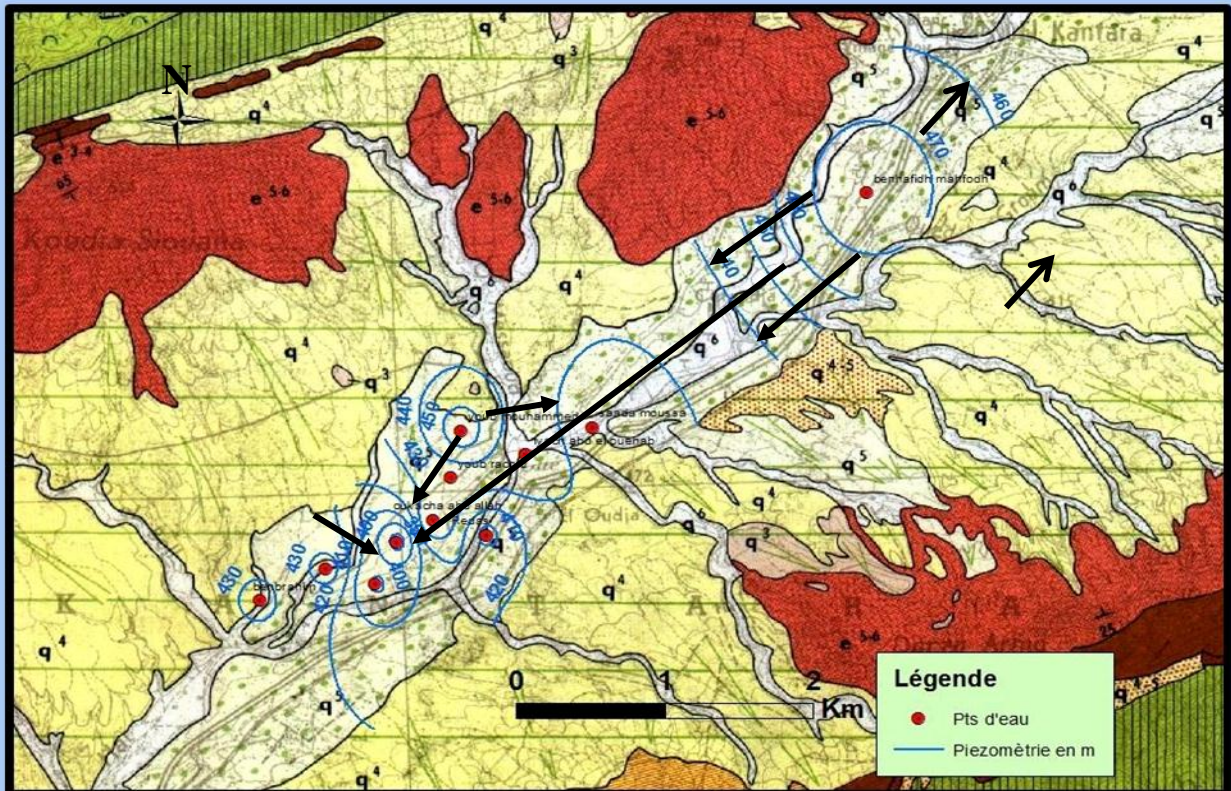


Fig. V.12 : Carte piézométrique de l'aquifère alluvionnaire de la région d'El- Kantara en 2017 (Adjaout et Allouche, 2017).

L'observation de la morphologie de la carte piézométrique (2017), conduit aux mêmes résultats que les cartes précédentes. Un même régime d'écoulement, du Nord-est vers le Sud-ouest, (**Fig. V.12**). La carte piézométrique obtenue montre que tous les écoulements convergent vers deux points. Le centre de la plaine d'El-Kantara qui représente le premier point de convergence (la première dépression piézométrique) qui coïncide avec le cône de déjection d'Oued El-Hai .Cependant le deuxième point de convergence (la deuxième dépression piézométrique) coïncide avec l'exutoire du Bassin versant de la plaine.

5.3-Evolution de la piézométrie entre 2011 et 2017 : Nous avons tenté de faire une analyse comparative entre la piézométrie de la campagne des hautes eaux avec celle des basses eaux et celle du Septembre 2011 et celle du Mai 2017. Cette comparaison fait ressortir :

-Un battement important du niveau se manifeste dans la partie centrale voir la carte de battement obtenue des cartes piézométriques établies au mois de Septembre 2011 et le mois de Février 2012 (**Fig. V.13**) .

- Une baisse généralisée de la piézométrie d'environ 6 m en moyenne, engendrée par :
- La nappe est influencée par le captage ; l'accroissement considérable du nombre de puits ayant pour conséquence une augmentation du débit de pompage (l'augmentation de l'exploitation).
- La diminution de la recharge par les précipitations due à la longue sécheresse qui règne dans la région ces dernières années, (**Fig. V.14**) .

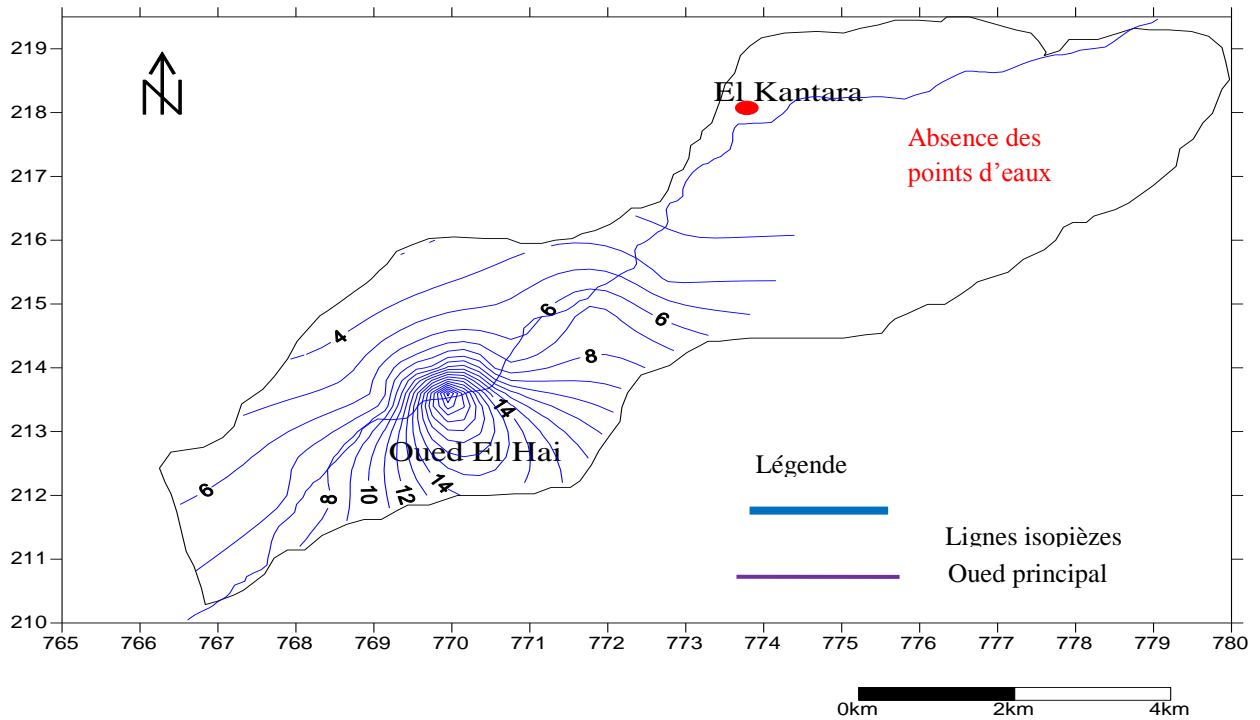


Fig. V.13 : Carte de battement de l'aquifère alluvionnaire de la région d'El -Kantara. (Auteur, 2022).

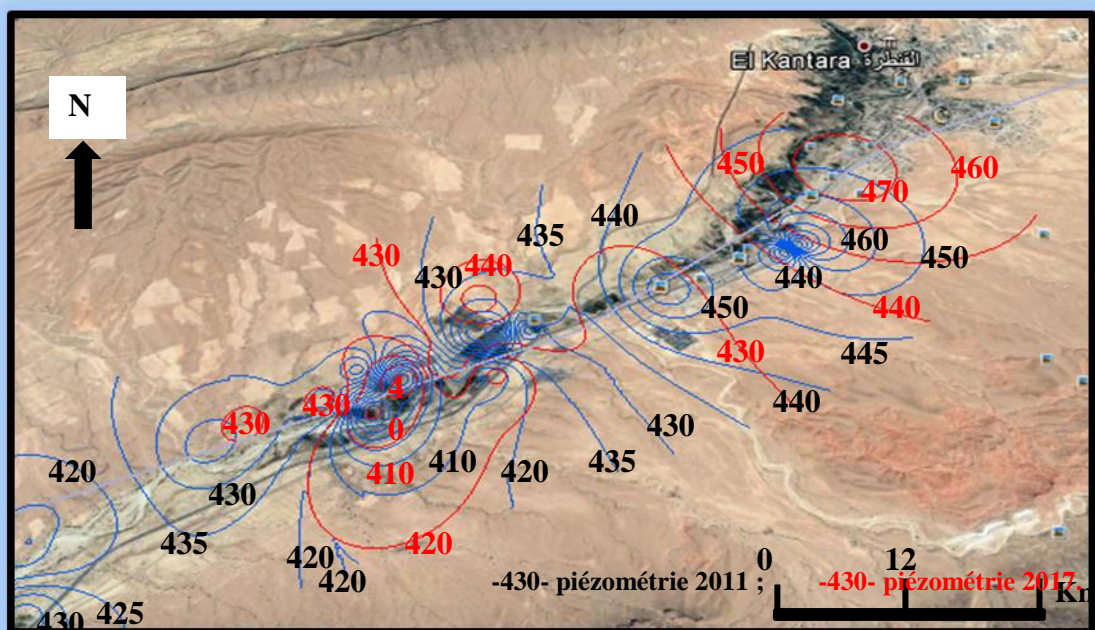


Fig. V.14 : Carte d'évolution de la piézométrie de l'aquifère alluvionnaire de la région d'El- Kantara entre 2011et 2017 (Adjaout et Allouche, 2017).

6-Les conditions aux limites :

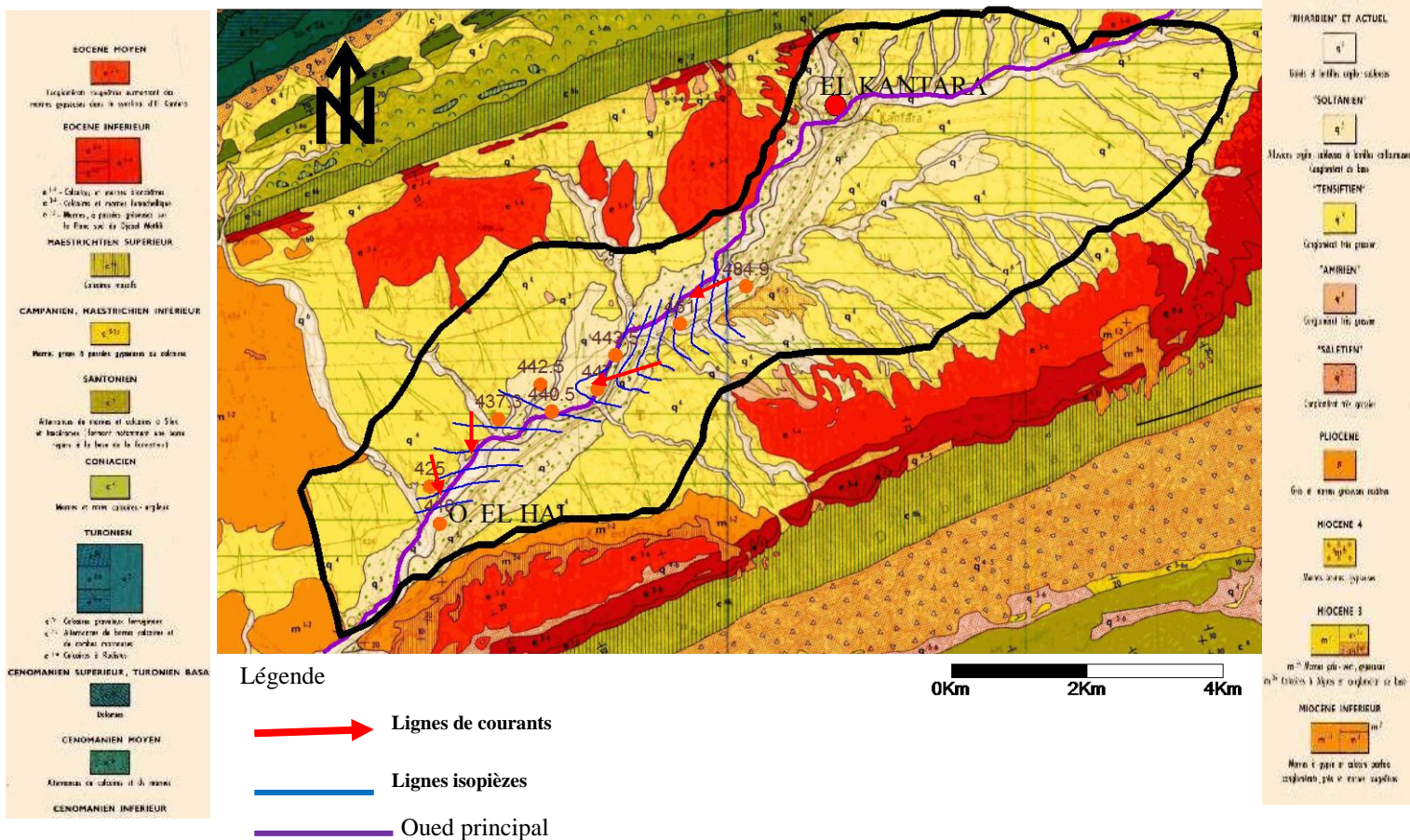


Fig. V.15 : Carte des conditions aux limites de la région d’El-Kantara (Auteur, 2012)

Dans le but de mieux comprendre le fonctionnement hydraulique de la nappe, on a établi la carte des conditions aux limites de la nappe aquifère d’El-Kantara (**Fig. V.15**). Cette carte a été établie en se basant sur les caractéristiques lithologiques des formations géologiques et les relevés piézométriques.

La nappe du Quaternaire est alimentée directement par la pluie et l’écène adjacent. Les calcaires éocènes sont en contact avec les alluvions quaternaires aquifères (qui souvent drainent les calcaires maestrichtiens). Donc la présence des calcaires fracturés autour de la région permettant l’alimentation de la nappe alluviale selon les directions NE-SW et N-S.

7-Les caractéristiques hydrodynamiques de l’aquifère :

Ces caractéristiques sont déterminées à l’aide d’essai de pompage. Le but de ces essais est double, tout d’abord, il sert à déterminer les caractéristiques hydrauliques d’un aquifère. C’est ce qu’on appelle souvent « un essai de nappe », car avant tout

c'est la nappe que l'on teste. Un essai convenablement programmé et exécuté avec soin et doit fournir des informations capitales pour résoudre un bon nombre de problèmes régionaux ou locaux de l'écoulement souterrain, tel que la détermination des conditions aux limites. C'est le second but.

On obtient ces renseignements par l'interprétation des essais de pompages réalisés sur site. La détermination de la perméabilité (transmissivité) et/ou du coefficient d'emménagement de l'aquifère, utile pour la modélisation de son fonctionnement, se fait généralement en utilisant les équations de DUPUIT pour les pompages en régime permanent ou de THEIS-JACOB pour les pompages en régime transitoire.

Certains préparatifs sont indispensables à tout essai de pompage. Il s'agit notamment de rassembler des informations sur le puits qui sera testé. Les fruits de ce travail de préparation peuvent influencer le choix de l'essai et permettront certainement d'obtenir des résultats d'une plus grande utilité.

Les deux paramètres qui doivent être mesurés lors de tout essai de pompage sont le niveau d'eau le débit d'extraction de l'eau.

- Le niveau piézométrique est mesuré à l'aide d'une sonde piézométrique ;
- Le débit est mesuré à l'aide d'un seau et un chronomètre, la pompe déverse l'eau dans un seau de volume connu, et on enregistre le temps nécessaire pour remplir le seau. Le débit est ensuite calculé en divisant le volume du seau par le temps nécessaire à le remplir.

7.1-Essais de pompages effectués dans la plaine d'El-Kantara:

On a choisi trois puits dispersés dans la plaine d'El-Kantara et selon les moyens qui nous ont été offerts sur terrain pour effectuer nos essais voir la (**Fig. V.08**) et (**Tab. V.04**).

Tab. V.04 : Caractéristiques du pompage d'essai aux puits d'El -Kantara

| Points d'eau | Durée | Débit m ³ /s | Type d'essai |
|--------------|-------|-------------------------|--------------------|
| 1 | 5 H | 3 ,51 | Décente / Remontée |
| 2 | 8 H | 2 ,891 | Décente / Remontée |
| 17 | 8H | 1 ,41 | Décente/ Remontée |

7.2-Interprétation des essais de pompage

L'interprétation des pompages d'essai repose sur des méthodes graphiques d'approximation, ces méthodes sont toutes basées sur les hypothèses suivantes :

- Le débit est supposé constant pendant toute la durée de pompage.
- La surface de la nappe est supposée être au repos avant le début du pompage.
- Le puits ou forage captent la nappe sur la totalité de son épaisseur.
- L'écoulement est supposé laminaire.
- L'aquifère est d'extension illimitée.

7.3-Interprétation des essais de pompage par l'approximation de Cooper-Jacob :

7.3.1 Étude de rabattement pendant le pompage (durant la descente) :

La méthode de JACOB (COOPER et JACOB, 1946) s'appuie elle aussi sur la formule de Theis; cependant les conditions de son application sont plus restrictives que celles de la méthode de Theis. Dans la formule de Theis

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \int_u^{\infty} \frac{e^{-y}}{y} dy = \frac{Q}{4\pi T} W(u)$$

On peut remplacer la fonction exponentielle intégrale par un développement en série convergente. Ainsi, le rabattement s s'écrit

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \left(-0.5772 - \ln u + u - \frac{u^2}{2.2!} + \frac{u^2}{2.2!} - \frac{u^2}{2.2!} + \dots \right)$$

A partir de $u = \frac{r^2 s}{4Tt}$ on voit que u décroît quand le temps de pompage augmente.

Ainsi, pour de grandes valeurs de t et/ou de faibles valeurs de r , les termes à droite de $\ln u$ dans la série de l'équation ci-dessus deviennent négligeables, et si $u < 0,01$, le rabattement peut s'exprimer sous la forme asymptotique

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \left(-0.5772 - \ln \frac{r^2 s}{4\pi T} \right)$$

Après arrangement et passage au logarithme décimal, cette Equation se réduit à

$$s = \frac{2.3Q}{4\pi T} \log \frac{2.25Tt}{r^2 s}$$

Par conséquent, si l'on porte le rabattement s en fonction du logarithme du temps t , on obtient une ligne droite. On prolonge cette ligne jusqu'à l'axe des abscisses, et le point d'intersection a pour coordonnées $s = 0$ et $t = t_0$.

Si l'on porte ces valeurs dans l'équation précédente, on obtient :

$$0 = \frac{0.183Q}{T} \log \frac{2.25 T t_0}{r^2 S}$$

Et comme $\frac{2.3Q}{4\pi T} \neq 0$, il s'ensuit que $\frac{2.25 T t_0}{r^2 S} = 1$ Soit, $S = \frac{2.25 T t_0}{r^2}$

Si maintenant $t/t_0=10$, d'où $\log t/t_0 = 1$ on peut remplacer s par Δs , c'est à dire par la différence de rabattement par cycle \log de temps, ce qui donne : $T = \frac{2.3Q}{4\pi \Delta s}$

7.3.1.1-Conditions d'application :

On doit satisfaire aux hypothèses et conditions suivantes:

- Les mêmes conditions que celles de la méthode de Theis.
- Les valeurs de u sont faibles ($u < 0,01$), c'est à dire que r est petit ou que t est grand.

La condition que u soit faible est atteinte en une heure ou même moins dans une nappe captive si l'on n'est pas trop éloigné du puits de pompage. Par contre, dans une nappe libre, cela peut prendre 12 h ou même davantage.

7.3.1.2-Mode opératoire :

- On Porte les valeurs de s en fonction du temps correspondant t sur un papier semi-logarithmique (t en échelle logarithmique) et tracer la droite passant par les points obtenus.
- On Prolonge la droite jusqu'à l'axe des temps où $s=0$, et lire la valeur de t_0 .
- On Calcule la pente de la droite, c'est à dire la différence de rabattement Δs par cycle \log de temps.

$$a = \frac{\Delta_1 - \Delta_2}{\log t_2 - \log t_1}$$

Pour un cycle logarithmique : $\log 100 - \log 10 = 1 \rightarrow a = \Delta \text{ cycle}$

$$\Delta \text{ cycle} = 0.183 \frac{Q}{T} \Rightarrow T = 0.183 \frac{Q}{\Delta_c}$$

$$\Delta = 0 = \frac{0.183Q}{T} \log \frac{2.25 T t_0}{r^2 S} / \frac{0.183Q}{T} \neq 0$$

$$\log \frac{2.25 T t_0}{r^2 S} = 0 \Rightarrow \log \frac{2.25 T t_0}{r^2 S} = 1 \Rightarrow S = \frac{2.25 T t_0}{r^2 S}$$

- On Porte les valeurs de Q et de Δs dans l'équation et résoudre par rapport à T .
Connaissant T et t_0 calculer S .

7.3.2-Étude de rabattement pendant le pompage (durant la remonté) :

Après l'arrêt de pompage, la nappe continue à fournir de l'eau comme s'il y avait une poursuite fictive de pompage, mais d'un autre côté l'eau remonte dans le puits comme s'il y avait injection de débit dans le puits après t_a ;

Les rabattements observés après l'arrêt de pompage résultent donc :

- D'un rabattement (s_1) qui est du à la poursuite fictive de pompage à un débit Q et pendant un temps (t).
- A un rabattement (s_2) qui est du à une injection fictive qui se produit à partir de l'arrêt de pompage (t').

Ces rabattements, on les appelle : **rabattements résiduels**.

$$s = s_1 - s_2 \quad \Rightarrow \quad s = \frac{0.183Q}{T} \log \frac{2.25 T t}{r^2 S} - \frac{0.183Q}{T} \log \frac{2.25 T t'}{r^2 S}$$

$$\Rightarrow \quad s = \frac{0.183Q}{T} \log \frac{t}{t'} \text{ Avec :}$$

s : rabattements après l'arrêt de pompage (m).

t : temps compté depuis le début de pompage (s).

t' : temps compté depuis l'arrêt de pompage (s).

T : transmissivité (m^2/s)

7.4-Application de la méthode de Cooper-Jacob :

On a réalisé trois essais de pompage selon les moyens qui nous ont été offerts sur terrain.

7.4.1- Application de la méthode de Cooper-Jacob sur le puits N°02

(10/10/2011) :

A- Durant la descente :

Calcul des paramètres hydrodynamiques T et S :

Application numérique :

$$Q = 2.891 \text{ l/s} = 0,002891 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$t_0 = 210 \text{ sec}$$

$$T = \frac{0.183Q}{s_2 - s_1}$$

On prend un cycle logarithmique entre 500 et 5000 :

$$s_1 = 0,09 \text{ m} \quad s_2 = 0,3 \text{ m}$$

$$T = (0,183 \times 0,002891) / 0,21 = 2,52 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}.$$

$$T = 2,52 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}.$$

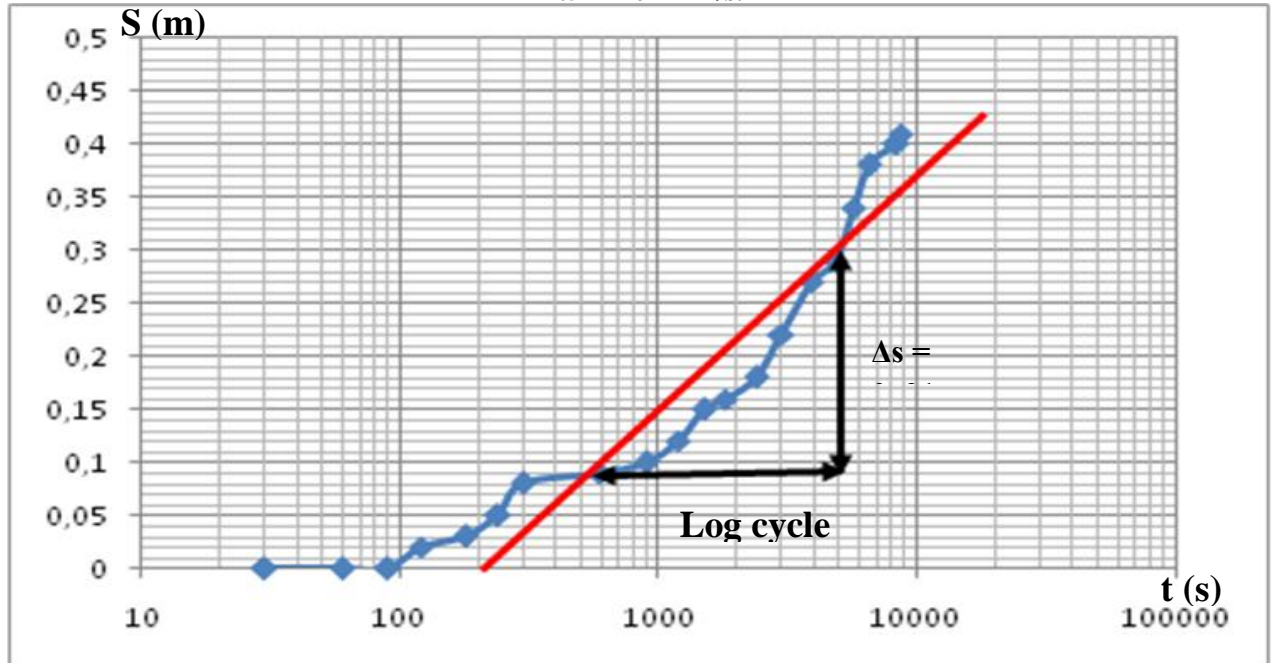


Fig. V.16 : Exemple d’application de la méthode de JACOB sur le puits N°02(durant la descente) dans la région d’El – Kantara (Auteur, 2012)

B- Durant la remontée :

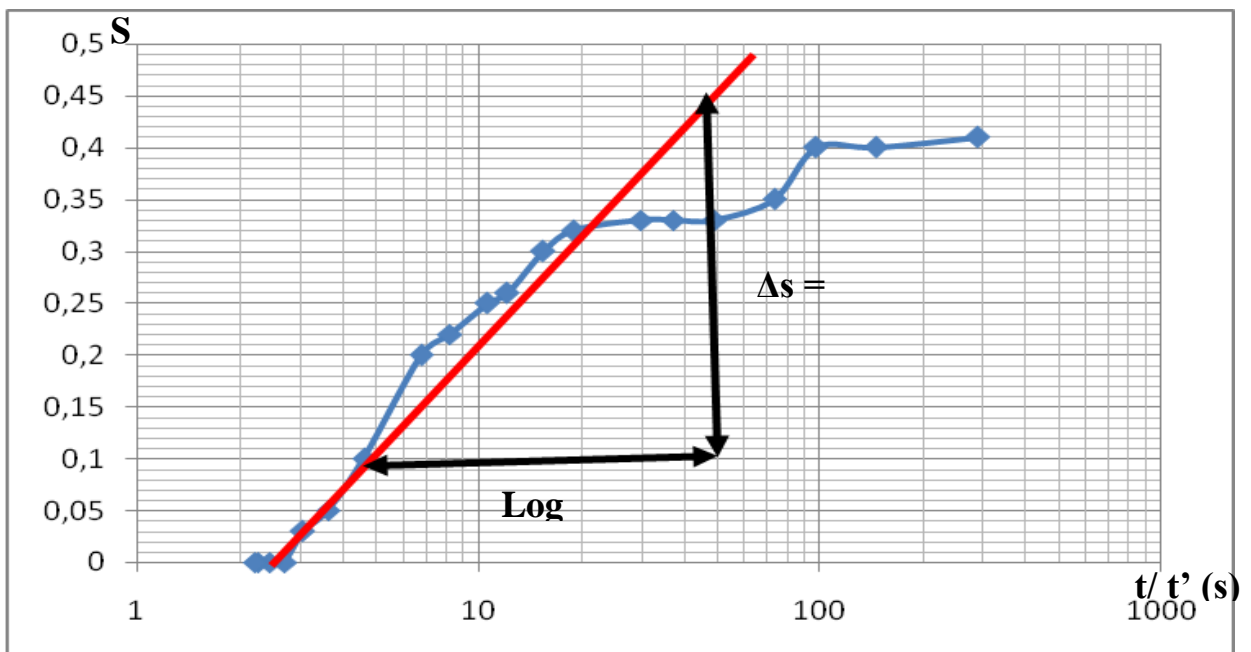


Fig. V.17 : Exemple d’application de la méthode de JACOB sur le puits N°02(durant la remontée) dans la région d’El –Kantara (Auteur, 2022)

On prend un cycle logarithmique entre 5 et 50 :

$$s_1 = 0.1 \text{ m} \quad s_2 = 0.45 \text{ m}$$

$$T = (0.183 \times 0,002891) / 0.35 = 1.51 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}.$$

$$T = 1.51 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}.$$

Calcul T_{moy}

$$T_{\text{moy}} = (T_1 + T_2) / 2$$

$$T_{\text{moy}} = [(2.52 + 1.51) \times 10^{-3}] / 2 \quad T_{\text{moy}} = 2.02 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}.$$

7.4.2- Application de la méthode de Cooper-Jacob sur le puits N°01:

A- Durant la descente :

Calcul des paramètres hydrodynamiques T et S :

$$Q = 3.51 \text{ l/s} = 0,00351 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$t_0 = 1650 \text{ sec}$$

$$T = \frac{0.183Q}{s_2 - s_1}$$

On prend un cycle logarithmique entre 2000 et 20000 :

$$s_1 = 0,2 \text{ m} \quad s_2 = 2.2 \text{ m}$$

$$T = (0.183 \times 0,00351) / 2 = 3.21 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}.$$

$$T = 3.21 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$$

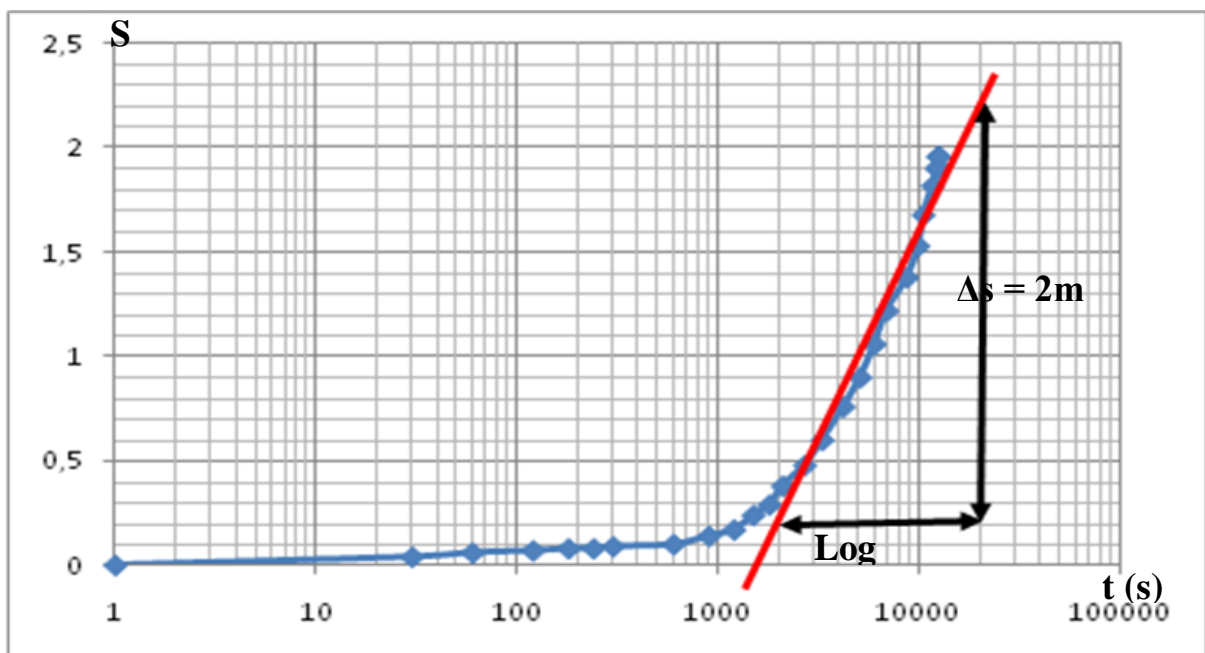


Fig. V.18 : Exemple d'application de la méthode de JACOB sur le puits N°01 (durant la descente) dans la région d'El-Kantara (Auteur, 2012)

2. Durant la remonté :

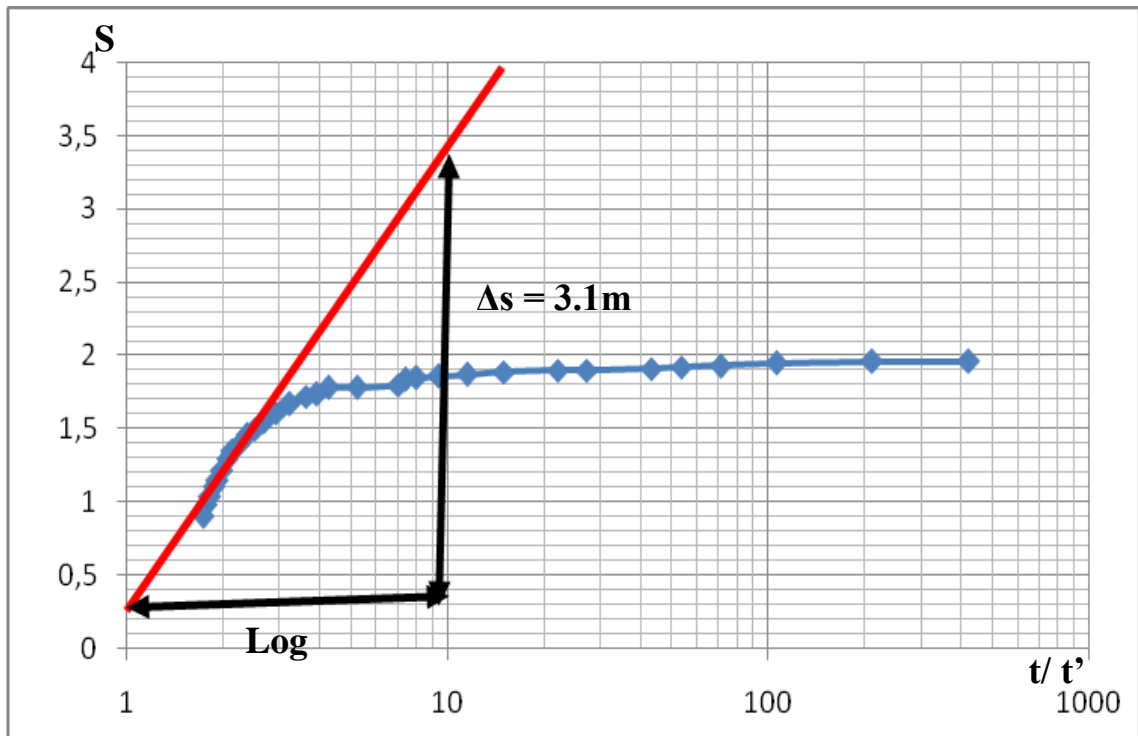


Fig. V.19 : Exemple d'application de la méthode de JACOB sur le puits N°01(durant la remontée) dans la région d'El –Kantara (Auteur, 2022)

On prend un cycle logarithmique entre 1 et 10 :

$$s_1 = 0.1 \text{ m} \qquad s_2 = 0.45 \text{ m}$$

$$T = (0.183 \times 0,00351)/3.1 = 2.07 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}.$$

$$T = 2.07 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}.$$

Calcul T_{moy} :

$$T_{\text{moy}} = (T_1 + T_2)/2$$

$$T_{\text{moy}} = [(3.21 + 2.07) \times 10^{-4}] / 2 \qquad T_{\text{moy}} = 2.64 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}.$$

7.4.3- Application de la méthode de Cooper-Jacob sur le puits N°17:

A- Durant la descente :

Calcul des paramètres hydrodynamiques T et S :

$$Q = 1.41 \text{ l/s} = 0,00141 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$t_0 = 1550 \text{ sec}$$

$$T = \frac{0.183Q}{s_2 - s_1}$$

On prend un cycle logarithmique entre 2000 et 20000 :

$$s_1 = 0,1 \text{ m} \quad s_2 = 0,98 \text{ m}$$

$$T = (0,183 \times 0,00141) / 0,88 = 2,93 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}.$$

$$T = 2,93 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}.$$

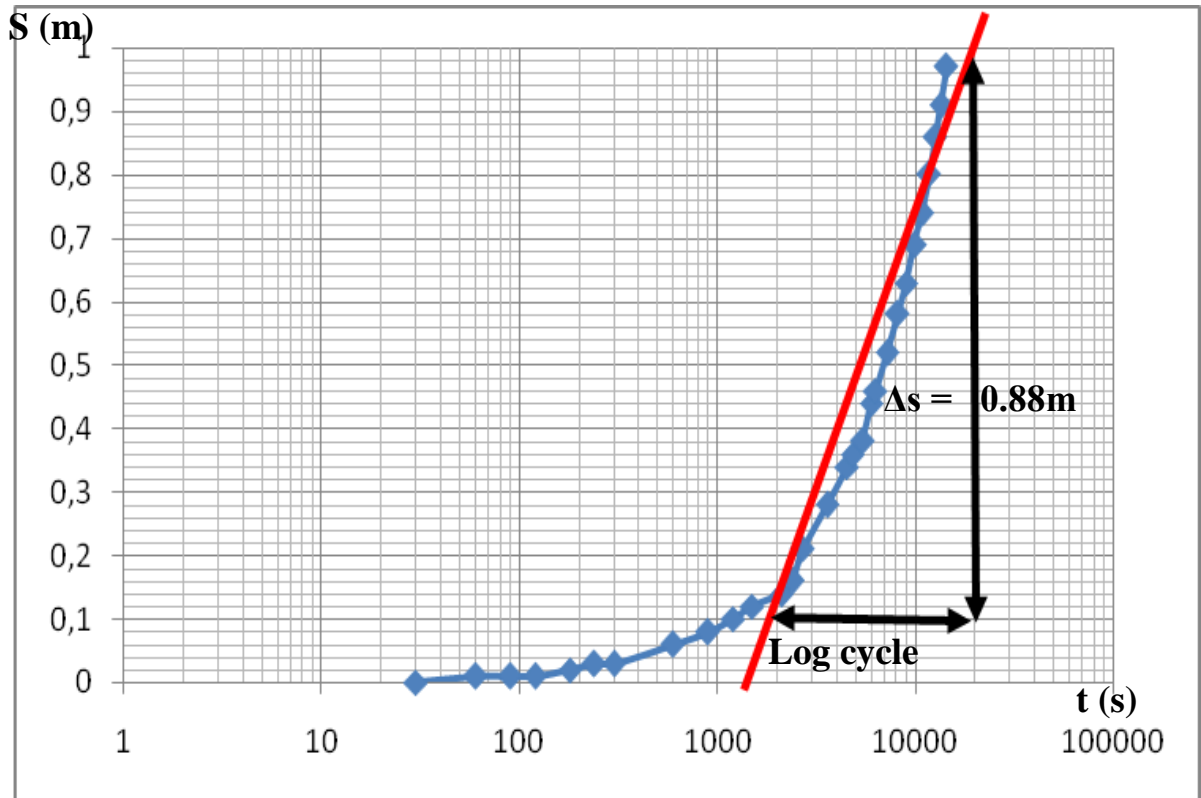


Fig. V.20 : Exemple d'application de la méthode de JACOB sur le puits N°17(durant la descente) dans la région d'El -Kantara (Auteur, 2012)

B- Durant la remonté :

On prend un cycle logarithmique entre 1 et 10 :

$$s_1 = 0,86 \text{ m} \quad s_2 = 1 \text{ m}$$

$$T = (0,183 \times 0,00351) / 0,14 = 4,6 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}.$$

$$T = 4,6 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}.$$

Calcul T_{moy} :

$$T_{moy} = (T_1 + T_2) / 2$$

$$T_{moy} = [(4,6 \times 10^{-3} + 2,93 \times 10^{-4})] / 2 \quad T_{moy} = 2,59 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}.$$

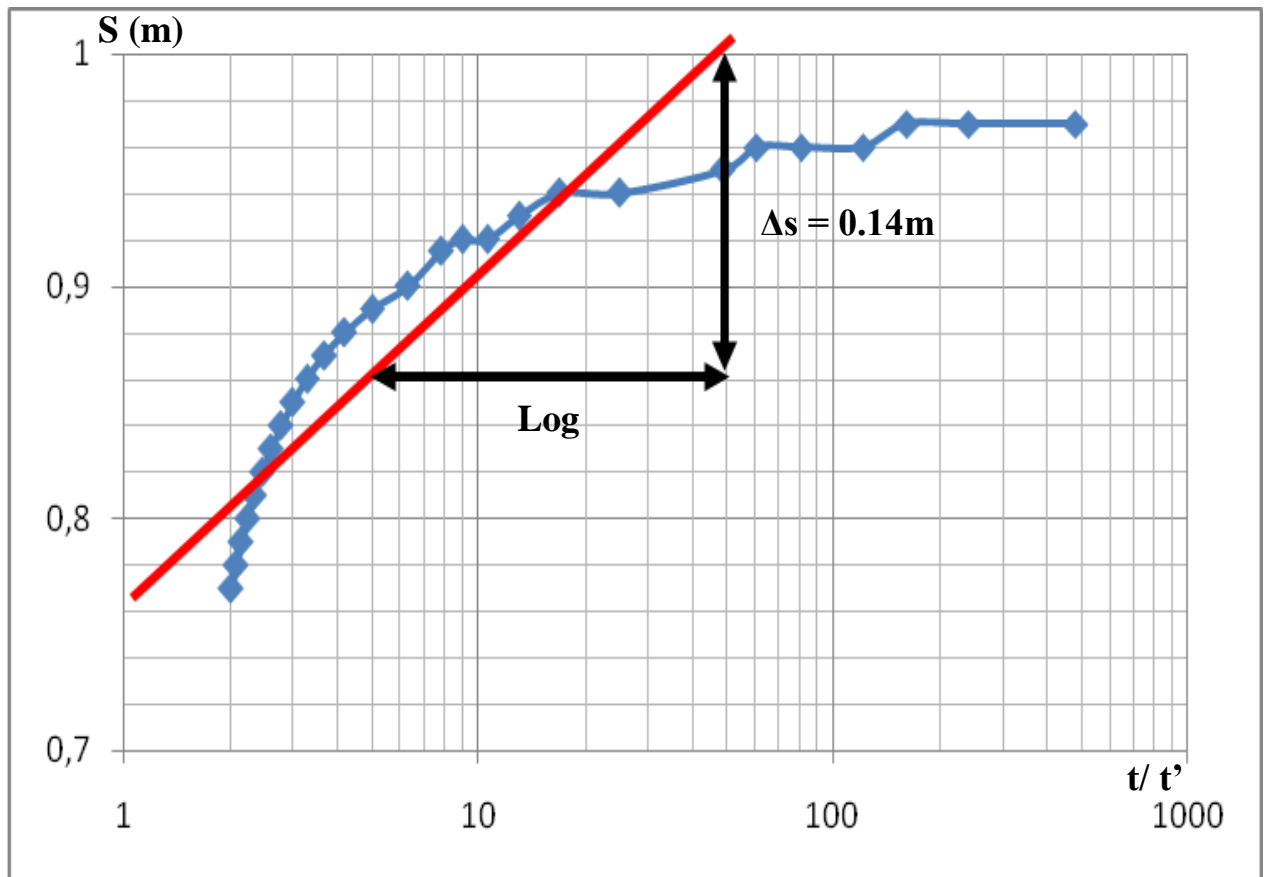


Fig. V.21 : Exemple d'application de la méthode de JACOB sur le puits N°17(durant la remontée) dans la région d'El –Kantara (Auteur, 2022)

7.5-Interprétation des résultats des essais :

L'interprétation de ces courbes fait en reportant en abscisse et sur une échelle logarithmique le temps t (s) et on ordonnée sur une échelle arithmétique le rabattement $s(m)$ pour la descente. Tandis que pour la remontée, en reportant en abscisse et sur une échelle logarithmique le temps le rapport (t/t') et on ordonnée sur une échelle arithmétique le rabattement résiduel. Le traçage de la droite qui permet d'estimer la Transmissivité donne la valeur de la pente nécessaire à ce calcul. Ce ci permet d'avoir une Transmissivité qui varie entre 2.07×10^{-4} et $4.6 \times 10^{-3} m^2/s$. Les valeurs de transmissivité obtenues par l'application de la méthode de Jacob sur les puits sont mentionnées dans le tableau (**Tabl. V.05**) :

Tabl. V.05 : Valeurs de Transmissivité calculées par l'approximation logarithmique de Jacob (Auteur, 2022).

| N° de puits | Débits en $Q (m^3/s) \times 10^{-3}$ | Graphique | T (m^2/s) | T moyennes (m^2/s) | Classe de Transmissivité |
|-------------|--------------------------------------|---|-----------------------|------------------------|------------------------------------|
| 1 | 3,51 | (Décente) : $\Delta s = f(\text{Log}t)$ | 2.52×10^{-3} | 2.02×10^{-3} | $< 10^{-5}$ Faible |
| | | (Remontée) $\Delta s = f(\text{Log}t (t/t'))$ | 1.51×10^{-3} | | |
| 2 | 2,891 | (Décente) $\Delta = f(\text{Log}t)$ | 3.21×10^{-4} | 2.64×10^{-4} | $10^{-5} < T < 10^{-4}$ Moyenne |
| | | (Remontée) $\Delta = f(\text{Log}t (t/t'))$ | 2.07×10^{-4} | | |
| 17 | 1,41 | (Décente) $\Delta = f(\text{Log}t)$ | 2.93×10^{-4} | 2.59×10^{-3} | $> 10^{-4}$ forte |
| | | (Remontée) $\Delta = f(\text{Log}t (t/t'))$ | 4.6×10^{-3} | | |

On signale qu'il n'est possible de calculer la perméabilité du fait de l'absence des données spécifiques à l'épaisseur utile de l'aquifère superficiel.

8-Conclusion :

L'analyse des différents outils géologiques, sondages et forages et outils hydrogéologiques a permis de mettre en évidence trois principales nappes qui forment la ressource essentielle surtout pour l'alimentation en eau potable et l'irrigation :

- La nappe phréatique du Quaternaire ;
- La nappe du Maestrichtien ;
- La nappe du Turonien.

L'aquifère superficiel d'El-Kantara en question se trouve dans les alluvions anciennes et actuelles qui reposent en majeure partie sur les assises imperméables de l'Oligocène. Cet aquifère est limité à l'Ouest par les calcaires Eocène, à l'Est par les calcaires Maestrichtiennes.

L'examen des cartes piézométriques montre que la partie Nord constitue une limite à flux entrant, alors que la partie Sud constitue une limite à flux sortant. L'écoulement général des eaux souterraines se fait du Nord-est vers le Sud-ouest avec un gradient hydraulique variable et les axes principaux convergent vers l'aval de l'oued qui draine la nappe du système aquifère. La nappe alluviale présente des fluctuations importantes qui peuvent atteindre en moyenne 6 m.

Les valeurs de la transmissivité T de la nappe alluvionnaire sont entre 2.07×10^{-4} et $4.6 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ ce qui indique un réservoir excellent.

*Chapitre VI : Etude Hydrochimique, qualitative
et vulnérabilité
à la pollution des eaux*

Partie A : Etude hydrochimique et qualitative des eaux

1-Introduction

Les caractéristiques physiques et chimiques qui ont été prise en compte au cours de notre travail, apporte un concours précieux à l'hydrogéologie et présentent un complément indispensable à la gestion des ressources en eau. L'étude hydrochimique et qualitative des eaux est une méthode simple de prospection qui complète utilement la piézométrie. Elle permet :

- De donner une idée sur la qualité chimique des eaux (identifier leurs faciès chimiques, leurs degrés de potabilité, ainsi que leurs aptitudes à l'irrigation) ;
- D'expliquer le chimisme de l'eau qui est le résultat d'un ensemble de mécanismes d'interaction entre l'eau et le réservoir ; dissolution et/ou précipitation des substances minérales d'origine naturelle géologique : le bruit de fond (Castany, 1982), et de l'influence de facteurs externes naturels ou anthropique.
- De visualiser à l'aide des cartes en iso-teneurs, la répartition et l'évolution géographique des concentrations en éléments chimiques dissous (Kerboub et al, 2016).

L'intérêt principal de cette partie de l'étude est de mieux caractériser la qualité des eaux souterraines de la plaine d'El-Kantara, et ses variations dans l'espace et dans le temps, afin de voir l'état du système vis-à-vis de la pollution. Les eaux de la plaine d'El-Kantara se répartissent en deux groupes principaux (Kerboub, 2012) et (Kerboub et al, 2014) :

- Les eaux de surface (Oued El-Hai)
- Les eaux souterraines (l'aquifère alluvionnaire du Mio-Plio-Quaternaire, le Maestrichtien et le Turonien).

2. Matériels et moyens d'analyse :

Onze (11) échantillons par campagne ont été prélevés et analysés pendant les campagnes suivantes :

- 1- Septembre 2011 (au niveau du laboratoire de la chimie de l'Université de Batna) ;
- 2- Février 2012 (au niveau du laboratoire de l'hydrogéologie de l'université de Constantine) ;
- 3- Septembre 2014 et Février 2015 (au niveau du laboratoire de la chimie de l'Université de Batna).

L'analyse des éléments chimiques s'est effectuée selon deux méthodes: l'absorption atomique à flamme pour le dosage des cations majeurs et le spectrophotomètre pour l'analyse des anions et des éléments en traces (Rodier, 1996).

En ce qui concerne la cartographie des éléments physicochimiques, nous avons utilisé le logiciel Surfer 11(version free).

Les points analysés sont répartis sur toute la vallée et sont inventoriés sur la carte (**Fig.VI.01**).

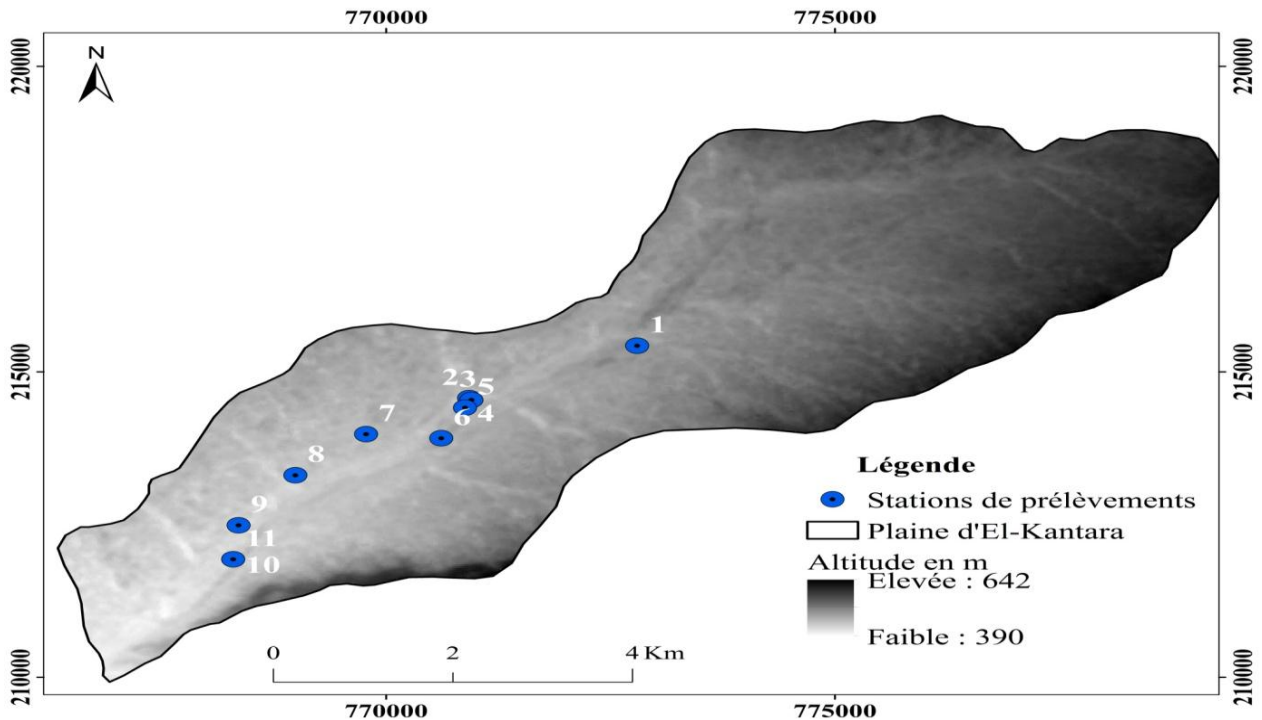


Fig.VI.01 : Carte d’inventaire des points analysés. (Auteur, 2022).

Les paramètres physiques et chimiques mesurés sont : le pH, la température, la conductivité électrique (CE), la dureté, les cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , NH_4^+ ,) ,les anions (Cl^- , SO_4^- , HCO_3^- , PO_4^{3-} , NO_2^- , et NO_3^-) , la DBO5, la DCO et les métaux lourds (Cu, Fe, Pb, Mn et Zn).

3-Interprétation des résultats des analyses physico-chimiques :

3.1-Normes de potabilité : La qualité de l’eau de consommation est appréciée sur la base des normes de potabilité définies par la réglementation. Si un des paramètres dépasse la concentration limite autorisée, il y a absence de conformité aux normes établies. Les normes Algériennes sont inspirées de celles de l’organisation mondiale de la santé (O.M.S) et aux normes prescrites dans les directives de la Communauté Economique Européenne (C.E.E). L’interprétation des données fournies est faite par rapport aux normes Algériennes et celles de l’organisation mondiale de la santé (O.M.S) (voir les tableaux :(Tab.VI.01), (Tab.VI.02), (Tab.VI.03), (Tab.VI.04), (Tab.VI.05) et (Tab.VI.06)).

4. Les paramètres physiques et chimiques :

Les caractéristiques statistiques des résultats des analyses physico-chimiques des eaux souterraines du Mio-Plio-Quaternaire des quatre et des eaux de surfaces (04) campagnes hydrochimiques ; dans le but de mettre en évidence la présence d'une pollution d'origine anthropiques, sont présentés dans les tableaux (**Tab.VI.01**), (**Tab.VI.02**), (**Tab.VI.03**), (**Tab.VI.04**), (**Tab.VI.05**) et (**Tab.VI.06**).

Tab.VI.01: Statistique élémentaire des éléments physiques dans les eaux de la plaine d'El-Kantara. (Auteur, 2022).

| Eléments physiques | Campagnes | MIN | MOY | MAX | E.TYPE | %E.TYPE | Normes de potabilités OMS | Normes de potabilités Algériennes |
|------------------------------|-----------|---------|---------|---------|--------|---------|---------------------------|-----------------------------------|
| T (°C) | SEP 2011 | 16.4 | 16.78 | 17.9 | 0.39 | 23.24 | 25 | 25 |
| PH | SEP 2011 | 6.9 | 7.4 | 7.6 | 0.23 | 31.08 | 6.2 - 9.22 | 6,5 - 9 |
| | FEV 2012 | 7.1 | 7.6 | 7.9 | 0.24 | 31.58 | | |
| | SEP 2014 | 6.7 | 7.2 | 7.4 | 0.24 | 33.33 | | |
| | FEV 2015 | 7.3 | 7.8 | 8.1 | 0.23 | 29.49 | | |
| Eh (mV) | SEP 2011 | 18.5 | 18.94 | 19.1 | 0.19 | 1 | / | / |
| DHT (°F) | SEP 2011 | 120.61 | 207.21 | 265.16 | 37.17 | 30.82 | / | / |
| | FEV 2012 | 39.92 | 112.48 | 168.01 | 37.51 | 33.35 | | |
| | SEP 2014 | 133.94 | 208.8 | 278.5 | 39.19 | 18.77 | | |
| | FEV 2015 | 31.25 | 102.78 | 154.68 | 36.92 | 35.92 | | |
| CE (µS/cm) | SEP 2011 | 2130 | 2949.02 | 3870 | 553.31 | 18.76 | 1 500 | 2 800 |
| | FEV 2012 | 1500.00 | 2652.73 | 3320.00 | 537.48 | 20.26 | | |
| | SEP 2014 | 2150 | 2905.45 | 3890 | 588.53 | 20.26 | | |
| | FEV 2015 | 1480 | 2696.82 | 3301 | 533.94 | 19.80 | | |
| Minéralisation (mg/l) | SEP 2011 | 1615,70 | 2237,02 | 2935,57 | 419,71 | 18.76 | / | 1000 |
| | FEV 2012 | 1137.82 | 2012.21 | 2518.37 | 407.70 | 20.26 | | |
| | SEP 2014 | 1630.87 | 2203.92 | 2950.74 | 588.53 | 26.70 | | |
| | FEV 2015 | 1122,65 | 2045,66 | 2503,95 | 405,02 | 19.80 | | |

Tab.VI.02: Statistique élémentaire des éléments chimiques majeurs (Cations) dans les eaux de la plaine d'El-Kantara. (Auteur, 2022).

| Eléments chimiques majeurs (Cations) | Campagnes | MIN | MOY | MAX | E.TYPE | %E.TYPE | Normes de potabilités OMS | Normes de potabilités Algériennes |
|---|-----------|--------|--------|--------|--------|---------|---------------------------|-----------------------------------|
| Ca²⁺ (mg/l) | SEP 2011 | 304.49 | 536.37 | 721.21 | 114.10 | 21.27 | 200 | 200 |
| | FEV 2012 | 78.5 | 258.94 | 424.85 | 97.95 | 37.83 | | |
| | SEP 2014 | 324.49 | 556.37 | 741.21 | 114.10 | 20.51 | | |
| | FEV 2015 | 60.50 | 239.85 | 404.85 | 98.05 | 40.87 | | |
| Mg²⁺ (mg/l) | SEP 2011 | 106.78 | 175.48 | 203.66 | 28.17 | 16.05 | 150 | 150 |
| | FEV 2012 | 48.70 | 114.59 | 151.50 | 33 | 28.80 | | |
| | SEP 2014 | 107.11 | 167.29 | 223.66 | 44.06 | 26.33 | | |
| | FEV 2015 | 38.70 | 102.77 | 141.50 | 31.83 | 30.97 | | |
| Na⁺ (mg/l) | SEP 2011 | 67.65 | 99.77 | 129.93 | 15.02 | 15.05 | 250 | 200-500 |
| | FEV 2012 | 61.90 | 327.11 | 458.85 | 159.67 | 48.81 | | |
| | SEP 2014 | 87.65 | 119.77 | 169.93 | 19.22 | 16.05 | | |
| | FEV 2015 | 51.90 | 312.65 | 445.85 | 156.86 | 50.17 | | |
| K⁺ (mg/l) | SEP 2011 | 0.69 | 2.84 | 6.73 | 1.84 | 64.79 | 10 | 12 |
| | FEV 2012 | 1.75 | 20.84 | 33 | 10.60 | 50.86 | | |
| | SEP 2014 | 5.69 | 7.57 | 11.73 | 1.87 | 24.70 | | |
| | FEV 2015 | 1.05 | 17.64 | 28 | 9.26 | 52.49 | | |

Tab.VI.03: Statistique élémentaire des éléments chimiques majeurs (Anions) dans les eaux de la plaine d'El-Kantara. (Auteur, 2022).

| Eléments chimiques majeurs (Anions) | Campagnes | MIN | MOY | MAX | E.TYPE | %E.TYPE | Normes de potabilités OMS | Normes de potabilités Algériennes |
|--|-----------|--------|---------|--------|--------|---------|---------------------------|-----------------------------------|
| Cl⁻ (mg/l) | SEP 2011 | 127.80 | 293.68 | 482.80 | 92.70 | 31.56 | 350 | 200-500 |
| | FEV 2012 | 79.85 | 164.04 | 379.85 | 80.74 | 49.22 | | |
| | SEP 2014 | 147.80 | 313.68 | 502.80 | 92.70 | 29.55 | | |
| | FEV 2015 | 60.75 | 144.13 | 359.85 | 81.84 | 56.78 | | |
| SO₄²⁻ (mg/l) | SEP 2011 | 1488 | 1671.22 | 1833 | 126.30 | 07.56 | 250 | 400 |
| | FEV 2012 | 420 | 1496.09 | 2100 | 413.07 | 27.61 | | |
| | SEP 2014 | 1508 | 1707.58 | 1880 | 138.61 | 08.12 | | |
| | FEV 2015 | 400 | 1467.64 | 2087 | 413.92 | 28.20 | | |
| HCO₃⁻ (mg/l) | SEP 2011 | 14.40 | 60.71 | 100.53 | 30.52 | 50.27 | / | / |
| | FEV 2012 | 147.90 | 281.46 | 390.40 | 82.97 | 29.48 | | |
| | SEP 2014 | 34.40 | 80.71 | 120.53 | 30.52 | 37.81 | | |
| | FEV 2015 | 127.90 | 259.65 | 370.40 | 80.94 | 31.17 | | |

Tab.VI.04: Statistique élémentaire des éléments indicateurs de pollution agricole (Substances eutrophisantes) dans les eaux de la plaine d'El-Kantara. (Auteur, 2022).

| Les éléments indicateurs de pollution agricole (Substances eutrophisantes) | Campagnes | MIN | MOY | MAX | E.TYPE | %E.TYPE | Normes de potabilités OMS | Normes de potabilités Algériennes |
|--|-----------|-------|-------|-------|--------|---------|---------------------------|-----------------------------------|
| NO₃⁻ (mg/l) | SEP 2011 | 5.23 | 22.09 | 36.51 | 11.08 | 50.16 | 40 | 50 |
| | FEV 2012 | 2.60 | 11.66 | 36.51 | 11.26 | 96.56 | | |
| | SEP 2014 | 7.23 | 24.09 | 38.51 | 11.08 | 45.99 | | |
| | FEV 2015 | 1.60 | 10.21 | 33.51 | 10.53 | 103 | | |
| NO₂⁻ (mg/l) | SEP 2011 | 1.18 | 4.98 | 8.24 | 2.50 | 50.20 | 0.1 | 0.2 |
| | FEV 2012 | 0.001 | 0.022 | 0.094 | 0.034 | 154.54 | | |
| | SEP 2014 | 2.80 | 6.79 | 10.24 | 2.77 | 40.80 | | |
| | FEV 2015 | 0.001 | 0.017 | 0.74 | 0.027 | 158.82 | | |
| NH₄⁺ (mg/l) | SEP 2011 | 0.21 | 0.24 | 0.27 | 0.02 | 8.33 | 0.2 | 0.5 |
| | FEV 2012 | 0.01 | 0.04 | 0.07 | 0.02 | 50 | | |
| | SEP 2014 | 0.31 | 0.34 | 0.37 | 0.02 | 5.88 | | |
| | FEV 2015 | 0.01 | 0.03 | 0.06 | 0.02 | 66.67 | | |
| PO₄²⁻ (mg/l) | SEP 2011 | 0 | 0.22 | 1.75 | 0.52 | 236.36 | 0.5 | / |
| P (mg/l) | SEP 2011 | 0 | 0.05 | 0.5 | 0.15 | 300 | 1 | 5 |

Tab.VI.05: Statistique élémentaire des éléments indicateurs de pollution anthropique (Substances eutrophisantes) dans les eaux de la plaine d'El-Kantara. (Auteur, 2022).

| Les éléments indicateurs de pollution anthropique (Substances eutrophisantes) | Campagnes | MIN | MOY | MAX | E.TYPE | %E.TYPE | Normes de potabilités OMS | Normes de potabilités Algériennes |
|---|-----------|-----|-------|-----|--------|---------|---------------------------|-----------------------------------|
| DBO5 | SEP 2011 | 10 | 50.55 | 134 | 47.65 | 94.26 | 5 | / |

| | | | | | | | | |
|------------|----------|----|-------|-----|-------|-------|----|---|
| (mg/l) | FEV 2012 | 7 | 42.45 | 120 | 44.23 | 104.2 | | |
| DCO (mg/l) | SEP 2011 | 27 | 90.73 | 165 | 51.75 | 57.04 | 20 | / |
| | FEV 2012 | 22 | 69.91 | 135 | 43.42 | 62.11 | | |

Tab.VI.06: Statistique élémentaire des éléments traces métalliques (ETM) dans les eaux de la plaine d'El-Kantara. (Auteur. 2022).

| Les éléments traces métalliques (ETM) | Campagnes | MIN | MOY | MAX | E.TYPE | %E.TYPE | Normes de potabilités OMS | Normes de potabilités Algériennes |
|---------------------------------------|-----------|-------|-------|--------|--------|---------|---------------------------|-----------------------------------|
| Pb (mg/l) | SEP 2011 | 0.021 | 0.059 | 0.112 | 0.033 | 55.93 | 0.01 | 0.01 |
| | FEV 2012 | 0.009 | 0.048 | 0.104 | 0.034 | 70.83 | | |
| | SEP 2014 | 0.010 | 0.061 | 0.122 | 0.036 | 59.02 | | |
| | FEV 2015 | 0.008 | 0.041 | 0.091 | 0.032 | 78.05 | | |
| Fe (mg/l) | SEP 2011 | 0 | 0.406 | 1.779 | 0.669 | 164.77 | 0.2 | 0.3 |
| | FEV 2012 | 0.34 | 2.32 | 11.08 | 2.98 | 128.45 | | |
| | SEP 2014 | 0.10 | 0.51 | 1.88 | 0.67 | 137.37 | | |
| | FEV 2015 | 0.24 | 1.96 | 9.08 | 2.44 | 124.5 | | |
| Cu ⁺⁺ (mg/l) | SEP 2011 | 0.061 | 0.208 | 0.321 | 0.076 | 36.54 | 0.05 | 2 |
| | FEV 2012 | 1.01 | 10.23 | 46.50 | 15.99 | 156.3 | | |
| | SEP 2014 | 0.261 | 0.408 | 0.521 | 0.076 | 18.63 | | |
| | FEV 2015 | 0.81 | 8.99 | 40.50 | 13.87 | 154.28 | | |
| Mn ⁺² (mg/l) | SEP 2011 | 0 | 0.034 | 0.107 | 0.035 | 103 | 0.4 | 0.5 |
| Cr ⁶⁺ (mg/l) | SEP 2011 | 2.57 | 32.22 | 53.29 | 15.75 | 48.88 | 0.05 | 0.05 |
| CrO ₄ (mg/l) | SEP 2011 | 5.76 | 72.26 | 119.52 | 35.34 | 48.90 | 0.05 | 0.05 |

4.1-Présentation globale des paramètres physico-chimiques et fiabilité des résultats des eaux d'El-Kantara : Toute série de données peut donner lieu au calcul d'une moyenne (m). Pour que cette moyenne soit réellement représentative de l'ensemble de la série, il faut que les

données ne s'écartent pas trop de sa valeur. La dispersion autour de la moyenne est mesurée par le coefficient de variation (CV) qui représente le rapport de l'écart-type à la moyenne : $CV = \sigma/m$. Par convention, on estime que la série est homogène lorsque $CV < 50\%$ (In Brinis, 2011).

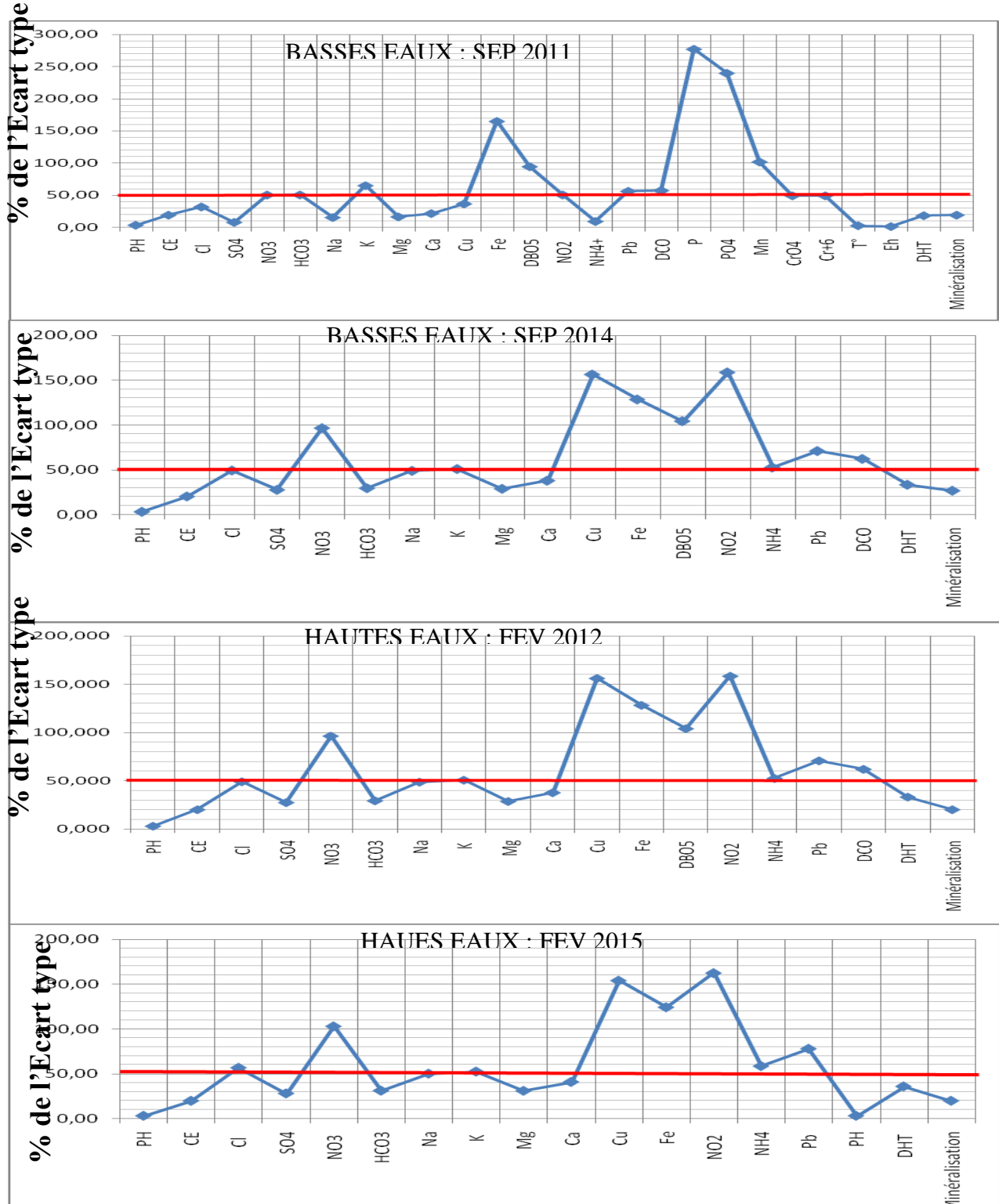


Fig. .VI.02 : Taux de l'écart par rapport à la moyenne des variables physico-chimiques mesurées des eaux de la plaine d'El-Kantara. (Auteur, 2022).

Ces résultats physico-chimiques sont utilisés pour la caractérisation hydrochimique des eaux de la plaine d'El-Kantara ; dans le but de mettre en évidence la présence d'une pollution d'origine anthropiques et leurs répartitions spatiales dans la plaine d'El-Kantara.

On remarque que l'écart à la moyenne est considérable pour certains éléments et attendront des valeurs extrêmes tels que les éléments traces métalliques (ETM), les éléments indicateurs de pollution anthropique (DBO_5 et PO_4) et dont d'autres le pourcentage de l'écart avoisine 50 % de la valeur la moyenne tels que les Chlorures, le Sodium et le Potassium,.. (**FIG .VI.02**).

Ces anomalies peuvent être expliquées par l'écart important qui existe entre les valeurs minimales (supposées normales) et les valeurs maximales (anomalies).

-L'extrême variabilité des éléments traces métalliques (ETM) et les éléments indicateurs de pollution anthropique (DBO_5 et PO_4) est liée au lessivage de la décharge publique et aussi aux rejets de la zone urbaine.

-La grande variabilité des Nitrates, Nitrites et Ammonium est due probablement à une utilisation spatiale temporelle sélectives des engrais. Les endroits et les périodes concernés présentent des valeurs relativement importantes;

-En ce qui concerne le Sodium, le Calcium, et les Chlorures qui proviennent de la dissolution des terrains salés, carbonatés et de l'action humaines.

-La déviation du reste des paramètres par rapport à la valeur moyenne est de l'ordre de 30%. Ceci peut être expliqué par une répartition assez régulière de la concentration de ces paramètres dans l'espace.

-Fiabilité des résultats des eaux d'El-Kantara :

Le contrôle de la validité des résultats d'analyses chimiques est fait à l'aide de la balance ionique :

$$BI = \frac{\sum A - \sum C}{\sum A + \sum C} \text{ en } \%$$

L'analyse est déclarée acceptable si : $-5 \leq BI \leq 5 \%$. Avec :

ΣA = La somme des anions en milliéquivalents par litre ;

ΣC = La somme des cations en milliéquivalents par litre. Le tableau ci-dessous donne une récapitulation sur la validité des résultats d'analyses chimiques.

Tab.VI.07: Tableau récapitulatif sur la validité des résultats d'analyses chimiques des eaux de la plaine d'El-Kantara. (Auteur, 2022).

| Campagnes | Nombre d'analyses | BI acceptable | % BI acceptable | BI non acceptable | % BI non acceptable | % BI de la campagne |
|------------------|--------------------------|----------------------|------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------------------|
| SEP 2011 | 11 | 6 | 54.54 | 5 | 45.46 | - 1.96 |
| FEV 2012 | 11 | 9 | 81.82 | 2 | 18.18 | 4.06 |
| SEP 2014 | 11 | 6 | 54.54 | 5 | 45.46 | -1.54 |
| FEV 2015 | 11 | 9 | 81.82 | 2 | 18.18 | 6.08 |

Vis-à-vis la balance ionique calculée pour chaque campagne, on peut considérer que les analyses sont bonnes et les résultats sont équilibrés pour les utilisés pour cette étude hydrochimique,

4.2- Etude détaillée des paramètres physiques et chimiques :

4.2.1-Paramètres physiques :

Ces paramètres sont très importants, car ils jouent un rôle majeur dans la solubilité de l'eau et aident à la détermination de son origine, on a mesuré: La température, pH et la conductivité électrique.

4.2.1.1. -Température :

Il est important de connaître la température de l'eau avec précision, c'est pourquoi L'OMS donne une valeur guide de la température de 25 °C. En effet lorsqu'elle est élevée la température s'accompagne d'une modification de la densité, d'une réduction de la viscosité, d'une augmentation de la tension de la vapeur saturante à la surface et joue un rôle dans la diminution de la solubilité des gaz. La température des eaux superficielles est influencée par la température de l'air et ceci d'autant plus que l'origine est moins profond.

Dans cette étude, la température moyenne annuelle de l'air dans la région étudiée est de l'ordre 17.72C° tandis que la température des eaux prélevées est de l'ordre 16.4C° ce qui montre un équilibre entre la température de l'air et celle des eaux du fait de la faible

profondeur du niveau statique (10 m en moyenne). Les valeurs des eaux prélevées sont conformes aux normes de l'O.M.S et aux normes algériennes (Norme de potabilité ≤ 25 C°) (Tab.VI.01).

4.2.1.2 -Potentiel hydrogène PH :

Le pH exprime le module de représentation en ion $[H^+]$ d'une solution. Par définition le pH est le log décimal de l'inverse de cette concentration totale : $\left[\frac{1}{H^+} \right]$. Il représente donc son

acidité ou son alcalinité. Le pH des eaux naturelle est lié à la nature des terrains traversés et dépend de l'équilibre calco-carbonique : $Ca (HCO_3)_2 \rightleftharpoons Ca CO_3 + CO_2 + H_2O$

L'échelle du pH varie de : 0 à 14.

- Pour un milieu neutre $(H^+) = (OH^-)$ ou $pH = 7$ (eau naturelle pure).

-Pour un milieu acide $(H^+) > (OH^-)$ ou $pH < 7$ (eaux provenant des terrains pauvres en calcaires ou siliceux).

-Pour un milieu basique $(H^+) < (OH^-)$ ou $7 < pH < 14$ (eaux très calcaires).

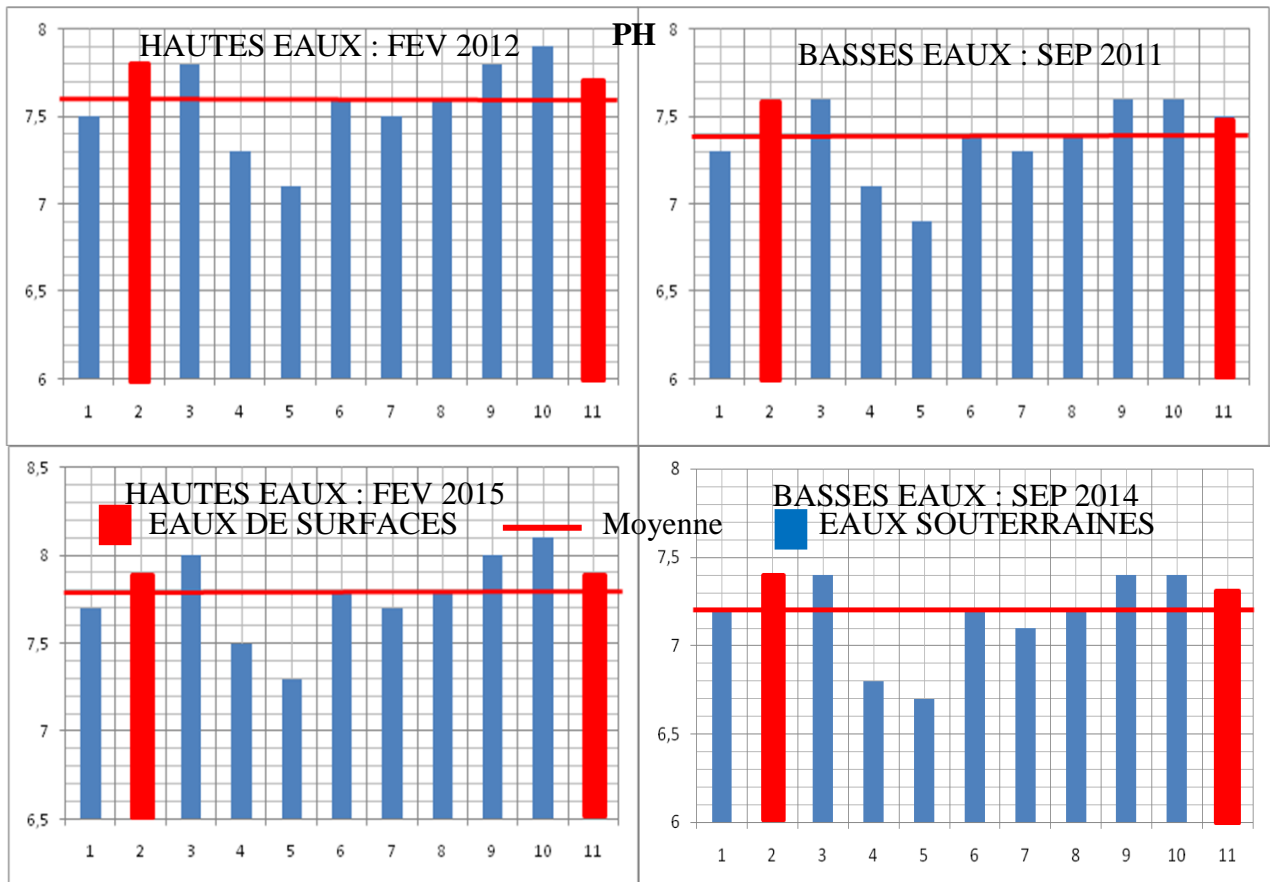


Fig.VI.03 : Histogrammes de variation du PH dans les eaux de la plaine d'El-Kantara. (Auteur, 2022).

Les valeurs du PH sont mesurées sur terrain au niveau des différentes stations et lors des différentes campagnes varient entre (6.9 et 8.1). Ces valeurs se trouvent dans l'intervalle des normes de potabilité de l'OMS (6.2 - 9.22) et celles de l'Algérie (6,5 – 9) (**Tab.VI.01**) et (**FIG .VI.03**). L'écart des valeurs par rapport à la moyenne n'est pas important et varie entre 29.49 et 33.33, ce qui est confirmé par les valeurs de pH qui sont identiques pour l'ensemble de la région d'étude et pratiquement stable dans le temps et dans l'espace et indiquant des eaux généralement neutres à légèrement basiques.

4.2.1.3-Potentiel redox (Eh) :

Dans les systèmes aqueux, le potentiel redox (ou disponibilité en électrons) affecte les états d'oxydation des éléments (H, C, N, O, S, Fe...). Dans une eau bien oxygénée, les conditions d'oxydation dominent. Quand les concentrations d'oxygène diminuent, le milieu devient plus réducteur ce qui se traduit par une réduction du potentiel redox. Dans les eaux naturelles, des comparaisons relatives de l'évolution du potentiel redox peuvent être utiles pour suivre les degrés de changement du système aquatique. Le potentiel redox se mesure en mV.

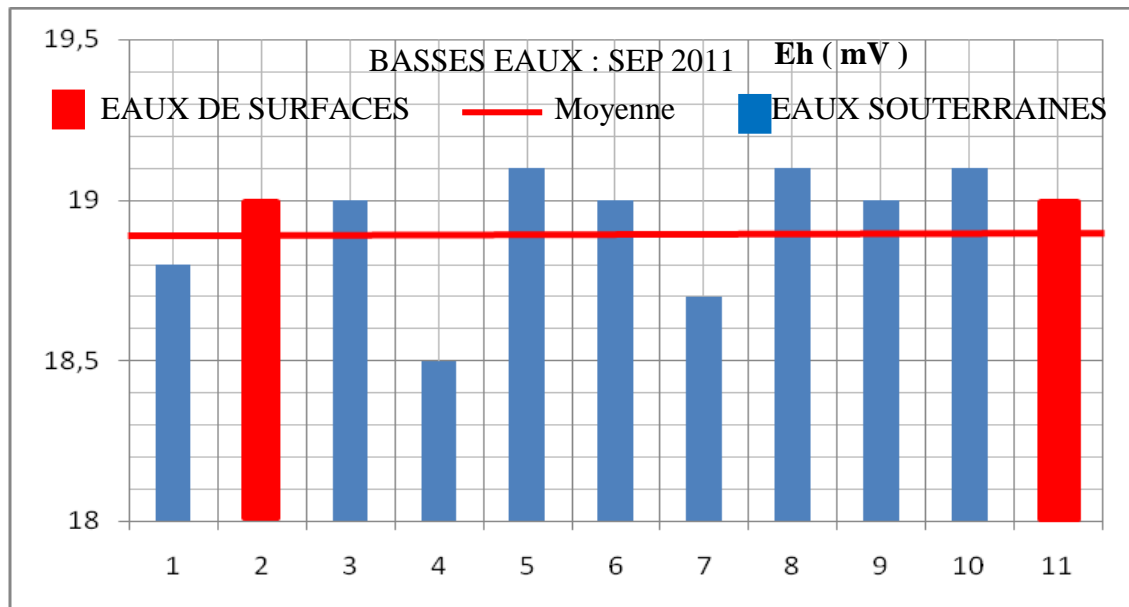


Fig.VI.04 : Histogrammes de variation Eh dans les eaux de la plaine d'El-Kantara. (Auteur, 2022).

Les valeurs du potentiel redox varient entre un minimum de 18.5 mV enregistré au point d'eau (2) et un maximum de 19.1 mV relevé aux points d'eau (5,8 et 10) (**FIG .VI.04**). L'écart des valeurs par rapport à la moyenne est très faible.

4.2.1.4- Dureté de l'eau (ou titre hydrométrique) DHT (°F) :

La dureté d'une eau correspond à la somme des concentrations en cations métalliques, excepté celles des métaux alcalins (Na^+ , K^+) et H^+ . Elle est souvent due aux ions Ca^{2+} et Mg^{2+} . La présence de ces deux cations dans l'eau tend souvent à réduire la toxicité des métaux. Le degré hydrométrique ou dureté de l'eau correspond à la somme des concentrations en Calcium et en Magnésium : $\text{DHT} = (\text{rCa}^{2+} + \text{rMg}^{2+})$ (en méq/l) où $5 \text{ méq/l} = 1 \text{ degré français c.-à-d. DHT (°F)}$.

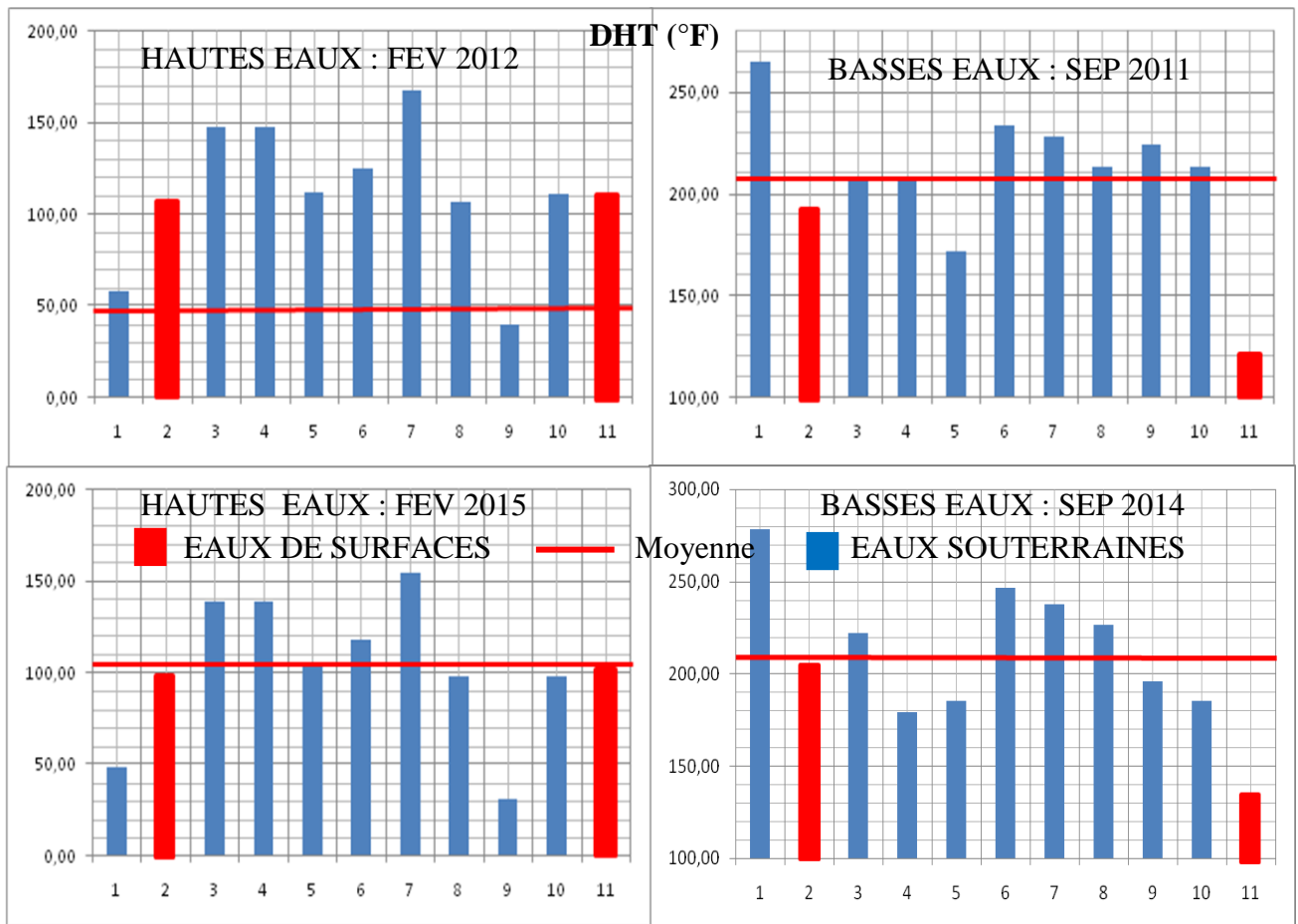


Fig.VI.05 : Histogrammes de variation du DHT dans les eaux de la plaine d'El-Kantara. (Auteur, 2022).

D'après la (FIG .VI.05), les valeurs de DHT sont comprises:

- Pour la campagne de SEP 2011 : entre un minimum de 120,61 f° enregistré au point d'eau (11) et un maximum de 265,16 f° enregistré au point d'eau (1).
- Pour la campagne de FEV 2012 : entre un minimum de 39,91 f° enregistré au point d'eau (9) et un maximum de 168,01f° enregistré au point d'eau (7).

-Pour la campagne de SEP 2014 : entre un minimum de 133,94f° enregistré au point d'eau (11) et un maximum de 278,49f° enregistré au point d'eau (1).

-Pour la campagne de FEV 2015 : entre un minimum de 31,25f° enregistré au point d'eau (9) et un maximum de 154,67f° enregistré au point d'eau (7).

Les valeurs de DHT de la région d'étude sont pratiquement stables dans le temps (hautes eaux et basses eaux) et dans l'espace. L'eau naturelle peut être classée selon la gamme de la dureté totale:

Tab.VI.08: Tableau de qualification de la dureté des eaux de la plaine d'El-Kantara. (In Hamel, 2009)

| DHT (F°) | 0 - 7 | 7 - 22 | 22 - 32 | 32 - 54 | >54 |
|------------------------|-------|------------------|-------------|---------|-----------|
| Qualification de l'eau | Douce | Modérément douce | Assez douce | Dure | Très dure |

La dureté totale des eaux de la plaine d'El-Kantara (**FIG .VI.05**) varie entre 31,25f° et 278,49f°, ce qui indique des eaux assez douces à très dures.). L'écart des valeurs par rapport à la moyenne est considérable et varie de 18.77 à 35.92 .

4.2.1.5 -Conductivité électrique (CE):

La conductivité électrique (CE) est une expression numérique de la capacité d'une solution à conduire le courant électrique. La plupart des sels minéraux en solution sont de bons conducteurs. Par contre, les composés organiques sont de mauvais conducteurs. La conductivité électrique standard s'exprime généralement en millisiemens par mètre (mS/ m) à 20 °C. La conductivité d'une eau naturelle est comprise entre 50 et 1500 µS/cm. Elle augmente lorsque la température et la teneur en sels dissous augmente "forte minéralisation" ; cela est dû à la présence excessive des cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ et K^+) et d'anions (HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^-). La mesure de la conductivité permet d'apprécier rapidement mais très approximativement la minéralisation de l'eau et de suivre son évolution (Rodier, 1996).

Les valeurs de la conductivité électrique des eaux de la zone d'étude sont exprimées en µ.S/cm et représentées au tableau (**Tab.VI.01**) et la figure (**FIG .VI.06**). Pendant la période d'étude on remarque que les valeurs de la conductivité électrique sont comprises entre un minimum de 1480 µ.S/cm enregistré au point d'eau (1) durant la période des hautes eaux (FEV 2015) et un maximum de 2949.02 µ.S/cm enregistré au point d'eau (1) durant la période

des basses eaux (SEP 2011). Les valeurs de la conductivité électrique des eaux de la région d'étude subissent une évolution remarquable dans le temps (hautes eaux et basses eaux) et dans l'espace qui est liée au phénomène de dilution de toutes ces eaux où on assiste à une chute de la conductivité électrique. La majorité des valeurs sont très élevées et dépassent la norme OMS de potabilité fixée à 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$. En revanche, pour la norme de potabilité Algérienne fixée à 2800 $\mu\text{S}/\text{cm}$, un nombre important de valeurs qui répondent à cette norme.

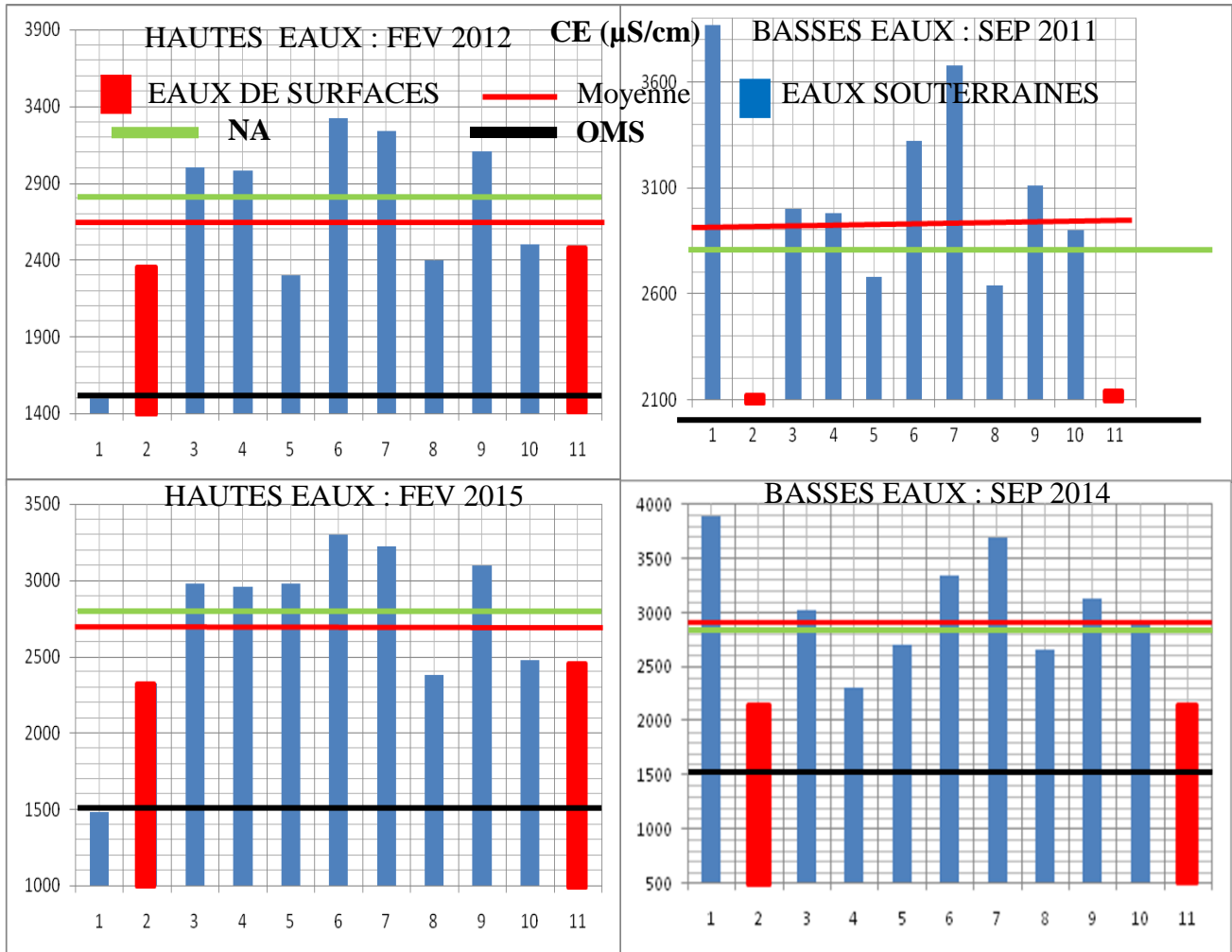


Fig.VI.06 : Histogrammes de variation de la CE dans les eaux de la plaine d'El-Kantara. (Auteur, 2022).

4.2.1.6 - Minéralisation globale :

L'estimation de la quantité totale de matières dissoutes peut être obtenue par la multiplication de la valeur de la conductivité par un facteur empirique dépendant de la nature des sels dissous et de la température de l'eau. La connaissance du contenu en sels dissous est importante surtout lors des variations importantes en sels dissous qui peuvent être observées par exemple en cas de déversements d'eaux usées.

La minéralisation en teneur globale des sels minéraux a été calculée à partir de la conductivité (Tab.VI.09).

Tab.VI.09: Tableau récapitulatif du calcul de la minéralisation des eaux de la plaine d’El-Kantara.

à partir de la conductivité (Rodier, 1996).

| Conductivité (µS/cm) | Minéralisation (mg/l) | Conductivité (µS/cm) | Minéralisation (mg/l) |
|-----------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Conductivité <50 | 1,365079 x conductivités | 333<Conductivité < 833 | 0,769574 x conductivités |
| 50<Conductivité< 166 | 0,947658 x conductivités | 833<Conductivité < 10000 | 0,758544 x conductivités |
| 166<Conductivité< 333 | 0,769574 x conductivités | Conductivité >10000 | 0,850432 x conductivités |

La relation entre la conductivité et la minéralisation est présentée dans le tableau (Tab.VI.10).

Tab.VI.10: Relation entre la minéralisation et la conductivité (Rodier, 1996).

| Conductivité (µS/cm) | Qualification de la Minéralisation (mg/l) | Conductivité (µS/cm) | Qualification de la Minéralisation (mg/l) |
|-----------------------|---|-------------------------|---|
| Conductivité <100 | Très faible | 333<Conductivité < 666 | Moyenne à accentuée |
| 100<Conductivité< 200 | Faible | 666<Conductivité < 1000 | Importante |
| 200<Conductivité< 333 | Moyenne | Conductivité >1000 | Elevée |

La minéralisation des eaux souterraines dépend naturellement de celle des terrains traversés et du temps de séjours. Dans les zones semi- arides ou arides, les évaporites dont la cinématique de dissolution est très rapide constituent une source de contamination naturelle (Rodier, 1996).

Les valeurs de la minéralisation des eaux de la zone d’étude sont exprimées en mg/l et représentées au tableau (Tab.VI.11) et la figure (FIG .VI.07) . Pendant la période d’étude on remarque que les valeurs de la minéralisation sont comprises entre un minimum de **1122,65** mg/l enregistré au point d’eau (1) durant la période des hautes eaux (FEV 2015) et un maximum de **2950.74** mg/l enregistré au point d’eau (1) durant la période des basses eaux (SEP 2011). Les valeurs de la minéralisation des eaux de la région d’étude subissent une

évolution remarquable dans le temps (hautes eaux et basses eaux) et dans l'espace qui est liée au phénomène de dilution de toutes ces eaux où on assiste à une chute de la minéralisation. Les concentrations de la minéralisation sont élevées ; évoluent de la même manière que celles de la conductivité, et dépassent largement la norme Algérienne de potabilité (1000 mg/l).

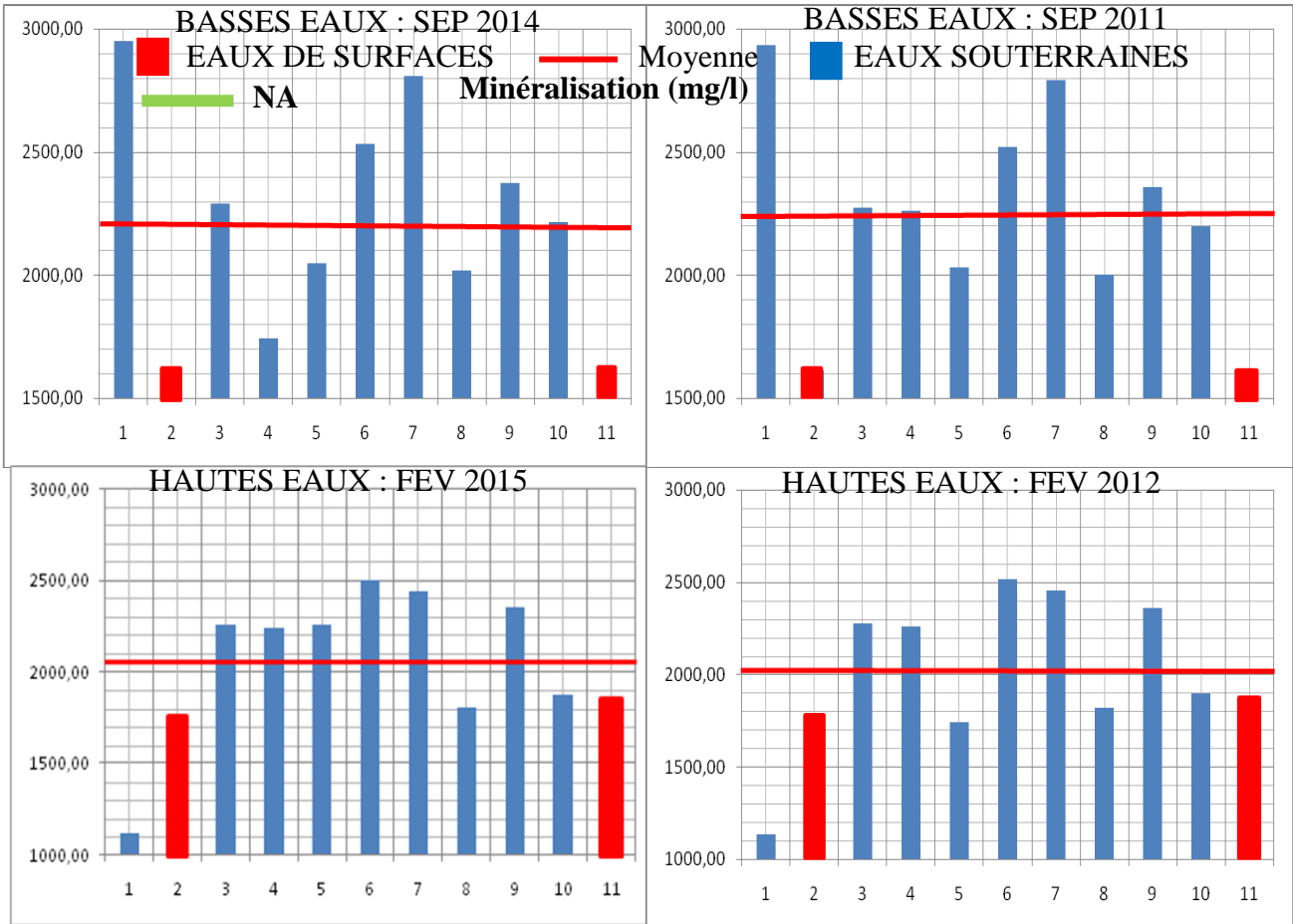


Fig.VI.07 : Histogrammes de variation de la minéralisation dans les eaux de la plaine d’El-Kantara. (Auteur, 2022).

Tab.VI.11: Tableau récapitulatif de la relation entre la minéralisation et la conductivité des eaux de la plaine d’El-Kantara. (Auteur, 2022).

| Stations | Campagnes | Conductivité | Minéralisation | Classification |
|----------|-----------|--------------|----------------|----------------|
| 1 | SEP 2011 | 3870 | 2935,57 | Elevée |
| | FEV 2012 | 1500 | 1137,82 | Elevée |
| | SEP 2014 | 3890 | 2950,74 | Elevée |
| | FEV 2015 | 1480 | 1122,65 | Elevée |

| | | | | |
|----------|-----------------|-------------|----------------|---------------|
| 2 | SEP 2011 | 2130 | 1615,70 | Elevée |
| | FEV 2012 | 2350 | 1782,58 | Elevée |
| | SEP 2014 | 2150 | 1630,87 | Elevée |
| | FEV 2015 | 2327 | 1765,13 | Elevée |
| 3 | SEP 2011 | 3000 | 2275,63 | Elevée |
| | FEV 2012 | 3000 | 2275,63 | Elevée |
| | SEP 2014 | 3020 | 2290,80 | Elevée |
| | FEV 2015 | 2977 | 2258,19 | Elevée |
| 4 | SEP 2011 | 2980 | 2260,46 | Elevée |
| | FEV 2012 | 2980 | 2260,46 | Elevée |
| | SEP 2014 | 2300 | 1744,65 | Elevée |
| | FEV 2015 | 2960 | 2245,29 | Elevée |
| 5 | SEP 2011 | 2680 | 2032,90 | Elevée |
| | FEV 2012 | 2300 | 1744,65 | Elevée |
| | SEP 2014 | 2700 | 2048,07 | Elevée |
| | FEV 2015 | 2981 | 2261,22 | Elevée |
| 6 | SEP 2011 | 3320 | 2518,37 | Elevée |
| | FEV 2012 | 3320 | 2518,37 | Elevée |
| | SEP 2014 | 3340 | 2533,54 | Elevée |
| | FEV 2015 | 3301 | 2503,95 | Elevée |
| 7 | SEP 2011 | 3680 | 2791,44 | Elevée |
| | FEV 2012 | 3240 | 2457,68 | Elevée |
| | SEP 2014 | 3700 | 2806,61 | Elevée |
| | FEV 2015 | 3220 | 2442,51 | Elevée |
| 8 | SEP 2011 | 2640 | 2002,56 | Elevée |
| | FEV 2012 | 2400 | 1820,51 | Elevée |

| | | | | |
|----|----------|------|---------|--------|
| | SEP 2014 | 2660 | 2017,73 | Elevée |
| | FEV 2015 | 2381 | 1806,09 | Elevée |
| 9 | SEP 2011 | 3110 | 2359,07 | Elevée |
| | FEV 2012 | 3110 | 2359,07 | Elevée |
| | SEP 2014 | 3130 | 2374,24 | Elevée |
| | FEV 2015 | 3100 | 2351,49 | Elevée |
| 10 | SEP 2011 | 2900 | 2199,78 | Elevée |
| | FEV 2012 | 2500 | 1896,36 | Elevée |
| | SEP 2014 | 2920 | 2214,95 | Elevée |
| | FEV 2015 | 2478 | 1879,67 | Elevée |
| 11 | SEP 2011 | 2130 | 1615,70 | Elevée |
| | FEV 2012 | 2480 | 1881,19 | Elevée |
| | SEP 2014 | 2150 | 1630,87 | Elevée |
| | FEV 2015 | 2460 | 1866,02 | Elevée |

4.2.2-Paramètres chimiques :

4.2.2.1-Eléments chimiques majeurs :

4.2.2.1.1 –Les Cations :

- Le Calcium Ca^{2+} :

Les sels de Calcium sont très fréquents dans les eaux naturelles. La teneur en calcium dépend de la nature géologique des terrains traversés par les eaux souterraines. Cette teneur entre, pour une large part, dans la définition de la dureté de l'eau.

Le Calcium est un élément alcalinoterreux fréquent dans les roches sédimentaires, il provient essentiellement de la dissolution des roches carbonatées (roches Calcaires et Dolomitiques) et des évaporites comme l'Anhydrite et le Gypse ((CaSO_4) $2\text{H}_2\text{O}$), à la présence du gaz carbonique CO_2 dissous (acide carbonique) provenant de l'atmosphère et du sol selon les équations suivantes :

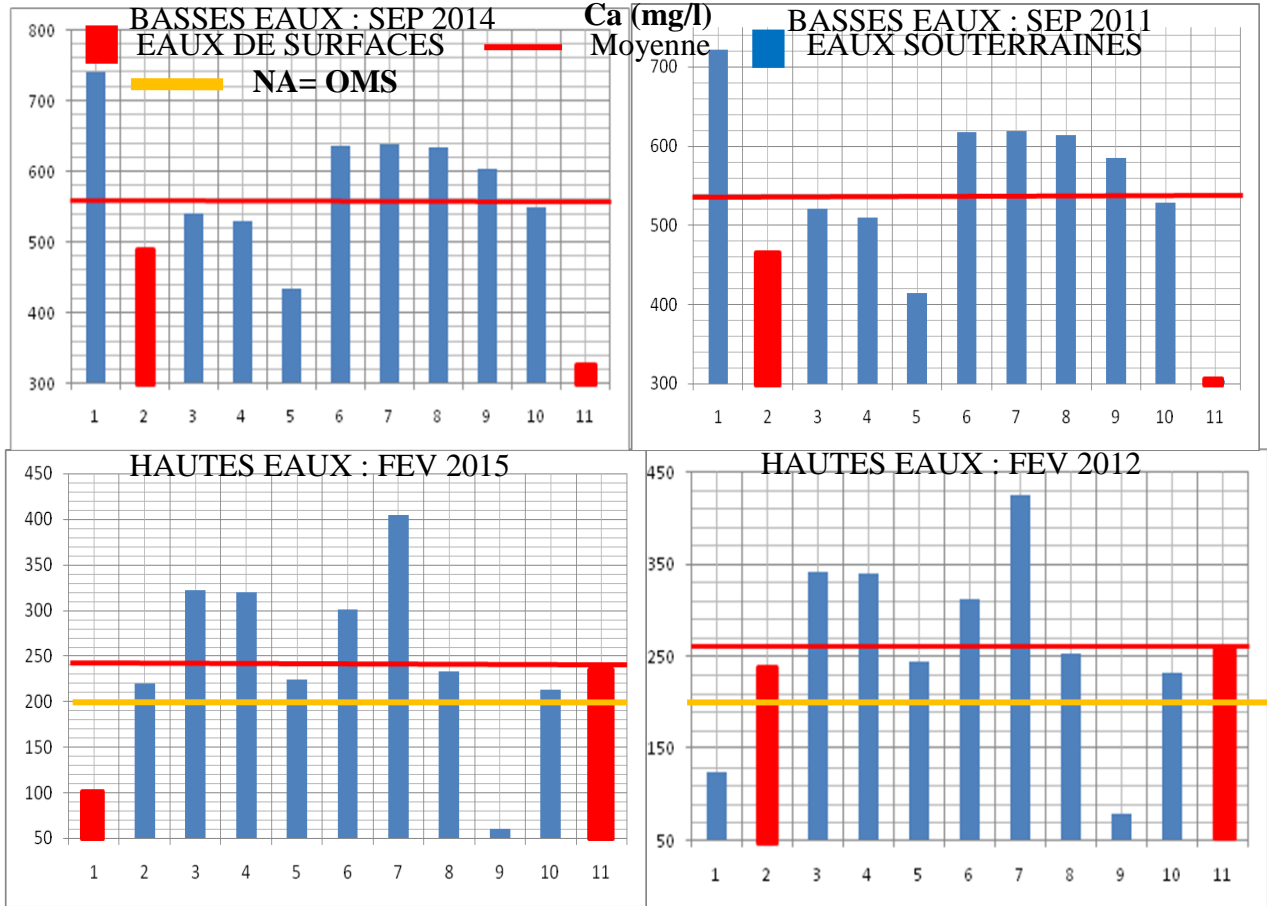
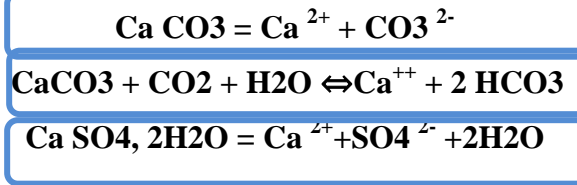


Fig.VI.08 : Histogrammes de variation de l'ion Calcium dans les eaux de la plaine d'El-Kantara. (Auteur, 2022).

Pendant la période d'étude on remarque que les concentrations sont comprises entre un minimum de 60.50 mg/l enregistré au point d'eau (9) durant la période des hautes eaux (FEV 2015) et un maximum de 741.21mg/l enregistré au point d'eau (1) durant la période des basses eaux (SEP 2014) (**FIG .VI.08**).

Les concentrations en Calcium des eaux souterraines de la région d'étude subissent une évolution remarquable dans le temps (hautes eaux et basses eaux) et dans l'espace qui est liée au phénomène de dilution, ce qui est indiqué par les écarts types des observations mesurées qui ne sont pas importants en périodes des basses eaux (20.51% à 21.27%) et qui deviennent important durant les périodes des hautes eaux (37.83% à 40.87%)

La plupart des points d'eau de la plaine présentent des concentrations qui dépassent largement la norme Algérienne de potabilité et celle de l'OMS (200 mg/l).

-Le Magnésium Mg^{2+} :

C'est un élément qui accompagne souvent le Calcium. Généralement dans les régions arides et semi-arides, il est présent dans les eaux souterraines avec des teneurs assez importantes. La teneur en Magnésium dépend, comme celle du Calcium, de la composition des roches sédimentaires rencontrées. Le Magnésium dans l'eau provient de la dissolution des Dolomies, des Calcaires dolomitiques, des minéraux ferromagnésiens. Le Magnésium contribue à la dureté de l'eau. Il est important dans les formations évaporitiques avec un rapport Mg/Ca dépassant en général "1". Par contre, dans les eaux bicarbonatées ce rapport est en général inférieur à "1" (In Brinis, 2011).

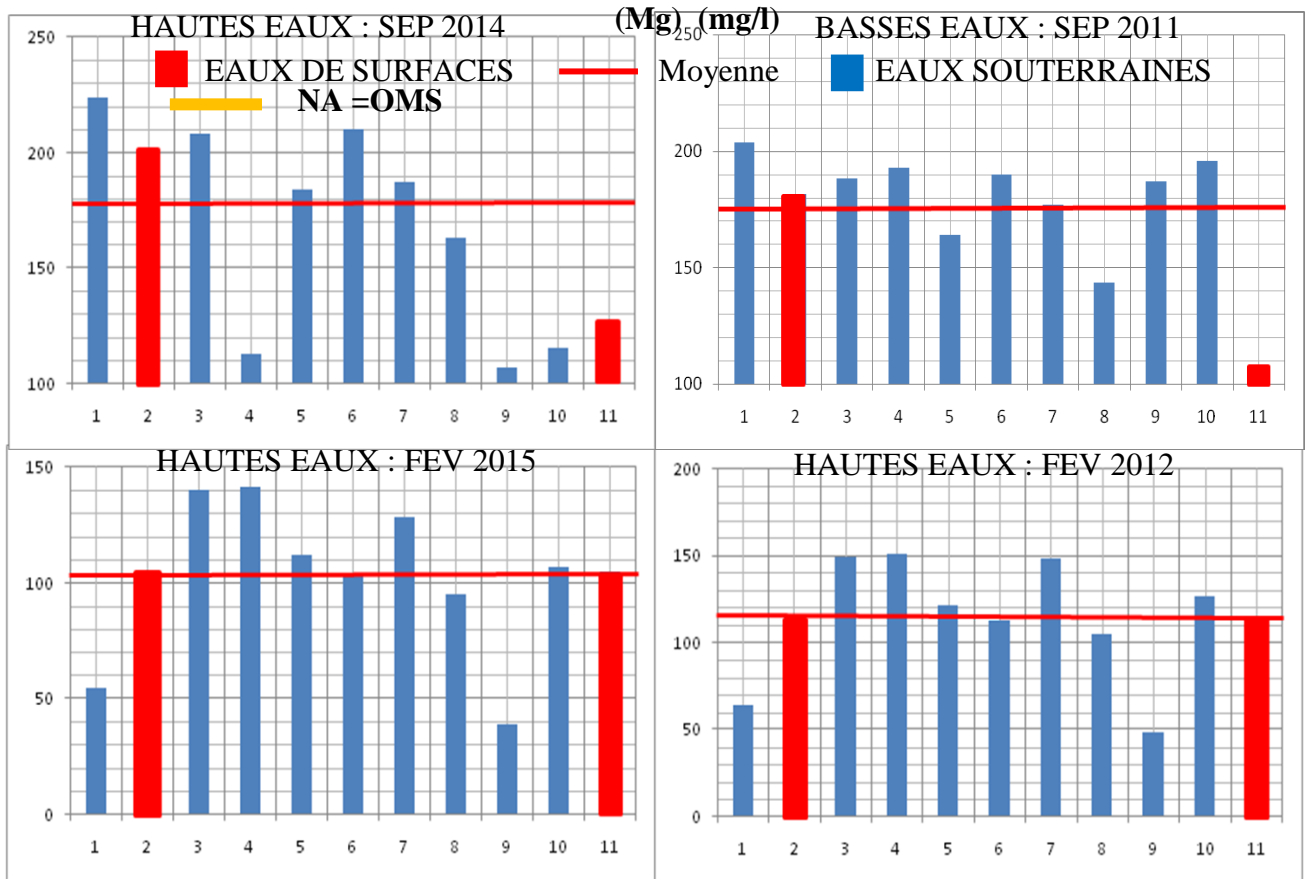


Fig.VI.09 : Histogrammes de variation de l'ion Magnésium dans les eaux de la plaine d'El-Kantara. (Auteur, 2022).

On remarque que la variation des concentrations du Magnésium est similaire à celle du Calcium dont les teneurs sont comprises entre un minimum de 38.70 mg/l enregistré au point d'eau (9) durant la période des hautes eaux (FEV 2015) et un maximum de 223.66

mg/l enregistré au point d'eau (1) durant la période des basses eaux (SEP 2014) (FIG .VI.09) .

– Pour la campagne de (SEP 2011) : La majorité des concentrations en ion Mg^{2+} dépassent les normes de potabilité Algérienne et de l'OMS fixée à (200 mg/l), à l'exception des points 1 et 8 , tandis que pour la campagne de (SEP 2014) les points 4,9,10, et 11 qui sont conformes aux normes de potabilité Algérienne et celles de l'OMS .

-Pour les campagnes des hautes eaux : La totalité des concentrations en ion Mg^{2+} sont conformes aux normes de potabilité Algérienne et celles de l'OMS, à l'exception du point 4 durant la campagne de (FEV 2012) (FIG .VI.09) . Les écarts types des observations mesurées ne sont pas importants et sont dans une limite maximale de 30% par rapport aux moyennes.

-Le Sodium (Na^+) :

Les teneurs élevées en Sodium dans l'eau proviennent de la dissolution des terrains salés, des formations riches en NaCl, des formations argileuses sodiques et argilo-marneuses gypseuses et du rejet des eaux usées d'origine industrielle. Il peut aussi provenir de l'activité humaine qui utilise beaucoup de sels de Sodium. En agriculture, il constitue, à des doses acceptables, associé aux autres éléments alcalins et alcalino-terreux, un élément de maintien de la perméabilité des sols.

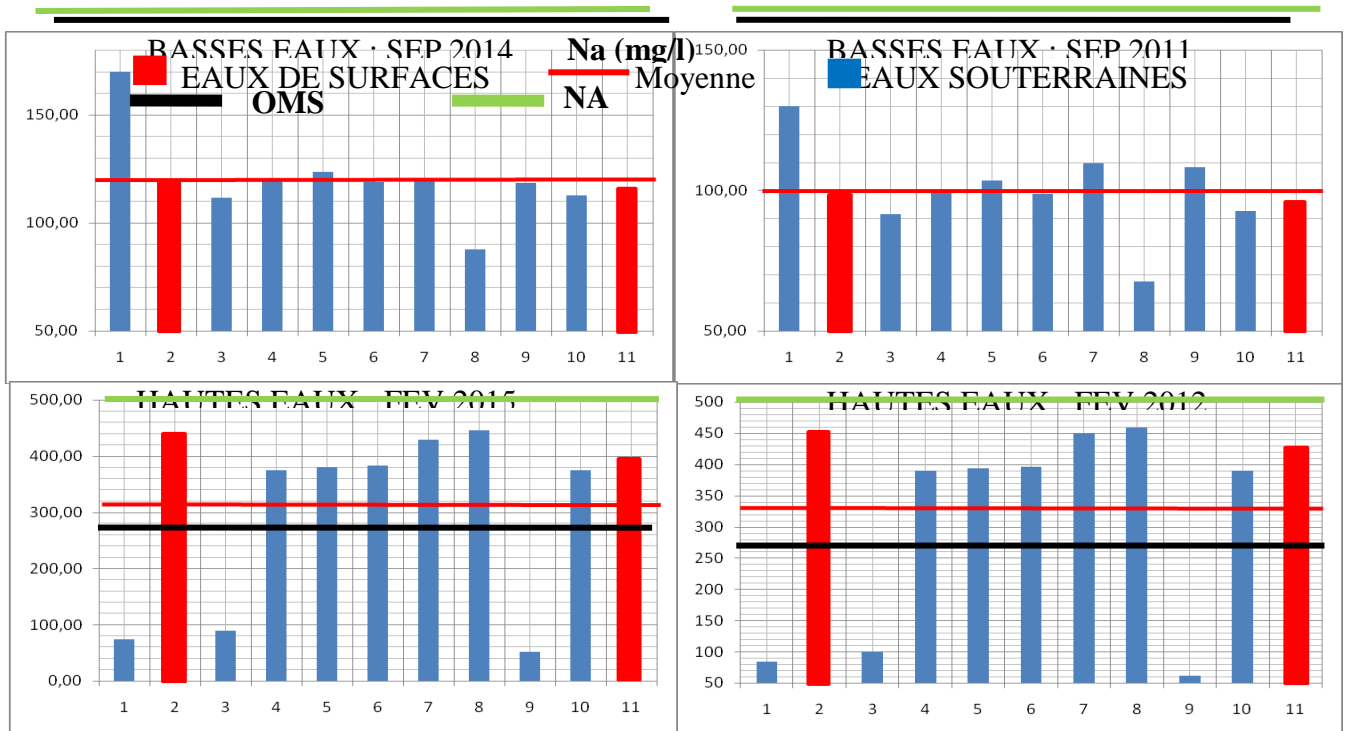


Fig. .VI.10 : Histogrammes de variation de l'ion Sodium dans les eaux de la plaine d'El-Kantara. (Auteur, 2022).

Les teneurs en Sodium des eaux de la zone d'étude sont exprimées en mg/l et représentées au tableau (Tab.VI.02) et à la figure (FIG .VI.10). Pendant la période d'étude on remarque que les concentrations en Sodium sont comprises entre un minimum de 51.90 mg/l enregistré au point d'eau (9) durant la période des hautes eaux (FEV 2015) et un maximum de 458.85 mg/l enregistré au point d'eau (8) durant la période des hautes eaux (FEV 2012).

Les écarts par rapport à la moyenne sont faibles durant la période des basses eaux (15.05% à 16 .05%) et deviennent importants durant la période des hautes eaux (48.81% à 50.17%), ce qui indique une évolution remarquable dans le temps (hautes eaux et basses eaux) et dans l'espace qui est liée aux phénomènes de dilution et de lessivage de toutes ces eaux.

Pour la période des basses eaux toutes les valeurs sont inférieures aux normes de potabilité OMS et Algérienne. Par contre, pour la période des hautes eaux la majorité de ces valeurs sont supérieures aux normes de potabilité OMS et conforment aux normes de potabilité Algérienne.

-Le Potassium (K⁺) :

Les teneurs élevées en Potassium dans l'eau proviennent de la dissolution des terrains salés, des formations riches en KCl, des formations argileuses, argilo-marneuses, gypseuses et du rejet des eaux usées d'origine industrielle. Il peut aussi provenir de l'activité humaine qui utilise beaucoup des engrais de type NPK.

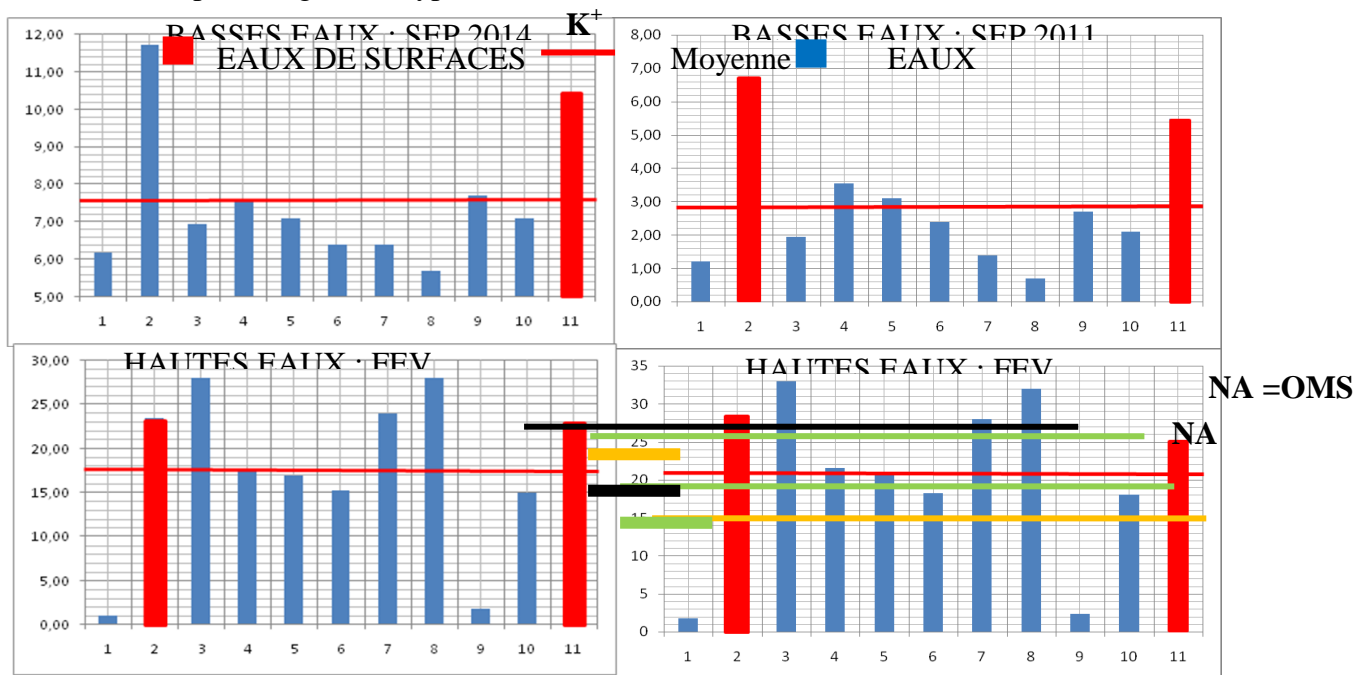


Fig.VI.11 : Histogrammes de variation de l'ion Potassium dans les eaux de la plaine d'El-Kantara. (Auteur, 2022).

Pendant la période d'étude on remarque que les concentrations en Potassium sont comprises entre un minimum de 0.69 mg/l enregistré au point d'eau (8) durant la période des basses eaux (SEP 2011) et un maximum de 28 mg/l enregistré au points d'eau (3 et 8) durant la période des hautes eaux (FEV 2015) (**FIG .VI.11**) .

Les écarts par rapport à la moyenne sont faibles durant la période (SEP 2014) avec une valeur de (24.79 % tandis qu'ils deviennent importants et dépassent 50% en prenant la valeur maximale durant la période des basses eaux (SEP 2011) avec une valeur qui atteint (64.79%).

-Pour les campagnes des hautes eaux : La majorité des concentrations en ion K^+ sont supérieures aux normes de potabilité Algérienne et celles de l'OMS, à l'exception des points 1 et 9. Par contre, durant la campagne de (SEP 2011) toutes les valeurs sont inférieures aux normes de potabilité Algérienne et celles de l'OMS.

-Pour la campagne de (SEP 2014) la majorité des concentrations en ion K^+ sont inférieures aux normes de potabilité Algérienne et celles de l'OMS.

4.2.2.1.2–Les Anions :

-Les Chlorures (Cl⁻):

Les Chlorures existent dans toutes les eaux à des concentrations très variables. Ils peuvent avoir plusieurs origines qui sont liés principalement à la dissolution des terrains salifères. La dissolution de ces sels étant très facile d'où leurs présences en fortes concentrations dans les eaux ayant traversées les formations argilo sableuses ou argileuses. Ainsi, ils peuvent provenir également de l'action humaine ou par contamination par les eaux usées. Les Chlorures donnent un goût indésagréable et posent le problème de la corrosion dans les canalisations et les réservoirs à partir de 50 mg/l (selon la norme de l'O.M.S).

Pendant la période d'étude on remarque que les concentrations en Chlorures sont comprises entre un minimum de 60.75 mg/l enregistré au point d'eau (1) durant la période des hautes eaux (FEV 2015) et un maximum de 502.80 mg/l enregistré au points d'eau (8) durant la période des basses eaux (SEP 2015) (**FIG .VI.12**).

Globalement, les moyennes des concentrations dont on dispose ne dépassent pas dans tous les cas les limites. Les écarts par rapport à la moyenne sont légèrement faibles et à la limite de 30% durant la période basses eaux tandis qu'ils deviennent importants et dépassent 50% durant la période des hautes eaux en prenant la valeur maximale durant la campagne de

(FEV2015) avec une valeur qui atteint (56.78%). Ce qui indique une évolution remarquable dans le temps (hautes eaux et basses eaux) et dans l'espace qui est liée au phénomène de dilution de toutes ces eaux.

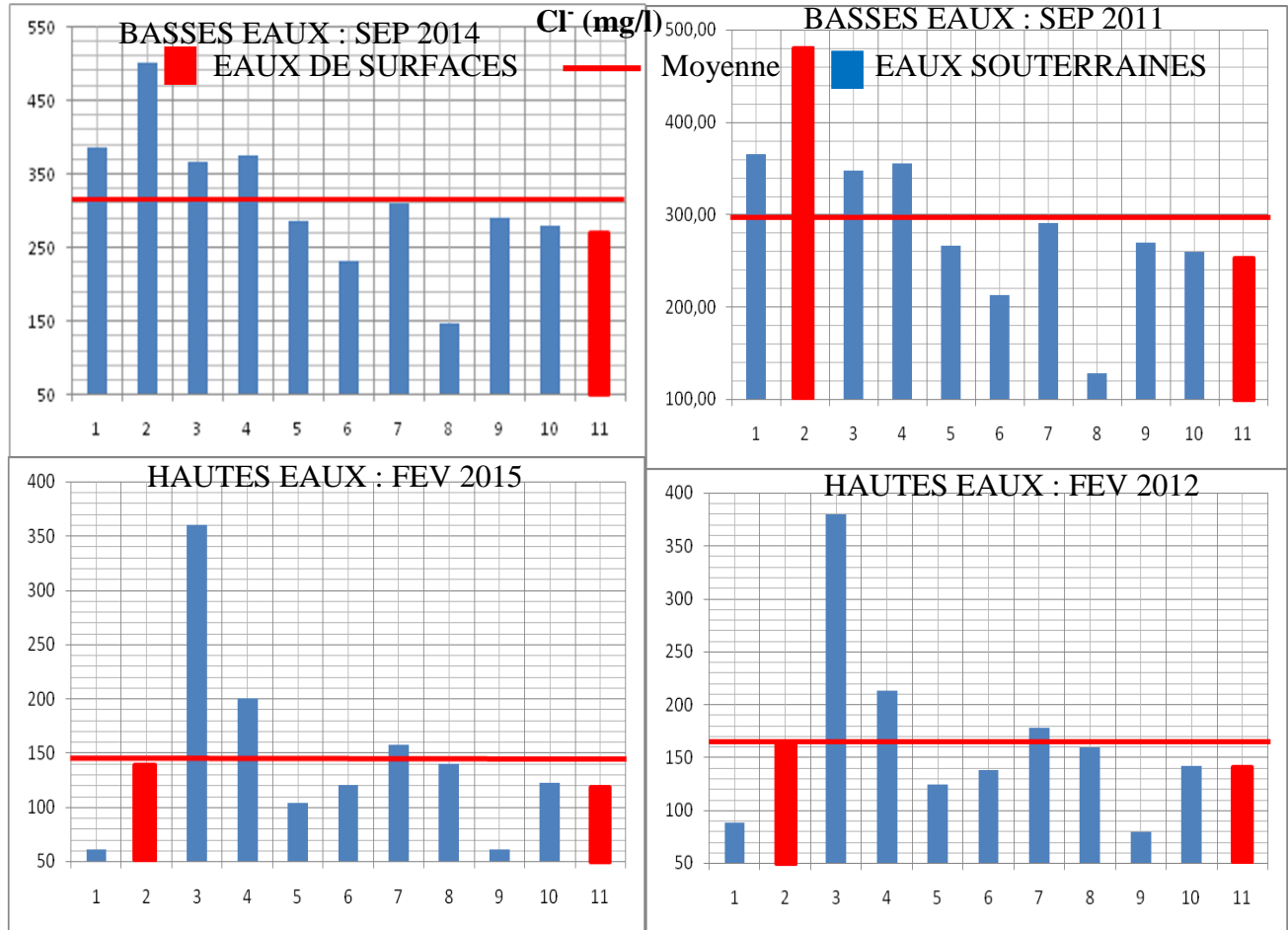


Fig.VI.12 : Histogrammes de variation des Chlorures dans les eaux de la plaine d'El-Kantara. (Auteur, 2022).

-Pour les campagnes des hautes eaux : La majorité des concentrations en ion Cl^- sont inférieures aux normes de potabilité Algérienne et celles de l'OMS, à l'exception de quelques points. Par contre, durant les campagnes des hautes eaux la majorité des valeurs sont conformes aux normes de potabilité Algérienne et inférieures à celles de l'OMS.

-Les Sulfates (SO_4^{-2}):

Composés naturels des eaux, ils sont liés aux cations majeurs : Calcium, Potassium et Sodium. Ils proviennent de la dissolution des formations gypseuses ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) triasiques comme ils peuvent être associés à des formations plus récentes comme les argiles et les marnes du Miocène et du Quaternaire. Ils sont également indicateurs d'une pollution par des eaux usées et de l'activité humaine mais il est difficile de préciser l'origine. On

peut citer comme sources anthropiques les ateliers de décapage métallique, les tanneries, les textiles et l'industrie papetière. Les eaux d'El-Kantara sont très riches en Sulfates et les valeurs mesurées (**Tab.VI.03**) sont dans leurs majeures parties dominantes par rapport aux autres éléments. Ces valeurs dépassent dans tous les cas les normes de potabilité de l'OMS et celles Algériennes. L'origine est sans doute due à la dissolution des formations plus récentes comme les argiles et les marnes du Miocène et du Quaternaire et de l'activité humaine. Les écarts types sont importants. Les écarts par rapport à la moyenne sont faibles durant la période des basses eaux à la limite de 8% tandis qu'ils connaissent une augmentation légèrement importante et à la limite de 30% durant la période des hautes eaux. Ce qui indique une évolution remarquable dans le temps (hautes eaux et basses eaux) et dans l'espace qui est liée au phénomène de dilution de toutes ces eaux.

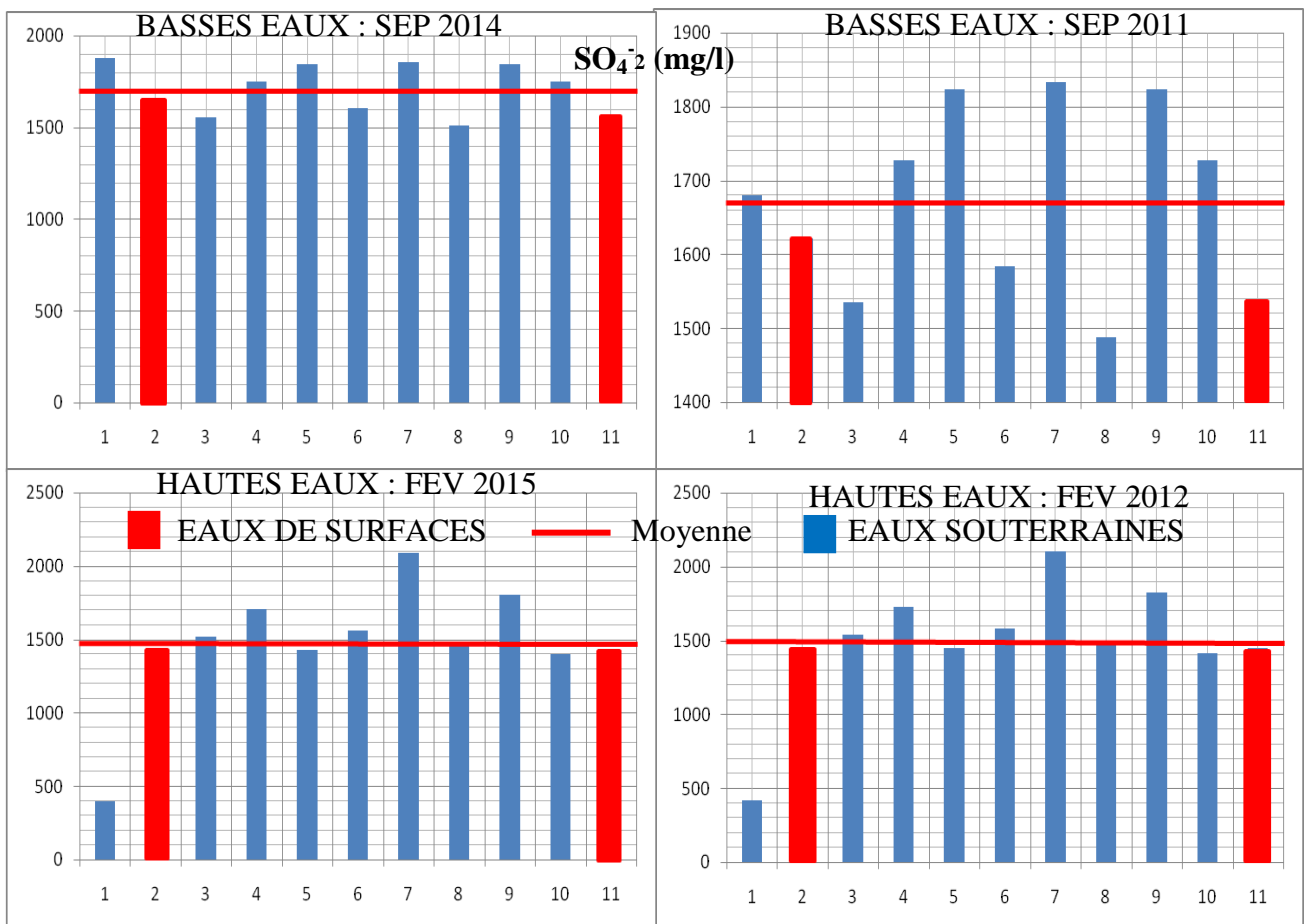
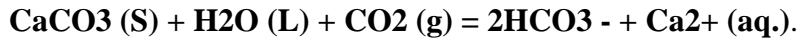


Fig.VI.13 : Histogrammes de variation des Sulfates dans les eaux de la plaine d'El-Kantara. (Auteur, 2022).

-Les Bicarbonates (HCO₃⁻) :

Les bicarbonates se trouvent dans les eaux naturelles, leur présence dans l'eau est conditionnée par l'équilibre physico-chimique entre la roche, l'eau et le gaz carbonique

(CO₂). Ils proviennent de la dissolution des formations carbonatées (Calcaire, Dolomie) par des eaux chargées en gaz carbonique (CO₂) selon l'équation suivante:



Les concentrations de cet élément sur l'ensemble de la plaine sont reportées au tableau (Tab.VI.03).

Les écarts par rapport à la moyenne sont à la limite de 30% à l'exception de la campagne de Septembre 2011 qui présente une augmentation importante (50%). Les variations des concentrations en Bicarbonates (HCO₃⁻) dans le temps et dans l'espace sont liées à la nature lithologique des terrains traversés, caractérisée par des formations carbonatées et le phénomène de dissolution des carbonates.

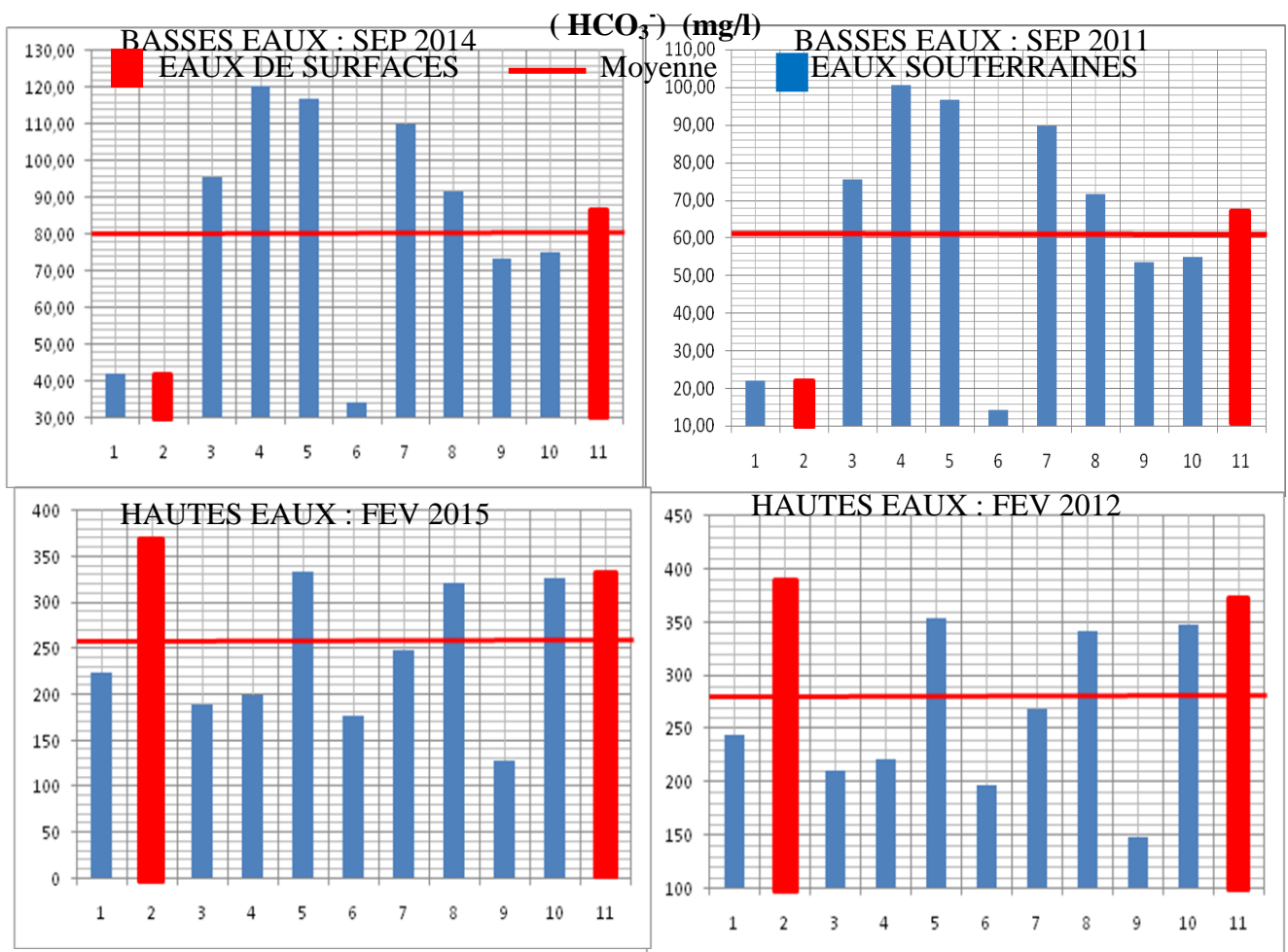


Fig.VI.14 : Histogrammes de variation des Bicarbonates dans les eaux de la plaine d'El-Kantara. (Auteur, 2022).

4.2.2.2-Les éléments indicateurs de pollution agricole (Substances eutrophisantes): Plus précisément les différentes formes d'azote et de phosphore (nutriments). Les composés qui en contiennent comme les Phosphates et les Nitrates constituent dès lors des matières

nutritives de choix pour les végétaux. Les concentrations en nitrites (NO_2^-), nitrates (NO_3^-), ammoniac (NH_3) et ammonium (NH_4^+), phosphates (PO_3^-), azote (N) et phosphore (P) sont dès lors des paramètres importants pour le suivi de la qualité des eaux et proprement des eaux de surfaces car les teneurs importantes induisent le phénomène d'eutrophisation (étouffement de la vie aquatique).

-Les Nitrates (NO_3^-):

Les nitrates se trouvant naturellement dans les eaux. C'est une forme très soluble des formes azotées organiques. Leur présence dans l'eau est principalement liée à l'activité humaine. Elle accélère le processus d'enrichissement en éléments nutritifs par l'apport d'engrais sur les sols cultivés. Les eaux d'irrigation et de pluie s'infiltrent dans les nappes, ce qui modifie la

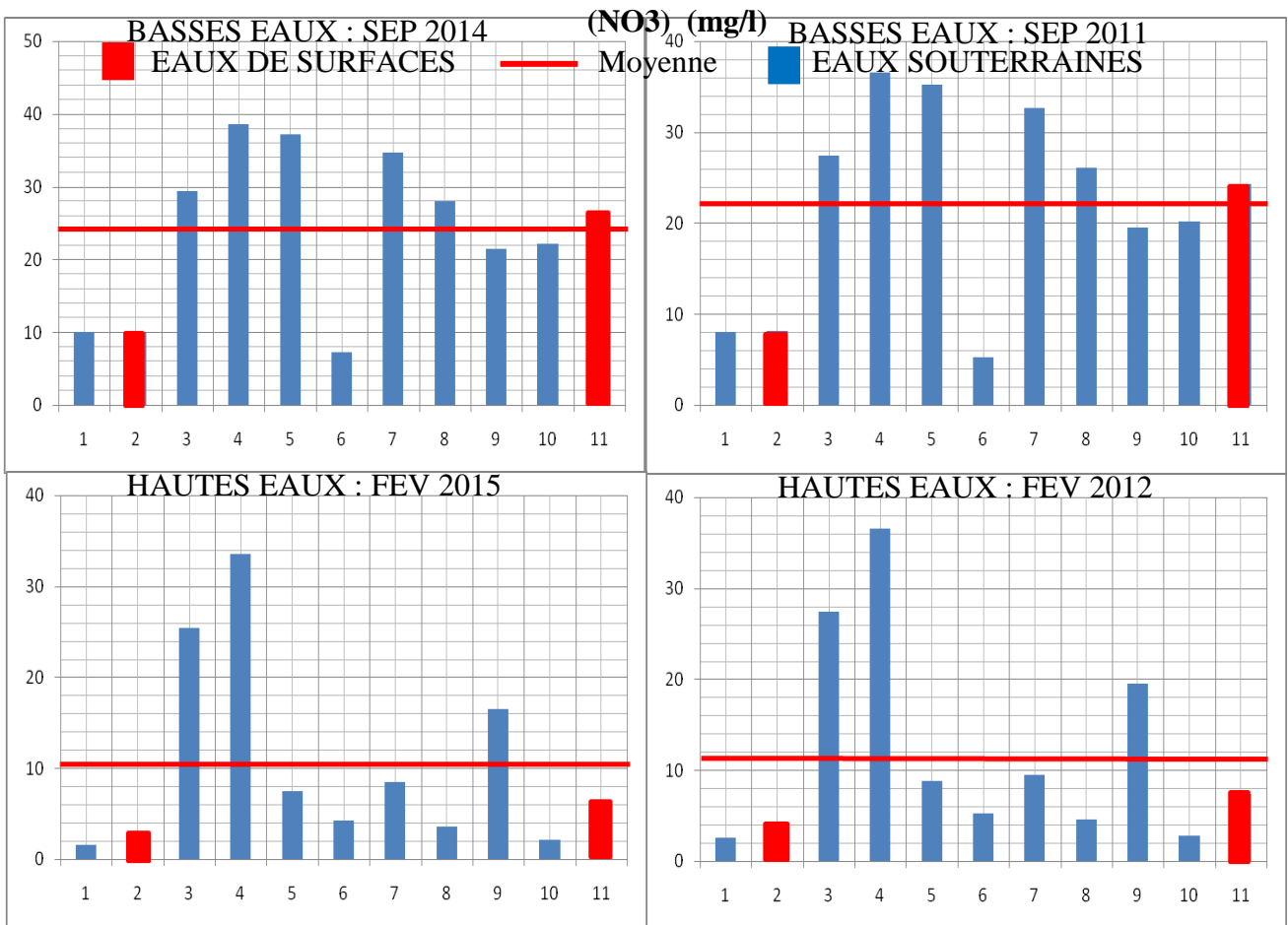


Fig.VI.15 : Histogrammes de variation des Nitrates dans les eaux de la plaine d'El-Kantara. (Auteur, 2022).

Au cours des campagnes d'étude, les teneurs enregistrées dans la région (**Tab.VI.04**) en Nitrates paraissent acceptables et ne dépassent pas les normes de potabilité de l'OMS fixées à (40 mg/l) et celles algériennes qui sont fixées à (50 mg/l) (Fig. VI.15).

La présence des Nitrates dans les eaux de la plaine est globalement sans danger selon les normes, mais elle est inquiétante dans quelques endroits où la teneur est à la limite de 40 mg / l . Les écarts par rapport à la moyenne sont très importants peuvent confirmer ces constatations.

-Les Nitrites (NO₂):

Les formes azotées organiques, Ammoniaques et Nitrates sont susceptibles d’être à l’origine de formation des Nitrites par un processus soit d’oxydation biologique des Nitrates, soit par réduction des Nitrates sous l’influence d’une action bactérienne (phénomène de dénitrification) .Les Nitrites représentent une forme de passage entre les Nitrates et l’Ammonium.

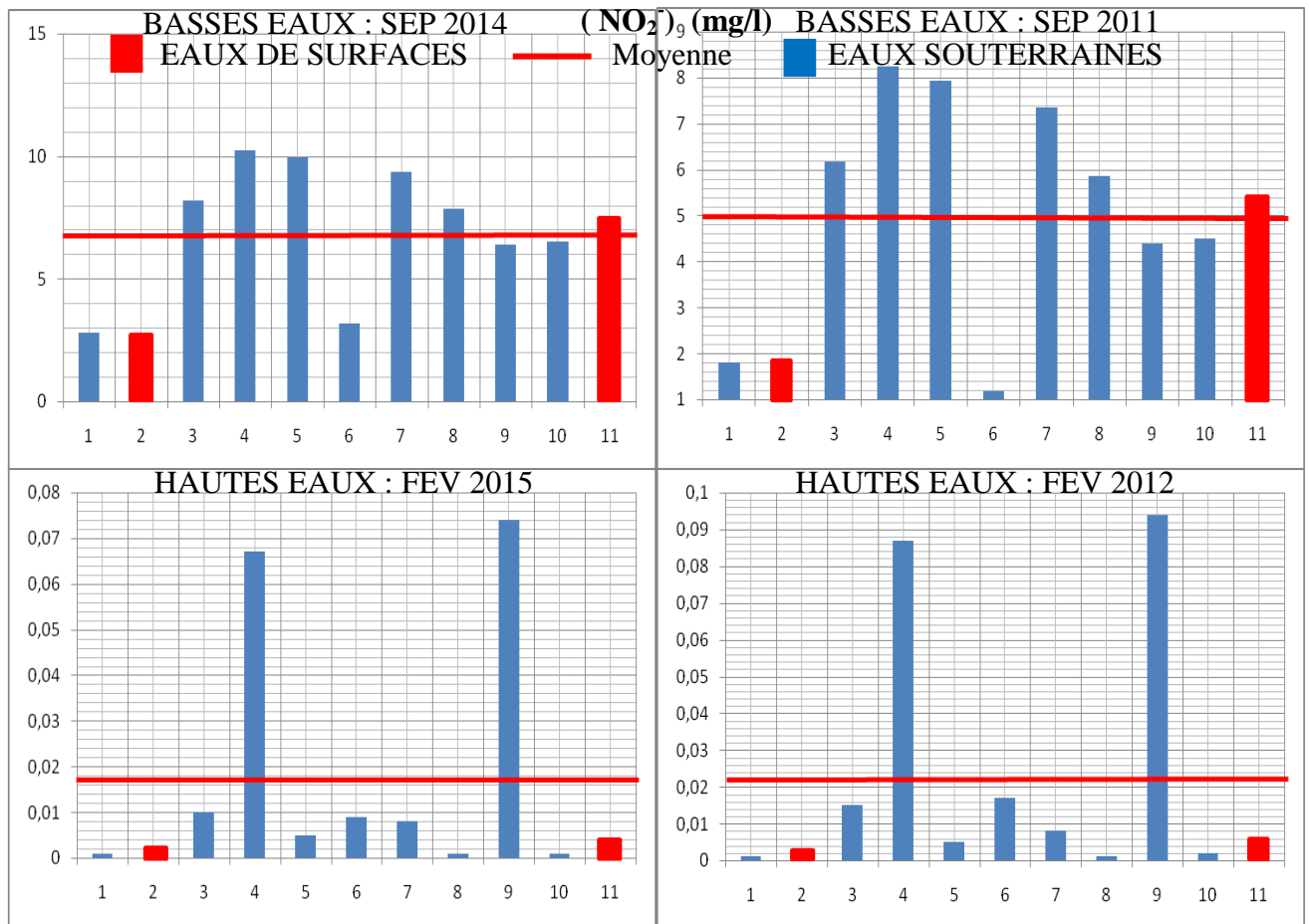


Fig.VI.16 : Histogrammes de variation des Nitrites dans les eaux de la plaine d’El-Kantara. (Auteur, 2022).

Au cours des campagnes d’étude, les teneurs enregistrées dans la région en Nitrites (Tab.VI.04) paraissent acceptables et ne dépassent pas les normes de potabilité de l’OMS fixée à (0.1 mg/l) et celles algérienne qui sont fixées à (0.2 mg/l) durant la période des hautes eaux (Fig. VI.16).

Par contre, ces teneurs dans les eaux de la plaine sont alarmantes et inquiétantes et posent un danger selon les normes avec des moyennes respectivement 4.98mg/l et 6.79 mg/l pour les campagnes SEP 2011 et SEP 2014 et qui peuvent atteindre des valeurs maximales 10.24mg/l. Les écarts par rapport à la moyenne sont très importants.

-L'azote ammoniacal (NH_4^+):

L'azote ammoniacal se présente sous la forme toxique NH_4^+ . Sa présence dans les eaux traduit habituellement un processus de dégradation incomplet de la matière organique.

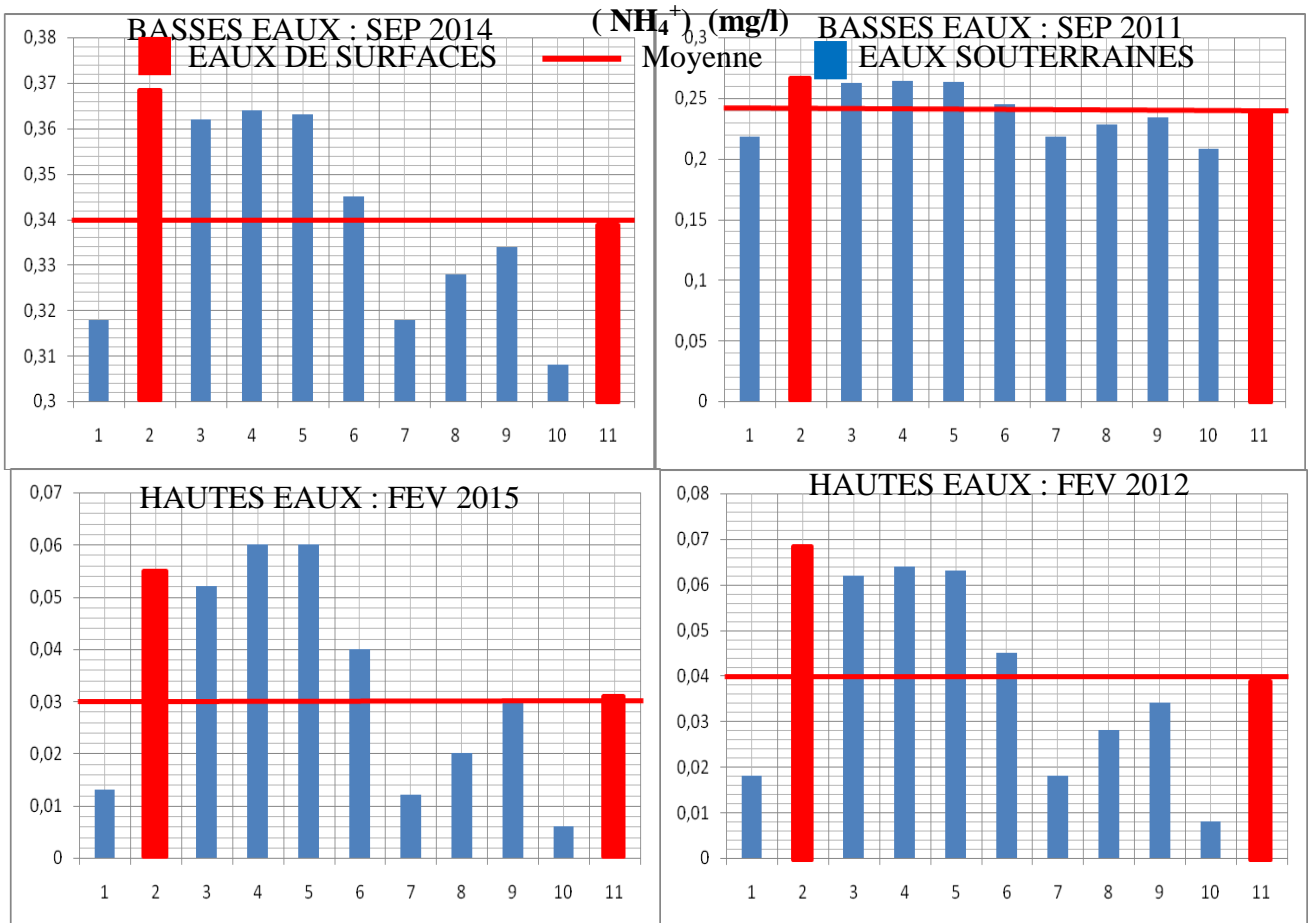


Fig.VI.17 : Histogrammes de variation de l'Ammonium dans les eaux de la plaine d'El-Kantara. (Auteur, 2022).

Les teneurs enregistrées dans la région (**Tab.VI.04**) en azote ammoniacal (Ammonium) paraît très acceptables et ne dépassent pas les normes de potabilité de l'OMS fixée à (0.2 mg/l) et celles Algérienne qui sont fixées à (0.5 mg/l) (Fig. VI.17).

Les écarts par rapport à la moyenne sont faibles à la limite de 8% durant les campagnes des basses eaux. Par contre, ces valeurs augmentent et atteignent des limites importantes 66.67% durant les campagnes des hautes eaux.

Les faibles teneurs en éléments azotés et les variations des concentrations en Nitrates dans les eaux de la plaine qui atteindront dans quelques endroits la limite de 40 mg /l témoignent la faible activité agricole et de la présence d'une pollution d'origine urbaine (le lessivage de la décharge publique).

-Les composés Phosphatés:

Tel que l'Azote (N), le Phosphore (P) constitue un des paramètres importants pour le suivi de la qualité des eaux et proprement dis les eaux de surfaces car les teneurs importantes induisent le phénomène d'eutrophisation (étouffement de la vie aquatique). Les composés qui en contiennent comme les Phosphates constituent dès lors des matières nutritives de choix pour les végétaux. Leur présence dans l'eau est principalement liée à l'activité humaine. Elle accélère le processus d'enrichissement en éléments nutritifs par l'apport d'engrais Phosphatés et par l'irrigation et par l'infiltration d'eaux usées domestiques et les rejets des eaux minérales d'industries.

-Les Phosphates (Orthophosphates) (PO_4^{2-}) :

Les Phosphates (PO_4^{2-}) sont la forme la plus simple et la plus répandue des Phosphates dans l'eau. Ils sont appelés aussi Orthophosphates, correspondent à une forme minérale oxydée du Phosphore. Les Phosphates se présentent sous forme dissoute, colloïdale ou solide. Ces différentes formes des Phosphates, issues du sel d'acide Orthophosphorique (H_3PO_4), sont présentes dans les eaux car elles s'ionisent: en $H_2PO_4^-$, HPO_4^{2-} et PO_3^- . Les Phosphates sont le composé le plus présent dans la charge totale en Phosphate.

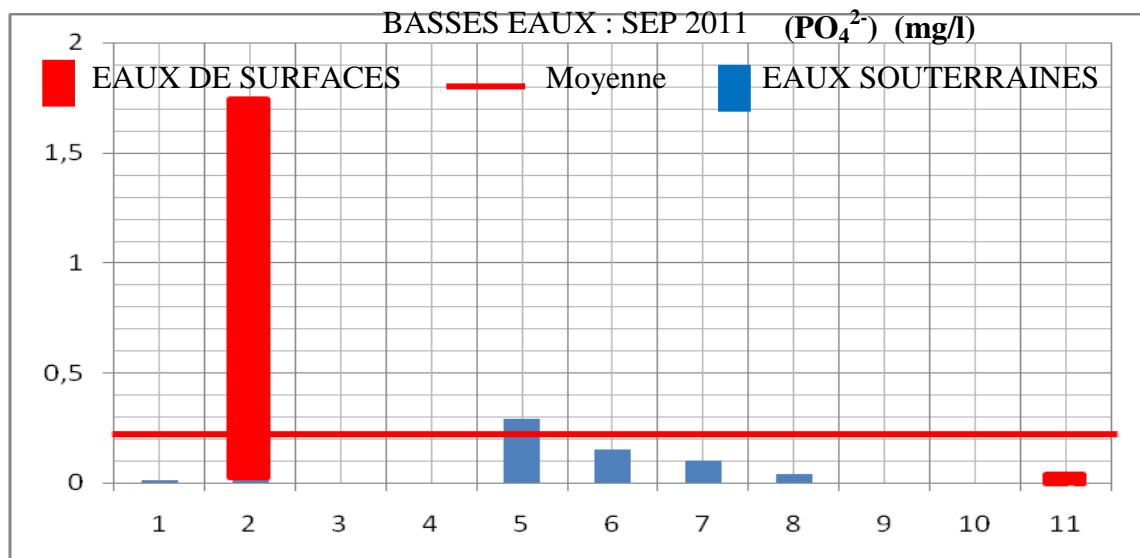


Fig.VI.18 : Histogrammes de variation des Orthophosphates dans les eaux de la plaine d'El-Kantara. (Auteur, 2022).

Les teneurs enregistrées dans la région (**Tab.VI.04**) en phosphates durant la seule campagne de SEP.2011 paraient très acceptables et ne dépassent pas les normes de potabilité de l'OMS fixée (0.5 mg/l) à l'exception du point (1), qui dépasse la norme et qui est en liaison avec les rejets de la zone urbaine. L'écart par rapport à la moyenne est très élevé.

-Le Phosphore total (P):

Le Phosphore n'est naturellement présent qu'en très faible quantité dans le sol et dans les eaux. Une concentration importante de Phosphore et plus précisément des Phosphates peut entraîner la prolifération des algues puisqu'il s'agit d'un élément nutritif pour les végétaux. Or, les algues sont responsables de l'eutrophisation des eaux stagnantes. Ce phénomène d'eutrophisation est alors plus ou moins important selon la teneur en Phosphates dans les eaux usées. Cependant, le Phosphore est le facteur limitant sur lequel il est possible de jouer efficacement pour réduire l'eutrophisation.

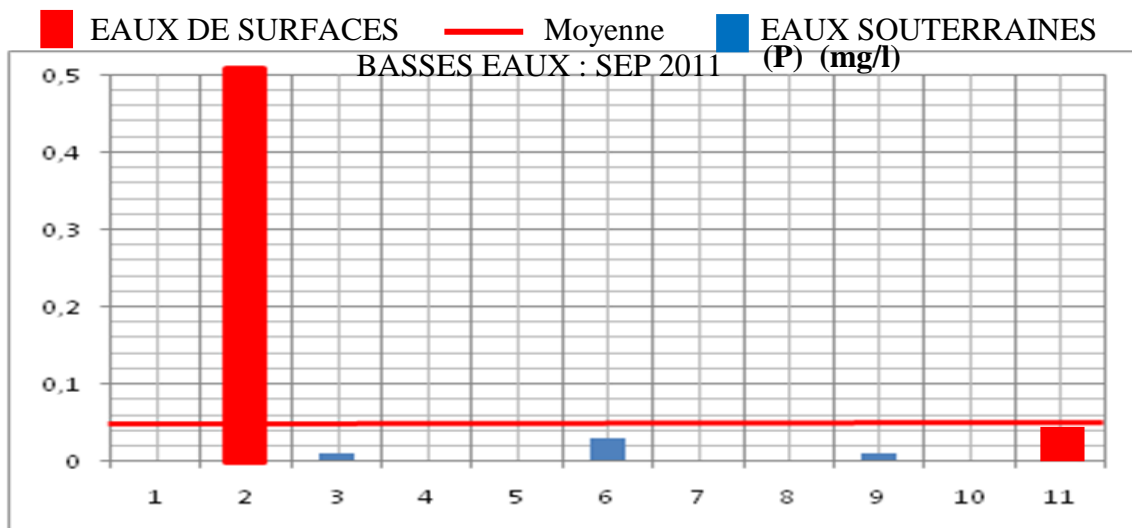


Fig.VI.19 : Histogrammes de variation du Phosphore dans les eaux de la plaine d'El-Kantara. (Auteur, 2022).

Comme les Phosphates, les teneurs enregistrées dans la région (**Tab.VI.04**) en Phosphores total durant la seule campagne de SEP.2011 paraient très acceptables et ne dépassent pas les normes de potabilité de l'OMS fixée à (1 mg/l) et celles Algérienne. Les valeurs les plus élevée sont les valeurs des eaux de surfaces et qui sont en liaison avec les rejets de la zone urbaine. L'écart par rapport à la moyenne est très élevé.

4.2.2.3-Charge en matières organiques (les éléments indicateurs de pollution anthropique) : Deux méthodes permettant d'évaluer la quantité en matière organique présente dans l'eau sont généralement utilisées : la demande biochimique en oxygène (DBO) et la demande chimique en oxygène (DCO). Ces deux méthodes se basent sur la différence

entre la teneur en oxygène dissous initiale et la teneur en oxygène dissous finale après oxydation de la matière organique présente dans un échantillon d'eau.

- La demande biochimique en oxygène en cinq jours (DBO₅):

La demande biochimique en oxygène (DBO) représente la quantité d'oxygène utilisée par les bactéries pour décomposer partiellement ou pour oxyder totalement les matières biochimiques oxydables présentes dans l'eau et qui constituent leur source de carbone (graisses, hydrates de carbone, tensioactifs, etc.). Ce prélèvement d'oxygène se fait au détriment des autres organismes vivants du milieu aquatique. En ce qui concerne les eaux domestiques, environ 70% des composés organiques sont généralement dégradés après 5 jours et la dégradation est pratiquement complète au bout de 20 j ours. L'indicateur utilisé est généralement la DBO₅ qui correspond à la quantité d'oxygène (exprimée en mg/ l) nécessaire aux microorganismes décomposeurs pour dégrader et minéraliser en 5 jours la matière organique présente dans un litre d'eau polluée. La DBO₅ représente la charge polluante organique biodégradable. Elle donne donc une indication importante pour juger de la qualité de l'eau et son degré de pollution. Plus elle est élevée, plus la quantité de matières organiques présentes dans l'échantillon est élevée. C'est un teste peu précis pour qualifier les eaux naturelles mais très utilisé pour surveiller l'efficacité des stations d'épuration.

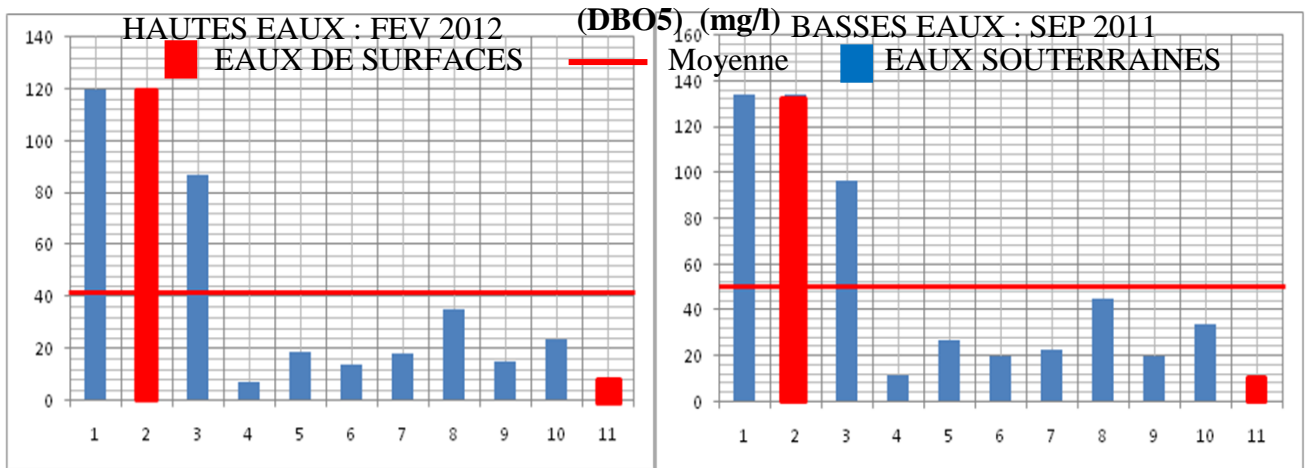


Fig.VI.20 : Histogrammes de variation du DBO₅ dans les eaux de la plaine d'El-Kantara. (Auteur, 2022).

Pendant la période (SEP 2011 et FEV 2012) on remarque que les concentrations en DBO₅ sont comprises entre un minimum de 7 mg/l enregistré au point d'eau (4) durant la période des hautes eaux (FEV 2015) et un maximum de 134 mg/l enregistré aux points d'eau (1 et 2) durant la période des basses eaux (SEP 2011) (**FIG .VI.20**).

La comparaison entre les valeurs en DBO₅ des deux campagnes et les écarts par rapport à la moyenne sont très importants, indiquant une évolution remarquable dans le temps suite au phénomène de dilution. La totalité des concentrations en ion DBO₅ sont supérieures aux normes de potabilité l’OMS.

- La demande chimique en oxygène (DCO) :

La demande chimique en oxygène (DCO) correspond à la quantité d’oxygène nécessaire pour la dégradation par voie chimique, effectuée à l’aide d’un oxydant puissant, des composés organiques présents dans l’eau. Elle permet de mesurer la teneur en matières organiques totales (excepté quelques composés qui ne sont pas dégradés), y compris celles qui ne sont pas dégradables par les bactéries. Il s’agit donc d’un paramètre important permettant de caractériser la pollution globale d’une eau par des composés organiques. La DCO correspond à la teneur de l’ensemble des matières organiques que celles-ci aient un caractère biodégradable ou non.

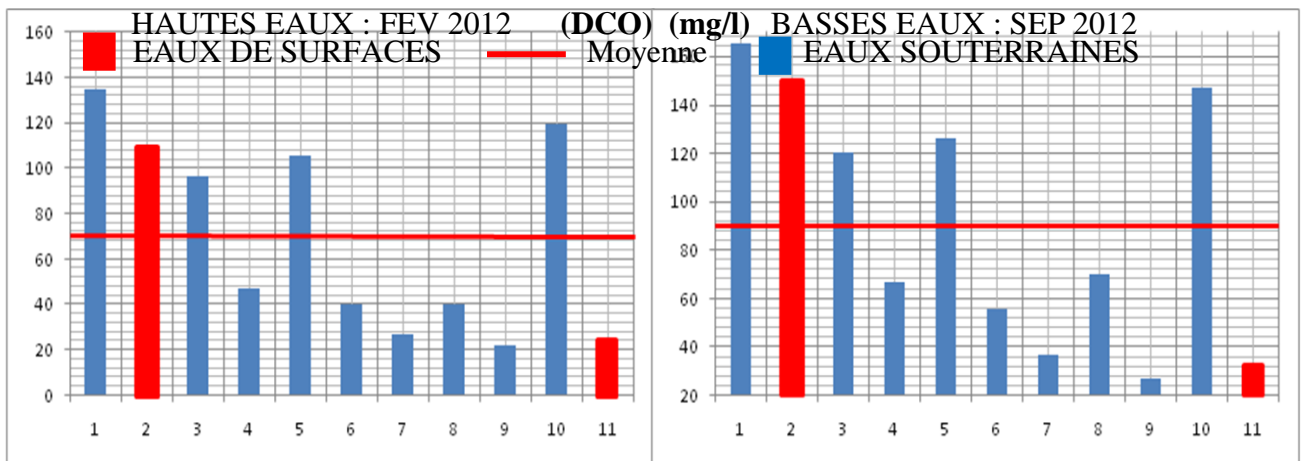


Fig.VI.21 : Histogrammes de variation du DCO dans les eaux de la plaine d’El-Kantara. (Auteur, 2022).

En accord avec la variation de la DBO₅. Pendant la période (SEP 2011 et FEV 2012) on remarque que les concentrations en DCO sont comprises entre un minimum de 22 mg/l enregistré au point d’eau (9) et durant la période des hautes eaux (FEV 2012) et un maximum de 165 mg/l enregistré aux points d’eau (1) durant la période des basses eaux (SEP 2011) (**FIG .VI.21**).

La comparaison entre les valeurs en DCO des deux campagnes et les écarts par rapport à la moyenne qui sont très importants, indique une évolution remarquable dans le temps suite au

phénomène de dilution. La totalité des concentrations en DCO sont supérieures aux normes de potabilité de l'OMS.

4.2.2.4-Les éléments traces métalliques (ETM) (Les Métaux lourds):

Le suivi des concentrations en métaux lourds (densité $> 5 \text{ g/cm}^3$) est particulièrement important vu leur toxicité et leur capacité de bioaccumulation le long des chaînes alimentaires. Contrairement aux polluants organiques, les métaux ne peuvent pas être dégradés biologiquement ou chimiquement. Les métaux lourds se dissolvent très bien dans une eau acide (pH faible). Dans des eaux neutres ou basiques, ils précipitent et s'accumulent principalement dans la phase solide (boues). L'analyse de ces boues permet ainsi d'obtenir une vue de l'ensemble des déversements en métaux lourds qui ont eu lieu, tant en nature qu'en quantité.

Les concentrations en cuivre, nickel, chrome, plomb, zinc, cadmium, arsenic sont régulièrement mesurées.

Les métaux lourds caractérisent certains types de pollution, comme par exemple :

-La présence de cuivre et de nickel signe des rejets provenant d'industries de traitement de surface des métaux ;

-Le chrome dénonce la présence d'une tannerie ;

-Le plomb est lié à des pollutions diffuses (apports dus aux transports routiers et à l'existence de sites industriels désaffectés) ;

-Le zinc est évacué par des industries qui pratiquent la galvanisation ou la préparation d'alliages tels que le laiton et le bronze, il est également libéré lors du contact entre les eaux de ruissellement et les matériaux galvanisés (toitures métalliques, gouttières) ;

-Le cadmium peut notamment être rejeté par des usines de galvanoplastie et des industries chimiques de textiles et de teintures.

- Plomb (Pb^{++}):

Le plomb est un élément lourd, métallique, dense, de mauvaise conductivité électrique. Il peut être présent sous forme de carbonate, et de phosphates. Il est associé généralement au zinc dans la galène. Les eaux de surface non contaminées leur teneur en plomb ne dépasse pas une dizaine de microgramme par litre. Le plomb brut est obtenu à partir des procédés d'extraction, il contient des impuretés des métaux tels que le cuivre et le zinc.

Pendant la période d'étude on remarque que les concentrations sont comprises entre un minimum de 0.008 mg/l enregistré au point d'eau (10) durant la période des hautes eaux

(FEV 2015) et un maximum de 0.122 mg/l enregistré au point d'eau (7) durant la période des basses eaux (SEP 2014) (FIG .VI.22) .

Les concentrations en plomb des eaux de la région d'étude subissent une évolution remarquable dans le temps (hautes eaux et basses eaux) et dans l'espace qui sont liées aux phénomènes de dilution et de lessivage de la décharge publique, ce qui est indiqué par les écarts types des observations mesurées qui sont importants. La totalité des points d'eau de la plaine présentent des concentrations qui dépassent largement les normes de potabilité Algérienne et celles de l'OMS (0.01mg/l) à l'exception du point (10) durant la période des hautes eaux.

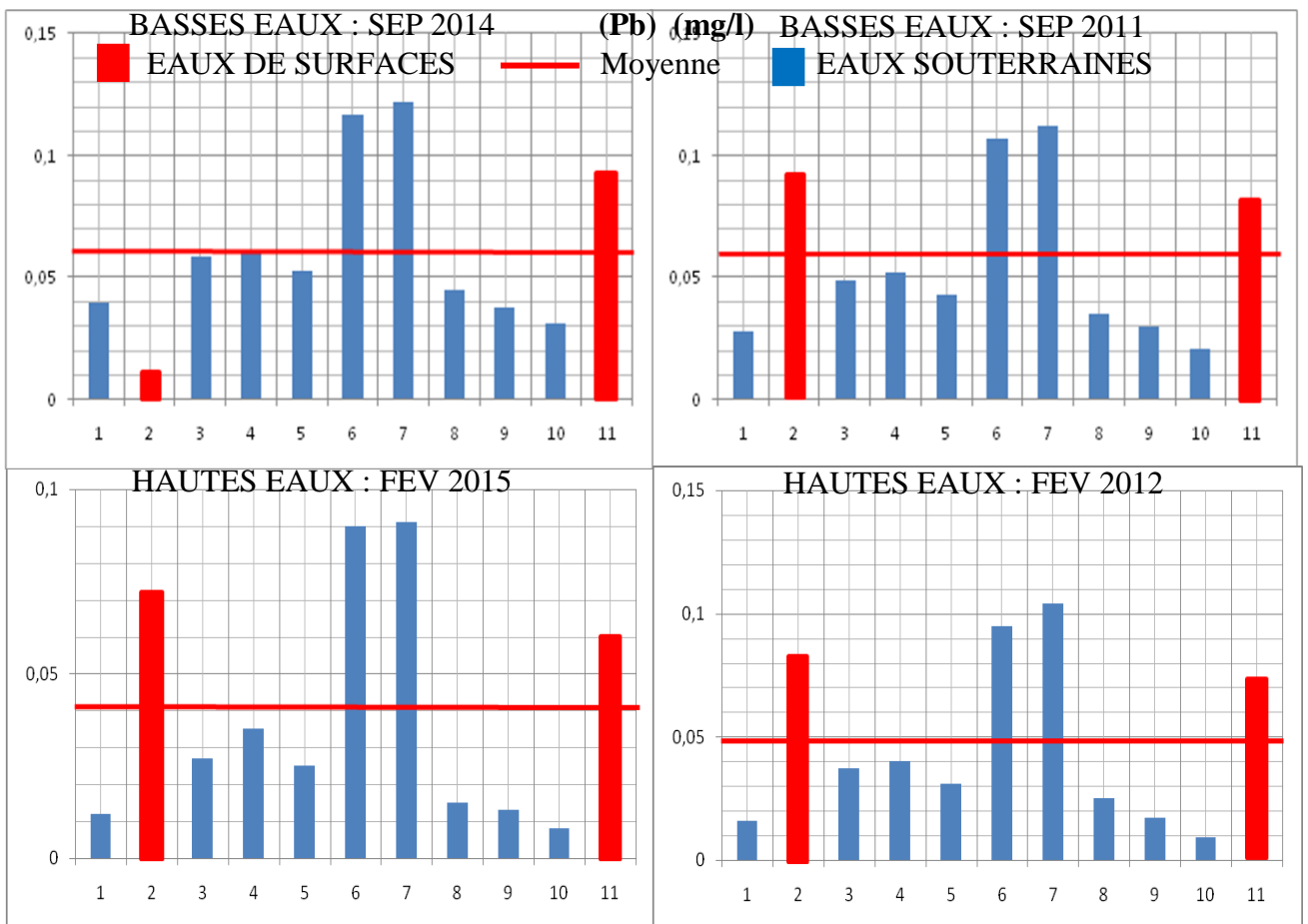


Fig.VI.22 : Histogrammes de variation de l'ion Plomb dans les eaux de la plaine d'El-Kantara. (Auteur, 2022).

-Le Fer (Fe⁺⁺):

Le fer est un élément lourd et toxique. Il peut avoir une origine naturelle provenant des terrains traversés (formations alluvionnaires) ou une origine industrielle.

Pendant la période d'étude on remarque que les concentrations sont comprises entre un minimum de 0 mg/l enregistré au point d'eau (4, 5, 7,8 et10) durant la période des basses eaux (SEP 2011) et un maximum de 11.08 mg/l enregistré au point d'eau (7) durant la période des hautes eaux (FEV 2012) (**FIG .VI.23**).

Les concentrations en Fer des eaux de la région d'étude subissent une évolution remarquable dans le temps (hautes eaux et basses eaux) et dans l'espace qui sont liées au phénomène de lessivage de la décharge publique, ce qui est indiqué par les écarts types des observations mesurées qui sont importants. Durant les campagnes des hautes eaux la totalité des points d'eau de la plaine présentent des concentrations qui dépassent largement les normes de potabilité Algérienne fixées à (0.3 mg/l) et celles l'OMS (0.2mg/l). Par contre, durant les campagnes des basses eaux plusieurs points ne dépassent pas ces normes.

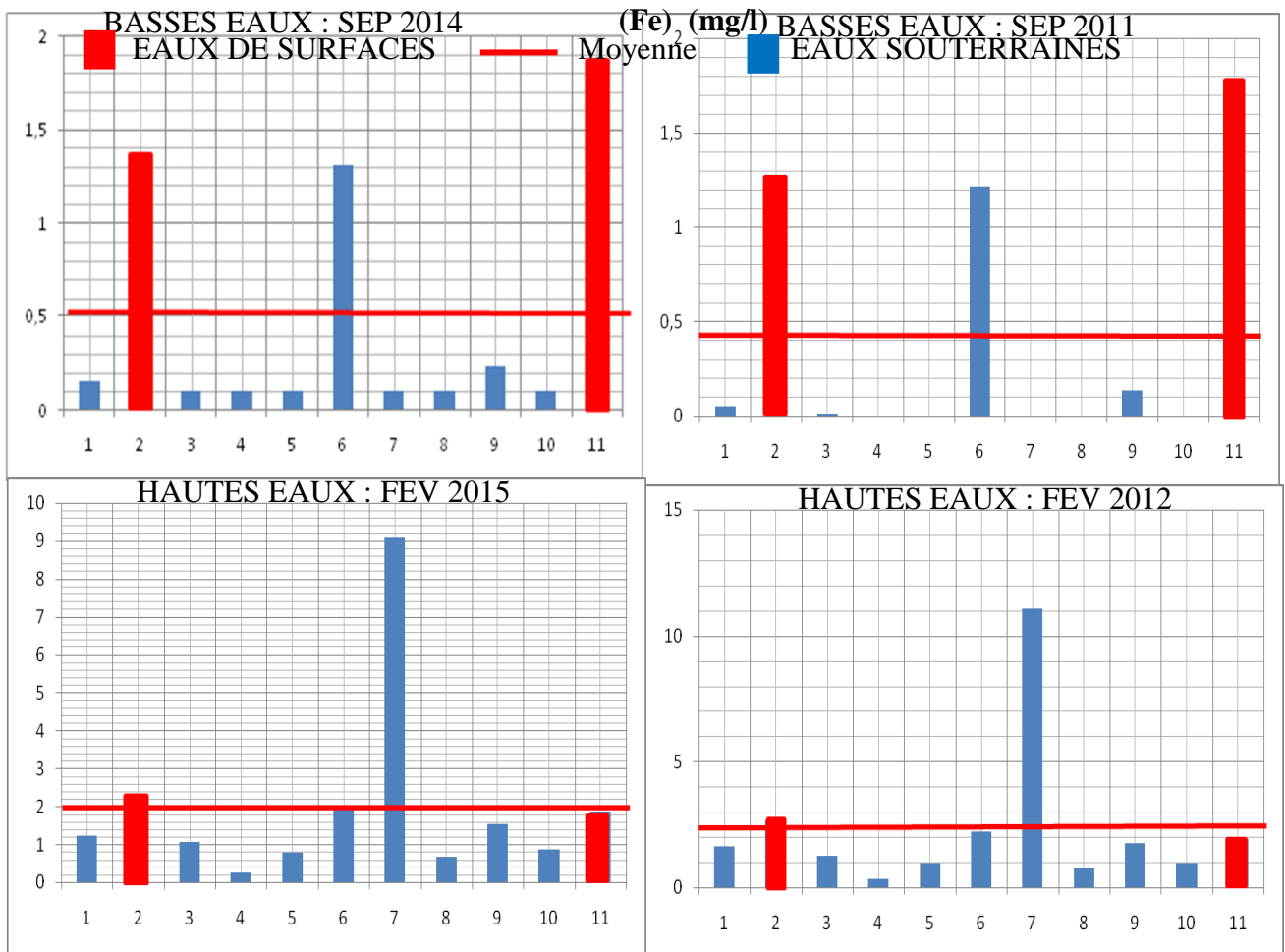


Fig.VI.23 : Histogrammes de variation de l'ion Fer dans les eaux de la plaine d'El-Kantara. (Auteur, 2022).

-Le Cuivre (Cu⁺⁺):

Les résultats des analyses chimiques pendant la période d'étude montrent que les concentrations sont comprises entre un minimum de 0.061 mg/l enregistré au point d'eau (9) durant la période des basses eaux (SEP 2011) et un maximum de 46.50 mg/l enregistré au point d'eau (7) durant la période des hautes eaux (FEV 2012) (FIG .VI.24) .

Les concentrations en Cuivre des eaux de la région d'étude subissent une évolution remarquable dans le temps (hautes eaux et basses eaux) et dans l'espace qui sont liées au phénomène de lessivage de la décharge publique, ce qui est indiqué par les écarts types des observations mesurées qui sont importants.

La totalité des points d'eau de la plaine présentent des concentrations qui dépassent largement les normes de potabilité de l'OMS fixée à (0.05mg/l). Tandis que la majorité des points présentent des concentrations supérieures aux normes de potabilité Algérienne fixée à (2 mg/l).

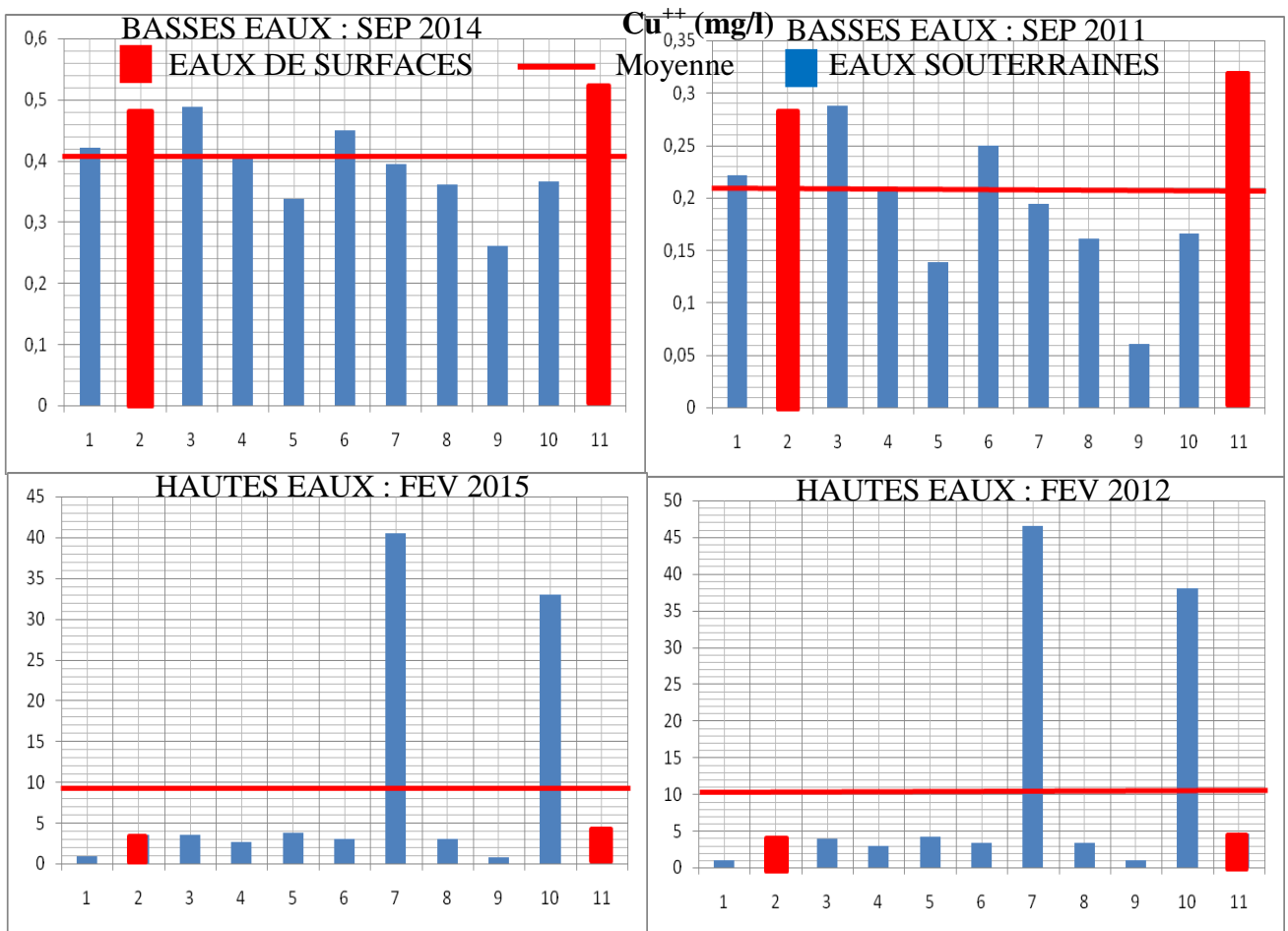


Fig.VI.24 : Histogrammes de variation de l'ion Cuivre dans les eaux de la plaine d'El-Kantara. (Auteur, 2022).

-Le Manganèse (Mn^{+2}):

Nous avons pu doser cet élément uniquement pendant la période de Septembre 2011.

Les résultats des analyses chimiques montrent que les concentrations sont comprises entre un minimum de 0 mg/l enregistré aux points d'eau (5 et 9) et un maximum de 0.107 mg/l enregistré au point d'eau (2) (**FIG .VI.25**) .

Les concentrations en Manganèse des eaux de la région d'étude subissent une évolution remarquable dans le temps (hautes eaux et basses eaux) et dans l'espace, qui sont liées au phénomène de lessivage de la décharge publique, ce qui est indiqué par les écarts types des observations mesurées qui sont importants. La totalité des points d'eau de la plaine présentent des concentrations très acceptables et ne dépassent pas les normes de potabilité de l'OMS fixée à (0.4 mg/l) et celles de l'Algérie fixée à (0.5 mg/l) .

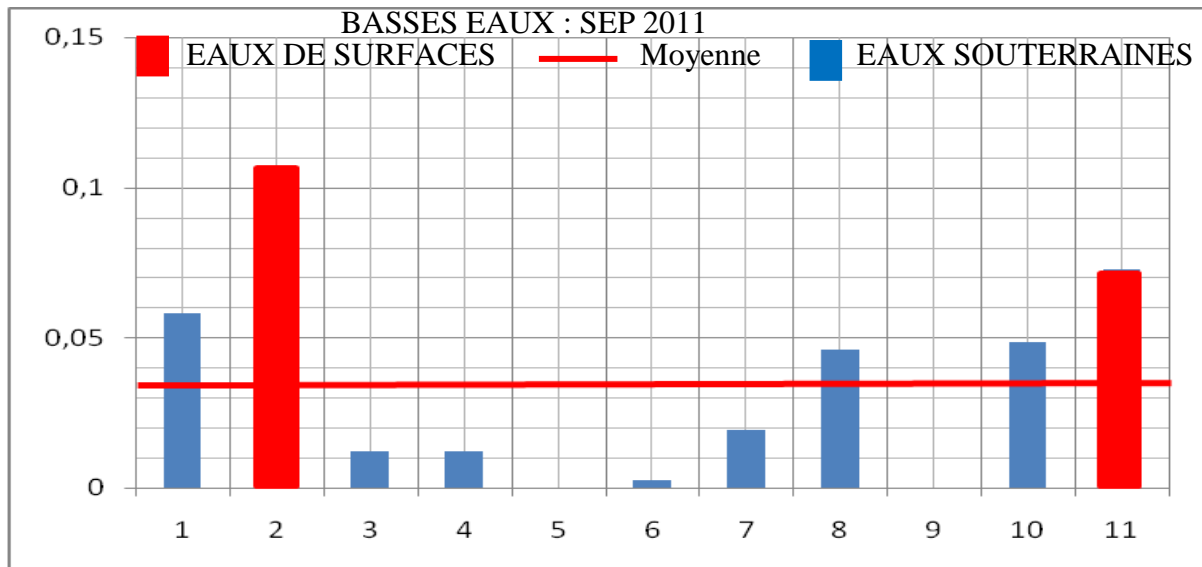


Fig.VI.25: Histogrammes de variation de l'ion Manganèse dans les eaux de la plaine d'El-Kantara. (Auteur, 2022).

-Le Chrome (Cr) et les Chromates (CrO_4) :

C'est un métal largement très répandu dans la croûte terrestre. Il est présent sous forme élémentaire et aux états d'oxydation (+2 à +6). Les formes hydriques majoritaires sont Cr^{3+} et Cr^{6+} et les Chromates sont extrêmement toxiques et cancérigènes. Sa présence dans les eaux provient de l'érosion des conduites ou de l'activité industrielle. Sa concentration doit être inférieure ou égale à 0.05mg/l. Nous avons pu doser deux formes (Cr^{6+} et CrO_4) pendant la période de Septembre 2011.

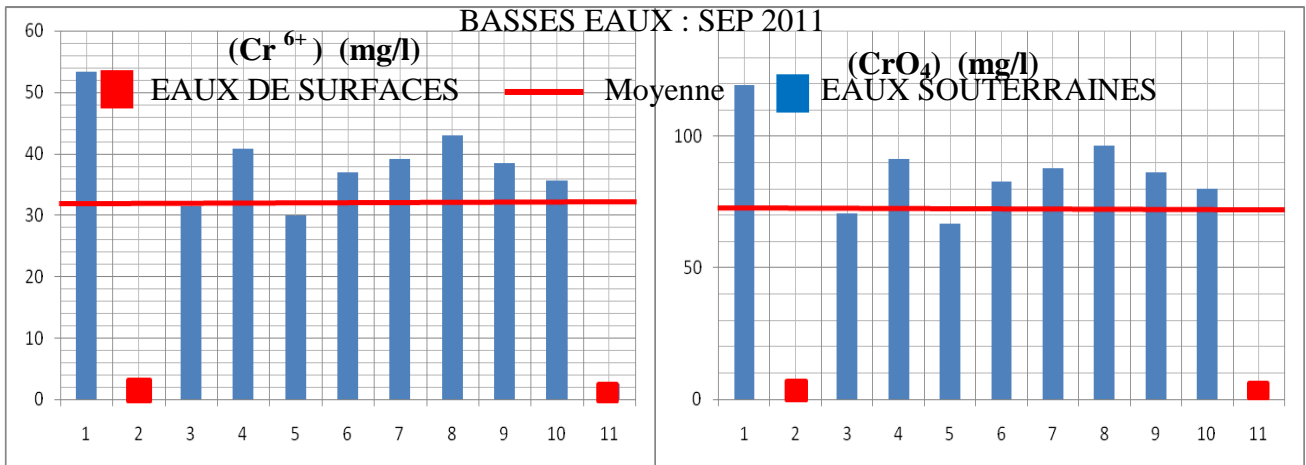


Fig.VI.26 : Histogrammes de variation de l'ion Chrome et des Chromates dans les eaux de la plaine d'El-Kantara. (Auteur, 2022).

L'examen du graphe concernant les Chromates et les Chromes montre qu'ils ont la même répartition. Les résultats des analyses chimiques montrent que les concentrations des Chromates et des Chromes sont respectivement comprises entre un minimum de 2.57 mg/l et 5.76mg /l et un maximum de 53.29 mg/l et 119.52 mg/l (**FIG .VI.26**) . Les écarts types des observations mesurées sont importants. La totalité des points d'eau de la plaine présentent des concentrations qui dépassent largement les normes de potabilité de l'OMS et celles Algériennes fixée à (0.05 mg/l).

5- Les faciès chimiques :

5.1-Détermination des faciès hydrochimiques :

Pour apprécier le faciès chimique des eaux, Il existe plusieurs types de classifications des eaux naturelles, ces classifications reposent généralement sur la composition des eaux .Parmi les plus utilisées nous pouvons citer celles de Stabler , de Schoeller et Berkallof, Piper et de Stiff....ect.

5.1.1-Classification des eaux par l'interprétation du diagramme de STABLER :

Cette classification est basée sur la formule ionique caractéristique de l'eau obtenue en se basant sur les ions et les cations qui prédominent.

A partir des calculs des quantités en réaction (conversion des concentrations en méq/l) et la classification des ions (formule ionique), nous avons déterminé les faciès qui se résument dans le tableau (**Tab.VI.12**):

Tab.VI.12: Tableau récapitulatif des formules caractéristiques et des faciès hydrochimiques des eaux de la plaine d'El-Kantara. (Auteur, 2022).

| Points d'eau | Formule caractéristique SEP 2011 | Faciès chimique SEP 2011 | Formule caractéristique FEV 2012 | Faciès chimique FEV 2012 | Formule caractéristique SEP 2014 | Faciès chimique SEP 2014 | Formule caractéristique FEV 2015 | Faciès chimique FEV 2015 |
|--------------|----------------------------------|--------------------------|-------------------------------------|--------------------------|----------------------------------|--------------------------|-------------------------------------|--------------------------|
| 1 | rSO4>rCl>rHCO3 r Ca>r Mg>rNa | Sulfaté calcique | r SO4>rHCO3>rCl rCa>r Mg>rNa>rK | Sulfaté calcique | rSO4>rCl>rHCO3 r Ca>r Mg>rNa | Sulfaté calcique | r SO4>rHCO3>rCl rCa>r Mg>rNa>rK | Sulfaté calcique |
| 2 | rSO4>rCl>rHCO3 r Ca>r Mg>rNa | Sulfaté calcique | r SO4>rHCO3>rCl rNa>rCa>r Mg>rK | Sulfaté sodique | rSO4>rCl>rHCO3 r Ca>r Mg>rNa | Sulfaté calcique | r SO4>rHCO3>rCl rNa>rCa>r Mg>rK | Sulfaté sodique |
| 3 | rSO4>rCl>rHCO3 r Ca>r Mg>rNa | Sulfaté calcique | r SO4>r Cl>rHCO3 rCa>r Mg>rNa>rK | Sulfaté calcique | rSO4>rCl>rHCO3 r Ca>r Mg>rNa | Sulfaté calcique | r SO4>r Cl>rHCO3 rCa>r Mg>rNa>rK | Sulfaté calcique |
| 4 | rSO4>rCl>rHCO3 r Ca>r Mg>rNa | Sulfaté calcique | r SO4>r Cl>rHCO3 rCa>rNa>r Mg>rK | Sulfaté calcique | rSO4>rCl>rHCO3 r Ca>r Mg>rNa | Sulfaté calcique | r SO4>r Cl>rHCO3 rNa>rCa>r Mg>rK | Sulfaté sodique |
| 5 | rSO4>rCl>rHCO3 r Ca>r Mg>rNa | Sulfaté calcique | r SO4>rHCO3>r Cl rNa>rCa>r Mg>rK | Sulfaté sodique | rSO4>rCl>rHCO3 r Ca>r Mg>rNa | Sulfaté calcique | r SO4>rHCO3>rCl rNa>rCa>r Mg>rK | Sulfaté sodique |
| 6 | rSO4>rCl>rHCO3 r Ca>r Mg>rNa | Sulfaté calcique | r SO4>r Cl>rHCO3 rNa>rCa>r Mg>rK | Sulfaté sodique | rSO4>rCl>rHCO3 r Ca>r Mg>rNa | Sulfaté calcique | r SO4>r Cl>rHCO3 rNa>rCa>r Mg>rK | Sulfaté sodique |
| 7 | rSO4>rCl>rHCO3 r Ca>r Mg>rNa | Sulfaté calcique | r SO4>r Cl>rHCO3 rNa>rCa>r Mg>rK | Sulfaté sodique | rSO4>rCl>rHCO3 r Ca>r Mg>rNa | Sulfaté calcique | r SO4>r Cl>rHCO3 rCa>rNa>rMg>rK | Sulfaté calcique |
| 8 | rSO4>rCl>rHCO3 r Ca>r Mg>rNa | Sulfaté calcique | r SO4>rHCO3>r Cl rNa>rCa>r Mg>rK | Sulfaté sodique | rSO4>rCl>rHCO3 r Ca>r Mg>rNa | Sulfaté calcique | r SO4>rHCO3>rCl rNa>rCa>r Mg>rK | Sulfaté sodique |
| 9 | rSO4>rCl>rHCO3 r Ca>r Mg>rNa | Sulfaté calcique | r SO4>rHCO3>r Cl r Mg>rCa>rNa>rK | Sulfaté magnésien | rSO4>rCl>rHCO3 r Ca>r Mg>rNa | Sulfaté calcique | r SO4>rHCO3>rCl r Mg>rCa>rNa>rK | Sulfaté magnésien |
| 10 | rSO4>rCl>rHCO3 r Ca>r Mg>rNa | Sulfaté calcique | r SO4>rHCO3>r Cl rNa>rCa>r Mg>rK | Sulfaté sodique | rSO4>rCl>rHCO3 r Ca>r Mg>rNa | Sulfaté calcique | r SO4>rHCO3>rCl rNa>rCa>r Mg>rK | Sulfaté sodique |
| 11 | rSO4>rCl>rHCO3 r Ca>r Mg>rNa | Sulfaté calcique | r SO4>rHCO3>r Cl rNa>rCa>r Mg>rK | Sulfaté sodique | rSO4>rCl>rHCO3 r Ca>r Mg>rNa | Sulfaté calcique | r SO4>rHCO3>rCl rNa>rCa>r Mg>rK | Sulfaté sodique |

La représentation graphique par le diagramme STABLER a permis de déterminer trois faciès chimiques principaux dans le secteur d'étude (FIG .VI.27):

-Le faciès sulfaté calcique.

-Le faciès sulfaté sodique.

-Le faciès sulfaté magnésien.

Le faciès sulfaté calcique est dominant avec 81.64 % des échantillons, alors que les deux autres faciès représentent respectivement 31.82 et 4.54 %.

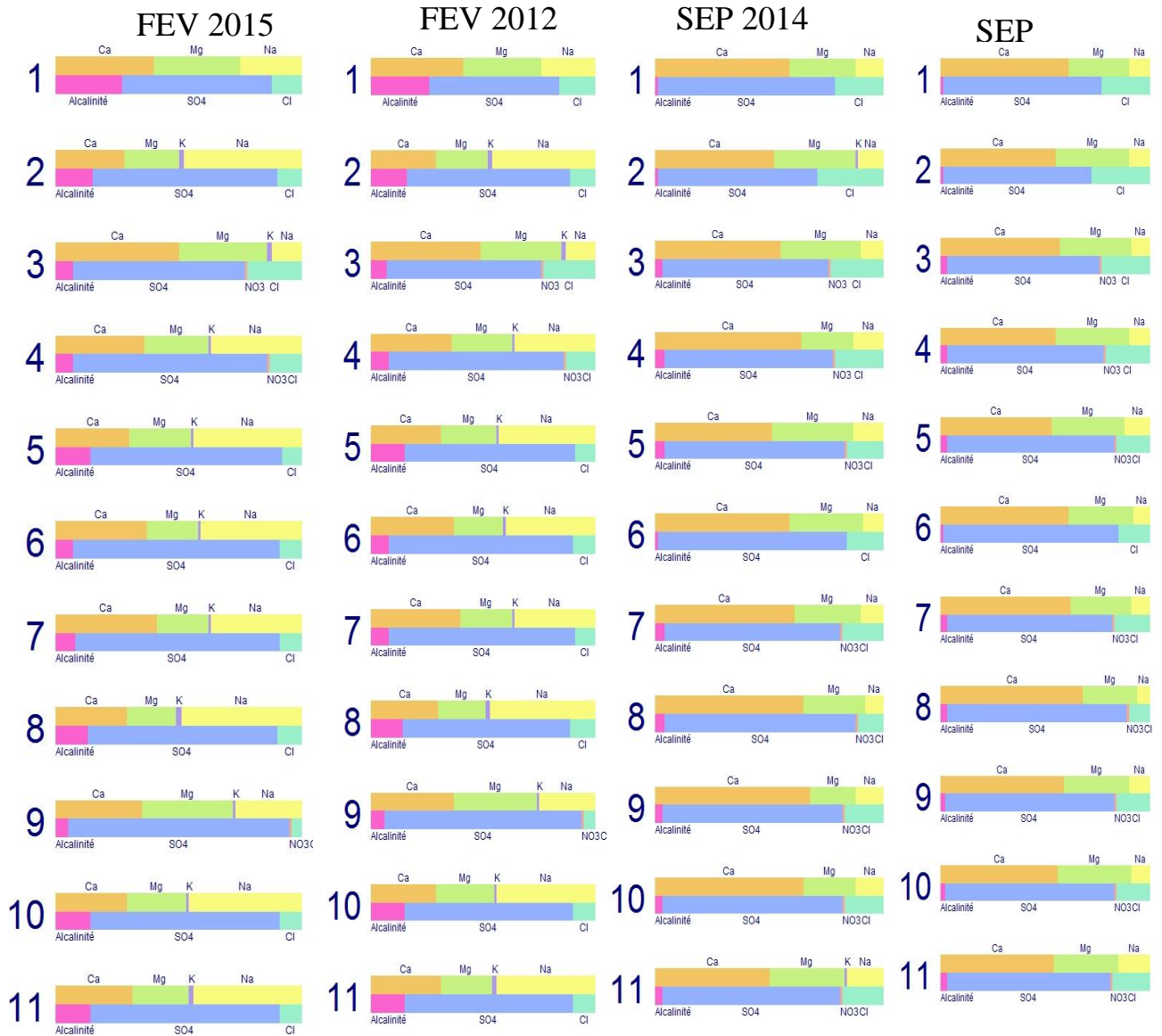


Fig.VI.27 : Diagramme de STABLER pour la classification des eaux de la plaine d'El-Kantara. (Auteur, 2022).

Sur toute la période d'observation, on a remarqué que la majorité des puits (72.72%) présentent un changement de faciès hydrochimique. Et uniquement 27.28 % qui gardent le faciès «sulfaté-calcique » dominant entre les campagnes. On explique le changement du faciès par la pluviométrie (diminution et/ou augmentation des concentrations par dilution). La

répartition du faciès sulfaté-calcique et sulfaté-sodique est remarquable à l'intérieur de la plaine. Ils tirent son origine à partir des formations alluvionnaires et gypsifères, la dissolution des roches carbonatées (roches calcaires et dolomitiques) bordant la plaine et par échange de base entre sodium et le calcium.

5.1.2-Classification des eaux par l'interprétation du diagramme de SCHOELLER BERKALLOF :

Cette classification est basée sur la représentation des résultats des analyses chimiques sur un diagramme établie par Schoeller en 1932 et repris par Berkalloff en 1953, nous portons les quantités en réactions des anions et des cations sur l'axe des ordonnées semi logarithmique et sur les abscisses les éléments chimiques à pas régulier, et ceci pour chaque point d'eau de prélèvement. Chaque échantillon est présenté par une ligne brisé, formée en reliant tous les points qui représentent les différents éléments chimiques.

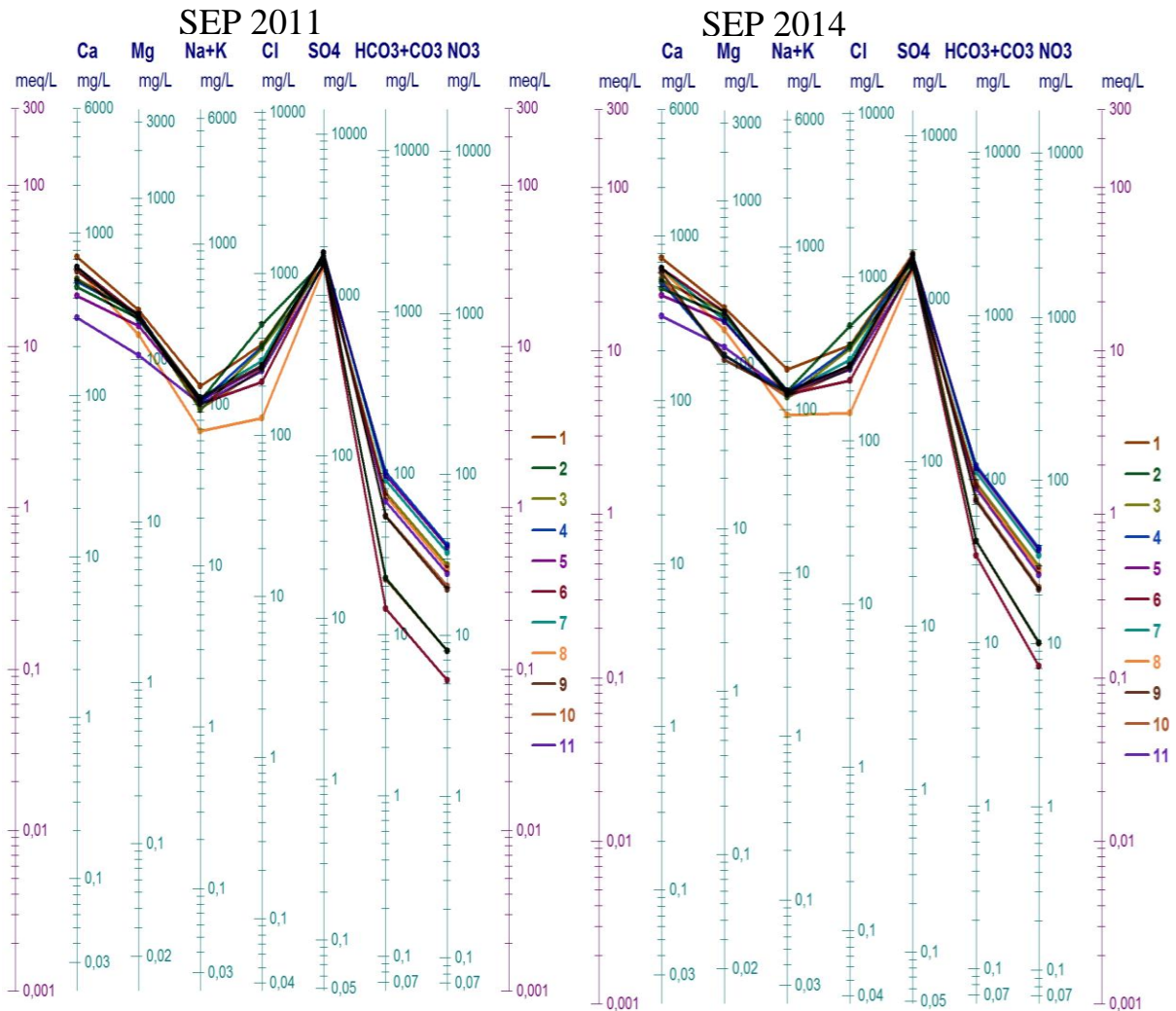


Fig.VI.28 : Diagramme de Schoeller –Berkaloff pour la classification des eaux de la plaine d'El-Kantara (période basses eaux). (Auteur, 2022).

Le diagramme tracé pour la période des basses eaux (septembre 2011/2014) (**FIG .VI.28**), confirme principalement un faciès sulfaté calcique, permettant de dire que la minéralisation des eaux est liée principalement aux ions SO_4 et Ca^{2+} .

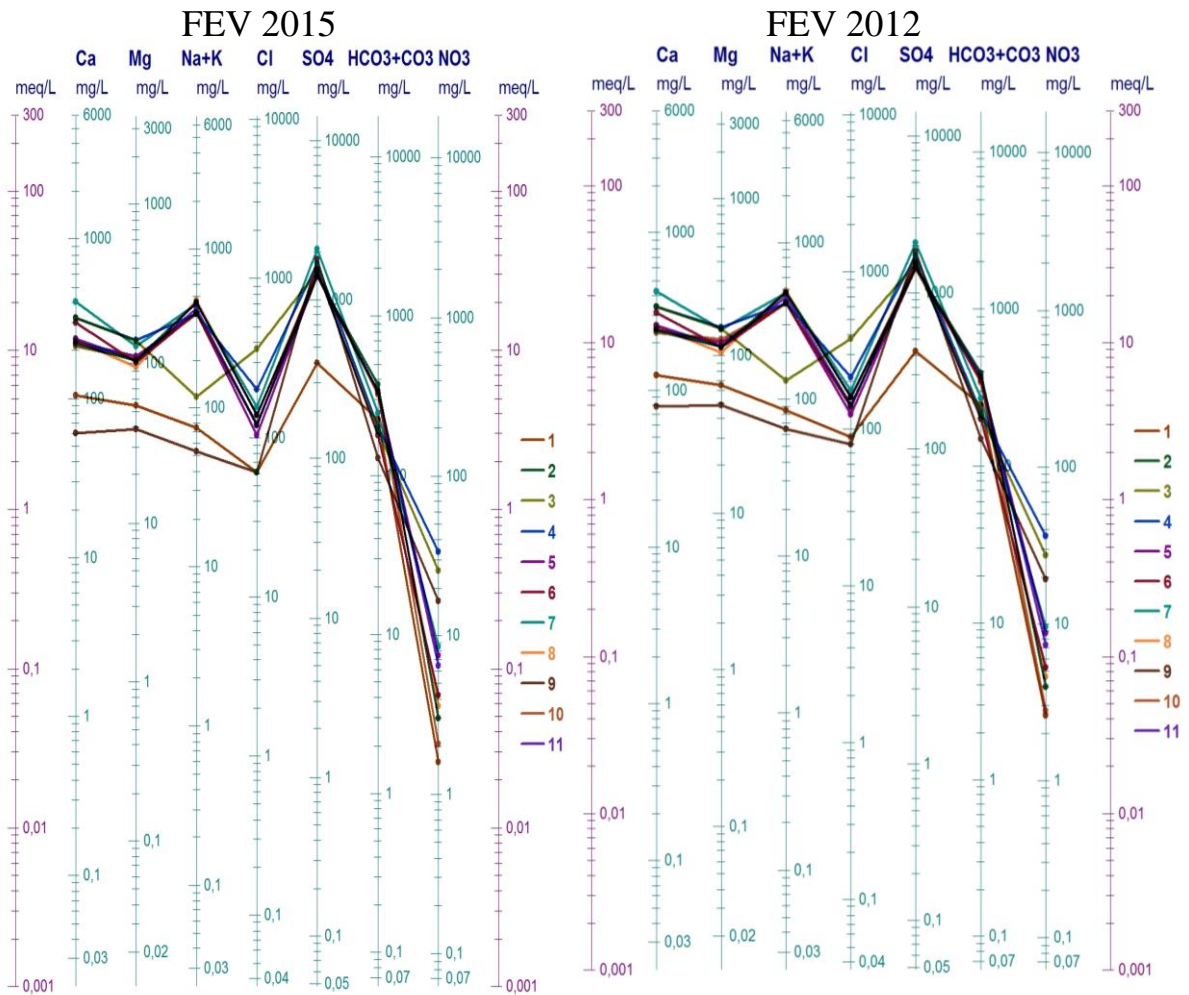


Fig.VI.29 : Diagramme de Schoeller –Berkaloff pour la classification des eaux de la plaine d’El-Kantara (période hautes eaux). (Auteur, 2022).

Pour la période des hautes eaux (Février 2012/ 2015), le faciès dominant est sulfaté sodique dont quelques puits gardent leurs faciès sulfaté calcique. Le puits P9 présente un faciès sulfaté magnésien. Ce changement de faciès est en liaison avec le lessivage des formations alluvionnaires et gypsifères, la dissolution des roches carbonatées (roches calcaires et dolomitiques) bordant la plaine et par échange de base entre Sodium et le Calcium pendant les précipitations hivernales (**FIG .VI.29**).

5.1.3-Classification des eaux par l’interprétation du diagramme de PIPER:

Pour mieux classer et faciliter l’interprétation, les faciès hydrochimiques correspondant aux différentes formations géologiques et/ou subdivisions lithologiques, ont été déterminés par le

diagramme de Piper. Ce diagramme est un autre mode de représentation graphique triangulaire et de classification d'une eau analysée. Il classe les eaux en quatre (4) faciès type (FIG .VI.30) :

- Faciès Bicarbonaté alcalino-terreux,
- Faciès Chloruré et/ou sulfaté alcalino-terreux,
- Faciès Chloruré et/ou sulfaté alcalin,
- Faciès Bicarbonaté alcalin.

Les nuages de points concentrés dans une zone représentent pour les différents échantillons la combinaison des éléments cationiques et anioniques.

Sur le diagramme de Piper nous allons interpréter les résultats d'analyses hydrochimiques, correspondant à la période d'observation, pour avoir une idée sur le faciès chimique des eaux de la région et sur son évolution temporaire, ainsi que sur le mode d'acquisition de ce faciès.

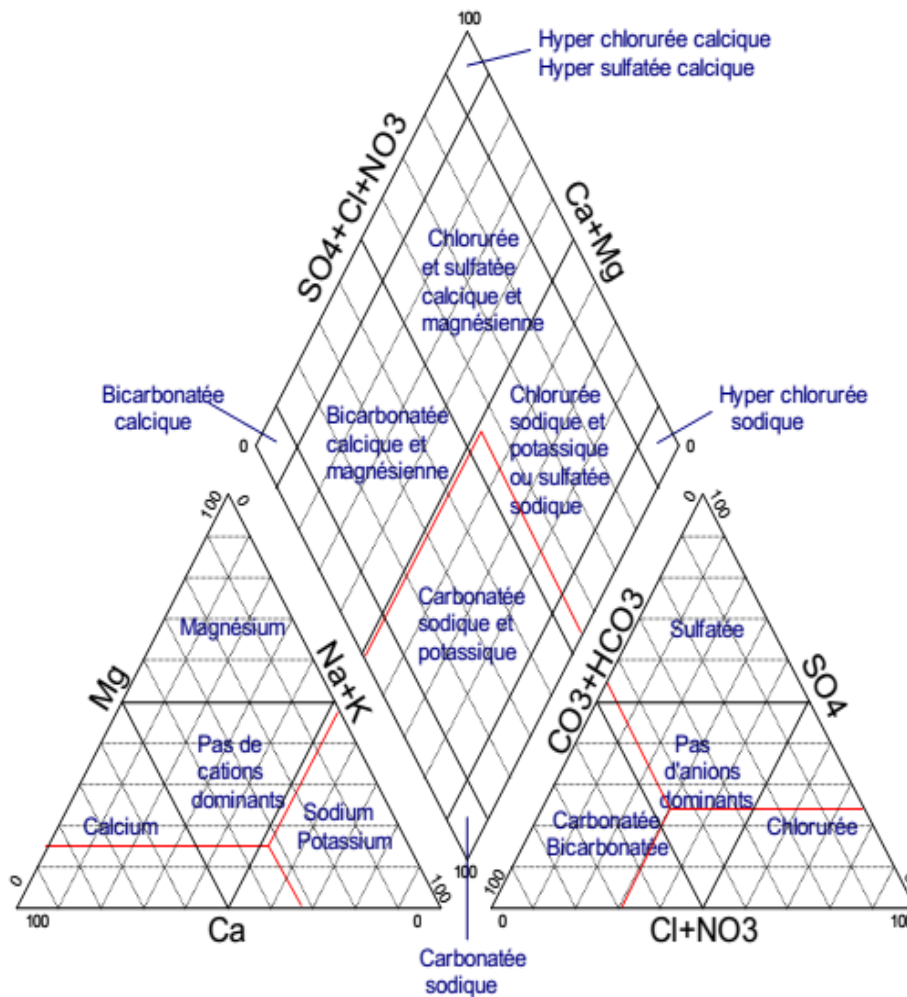


Fig.VI.30 : Diagramme de PIPER présentation générale.

La répartition spatiale des paramètres physico-chimiques, basé sur les résultats des analyses des quatre campagnes (2011/2015), et en raison du nombre relativement important des points et de la bonne répartition des points qui couvrent bien la zone d'étude, permet de mettre en évidence l'évolution de chaque élément et d'estimer l'origine des minéralisations. Ainsi l'analyse des paramètres chimiques montre que les eaux de la nappe du Mio-Plio-Quaternaire est caractérisée par l'abondance des ions (Na^+ , Cl^- , Ca^{2+} , SO_4^{2-} , HCO_3^-). Le report de ces résultats sur le diagramme triangulaire de Piper, a met en évidence l'influence de la géologie sur la qualité des eaux et il a permet aussi d'estimer les pourcentages des éléments chimiques et leur classification.

Les diagrammes des anions tracés pour la période des basses eaux (Septembre 2011/2014) montrent pratiquement un seul grand groupe sulfaté .Alors que les diagrammes des cations présentent un groupe proche du pôle calcique.

En cette période, Les diagrammes globaux confirment aussi la dominance du faciès sulfaté calcique, et l'influence de la géologie sur la qualité des eaux (FIG .VI.31).

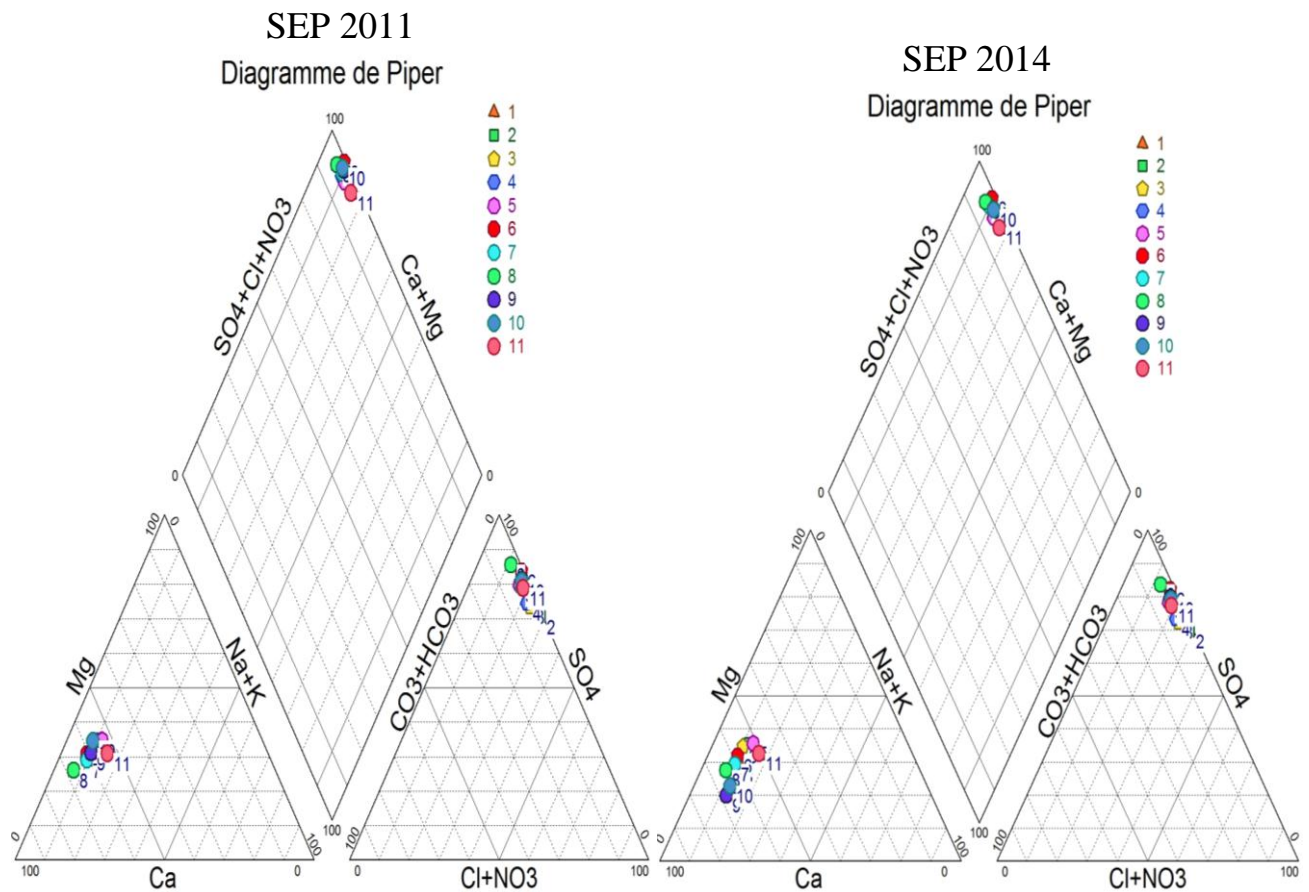


Fig.VI.31 : Diagramme de PIPER pour la classification des eaux de la plaine d'El-Kantara (période basse eaux)

(Auteur, 2022).

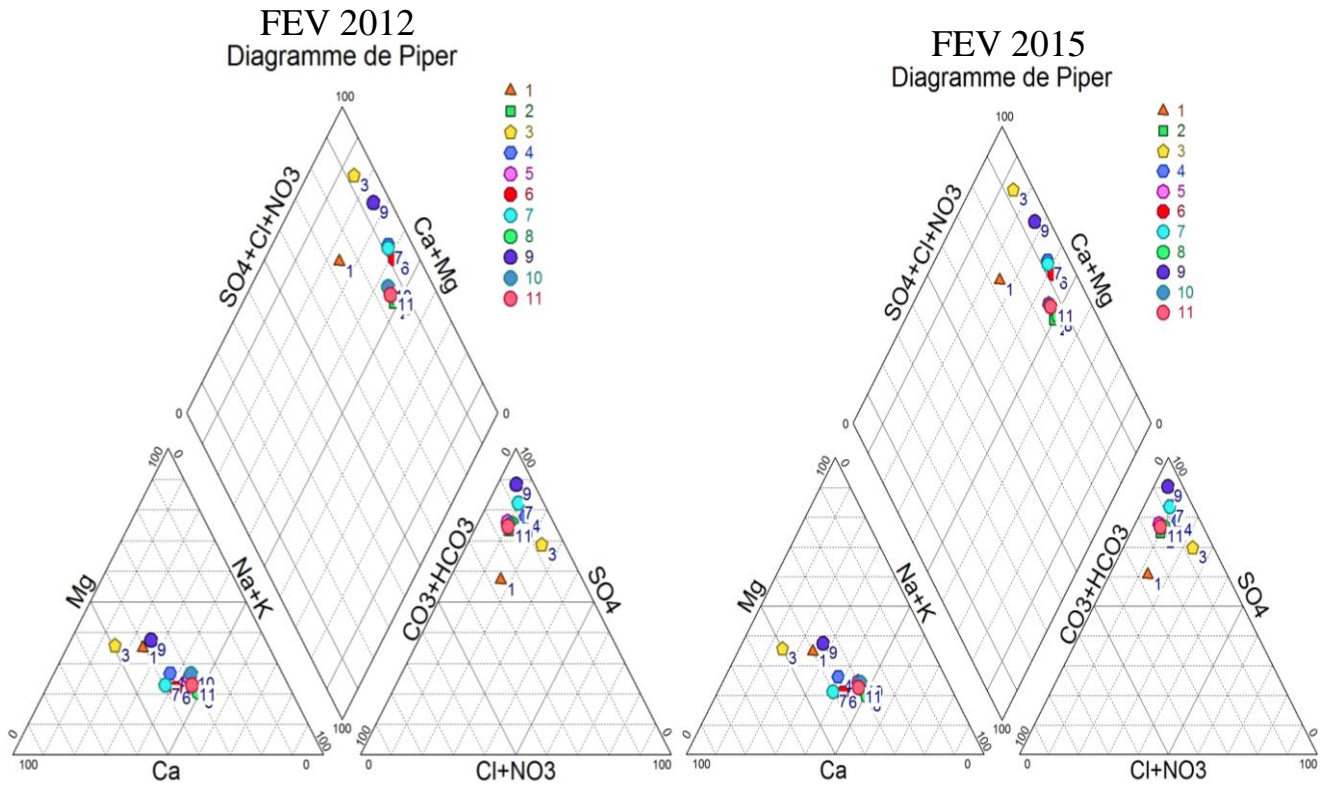


Fig.VI.32 : Diagramme de PIPER pour la classification des eaux de la plaine d’El-Kantara (période hautes eaux). (Auteur, 2022).

Pour la période des hautes eaux (Février 2012/ 2015), les anions présente le même scénario. Ailleurs, les cations mettent en évidence une dynamique différente. Un enrichissement en Sodium et en Magnésium. Les diagrammes globaux indiquent un changement de faciès clair et l’apparition d’un faciès sulfaté sodique et sulfaté magnésien (FIG .VI.32).

5.1.4-Classification des eaux par l’interprétation du diagramme de STIFF:

Ce genre de diagramme permet d’obtenir une figure géométrique polygonale caractéristique d’une famille d’eau donnée. Les données d’analyse des ions majeurs sont reportées sur des axes horizontaux de part et d’autre de l’axe vertical d’origine. Les cations sont représentés à gauche ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$, Ca^{2+} , Mg^{2+} et Fe^{2+}) et les anions à droite (Cl^- , HCO_3^- , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} , NO_3^-). La représentation des résultats d’analyses hydrochimiques, correspondant à la période d’observation par ce diagramme n’est en fait qu’une illustration des résultats obtenus avec les diagrammes de Piper. Par ailleurs il faut noter que le diagramme de STIFF bien qu’étant individuel permet une lecture facile des caractéristiques chimiques de l’échantillon mais également une localisation aisée.

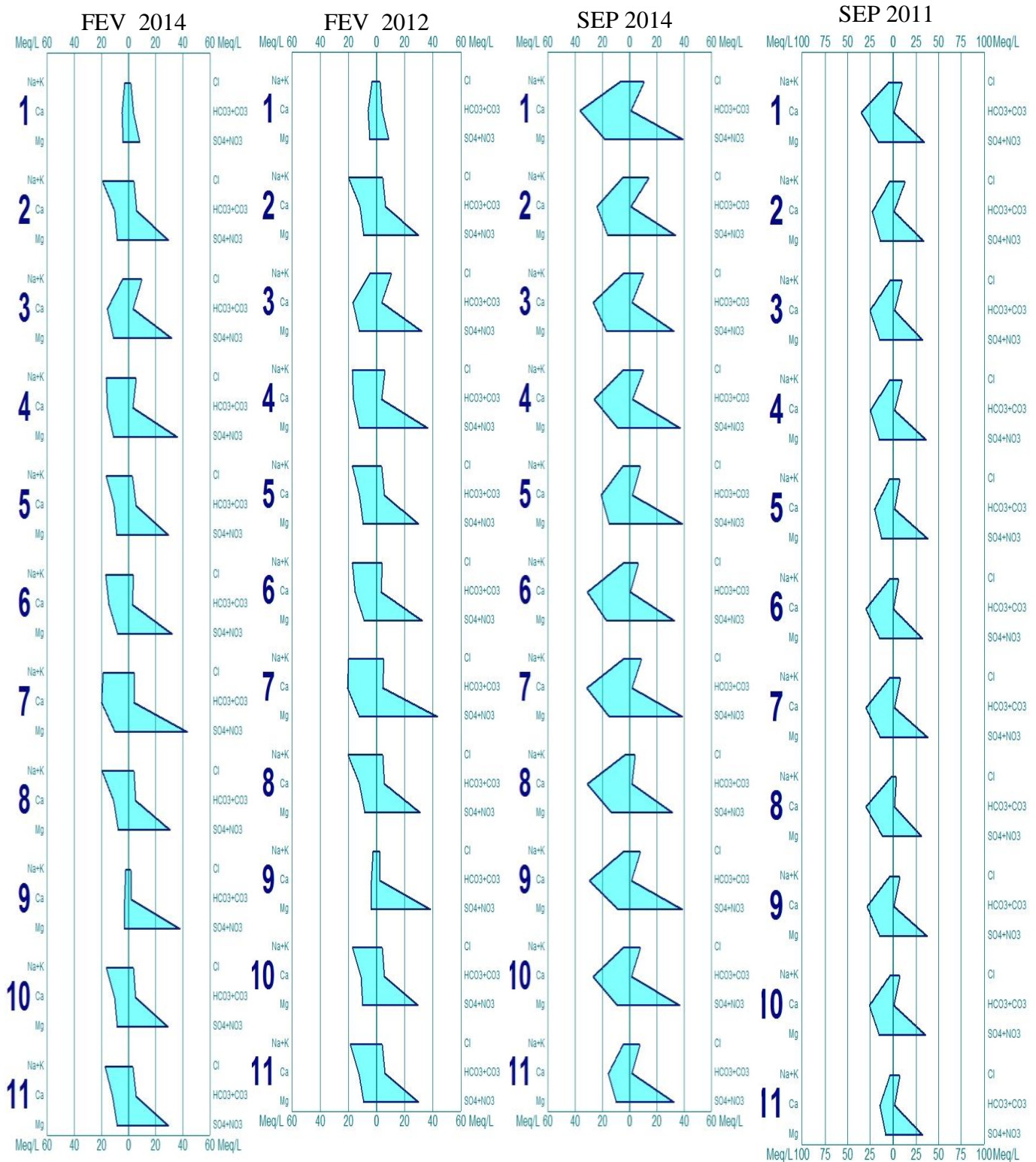


Fig.VI.33 : Diagramme de STIFF pour la classification des eaux de la plaine d'El-Kantara.

La représentation des analyses chimiques sur les diagrammes de STIFF permet d'avoir une approche globale de la composition chimique des eaux. Les diagrammes montrent que les eaux de la plaine d'El-Kantara présentent une dominance de deux faciès chimiques : le

premier avec un faciès sulfaté calcique représenté par la majorité des puits durant la période des basses eaux et le second par le faciès sulfaté sodique à magnésien (FIG .VI.33).

6- Indice d'échange de base (i.e.b) :

L'indice d'échange de base proposé par Schoeller en 1934 , défini comme étant le rapport entre les ions échangés et les ions de même nature primitivement existants dans l'eau.

Il est obtenu comme suit :
$$i.e.b = rCl^- - \frac{r(Na^+ + K^+)}{rCl^-}$$

Cette capacité d'échange est particulièrement élevée pour les argiles.

→Si le : i.e.b est négatif, les ions Ca⁺⁺ et Mg⁺⁺ de l'eau sont échangés contre les ions K⁺ et Na⁺ des formations encaissantes.

→Par contre si le : i.e.b est positif, les ions Na⁺ et K⁺ de l'eau sont remplacés par les ions Mg⁺⁺ et Ca⁺⁺ des formations encaissantes.

→Si le : i.e.b = 0, il y a un équilibre entre les compositions chimiques de l'eau et celle du terrain encaissant.

Tab. VI.13 : Les indices d'échange de base des différents points d'eaux. (Auteur, 2022).

| Stations | Septembre 2011 i.e.b | Septembre 2014 i.e.b | Février 2012 i.e.b | Février 2015 i.e.b |
|----------|-------------------------|-------------------------|-----------------------|-----------------------|
| 1 | 1,83 | 1,93 | 0,78 | 0,30 |
| 2 | 2,41 | 2,51 | 1,90 | 0,68 |
| 3 | 1,74 | 1,84 | 1,06 | 1,80 |
| 4 | 1,77 | 1,87 | 0,60 | 0,99 |
| 5 | 1,33 | 1,43 | 0,67 | 0,50 |
| 6 | 1,06 | 1,16 | 0,87 | 0,59 |
| 7 | 1,45 | 1,55 | 0,78 | 0,77 |
| 8 | 0,64 | 0,74 | 0,40 | 0,68 |
| 9 | 1,35 | 1,45 | 0,70 | 0,30 |
| 10 | 1,29 | 1,39 | 0,69 | 0,59 |
| 11 | 1,26 | 1,36 | 0,69 | 0,58 |

L'utilisation de cet indice est importante car il met en évidence les modifications du chimisme de l'eau au cours de son trajet souterrain (**Tab. VI.13**).

L'interprétation des données des i.e.b calculés montre que la totalité des eaux de la plaine d'El-Kantara présentent des i.e.b positifs variant de 0.64 à 2.51 pour les campagnes des basses eaux (SEP 2011/2014) et 0,30 à 1,90 pour les campagnes des hautes eaux (FEV 2012/2015) .Donc les ions Na^+ et K^+ de l'eau sont remplacés par les ions Mg^{++} et Ca^{++} des formations encaissantes ce qui confirme les résultats des différentes classifications des eaux par l'interprétation des différents diagrammes .

7- Qualité chimique des eaux dans la région d'El-Kantara:

7.1-Etude de potabilité des eaux : La potabilité de l'eau est définie par des paramètres physiques, chimiques et biologiques, et surtout en fonction de son usage. En ce qui concerne l'eau de boisson, l'aptitude à l'usage domestique est déterminée à partir des concentrations des anions et des cations majeurs. En plus le calcul des paramètres essentiels à savoir la salinité et la dureté totale.

7.1.1-La salinité :

Traditionnellement les eaux souterraines ont été souvent classées sur la base des valeurs du Total des sel dissous TDS. Ils sont constitués essentiellement par les produits minéraux dissous.

Ces corps dissous ont pour origine :

- Le lessivage naturel des roches de caractéristiques géologiques différentes ;
- L'apport des eaux usées des villes et unités industrielles.
- La sapidité (le goût et la saveur) de l'eau se présente comme suit :

*Excellente < 300 mg/l

*bonne 300 – 600 mg/l

*passable 600 – 900 mg/l

*mauvaise 900 – 1200 mg/l .

La classification qui est souvent appliquée sur les eaux souterraines non fraîches est présentée dans le tableau (**Tab. VI.13**):

Tab. VI.13 : Classification des eaux souterraines en utilisant les valeurs de TDS (In Fehdi, 2008).

| Classe | TDS mg/L | Nombre d'échantillons | % d'échantillons |
|----------|--------------|-----------------------|------------------|
| Fraîche | 0-1000 | 1 | 2.33 |
| Saumâtre | 1000-10000 | 43 | 97.67 |
| Salée | 10000-100000 | / | / |
| Saumure | > 100000 | / | / |

D'après cette classification, on constate que les eaux souterraines de la région d'étude sont en général des eaux saumâtres (entre 1000 et 10000 mg/l), **97.67%** des échantillons d'eau analysés représentent cette classe. Un seul échantillon appartient à la classe des eaux douces, soit environ **2.33%** de la totalité des points d'eaux étudiés.

7.1.2- Le degré hydrométrique total (D.H.T) ou la dureté totale : La dureté résulte en général de la présence du Calcium, du Magnésium, des Bicarbonates et des Sulfates, qui sont les ions les plus abondants dans les eaux souterraines. D'après les valeurs de DHT calculées dans la partie des paramètres physique, on a pu classer les eaux de la région comme suit:

Tab.VI.14: Classification des eaux en utilisant les valeurs de DHT (Auteur, 2022).

| DHT (F°) | 0 – 7 | 7 – 22 | 22 – 32 | 32 – 54 | >54 |
|--------------------------|-------|------------------|-----------------|-----------------|-----------------------|
| Qualification de l'eau | Douce | Modérément douce | Assez douce | Dure | Très dure |
| Campagne SEP 2011 | / | / | / | / | Tous les échantillons |
| Campagne FEV 2012 | / | / | / | Echantillon : 9 | 10 échantillons |
| Campagne SEP 2014 | / | / | / | / | Tous les échantillons |
| Campagne FEV 2015 | / | / | Echantillon : 9 | Echantillon : 1 | 09 échantillons |
| Total % des échantillons | / | / | 2.27 | 2.27 | 95.46 |

La dureté totale des eaux de la plaine d'El-Kantara varie entre 31,25f° et 278,49f° . Ce qui fait 2.27 % des échantillons présentent une eau assez douce, 2.27 % eau dure et 95.46 % eau très dure.

7.2- Etude de potabilité des eaux selon les normes:

Afin de définir la potabilité des eaux souterraines, nous nous sommes basés sur deux types de normes, ceux d'Organisation Mondiale de Santé (O.M.S) et les normes algériennes, pour l'eau destinée à la consommation humaine (Décret exécutif n ° 11-125 du 22 Mars 2011 JON°18/2011).

7.2.1-Selon l'O.M.S :

Tab. VI.15 : Normes de potabilité de l'O.M.S.

| Eléments physiques et chimiques | Des échantillons ayant une concentration acceptable par Campagnes | | | | Normes de potabilités OMS |
|---------------------------------|---|------------------------------|---------------------------------|-----------------------|---------------------------|
| | Campagne SEP 2011 | Campagne FEV 2012 | Campagne SEP 2014 | Campagne FEV 2015 | |
| T (°C) | Tous les échantillons | Tous les échantillons | Tous les échantillons | Tous les échantillons | 25 |
| PH | Tous les échantillons | Tous les échantillons | Tous les échantillons | Tous les échantillons | 6.2 - 9.22 |
| CE (µS/cm) | Aucun échantillon | 1 | Aucun échantillon | 1 | 1 500 |
| Ca ²⁺ (mg/l) | Aucun échantillon | 1 et 9 | Aucun échantillon | 1 et 9 | 200 |
| Mg ²⁺ (mg/l) | 8 et 11 | Tous les échantillons sauf 4 | 4-9-10-11 | Tous les échantillons | 150 |
| Na ⁺ (mg/l) | Tous les échantillons | 1-3-9 | Tous les échantillons | 1-3-9 | 250 |
| K ⁺ (mg/l) | Tous les échantillons | 1-9 | Tous les échantillons sauf 2-11 | 1-9 | 10 |
| Cl ⁻ (mg/l) | Tous les échantillons sauf | Tous les | Tous les échantillons | Tous les | 350 |

| | 1-2-3-4 | échantillons sauf 3 | sauf 1-2-3-4 | échantillons | |
|---|--|---|--|------------------------------|-------------|
| SO₄²⁻ (mg/l) | Aucun échantillon | Aucun échantillon | Aucun échantillon | Aucun échantillon | 250 |
| NO₃⁻ (mg/l) | Tous les échantillons | Tous les échantillons | Tous les échantillons | Tous les échantillons | 40 |
| NO₂⁻ (mg/l) | Aucun échantillon | Tous les échantillons | Aucun échantillon | Tous les échantillons | 0.1 |
| NH₄⁺ (mg/l) | Aucun échantillon | Tous les échantillons | Aucun échantillon | Tous les échantillons | 0.2 |
| PO₄²⁻ (mg/l) | Tous les échantillons sauf 2 | / | / | / | 0.5 |
| P (mg/l) | Tous les échantillons | / | / | / | 1 |
| DBO5 (mg/l) | Aucun échantillon | Tous les échantillons 1-2-3-8-10 | / | / | 5 |
| DCO (mg/l) | Aucun échantillon | Aucun échantillon | / | / | 20 |
| Pb (mg/l) | Aucun échantillon | 10 | Aucun échantillon | 2 | 0.01 |
| Fe (mg/l) | Tous les échantillons sauf 2-6-11 | Aucun échantillon | Tous les échantillons sauf 2-6-11 | Aucun échantillon | 0.2 |
| Cu⁺⁺ (mg/l) | Aucun échantillon | Aucun échantillon | Aucun échantillon | Aucun échantillon | 0.05 |
| Mn⁺² (mg/l) | Tous les échantillons | / | / | / | 0.4 |
| Cr⁶⁺ (mg/l) | Aucun échantillon | / | / | / | 0.05 |
| CrO₄ (mg/l) | Aucun échantillon | / | / | / | 0.05 |

7.2.2-Selon les normes du ministère du commerce algérien :

Tab. VI.16 : Normes de potabilité algériennes (Décret exécutif n ° 11-125 du 22 Mars 2011 JON°18/2011).

| Eléments physiques et chimiques | Des échantillons ayant une concentration acceptable par Campagnes | | | | Normes de potabilités Algériennes |
|---------------------------------------|---|--|------------------------------------|--|---|
| | Campagnes SEP 2011 | Campagnes FEV 2012 | Campagnes SEP 2014 | Campagnes FEV 2015 | |
| T (°C) | Tous les échantillons | Tous les échantillons | Tous les échantillons | Tous les échantillons | 25 |
| PH | Tous les échantillons | Tous les échantillons | Tous les échantillons | Tous les échantillons | 6,5 – 9 |
| CE (µS/cm) | 2 -5-8-11 | 2 -5-8-10-11 | 2-4-5-8 | 1-2-3-8-10-11 | 2 800 |
| Minéralisation (mg/l) | Aucun échantillon | Aucun échantillon | Aucun échantillon | Aucun échantillon | 1000 |
| Ca ²⁺ (mg/l) | Aucun échantillon | 1 et 9 | Aucun échantillon | 1 et 9 | 200 |
| Mg ²⁺ (mg/l) | 8 et 11 | Tous les échantillons sauf 4 | 4-9-10-11 | Tous les échantillons | 150 |
| Na ⁺ (mg/l) | Aucun échantillon | Tous les échantillons sauf 1-3-9 | Aucun échantillon | Tous les échantillons sauf 1-3-9 | 200-500 |
| K ⁺ (mg/l) | Tous les échantillons | 1-9 | Tous les échantillons | 1-9 | 12 |
| Cl ⁻ (mg/l) | Tous les échantillons | Tous les échantillons | Tous les échantillons sauf 2 | Tous les échantillons | 200-500 |
| SO ₄ ²⁻ (mg/l) | Aucun échantillon | Aucun échantillon | Aucun échantillon | 1 | 400 |
| NO ₃ ⁻ (mg/l) | Tous les échantillons | Tous les échantillons | Tous les échantillons | Tous les échantillons | 50 |

| | | | | | |
|--|--|------------------------------|--|------------------------------|-------------|
| NO₂⁻ (mg/l) | Aucun échantillon | Tous les échantillons | Aucun échantillon | Tous les échantillons | 0.2 |
| NH₄⁺ (mg/l) | Tous les échantillons | Tous les échantillons | Tous les échantillons | Tous les échantillons | 0.5 |
| P (mg/l) | Tous les échantillons sauf | / | / | / | 5 |
| Pb (mg/l) | Aucun échantillon | 10 | Aucun échantillon | 2 | 0.01 |
| Fe (mg/l) | Tous les échantillons sauf 2-6-11 | Aucun échantillon | Tous les échantillons sauf 2-6-11 | 4 | 0.3 |
| Cu⁺⁺ (mg/l) | Tous les échantillons | 1 | Tous les échantillons | 1-9 | 2 |
| Mn⁺² (mg/l) | Tous les échantillons | / | / | / | 0.5 |
| Cr⁶⁺(mg/l) | Aucun échantillon | / | / | / | 0.05 |
| CrO₄(mg/l) | Aucun échantillon | / | / | / | 0.05 |

A partir des données d'eaux analysées, on remarque que la majorité des points d'eaux sont classés comme eau dure à très dure. Ces valeurs élevées sont dues à la présence en abondance des cations métalliques divalents, surtout le Calcium et le Magnésium. Ainsi, les teneurs élevées des Sulfates traduisant la forte minéralisation des eaux de la région d'étude. Généralement les eaux dures et de fortes minéralisations sont inconvenables pour toutes les opérations de ménage, souvent un processus de traitement de ces eaux pour réduire le taux de dureté totale et de salinité est indispensable.

Il faut noter aussi qu'un nombre considérable d'élément, dépassent les limites de potabilité essentiellement les éléments majeurs, les éléments indicateurs de pollution agricole, charge en matières organiques et surtout les éléments traces métalliques. Les teneurs enregistrées peuvent présenter un risque sanitaire. Ces teneurs anormalement élevées surtout en Sulfates,

Fer, Chromes rencontrés dans quelques échantillons, doivent être le fait de pollution d'origine anthropique.

D'une manière générale, les eaux dans la région d'El-Kantara présente une potabilité admissible à médiocre selon les normes de L'O.M.S et les normes algériennes (**Tab. VI.16**).

7.3-Aptitude des eaux à l'irrigation :

7.3.1- Introduction :

Dans le cadre de développement et de la promotion du secteur de l'agriculture dans la région d'étude. Une série de forages a été réalisés par les services de l'état, pour satisfaire les besoins de la région qui a pris une nouvelle tendance dans l'activité agricole, toutes sortes de cultures ont été pratiquées. L'intensité des pratiques agricoles et la mise en place de nombreux systèmes d'irrigation ont provoqué un impact sur la qualité des eaux souterraines, notamment ceux de retour vers la nappe après irrigation. Il est connu que les sels minéraux contenus dans l'eau ont des effets sur le sol et les plantes. Les sels peuvent perturber le développement physique des plantes. Du fait de l'absorption de l'eau, on peut observer des effets sur les processus osmotiques, ou du point de vue chimique par des réactions métaboliques, telles que celles causées par les constituants toxiques. En plus, et selon Person .j (1978) les sels causent des changements dans la structure du sol (sur sa perméabilité et son aération), affectant directement le développement de la plante (In Rouabhia ,2006). La sécheresse de la dernière décennie a engendré un fort déficit (démonstré par les calculs du bilan hydrique) et une forte évapotranspiration, influençant le taux de salinité des eaux. Les formations géologiques (sables, grés, gypse ...) traversées par les eaux modifient la composition chimique de celles-ci (Kerboub, 2012).

Beaucoup de critères sont à prendre en considération si on veut caractériser l'aptitude d'une eau à être utilisée pour irriguer les cultures ; à savoir les caractéristiques physicochimiques de cette eau qui sont :

- 1- Salinité: contenu total en sel soluble.
- 2- Sodium: proportion relative des cations Sodium (Na^+) par rapport aux autres.
- 3- Alcalinité et Dureté: concentration d'anions Carbonate (CO_3) et Bicarbonate.
- 4- pH de l'eau.
- 5- Autres éléments.

Les deux premiers critères sont d'importance majeure, car un excès de sel augmente la pression osmotique de l'eau du sol et provoque des conditions, qui empêchent les racines d'absorber l'eau. Ces conditions provoquent une sécheresse physiologique. Même si le sol semble avoir beaucoup d'humidité, les plants flétrissent parce que les racines n'absorbent pas suffisamment d'eau pour remplacer celle perdue par évapotranspiration.

7.3.2-La Salinité :

Les principaux sels responsables de la salinité de l'eau sont les sels de Calcium (Ca^{2+}), de Magnésium (Mg^{2+}), de Sodium (Na^+), de Potassium (K^+), les Chlorures (Cl^-), les Sulfates (SO_4^{2-}) et les Bicarbonates (HCO_3^-). Une valeur élevée de la salinité signifie une grande quantité d'ions en solution, ce qui rend plus difficile l'absorption de l'eau et des éléments minéraux par la plante. Une salinité trop élevée peut causer des brûlures racinaires. La salinité peut se mesurer de deux façons, soit par le total des sels dissous (TDS) exprimées en mg/l ; qui a été développé dans la partie de potabilité des eaux, soit par le résidu sec ou la conductivité électrique, la salinité potentielle, qu'on va essayer de développer dans cette partie par l'application des formules ci-dessous :

-La salinité totale : L'effet primordial de la salinité totale est de réduire la croissance des cultures et leur production, elle est généralement exprimée par la minéralisation globale ou par la conductivité électrique (CE). Cette dernière est liée au résidu sec (RS) et à la pression osmotique (π) par les formules suivantes : $\text{RS (mg/l)} = 0.7 \text{ CE } (\mu\text{s/cm}) \dots\dots\dots (1)$

$(\pi) (\text{atm.}) = 0.00036 \cdot \text{CE} \dots\dots\dots ; \dots\dots\dots ; (2)$ (In Rouabhia ,2006)

-La salinité potentielle (Sp) : La salinité totale du sol est constituée par tous les sels de Chlorures de Sodium et des sulfates de magnésium, par conséquent la salinité potentielle (Sp) pourrait être estimée par Doneen (1961) (In Rouabhia ,2006) :

$\text{SP} = \text{Cl} + \frac{1}{2} \text{SO}_4^{2-}$: Tous les termes sont exprimés en méq/l

7.3.3-Le Sodium : Le Sodium est l'un des éléments les plus indésirables dans l'eau d'irrigation. Cet élément origine de l'altération de la roche et du sol, des intrusions d'eau de mer, et des eaux d'irrigation. Le Sodium contribue directement à la salinité totale de l'eau et peut être toxique pour des cultures sensibles, mais le problème principal avec un excès de Sodium est son effet sur la perméabilité du sol et donc sur l'infiltration de l'eau. Le Sodium remplace le Calcium et le Magnésium adsorbés sur le complexe argilo-humique et provoque

la dispersion des particules du sol. Il y a donc éclatement des agrégats du sol, ce qui induit un sol dur et compact lorsqu'il est sec et le rend imperméable à l'eau par la formation d'une croûte de battance (exemple ; cas extrême des sebkhas), le risque du Sodium est exprimé par le ratio SAR décrit plus bas.

L'abondance de Sodium dans l'eau d'irrigation peut provoquer une destruction de la structure du sol. Dans de telles conditions, il peut devenir extrêmement difficile de satisfaire les besoin en eau de la culture. Ce risque est déterminé par différents auteurs en calculant plusieurs paramètres tels que :

-**Méthode de Richard 1954** : Le rapport du sodium adsorbable (Sodium Absorption Ration) (S.A.R) est exprimé par la formule suivante :

$$SAR = \frac{Na^{++}}{\sqrt{\frac{(Ca^{2+} + Mg^{2+})}{2}}}$$

- **Méthode de Wilcox** : Le pourcentage en sodium est calculé par la formule suivante:

$$\%Na = \frac{(Na^+ + K)}{(Ca + Mg + Na + K)} \times 100$$

L'usage agricole d'une eau exige un pourcentage en sodium inférieur à 60% seuil maximum admissible.

- Le pourcentage d'échange de sodium : $ESP = 100 \frac{[-a + b(SAR)]}{1 + [-a + b(SAR)]}$

Où a = 0,0126 et b= 0,01475

Dans les formules ci-dessus, tous les éléments sont exprimés en mé/l. De plus, des études récentes ont indiqué que la perméabilité du sol dépend de plusieurs autres facteurs tels que la concentration totale de l'eau, la quantité de sodium, la concentration en bicarbonates et la nature du sol lui-même. Les trois premiers termes ont été combinés dans une seule formule donnant ce qu'on appelle l'indice de perméabilité (IP) défini par (Doneen, 1961) :

$$IP(\%) = \frac{Na^+ + \sqrt{HCO_3}}{Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+} \times 100$$

7.3.4-Calcul et interprétation des paramètres des eaux à usage agricole :

7.3.4.1-Calcul des paramètres des eaux à usage agricole : Les facteurs les plus importants, qui interviennent mieux à définir l'aptitude des eaux de la plaine d'El-Kantara à l'irrigation

sont calculés et présentés dans les tableaux suivants et les diagrammes de classifications les plus utilisées de nos jours.

Tab. VI.17 : Paramètres de la qualité de l'eau à l'irrigation de la plaine d'El-Kantara (SEP 2011). (Auteur, 2022).

| Stations | CE (µs/cm) | RS (mg/l) | (π) (atm.) | SP méq/l | SAR | %Na | ESP | IP% |
|----------|------------|-----------|------------|----------|------|-------|-------|-------|
| 1 | 3870 | 2709 | 1,39 | 13,25 | 1,10 | 9,67 | 0,36 | 10,15 |
| 2 | 2130 | 1491 | 0,77 | 9,99 | 0,98 | 10,39 | 0,18 | 10,71 |
| 3 | 3000 | 2100 | 1,08 | 10,73 | 0,87 | 8,81 | 0,03 | 9,35 |
| 4 | 2980 | 2086 | 1,07 | 10,74 | 0,95 | 9,65 | 0,15 | 10,12 |
| 5 | 2680 | 1876 | 0,96 | 8,93 | 1,09 | 11,76 | 0,34 | 12,29 |
| 6 | 3320 | 2324 | 1,20 | 11,78 | 0,89 | 8,54 | 0,05 | 9,01 |
| 7 | 3680 | 2576 | 1,32 | 11,42 | 1,00 | 9,51 | 0,21 | 10,01 |
| 8 | 2640 | 1848 | 0,95 | 10,43 | 0,64 | 6,49 | -0,32 | 7,02 |
| 9 | 3110 | 2177 | 1,12 | 11,36 | 1,00 | 9,64 | 0,21 | 10,10 |
| 10 | 2900 | 2030 | 1,04 | 11,02 | 0,87 | 8,73 | 0,03 | 9,27 |
| 11 | 2130 | 1491 | 0,77 | 6,18 | 1,21 | 15,22 | 0,52 | 15,59 |

Tab. VI.18 : Paramètres de la qualité de l'eau à l'irrigation de la plaine d'El-Kantara (FEV 2012). (Auteur, 2022).

| Stations | CE (µs/cm) | RS (mg/l) | (π) (atm.) | SP méq/l | SAR | %Na | ESP | IP% |
|----------|------------|-----------|------------|----------|------|-------|------|-------|
| 1 | 1500 | 1050 | 0,54 | 6,88 | 1,52 | 24,15 | 0,97 | 37,04 |
| 2 | 2350 | 1645 | 0,85 | 19,60 | 5,94 | 48,38 | 6,97 | 53,61 |
| 3 | 3000 | 2100 | 1,08 | 26,70 | 1,13 | 14,92 | 0,40 | 18,26 |
| 4 | 2980 | 2086 | 1,07 | 24,00 | 4,40 | 37,12 | 4,97 | 40,46 |
| 5 | 2300 | 1610 | 0,83 | 18,60 | 5,11 | 44,06 | 5,91 | 49,40 |
| 6 | 3320 | 2324 | 1,20 | 20,38 | 4,87 | 41,43 | 5,60 | 45,05 |
| 7 | 3240 | 2268 | 1,17 | 26,88 | 4,77 | 37,62 | 5,46 | 40,73 |
| 8 | 2400 | 1680 | 0,86 | 20,13 | 6,10 | 49,26 | 7,18 | 53,98 |
| 9 | 3110 | 2177 | 1,12 | 21,25 | 1,35 | 25,62 | 0,72 | 39,80 |
| 10 | 2500 | 1750 | 0,90 | 18,74 | 5,10 | 43,99 | 5,89 | 49,43 |
| 11 | 2480 | 1736 | 0,89 | 19,10 | 5,52 | 46,06 | 6,44 | 51,27 |

Tab. VI.19 : Paramètres de la qualité de l'eau à l'irrigation de la plaine d'El-Kantara (SEP 2014). (Auteur, 2022).

| Stations | CE (µs/cm) | RS (mg/l) | (π) (atm.) | SP méq/l | SAR | %Na | ESP | IP% |
|----------|------------|-----------|------------|----------|------|-------|-------|-------|
| 1 | 3890 | 2723 | 1,40 | 30,45 | 1,40 | 11,93 | 0,80 | 13,03 |
| 2 | 2150 | 1505 | 0,77 | 31,27 | 1,14 | 11,72 | 0,42 | 12,94 |
| 3 | 3020 | 2114 | 1,09 | 26,57 | 1,03 | 10,17 | 0,26 | 12,39 |
| 4 | 2300 | 1610 | 0,83 | 28,77 | 1,23 | 13,11 | 0,55 | 16,12 |
| 5 | 2700 | 1890 | 0,97 | 27,27 | 1,25 | 13,04 | 0,58 | 15,93 |
| 6 | 3340 | 2338 | 1,20 | 23,27 | 1,04 | 9,75 | 0,27 | 10,85 |
| 7 | 3700 | 2590 | 1,33 | 28,07 | 1,07 | 10,15 | 0,31 | 12,41 |
| 8 | 2660 | 1862 | 0,96 | 19,87 | 0,80 | 8,03 | -0,08 | 10,26 |
| 9 | 3130 | 2191 | 1,13 | 27,37 | 1,16 | 12,01 | 0,45 | 14,09 |
| 10 | 2920 | 2044 | 1,05 | 26,07 | 1,14 | 12,07 | 0,42 | 14,33 |
| 11 | 2150 | 1505 | 0,77 | 23,87 | 1,38 | 16,59 | 0,77 | 19,63 |

Tab. VI.20 : Paramètres de la qualité de l'eau à l'irrigation de la plaine d'El-Kantara (FEV 2015). (Auteur, 2022).

| Station | CE (µs/cm) | RS (mg/l) | (π) (atm.) | SP méq/l | SAR | %Na | ESP | IP% |
|---------|------------|-----------|------------|----------|------|-------|------|-------|
| 1 | 1480 | 1036 | 1,40 | 5,88 | 1,45 | 24,92 | 0,88 | 39,52 |
| 2 | 2327 | 1628,9 | 0,77 | 18,83 | 6,07 | 49,89 | 7,14 | 55,45 |
| 3 | 2977 | 2083,9 | 1,09 | 25,93 | 1,05 | 14,28 | 0,29 | 17,91 |
| 4 | 2960 | 2072 | 0,83 | 23,43 | 4,37 | 37,58 | 4,93 | 41,06 |
| 5 | 2981 | 2086,7 | 0,97 | 17,83 | 5,16 | 45,22 | 5,97 | 50,88 |
| 6 | 3301 | 2310,7 | 1,20 | 19,65 | 4,85 | 41,97 | 5,57 | 45,64 |
| 7 | 3220 | 2254 | 1,33 | 26,18 | 4,75 | 38,41 | 5,43 | 41,72 |
| 8 | 2381 | 1666,7 | 0,96 | 19,33 | 6,20 | 50,68 | 7,31 | 55,67 |
| 9 | 3100 | 2170 | 1,13 | 20,51 | 1,28 | 26,92 | 0,62 | 43,55 |
| 10 | 2478 | 1734,6 | 1,05 | 18,02 | 5,22 | 46,10 | 6,06 | 51,99 |
| 11 | 2460 | 1722 | 0,77 | 18,28 | 5,36 | 46,35 | 6,23 | 51,71 |

-Diagramme de Richards :

La qualité de l'eau pour l'irrigation a été étudiée par l'USSS (1954) puis complétée par Durant (1958). Cette étude s'est basée sur la concentration du Sodium par rapport à celle du Calcium et du Magnésium qui définit le rapport du Sodium absorbé. Trois classes de risque alcalin ont été définies en relation avec le risque salin (**FIG .VI.34**).

* $0 \leq \text{SAR} \leq 13$ Risque faible ;

* $13 \leq \text{SAR} \leq 23$ Risque moyen ;

* $23 \leq \text{SAR} \leq 32$ Risque fort.

-Classification de WILCOX :

Le diagramme de Wilcox est une représentation graphique du pourcentage du Sodium (%Na) en fonction de la conductivité électrique, permettant de déterminer le risque de salinité des eaux. La classification définit cinq classes d'eau excellente, bonne, admissible, médiocre et mauvaise. L'augmentation de la charge en Na^+ influence négativement le développement des plantes (**Tab. VI.21**) et (**FIG .VI.35**).

Tab. VI.21 : Classification des eaux d'irrigation, d'après J.Servant, 1975 (U.S. Salinity LAB).

| Degré | Qualité | Classes | Description |
|-------|------------|-------------------------|---|
| 1 | Excellente | C1-S1 | Eau utilisable sans danger dans l'irrigation de la plupart des cultures, sur la plupart des sols. |
| 2 | Bonne | C2-S1 C2-S2 | En général, eau pouvant être utilisée sans contrôle particulier pour l'irrigation des plantes moyennement tolérant les sels, sur sols ayant une bonne perméabilité. Principaux problèmes dus aux plantes trop sensibles, au sodium et aux sols à forte capacité d'échange d'ions (sols argileux) |
| 3 | Admissible | C3-S1 | En général, eau convenant à l'irrigation des cultures tolérant les sels, sur des sols bien drainés. L'évolution de la salinité doit cependant être contrôlée. Principaux problèmes dus aux plantes trop sensibles au sodium et aux sols à faible perméabilité. |
| 4 | Médiocre | C4-S1 C4-S2 C3-S3 | En général eau fortement minéralisée pouvant convenir à l'irrigation de certaines espèces tolérant bien les sels et sur des sols bien drainés et lessivés |
| 5 | Mauvaise | C3-S4 C4-S3 C4-S4 | Eau ne convenant généralement pas à l'irrigation, mais pouvant être utilisée sous certaines conditions : sols très perméables, bon lessivage, plantes tolérant très bien le sel. |

7.3.4.2-Interprétation des résultats des diagrammes.

7.3.4.2.1-Diagrammes de Richards :

L'examen des diagrammes de Richards permet de dire que le danger d'alcalinisation est faible avec le danger de salinité élevé pendant la période des basses eaux (SEP 2011/2014). Par contre, durant la période des hautes eaux le danger d'alcalinisation est devenu moyen avec le danger de salinité élevé. Le tableau (**Tab. VI.22**) récapitule les résultats d'interprétation des diagrammes.

Tab. VI.22: Classification des eaux d'El-Kantara pour l'irrigation d'après l'interprétation des diagrammes de Richards . (Auteur, 2022).

| Classe | Périodes | | | |
|---|--------------------|-------------------|------------------|-------------------|
| | SEP 2011 | FEV 2012 | SEP 2014 | FEV 2015 |
| Le pouvoir d'alcalinisation faible : $0 \leq SAR \leq 13$ | 2-11 | 1-3-9 | 2-4-11 | 1-3-9 |
| Le pouvoir d'alcalinisation moyen : $13 \leq SAR \leq 23$ | 1-3-4-5-6-7-8-9-10 | 2-4-5-6-7-8-10-11 | 1-3-5-6-7-8-9-10 | 2-4-5-6-7-8-10-11 |
| Le pouvoir d'alcalinisation fort : $23 \leq SAR \leq 32$ | / | / | / | / |

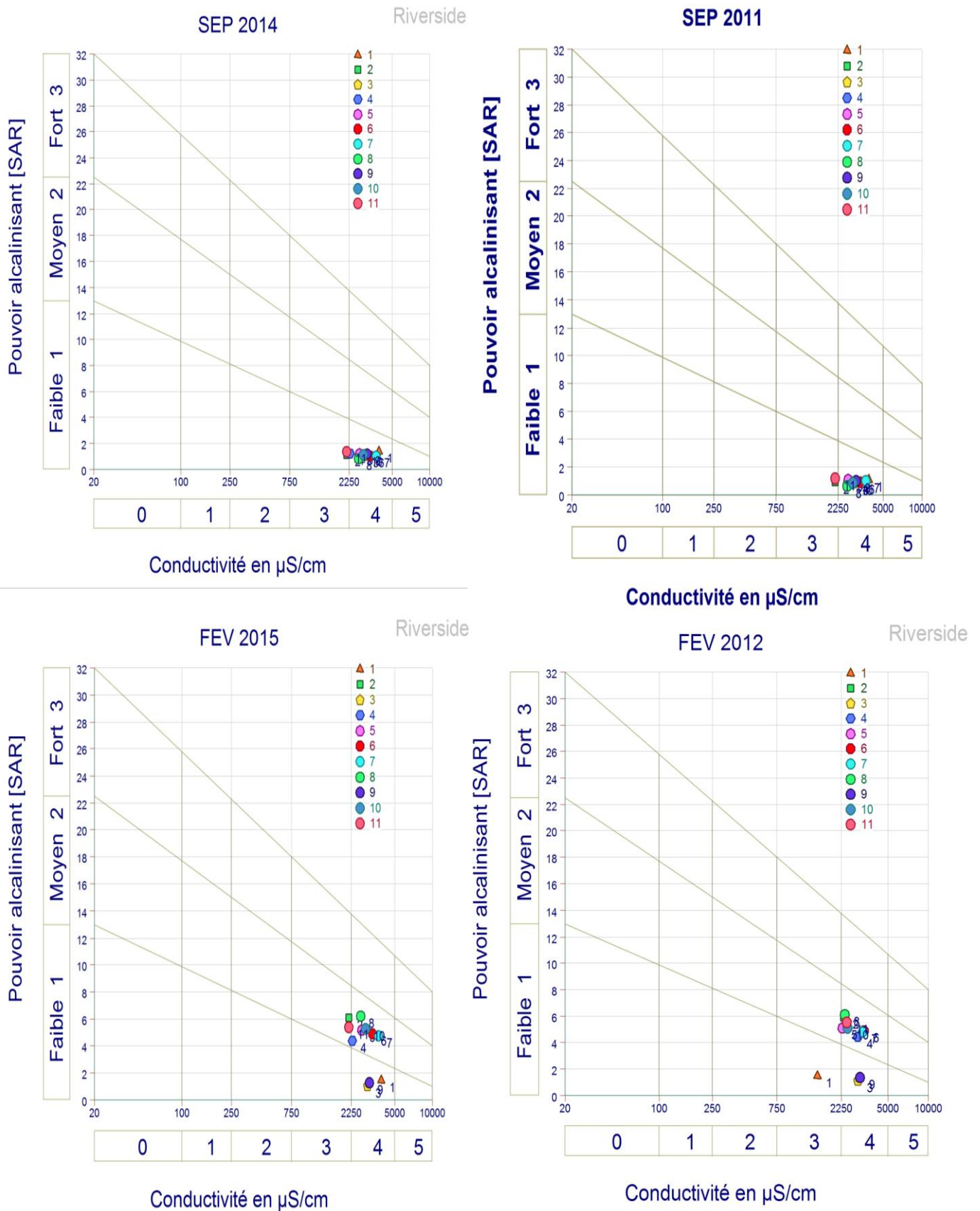


Fig.VI.34 : Aptitude des eaux de la plaine d'El-Kantara à l'irrigation selon le Diagramme de Richards (Riverside).

(Auteur, 2022).

7.3.4.2.2-Diagrammes de Wilcox :

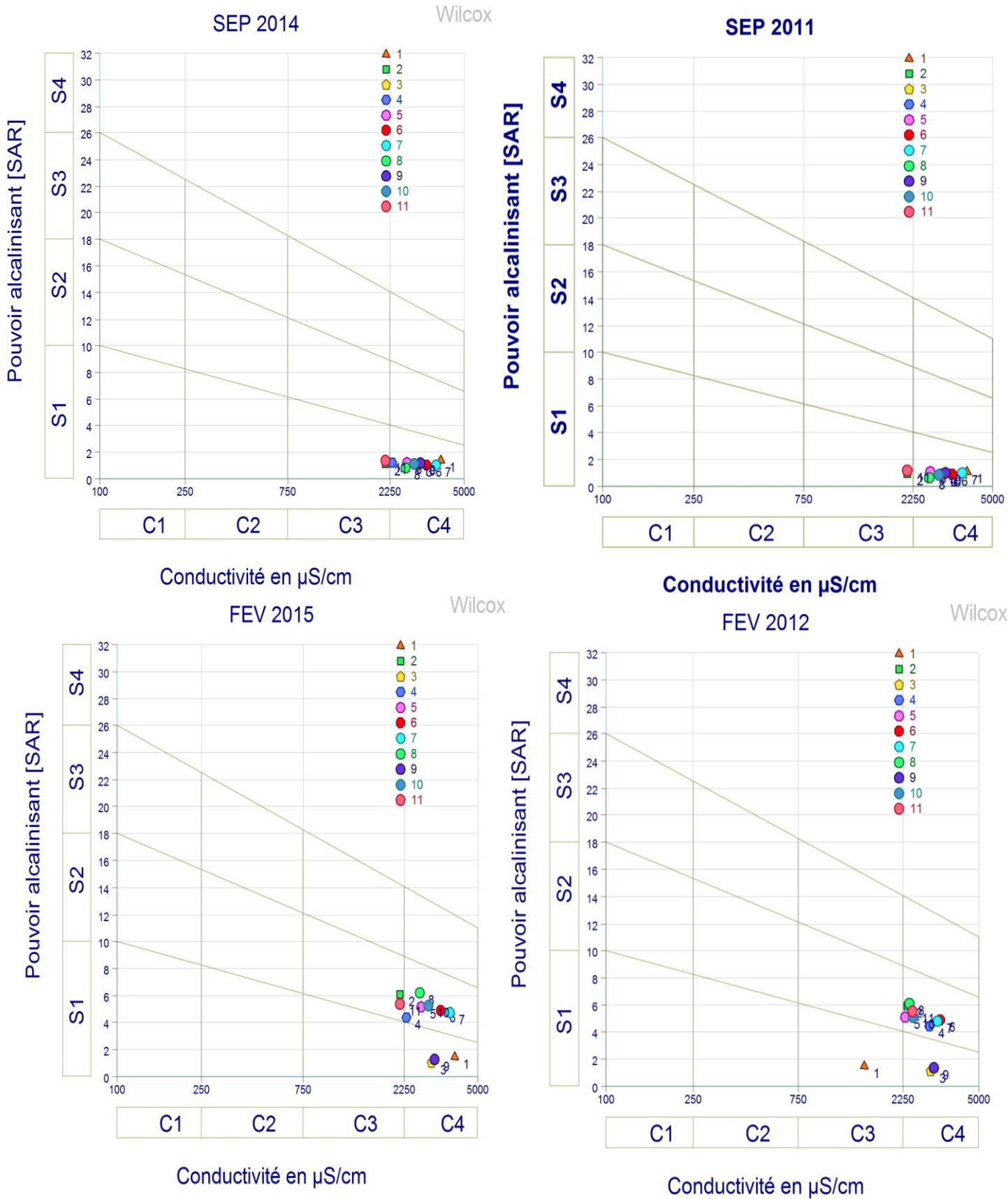


Fig.VI.35 : Aptitude des eaux de la plaine d’El-Kantara à l’irrigation selon le Diagramme de Wilcox. (Auteur, 2022)

Tab. VI.23 : Classification des eaux d’El-Kantara pour l’irrigation d’après l’interprétation des diagrammes de Wilcox . (Auteur, 2022).

| Périodes Classes | SEP 2011 | FEV 2012 | SEP 2014 | FEV 2015 |
|-----------------------------|----------------------------------|--|----------------------------------|---|
| Excellente | / | / | / | / |
| Bonne | / | / | / | / |
| Admissible (C 3S1 et C3S2) | 2-11 (C 3S1) | 1 (C 3S1) | 2-11 (C 3S1) | 2-11 (C 3S2) |
| Médiocre (C 4S1 et C 4S2) | 1-3-4-5-6-7-8-9-10(C 4S1) | 3-9 (C 4S1)et 2-4-5-6-7-8-10-11 (C 4S2) | 1-3-4-5-6-7-8-9-10(C 4S1) | 1-3-9(C 4S1) et 4-5-6-7-8-10 (C 4S2) |
| Mauvaise | / | / | / | / |

La qualité des eaux pour l'irrigation est donc du type admissible à médiocre. Leur utilisation à l'état brut risque de causer des dégâts irréversibles aux sols de la vallée. L'effet cumulé des irrigations avec une eau de qualité admissible à médiocre, sous un climat très évaporant et la présence d'une nappe peu profonde engendre une salinisation secondaire des terres agricoles. Par ailleurs, la rareté de la ressource hydrique oblige les exploitants à l'utiliser malgré les risques, donc il est nécessaire de procéder à des solutions adaptées au problème de salinisation des sols. L'utilisation d'un mélange d'eau est un moyen qui est parfois préconisé pour abaisser la salinité des eaux chargées, aussi la mise en œuvre des techniques d'irrigation et de drainage bien adaptées aux cultures, aux oasis et aux sols est un facteur principal pour la préservation des sols de la vallée.

8- Cartographie hydrochimique : L'outil cartographique, même dans l'aspect qualitatif des eaux, reste un outil très appréciable et complémentaire, dans la vision de l'évolution dans le temps et dans l'espace à travers la région étudiée, d'un constituant chimique quelconque, ou d'un polluant. A cet effet, nous avons dans notre cas, choisi également ce mode de représentation, pour la variabilité des éléments chimiques qui ont le plus de rapport avec le présent sujet de thèse. Pour mettre en évidence cette représentation des différents paramètres, comme le cas de la piézométrie on a utilisé le logiciel de cartographie Surfer 11 (version free) (Kerboub et al, 2016).

8.1- Cartographie des paramètres physiques :

8.1.1 -Potentiel hydrogène PH :

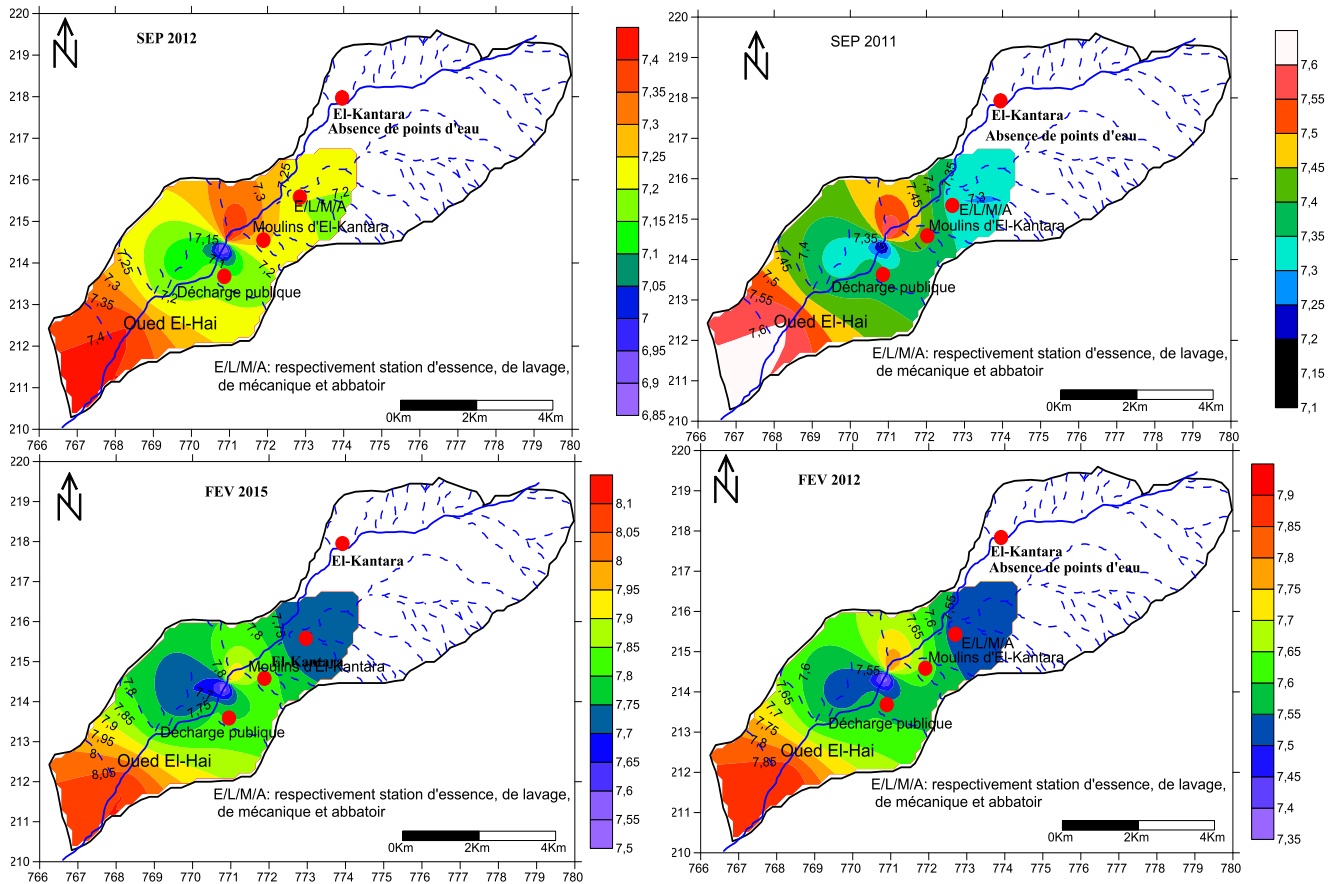


Fig. VI.36 : Cartes des PH des eaux de la plaine d'El-Kantara. (Auteur, 2022).

Pour la période des basses eaux (SEP 2011/2014), les valeurs obtenues du PH varient de 6.7 à 7.6, indiquant des eaux généralement neutres à légèrement basiques. Les pH les plus faibles ont été enregistrés dans une partie très limitée de l'amont et du centre de la plaine avec PH= 6.9 au puits 5 durant la période (SEP 2011) et respectivement PH= 6.7 et 6.8 pour les puits 5 et 4 durant la période (SEP 2014).), ce qui indique des eaux provenant des terrains pauvres en calcaires ou siliceux. Cependant, les valeurs les plus fortes sont enregistrées dans la partie aval de la plaine, où elles atteignent 7.4 à 7.6. Ce qui indique eaux très calcaires et met en évidence l'incidence géologique.

Pour la période des hautes eaux (FEV 2012/2015), la même constatation est valable que pour la période précédente, cependant, les valeurs du PH augmentent légèrement, ce qui correspond probablement au faciès lithologique dominant.

8.1.2 – Conductivité électrique (CE) : La conductivité électrique augmente lorsque la teneur en sels dissous augmente "forte minéralisation", et cela est dû à la présence excessive des cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ et K^+) et d'anions (HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^-) et permet l'estimation de la minéralisation (Rodier ,1996).

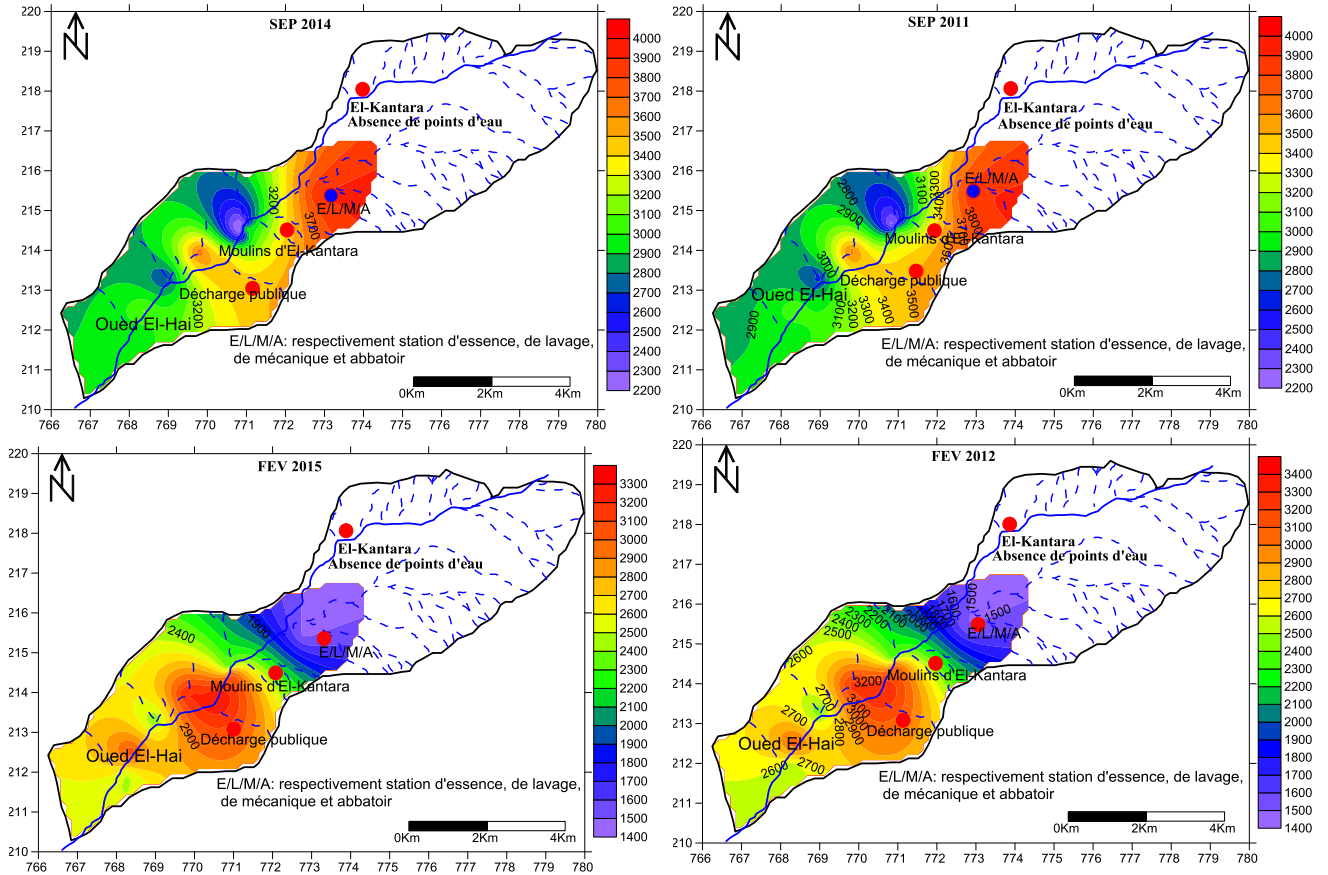


Fig.VI.37 : Cartes de conductivité électrique des eaux de la plaine d’El-Kantara. (Auteur, 2022).

Les valeurs de la conductivité électrique des eaux d’El-Kantara sont mesurées in-situ pendant la période d’étude. Elles sont comprises entre un minimum de 1480 $\mu\text{s}/\text{cm}$ durant la période des hautes eaux (FEV 2015) et un maximum de 3890 $\mu\text{s}/\text{cm}$ durant la période des basses eaux (SEP 2014) (FIG .VI.37). Les cartes de conductivité électrique de la période des basses eaux montrent sommairement une élévation remarquable dans la partie NE du terrain (3500– 4000 $\mu\text{s}/\text{cm}$) notamment près du centre urbain et en liaison avec les rejets de la ville et une diminution dans la partie SW qui se caractérise par des valeurs faibles (2800– 3000 $\mu\text{s}/\text{cm}$). Par contre les cartes de conductivité électrique de la période des hautes eaux montrent une diminution de la conductivité électrique avec les plus fortes concentrations coïncident avec la décharge publique au centre de la plaine. Donc ses valeurs de conductivité électrique des eaux de la région d’étude indiquent une évolution remarquable dans le temps (hautes eaux

et basses eaux) et dans l'espace qui est liée au phénomène de dilution de toutes ces eaux le long du sens d'écoulement.

8.1.3 - Minéralisation globale : La minéralisation globale correspond à la teneur totale en sels dissous dans l'eau. Elle est en relation directe avec la conductivité électrique de la solution.

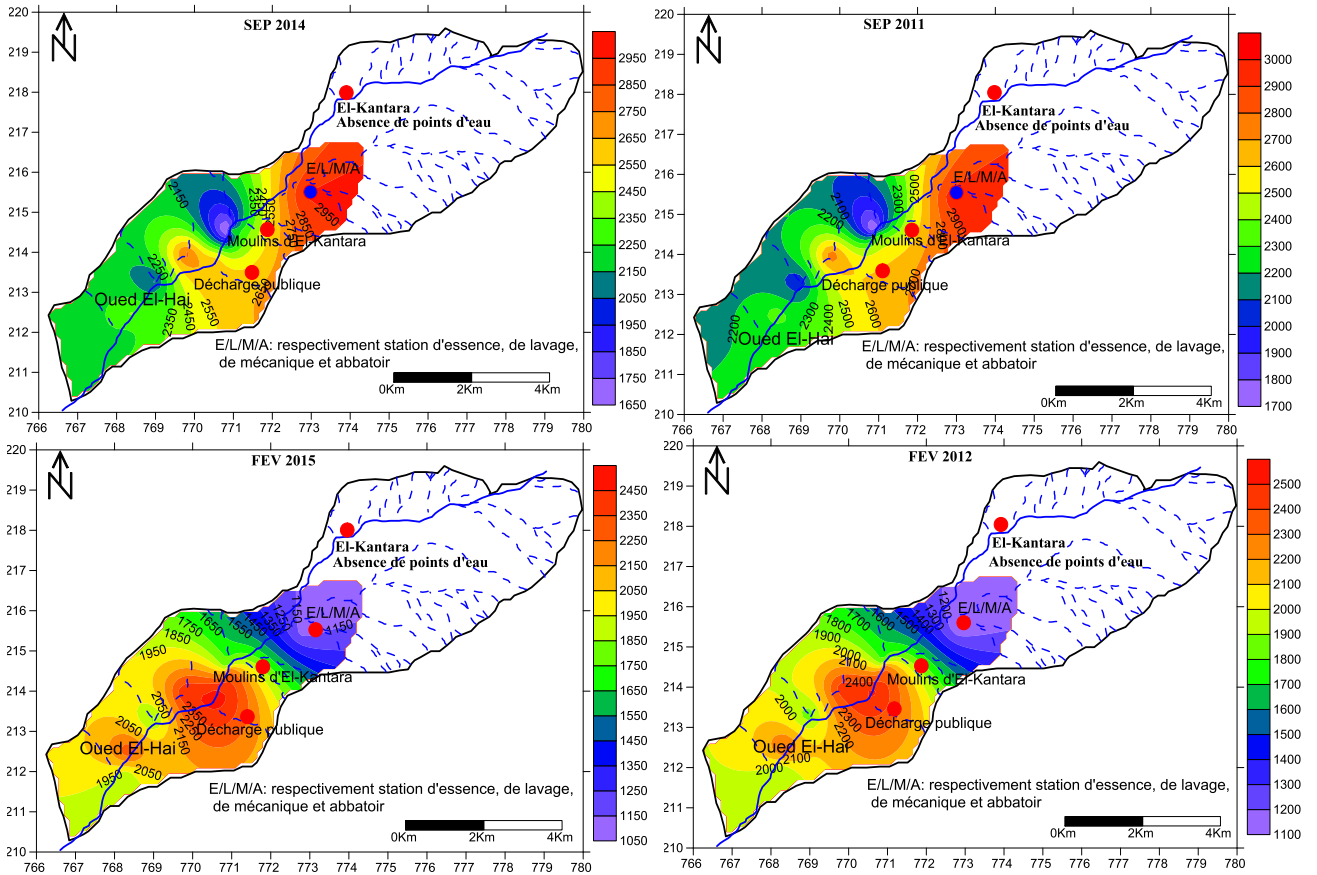


Fig.VI.38 : Cartes de minéralisation des eaux de la plaine d'El-Kantara. (Auteur, 2022).

Les valeurs de la minéralisation des eaux de la zone d'étude sont comprises entre un minimum de 1122,65 mg/l durant la période des hautes eaux (FEV 2015) et un maximum de 2950.74 mg/l durant la période des basses eaux (SEP 2014) (FIG .VI.38). Les cartes de minéralisations de la période des basses eaux montrent sommairement une élévation remarquable dans la partie NE du terrain (2500– 3000 mg/l) notamment près du centre urbain et en liaison avec les rejets de la ville et une diminution dans la partie SW qui se caractérise par des valeurs faibles (2100– 2500 mg/l).Par contre les cartes de minéralisations de la période des hautes eaux montrent une diminution de la minéralisation avec les plus fortes concentrations coïncident avec la décharge publique au centre de la plaine. Donc ses valeurs

de minéralisation des eaux de la région d'étude indiquent une évolution remarquable dans le temps (hautes eaux et basses eaux) et dans l'espace qui est liée au phénomène de dilution de toutes ces eaux le long du sens d'écoulement. Les concentrations de la minéralisation sont élevées et dépassent largement la norme Algérienne de potabilité (1000 mg/l).

8.1.4 - Résidu sec (Rs): Il exprime la totalité des sels dissous et des suspensions organiques contenues dans l'eau, c'est-à-dire la minéralisation totale de l'eau (Rodier, 1996) . Cette teneur en résidu sec est liée à la nature lithologique des formations, aux rejets des eaux usées et à l'évaporation intense dans la région. La valeur limite du résidu sec dans une eau destinée à la consommation humaine est fixée à 2000 mg/l, selon les normes Algériennes.

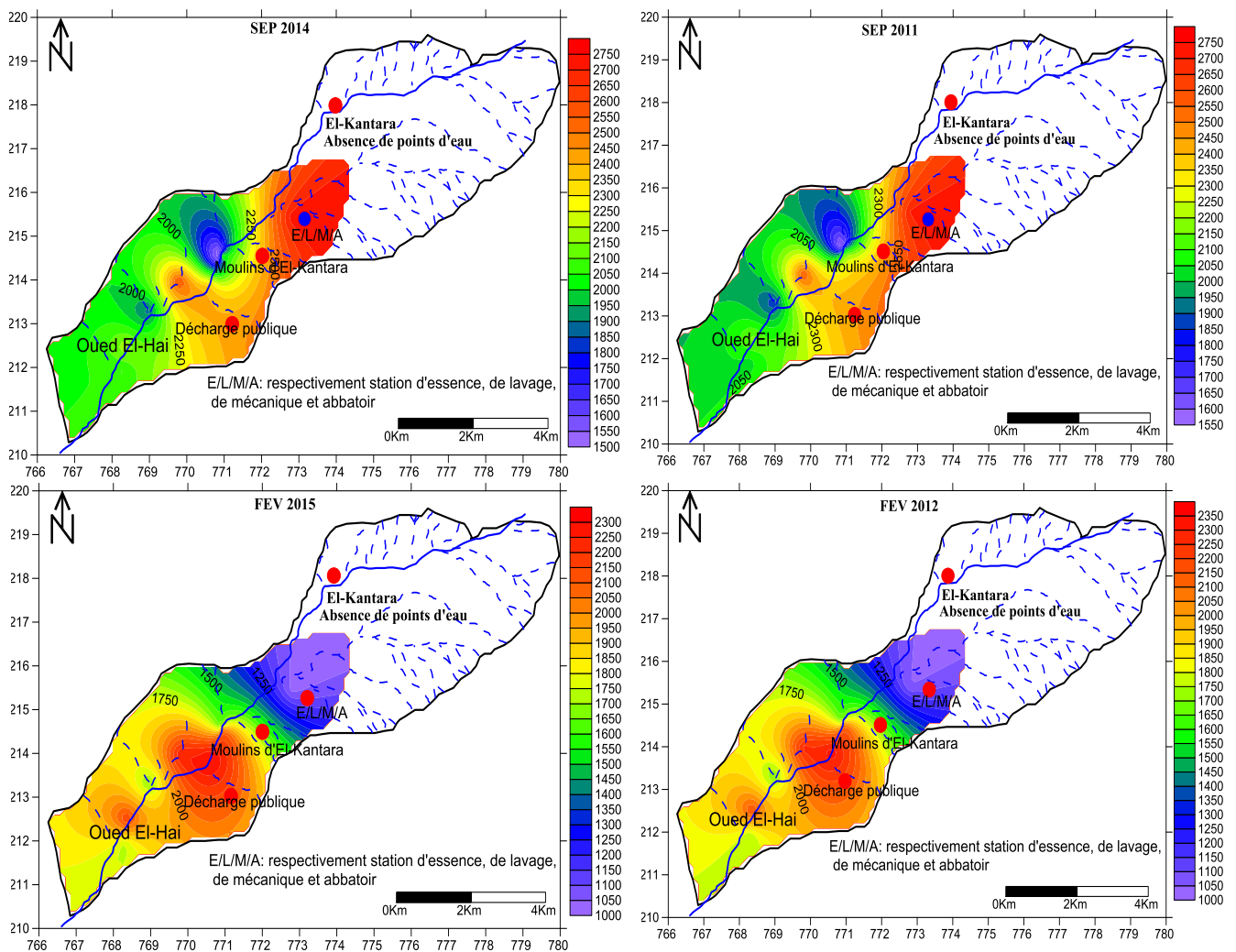


Fig.VI.39 : Cartes de résidu sec des eaux de la plaine d'El-Kantara. (Auteur, 2022).

Les cartes des concentrations de résidu sec montrent une évolution de la même manière que celles de la conductivité électrique et de la minéralisation globale (**FIG .VI.39**).

8.2- Cartographie des éléments chimiques majeurs :

8.2.1- Le Calcium Ca^{2+} : Pendant la période d'étude on remarque que les concentrations sont très dispersées et comprises entre un minimum de 60.50 mg/l enregistré au point d'eau (9) durant la période des hautes eaux (FEV 2015) et un maximum de 741.21 mg/l enregistré au point d'eau (1) durant la période des basses eaux (SEP 2014).

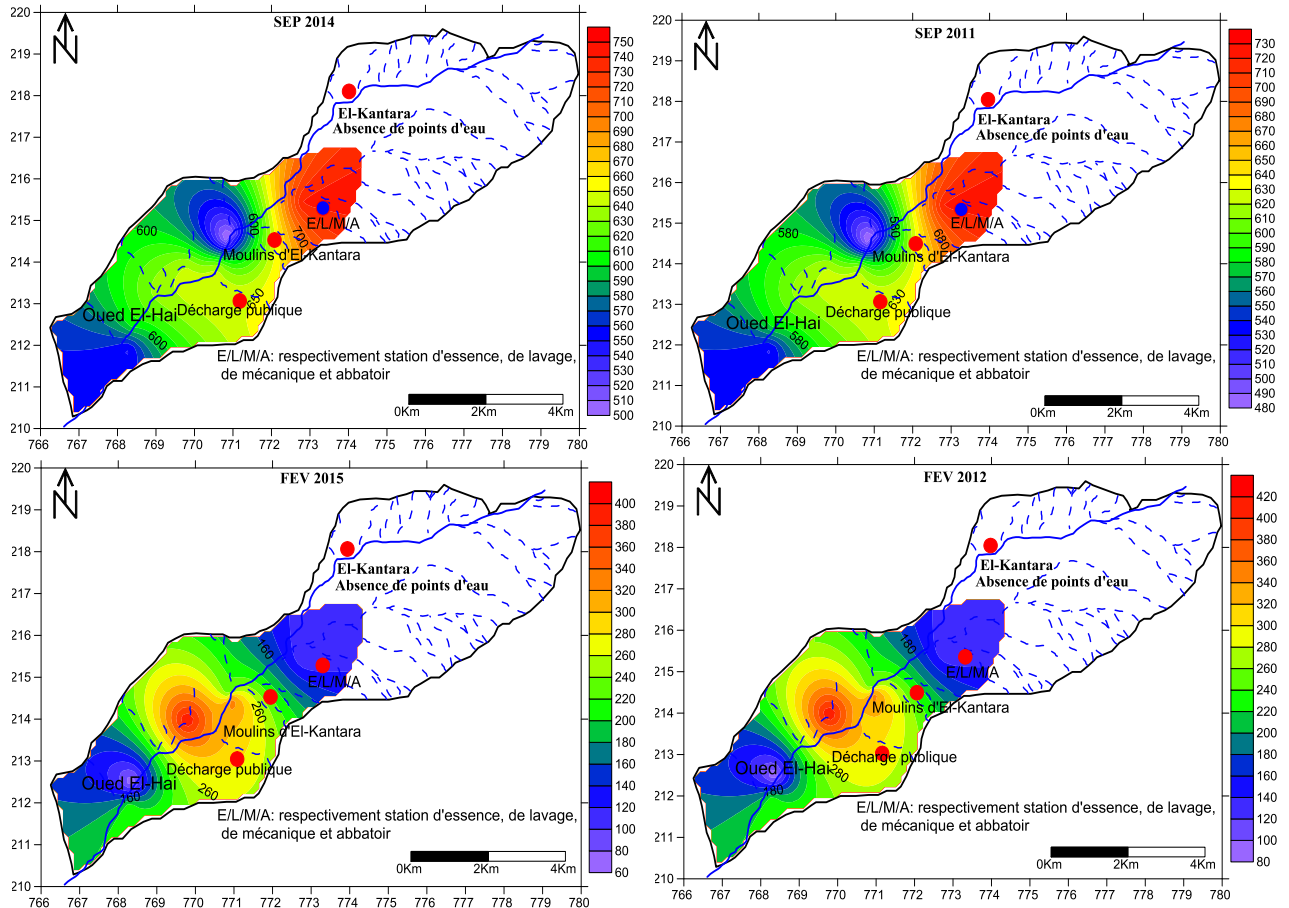


Fig.VI.40 : Cartes de l'ion Calcium des eaux de la plaine d'El-Kantara. (Auteur, 2022).

La plupart des points d'eau de la plaine présentent des concentrations qui dépassent largement les normes de potabilité Algérienne et celles l'OMS (200 mg/l). Pour la période de Septembre 2011 la teneur en Calcium varie entre 304,49 mg/l et 721,21 mg/l. Pour la période de Février 2012 on remarque que les teneurs en Calcium sont comprises entre 78,5 mg/l et 424,85 mg/l. La comparaison entre les cartes de l'ion Calcium des deux périodes (basses eaux SEP 2011 /2014 et hautes eaux FEV 2012/2015) selon la direction NE -SW montre que les concentrations en Calcium des eaux de la région d'étude sont très élevées en période des basses eaux par rapport à celle de la période des hautes eaux (**FIG.VI.40**). Cette diminution peut s'expliquer par le phénomène de dilution.

8.2.2- Le Magnésium Mg^{2+} : C'est un élément qui accompagne souvent le Calcium et provient de la dissolution des dolomies, des calcaires dolomitiques, des minéraux ferromagnésiens, ...

La constatation des cartes de l'ion Magnésium montre que la variation des concentrations du Magnésium est similaire à celle du Calcium dont les teneurs sont comprises entre un minimum de 38.70 mg/l enregistré au point d'eau (9) durant la période des hautes eaux (**FIG .VI.41**) et un maximum de 223.66 mg/l enregistré au point d'eau (1) durant la période des basses eaux (SEP 2014).

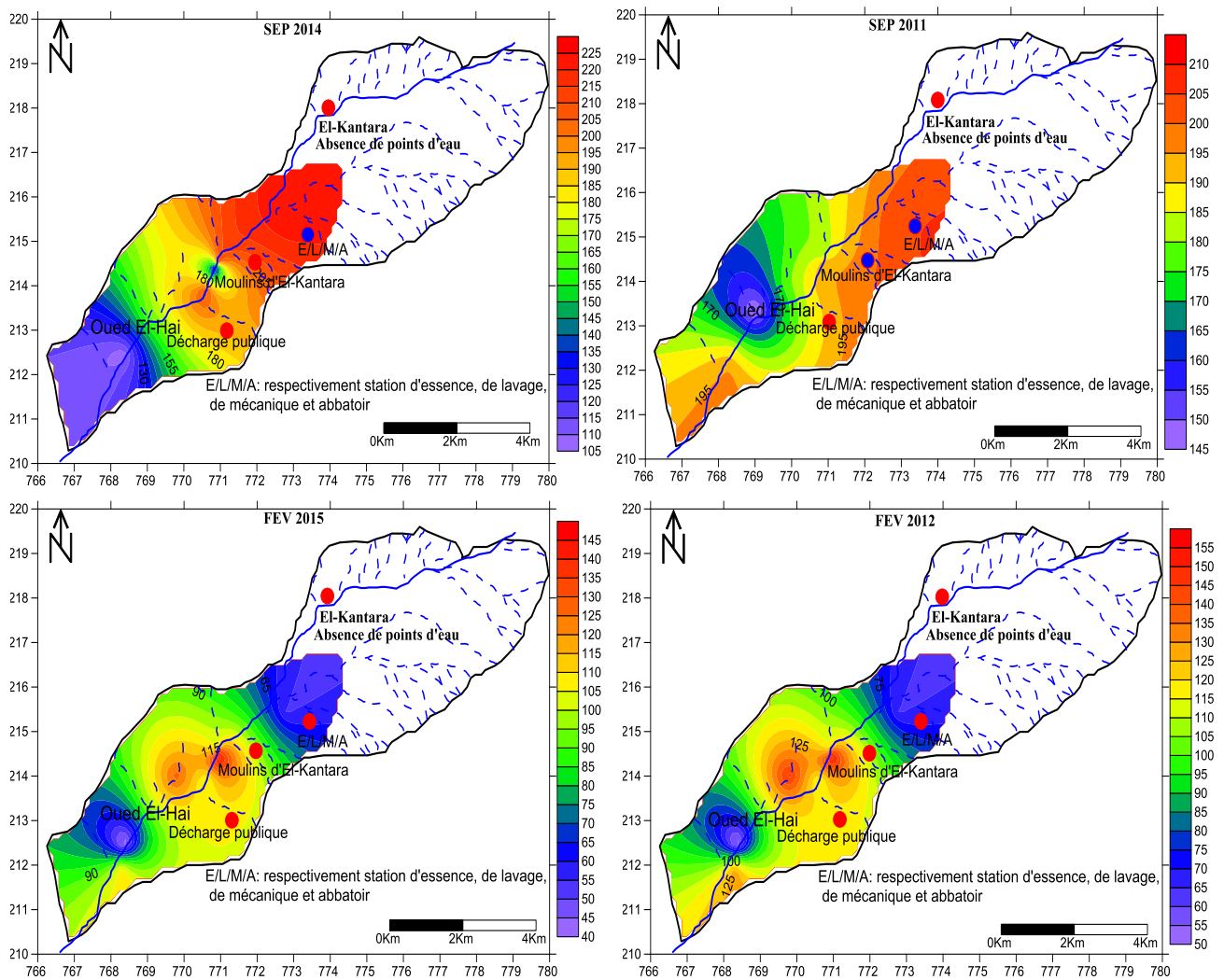


Fig.VI.41 : Cartes de l'ion Magnésium des eaux de la plaine d'El-Kantara. (Auteur, 2022).

L'allure des cartes de la répartition du Magnésium (**FIG .VI.41**) est semblable à celui du Calcium. La diminution des valeurs de Magnésium dans le temps peut s'expliquer également par le phénomène de dilution.

8.2.3 -Le Sodium et le Potassium (Na^+ et K^+) :

Les teneurs en Sodium et en Potassium proviennent des formations riches en NaCl, KCl et des formations argileuses sodiques et argilo-marneuses gypseuses et du rejet des eaux usées d'origine industrielle.

-Le Sodium (Na^+) :

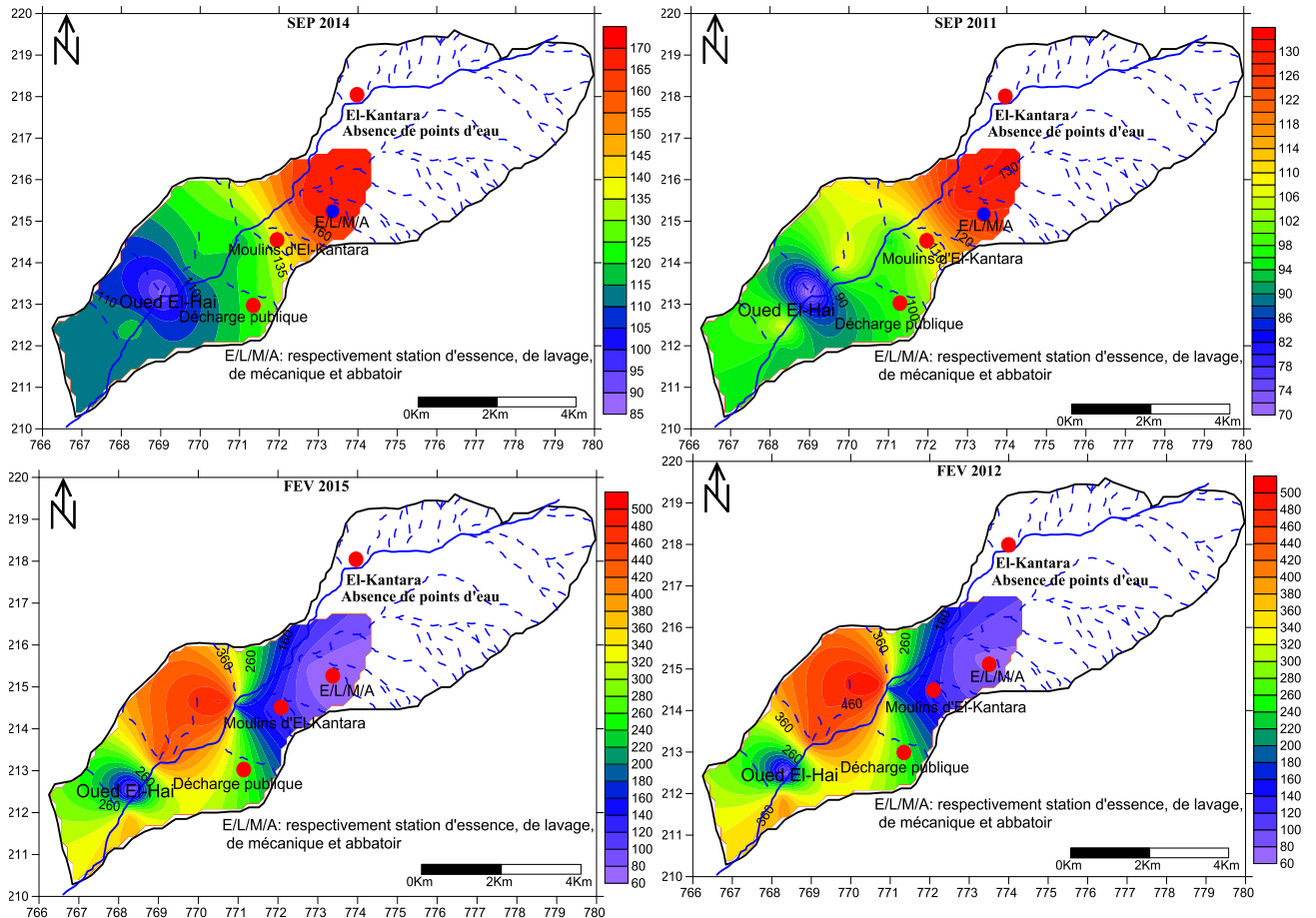


Fig.VI.42 : Cartes de l'ion Sodium des eaux de la plaine d'El-Kantara. (Auteur, 2022).

Les cartes de la répartition des teneurs en Sodium des eaux de la zone d'étude montrent les constatations suivantes (**FIG .VI.42**) :

-Les concentrations en Sodium sont comprises entre un minimum de 51.90 mg/l enregistré au point d'eau (9) durant la période des hautes eaux (FEV 2015) et un maximum de 458.85 mg/l enregistré au point d'eau (8) durant la période des hautes eaux (FEV 2012).

-Pour la période des basses eaux toutes les valeurs sont inférieures aux normes de potabilité OMS et celle de l'Algérie. Par contre, pour la période des hautes eaux la majorité de ces

valeurs sont supérieures aux normes de potabilité OMS et conformes aux normes de potabilité Algérienne.

-La comparaison entre les valeurs des deux périodes montre que celles de la période des basses eaux sont très faibles par rapport à celles des hautes eaux. Ceci peut être expliqué par un lessivage de cet élément pendant la période pluvieuse.

-Le Potassium (K^+) :

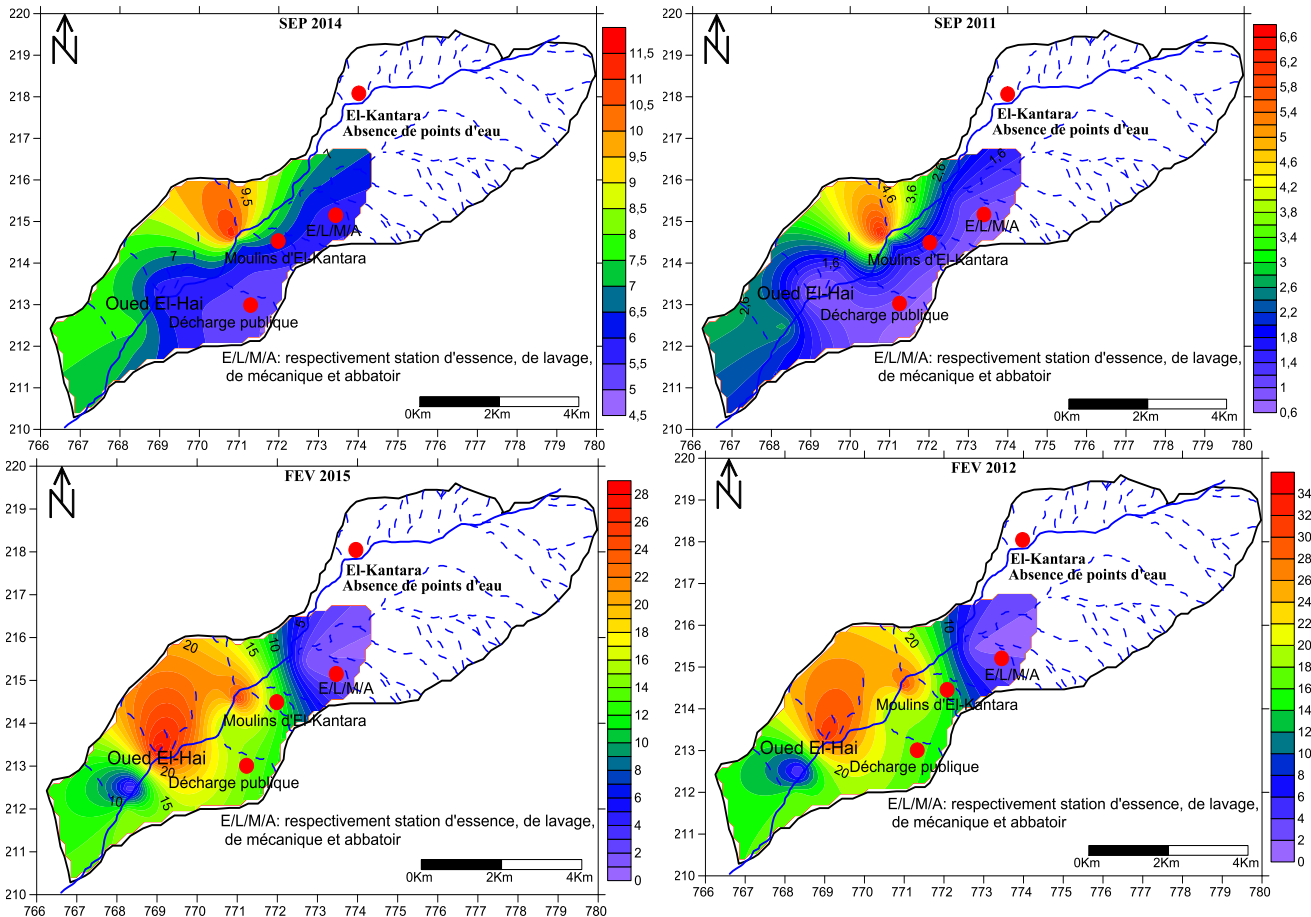


Fig.VI.43 : Cartes de l'ion Potassium des eaux de la plaine d'El-Kantara. (Auteur, 2022).

L'allure des cartes de la répartition des teneurs en Potassium des eaux de la zone d'étude (FIG .VI.43) est semblable à celui du Sodium. Il montre les constatations suivantes :

- Les teneurs en Potassium, sont souvent en très faibles quantités dans les eaux et ne présentent pas d'inconvénient majeur.

-Pendant la période d'étude on remarque que les concentrations en Potassium sont comprises entre un minimum de 0.69 mg/l enregistré au point d'eau (8) durant la période des basses

eaux (SEP 2011) et un maximum de 28 mg/l enregistré au points d'eau (3 et 8) durant la période des hautes eaux (FEV 2015).

-Pour les campagnes des hautes eaux : La majorité des concentrations en ion K^+ sont supérieures aux normes de potabilité Algérienne et celles de l'OMS, à l'exception des points 1 et 9. Par contre, durant la campagne de (SEP 2011) toutes les valeurs sont inférieures aux normes de potabilité Algérienne et celles de l'OMS.

-Pour la campagne de (SEP 2014) la majorité des concentrations en ion K^+ sont inférieures aux normes de potabilité Algérienne et celles de l'OMS.

-La comparaison entre les valeurs des deux périodes montre que celles de la période des basses eaux sont très faibles par rapport à celles des hautes eaux (FIG .VI.43). Ceci peut être expliqué par un lessivage de cet élément pendant la période pluvieuse.

8.2.4 - Les Chlorures (Cl^-):

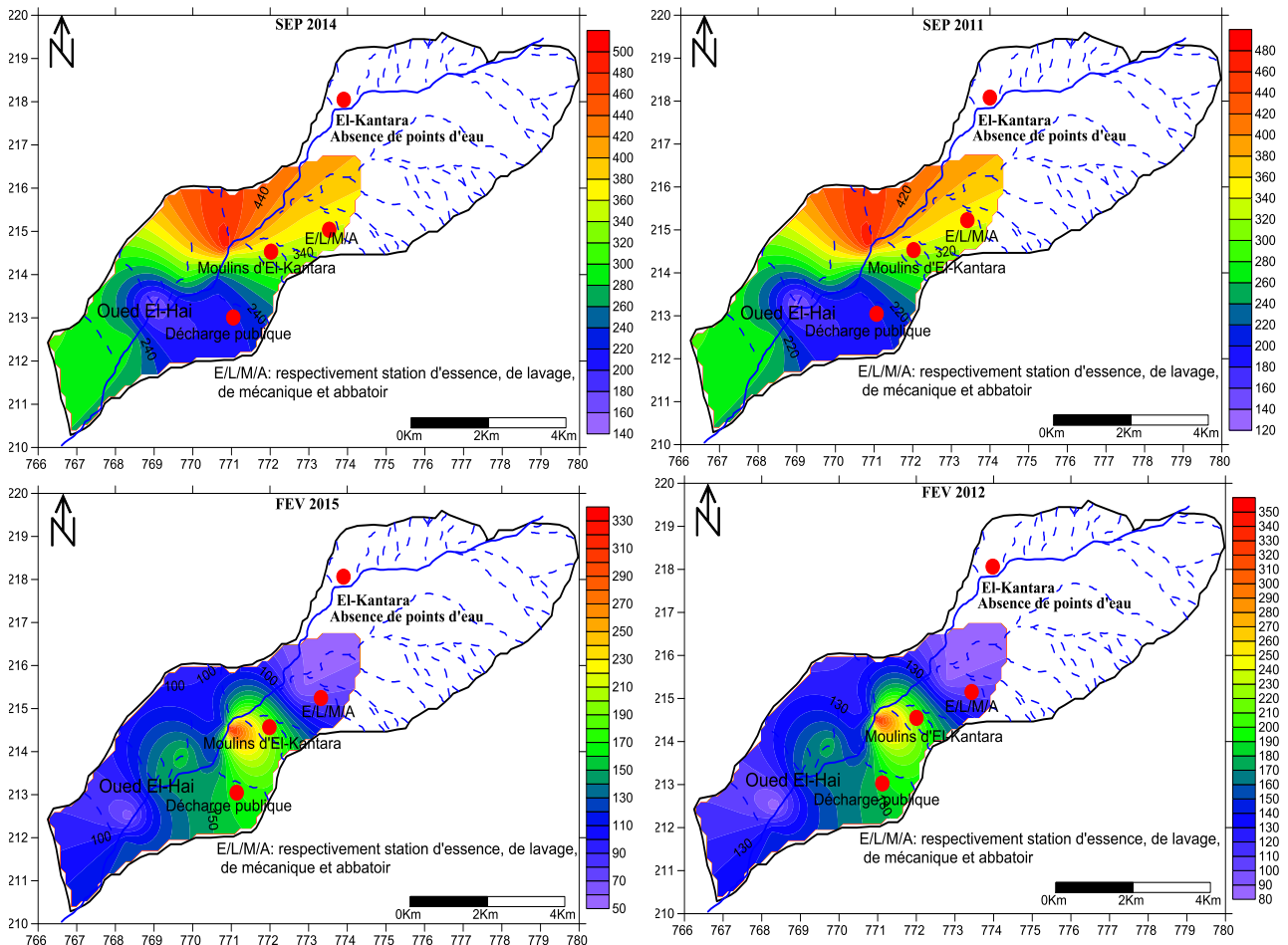


Fig.VI.44 : Cartes de l'ion Chlorure des eaux de la plaine d'El-Kantara. (Auteur, 2022).

L'ion Chlorure est un très bon indicateur de pollution de surface dans les régions éloignées de la mer. Les faibles profondeurs du plan d'eau et la nature lithologique de la couverture de la nappe sont en faveur des teneurs enregistrées lors des différentes campagnes de terrain. Pendant la période d'étude on remarque que les concentrations en Chlorures sont comprises entre un minimum de 60.75 mg/l enregistré au point d'eau (1) durant la période des hautes eaux (FEV 2015) et un maximum de 502.80 mg/l enregistré au points d'eau (8) durant la période des basses eaux (SEP 2015).

La comparaison entre les valeurs des deux périodes montre que celles de la période des basses eaux sont très fortes par rapport à celles des hautes eaux. Ceci peut être expliqué par une dilution de cet élément pendant la période pluvieuse et probablement à un effet de dissolution des évaporites comme c'est le cas de Na et K (FIG .VI.44).

8.2.5 --Les Sulfates (SO_4^{-2}):

Les eaux d'El-Kantara sont très riches en Sulfates et les valeurs mesurées (FIG .VI.45) sont dans leurs majeures parties dominantes par rapport aux autres éléments. Ces valeurs dépassent dans tous les cas les normes de potabilité de l'OMS et celles Algériennes.

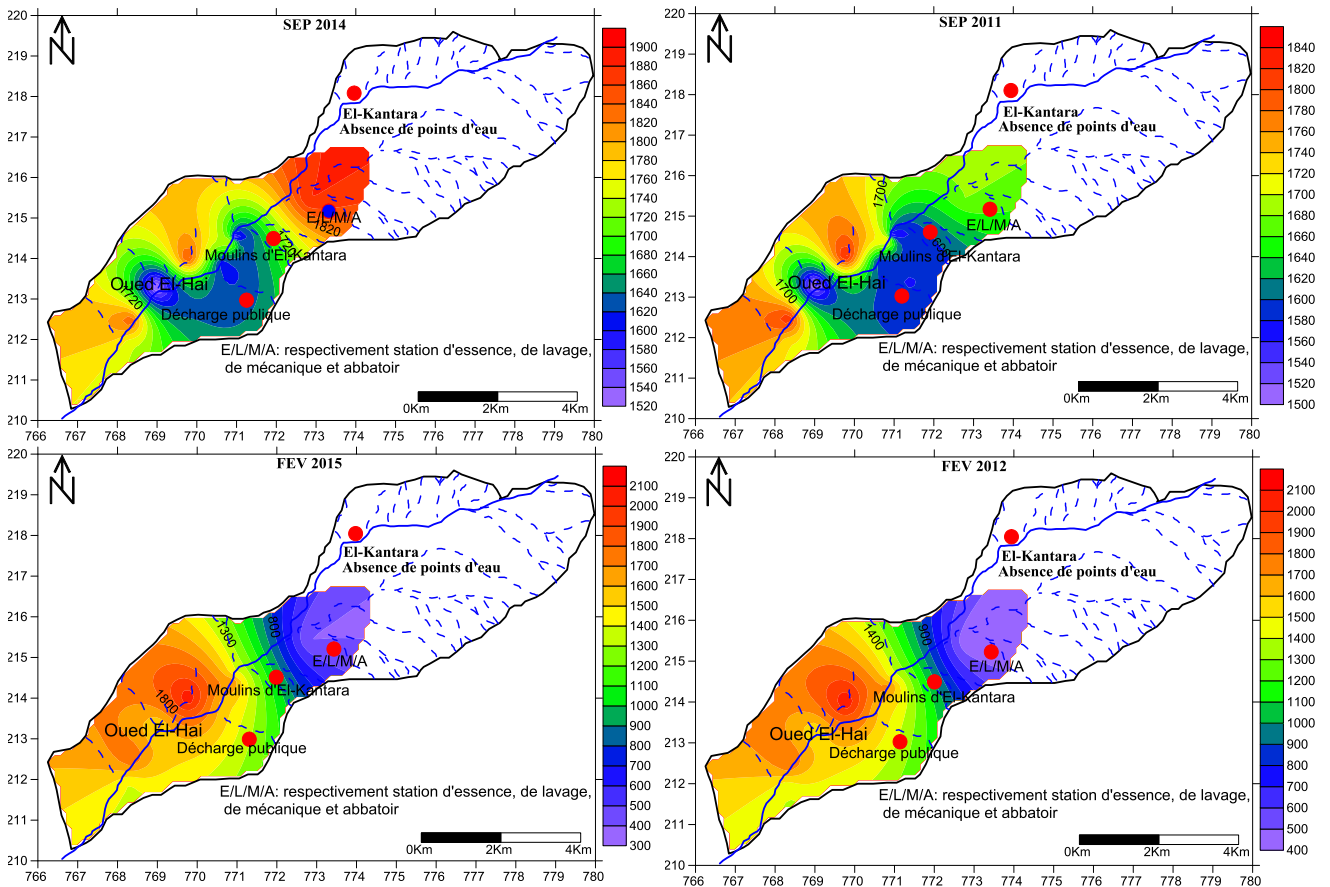


Fig.VI.45 : Cartes des Sulfates des eaux de la plaine d'El-Kantara. (Auteur, 2022).

-Pour la période des basses eaux, les fortes concentrations en Sulfate se manifestent en amont de la plaine et en liaison avec la zone urbaine. Ils sont également indicateurs d'une pollution par des eaux usées. Ainsi, au Sud de la plaine se localisent les fortes concentrations qui sont liées probablement à l'existence de formations gypseuses (marnes à gypses, calcaires parfois à conglomérats,..).

- Pour la période des hautes, les sulfates offrent un scénario différent de celui des campagnes de la période des basses eaux. Les fortes concentrations en Sulfates sont localisées dans le secteur Nord-Ouest et Sud de la plaine. Elles sont liées également à l'existence de formations gypseuses.

- La comparaison entre les valeurs des deux périodes montre que celles de la période des basses eaux sont très fortes par rapport à celles des hautes eaux. Ceci peut être expliqué par la tendance à une pollution par les eaux usées, fortement concentrées pendant la période estivale, ainsi l'augmentation de l'évapotranspiration en cette période d'été, ce qui augmente la concentration des sels dissous dans l'eau, notamment les Sulfates, dont la teneur peut avoir une grande variation entre les périodes de hautes et de basses eaux.

8.2.6 -Les Bicarbonates (HCO_3^-) :

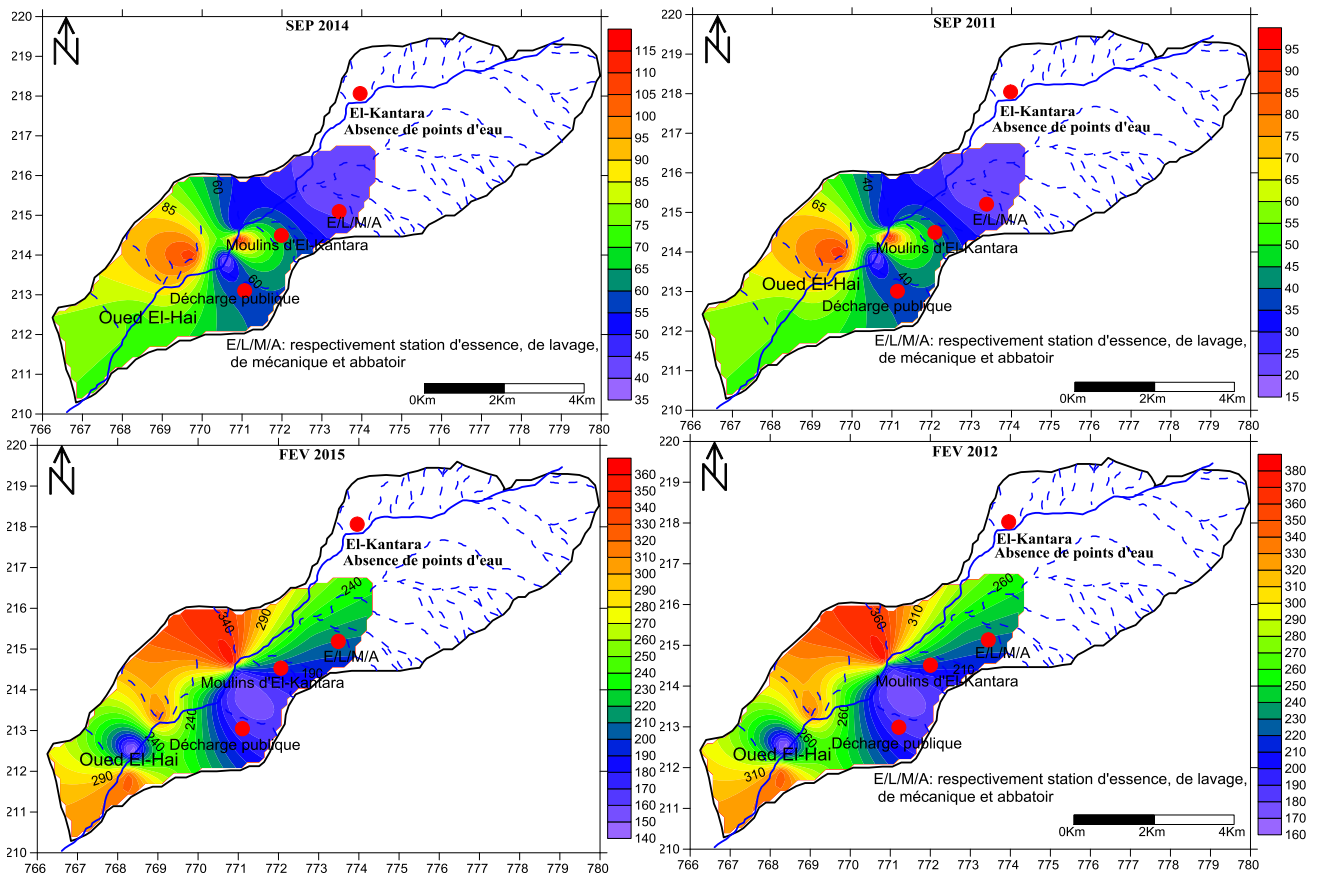


Fig.VI.46 : Cartes des Bicarbonates des eaux de la plaine d'El-Kantara. (Auteur, 2022).

La concentration des bicarbonates dans l'eau est fonction de la Température de l'eau, de la teneur du CO₂ dissous, de la concentration de l'eau en sels et à la nature lithologique des terrains traversés.

Les cartes de la répartition des teneurs en Bicarbonates des eaux de la zone d'étude montrent les constatations suivantes (**FIG .VI.46**):

-Durant la période d'étude, les concentrations les plus fortes en Bicarbonates sont localisées dans la partie Nord-ouest et Sud-ouest et coïncident à la dissolution des terrains carbonatés traversés du Miocène et de l'Eocène.

-La comparaison entre les valeurs des deux périodes montre que celles de la période des basses eaux sont très faibles par rapport à celles des hautes eaux. Ceci peut être expliqué par le phénomène de la dissolution des carbonates et l'augmentation de la concentration de l'eau en sels dissous pendant la période pluvieuse.

8.3- Cartographie des éléments indicateurs de pollution agricole (Substances eutrophisantes):

8.3.1- Cartographie des éléments principal du cycle de l'azote : Le cycle de l'azote dans les sols est marqué par différents processus dont les effets cumulés conduisent ou non à maintenir un excès d'azote dans les sols, et à le rendre disponible pour le lessivage (**FIG .VI.47**). L'azote dans les sols provient principalement de la fixation de l'azote atmosphérique, du dépôt de l'azote contenu dans les précipitations, d'amendements organiques et des apports d'engrais de synthèse. La fixation libre par des bactéries aérobies ou anaérobies contribue à maintenir un stock d'azote de 10 à 30 kg.ha⁻¹, l'apport d'azote par la fixation symbiotique des espèces légumineuses variant entre quelques dizaines à plusieurs centaines de kg.ha⁻¹, selon les conditions de PH, d'humidité et de teneurs en nitrates (Recous et al., 1990). Les apports d'azote sous forme organique dans les sols se font par amendements anthropiques (fumier, etc...), restitution au sol des résidus de culture et/ou restitution des déjections animales. La constitution du stock d'azote minéral dans le sol est issue des apports d'engrais de synthèse, sous forme d'ammonium, de nitrates et d'urée.

L'effet des processus internes au cycle de l'azote peut être dominant par rapport aux modifications induites par les processus externes (Webb et Walling, 1985). Les processus internes interagissent avec les processus externes au cycle de l'azote, contrôlant le stock et les formes de l'azote contenu dans le sol, quelle que soit l'origine de ce dernier (**FIG .VI.48**).

La minéralisation ou ammonification correspond à la dégradation de la matière organique, conduisant à la production d'ammonium (NH_4^+). La minéralisation est d'autant plus forte que les apports sont importants, elle est maximale au printemps et à l'automne lorsque les températures sont douces et le sol humide.

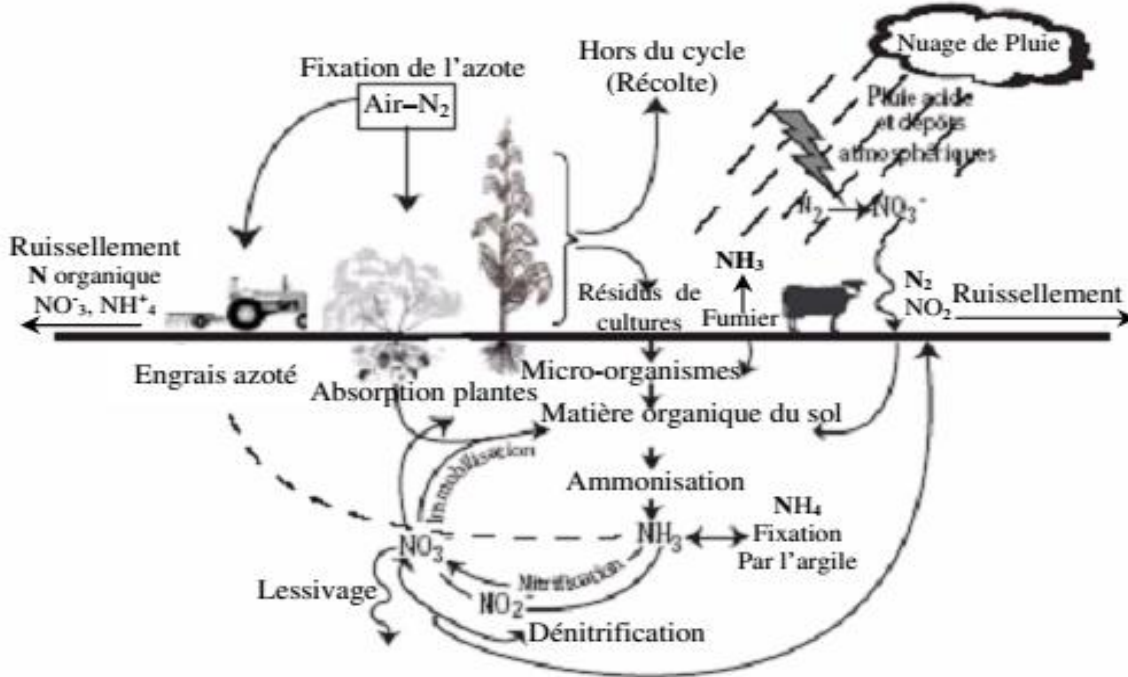


Fig.VI.47 : Le cycle de l'azote dans le sol Recous et al (1997) (In Rouabhia,2006)

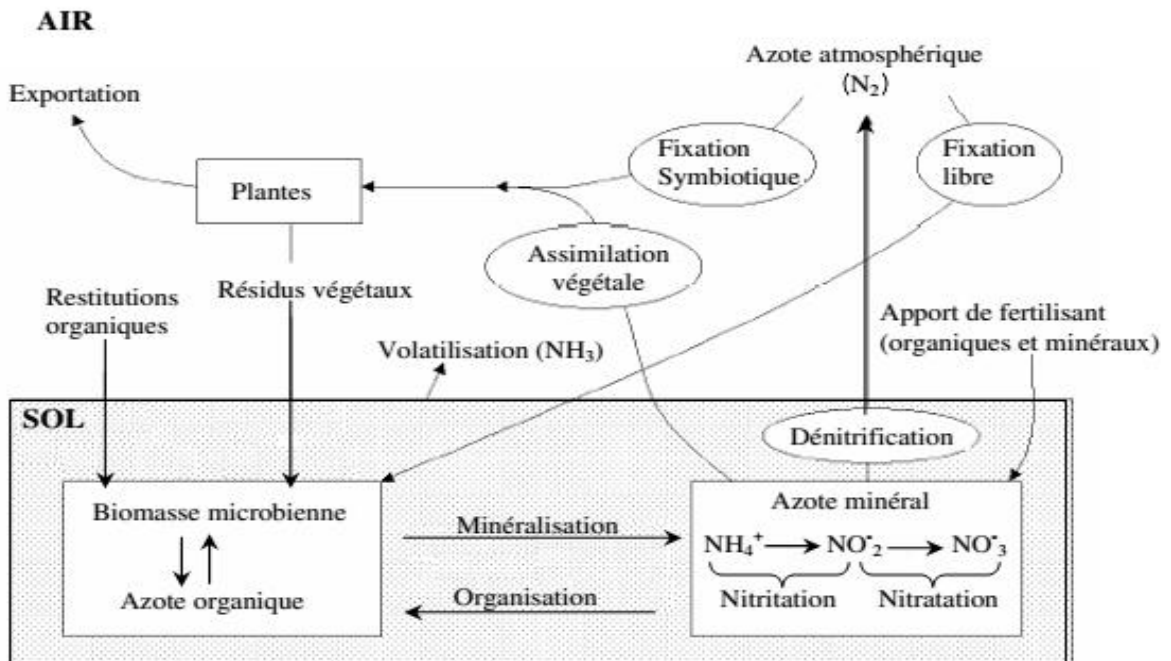


Fig.VI.48 : Le cycle de l'azote dans le sol selon Recous et al (1997) (In Rouabhia,2006)

Le cycle de l'azote dans le sol est très complexe, il est représenté sous forme simplifiée dans la figure (FIG .VI.49) :

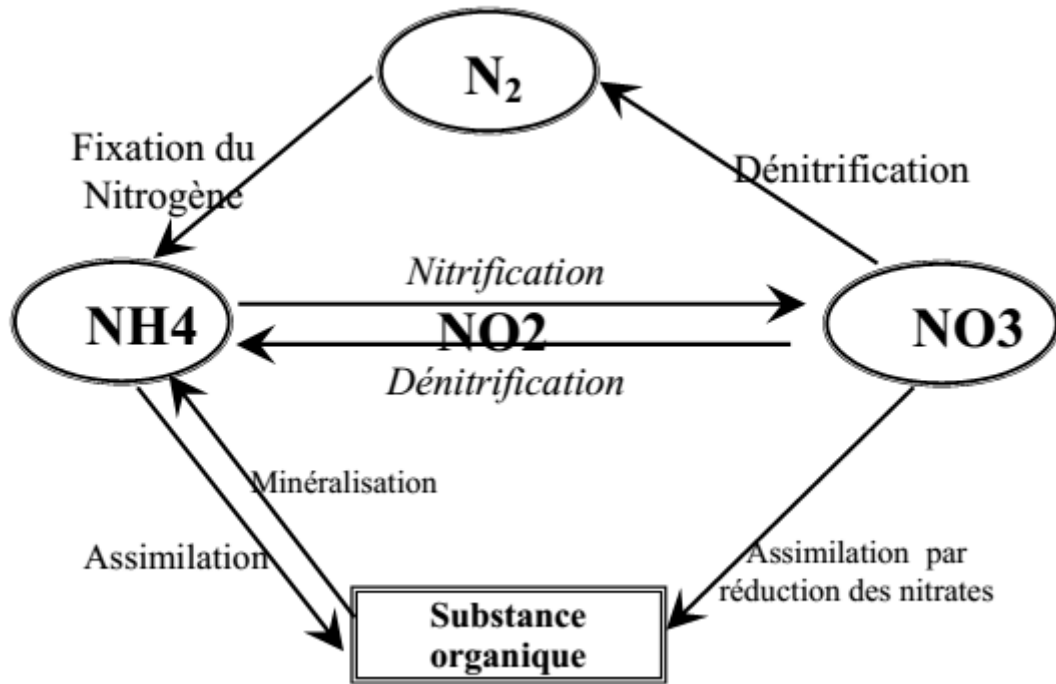
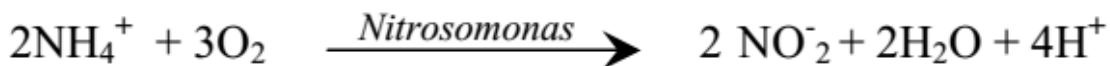
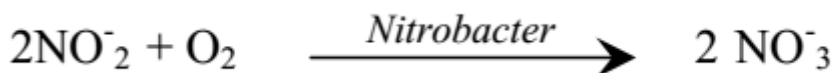


Fig.VI.49 : Le cycle de l'azote dans le sol (Hill, 1991)

La nitrification, est un processus qui se fait en deux étapes où le NH_4^+ se convertit premièrement en NO_2^- et après en NO_3^- . L'oxydation biologique du NH_4^+ et du NO_2^- est représentée par les deux réactions suivantes (Tisdale et al, 1993).



Dans la seconde réaction, les nitrites seront oxydés pour donner des nitrates :



8.3.1.1-Les Nitrates (NO_3^-):

Les Nitrates (NO_3^-) constituent le stade final d'oxydation de l'azote organique. Les Nitrates sont abondamment répandus dans le sol, dans la plupart des eaux et des plantes où ils sont nécessaires à la synthèse des végétaux. Soluble dans l'eau, ils se retrouvent naturellement en faible concentration dans les eaux souterraines et les eaux de surface. Sans apport artificiel, les eaux ne contiennent pas plus de 10 mg/l de Nitrates.

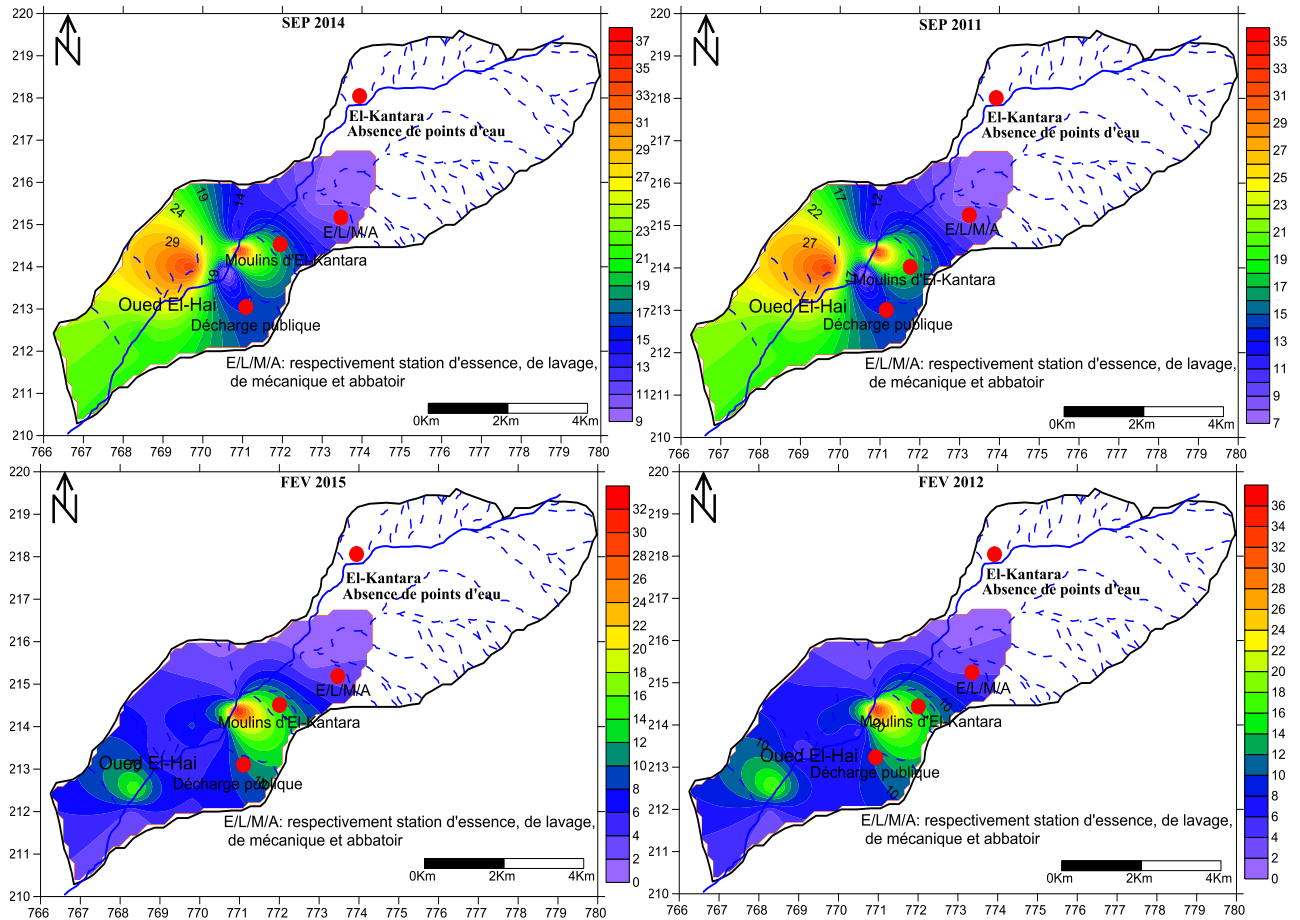


Fig.VI.50: Cartes des Nitrates des eaux de la plaine d'El-Kantara. (Auteur, 2022).

Au cours des campagnes d'étude, les teneurs enregistrées dans la région en Nitrates paraissent acceptables et ne dépassent pas les normes de potabilité de l'OMS fixée à (40 mg/l) et celles Algérienne qui sont fixées à (50 mg/l). La présence des Nitrates dans les eaux de la plaine est globalement sans danger selon les normes mais elle est inquiétante dans quelques endroits où la teneur est à la limite de 40 mg/l (**FIG .VI.50**).

-Pour la période des basses eaux, les fortes concentrations en Nitrates se manifestent principalement dans le secteur Nord-ouest et Sud de la plaine qui sont liées à l'utilisation des engrais dans ces vergétées.

- Pour la période des hautes, les Nitrates présentent un scénario différent de celui des campagnes de la période des basses eaux. Les fortes concentrations en Nitrates sont localisées dans un secteur très restreint, plus précisément au Sud-est de la plaine qui coïncide à l'endroit des Moulins d'El-Kantara.

-L'augmentation de la concentration des Nitrates durant la période des basses eaux coïncide avec l'utilisation des engrais dans les vergétés et les oasis pendant la saison des cultures. La

teneur de cet élément a été chuté pendant la période des hautes suite à sa consommation par les plantes pendant la saison agricole.

8.3.1.2- Les Nitrites (NO_2^-):

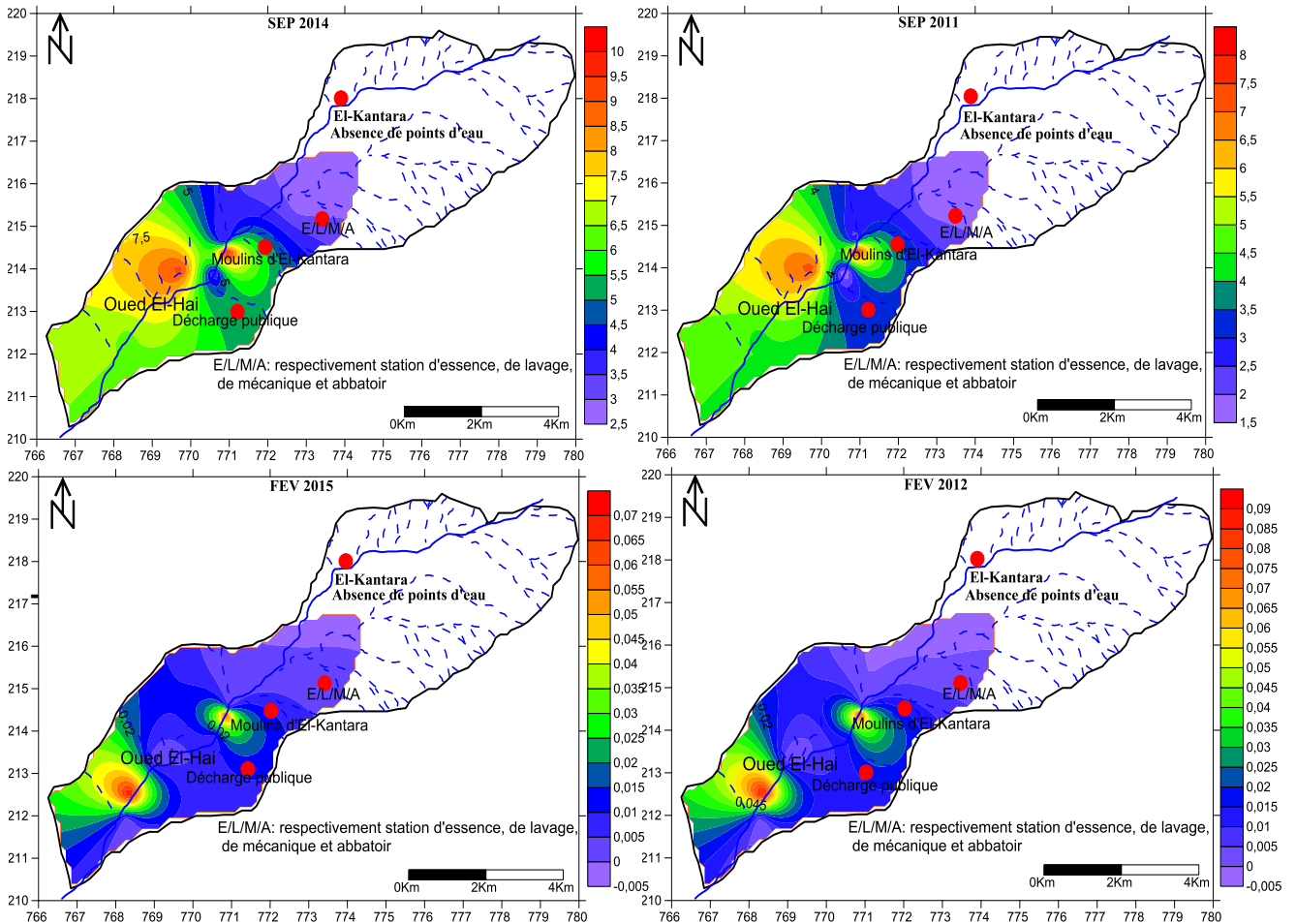


Fig.VI.51: Cartes des Nitrites des eaux de la plaine d'El-Kantara. (Auteur, 2022).

L'allure des cartes de la répartition des teneurs en Nitrites des eaux de la zone d'étude (**FIG .VI.51**) est semblable à celui en Nitrates. Il montre les constatations suivantes :

-Pour la période des basses eaux, les fortes concentrations en Nitrites se manifestent principalement dans le secteur Nord-ouest et Sud de la plaine. Au cours de cette période, les teneurs enregistrées dans la région d'étude en Nitrites paraissent acceptables et ne dépassent pas les normes de potabilité de l'OMS fixée à (0.1 mg/l) et celles Algériennes qui sont fixées à (0.2 mg/l).

- Pour la période des hautes eaux, les Nitrites présentent un scénario différent de celui des campagnes de la période des basses eaux. Les fortes concentrations en Nitrites sont localisées dans un secteur très restreint, plus précisément au Sud-est de la plaine qui coïncide à l'endroit des Moulins d'El-Kantara. Au cours de cette période, les teneurs enregistrées dans la région

d'étude en Nitrites sont alarmantes et inquiétantes et posent un danger selon les normes avec des moyennes respectivement 4.98mg/l et 6.79 mg/l pour les campagnes SEP 2011 et SEP 2014 et qui peuvent atteindre des valeurs maximales 10.24mg/l.

-L'augmentation de la concentration des Nitrites durant la période des basses eaux est liée directement au scénario des Nitrates qui sont susceptibles d'être à l'origine de formation des Nitrites par un processus soit d'oxydation biologique des nitrates, soit par réduction des nitrates sous l'influence d'une action bactérienne (phénomène de dénitrification).

8.3.1.3-L'azote ammoniacal (NH_4^+):

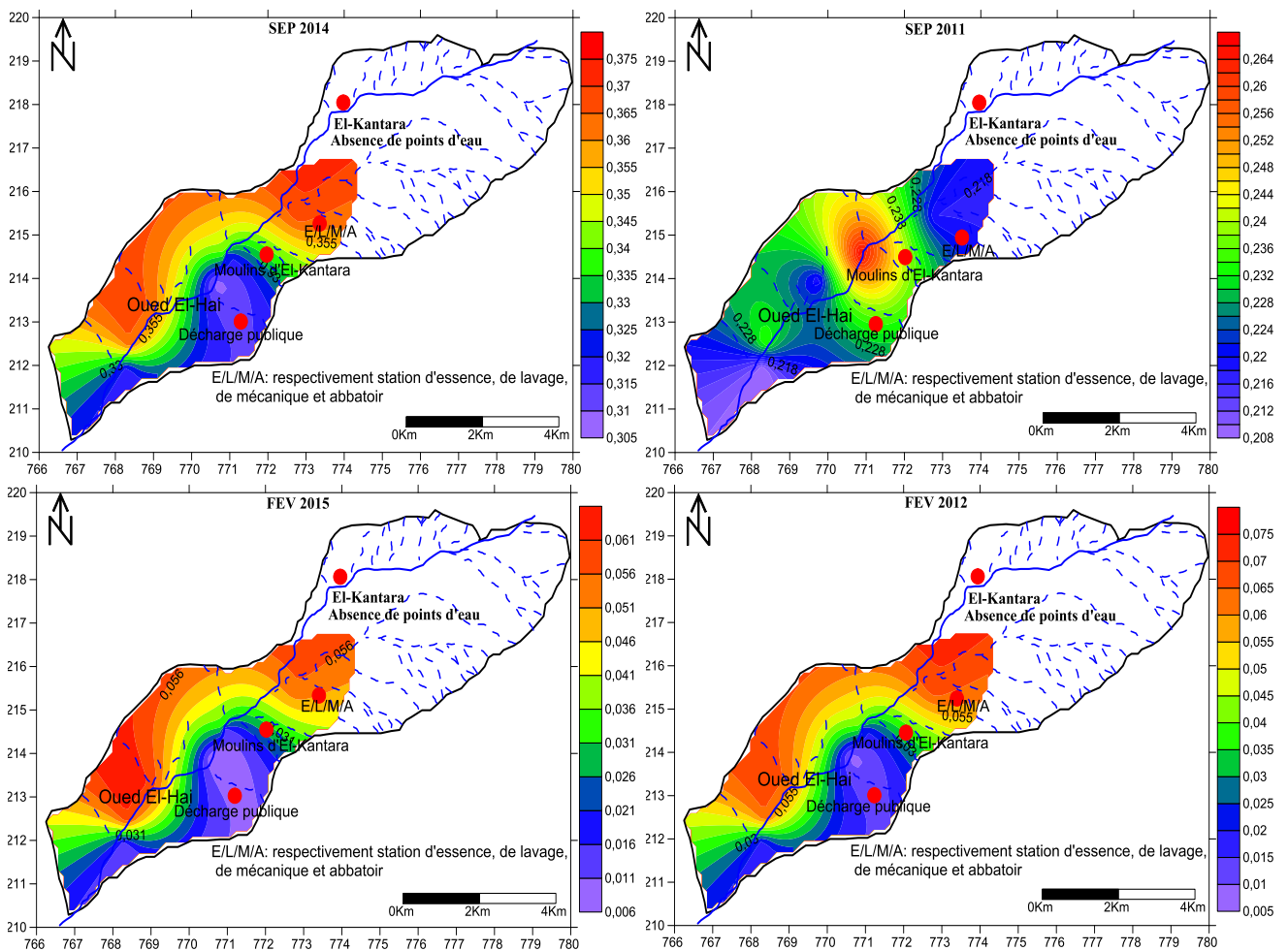


Fig.VI.52: Cartes des l'azote ammoniacal des eaux de la plaine d'El-Kantara. (Auteur, 2022).

La répartition des teneurs en Azote ammoniacal des eaux de la zone d'étude est différente à celle en Nitrates et Nitrite (**FIG .VI.52**). Elle montre les constatations suivantes :

-Pour la période des basses eaux, les teneurs enregistrées dans la région d'étude en Azote ammoniacal paraissent alarmantes et inquiétantes et posent un danger selon les normes de potabilité de l'OMS fixée à (0.1 mg/l) et celles Algérienne qui sont fixées à (0.2 mg/l).

- Pour la période des hautes eaux, les teneurs enregistrées dans la région d'étude en Azote ammoniacal paraient acceptables et ne dépassent pas les normes.

-L'augmentation de la concentration en Azote ammoniacal durant la période des basses eaux est probablement liée directement au scénario des Nitrates et au processus de dégradation incomplet de la matière organique. Les faibles teneurs en éléments azotés et les variations des concentrations en Nitrates dans les eaux de la plaine qui atteindront dans quelques endroits la limite de 40 mg/l témoignent la faible activité agricole et de la présence d'une pollution d'origine urbaine (les rejets urbains et le lessivage de la décharge publique).

8.3.2-Les Phosphates (Orthophosphates) (PO_4^{2-}) :

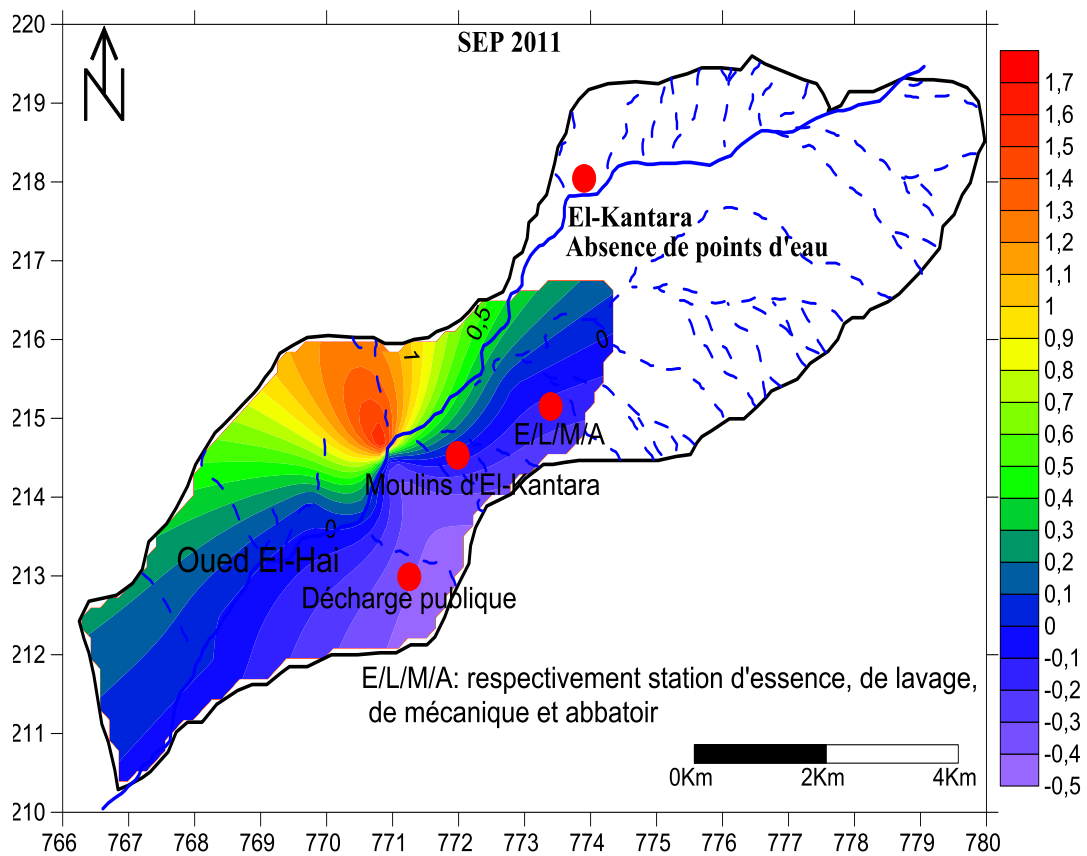


Fig.VI.53: Carte des Phosphates (Orthophosphates) des eaux de la plaine d'El-Kantara. (Auteur, 2022).

Une seule campagne qui était le sujet d'une analyse des Phosphates en Septembre 2011 montre que les concentrations sont très faibles et ne dépassent pas les normes de potabilité de l'OMS fixée à (0.5 mg/l) à l'exception du point (1) qui dépasse la norme et qui est en liaison avec les rejets de la zone urbaine (FIG .VI.53).

8.3.3-Le Phosphore total (P):

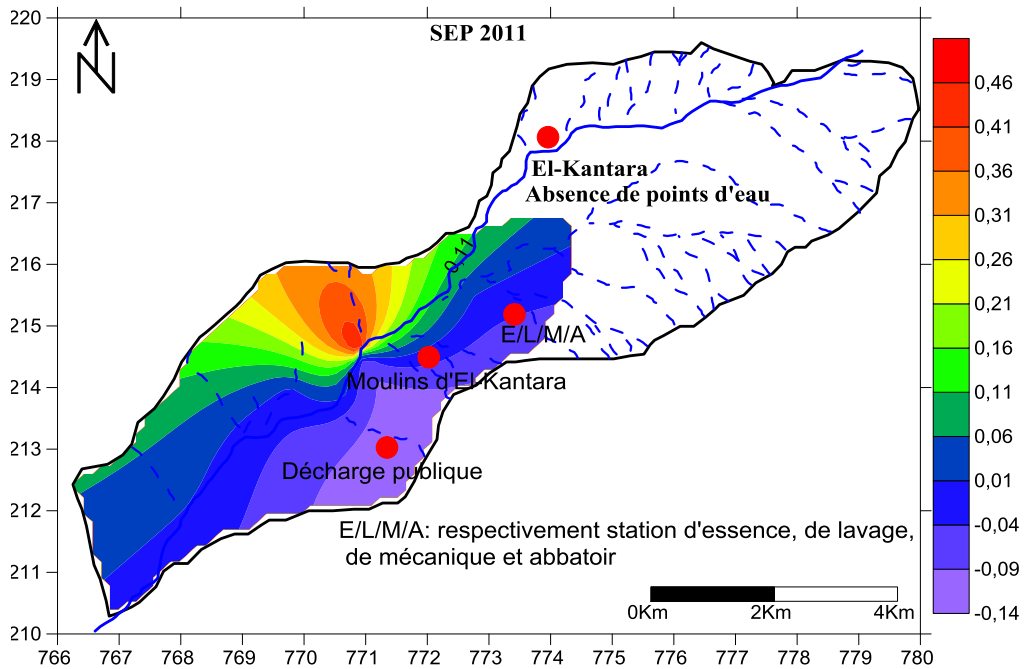


Fig.VI.54: Carte du Phosphore total des eaux de la plaine d'El-Kantara. (Auteur, 2022).

Comme les Phosphates, les teneurs enregistrées dans la région d'étude en Phosphore total durant la seule campagne de SEP 2011 paraissent très acceptables et ne dépassent pas les normes de potabilité de l'OMS fixée à (1 mg/l) et celles de l'Algérie. Les plus fortes valeurs coïncident avec la partie NE du terrain notamment en liaison avec les rejets de la zone urbaine par contre dans la partie SW on rencontre les plus faibles valeurs (**FIG .VI.54**).

8.4- Cartographie des éléments indicateurs de pollution anthropique:

8.4.1- La demande biochimique en oxygène en cinq jours (DBO₅):

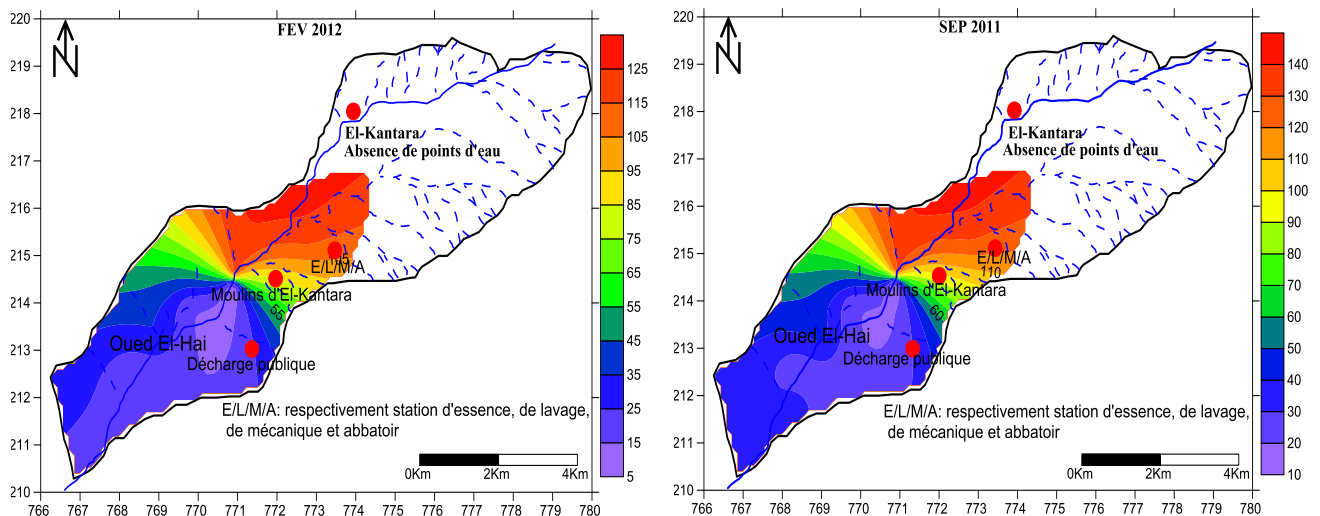


Fig.VI.55: Cartes de la demande biochimique en oxygène en cinq jours des eaux de la plaine d'El-Kantara.

(Auteur, 2022).

L'examen des cartes de la répartition des teneurs en DBO₅ des eaux de la zone d'étude (**FIG .VI.55**) montre que :

- Pendant la période (SEP 2011 et FEV 2012) on remarque que les concentrations en DBO₅ sont comprises entre un minimum de 7 mg/l enregistré au point d'eau (4) durant la période des hautes eaux (FEV 2012) et un maximum de 134 mg/l enregistré aux points d'eau (1 et 2) durant la période des basses eaux (SEP 2011).
- Les plus fortes valeurs coïncident avec la partie NE du terrain notamment en liaison avec les rejets de la zone urbaine par contre dans la partie SW on rencontre les plus faibles valeurs.
- La totalité des concentrations en DBO₅ sont supérieures aux normes de potabilité OMS et Algériennes. La comparaison entre les valeurs en DBO₅ des deux campagnes notamment selon la direction NE -SW montre que celles de la période Février 2012 sont très faibles à celles de la période de Septembre 2011 suite au phénomène de dilution.

8.4.2-La demande chimique en oxygène (DCO) :

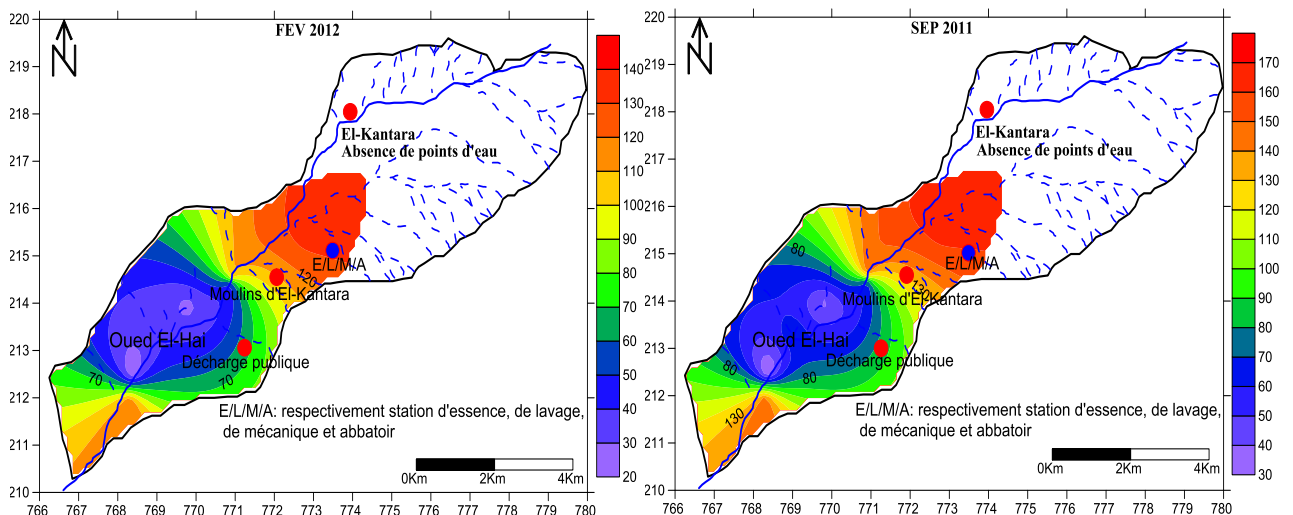


Fig. VI.56: Cartes de la demande chimique en oxygène des eaux de la plaine d'El-Kantara. (Auteur, 2022).

La répartition des teneurs en DCO des eaux de la zone d'étude (**FIG .VI.56**) est semblable à celle en DBO₅. Elle montre les constatations suivantes :

- En accord avec la variation de la DBO₅ et Pendant la période (SEP 2011 et FEV 2012) ,on remarque que les concentrations en DCO sont comprises entre un minimum de 22 mg/l enregistré au point d'eau (9) durant la période des hautes eaux (FEV 2012) et un maximum de 165 mg/l enregistré aux points d'eau (1) durant la période des basses eaux (SEP 2011).
- Les plus fortes valeurs coïncident avec la partie NE du terrain notamment en liaison avec les rejets de la zone urbaine par contre dans la partie SW on rencontre les plus faibles valeurs.

- La totalité des concentrations en DCO sont supérieures aux normes de potabilité OMS et Algériennes. La comparaison entre les valeurs en DCO des deux campagnes notamment selon la direction NE -SW montre que celles de la période de Février 2012 sont très faibles à celles de la période de Septembre 2011 suite au phénomène de dilution.

8.4- Cartographie des éléments traces métalliques (ETM) (Les Métaux lourds):

8.4 .1- Plomb (Pb^{++}):

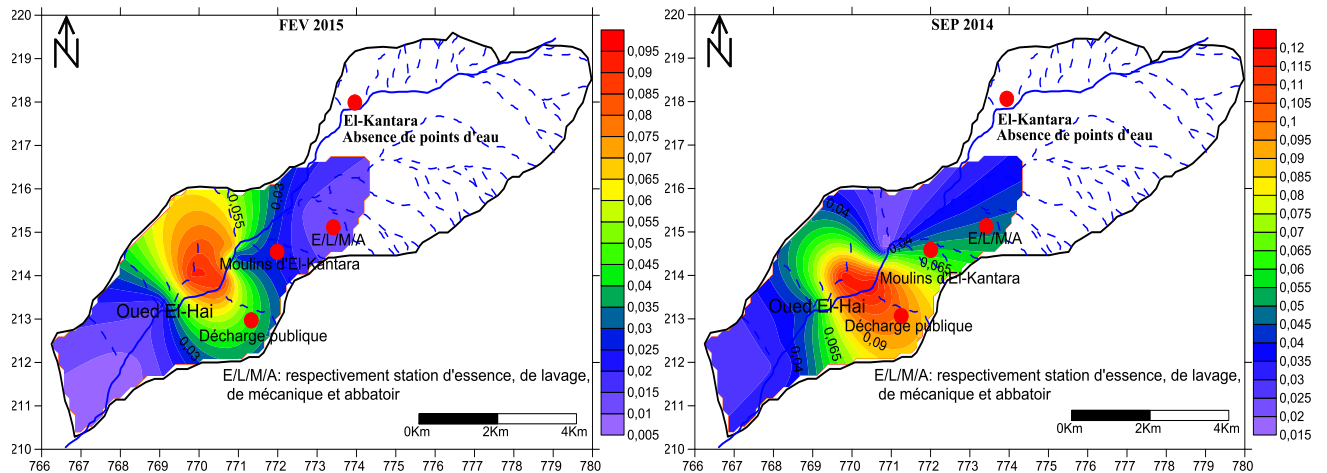


Fig.VI.57: Cartes du Plomb des eaux de la plaine d'El-Kantara. (Auteur, 2022).

Le plomb est un élément lourd, métallique, dense, de mauvaise conductivité électrique. Il peut être présent sous forme de Carbonates, et de Phosphates. Il est associé généralement au Zinc dans la galène. Les eaux de surface non contaminées leur teneur en plomb ne dépasse pas une dizaine de microgramme par litre.

Nous avons pu doser cet élément uniquement pendant les deux dernières campagnes Septembre 2014 et Février 2015. L'examen des cartes de la répartition des teneurs en Plomb des eaux de la zone d'étude (**FIG .VI.57**) montre que :

- Les concentrations sont comprises entre un minimum de 0.008 mg/l enregistré au point d'eau (10) durant la période des hautes eaux (FEV 2015) et un maximum de 0.122 mg/l enregistré au point d'eau (7) durant la période des basses eaux (SEP 2014).
- Les plus fortes concentrations coïncident avec la décharge publique au centre de la plaine alors que le reste du terrain est caractérisé par des valeurs plus faibles.
- La totalité des points d'eau de la plaine présentent des concentrations dépassent largement les normes de potabilité Algérienne et celles de l'OMS (0.01mg/l) à l'exception du point (10) durant la période des hautes eaux.

8.4 .2- Le Fer (Fe⁺⁺):

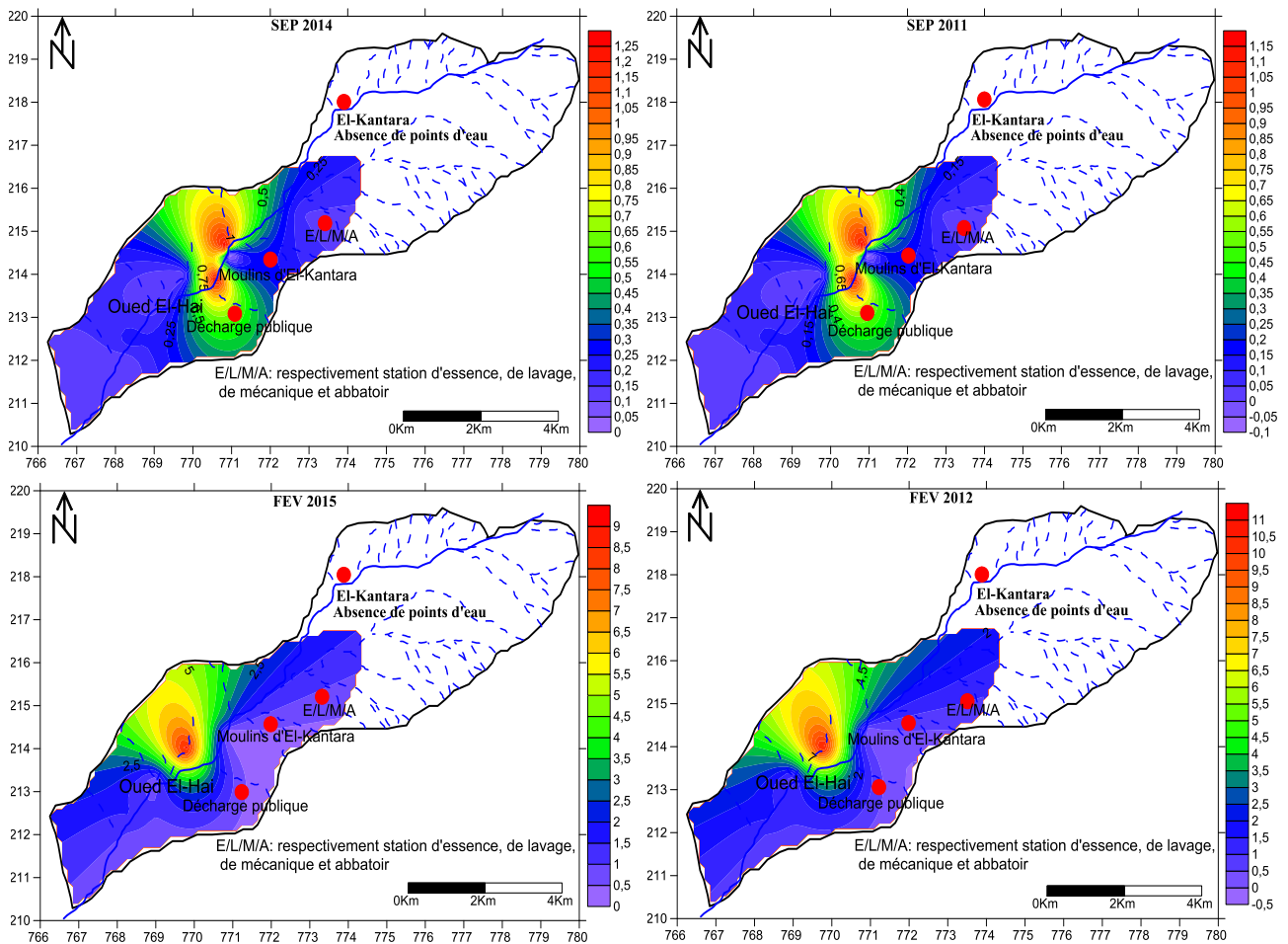


Fig.VI.58: Cartes du Fer des eaux de la plaine d'El-Kantara. (Auteur, 2022).

Le Fer est un élément lourd et toxique. Il peut avoir une origine naturelle provenant des terrains traversés (formations alluvionnaires) ou une origine industrielle. L'allure des cartes de la répartition des teneurs en Fer des eaux de la zone d'étude (**FIG .VI.58**) montre les constatations suivantes :

- Pendant la période d'étude on remarque que les concentrations sont comprises entre un minimum de 0 mg/l enregistré au point d'eau (4, 5, 7,8 et10) durant la période des basses eaux (SEP 2011) et un maximum de 11.08 mg/l enregistré au point d'eau (7) durant la période des hautes eaux (FEV 2012).
- Les plus fortes concentrations se situent dans la partie centrale du terrain et coïncident notamment avec la décharge publique et aux terrains traversés (formations alluvionnaires) , alors que le reste du terrain est caractérisé par des valeurs plus faibles.
- Durant les campagnes des hautes eaux la totalité des points d'eau de la plaine présentent des concentrations dépassent largement les normes de potabilité Algérienne fixées à (0.3 mg/l)

et celles de l'OMS (0.2 mg/l). Par contre, durant les campagnes des basses eaux plusieurs points ne dépassent pas ces normes.

-La comparaison entre les valeurs en Fer des deux campagnes selon la direction NE -SW montre que celles de la période Février 2012 sont très élevées suite à un lessivage de la décharge publique et les formations alluvionnaires.

8.4 .3-Le Cuivre (Cu⁺⁺):

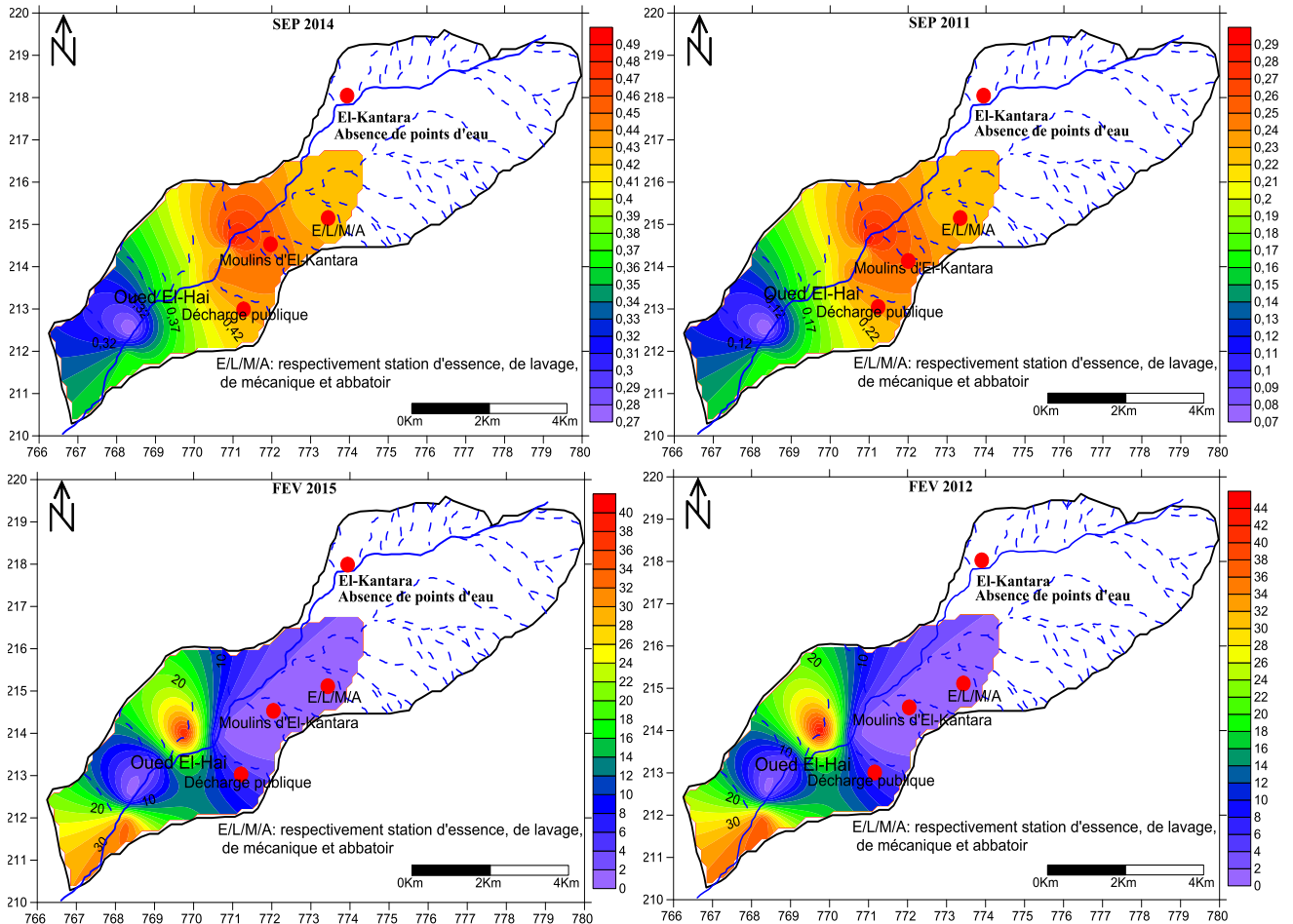


Fig.VI.59: Cartes du Cuivre des eaux de la plaine d'El-Kantara. (Auteur, 2022).

Le Cuivre est présent dans la nature sous forme de minerais de cuivre natif, de minerais oxydé ou sulfuré. Dans la région d'étude, les concentrations sont élevées dans la plupart des points de prélèvement (**FIG .VI.59**). Les résultats des analyses chimiques pendant la période d'étude montrent que les concentrations sont comprises entre un minimum de 0.061 mg/l enregistré au point d'eau (9) durant la période la période des basses eaux (SEP 2011) et un maximum de 46.50 mg/l enregistré au point d'eau (7) durant la période des hautes eaux (FEV 2012). La totalité des points d'eau de la plaine présentent des concentrations dépassent largement les normes de potabilité de l'OMS fixée à (0.05mg/l). Tandis que la majorité des points

présentent des concentrations supérieures aux normes de potabilité Algérienne fixée à (2 mg/l). La comparaison entre les valeurs en Cuivre des quatre campagnes selon la direction NE -SW montre que celles de la période Février 2012 sont très élevées suite à un lessivage de la décharge publique et les formations alluvionnaires.

8.4.4-Le Manganèse (Mn^{+2}):

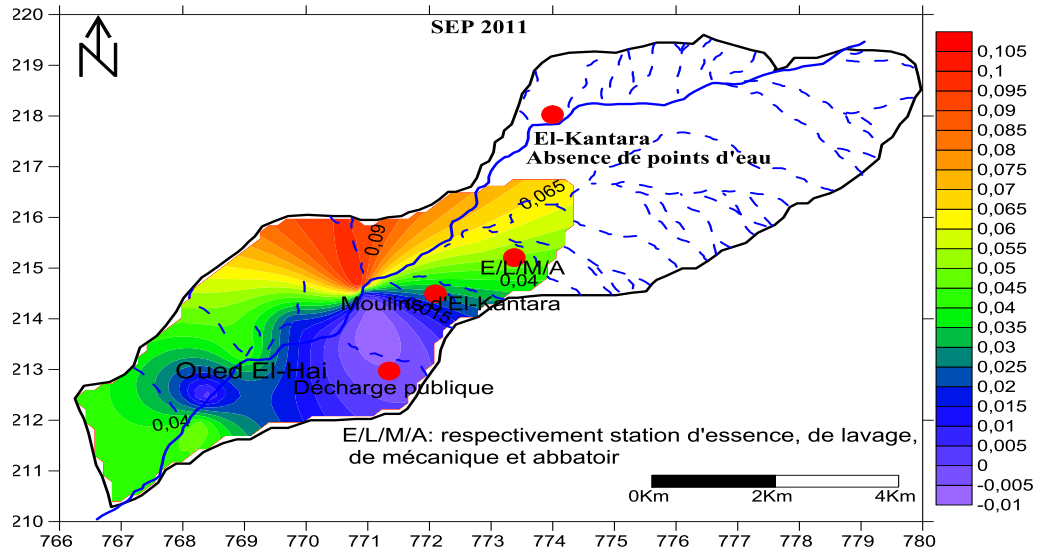


Fig.VI.60: Carte du Manganèse des eaux de la plaine d'El-Kantara. (Auteur, 2022).

Nous avons pu doser cet élément uniquement pendant la période de Septembre 2011. Les résultats des analyses chimiques montrent que les concentrations sont comprises entre un minimum de 0 mg/l enregistré aux points d'eau (5 et 9) et un maximum de 0.107 mg/l enregistré au point d'eau (2). Les concentrations les plus élevées se situent dans la partie centrale du terrain en liaison avec les eaux usées de la ville et la décharge publique (**FIG.VI.60**). La totalité des points d'eau de la plaine présentent des concentrations très acceptables et ne dépassent pas les normes de potabilité de l'OMS fixée à (0.4 mg/l) et celles Algériennes fixée à (0.5 mg/l).

8.4.5-Le Chrome (Cr) et les Chromates (CrO_4) : Nous avons pu doser deux formes (Cr^{6+} et CrO_4) pendant la période de Septembre 2011.

8.4.5.1-Le Chrome (Cr^{6+}) : Une seule campagne qui était le sujet d'une analyse du Chrome en Septembre 2011 montre que les concentrations sont très élevées et varient entre un minimum de 5.76mg /l et un maximum de 53.29 mg/l. La totalité des points d'eau de la plaine présentent des concentrations qui dépassent largement les normes de potabilité de l'OMS et celles Algériennes fixée à (0.05 mg/l). La carte obtenue montre une élévation remarquable

dans la partie NE et central du terrain notamment en liaison avec les rejets de la zone urbaine et la décharge publique (**FIG .VI.61**).

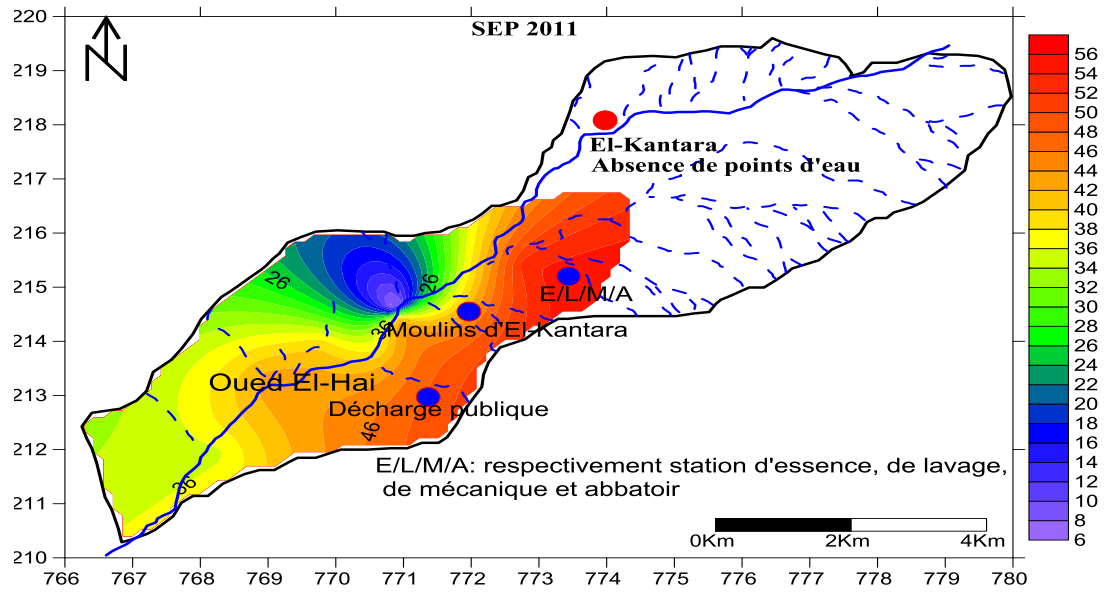


Fig.VI.61: Carte du Chrome des eaux de la plaine d'El-Kantara. (Auteur, 2022).

8.4 .5 .2-Les Chromates (CrO_4) :

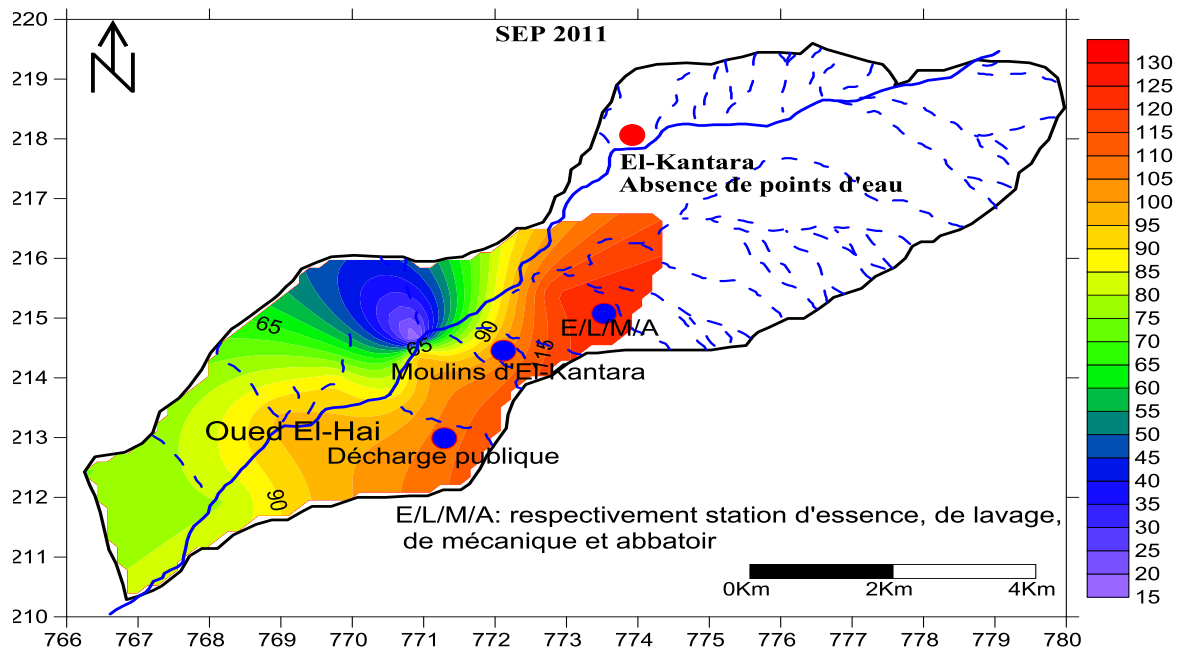


Fig.VI.62: Carte des Chromates des eaux de la plaine d'El-Kantara. (Auteur, 2022).

Comme le Chrome, les teneurs enregistrées dans la région d'étude en Chromates durant la seule campagne de SEP.2011 paraissent inquiétantes et dépassent largement les normes de potabilité de l'OMS et celles Algériennes. La carte obtenue montre une élévation remarquable dans la partie NE et centrale du terrain notamment en liaison avec les rejets de la zone urbaine et la décharge publique (**FIG .VI.62**).

8.5- Cartographie des paramètres caractérisant l'aptitude des eaux à l'irrigation :

Beaucoup de critères sont à prendre en considération si on veut caractériser l'aptitude d'une eau à être utilisée pour irriguer les cultures ; à savoir les caractéristiques physicochimiques de cette eau qui sont : La Salinité, le Sodium (proportion relative de cations Sodium (Na⁺) par rapport aux autres) et la Dureté (concentration d'anions Carbonate (CO₃²⁻) et Bicarbonate HCO₃⁻) .

8.5.1- Cartographie de la salinité totale : L'effet primordial de la salinité totale est de réduire la croissance des cultures et leur production. Elle est généralement exprimée par la minéralisation globale ou par la conductivité électrique (CE) (voir la partie de la cartographie des paramètres physiques) .

8.5.2- Cartographie de la salinité potentielle (Sp) :

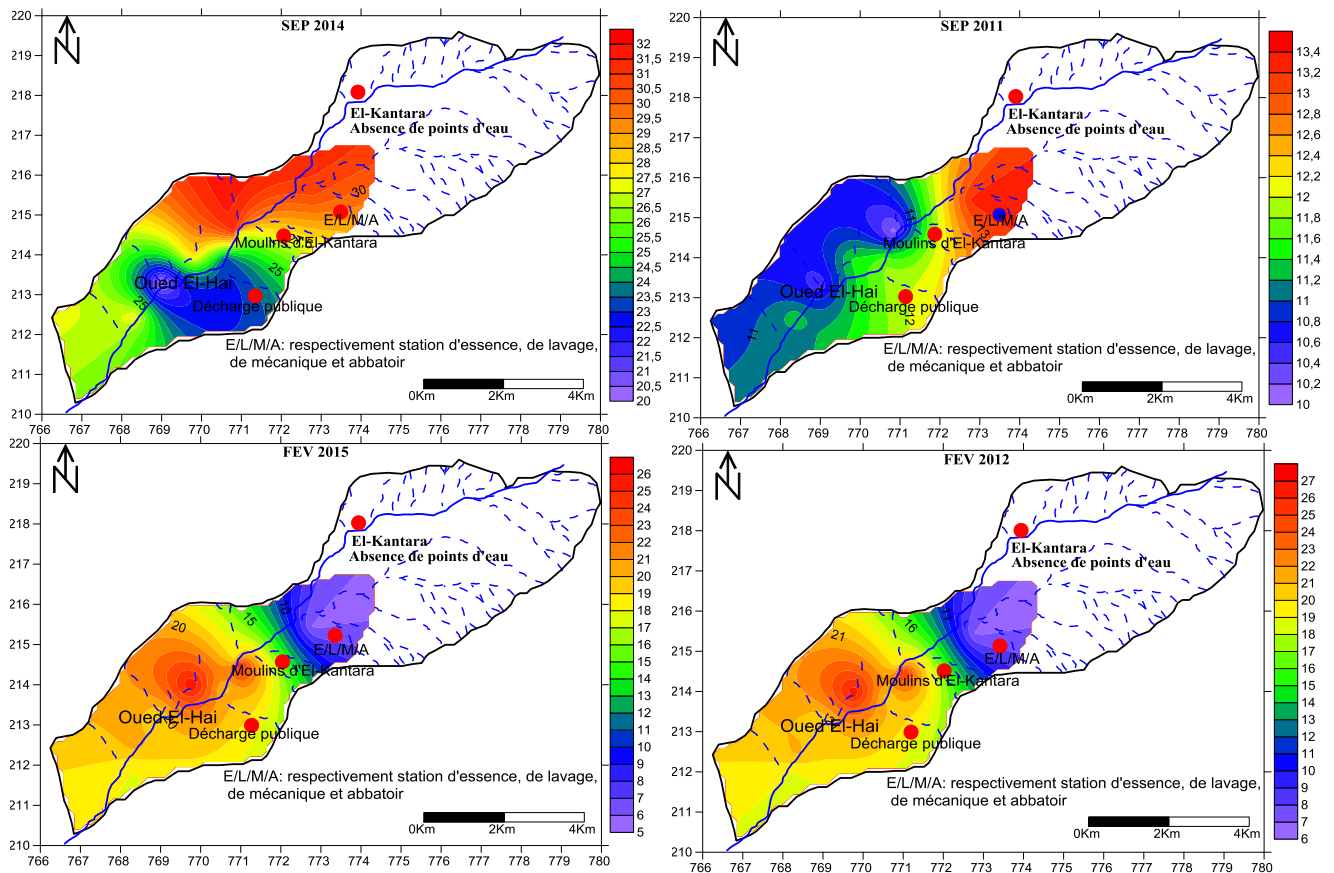


Fig.VI.63: Cartes de la Salinité Potentielle des eaux de la plaine d'El-Kantara. (Auteur, 2022).

La salinité totale du sol est constituée par tous les sels de Chlorures de Sodium et des Sulfates de magnésium, par conséquent la salinité potentielle (Sp) pourrait être estimée par (Doneen, 1961) : $SP = Cl + \frac{1}{2} SO_4^{2-}$: Tous les termes sont exprimés en méq/l .

Durant la période d’observation une dégradation de la qualité des eaux, a été remarquée par l’augmentation de la salinité potentielle (FIG .VI.63). Très remarquable au centre du terrain, au Nord-ouest et au Nord-est durant la période des basses eaux, notamment en liaison avec les rejets de la zone urbaine et la décharge publique. Durant la période des hautes eaux, les concentrations élevées de la salinité potentielle se localisent sur la totalité de la région d’étude. Cette évolution est liée essentiellement aux facteurs suivants:

- La géologie : La description lithologique a montré une hétérogénéité dans les formations (alluvions, argiles, sables, grès et les évaporites riches en Cl, Na, SO₄, et Ca) composant l’aquifère de la région d’El–Kantara qui favorise la minéralisation.
- Les facteurs climatiques : les régions semi-arides sont généralement caractérisées par l’irrégularité de la pluviométrie, ce qui ne favorise pas le phénomène de dilution. Les fortes températures qui sévissent provoquent une forte évapotranspiration et par conséquent une augmentation de la salinité qui peut expliquer la dégradation de la qualité des eaux.

8.5.3- Cartographie d’aptitude des eaux à l’irrigation selon le diagramme de Richard :

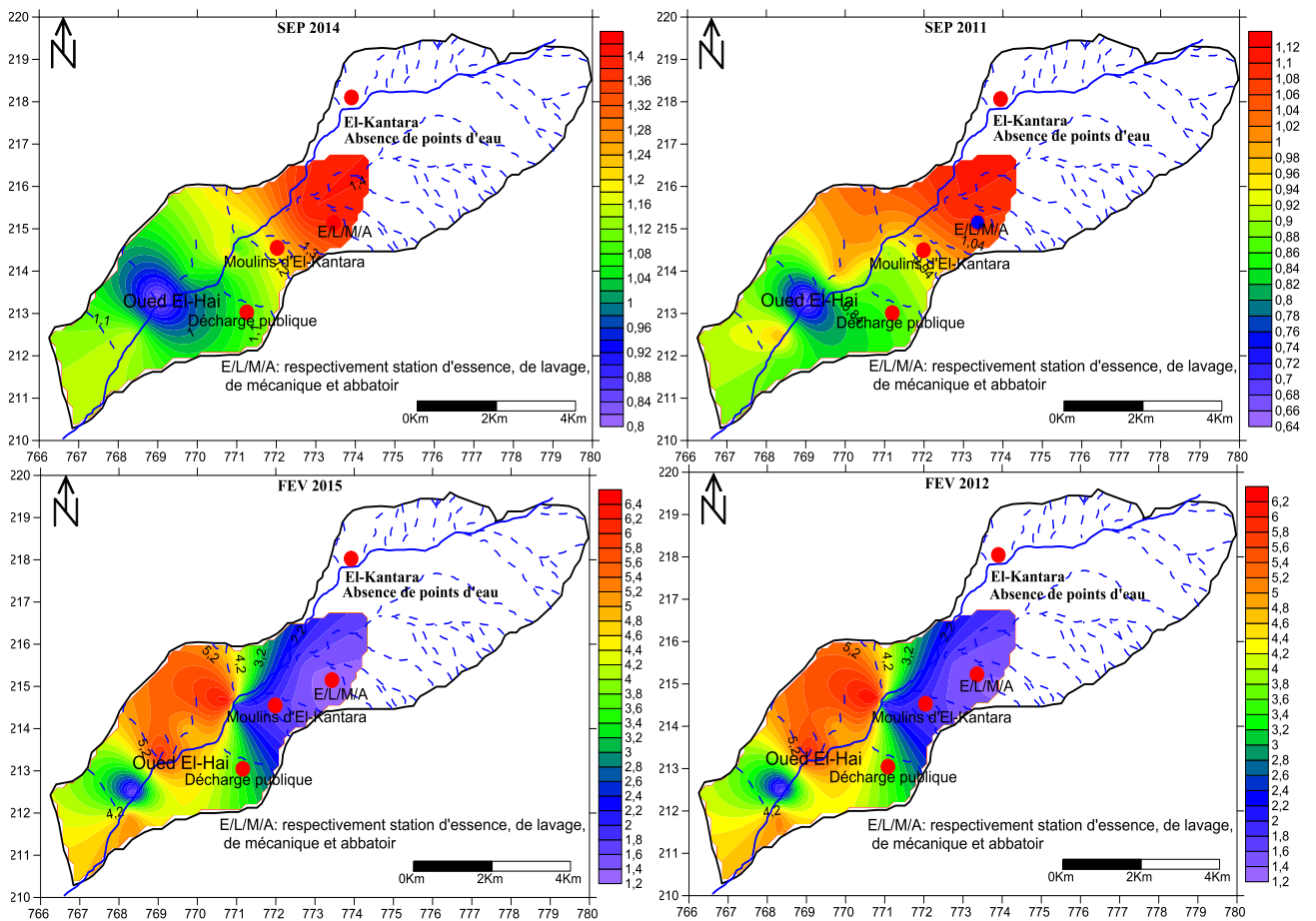


Fig.VI.64: Cartes d’aptitude à l’irrigation selon le diagramme de Richard des eaux de la plaine d’El-Kantara. (Auteur, 2022).

Pour mieux connaître l'aptitude des eaux à l'irrigation, on a calculé et cartographié la quantité de sodium adsorbé (SAR) selon la méthode de Richard (1954). Le rapport du sodium adsorbable (Sodium Absorption Ratio) (S.A.R) est exprimé par la formule suivante :

$$SAR = \frac{Na^{++}}{\sqrt{\frac{(Ca^{2+} + Mg^{2+})}{2}}}$$

L'examen des cartes tracées de la période d'étude confirment les constatations des diagrammes de Richards et permet de dire que le danger d'alcalinisation est faible avec le danger de salinité élevé pendant la période des basses eaux (SEP 2011/2014). Par contre, durant la période des hautes eaux (FEV 2012/2015) le danger d'alcalinisation est devenu moyen avec le danger de salinité élevé (FIG .VI.64).

8.5 .4- Cartographie d'aptitude des eaux à l'irrigation selon le diagramme Wilcox :

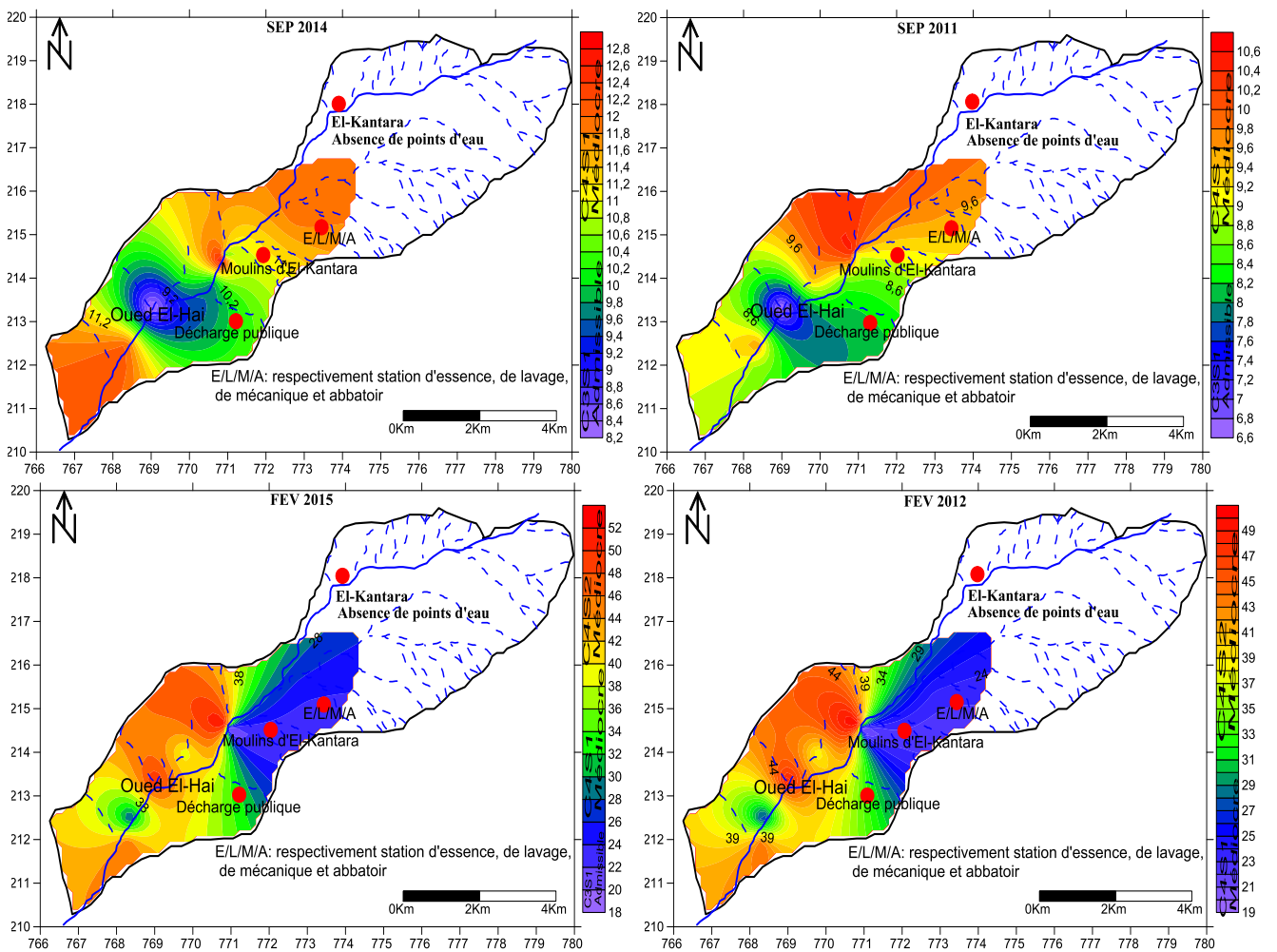


Fig.VI.65: Cartes d'aptitude à l'irrigation selon le diagramme de Wilcox des eaux de la plaine d'El-Kantara. (Auteur, 2022).

L'examen des cartes tracées de la période d'étude (**FIG .VI.65**) confirment les constatations des diagrammes de Wilcox et a fait ressortir deux catégories d'eaux : Les eaux de qualité admissible à médiocre. Les eaux de qualité médiocre sont les plus dominantes notamment durant la période des hautes eaux (FEV 2012/2015) . Elles se localisent sur la majorité du terrain de la zone d'étude.

8.6- Cartographie de potabilité des eaux selon le degré hydrométrique total (D.H.T) ou la dureté totale :

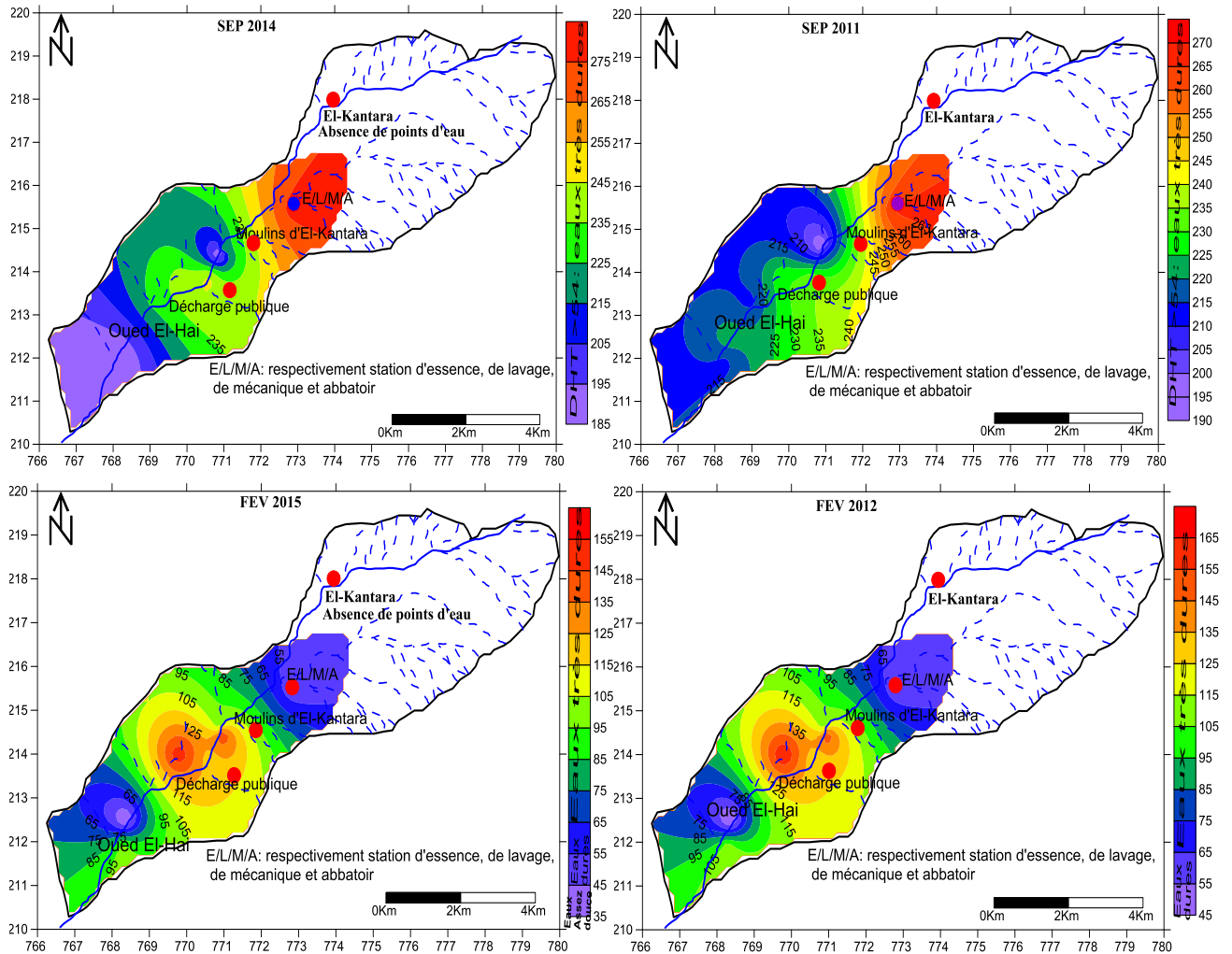


Fig.VI.66: Cartes de potabilité des eaux selon le degré hydrométrique total (D.H.T) des eaux de la plaine d'El-Kantara. (Auteur, 2022).

L'examen des cartes tracées de la période d'étude (**FIG .VI.66**) confirment les constatations de la classification des eaux en utilisant les valeurs de DHT et a fait ressortir trois catégories d'eaux : Les eaux de qualité assez douce, dures et très dures. Les eaux de qualité très dures sont les plus dominantes notamment durant la période des basses eaux (SEP 2011/2014). Elles occupent la majorité du terrain de la zone d'étude.

8.7- Cartographie et domaines de variations des rapports caractéristiques :

On appelle rapport caractéristique, le rapport de certains éléments chimiques exprimé en quantité en réaction. Ce rapport donne de précieuses indications sur l'alimentation et le sens d'écoulement. Pour ces mêmes raisons et pour pouvoir tirer le maximum d'information, dans cette partie on a utilisé les données des 04 campagnes chimiques (septembre 2011/2014 et Février 2012/ 2015). Pour mettre en évidence l'évolution dans le temps et dans l'espace à travers la région étudiée des différents rapports caractéristiques.

8.7.1- Cartes du rapport rCa^{2+}/rMg^{2+} :

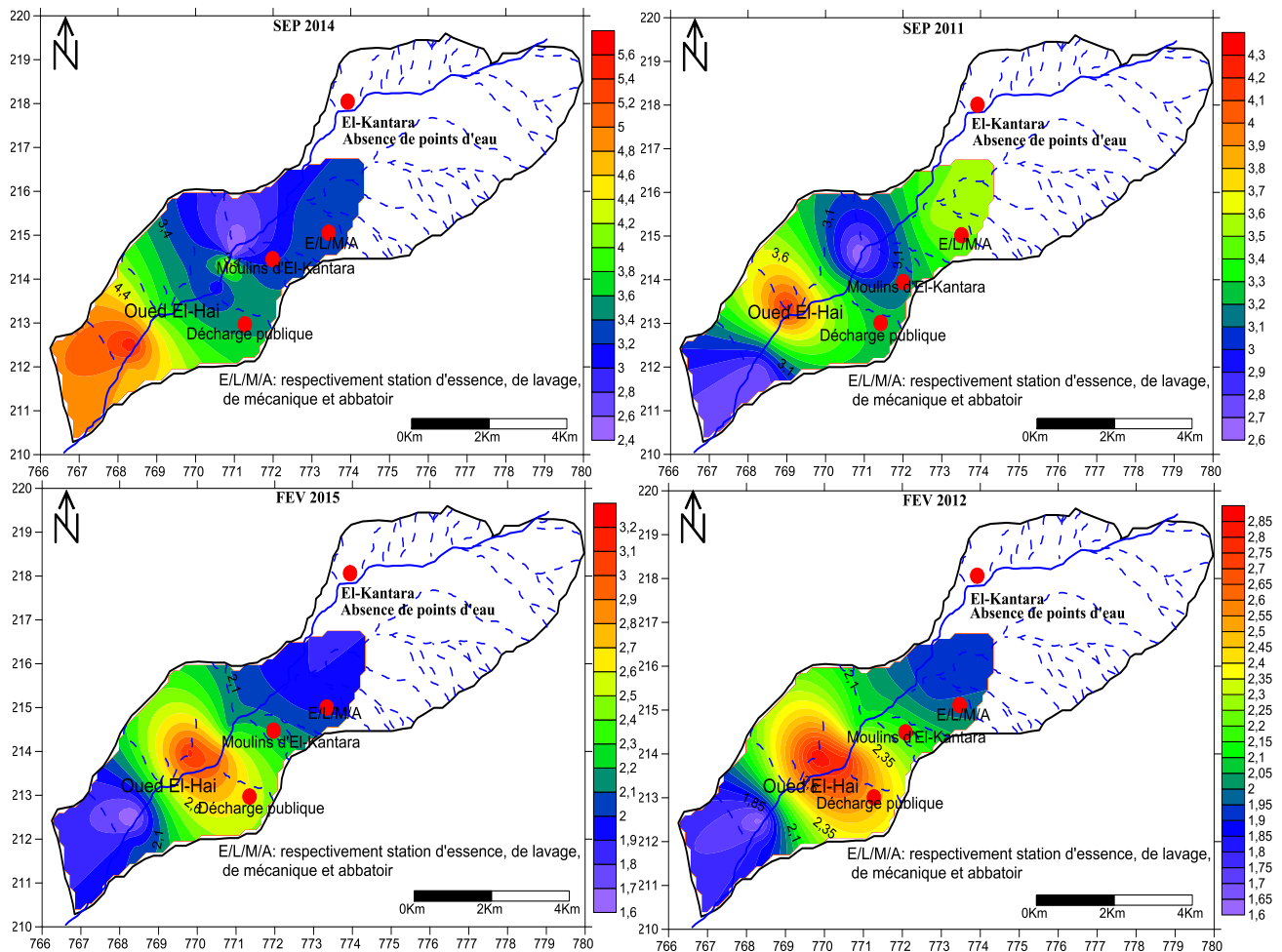


Fig.VI.67: Cartes du rapport caractéristique rCa^{2+}/rMg^{2+} des eaux de la plaine d'El-Kantara. (Auteur, 2022).

Durant toute la période d'observation, la cartographie du rapport rCa^{2+}/rMg^{2+} (FIG .VI.67) montre que les valeurs sont supérieures à l'unité signifiant une dominance de l'ion Calcium.

• Dans le temps et l'espace nous remarquons que:

-Durant la période des basses eaux, les fortes valeurs du rapport rCa^{2+}/rMg^{2+} se manifestent principalement en Amont et au centre (en Septembre 2011) et dans la partie aval

(en Septembre 2014). Par contre, pour la période des hautes eaux, les fortes valeurs du rapport rCa^{2+}/rMg^{2+} occupent la partie centrale de la zone d'étude.

-L'augmentation des valeurs du rapport rCa^{2+}/rMg^{2+} durant la période des basses eaux. A partir de ces constatations nous pouvons conclure une mise en solution des minéraux calciques, avec une vitesse de transition courte et donc un contact eau/roche court et une abondance du faciès chimique calcique.

8.7.2- Cartes du rapport rSO_4^{2-}/rCl^- :

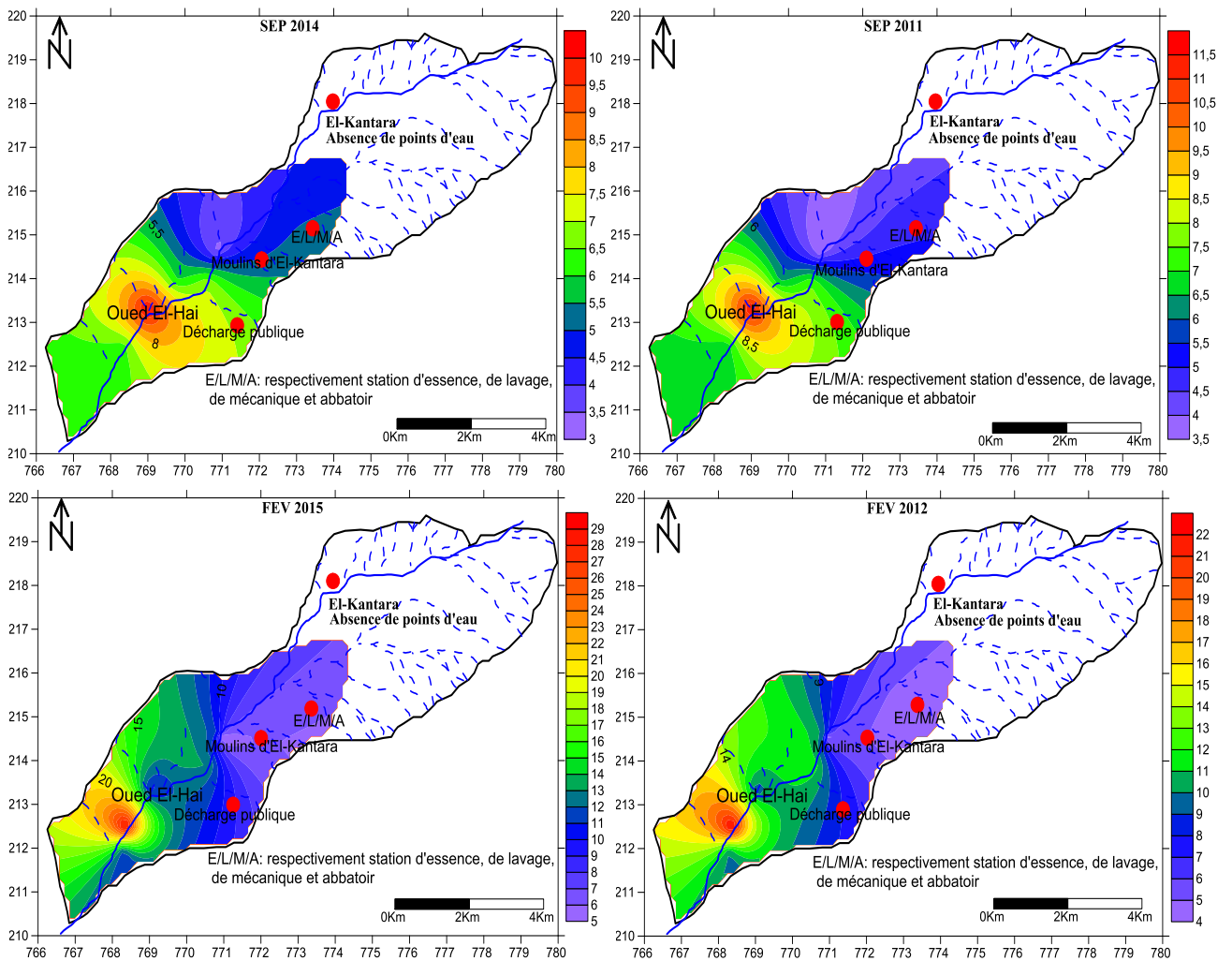


Fig.VI.68: Cartes du rapport caractéristique rSO_4^{2-}/rCl^- des eaux de la plaine d'El-Kantara. (Auteur, 2022).

La cartographie du rapport rSO_4^{2-}/rCl^- montre (FIG .VI.68) que les valeurs sont largement supérieures à l'unité notamment en période des hautes eaux, traduisant une dominance totale des Sulfates. Les plus fortes valeurs du rapport rSO_4^{2-}/rCl^- occupent la partie centrale et aval de la région d'étude.

8.7.3-Répartition spatiale des faciès chimiques: L'étude de la répartition spatiale des faciès n'est qu'en réalité que l'étude de la répartition des paramètres chimiques caractérisant ces faciès sur toute la plaine. Les paramètres dominants des eaux d'El-Kantara sont les Sulfates, les Chlorures, le Calcium et le Sodium.

Un autre moyen pour mieux apprécier l'origine des faciès caractéristiques des eaux de la région est l'étude des deux rapports caractéristiques suivants: rCa^{2+}/rMg^{2+} et rSO_4^{2-}/rCl^- . L'examen des cartes tracées (**FIG .VI.67**) et (**FIG .VI.68**) montre que la majorité des points présentent des rapports supérieurs à "1". Donc la prédominance des sulfates sur les chlorures pour les anions et le Calcium sur le Magnésium pour les cations.

9- Etude de l'évolution des minéraux et des éléments dissous (étude des indices de saturation (SI)): Cette étude est relative aux points d'eau échantillonnés pendant la période d'étude. Un calcul de l'indice de saturation des minéraux dissous dans l'eau dont on a fait l'analyse ; pour savoir si cette eau peut dissoudre tel minéral ou si ce minéral peut se former à partir des ions dissous dans l'eau (l'examen de la tendance des formes chimiques dans le système d'équilibre thermodynamique entre la phase dissoute et la phase minérale), qui a été mené en utilisant la loi de **DEBYE-HUCKEL** et un logiciel thermodynamique pour calculer les degrés de saturation d'une eau.

9.1- Equilibres chimiques et indices de saturation (In Fehdi, 2008):

La loi d'action de masse correspond à l'équilibre entre solution et phase solide qui est en relation avec la concentration des constituants qui sont en réaction et la concentration des produits d'une réaction chimique quelconque : $aA + bB \rightleftharpoons cC + dD$

Où a, b, c et d sont respectivement les fractions stœchiométriques des constituants chimiques A, B, C et D.

Si le système est en équilibre :
$$K_{\text{éq}} = \frac{C^c * D^d}{A^a * B^b}$$

$K_{\text{éq}}$: Est la constante d'équilibre.

Si le système n'est pas en équilibre, l'expression ci dessus est dite produit d'activité ionique (PAI), dans ce cas là nous aurons les cas suivants :

- Si $PAI / K_{\text{éq}} > 1$, la réaction va vers la gauche.

- Si $PAI / K_{\text{éq}} < 1$, la réaction va vers la droite.

- Si $PAI = K_{eq}$, la réaction est en équilibre.

9.1.1- Théorie de DEBYE-HÜCKEL : La théorie de Debye-Hückel est un modèle qui tient compte du coefficient d'activité (γ). En général, le coefficient d'activité est proche de l'unité dans les solutions diluées et peut être supérieur à 1 dans les solutions concentrées, Comme référence le coefficient d'activité du CO₂ dissous dans l'eau de mer est de l'ordre de 1.12 selon Plummer et Mackenzie (1974) (In Fehdi, 2008) . Il est donné $\log \gamma_i = -AZ_i^2 \cdot \sqrt{I}$ par la formule suivante : Où A est une constante qui dépend uniquement de la pression et de la température, Z_i est la charge ionique et I est la force ionique de la solution.

La grandeur déterminante de la solution pour fixer γ_i est la force ionique. Cette force ionique est égale à la demi-somme des produits $m_i \cdot Z_i^2$ étendue à tous les ions présents dans la solution : $I = \frac{1}{2} \sum m_i \cdot z_i^2$ (Hem, 1961) .

m_i : concentration de l'ion i (la somme signifie la contribution de tous les ions de la solution).
Sur la base des valeurs de la force ionique, plusieurs modèles et plusieurs formules ont été données par les auteurs :

-Pour des forces ioniques élevées, le modèle simple fait défaut, et la formule a été modifiée par Debye-Hückel, en tenant compte des dimensions des ions : $\log \gamma_i = \frac{-AZ_i^2 \sqrt{I}}{1 + Ba_0 \sqrt{I}}$

Où B est une constante dépendant de la pression et de la température et a_0 : théoriquement c'est le rayon hydraté de l'ion.

9.1.2- Degré de saturation d'une solution vis-à-vis d'un minéral (indice de saturation):

L'indice de saturation exprime le degré d'équilibre chimique entre l'eau et le minéral dans la matrice de l'aquifère et peut être considéré comme une mesure du processus de dissolution et/ou précipitation concernant l'interaction eau-roche (Drever, 1997).

Le degré de saturation peut être évalué à partir de l'équation suivante : **IS = log (KIAP/Ksp).**

-KIAP = le produit d'activité ionique des ions.

-Ksp = le produit de la solubilité du minéral.

-IS = l'indice de saturation.

- Si le $IS < 0$: L'eau est sous-saturée en ce qui concerne un certain minéral, c'est-à-dire l'eau est encore capable de dissoudre ce minéral spécifique.

- Si le IS > 0 : L'eau est sursaturée en ce qui concerne ce minéral. Et le minéral va précipiter à l'intérieur de l'aquifère.
- Si le IS = 0 : L'eau est en état d'équilibre.

L'objectif principal des indices de saturation est d'évaluer les activités ioniques sous les conditions de température et des forces ioniques prévues. Si on connaît la composition d'une eau, sa température et sa pression, et on cherche à savoir si cette eau est saturée, sous-saturée ou sursaturée vis-à-vis d'un minéral. Cela nécessite la connaissance du produit de solubilité (Ksp) de ce minéral, à cette pression et cette température, que l'on peut calculer en utilisant les données thermodynamiques, on doit connaître aussi les différentes réactions d'équilibre entre l'eau et les minéraux qui forment la matrice aquifère tout en calculant les constantes d'équilibres à partir des données disponibles (TAB .VI.24).

TAB .VI.24: Réactions de dissociation de quelques minéraux avec leurs constantes d'équilibres et leurs Enthalpies ΔH d'après Truesdall et Jones, 1974 (In Fehdi,2008).

| Minéral | Equilibre | log Kp | ΔH |
|------------------|---|--------|------------|
| Calcite | $\text{CaCO}_3 \longleftrightarrow \text{Ca}^{2+} + \text{CO}_3^{2-}$ | -8.41 | 0.19 |
| Dolomite | $\text{Ca Mg (CO}_3) \longleftrightarrow \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + 2\text{CO}_3^{2-}$ | -17.02 | -8.29 |
| Aragonite | $\text{CaCO}_3 \longleftrightarrow \text{Ca}^{2+} + \text{CO}_3^{2-}$ | -8.215 | -2.959 |
| Gypse | $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \longleftrightarrow \text{Ca}^{2+} + \text{SO}_4^{2-} + 2\text{H}_2\text{O}$ | -4.759 | 0.261 |
| Anhydrite | $\text{CaSO}_4 \longleftrightarrow \text{Ca}^{2+} + \text{SO}_4^{2-}$ | -4.548 | -3.769 |
| Halite | $\text{NaCl} \longleftrightarrow \text{Na}^+ + \text{Cl}^-$ | 1.582 | 0.918 |
| Brucite | $\text{Mg (OH)}_2 \longleftrightarrow \text{Mg}^{2+} + 2\text{OH}^-$ | -11.41 | 0.850 |
| Magnésite | $\text{Mg CO}_3 \longleftrightarrow \text{Mg}^{2+} + \text{CO}_3^{2-}$ | -8.24 | -8.29 |

9.1.3- Interprétation des résultats :

La simulation à l'évaporation naturelle des eaux de la nappe de l'aquifère Mio-Plio-Quaternaire d'El-Kantara a été effectuée à l'aide du logiciel diagrammes « **WATEQ** » et « **Phreeq** » (*version free*), nous a permis de calculer les indices de saturation de la Calcite , de l'Aragonite ,de la Dolomite ,du Gypse ,de l'Anhydrite ,de l'Halite, de la Rhodochrosite , de la Magnésite et la Brucite.

Les résultats significatifs de tous les échantillons d'eau souterraine analysés durant les quatre campagnes (**TAB .VI.25**), (**TAB .VI.26**) , (**TAB .VI.27**) et (**TAB .VI.28**) montrent que ces derniers sont majoritairement sous-saturés, notamment pour les minéraux évaporitiques tel que l'Halite, le Gypse , l'Anhydrite . Ils sont plutôt légèrement saturés par rapport aux minéraux carbonatés tel que la Calcite et la Dolomite.

TAB .VI.25: Indice de saturation (SI) des minéraux présents dans les eaux de la plaine d'El-Kantara (SEP 2011). (Auteur, 2022).

| N° | IS (CA) | IS (AR) | IS (DO) | IS (GY) | IS (AN) | IS (HA) | IS (MA) | IS (BR) |
|-----|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 1 | -0.67 | -0.81 | -1.55 | -0.03 | -0.25 | -6.02 | -1.46 | -5.42 |
| 2 | -0.85 | -1.00 | -1.78 | -0.17 | -0.39 | -6.01 | -1.51 | -5.48 |
| 3 | -0.25 | -0.39 | -0.61 | -0.15 | -0.37 | -6.18 | -0.94 | -5.45 |
| 4 | -0.16 | -0.30 | -0.40 | -0.12 | -0.34 | -6.14 | -0.82 | -5.46 |
| 5 | -0.27 | -0.41 | -0.61 | -0.16 | -0.38 | -6.24 | -0.92 | -5.55 |
| 6 | -0.90 | -1.05 | -1.98 | -0.08 | -0.30 | -6.36 | -1.66 | -5.44 |
| 7 | -0.13 | -0.28 | -0.47 | -0.04 | -0.26 | -6.19 | -2.14 | -5.50 |
| 8 | -0.19 | -0.34 | -0.68 | -0.08 | -0.30 | -6.74 | -1.07 | -5.56 |
| 9 | -0.38 | -0.52 | -0.91 | -0.06 | -0.28 | -6.22 | -1.12 | -5.48 |
| 10 | -0.40 | -0.54 | -0.90 | -0.11 | -0.33 | -6.30 | -1.08 | -5.45 |
| 11 | -0.53 | -0.67 | -1.18 | -0.30 | -0.52 | -6.28 | -1.24 | -5.72 |
| MAX | -0,13 | -0,28 | -0,4 | -0,03 | -0,25 | -6,01 | -0,82 | -5,42 |
| MIN | -0,9 | -1,05 | -1,98 | -0,3 | -0,52 | -6,74 | -2,14 | -5,72 |
| MOY | -0,43 | -0,57 | -1,01 | -0,12 | -0,34 | -6,24 | -1,27 | -5,50 |
| ET | 0,27 | 0,27 | 0,54 | 0,08 | 0,08 | 0,20 | 0,39 | 0,08 |

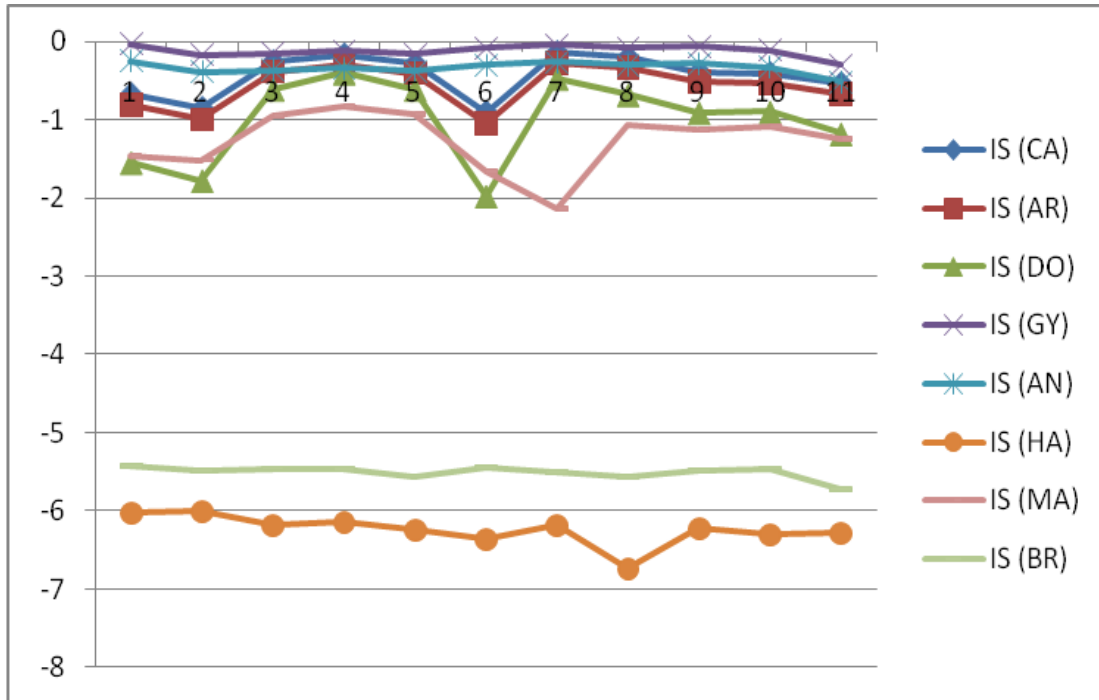


Fig.VI.69: Evolution des indices de saturation des minéraux des eaux de la plaine d’El-Kantara (SEP 2011). (Auteur, 2022).

Pour la campagne SEP 2011 : L’examen du tableau (TAB .VI.25) et du graphe (FIG .VI.69) montre que la totalité des minéraux sont sous- saturés selon les cas. L’indice de saturation étant pour l’ensemble des minéraux varie entre un minimum de -6,74 par rapport IS (HA), présentée au niveau du point d’eau 8 (proche de l’équilibre) et un maximum de -0,03 par rapport IS (GY) au niveau du point d’eau 1. A noter que la majorité des points se trouvent légèrement sous-saturés par rapport le Gypse et les minéraux Carbonaté avec des indices qui varient entre -0, 3 et -0,03 (proche de l’équilibre). Par contre la Halite et la Brucite se trouve largement sous-saturé (SI entre -6,74 et -5,42), ce qui lui donnent la possibilité de se dissoudre davantage dans les eaux et contribuant ainsi à une augmentation de la minéralisation.

Pour la campagne FEV2012 : L’examen du tableau (TAB .VI.26) et du graphe (FIG .VI.70) montre presque le même scénario que la campagne précédente et que la majorité des minéraux sont sous- saturés. La différence remarquée est que la majorité des points présentent légèrement une sursaturation par rapport la Calcite et la Dolomite avec des indices qui varient entre + 0, 01 et +0,26. A noter que quelques points de Calcite, et plus d’Aragonite se trouvent saturés (en équilibre) respectivement au niveau des points d’eaux 4 et 7.

TAB .VI.26: Indice de saturation (SI) des minéraux présents dans les eaux de la plaine d'El-Kantara (FEV 2012) (Auteur, 2022).

| N° | IS (CA) | IS (AR) | IS (DO) | IS (GY) | IS (AN) | IS (HA) | IS (MA) | IS (BR) |
|-----|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 1 | -0.16 | -0.30 | -0.26 | -0.98 | -1.20 | -6.75 | -0.69 | -5.75 |
| 2 | 0.12 | -0.02 | 0.26 | -0.44 | -0.66 | -5.82 | -0.44 | -5.69 |
| 3 | 0.01 | -0.13 | -0.55 | -0.28 | -0.50 | -6.10 | -0.60 | -5.57 |
| 4 | 0.00 | -0.14 | -0.01 | -0.27 | -0.49 | -5.77 | -0.60 | -5.58 |
| 5 | 0.09 | -0.05 | 0.22 | -0.43 | -0.65 | -5.99 | -0.46 | -5.66 |
| 6 | -0.06 | -0.21 | -0.24 | -0.31 | -0.53 | -5.94 | -0.76 | -5.70 |
| 7 | 0.15 | 0.00 | 0.17 | -0.14 | -0.36 | -5.80 | -0.56 | -5.63 |
| 8 | 0.08 | -0.06 | 0.12 | -0.41 | -0.63 | -5.81 | -0.55 | -5.73 |
| 9 | -0.82 | -0.97 | -1.53 | -0.78 | -1.00 | -6.98 | -1.29 | -6.13 |
| 10 | 0.07 | -0.07 | 0.21 | -0.46 | -0.68 | -5.93 | -0.44 | -5.64 |
| 11 | 0.14 | -0.01 | 0.26 | -0.41 | -0.63 | -5.90 | -0.46 | -5.69 |
| MAX | 0,15 | 0 | 0,26 | -0,14 | -0,36 | -5,77 | -0,44 | -5,57 |
| MIN | -0,82 | -0,97 | -1,53 | -0,98 | -1,2 | -6,98 | -1,29 | -6,13 |
| MOY | -0,03 | -0,18 | -0,12 | -0,45 | -0,67 | -6,07 | -0,62 | -5,71 |
| ET | 0,28 | 0,28 | 0,54 | 0,24 | 0,24 | 0,41 | 0,24 | 0,15 |

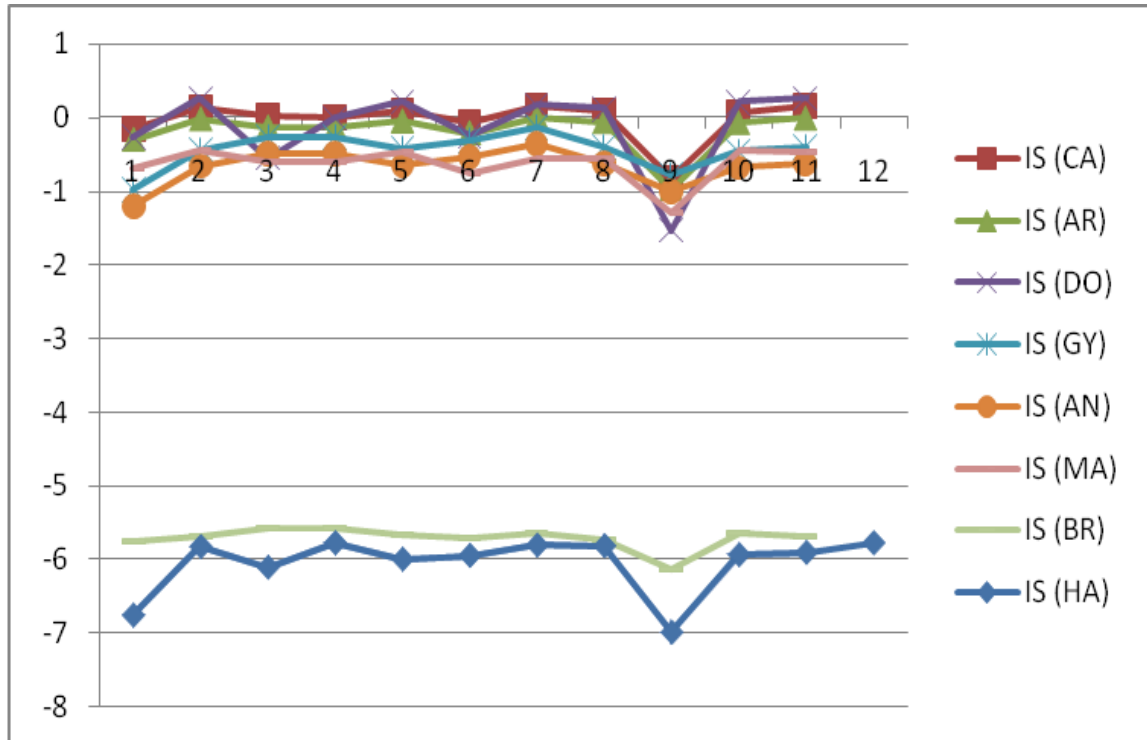


Fig.VI.70: Evolution des indices de saturation des minéraux des eaux de la plaine d’El-Kantara (FEV 2012). (Auteur, 2022).

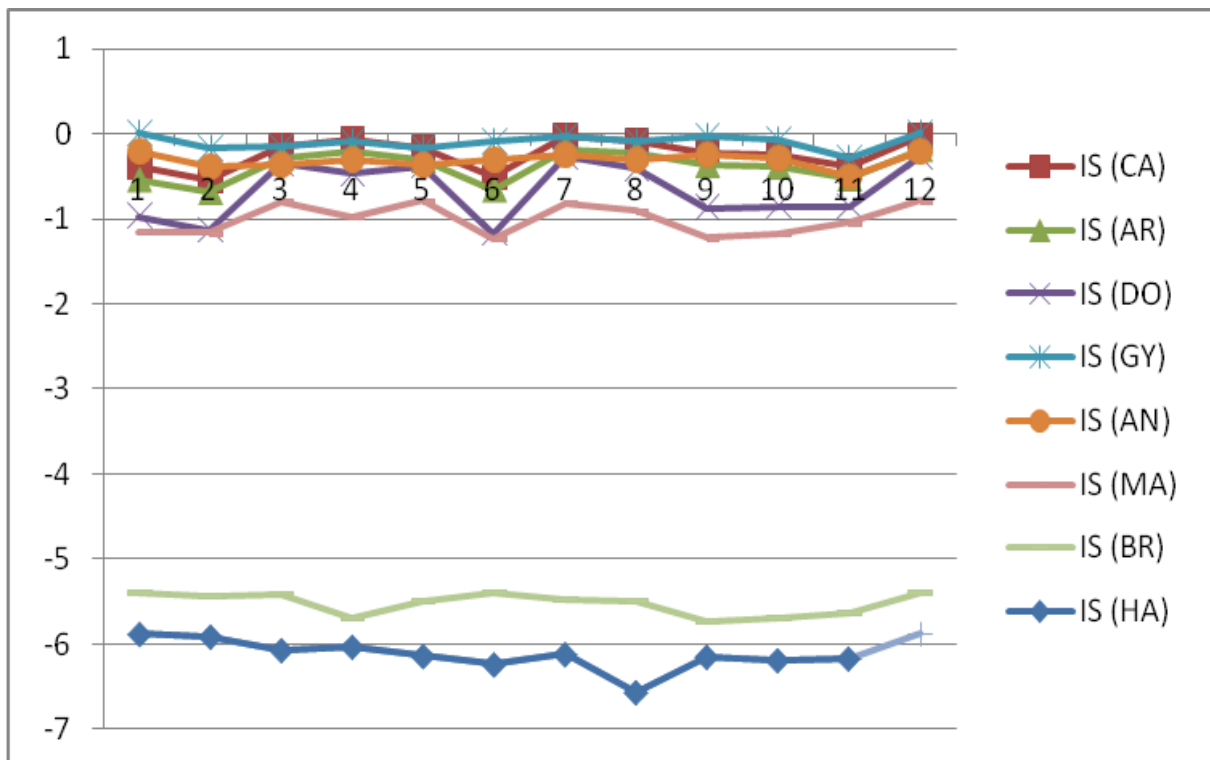


Fig.VI.71: Evolution des indices de saturation des minéraux des eaux de la plaine d’El-Kantara (SEP 2014). (Auteur, 2022).

TAB .VI.27: Indice de saturation (SI) des minéraux présents dans les eaux de la plaine d'El-Kantara (SEP 2014) (Auteur, 2022).

| N° | IS (CA) | IS (AR) | IS (DO) | IS (GY) | IS (AN) | IS (HA) | IS (MA) | IS (BR) |
|-----|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 1 | -0.39 | -0.54 | -0.97 | 0.01 | -0.21 | -5.88 | -1.16 | -5.40 |
| 2 | -0.54 | -0.69 | -1.14 | -0.16 | -0.38 | -5.91 | -1.17 | -5.43 |
| 3 | -0.14 | -0.28 | -0.35 | -0.14 | -0.36 | -6.07 | -0.80 | -5.41 |
| 4 | -0.06 | -0.21 | -0.47 | -0.08 | -0.30 | -6.03 | -0.98 | -5.70 |
| 5 | -0.17 | -0.31 | -0.38 | -0.16 | -0.37 | -6.14 | -0.79 | -5.50 |
| 6 | -0.51 | -0.66 | -1.17 | -0.08 | -0.30 | -6.24 | -1.24 | -5.40 |
| 7 | -0.03 | -0.18 | -0.27 | -0.03 | -0.25 | -6.12 | -0.82 | -5.48 |
| 8 | -0.08 | -0.22 | -0.41 | -0.08 | -0.30 | -6.57 | -0.91 | -5.50 |
| 9 | -0.23 | -0.37 | -0.87 | -0.02 | -0.24 | -6.15 | -1.23 | -5.73 |
| 10 | -0.25 | -0.39 | -0.85 | -0.07 | -0.28 | -6.19 | -1.18 | -5.69 |
| 11 | -0.39 | -0.53 | -0.86 | -0.28 | -0.50 | -6.17 | -1.05 | -5.64 |
| MAX | -0,03 | -0,18 | -0,27 | 0,01 | -0,21 | -5,88 | -0,79 | -5,4 |
| MIN | -0,54 | -0,69 | -1,17 | -0,28 | -0,5 | -6,57 | -1,24 | -5,73 |
| MOY | -0,25 | -0,40 | -0,70 | -0,10 | -0,32 | -6,13 | -1,03 | -5,53 |
| ET | 0,18 | 0,18 | 0,33 | 0,08 | 0,08 | 0,18 | 0,18 | 0,13 |

Pour les deux campagnes restantes (SEP 2014 et FEV2015), Les mêmes constatations sont valables.

TAB .VI.28: Indice de saturation (SI) des minéraux présents dans les eaux de la plaine d’El-Kantara (FEV 2015). (Auteur, 2022).

| N° | IS (CA) | IS (AR) | IS (DO) | IS (GY) | IS (AN) | IS (HA) | IS (MA) | IS (BR) |
|-----|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 1 | -0.26 | -0.40 | -0.46 | -1.05 | -1.27 | -6.96 | -0.78 | -5.82 |
| 2 | 0.07 | -0.08 | 0.15 | -0.47 | -0.69 | -5.89 | -0.50 | -5.73 |
| 3 | -0.05 | -0.20 | -0.14 | -0.30 | -0.52 | -6.17 | -0.67 | -5.59 |
| 4 | -0.06 | -0.20 | -0.14 | -0.29 | -0.51 | -5.81 | -0.66 | -5.61 |
| 5 | 0.04 | -0.11 | 0.10 | -0.46 | -0.68 | -6.08 | -0.52 | -5.69 |
| 6 | -0.12 | -0.27 | -0.38 | -0.32 | -0.54 | -6.01 | -0.84 | -5.74 |
| 7 | 0.09 | -0.05 | 0.02 | -0.15 | -0.37 | -5.86 | -0.66 | -5.69 |
| 8 | 0.03 | -0.12 | -0.00 | -0.44 | -0.66 | -5.88 | -0.61 | -5.77 |
| 9 | -1.00 | -1.14 | -1.87 | -0.88 | -1.10 | -7.17 | -1.45 | -6.23 |
| 10 | 0.01 | -0.14 | 0.05 | -0.48 | -0.70 | -6.01 | -0.54 | -5.71 |
| 11 | 0.06 | -0.09 | 0.09 | -0.44 | -0.66 | -6.00 | -0.55 | -5.72 |
| MAX | 0,09 | -0,05 | 0,15 | -0,15 | -0,37 | -5,81 | -0,5 | -5,59 |
| MIN | -1 | -1,14 | -1,87 | -1,05 | -1,27 | -7,17 | -1,45 | -6,23 |
| MOY | -0,11 | -0,25 | -0,23 | -0,48 | -0,70 | -6,17 | -0,71 | -5,75 |
| ET | 0,31 | 0,31 | 0,58 | 0,26 | 0,26 | 0,46 | 0,27 | 0,17 |

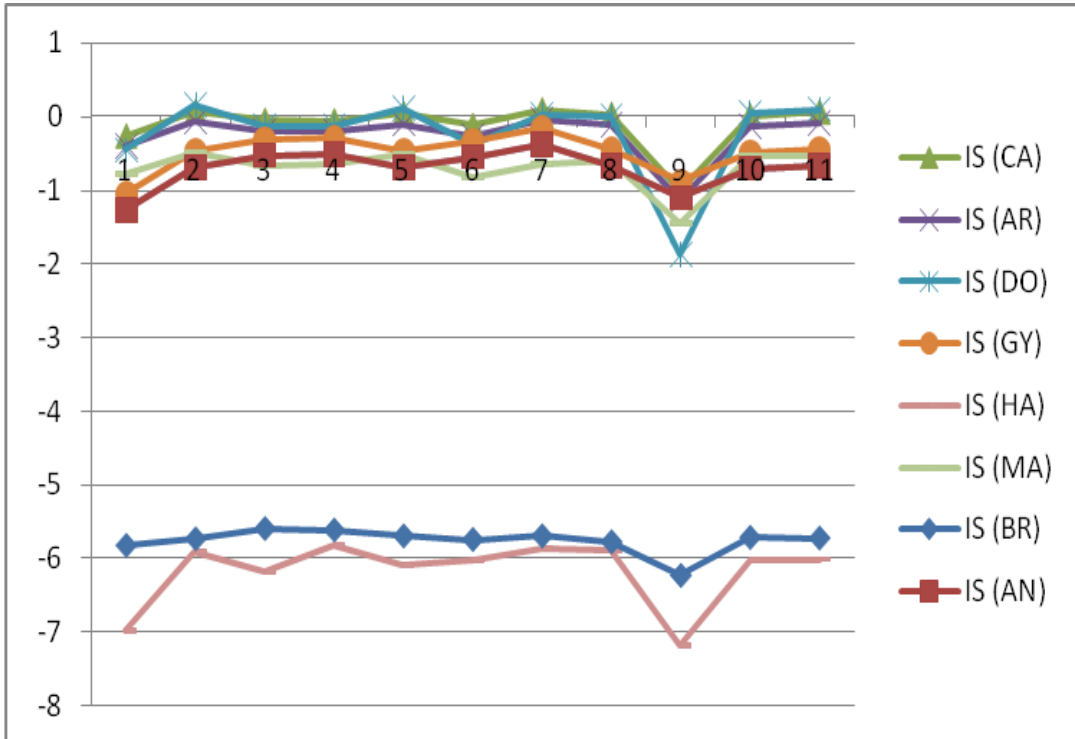


Fig.VI.72: Evolution des indices de saturation des minéraux des eaux de la plaine d'El-Kantara (FEV 2015).

10- Analyse statistique des données :

Les techniques statistiques multivariées, la classification ascendante hiérarchique (CAH), l'analyse en composantes principales (ACP) et les cartes auto-organisatrices de Kohonen (SOM, pour Self-Organizing Maps) ; font partie de la famille de techniques issues de la recherche en intelligence artificielle appelée « réseaux de neurones artificiels », sont des moyens efficaces d'interprétation et de représentation des données chimiques relatives aux eaux souterraines et de surface. Love et al. (2004) ont appliqué l'ACP pour distinguer les eaux souterraines contaminées ou non, les activités agricoles, les activités minières et la pollution des eaux usées. Olmez *et al.* (1994), Mahlkecht *et al.* (2003) et Farnham *et al.* (2003) ont utilisé l'ACP pour discuter l'évolution géochimique, la minéralisation et la contamination des eaux souterraines. La CAH a été également utilisée pour interpréter les données hydrochimiques pour faire ressortir les différents groupe au sein d'un même aquifère. Suk et Lee (1999), Reghunath *et al.* (2002) et Kim *et al.* (2005). En plus, Les cartes auto-organisatrices (SOM) sont des techniques de réseau neuronal artificiel basées sur des algorithmes d'apprentissage non supervisé (Kohonen, 2001).

En raison de leurs capacités de classification ainsi que de leur performance de visualisation, elles ont été utilisées avec succès dans les domaines de l'environnement (sol, air, eau, etc.). Alvarez-Guerra et al. (2011) ont développé une méthodologie basée sur la technique de SOM pour l'intégration et la classification de données sur plusieurs polluants mesurés aux stations de surveillances en fonction de leurs indications sur la qualité de l'air en Espagne. Tsakovski et al. (2009) ont utilisé SOM pour révéler les principaux facteurs contrôlant la qualité de l'eau de ruissellement à Gdansk (Pologne). Berrada et al., 2014 ont utilisé SOM et une classification hiérarchique ascendante (SOM-HCA) afin de détecter les variations saisonnières des concentrations en métaux lourds dans les sédiments superficiels du barrage Sidi Chahed (Maroc). Dans cette partie, ces trois techniques ont été appliquées aux données chimiques des eaux souterraines et de surface de la région d'El-Kantara.

10.1- Corrélation entre les paramètres physico-chimiques :

Vue l'influence des facteurs climatiques tels que l'évaporation (période des basses eaux), les précipitations (période des hautes eaux), lithologiques ainsi que les conditions hydrodynamiques, sur les mécanismes du chimisme des eaux la plaine. Et pour une meilleure caractérisation de ces mécanismes et leurs évolutions, on a commencé en premier lieu par une simple matrice de corrélation des différents paramètres analysés durant toute la période d'investigation (anions majeurs, cations majeurs, pH, conductivité et éléments en trace ,...). La matrice de corrélation est une matrice carrée caractérisée par un coefficient de corrélation qui peut être utilisé pour distinguer la relation entre deux paramètres (Davis, 1973). Une matrice de corrélations a été réalisée pour les différents échantillons d'eau analysés, en utilisant le programme SPSS (version 19 .0) (*version free*). La relation entre ses différents constituants peut être résumée de la manière suivante (TAB .VI.29), (TAB .VI.30) , (TAB .VI.31) et (TAB .VI.32):

Groupe 1 : Les paramètres avec un coefficient de corrélation supérieur à 0.9 ont une très grande relation linéaire.

Groupe 2 : Les paramètres avec un coefficient de corrélation compris entre (0.85-0.90) ont une grande relation linéaire.

Groupe 3 : Les paramètres qui ont un coefficient de corrélation entre (0.80-0.85) ont une relation linéaire significative.

Groupe 4 : Les paramètres avec un coefficient de corrélation entre (0.70-0.80), ont une bonne relation linéaire.

Groupe 5 : Les paramètres qui ont un Coefficient de corrélation entre (0.60-0.70) ont une relation moyenne à acceptable.

Groupe 6 : Les paramètres avec un coefficient de corrélation inférieur à 0.60 ont un faible à très faible relation linéaire.

TAB .VI.29: Matrice de corrélation des paramètres physico-chimiques mesurés dans les eaux de la plaine d'El-Kantara (SEP 2011). (Auteur, 2022).

| Corrélation | PH | CE | Cl | SO4 | NO3 | HCO3 | Na | K | Mg | Ca | Cu | Fe | DBO5 | NO2 | NH4+ | Pb | DCO | P | Po4 | Mn | Cr o4 | Cr +6 | |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--|
| PH | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| CE | -,199 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Cl | ,099 | -,049 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| SO4 | -,409 | ,396 | ,174 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| NO3 | -,508 | -,100 | -,208 | ,308 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| HCO3 | -,509 | -,100 | -,207 | ,307 | 1,000 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Na | -,226 | ,582 | ,504 | ,577 | -,255 | -,254 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| K | ,156 | -,739 | ,541 | -,099 | -,155 | -,153 | ,019 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | | |
| Mg | ,012 | ,633 | ,433 | ,409 | -,283 | -,285 | ,455 | -,315 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | |
| Ca | ,041 | ,827 | -,091 | ,119 | -,357 | -,357 | ,280 | -,737 | ,643 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | |
| Cu | ,222 | -,287 | ,374 | -,650 | -,239 | -,237 | -,052 | ,458 | -,259 | -,347 | 1,000 | | | | | | | | | | | | |
| Fe | ,323 | -,535 | ,114 | -,460 | -,480 | -,478 | -,058 | ,734 | -,497 | -,506 | ,644 | 1,000 | | | | | | | | | | | |
| DBO5 | ,276 | ,058 | ,657 | -,271 | -,518 | -,517 | ,264 | ,101 | ,361 | ,291 | ,349 | -,006 | 1,000 | | | | | | | | | | |
| NO2 | -,509 | -,100 | -,207 | ,307 | 1,000 | 1,000 | -,254 | -,153 | -,285 | -,357 | -,237 | -,478 | -,517 | 1,000 | | | | | | | | | |
| NH4+ | -,243 | -,479 | ,438 | -,150 | ,165 | ,169 | -,137 | ,575 | -,038 | -,489 | ,321 | ,248 | ,131 | ,169 | 1,000 | | | | | | | | |
| Pb | ,019 | -,053 | ,147 | -,103 | -,147 | -,143 | ,047 | ,373 | -,202 | -,153 | ,525 | ,609 | -,118 | -,143 | ,223 | 1,000 | | | | | | | |
| DCO | -,018 | -,001 | ,502 | -,042 | -,301 | -,304 | ,193 | ,028 | ,443 | ,112 | ,154 | -,213 | ,754 | -,304 | ,073 | -,390 | 1,000 | | | | | | |
| P | ,331 | -,522 | ,659 | -,172 | -,449 | -,448 | -,029 | ,743 | ,024 | -,241 | ,374 | ,511 | ,555 | -,448 | ,437 | ,373 | ,337 | 1,000 | | | | | |
| Po4 | ,184 | -,493 | ,633 | -,076 | -,386 | -,385 | -,011 | ,701 | ,046 | -,233 | ,295 | ,436 | ,533 | -,385 | ,471 | ,378 | ,380 | ,981 | 1,000 | | | | |
| Mn | ,408 | -,486 | ,407 | -,413 | -,430 | -,431 | -,061 | ,538 | -,282 | -,226 | ,507 | ,505 | ,555 | -,431 | -,076 | ,113 | ,396 | ,696 | ,621 | 1,000 | | | |
| Cr o4 | -,308 | ,833 | -,318 | ,288 | ,085 | ,084 | ,216 | -,895 | ,562 | ,829 | -,553 | -,779 | -,055 | ,084 | -,451 | -,438 | ,034 | -,661 | -,618 | -,567 | 1,000 | | |
| Cr +6 | -,308 | ,833 | -,318 | ,288 | ,085 | ,084 | ,216 | -,895 | ,562 | ,829 | -,553 | -,779 | -,055 | ,084 | -,451 | -,438 | ,034 | -,661 | -,618 | -,567 | 1,000 | 1,000 | |

TAB .VI.30: Matrice de corrélation des paramètres physico-chimiques mesurés dans les eaux de la plaine d’El-Kantara (FEV 2012). (Auteur, 2022).

| Corrélation | PH | CE | Cl | SO4 | NO3 | HCO3 | Na | K | Mg | Ca | Cu | Fe | DBO5 | NO2 | NH4+ | Pb | DCO |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| PH | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| CE | ,133 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | | |
| Cl | ,144 | ,353 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | |
| SO4 | ,036 | ,875 | ,252 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | |
| NO3 | -,178 | ,483 | ,577 | ,391 | 1,000 | | | | | | | | | | | | |
| HCO3 | -,015 | -,507 | -,140 | -,156 | -,558 | 1,000 | | | | | | | | | | | |
| Na | -,222 | ,115 | -,099 | ,368 | -,313 | ,670 | 1,000 | | | | | | | | | | |
| K | ,029 | ,262 | ,667 | ,432 | ,090 | ,469 | ,601 | 1,000 | | | | | | | | | |
| Mg | -,195 | ,384 | ,702 | ,447 | ,345 | ,237 | ,532 | ,784 | 1,000 | | | | | | | | |
| Ca | -,218 | ,529 | ,626 | ,535 | ,264 | ,076 | ,542 | ,759 | ,918 | 1,000 | | | | | | | |
| Cu | ,153 | ,245 | ,017 | ,376 | -,227 | ,177 | ,343 | ,185 | ,411 | ,445 | 1,000 | | | | | | |
| Fe | -,034 | ,351 | -,002 | ,447 | -,167 | -,034 | ,237 | ,191 | ,250 | ,499 | ,697 | 1,000 | | | | | |
| DBO5 | ,253 | -,572 | ,184 | -,633 | -,206 | ,118 | -,376 | -,029 | -,196 | -,248 | -,255 | -,090 | 1,000 | | | | |
| NO2 | -,071 | ,471 | -,044 | ,394 | ,750 | -,666 | -,354 | -,399 | -,194 | -,201 | -,266 | -,183 | -,376 | 1,000 | | | |
| NH4+ | -,295 | ,174 | ,429 | ,176 | ,500 | ,014 | ,068 | ,360 | ,328 | ,215 | -,589 | -,320 | ,141 | ,232 | 1,000 | | |
| Pb | -,029 | ,458 | ,099 | ,435 | -,144 | ,094 | ,515 | ,426 | ,391 | ,626 | ,227 | ,657 | -,096 | -,213 | ,209 | 1,000 | |
| DCO | ,010 | -,674 | ,071 | -,692 | -,260 | ,301 | -,230 | -,134 | -,013 | -,252 | -,021 | -,318 | ,697 | -,453 | ,048 | ,414 | 1,000 |

TAB .VI.31: Matrice de corrélation des paramètres physico-chimiques mesurés dans les eaux de la plaine d’El-Kantara (SEP 2014). (Auteur, 2022).

| Corrélation | PH | CE | Cl | SO4 | NO3 | HCO3 | Na | K | Mg | Ca | Cu | Fe | NO2 | NH4+ | Pb |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|----|
| PH | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | |
| CE | ,077 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | |
| Cl | ,099 | -,125 | 1,000 | | | | | | | | | | | | |
| SO4 | -,363 | ,508 | ,260 | 1,000 | | | | | | | | | | | |
| NO3 | -,588 | -,249 | -,208 | ,116 | 1,000 | | | | | | | | | | |
| HCO3 | -,589 | -,250 | -,207 | ,115 | 1,000 | 1,000 | | | | | | | | | |
| Na | -,125 | ,510 | ,489 | ,638 | -,369 | -,368 | 1,000 | | | | | | | | |
| K | ,286 | -,694 | ,559 | -,232 | -,203 | -,202 | -,041 | 1,000 | | | | | | | |
| Mg | ,000 | ,444 | ,271 | -,058 | -,406 | -,403 | ,375 | -,162 | 1,000 | | | | | | |
| Ca | ,116 | ,806 | -,091 | ,319 | -,357 | -,357 | ,328 | -,692 | ,368 | 1,000 | | | | | |
| Cu | ,216 | -,273 | ,374 | -,570 | -,239 | -,237 | ,089 | ,469 | ,402 | -,347 | 1,000 | | | | |
| Fe | ,309 | -,431 | ,113 | -,488 | -,480 | -,478 | -,048 | ,722 | ,064 | -,506 | ,644 | 1,000 | | | |
| NO2 | -,564 | -,239 | -,288 | ,076 | ,994 | ,994 | -,425 | -,236 | -,438 | -,359 | -,256 | -,459 | 1,000 | | |

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|------|-------|-------|-------|-------|------|------|-------|-------|------|-------|------|------|------|-------|-------|
| NH4+ | -,319 | -,580 | ,438 | -,274 | ,165 | ,169 | -,146 | ,440 | ,169 | -,489 | ,321 | ,248 | ,145 | 1,000 | |
| Pb | -,230 | ,323 | -,390 | -,079 | ,178 | ,180 | -,064 | -,278 | ,143 | ,022 | ,248 | ,233 | ,235 | -,134 | 1,000 |

TAB .VI. 32: Matrice de corrélation des paramètres physico-chimiques mesurés dans les eaux de la plaine d’El-Kantara (FEV 2015) (Auteur, 2022).

| Corrélation | PH | CE | Cl | SO4 | NO3 | HCO3 | Na | K | Mg | Ca | Cu | Fe | NO2 | NH4+ | Pb |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| PH | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | |
| CE | -,113 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | |
| Cl | ,142 | ,316 | 1,000 | | | | | | | | | | | | |
| SO4 | ,043 | ,867 | ,281 | 1,000 | | | | | | | | | | | |
| NO3 | -,156 | ,454 | ,619 | ,390 | 1,000 | | | | | | | | | | |
| HCO3 | -,085 | -,398 | -,145 | -,155 | -,549 | 1,000 | | | | | | | | | |
| Na | -,265 | ,168 | -,080 | ,365 | -,299 | ,671 | 1,000 | | | | | | | | |
| K | ,029 | ,247 | ,654 | ,429 | ,096 | ,474 | ,599 | 1,000 | | | | | | | |
| Mg | -,238 | ,409 | ,744 | ,424 | ,418 | ,230 | ,514 | ,775 | 1,000 | | | | | | |
| Ca | -,214 | ,519 | ,633 | ,539 | ,290 | ,066 | ,538 | ,739 | ,902 | 1,000 | | | | | |
| Cu | ,173 | ,196 | ,020 | ,382 | -,215 | ,193 | ,340 | ,189 | ,303 | ,443 | 1,000 | | | | |
| Fe | -,019 | ,309 | -,009 | ,466 | -,169 | -,030 | ,240 | ,205 | ,179 | ,499 | ,696 | 1,000 | | | |
| NO2 | -,066 | ,403 | -,035 | ,396 | ,720 | -,653 | -,353 | -,412 | -,182 | -,209 | -,251 | -,163 | 1,000 | | |
| NH4+ | -,428 | ,360 | ,400 | ,181 | ,539 | -,030 | ,065 | ,245 | ,414 | ,198 | -,577 | -,355 | ,279 | 1,000 | |
| Pb | -,076 | ,408 | ,069 | ,423 | -,140 | ,049 | ,504 | ,370 | ,370 | ,616 | ,236 | ,659 | -,205 | ,152 | 1,000 |

10.2- Classification ascendante hiérarchique (C.A.H):

10.2 .1-Objet de la méthode :

L'objectif de la méthode est de faire ressortir les tendances chimiques dans ces eaux. Ces tendances sont en réalité une approche sur les origines possibles des différentes catégories d'eau. Elles représentent une approche sur les origines dans le cas des variables, tandis qu'elles traduisent des classes de la minéralisation dans le cas des observations.

10.2 .2-Principe de la méthode :

Une analyse de groupement a été effectuée pour déterminer si les échantillons peuvent être regroupés en groupes hydrochimiques statistiquement distincts qui peuvent être importants dans le contexte géologique. Un certain nombre d'études ont utilisé cette technique pour réussir à classer les échantillons d'eau (Alther,1979) ; (Williams, 1982) ; (Farnham *et al.*, 2000) ; (Alberto *et al.*, 2001) ; (Meng et Maynard, 2001) ; (Brinis, 2011) ; (Belkhiri *et al.*, 2010). Les comparaisons fondées sur des paramètres multiples à partir d'échantillons différents ont été faites et des échantillons ont été regroupés en fonction de leurs paramètres

est connue comme les classifications Q-mode. Dans la présente étude Q-mode CAH a été utilisée pour classer les échantillons en groupes hydrochimiques distincts.

Le traitement des données est effectué à l'aide du logiciel SPSS (version 19 .0) (*version free*) -Classification Ascendante Hiérarchique (CAH). La méthode de Ward (Ward, 1963) a été utilisée dans cette analyse. Elle repose sur un critère d'optimisation assez naturel. Selon Gilbert Saporta, (1990), elle constitue la meilleure méthode de classification hiérarchique sur données euclidiennes. Elle consiste à classer ("**n**" variables, "**p**" observations); telle que chaque observation comporte **n** variables mesurables. Les éléments à classer sont des vecteurs, et l'ensemble qu'ils constituent est muni d'une distance euclidienne : on peut alors construire une matrice des distances entre les variables et les observations. On définit ensuite un critère d'affectation ou d' "**inertie**" de regroupement de ces vecteurs, c'est à dire une règle de calcul des distances entre les groupements disjoints de variables ou d'observations. Les deux groupements dont la distance est la plus faible (selon ce critère) se réunissent alors, et on itère le processus jusqu'à regroupement complet des classes. Pour l'analyse statistique, toutes les variables ont été transformées en logarithme puis normalisées par la suite selon la méthode décrite par (Güler et al, 2002). On peut représenter la classification ascendante hiérarchique par un schéma de classification appelé dendrogramme ou arbre de classification.

Nous avons utilisés cette classification à la fois pour les variables et pour les observations pendant les quatre campagnes (Septembre 2011/2014 et Février 2012/2015).

10.2 .3-Résultat de l'analyse :

Les données chimiques ont été classées en trois groupes (C1, C2 et C3) voir les tableaux (TAB .VI. 33), (TAB .VI. 34) , (TAB .VI. 35) et (TAB .VI. 36). Nous signalons que liens significatifs (moyennes, fortes et très fortes corrélations entre quelques éléments peuvent être probablement attribuées à des origines communes de ces éléments, voir les tableaux des matrices de corrélations). Alors que, les valeurs faibles à très faibles expliquent leurs origines différentes (géologie) qui sont parfois soumis à des facteurs qui ne les affectent pas de même degré. Ainsi ces éléments chimiques se répartissent en trois (03) classes différentes (C1, C2 et C3), en fonction de leurs degrés de corrélation et leurs moyennes.

TAB .VI. 33: Tableau de bord des paramètres physico-chimiques mesurés des eaux de la plaine d'El-Kantara pour la CAH (SEP 2011). (Auteur, 2022).

| Ward Method | PH | CE | Cl | SO4 | NO3 | HCO3 | Na | K | Mg | Ca | Cu | Fe | DBO5 | NO2 | NH4+ | Pb | DCO | P | Po4 | Mn | Cr o4 | Cr +6 | |
|-------------|------------|-------|---------|----------|---------|----------|----------|--------------|------------|----------|-----------|----------|----------|--------|--------|---------|---------|--------|------|--------|----------|----------|-----------|
| C1 | Moyenne | 7,356 | 3131,11 | 277,2944 | 1691,67 | 23,4033 | 64,3211 | 100,25128800 | 2,1128100 | 182,4256 | 569,7856 | 187633 | 156700 | 45,78 | 5,272 | 2,3778 | 0,05300 | 90,56 | 0,01 | 0,0656 | 0,022089 | 86,8000 | 38,73400 |
| | N | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 |
| | Ecart-type | ,2404 | 421,528 | 75,83727 | 129,942 | 11,23861 | 30,98084 | 16,734340752 | ,92226786 | 18,51982 | 87,76594 | ,0663463 | ,3994350 | 41,665 | 2,5394 | ,021626 | ,033571 | 49,913 | ,010 | ,09976 | ,0227716 | 15,44228 | 6,884683 |
| C2 | Moyenne | 7,600 | 2130,00 | 482,8000 | 1622,40 | 8,0800 | 22,2040 | 98,78734200 | 5,7317950 | 181,6300 | 467,5300 | 282400 | 1,277400 | 134,00 | 1,820 | 2,6800 | 0,09200 | 150,00 | 50 | 1,7500 | 106700 | 7,2000 | 3,21000 |
| | N | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | Ecart-type | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| C3 | Moyenne | 7,500 | 2130,00 | 252,0500 | 1536,00 | 24,2400 | 66,7340 | 96,39179400 | 5,4841700 | 106,7750 | 304,4900 | 321100 | 1,778900 | 10,00 | 5,470 | 2,3900 | 0,08200 | 33,00 | 0,04 | 0,0300 | 0,072700 | 5,7600 | 2,56800 |
| | N | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | Ecart-type | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Total | Moyenne | 7,391 | 2949,09 | 293,6818 | 1671,22 | 22,0864 | 60,7116 | 99,76733891 | 2,8392050 | 175,4759 | 536,3718 | ,208382 | ,406055 | 50,55 | 4,976 | ,24064 | ,05918 | 90,73 | ,05 | ,2155 | ,034382 | 72,2618 | 32,21673 |
| | N | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 |
| | Ecart-type | ,2300 | 553,307 | 92,69635 | 126,297 | 11,07645 | 30,52026 | 15,015884393 | 1,83579869 | 28,17133 | 114,09625 | ,0756790 | ,6693230 | 47,645 | 2,5017 | ,021369 | ,033102 | 51,746 | ,149 | ,51682 | ,0349380 | 35,33619 | 15,754053 |

TAB .VI. 34: Tableau de bord des paramètres physico-chimiques mesurés des eaux de la plaine d'El-Kantara pour la CAH (FEV 2012) (Auteur, 2022)..

| Ward Method | PH | CE | Cl | SO4 | NO3 | HCO3 | Na | K | Mg | Ca | Cu | Fe | DBO5 | NO2 | NH4+ | Pb | DCO | |
|-------------|------------|-------|---------|----------|--------|---------|--------|----------|---------|---------|---------|---------|--------|--------|----------|----------|----------|-------|
| C1 | Moyenne | 7,650 | 2305,00 | 84,3000 | 1122,0 | 11,0250 | 195,95 | 72,9250 | 2,0250 | 56,6900 | 101,375 | 1,0150 | 1,6800 | 67,50 | 0,047500 | 0,026000 | 0,016500 | 78,50 |
| | N | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| | Ecart-type | ,2121 | 1138,44 | 6,29325 | 992,77 | 11,9147 | 67,953 | 15,59170 | ,38891 | 11,2995 | 32,3501 | ,00707 | ,08485 | 74,246 | ,0657609 | ,0113137 | ,0007071 | 79,90 |
| C2 | Moyenne | 7,600 | 2655,71 | 149,0000 | 1564,1 | 6,0471 | 324,77 | 423,2614 | 24,3857 | 120,802 | 280,458 | 14,8086 | 2,9400 | 34,00 | 0,006000 | 0,038429 | 0,059714 | 66,86 |
| | N | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 |
| | Ecart-type | ,2582 | 432,661 | 17,70358 | 242,54 | 2,54386 | 67,930 | 29,68025 | 5,45968 | 13,9555 | 68,8704 | 18,9114 | 3,6606 | 38,846 | ,0054160 | ,0222625 | ,0375398 | 42,81 |
| C3 | Moyenne | 7,550 | 2990,00 | 296,4250 | 1632,0 | 31,9450 | 215,40 | 244,7500 | 27,2500 | 150,750 | 341,200 | 3,4250 | ,8050 | 47,00 | 0,051000 | 0,063000 | 0,038500 | 72,00 |
| | N | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| | Ecart-type | ,3536 | 14,142 | 117,9807 | 135,76 | 6,45588 | 7,6368 | 204,7074 | 8,13173 | 1,06066 | 1,83848 | ,62933 | ,65761 | 56,569 | ,0509117 | ,0014142 | ,0021213 | 35,35 |
| Total | Moyenne | 7,600 | 2652,73 | 164,0409 | 1496,0 | 11,6609 | 281,46 | 327,1073 | 20,8409 | 114,590 | 258,941 | 10,2309 | 2,3227 | 42,45 | ,021727 | ,040636 | ,048000 | 69,91 |
| | N | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 |
| | Ecart-type | ,2408 | 537,477 | 80,74125 | 413,07 | 11,2550 | 82,973 | 159,6670 | 10,5986 | 32,9961 | 97,9474 | 15,9857 | 2,9822 | 44,230 | ,0344473 | ,0213695 | ,0340382 | 43,42 |

TAB .VI. 35: Tableau de bord des paramètres physico-chimiques mesurés des eaux de la plaine d’El-Kantara pour la CAH (SEP 2014). (Auteur, 2022).

| Ward Method | PH | CE | Cl | SO4 | NO3 | HCO3 | Na | K | Mg | Ca | Cu | Fe | NO2 | NH4+ | Pb | |
|-------------|------------|-------------|---------|-----------|--------------|----------|-----------|--------------|--------------|-----------|-----------|----------|----------|---------|---------|---------|
| C1 | Moyenne | 7,200 | 5615,00 | 309,3250 | 1742,000 | 8,6300 | 38,17800 | 644,35840000 | 6,29120000 | 216,78750 | 689,1200 | ,435300 | ,733650 | 2,9900 | ,33150 | ,07850 |
| | N | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| | Ecart-type | ,0000 | 388,909 | 107,93985 | 195,1615 | 1,97990 | 5,348556 | 36,162939856 | ,139809153 | 9,719183 | 73,66638 | ,0195161 | ,8222945 | ,26870 | ,019092 | ,054447 |
| C2 | Moyenne | 7,350 | 2150,00 | 387,4250 | 1599,200 | 18,1600 | 64,46900 | 117,58956500 | 11,10798250 | 164,20250 | 406,0100 | ,501750 | ,1628150 | 5,1450 | ,35350 | ,05100 |
| | N | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| | Ecart-type | ,0707 | ,000 | 163,16489 | 61,0940 | 11,42685 | 31,487465 | 1,693909650 | ,882204098 | 52,930478 | 115,28669 | ,0273650 | ,3546141 | 3,28805 | ,020506 | ,057983 |
| C3 | Moyenne | 7,143 | 2918,57 | 293,8571 | 1728,714 | 30,1957 | 97,50486 | 113,36354214 | 6,91898429 | 154,03643 | 561,4043 | ,374014 | ,120971 | 8,3529 | ,33957 | ,05829 |
| | N | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 |
| | Ecart-type | ,2936 | 440,243 | 75,26303 | 142,1955 | 6,86869 | 19,038739 | 12,087149707 | ,685023438 | 41,562539 | 71,67404 | ,0695116 | ,0501870 | 1,56055 | ,023366 | ,030065 |
| Total | Moyenne | 7,191 | 2905,45 | 313,6818 | 1707,582 | 24,0864 | 80,71164 | 119,76733864 | 7,56647773 | 167,29409 | 556,3718 | ,408382 | ,506400 | 6,7945 | ,34064 | ,06064 |
| | N | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 |
| | Ecart-type | ,2427 | 588,530 | 92,69635 | 138,6097 | 11,07645 | 30,520259 | 19,217723429 | 1,867760325 | 44,056142 | 114,09625 | ,0756790 | ,6690926 | 2,77281 | ,021369 | ,035514 |
| | | Valeurs Max | | | Valeurs Moy. | | | | Valeurs Min. | | | | | | | |

TAB .VI. 36: Tableau de bord des paramètres physico-chimiques mesurés des eaux de la plaine d’El-Kantara pour la CAH (FEV 2015).

| Ward Method | PH | CE | Cl | SO4 | NO3 | HCO3 | Na | K | Mg | Ca | Cu | Fe | NO2 | NH4+ | Pb | |
|-------------|------------|-------------|----------|-----------|--------------|----------|---------|-----------|--------------|----------|----------|----------|---------|----------|----------|----------|
| C1 | Moyenne | 7,850 | 2290,00 | 60,8000 | 1102,00 | 9,0250 | 175,950 | 62,9250 | 1,4250 | 46,6900 | 82,3750 | ,8650 | 1,3800 | ,037500 | ,021500 | ,012500 |
| | N | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| | Ecart-type | ,2121 | 1145,513 | ,07071 | 992,778 | 10,50054 | 67,9530 | 15,59170 | ,53033 | 11,29957 | 30,93592 | ,07778 | ,22627 | ,0516188 | ,0120208 | ,0007071 |
| C2 | Moyenne | 7,786 | 2735,43 | 129,1429 | 1545,00 | 5,0471 | 301,914 | 406,9757 | 20,8143 | 107,9457 | 261,6014 | 13,0000 | 2,5000 | ,004286 | ,032000 | ,051571 |
| | N | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 |
| | Ecart-type | ,2478 | 418,240 | 17,57772 | 244,669 | 2,42924 | 65,9155 | 30,04180 | 5,06044 | 10,31118 | 69,55187 | 16,37282 | 2,97359 | ,0032514 | ,0208087 | ,0352650 |
| C3 | Moyenne | 7,750 | 2968,50 | 279,9250 | 1612,00 | 29,4450 | 195,400 | 232,2500 | 22,7500 | 140,7500 | 321,2000 | 3,0750 | ,6550 | ,038500 | ,056000 | ,031000 |
| | N | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| | Ecart-type | ,3536 | 12,021 | 113,03102 | 135,765 | 5,74878 | 7,6368 | 201,17188 | 7,42462 | 1,06066 | 1,83848 | ,70004 | ,58690 | ,0403051 | ,0056569 | ,0056569 |
| Total | Moyenne | 7,791 | 2696,82 | 144,1318 | 1476,64 | 10,2064 | 259,645 | 312,6527 | 17,6409 | 102,7727 | 239,8509 | 8,9891 | 1,9609 | ,016545 | ,034455 | ,040727 |
| | N | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 |
| | Ecart-type | ,2343 | 533,943 | 81,83552 | 413,918 | 10,52654 | 80,9422 | 156,86400 | 9,26102 | 31,82631 | 98,04563 | 13,86895 | 2,44068 | ,0269197 | ,0202008 | ,0317808 |
| | | Valeurs Max | | | Valeurs Moy. | | | | Valeurs Min. | | | | | | | |

10.2 .3.1-Classification des variables:

-Campagne Septembre 2011 :

Appartenance à la classe :

SEP 2011

| Observations | 3 classes |
|--------------|-----------|
| PH | 1 |
| CE | 2 |
| Cl | 1 |
| SO4 | 2 |
| NO3 | 3 |
| HCO3 | 3 |
| Na | 2 |
| K | 1 |
| Mg | 2 |
| Ca | 2 |
| Cu | 1 |
| Fe | 1 |
| DBO5 | 1 |
| NO2 | 3 |
| NH4+ | 1 |
| Pb | 1 |
| DCO | 1 |
| P | 1 |
| Po4 | 1 |
| Mn | 1 |
| Cr o4 | 2 |
| Cr +6 | 2 |

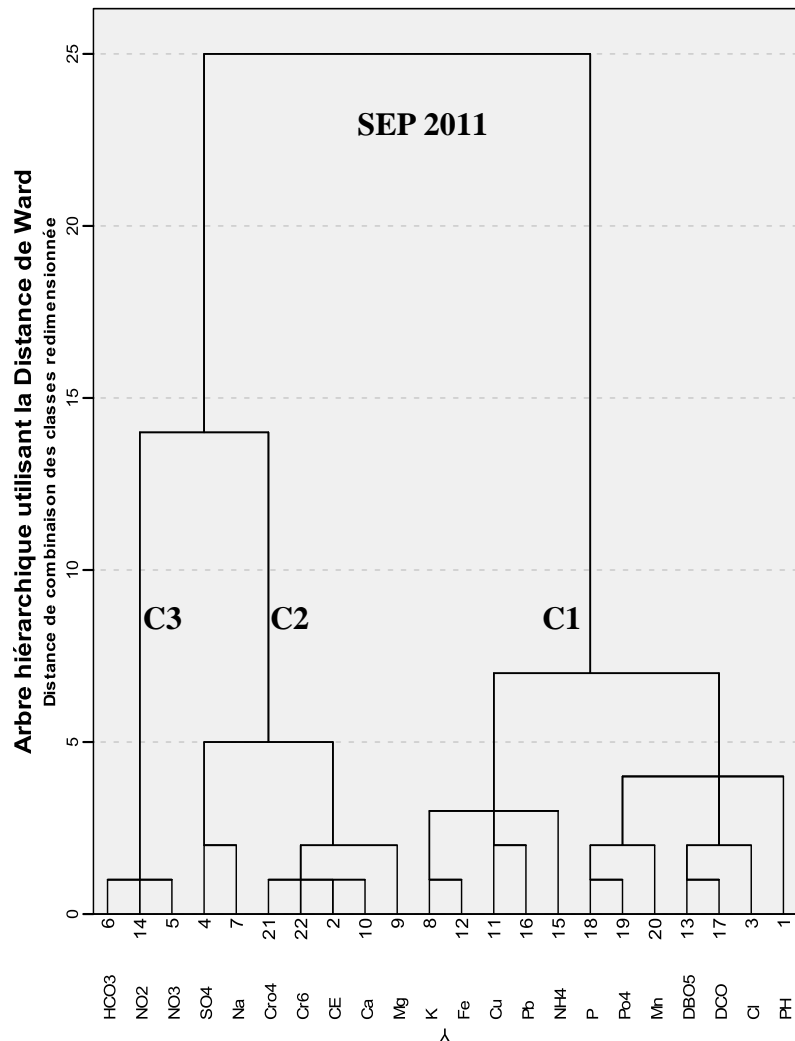


Fig.VI.73: Dendrogramme et tableau de Classification ascendante hiérarchique (C.A.H) des variables des eaux de la plaine d’El-Kantara (SEP 2011). (Auteur, 2022).

La figure (**FIG .VI.73**) de la classification des variables montre tout d'abord le regroupement des paramètres mesurés en deux tendances. Un premier groupe qui s’individualise en deux classes C2 et C3 et un deuxième groupe représenté par la seule classe C1. On remarque, par ailleurs, que les classes se composent par des liaisons variables entre les éléments.

-La troisième classe C3 est représentée par une étroite liaison entre les Bicarbonates, les Nitrates et les Nitrites.

-La deuxième classe C2 est constituée par la liaison qui se fait comme suit:

*Une dépendance entre la liaison étroite de Calcium, conductivité, Chrome et Chromates et Magnésium qui sont tous les deux en relation étroite avec le Sodium et les Sulfates.

-La première classe C1 est la plus importante. Elle est constituée par les liaisons qui se font comme suit:

*Une dépendance entre la liaison étroite de Manganèse, Phosphates et Phosphore, et la liaison étroite de DBO5, DCO et les Chlorures qui sont liées à leurs tour par le Ph.

*Le tout est en relation avec la liaison étroite d'Ammonium, Potassium, Fer, Cuivre et Plomb.

-Campagne Février 2012 :

Appartenance à la classe :
FEV 2012

| Observations | 3 classes |
|--------------|-----------|
| PH | 1 |
| CE | 2 |
| Cl | 2 |
| SO4 | 2 |
| NO3 | 3 |
| HCO3 | 2 |
| Na | 2 |
| K | 2 |
| Mg | 2 |
| Ca | 2 |
| Cu | 2 |
| Fe | 2 |
| DBO5 | 1 |
| NO2 | 3 |
| NH4+ | 3 |
| Pb | 2 |
| DCO | 1 |

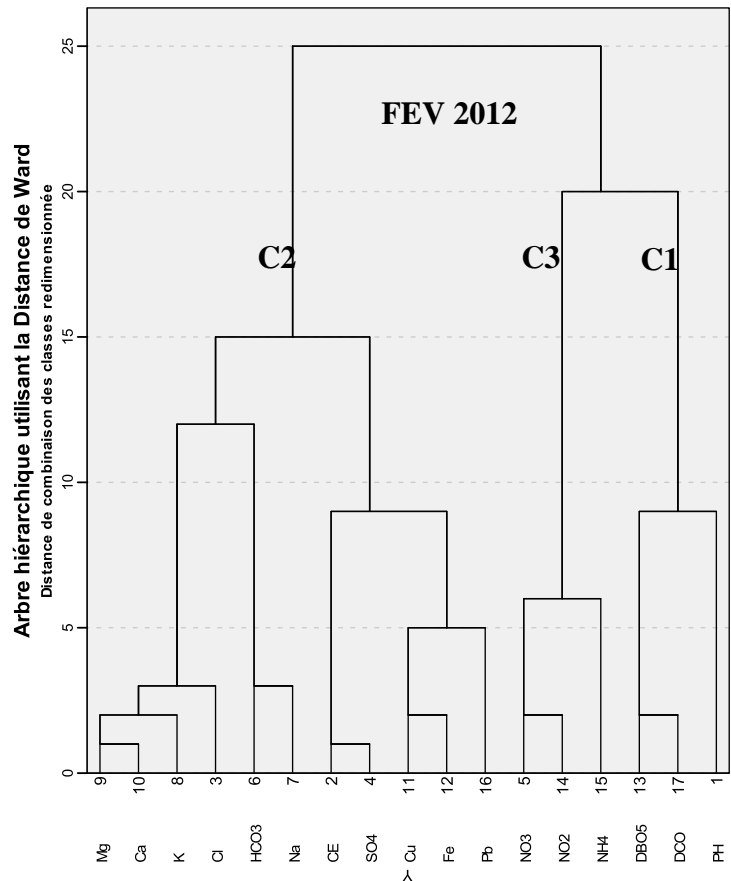


Fig.VI.74: Dendrogramme et tableau de Classification ascendante hiérarchique (C.A.H) des variables des eaux de la plaine d'El-Kantara (FEV 2012). (Auteur, 2022).

La figure (**FIG .VI.74**) de la classification des variables montre tout d'abord le regroupement des paramètres mesurés en deux tendances. Un premier groupe qui s'individualise en deux classes C1 et C3 et un deuxième groupe représenté par la seule classe C2. On remarque, par ailleurs, que les classes se composent par des liaisons variables entre les éléments.

- La troisième classe C3 est représentée par une étroite liaison entre l'Ammonium, les Nitrates et les Nitrites.

- La première classe C1 est constituée par une liaison étroite entre le Ph, la DBO5 et la DCO.
- La deuxième classe C2 qui est la plus importante. Elle est constituée par les liaisons qui se font comme suit:

* Une dépendance entre le Cuivre et Fer qui sont tous deux en relation étroite avec le Plomb ; le Tout en relation avec la conductivité et les sulfates.

* Une dépendance en liaison étroite de Magnésium et Calcium ; le tout avec le Potassium, puis le tout avec les Chlorures et enfin le tout en relation avec les Bicarbonates qui sont en liaison directes avec le Sodium.

-Campagne Septembre 2014 :

Appartenance à la classe : SEP 2014

| Observations | 3 classes |
|--------------|-----------|
| PH | 1 |
| CE | 2 |
| Cl | 1 |
| SO4 | 2 |
| NO3 | 3 |
| HCO3 | 3 |
| Na | 2 |
| K | 1 |
| Mg | 2 |
| Ca | 2 |
| Cu | 1 |
| Fe | 1 |
| NO2 | 3 |
| NH4+ | 1 |
| Pb | 2 |

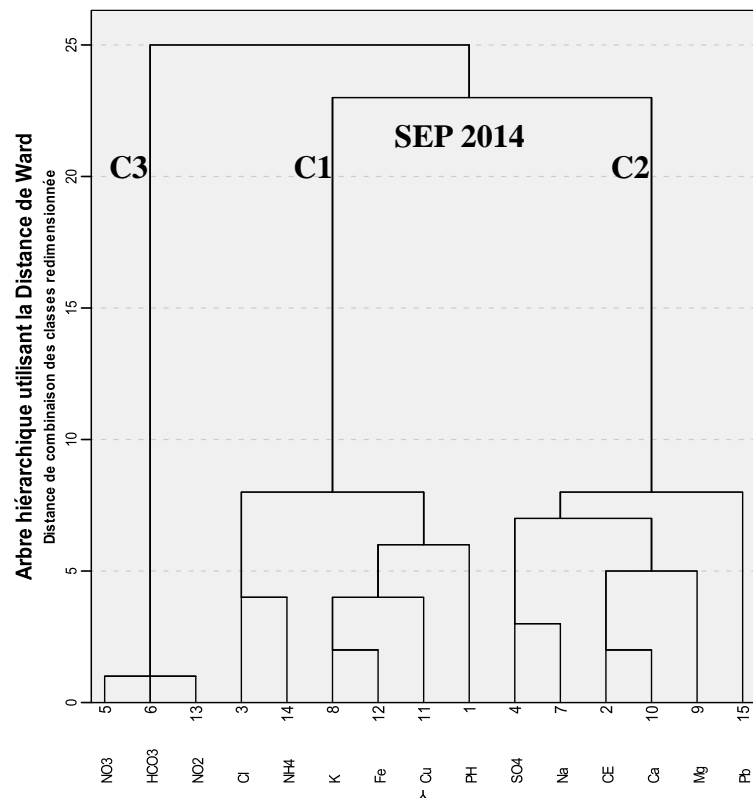


Fig.VI.75: Dendrogramme et tableau de Classification ascendante hiérarchique (C.A.H) des variables des eaux de la plaine d'El-Kantara (SEP 2014). (Auteur, 2022).

La figure (FIG .VI.75) de la classification des variables montre tout d'abord le regroupement des paramètres mesurés en deux tendances. Un premier groupe qui s'individualise en deux classes C2 et C3 et un deuxième groupe représenté par la seule classe C3. On remarque, par ailleurs, que les classes se composent par des liaisons variables entre les éléments.

- La troisième classe C3 qui est similaire à celle de la campagne de SEP 2011. Elle est représentée par une étroite liaison entre les Bicarbonates, les Nitrates et les Nitrites.

-La deuxième classe C2 est constituée par la liaison qui se fait comme suit:

*Une première dépendance entre le Potassium et le Fer, le tout avec le Cuivre, puis le tout avec le Ph.

* Une deuxième dépendance entre les Chlorures et l'Ammonium.

*Le tout est lié entre eux.

-Campagne Février 2015 :

Appartenance à la classe :
FEV 2015

| Observation | 3 classes |
|-------------|-----------|
| PH | 1 |
| CE | 2 |
| Cl | 3 |
| SO4 | 2 |
| NO3 | 2 |
| HCO3 | 1 |
| Na | 1 |
| K | 3 |
| Mg | 3 |
| Ca | 3 |
| Cu | 1 |
| Fe | 1 |
| NO2 | 2 |
| NH4+ | 2 |
| Pb | 1 |

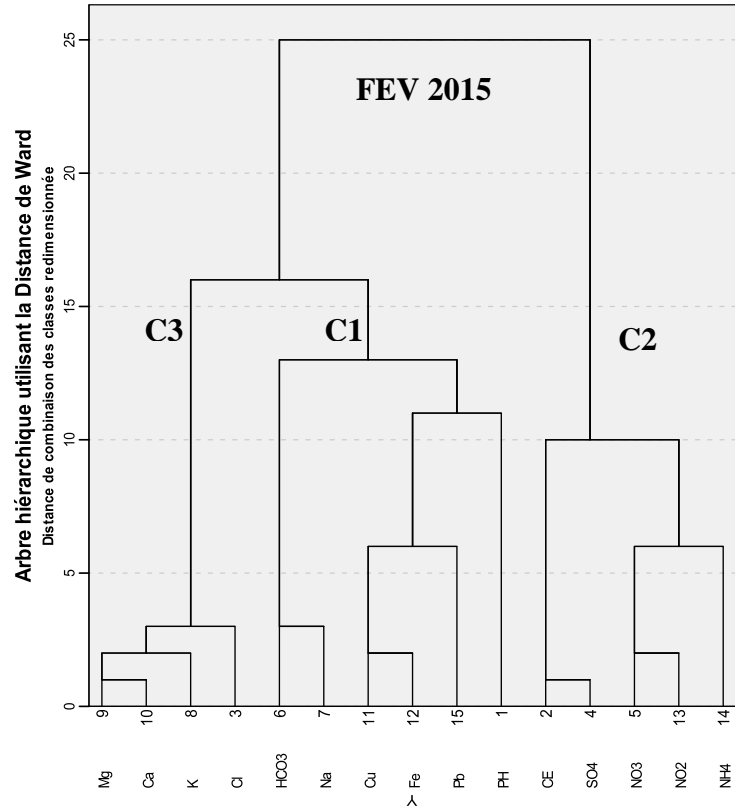


Fig.VI.76: Dendrogramme et tableau de Classification ascendante hiérarchique (C.A.H) des variables des eaux de la plaine d'El-Kantara (FEV 2015). (Auteur, 2022).

La figure (FIG .VI.76) de la classification des variables montre tout d'abord le regroupement des paramètres mesurés en deux tendances. Un premier groupe qui s'individualise en deux classes C1 et C3 et un deuxième groupe représenté par la seule classe C2. On remarque, par ailleurs, que les classes se composent par des liaisons variables entre les éléments.

- La troisième classe C3 est représentée par une étroite liaison entre le Magnésium et Calcium, puis avec le Potassium et en fin le tout avec les Chlorures.

- La deuxième classe C2 qui est constituée par les liaisons qui se font comme suit:

* Une dépendance étroite entre les Nitrates et les Nitrites qui sont tous les deux en relation avec l'Ammonium.

*Le Tout en relation avec la dépendance étroite entre conductivité et les sulfates.

- La première classe C1 qui est la plus importante. Elle est constituée par les liaisons qui se font comme suit:

* Une dépendance étroite entre le Fer et le Cuivre qui sont tous deux en relation avec le Plomb puis le Ph.

*Le Tout en relation avec la dépendance étroite entre les Bicarbonates et le Sodium.

10.2 .3.2-Classification des observations :

Une classification par la même méthode (CAH) a été appliquée aux observations. Le choix des classes est basé sur les mêmes critères de la (CAH) appliquée aux variables tels que :

- La matrice de proximité (Distance euclidienne) en regroupant des différentes classes selon la variabilité des observations (dissimilarité).

- Les Tableaux de bord des paramètres physico-chimiques mesurés (les moyennes des paramètres) ;

Ce qui correspond dans notre cas à l'importance de la minéralisation en premier lieu suivi en deuxième lieu par indicateurs de pollution agricole, ETM et anthropique.

-Campagne Septembre 2011 :

Appartenance à la classe : SEP 2011

| Observations | 3 classes |
|--------------|-----------|
| 1:Case 1 | 1 |
| 2:Case 2 | 2 |
| 3:Case 3 | 1 |
| 4:Case 4 | 3 |
| 5:Case 5 | 2 |
| 6:Case 6 | 1 |
| 7:Case 7 | 1 |
| 8:Case 8 | 3 |
| 9:Case 9 | 3 |
| 10:Case 10 | 3 |
| 11:Case 11 | 2 |

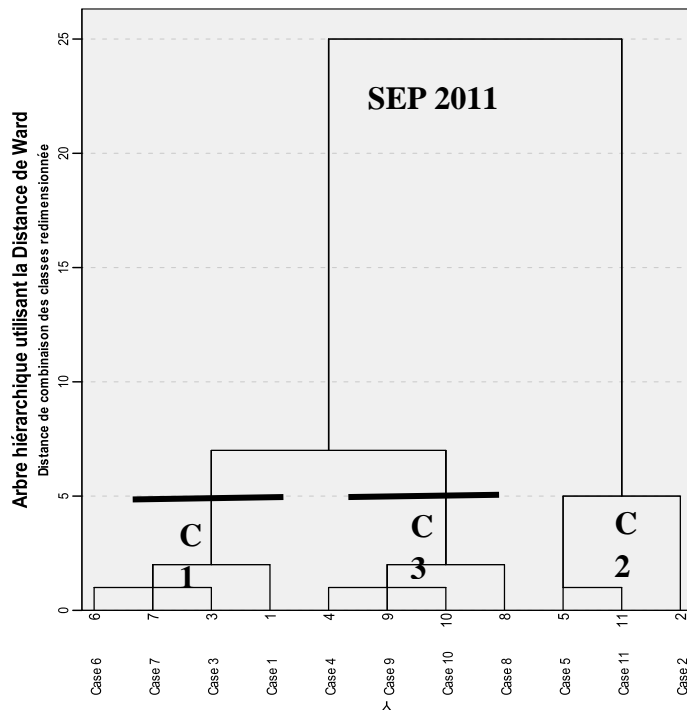


Fig.VI.76.bis: Dendrogramme et tableau de Classification ascendante hiérarchique (C.A.H) des observations des eaux de la plaine d'El-Kantara (SEP 2011). (Auteur, 2022).

*La classe (C1) ; composée par les points d'eau 6, 7, 3 qui sont en dépendance et en liaison avec le point d'eau 6, de minéralisation la plus élevée. Une conductivité et des concentrations en Sulfates, Sodium, Calcium et Magnésium correspondantes aux valeurs extrêmes.

Concernant la pollution :

- Les eaux de cette classe sont très chargées.
- Pour les ETM : On constate que cette classe est caractérisée par les valeurs les plus élevées en Chrome et Chromates.

*La classe (C2) ; composée par les points d'eau 5, 11 qui sont en dépendance relation étroite et en liaison avec le point d'eau 2, de minéralisation moyenne. Une conductivité de l'ordre de 2130 μ .simens. cm-1. et des concentrations en Chlorures et Potassium correspondantes aux valeurs extrêmes.

Concernant la pollution :

- Des valeurs les plus élevées en éléments indicateur de pollution anthropique : DBO5 et DCO.
- Des valeurs les plus élevées en éléments indicateur de pollution agricole : NH_4^+ , P et PO_4 .
- Des valeurs les plus élevées en éléments indicateur de pollution par les ETM : Mn et Pb.

*La classe (C3) ; composée par les points d'eau 4, 9,10 qui sont en dépendance relation étroite et en liaison avec le point d'eau 8, de minéralisation moyenne et égale à la classe précédente. Une concentration en Bicarbonates très remarquable qui atteint 66,7340 mg/l.

Concernant la pollution :

- Cette classe est marquée par des valeurs extrêmes en éléments indicateur de pollution agricole (NO_3 et NO_2) et en éléments indicateur de pollution par les ETM (Fe et Cu).

-Campagne Février 2012 :

*La classe (C1) ; composée par les points d'eau 1 et 9 qui sont en dépendance de faible minéralisation. La valeur repère de la conductivité est de l'ordre de 2305 μ .simens. cm-1. Il s'agit ici des eaux faiblement chargées par rapport à l'ensemble des échantillons analysés en éléments majeurs.

Concernant la pollution, les eaux de cette classe sont très chargées en éléments indicateurs de pollutions anthropiques la DBO5 et la DCO.

*La classe (C3) ; composée par les points d'eau 3 et 4 qui sont en dépendance et d'une minéralisation plus forte. Les valeurs repères de la conductivité et des concentrations en Sulfates, Chlorures, Calcium et Magnésium correspondantes aux valeurs extrêmes.

. Il s'agit ici des eaux fortement chargées par rapport à l'ensemble des échantillons analysés.

Concernant la pollution, les eaux de cette classe sont très chargées en éléments indicateurs de pollutions agricole NO₃, NO₂ et NH₄⁺.

*La classe (C2) est la plus importante. Elle est composée par les points d'eau 8, 11, 6, 5, 2, 10 et 7 qui se sont moyennement minéralisés. La valeur repère de la conductivité est de l'ordre de 2655,71 μ.simens. cm-1. Il s'agit ici des eaux fortement chargées en Bicarbonates et Sodium. Concernant la pollution, les eaux de cette classe sont très chargées en éléments ETM comme le Cuivre, le Fer et le Plomb.

Appartenance à la classe :

| FEV 2012 | |
|--------------|-----------|
| Observations | 3 classes |
| 1:Case 1 | 1 |
| 2:Case 2 | 2 |
| 3:Case 3 | 3 |
| 4:Case 4 | 3 |
| 5:Case 5 | 2 |
| 6:Case 6 | 2 |
| 7:Case 7 | 2 |
| 8:Case 8 | 2 |
| 9:Case 9 | 1 |
| 10:Case 10 | 2 |
| 11:Case 11 | 2 |

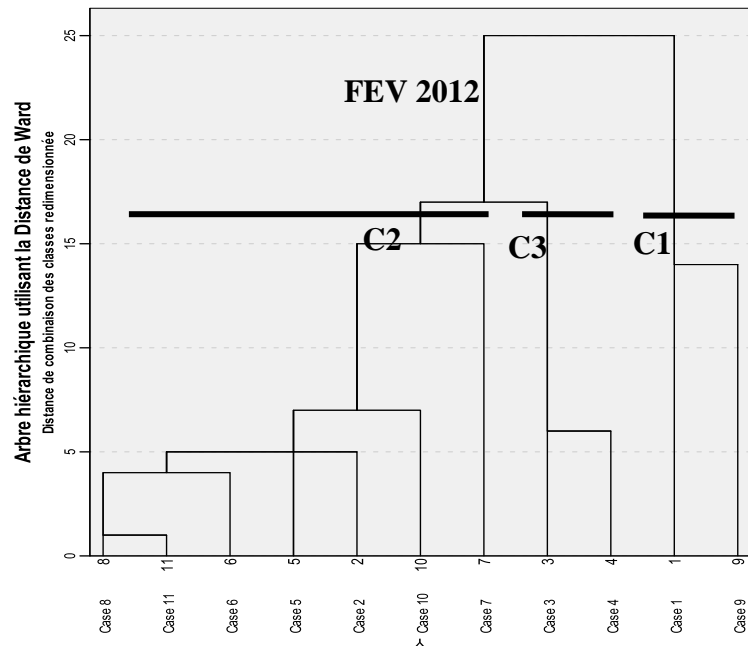


Fig.VI.77: Dendrogramme et tableau de Classification ascendante hiérarchique (C.A.H) des observations des eaux de la plaine d'El-Kantara (FEV 2012). (Auteur, 2022).

-Campagne Septembre 2014 :

*La classe (C1) ; composée par les points d'eau 5, 4 et 6, qui sont en dépendance et d'une minéralisation la plus forte. La conductivité et les concentrations en Sulfates, Sodium, Calcium et Magnésium et Bicarbonates correspondent aux valeurs extrêmes.

Concernant la pollution, les eaux de cette classe sont très chargées en Plomb.

*La classe (C2) composée par les points d'eau 2 et 11, qui sont en dépendance et représentent les eaux de surfaces. Elle se caractérise par une minéralisation faible. La conductivité est de l'ordre de 2150 μ.simens. cm-1. Les concentrations en Chlorures et Potassium correspondent aux valeurs extrêmes.

Concernant la pollution, les eaux de cette classe sont chargées en NH₄⁺, le Cuivre et le Fer.

*La classe (C3) est la plus importante. Elle est composée par les points d'eau 4 , 5,9,10 ,3,8 et 7 .La minéralisation est moyenne avec une valeur repère de la conductivité de l'ordre de 2918,57 μ .simens. cm-1.

Concernant la pollution, cette classe est marquée par des valeurs extrêmes en éléments indicateur de pollution agricole (NO3 et NO2).

Appartenance à la classe SEP 2014

| Observations | 3 classes |
|--------------|-----------|
| 1:Case 1 | 1 |
| 2:Case 2 | 2 |
| 3:Case 3 | 3 |
| 4:Case 4 | 3 |
| 5:Case 5 | 3 |
| 6:Case 6 | 1 |
| 7:Case 7 | 3 |
| 8:Case 8 | 3 |
| 9:Case 9 | 3 |
| 10:Case 10 | 3 |
| 11:Case 11 | 2 |

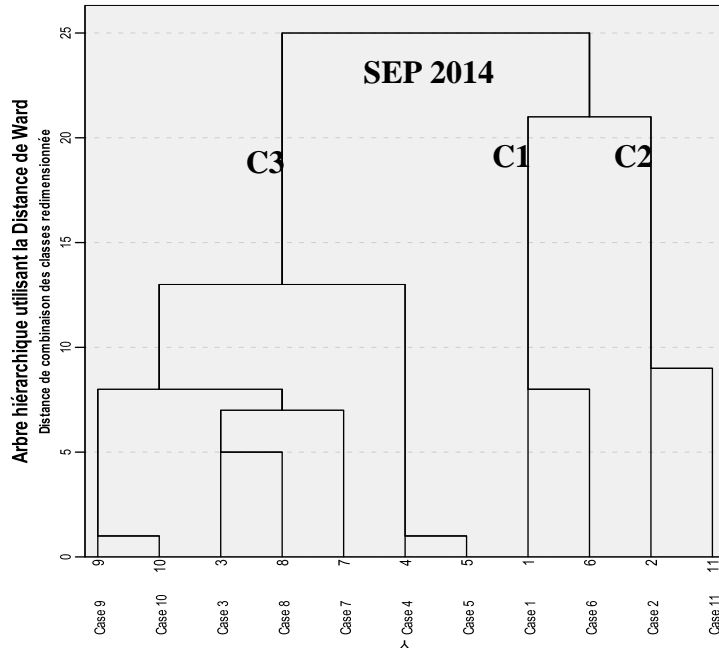


Fig.VI.78: Dendrogramme et tableau de Classification ascendante hiérarchique (C.A.H) des observations des eaux de la plaine d'El-Kantara (SEP 2014).

-Campagne Février 2015

Appartenance à la classe : FEV 2015

| Observations | 3 classes |
|--------------|-----------|
| 1:Case 1 | 1 |
| 2:Case 2 | 2 |
| 3:Case 3 | 3 |
| 4:Case 4 | 3 |
| 5:Case 5 | 2 |
| 6:Case 6 | 2 |
| 7:Case 7 | 2 |
| 8:Case 8 | 2 |
| 9:Case 9 | 1 |
| 10:Case 10 | 2 |
| 11:Case 11 | 2 |

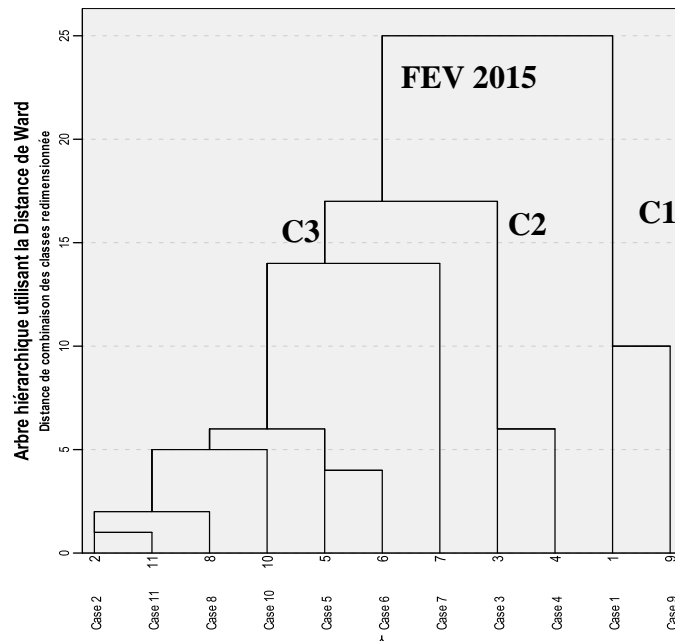


Fig.VI.79: Dendrogramme et tableau de Classification ascendante hiérarchique (C.A.H) des observations des eaux de la plaine d'El-Kantara (FEV 2015). (Auteur, 2022).

*La classe (C1) ; composée par les points d'eau 1 et 9 qui sont en dépendance et de faible minéralisation. La valeur repère de la conductivité est de l'ordre de 2290 μ .simens. cm-1. Il s'agit ici des eaux faiblement chargées par rapport à l'ensemble des échantillons analysés en éléments majeurs.

*La classe (C2) composée par les points d'eau 3 et 4 qui sont en dépendance et d'une minéralisation moyenne. La valeur repère de la conductivité est de l'ordre de 2735,43 μ .simens. cm-1. Elle est marquée par des concentrations élevées en Bicarbonates et sodium. Il s'agit ici des eaux fortement chargées par rapport à l'ensemble des échantillons analysés. Concernant la pollution, les eaux de cette classe sont très chargées en éléments indicateurs de pollutions en ETM comme le Plomb, le Fer et le Cuivre.

*La classe (C3) est la plus importante. Elle est composée par les points d'eau 2, 5,6,7, 8, 10 et 11 qui se sont fortement minéralisés. La valeur repère de la conductivité correspond à l'extrême. Il s'agit ici des eaux fortement chargées en Sulfates, Chlorures, Calcium, Magnésium et Potassium. Concernant la pollution, les eaux de cette classe sont très chargées en éléments indicateur de pollution agricole comme NH_4^+ , NO_2 et NO_3 .

10. 3- Analyse en Composantes Principales (ACP) :

La méthode d'analyse multidimensionnelle utilisée est « l'Analyse en Composante Principale (ACP) ». Elle consiste à exprimer un ensemble de variables en un ensemble de combinaisons linéaires de facteurs non corrélés entre eux, ces facteurs rendant compte d'une fraction de plus en plus faible de la variabilité des données. Cette méthode permet de représenter les données originelles (individus et variables) dans un espace de dimension inférieure à l'espace originel, tout en limitant au maximum la perte d'information. La représentation des données dans des espaces de faible dimension (2 à 3 dimensions) pour faciliter considérablement l'analyse.

10. 3.1- But de la méthode :

L'A.C.P sert à mettre en évidence des similarités ou des oppositions entre variables et à repérer les variables les plus corrélées entre elles (Ouandaogo, 2008). L'utilisation de cette méthode a pour objet de :

- * Etudier et visualiser les corrélations entre les variables,
- * Obtenir des facteurs non corrélés qui sont des combinaisons linéaires des variables de départ.
- * Réduire le nombre des variables à un nombre plus petit de variables « représentatives » et « non corrélées ».
- * Visualiser les observations dans un espace à deux ou trois dimensions.

La clé d'interprétation est simple :

- Chacun des axes résulte d'une composition de n éléments analysés ; ainsi les coordonnées X et Y de chaque point d'eau projeté sur un graphique.
- Les similitudes de faciès physico-chimiques vont se traduire graphiquement par la proximité des points représentatifs de chaque échantillon.

10. 3.2- Utilisation de l'ACP : Il existe plusieurs applications pour l'ACP, parmi lesquelles :

- * L'étude et la visualisation des corrélations entre les variables, afin de limiter le nombre de variables à mesurer par la suite ;
- * L'obtention de facteurs non corrélés qui sont des combinaisons linéaires des variables de départ, afin d'utiliser ces facteurs dans des méthodes de modélisation telles que la régression linéaire, la régression logistique ou l'analyse discriminante ;
- * La visualisation des observations dans un espace à deux ou trois dimensions, afin d'identifier des groupes homogènes d'observations, ou au contraire des observations atypiques.

10. 3. 3- Principe de la méthode :

Les données constituent un tableau à deux entrées :

- Celle des variables chimiques.
- Celle des échantillons qui constituent les unités statistiques (U.S) .Les valeurs des variables pour toutes les unités statistiques peuvent être représentées par un nuage de points, aussi bien dans l'espace des variables que dans l'espace des U.S.

L'ACP peut être considéré comme une méthode de projection qui permet de projeter les observations depuis l'espace à p dimensions des p variables vers un espace à k dimensions ($k < p$). Le principe de l'analyse consiste à chercher des plans de projections sur lesquels la projection s'effectuerait avec un minimum d'erreur. Ces plans sont caractérisés par deux axes factoriels dont le calcul est effectué à partir des variances et des covariances des variables. Le premier axe F1 est tel qu'il détermine le maximum de variance, c'est-à-dire, le maximum d'inertie de nuages. Le second axe F2 est perpendiculaire à F1, de telle façon qu'il exprime le maximum de variance non déterminé par F1. Le troisième axe F3 est perpendiculaire à F1 et F2 et exprime le maximum de variance non exprimée par les deux premiers. En règle générale, on projette les U.S jusqu'à ce que 90% environ de la variance totale soit exprimée. A chaque axe factoriel est associé un facteur et après la mise en évidence des principaux facteurs responsables de la structure observée, l'ACP permet de décrire le nuage graphiquement, soit dans l'espace des variables, soit dans celui des US.

10. 3. 4- L'espace des variables :

Les variables initiales sont projetées dans les différents plans factoriels pour que toutes les variables aient le même poids, on a utilisé une ACP « métrique normée » les variables se projettent dans un cercle de rayon (1) appelé cercle de corrélation. Puisque la distance entre le centre du cercle et une variable est proportionnelle à la corrélation multiplié avec le facteur engendrant l'espace, plus une variable est située près du cercle, mieux elle est représentée dans le plan considéré, et c'est à partir de ce graphique que sont définis les différents facteurs responsables de la structure observée.

10. 3. 5- L'espace des unités statistiques :

Dans les différents plans factoriels, les US possèdent deux nouvelles coordonnées appelées composantes principales. Cette représentation permet de synthétiser, la position des US entre et par rapport aux facteurs, donc aux variables. En plus des descriptions des graphiques, le dépouillement des résultats est nécessaire, à savoir :

- La matrice des coefficients de corrélations, elle donne la liaison qui existe entre toutes les variables deux à deux
- Le tableau, des valeurs propres de facteurs (variance exprimée par chaque variable) : permet d'apprécier l'importance du caractère représenté par un axe factoriel par rapport aux autres. Cette variation peut s'exprimer aussi en %
- Le tableau des vecteurs propre sur chaque axe : ce sont ces coordonnées qu'on utilise pour reporter les points du nuage dans l'espace des variables.
- Le tableau des coefficients de corrélation carrés des variables avec chaque axe factoriel : coefficients permettent d'apprécier l'importance du rôle joué par chaque variable dans la détermination de l'axe. Graphiquement, cette importance est exprimée par le fait qu'une variable est projetée loin de l'origine suivant l'axe factoriel en question.

10. 3. 6- Traitement de données et interprétation des résultats :

Dans cette étude, plusieurs analyses en composantes principales ont été effectuées sur les campagnes d'échantillonnage étalées sur la période d'observation (2011 – 2015). Le traitement de nos données par analyse en composantes principales (ACP) a donc été réalisé à l'aide du logiciel SPSS Version 2019 (version free). L'analyse effectuée est une ACP centrée réduite qui a été réalisée et nous avons pris en considération la règle de Kaiser en A.C.P normée. L'interprétation de cette ACP se fera selon l'ordre d'apparition des résultats donnés par le logiciel.

10. 3. 7- Applications de l’A.C.P. sur les eaux d’El-Kantara et interprétation des résultats :

10. 3. 7 .1-Campagne Septembre 2011 :

Cette ACP a été effectuée sur 11 points d’eau qui sont utilisés pour expliquer la variation de vingt-deux (22) variables. Elle consiste aussi à sélectionner le nombre d’axes factoriels que l’on souhaite conserver. A cet effet il y a quelques règles (H. Aziz, 2014) :

*Règle de Kaiser en A.C.P normée : on ne s’intéresse qu’aux axes avec une valeur propre supérieure à 1 (= inertie d’une variable initiale).

* Règle de l’inertie minimale : On sélectionne les premiers axes afin d’atteindre un % donné d’inertie expliquée (70% par exemple).

* Règle du coude : On observe souvent de fortes valeurs propres au départ puis ensuite de faibles valeurs avec un décrochage dans le diagramme. On retient les axes avant le décrochage.

Le tableau des valeurs propres (**TAB .VI. 37**) qui donne le pourcentage exprimé par chaque facteur, permet de connaître le nombre de facteurs nécessaires pour l’interprétation de ces phénomènes à partir du pourcentage cumulé de ces différents facteurs. Pour le traitement, nous avons pris en considération la règle de Kaiser en A.C.P normée et nous avons choisi cinq axes qui expriment 86,57 % des renseignements (**TAB .VI. 37**) et (**FIG .VI.80**).

TAB .VI. 37: Valeurs propres des axes et leurs contributions (Variance totale expliquée) (SEP 2011).
(Auteur, 2022).

| Composante | Valeurs propres initiales | | | Extraction Sommes des carrés des facteurs retenus | | |
|------------|---------------------------|------------------|-----------|---|------------------|-----------|
| | Total | % de la variance | % cumulés | Total | % de la variance | % cumulés |
| 1 | 8,090 | 36,772 | 36,772 | 8,090 | 36,772 | 36,772 |
| 2 | 5,069 | 23,040 | 59,812 | 5,069 | 23,040 | 59,812 |
| 3 | 2,792 | 12,689 | 72,501 | 2,792 | 12,689 | 72,501 |
| 4 | 1,859 | 8,451 | 80,952 | 1,859 | 8,451 | 80,952 |
| 5 | 1,236 | 5,619 | 86,571 | 1,236 | 5,619 | 86,571 |

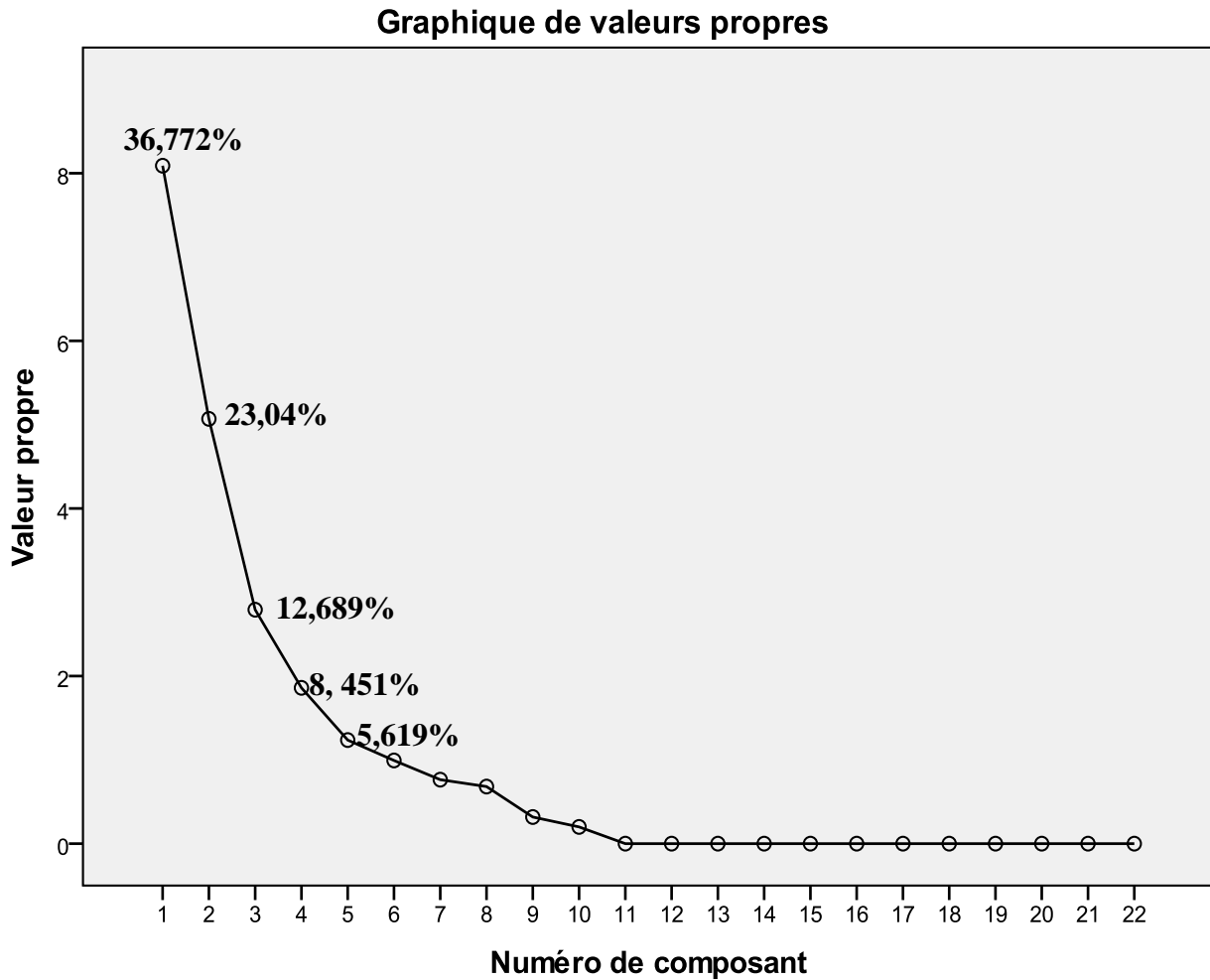


Fig.VI.80: Courbe des valeurs propres et la matrice des variances expliquées (SEP 2011). (Auteur, 2022).

Le calcul a été arrêté à trois axes, à savoir les axes F1, F2 et F3. Ainsi, le facteur F1 exprime 36.772 % de la variance, le facteur F2 : 23.04 %, et le facteur F3 :12.689 %. Ces trois facteurs expriment donc 72.501 % de la variance totale. Donc nous sélectionnons les 3 premières valeurs propres, qui expliquent ensemble plus de 72 % de l’inertie totale du nuage de points.

- Matrice de corrélation (TAB .VI. 38) :

- Le facteur F1 est corrélé positivement aux K, P, Fe , PO4 , Mn ,Cu et négativement aux Cro4 , Cr ⁺⁶ et CE.
- Le facteur F2 est corrélé positivement aux Ca, Mg, DBO5 et négativement aux HCO3, NO2, NO3.
- Le facteur F3 est corrélé positivement aux Cl et SO4.

TAB .VI. 38: Corrélation entre les variables et les axes (SEP 2011). (Auteur, 2022).

| Variables | Facteur 1 | Facteur 2 | Facteur 3 |
|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Cr o4 | ,899 | ,373 | -,036 |
| Cr +6 | ,899 | ,373 | -,036 |
| K | ,873 | -,225 | ,271 |
| P | ,853 | ,257 | ,264 |
| Fe | ,820 | -,111 | -,363 |
| Po4 | ,791 | ,232 | ,357 |
| Mn | ,748 | ,239 | -,094 |
| CE | ,720 | ,534 | ,013 |
| Cu | ,670 | ,005 | -,131 |
| HCO3 | -,418 | -,775 | ,376 |
| NO2 | -,418 | -,775 | ,376 |
| NO3 | -,420 | -,774 | ,375 |
| Ca | -,561 | ,725 | -,168 |
| DBO5 | ,383 | ,716 | ,245 |
| Mg | -,338 | ,716 | ,400 |
| DCO | ,187 | ,559 | ,412 |
| Cl | ,488 | ,402 | ,690 |
| SO4 | -,450 | ,019 | ,601 |
| NH4+ | ,452 | -,289 | ,509 |
| PH | ,403 | ,298 | -,492 |
| Pb | ,443 | -,121 | -,100 |
| Na | -,134 | ,503 | ,414 |

-Analyse des cercles ACP: La projection des variables et des individus sur les plans factoriels F1, F2 et F3 permet d'extraire le maximum d'information (72.501 %). Nous allons limiter notre interprétation à la projection des variables et des individus sur le plan factoriel F1 et F2, puisqu'elle permet d'extraire le maximum d'information (59,812%).

La projection des variables et des individus sur le plan factoriel F1-F2 permet d'extraire les figures (FIG .VI.81) et (FIG .VI.82).

-L'espace des variables :

Presque toutes les variables sont bien représentées dans ce plan factoriel (FIG .VI.81) puisque leurs corrélations avec les axes sont relativement importantes (les projections sont proches du cercle de corrélation), à l'exception des Sulfates, l'Ammonium, le Plomb, le Ph et le Sodium, qui sont marqués par une corrélation moins importante avec les axes. L'interprétation que l'on peut faire des deux premiers axes factoriels est la suivante :

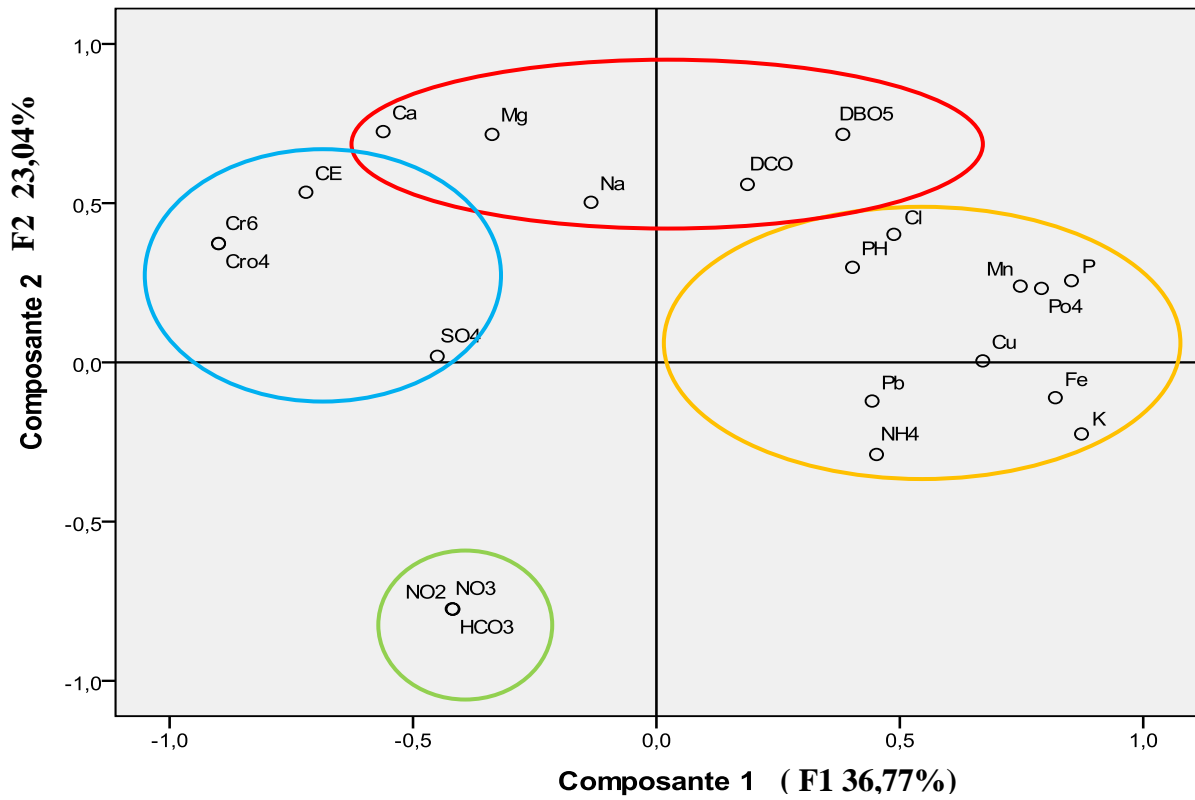


Fig.VI.81: Projection des variables sur le plan factoriel F1-F2 (SEP 2011). (Auteur, 2022).

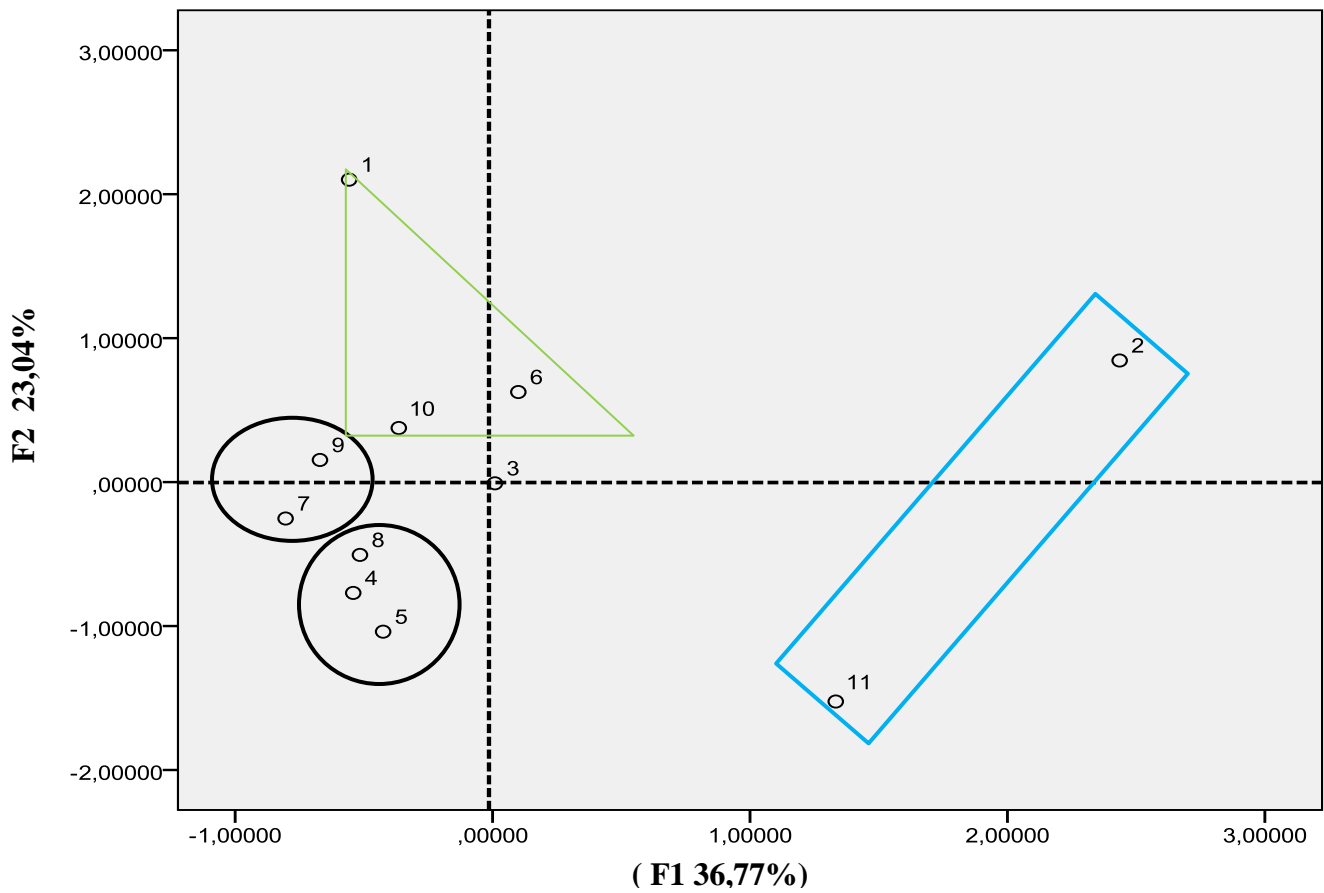


Fig.VI.82: Projection des individus sur le plan factoriel F1-F2 (SEP 2011). (Auteur, 2022).

-L'axe F1 horizontal exprime 36,77% des informations. Ce premier axe factoriel est corrélé positivement aux K, P, PO₄, Fe, Mn, Cu et d'un degré moindre aux Cl, NH₄, Ph et Pb, alors qu'il est corrélé négativement aux Cr⁶⁺, CrO₄, CE et d'un degré moindre aux SO₄. Donc c'est le facteur d'une pollution agricole marquée par le P et PO₄ lié à l'utilisation des engrais et une pollution par les éléments en trace métalliques Pb, Fe, Mn; probablement liée au lessivage de la décharge publique, et qui est en opposition à la pollution par le Cr⁶⁺ et CrO₄.

-L'axe vertical F2 exprime 23,04% des renseignements. Ce deuxième axe factoriel est corrélé positivement aux Ca, Mg, Na, DBO₅ et DCO, Mn, alors qu'il est corrélé négativement aux NO₂, NO₃ et HCO₃. Donc il indique un pôle de forte minéralisation liée à la fois à l'interaction eau-roche et à la pollution anthropique; marquée par les teneurs élevées en DBO₅ et DCO, et qui en relation avec les rejets de la zone urbaine. Ainsi, ce deuxième facteur oppose les eaux bicarbonatées et riche en (NO₃⁻ et NO₂⁻), c'est donc la pollution azotée.

-Etude des individus : L'examen de cet espace factoriel (**FIG .VI.82**) montre des groupements d'individus formant ainsi quatre groupes .

-Groupe 1 : Rassemble les points d'eau 2 et 11 qui sont des eaux de surfaces. Elles se caractérisent par des teneurs élevées en élément indicateur de pollution anthropique.

Groupe 2 : Dans lequel s'inscrivent les points d'eau 1,6 et 10 .Il est marqué par une forte minéralisation en relation avec des concentrations élevées en Calcium, Magnésium et d'un degré moindre par le Sodium. Ainsi, il est déterminé par une pollution d'origine anthropique confirmé par les teneurs élevées en DBO₅ et DCO.

-Groupe 3 : Englobe les points d'eau 7 et 9 de forte pollution par le Chrome et les chromates .

-Groupe 4 : Regroupe les points d'eau 4,5 et 8 qui se caractérisent par des teneurs fortes en nutriments (NO₃⁻ et NO₂⁻) et ion de bicarbonates.

10. 3. 7 .2-Campagne Février 2012 :

Pour cette campagne, nous avons pris en considération la règle de Kaiser en A.C.P normée et nous avons choisi six axes qui expriment 93,209 % des renseignements (**TAB .VI. 39**) et (**FIG .VI.83**).

Le calcul a été arrêté à trois axes, à savoir les axes F1, F2 et F3. Ainsi, le facteur F1 exprime 32,168 % de la variance, le facteur F2 : 21,870 %, et le facteur F3 : 16,169 %. Ces trois facteurs expriment donc 70,206 % de la variance totale. Donc nous sélectionnons les 3 premières valeurs propres, qui expliquent ensemble plus de 70 % de l'inertie totale du nuage de points (**TAB .VI. 39**), (**FIG .VI.83**) et (**TAB .VI. 38**) .

TAB .VI. 39: Valeurs propres des axes et leurs contributions (Variance totale expliquée) (FEV 2012).
(Auteur, 2022).

| Composante | Valeurs propres initiales | | | Extraction Sommes des carrés des facteurs retenus | | |
|------------|---------------------------|------------------|-----------|---|------------------|-----------|
| | Total | % de la variance | % cumulés | Total | % de la variance | % cumulés |
| 1 | 5,469 | 32,168 | 32,168 | 5,469 | 32,168 | 32,168 |
| 2 | 3,718 | 21,870 | 54,037 | 3,718 | 21,870 | 54,037 |
| 3 | 2,749 | 16,169 | 70,206 | 2,749 | 16,169 | 70,206 |
| 4 | 1,706 | 10,036 | 80,243 | 1,706 | 10,036 | 80,243 |
| 5 | 1,125 | 6,616 | 86,858 | 1,125 | 6,616 | 86,858 |
| 6 | 1,080 | 6,351 | 93,209 | 1,080 | 6,351 | 93,209 |

Graphique de valeurs propres

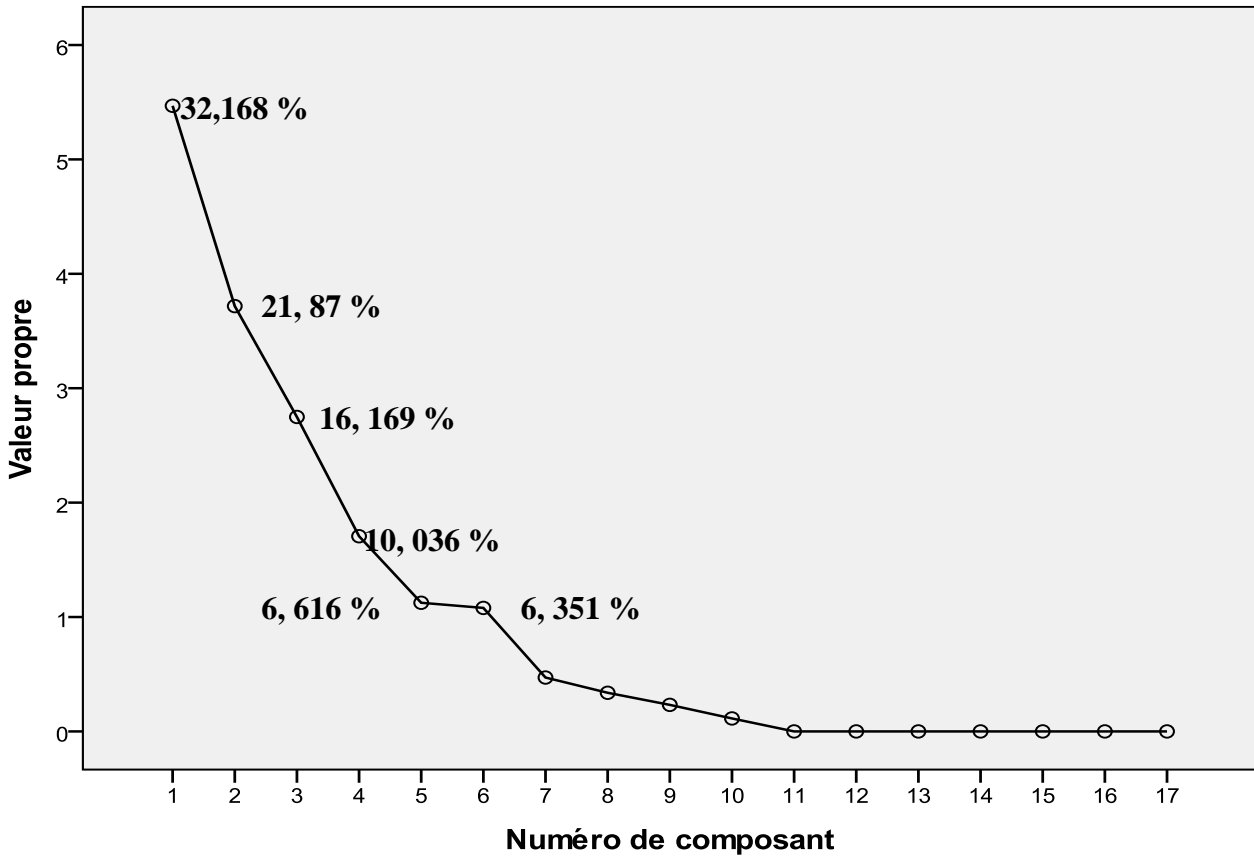


Fig.VI.83: Courbe des valeurs propres et la matrice des variances expliquées (FEV 2012). (Auteur, 2022).

- Matrice de corrélation (TAB .VI. 40) :

- Le facteur F1 est corrélé positivement aux Ca, SO₄, Mg, CE, et d'un degré moindre aux Na et Fe . Alors qu'il est corrélé négativement en degré faible aux DBO₅ et DCO.

- Le facteur F2 est corrélé positivement au HCO₃ et négativement aux NO₂ et NO₃.

- Le facteur F3 est corrélé positivement aux NH4 et Cl et négativement en degré faible aux Fe et Cu.

TAB .VI. 40: Corrélation entre les variables et les axes (FEV 2012). (Auteur, 2022).

| Variables | Facteur 1 | Facteur 2 | Facteur 3 |
|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Ca | ,906 | ,209 | ,195 |
| SO4 | ,831 | -,323 | -,241 |
| Mg | ,807 | ,248 | ,407 |
| CE | ,759 | -,518 | -,187 |
| K | ,720 | ,408 | ,422 |
| Pb | ,662 | ,241 | -,169 |
| Na | ,571 | ,551 | -,136 |
| DCO | -,537 | ,456 | ,465 |
| Fe | ,534 | ,236 | -,504 |
| DBO5 | -,484 | ,338 | ,474 |
| NO2 | ,047 | -,928 | -,071 |
| HCO3 | ,019 | ,830 | ,097 |
| NO3 | ,337 | -,755 | ,448 |
| NH4+ | ,241 | -,237 | ,746 |
| Cl | ,505 | -,083 | ,697 |
| Cu | ,444 | ,384 | -,506 |
| PH | -,110 | ,035 | -,137 |

-Analyse des cercles ACP: La projection des variables et des individus sur les plans factoriels F1, F2 et F3 permet d'extraire le maximum d'information (70,206%). Nous allons limiter notre interprétation à la projection des variables et des individus sur le plan factoriel F1 et F2, puisqu'elle permet d'extraire le maximum d'information (54,037%).

La projection des variables et des individus sur le plan factoriel F1-F2 permet d'extraire les figures (FIG .VI.84) et (FIG .VI.85).

-L'espace des variables :

Presque toutes les variables sont bien représentées dans ce plan factoriel (FIG .VI.84) puisque leurs corrélations avec les axes sont relativement importantes (les projections sont proches du cercle de corrélation), à l'exception des Chlorures, l'Ammonium, le Cuivre, la DBO5 et le Ph, qui sont marqués par une corrélation moins importante. L'interprétation que l'on peut faire des deux premiers axes factoriels est la suivante :

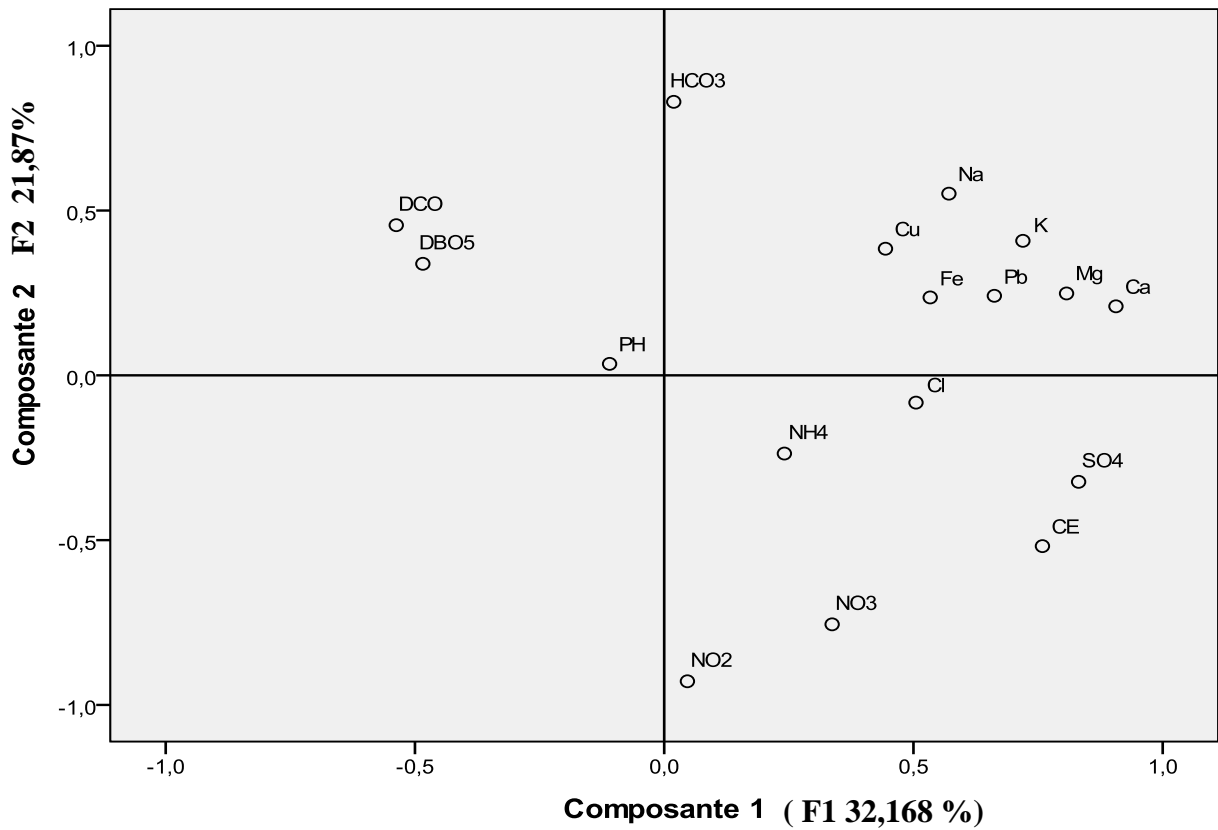


Fig.VI.84: Projection des variables sur le plan factoriel F1-F2 (FEV 2012). (Auteur,

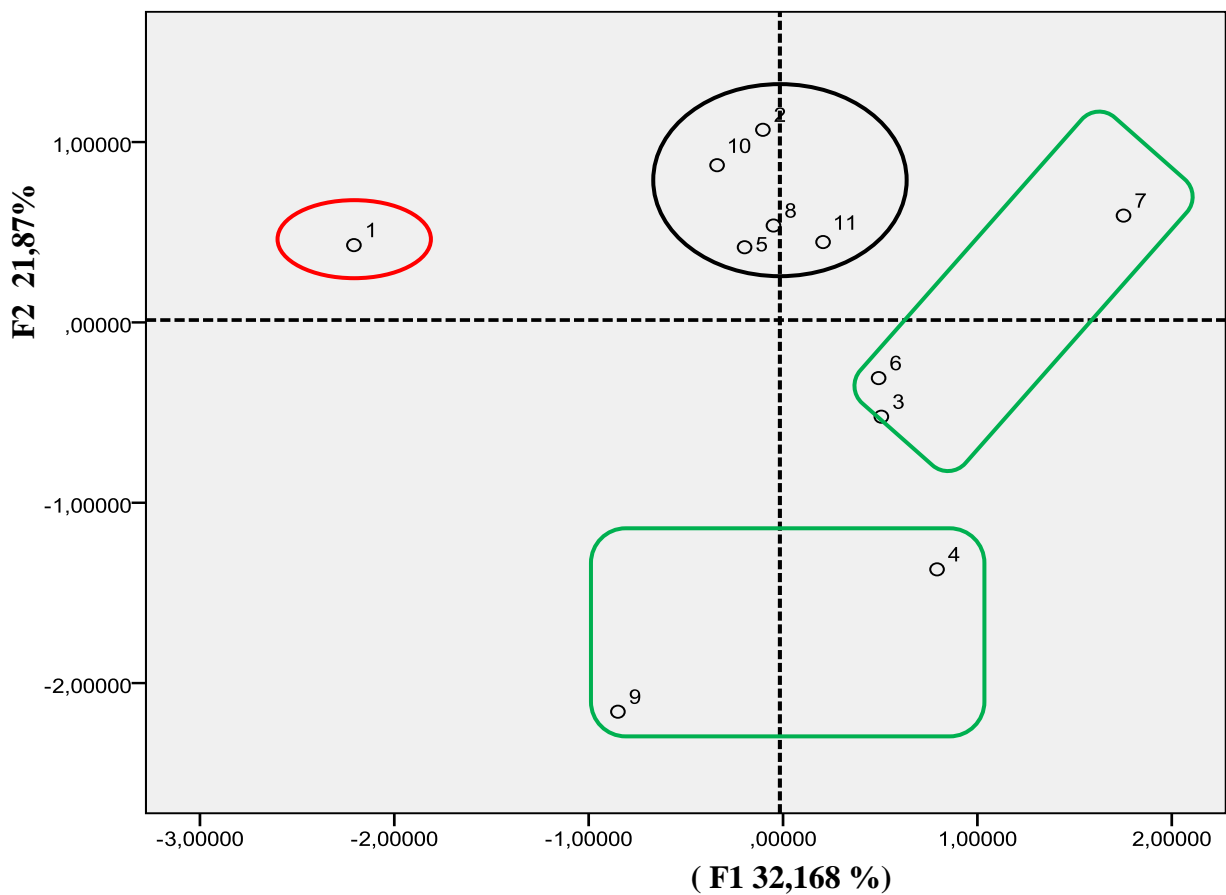


Fig.VI.85: Projection des individus sur le plan factoriel F1-F2 (FEV 2012). (Auteur, 2022).

-L'axe F1 horizontal exprime **32,168** % de la variance. Il montre un regroupement important des variables traduisant une minéralisation importante de l'eau. Donc il indique un pôle de forte minéralisation liée à la fois à l'interaction eau-roche et à la pollution par les éléments métalliques Pb, Fe et Cu liée probablement au lessivage de la décharge publique. Il oppose les eaux riches en DBO5 et DCO.

-L'axe vertical F2 exprime 21,87 % des renseignements. Il est marqué par des eaux riches Bicarbonates et qui sont en opposition à celles riches en Nitrates et Nitrites.

-Etude des individus : Le graphe qui représente la projection des individus, montre une évolution générale de la salinité qui se positionne sur l'axe F1. Le graphe met en évidence quatre familles d'eaux qui s'opposent deux à deux. L'axe F1 montre l'opposition entre le Groupe 1 ; composé par les points d'eaux 1,3 et 6 de forte minéralisation et marqué par des teneurs élevées en Pb, Fe et Cu et le groupe 2 contenant un seul point 1, riche en DBO5 et DCO. tandis que , l'axe F2 indique l'opposition entre le groupe 3 constitué par les points 2,11,5,8 et 10 riche en Bicarbonates ; reflétant probablement l'alimentation de l'aquifère par les calcaires des bordures où les eaux sont bicarbonatées et le groupe 4 composé par les points 4 et 9 riche en nutriments NO2 et NO3.

10. 3. 7 .3-Campagne Septembre 2014 :

Pour cette campagne, respectant la règle de Kaiser en A.C.P normée nous avons pris cinq axes qui expriment 90,284 % des renseignements (**TAB .VI. 41**) et (**FIG .VI.86**).

TAB .VI. 41: Valeurs propres des axes et leurs contributions (Variance totale expliquée) (SEP 2014).
(Auteur, 2022).

| Composante | Valeurs propres initiales | | | Extraction Sommes des carrés des facteurs retenus | | |
|------------|---------------------------|------------------|-----------|---|------------------|-----------|
| | Total | % de la variance | % cumulés | Total | % de la variance | % cumulés |
| 1 | 4,540 | 30,265 | 30,265 | 4,540 | 30,265 | 30,265 |
| 2 | 4,131 | 27,540 | 57,805 | 4,131 | 27,540 | 57,805 |
| 3 | 2,104 | 14,024 | 71,828 | 2,104 | 14,024 | 71,828 |
| 4 | 1,723 | 11,484 | 83,312 | 1,723 | 11,484 | 83,312 |
| 5 | 1,046 | 6,972 | 90,284 | 1,046 | 6,972 | 90,284 |

Le calcul a été arrêté à trois axes, à savoir les axes F1, F2 et F3. Ainsi, le facteur F1 exprime 30,265 % de la variance, le facteur F2 : 27,54 %, et le facteur F3 : 14,024 %. Ces trois facteurs expriment donc 71,828% de la variance totale. Donc nous sélectionnons les 3

premières valeurs propres, qui expliquent ensemble plus de 71 % de l'inertie totale du nuage de points (TAB .VI. 41) , (FIG .VI.86) et (TAB .VI. 42) .

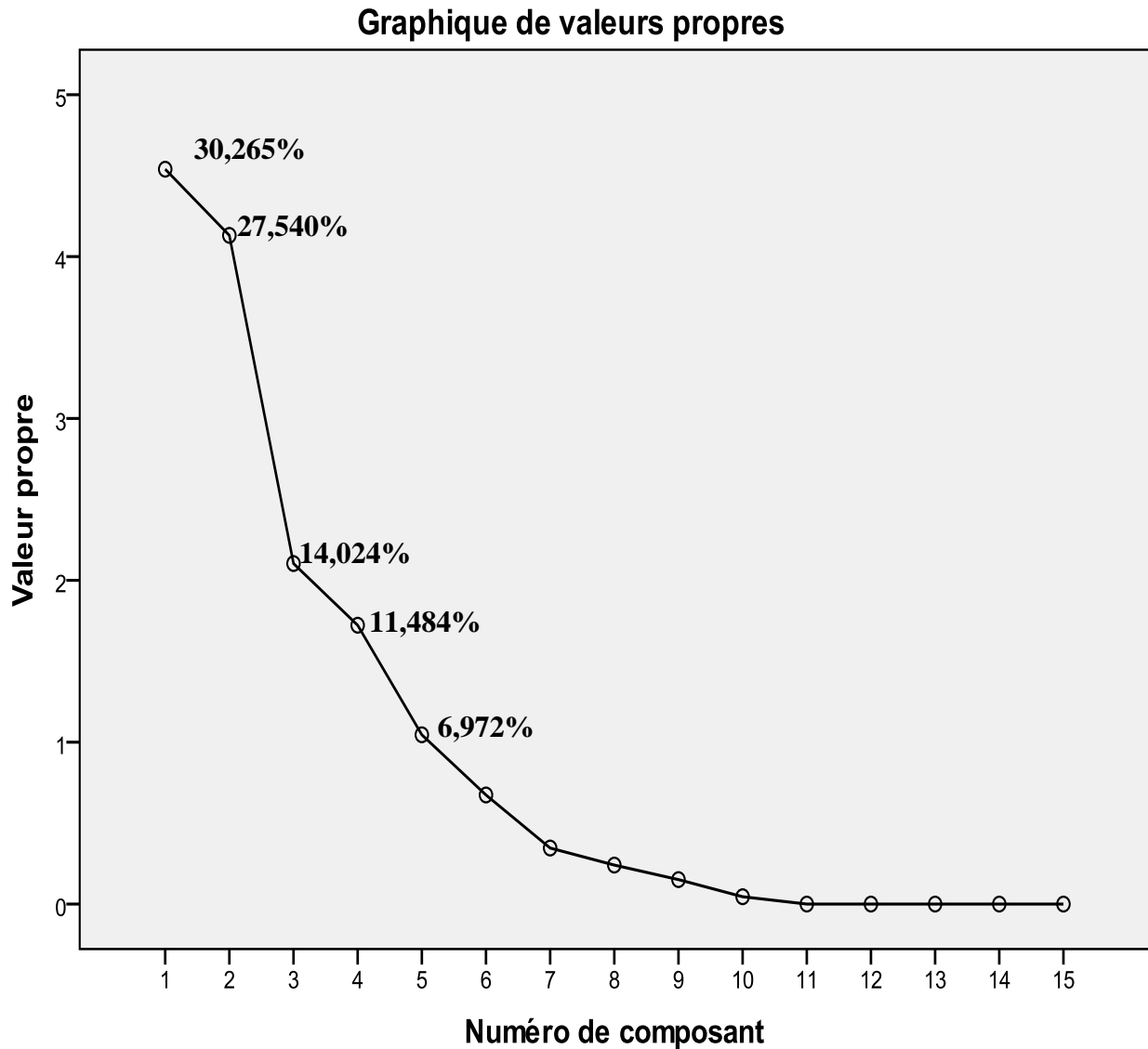


Fig.VI.86: Courbe des valeurs propres et la matrice des variances expliquées (SEP 2014).

(Auteur, 2022).

- Matrice de corrélation (TAB .VI. 42) :

- Le facteur F1 est corrélé positivement aux Ph ,Fe et d'un degré faible aux Cu, K et Mg. . Alors qu'il est corrélé négativement en degré fort aux NO₂, NO₃ et HCO₃.
- Le facteur F2 est corrélé positivement aux K, Fe, NH₄ et Cu et négativement aux CE, Ca, SO₄ .
- Le facteur F3 est corrélé positivement aux Cl ,Na et SO₄.

TAB .VI. 42 : Corrélation entre les variables et les axes (SEP 2014). (Auteur, 2022).

| Variables | Composante | | |
|-----------|------------|-----------|-----------|
| | Facteur 1 | Facteur 2 | Facteur 3 |
| NO2 | -,950 | ,220 | ,044 |
| NO3 | -,936 | ,220 | ,132 |
| HCO3 | -,935 | ,222 | ,133 |
| PH | ,620 | ,022 | -,421 |
| Fe | ,610 | ,601 | -,217 |
| CE | ,103 | -,929 | -,050 |
| Ca | ,162 | -,888 | -,097 |
| K | ,431 | ,768 | ,270 |
| NH4+ | ,004 | ,638 | ,440 |
| Cl | ,433 | ,183 | ,791 |
| SO4 | -,212 | -,598 | ,620 |
| Na | ,392 | -,488 | ,615 |
| Pb | -,176 | -,083 | -,387 |
| Mg | ,481 | -,287 | ,160 |
| Cu | ,509 | ,507 | -,022 |

-Analyse des cercles ACP: La projection des variables et des individus sur les plans factoriels F1, F2 et F3 permet d'extraire le maximum d'information (71,828%). Nous allons limiter notre interprétation à la projection des variables et des individus sur le plan factoriel F1 et F2, puisqu'elle permet d'extraire le maximum d'information (57,805 %).

La projection des variables et des individus sur le plan factoriel F1-F2 permet d'extraire les figures (FIG .VI.87) et (FIG .VI.88).

-L'espace des variables :

Presque toutes les variables sont bien représentées dans ce plan factoriel (FIG .VI.87) puisque leurs corrélations avec les axes sont relativement importantes (les projections sont proches du cercle de corrélation), à l'exception des Chlorures, Sodium, Magnésium et le Plomb qui sont marqués par une corrélation moins importante. L'interprétation que l'on peut faire des deux premiers axes factoriels est la suivante :

-L'axe F1 horizontal exprime 30,265 % de l'information. Il montre un regroupement de la majorité des variables traduisant la minéralisation de l'eau. Ainsi, il présente une opposition entre les eaux riches en Cl , Mg, Na et quelques métaux lourds tels que le Cu et le Fe et les eaux faiblement minéralisées et riche en HCO3 et Nutriments NO2 et NO3.

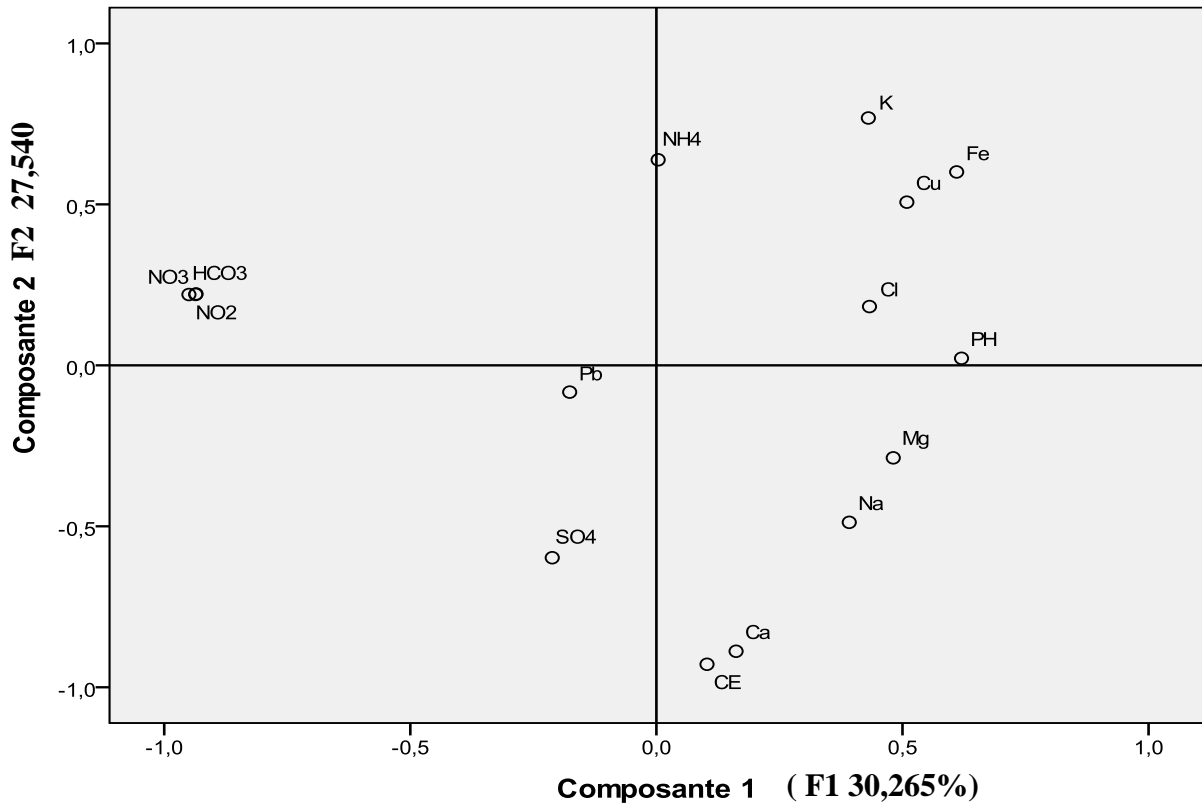


Fig.VI.87: Projection des variables sur le plan factoriel F1-F2 (SEP 2014). (Auteur,

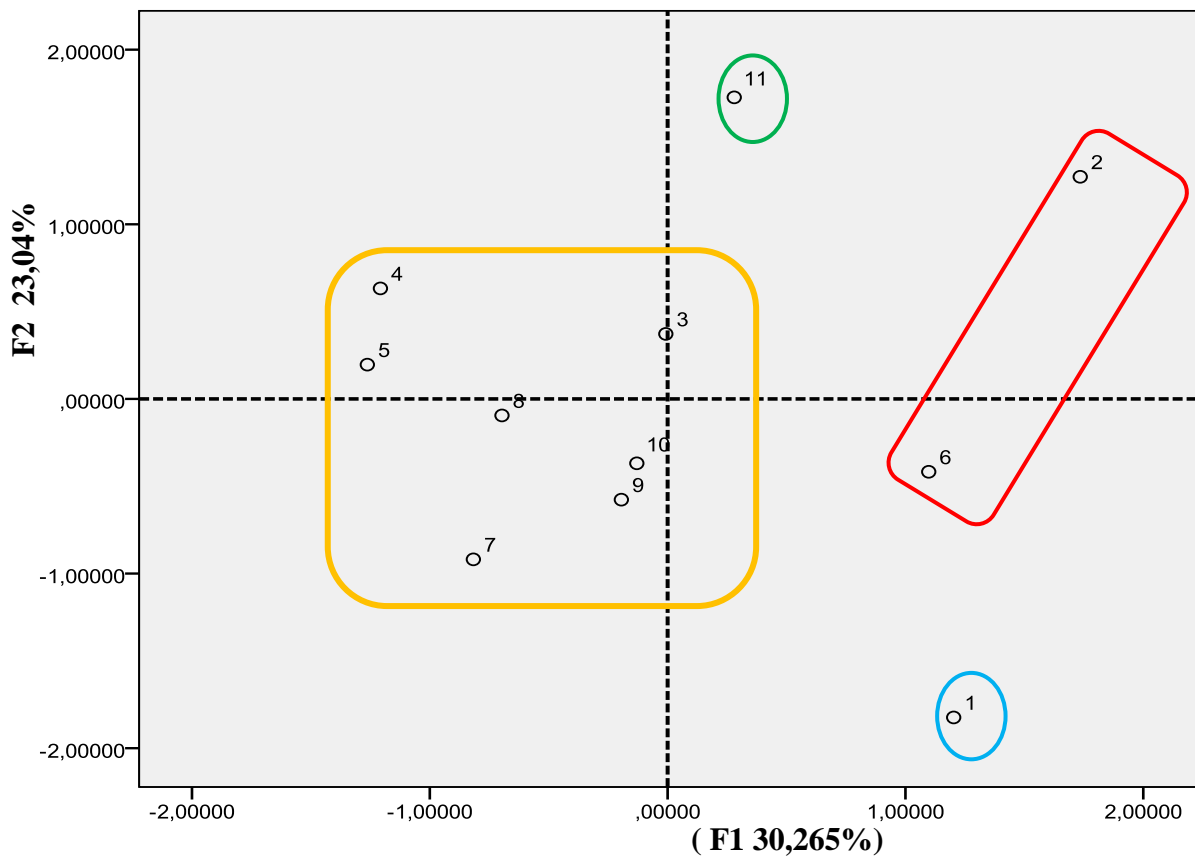


Fig.VI.88: Projection des individus sur le plan factoriel F1-F2 (SEP 2014). (Auteur, 2022).

-L'axe vertical F2 exprime 27,54 % des renseignements. Il est marqué par des eaux riches Ammonium et qui sont en opposition à celles qui ont une conductivité élevée et riche Ca et d'un degré moindre en SO4.

-Etude des individus (FIG .VI.88): Le graphe met en évidence quatre ensembles d'eaux qui s'opposent deux à deux. L'axe F1 indique l'opposition entre le groupe 1 constitué par les points 2, et 6 riches en Cl , Mg, Na et quelques métaux lourds tels que le Cu et le Fe et les eaux faiblement minéralisées et riche en HCO3 et les Nutriments NO2 et NO3. Alors , L'axe F2 montre l'opposition des deux groupes les moins importants. Le groupe 3 où s'inscrit le point d'eau 11 qui se caractérise par des teneurs élevées en NH4 et le groupe 4 composé par le seul point 1 ; riche en Calcium et d'un degré moindre par les Sulfates.

10. 3. 7 .4-Campagne Février 2015 :

Pour cette campagne, nous avons pris en considération la règle de Kaiser en A.C.P normée et nous avons choisi six axes qui expriment 82,694 % des renseignements (TAB .VI. 43) et (FIG .VI.89).

Le calcul a été arrêté à trois axes, à savoir les axes F1, F2 et F3. Ainsi, le facteur F1 exprime 33,862 % de la variance, le facteur F2 : 23,394 %, et le facteur F3 : 15,268 %. Ces trois facteurs expriment donc 72,525 % de la variance totale. Donc nous sélectionnons les 3 premières valeurs propres, qui expliquent ensemble plus de 72 % de l'inertie totale du nuage de points (TAB .VI. 43) , (FIG .VI.89) et (TAB .VI. 44) .

TAB .VI. 43: Valeurs propres des axes et leurs contributions (Variance totale expliquée) (FRV 2015).
(Auteur, 2022).

| Composante | Valeurs propres initiales | | | Extraction Sommes des carrés des facteurs retenus | | |
|------------|---------------------------|------------------|-----------|---|------------------|-----------|
| | Total | % de la variance | % cumulés | Total | % de la variance | % cumulés |
| 1 | 5,079 | 33,862 | 33,862 | 5,079 | 33,862 | 33,862 |
| 2 | 3,509 | 23,394 | 57,256 | 3,509 | 23,394 | 57,256 |
| 3 | 2,290 | 15,268 | 72,525 | 2,290 | 15,268 | 72,525 |
| 4 | 1,525 | 10,169 | 82,694 | 1,525 | 10,169 | 82,694 |

- Matrice de corrélation (TAB .VI. 44) :

- Le facteur F1 est corrélé positivement aux Ca ,Mg,K,SO4, CE, Pb,Na et Cl d'un degré faible aux Fe et .
- Le facteur F2 est corrélé positivement aux NO2, NO3 et d'un degré moindre au NH4 et négativement aux HCO3.

- Le facteur F3 est corrélé positivement au Fe et négativement au NH₄.

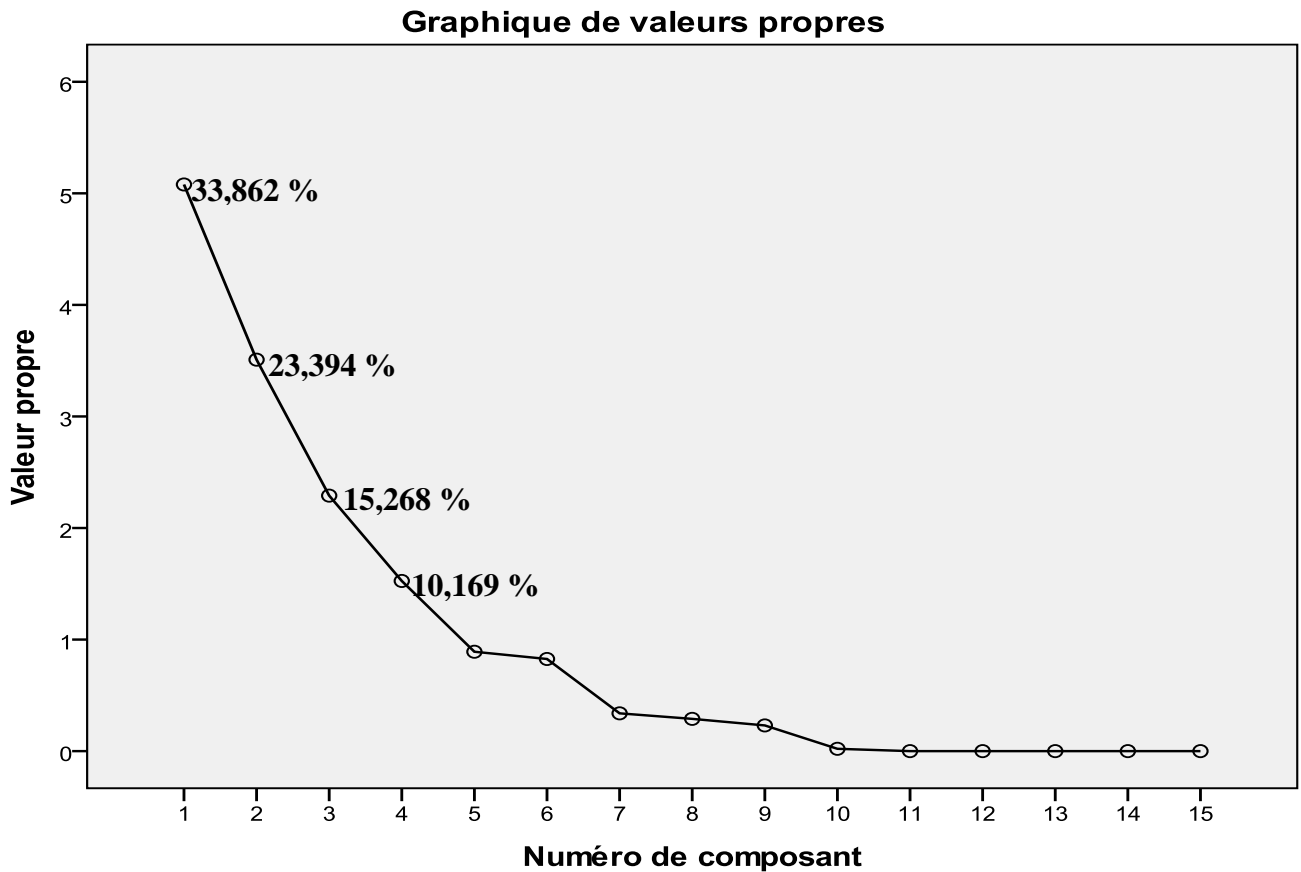


Fig.VI.89: Courbe des valeurs propres et la matrice des variances expliquées (FEV 2015). (Auteur, 2022).

TAB .VI. 44: Corrélation entre les variables et les axes (FEV 2015). (Auteur, 2022).

| Variables | Composante | | |
|-----------|------------|-----------|-----------|
| | Facteur 1 | Facteur 2 | Facteur 3 |
| Ca | ,949 | -,040 | -,020 |
| Mg | ,885 | ,060 | -,336 |
| K | ,797 | -,209 | -,378 |
| SO4 | ,722 | ,271 | ,437 |
| CE | ,645 | ,467 | ,372 |
| Pb | ,638 | -,232 | ,244 |
| Na | ,605 | -,523 | -,188 |
| Cl | ,603 | ,385 | -,308 |
| NO3 | ,306 | ,886 | -,067 |
| NO2 | -,117 | ,822 | ,329 |
| HCO3 | ,149 | -,736 | -,498 |
| NH4+ | ,310 | ,575 | -,569 |
| Fe | ,501 | -,343 | ,654 |
| Cu | ,428 | -,478 | ,556 |
| PH | -,166 | -,117 | ,307 |

-Analyse des cercles ACP: La projection des variables et des individus sur les plans factoriels F1, F2 et F3 permet d'extraire le maximum d'information (72,525 %). Nous allons limiter notre interprétation à la projection des variables et des individus sur le plan factoriel F1 et F2, puisqu'elle permet d'extraire le maximum d'information (57,256 %).

La projection des variables et des individus sur le plan factoriel F1-F2 permet d'extraire les figures (**FIG .VI.90**) et (**FIG .VI.91**).

-L'espace des variables :

Presque toutes les variables sont bien représentées dans ce plan factoriel (**FIG .VI.87**) puisque leurs corrélations avec les axes sont relativement importantes (les projections sont proches du cercle de corrélation), à l'exception du PH et le Cuivre qui sont marqués par une corrélation moins importante. L'interprétation que l'on peut faire des deux premiers axes factoriels est la suivante :

-L'axe F1 horizontal exprime **33,862** % de la variance. Il montre un regroupement de la majorité des variables traduisant la minéralisation de l'eau. Donc il indique un pôle de forte minéralisation liée à l'interaction eau-roche et de pollution par les éléments métalliques Pb, Fe et Cu liée probablement au lessivage de la décharge publique.

-L'axe vertical F2 exprime 23,394 % des renseignements. Il est déterminé par la pollution azotée (NO₂ et NO₃) et d'un degré moindre NH₄. Ainsi, il présente une opposition aux eaux riches en Bicarbonates.

-Etude des individus (FIG .VI.88): Le graphe met en évidence quatre ensembles d'eaux qui s'opposent deux à deux. L'axe F1 indique l'opposition entre le groupe 1 constitué par les points 3, 5, 6 et 7 ; de minéralisation importante avec une pollution liée à la présence de quelques métaux lourds tels que le Cu, le Pb et le Fe et le groupe 2 constituée par le seul point d'eau 1 de faible minéralisation. Alors, L'axe F2 indique l'opposition entre le groupe 3 où s'inscrivent les deux points d'eau 4 et 9 ; qui se caractérise par des teneurs élevées en éléments azotés NO₂, NO₃ et NH₄ et le groupe 4 composé par les points d'eaux 2, 8, 10 et 11 ; riche en HCO₃.

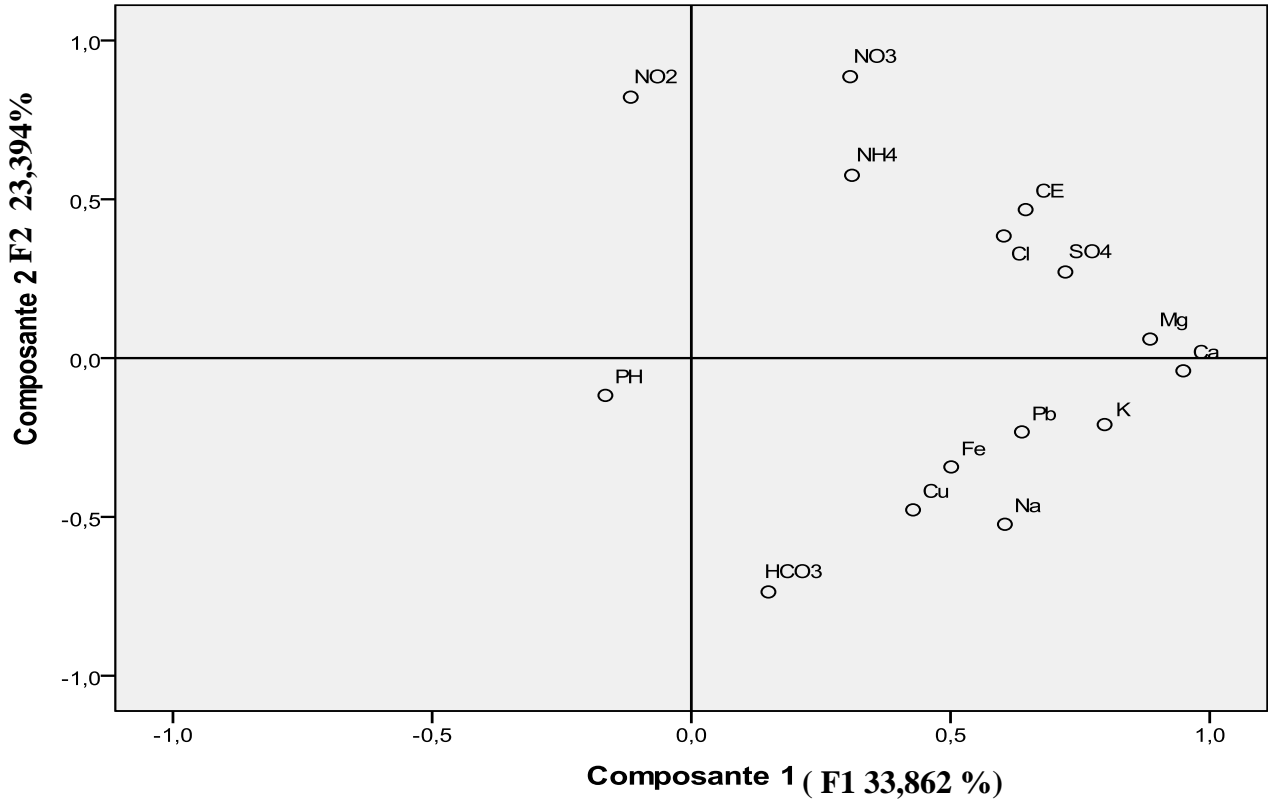


Fig.VI.90: Projection des variables sur le plan factoriel F1-F2 (FEV 2015). (Auteur, 2022).

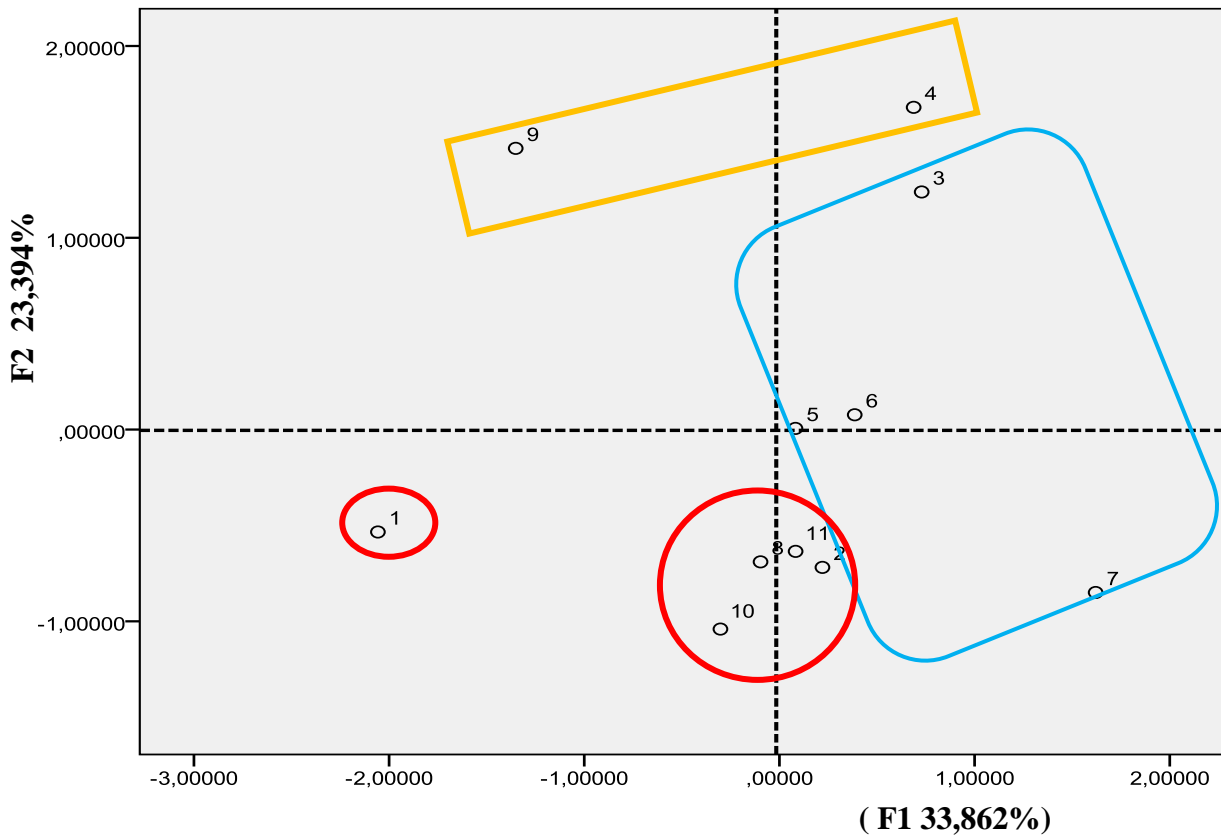


Fig.VI.92: Projection des individus sur le plan factoriel F1-F2 (SEP 2011). (Auteur, 2022).

10.4- La méthode des cartes auto-organisatrices de Kohonen (SOM, pour self-organizing maps) des réseaux de neurones artificiels:

10.4 .1-Présentation générale :

10.4 .1 .1-Un réseau de neurones artificiels : Les cartes auto-organisatrices de Kohonen (SOM, pour Self-Organizing Maps) font partie de la famille de techniques issues de la recherche en intelligence artificielle appelée « réseaux de neurones artificiels ». Les chercheurs ayant développé ces techniques s'inspirent des facultés du cerveau pour élaborer des systèmes d'apprentissage au sein des ordinateurs grâce à des traitements de valeurs numériques (on parle de « machine learning » en anglais). Ils s'inspirent d'une description simplifiée du fonctionnement du système nerveux.

Les neurones sont des cellules élémentaires de ce système, capables de transmettre des signaux électriques et chimiques. Ils s'organisent en réseaux, dans lesquels ils sont liés les uns aux autres, de proche en proche, par des synapses. Ainsi, les informations circulent dans le cerveau en variant d'intensité selon la réponse de chaque neurone. Il en résulte une activation plus ou moins forte des différentes zones, qui traduit le traitement de l'information initiale à l'intérieur du cerveau. L'apprentissage va donc consister à ajuster les réponses de chaque neurone et la transmission des informations vers les autres neurones. Dans les réseaux de neurones artificiels, chaque neurone est lié aux données d'entrée et aux autres neurones par des valeurs numériques. Ces valeurs numériques, appelées « poids » sont ajustées pendant une phase d'apprentissage, puis utilisées pour prédire des valeurs de sorties, ou simplement pour décrire les données. Il existe deux familles de réseaux de neurones : les réseaux de neurones supervisés et les réseaux de neurones non-supervisés. Les modèles supervisés sont des modèles prédictifs dans lesquels le jeu de données d'apprentissage est utilisé pour ajuster les réponses du modèle. La phase d'apprentissage va alors consister à modifier les poids de façon à ce que les valeurs de sortie ressemblent le plus possible aux valeurs de sortie du jeu d'apprentissage. Le modèle pourra ensuite être utilisé pour prédire des valeurs de sortie à partir d'un jeu ne contenant que des valeurs d'entrées (prédicteurs). Dans le cas des SOM, qui font partie des réseaux non-supervisés, les poids seront modifiés de façon à décrire les différences entre les valeurs d'entrée, mais il n'y aura pas de valeur de sortie. Il s'agit dans ce cas de classer les données d'entrée de façon à ce que le réseau de neurones décrive au mieux les différences entre celles-ci.

10.4 .1 .2- Présentation et fonctionnement de La carte auto-organisatrice de Kohonen (SOM) : La carte auto-organisatrice de Kohonen (SOM) est un outil puissant pour le partitionnement des données (Kohonen, 1998) (**FIG .VI.93**).

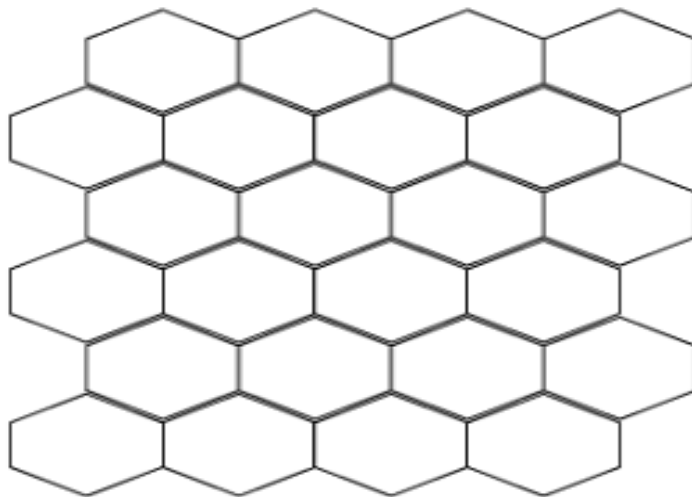


Fig.VI. 93: Représentation d'une SOM, celle-ci comprend 24 cellules (ou neurones), six rangées horizontales, et quatre rangées verticales.

Les SOM se présentent sous la forme de cellules (neurones), le plus souvent hexagonales, disposées sur un plan (**FIG .VI.93**). Le jeu de données est présenté sous la forme d'un tableau de données, comprenant m échantillons (lignes) et n espèces (colonnes). Chacun des neurones (ou cellules) est lié à chaque variable par un poids. Ce poids peut être considéré comme une valeur virtuelle de la variable, on parle donc de *vecteurs virtuels* pour les valeurs d'un neurone. Ainsi, la SOM représentée dans la figure (**FIG .VI.93**) est définie par un tableau de valeurs de 24 lignes (une par neurone) et n variables (équivalentes aux n variables ou espèces du tableau de données).

10.4 .1 .3- Utilisation des cartes auto-organisatrices (SOM) de Kohonen :

Il existe plusieurs applications, parmi lesquelles :

- *La mise en évidence de la classification des paramètres physico-chimique des eaux surtout saisonnière.
- * La compréhension et la visualisation de la distribution spatiale et temporelle de la qualité physico-chimique des eaux.
- * La modélisation et résolution des problèmes environnementaux.
- *La carte topologique présente divers avantages par rapport aux méthodes linéaires et de classification habituellement utilisées pour extraire des groupes d'échantillons recueillis,

comme l'Analyse en Composantes Principales (ACP), l'Analyse des Correspondances (AC) et la classification hiérarchique (CAH). Leurs limitations sont bien connues. Par exemple, pour chacune d'elle, une forte distorsion est observée lorsqu'il y a des relations non-linéaires entre les variables (Giraudel et Lek, 2001).

10. 4. 1.4- Principe de la méthode :

Les cartes auto-organisatrices de Kohonen (SOM) possèdent la propriété de préserver la topologie des données ainsi que la relation de distance entre elles. Les cartes SOM sont des méthodes de réseaux de neurones artificiels à apprentissage non supervisé qui constituent une classe importante des réseaux de neurones (Cottrell et *al.*, 2003). Ces réseaux sont composés d'une grille de d neurones (ou nœuds, ou unités) auxquels seront présentés les échantillons (les vecteurs d'entrées) (Vesanto et *al.*, 2000). Le choix du paramètre d (la dimension de la carte) se fait a priori. En général, on choisit un nombre de cellules très largement inférieur à celui du nombre m d'échantillons (une règle empirique veut que le nombre de neurones soit approximativement $5 \times m^{0.543}$). Chaque neurone de la grille est relié aux vecteurs d'entrées par l'intermédiaire de d synapses et d vecteurs poids w . Le vecteur w est appelé vecteur prototype ou référent et représente le neurone de la carte dans l'espace des données. Le plus proche des référents pour une donnée est appelé le BMU (the Best Matching Unit).

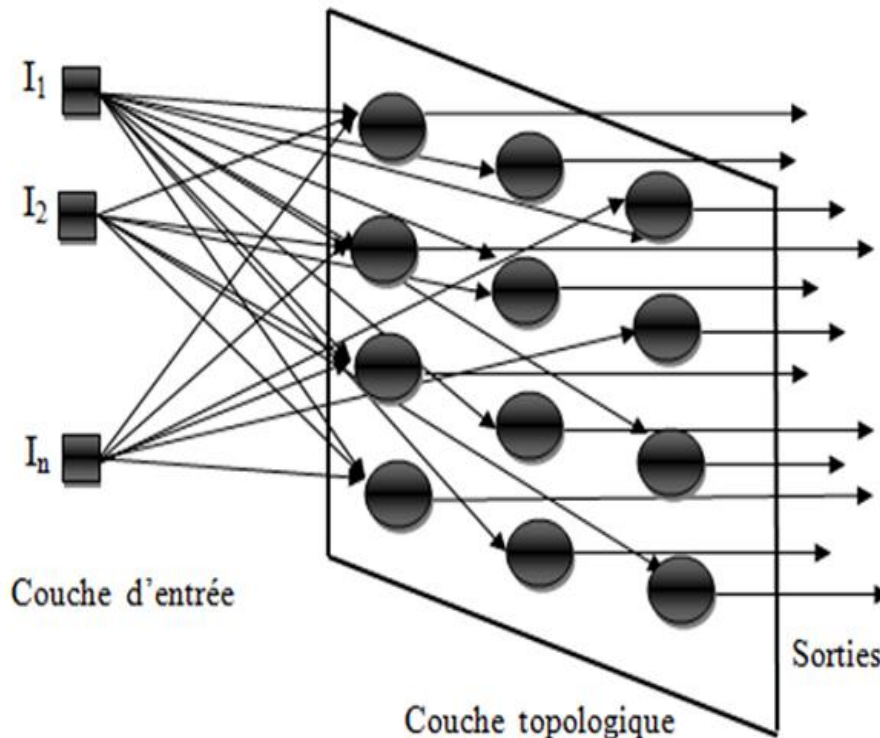


Fig.VI. 94: Structure d'une carte topologique auto-organisatrice de Kohonen (SOM). (Ousmana et al, 2016)

Pour valider la classification SOM , on utilise généralement deux mesures de la qualité de la représentation des données par la SOM : erreur topologique (TE) et erreur de quantification (QE).

-Erreur de quantification (quantization error) Q_e : Cet indice mesure la distance moyenne entre chaque donnée et son BMU (Kohonen, 2001). Plus la valeur de Q_e est petite, plus la qualité de l'algorithme SOM est meilleur. Son expression est donnée par la formule :

$$Q_e = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \|x^{(k)} - w(x^{(k)})\|^2$$

où N est le nombre des données, $x^{(k)}$ est le k -ième individu et $w(x^{(k)})$ est le BMU de l'individu $x^{(k)}$

-Erreur topographique (Topologique) T_e : L'erreur topographique est la proportion de vecteurs réels pour lesquels le deuxième vecteur virtuel le plus similaire (deuxième BMU) ne correspond pas à une cellule voisine du BMU. Il s'agit de vérifier que ce sont bien les cellules les plus proches qui représentent les communautés les plus similaires. Donc Ce critère décrit la façon dont la SOM préserve la topologie de l'ensemble des données étudiées (Cabanes et al., 2011). Elle mesure la proportion des données ayant les deux premiers BMU non adjacents. Contrairement à l'erreur de Quantification, T_e prend en compte la structure de la carte SOM (Uriarte et al., 2005).

10.4 .2-Traitement de données et présentation de l'algorithme d'apprentissage:

Dans cette étude, un essai d'application de la méthode des cartes auto-organisatrices de Kohonen (SOM, pour self-organizing maps) des réseaux de neurones artificiels a été effectué sur deux campagnes d'échantillonnage étalées sur la période d'observation (2011 – 2012). Le traitement de nos données par cette méthode a donc été réalisé à l'aide du logiciel Matlab Version 2019 (Version free). La base de données utilisée, dans le cadre de ce travail, est constituée de 14 paramètres physico – chimiques réalisés sur 22 échantillons des eaux de la plaine d'El-Kantara.

10.4 .2.1-Présentation de l'algorithme d'apprentissage : Les différentes étapes sont présentées dans la figure (**FIG .VI.95**). Dans un premier temps, une analyse linéaire des gradients d'abondance des paramètres, similaire à une Analyse en Composantes Principales est réalisée. Cette analyse, grâce au calcul des deux vecteurs propres principaux, nous permet d'initialiser les valeurs virtuelles de la SOM sur deux dimensions, de façon linéaire.

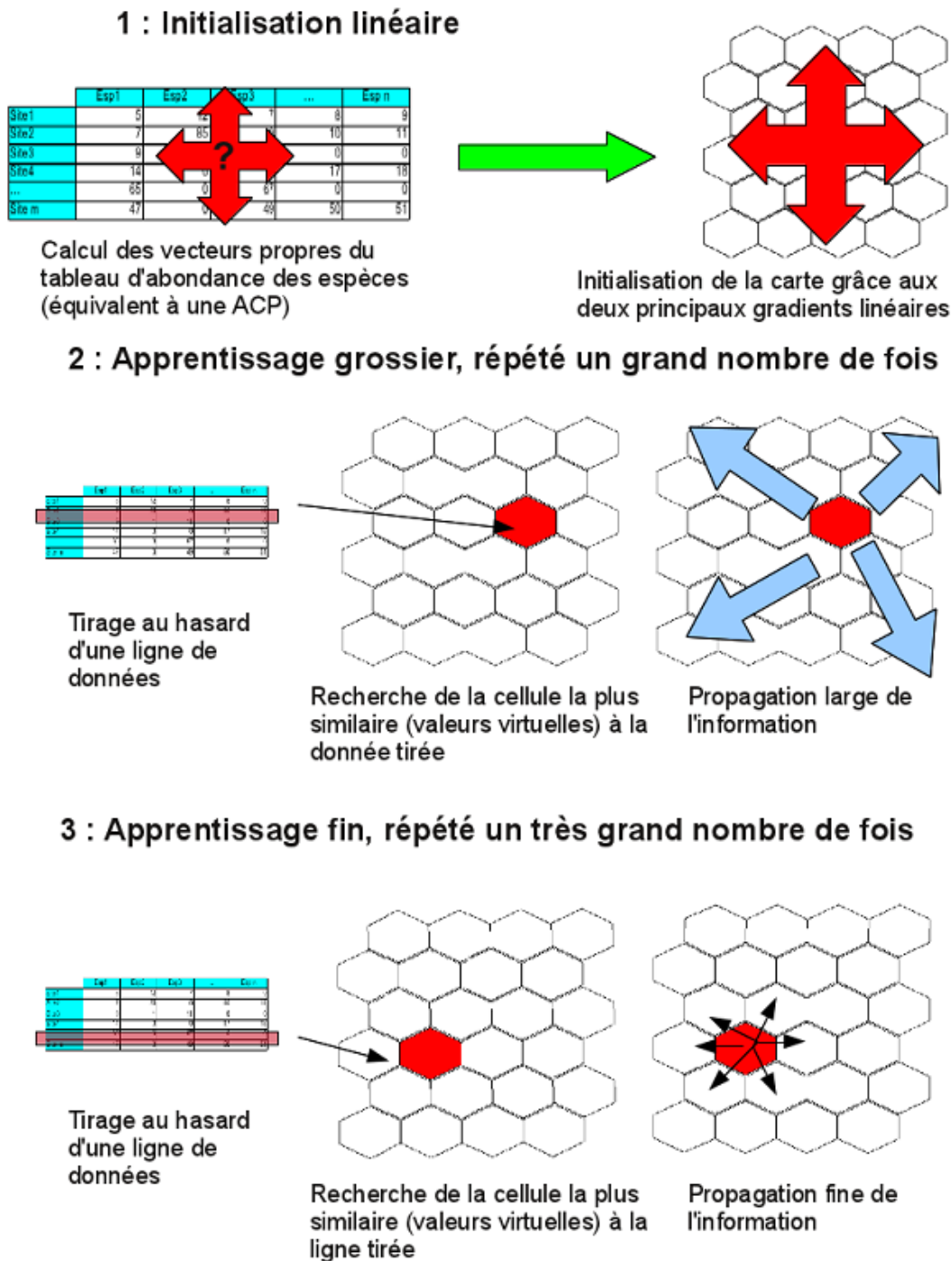


Fig.VI. 95: Description de l'algorithme d'apprentissage des cartes topologiques auto-organisatrice de Kohonen (SOM). (Marius, 2012)

Puis ensuite va suivre un apprentissage récursif, répété un grand nombre de fois (**Fig.VI.95**).

– Un échantillon du tableau de données est tiré au hasard. Les valeurs de l'échantillon sont appelées « vecteur réel »,

- Une mesure de diversité β est calculée entre le vecteur réel et chacun des vecteurs virtuels (valeurs des neurones),
- Le neurone dont les valeurs virtuelles sont les plus proches de celles du vecteur réel est désigné comme BMU (pour Best Matching Unit),
- Les valeurs du BMU sont modifiées pour ressembler encore davantage à celles de l'échantillon,
- Les valeurs de l'ensemble des vecteurs virtuels sont modifiées. Ces valeurs seront d'autant plus modifiées que la cellule est proche (spatialement, sur la carte) du BMU. Grâce à ces étapes récursives, les cellules de la SOM proches spatialement vont avoir des valeurs ressemblantes pour chacune des espèces, alors que les cellules éloignées vont avoir des valeurs très différentes. Lors de cet apprentissage récursif, il y a deux phases majeures :

1. L'apprentissage grossier (rough phase) : durant cette phase, les valeurs des vecteurs virtuels vont être fortement modifiées à chaque étape, et cette modification sera significative sur une part considérable de la carte. Cette phase permet une prise en compte grossière des différences entre les échantillons afin de définir les principaux gradients de la carte, et les différentes grandes zones homogènes.

2. L'apprentissage fin (finetuning phase) : durant cette phase, seuls les vecteurs virtuels proches du BMU seront modifiés, et ces modifications seront très faibles. Cette phase, plus longue, permet d'affiner les valeurs virtuelles des cellules. Le but est que ces valeurs représentent au mieux les données présentes dans le tableau et les gradients linéaires ou non linéaires qui existent dans celui-ci.

10. 4.3- Essai d'application de la méthode des cartes auto-organisatrices de Kohonen (SOM, pour self-organizing maps) sur les eaux d'El-Kantara et interprétation des résultats : Le principe de l'algorithme des SOM consiste à effectuer une classification non linéaire des bases de données complexes en identifiant des groupes semblables similaire à une Analyse en Composantes Principales (**FIG .VI.96**).

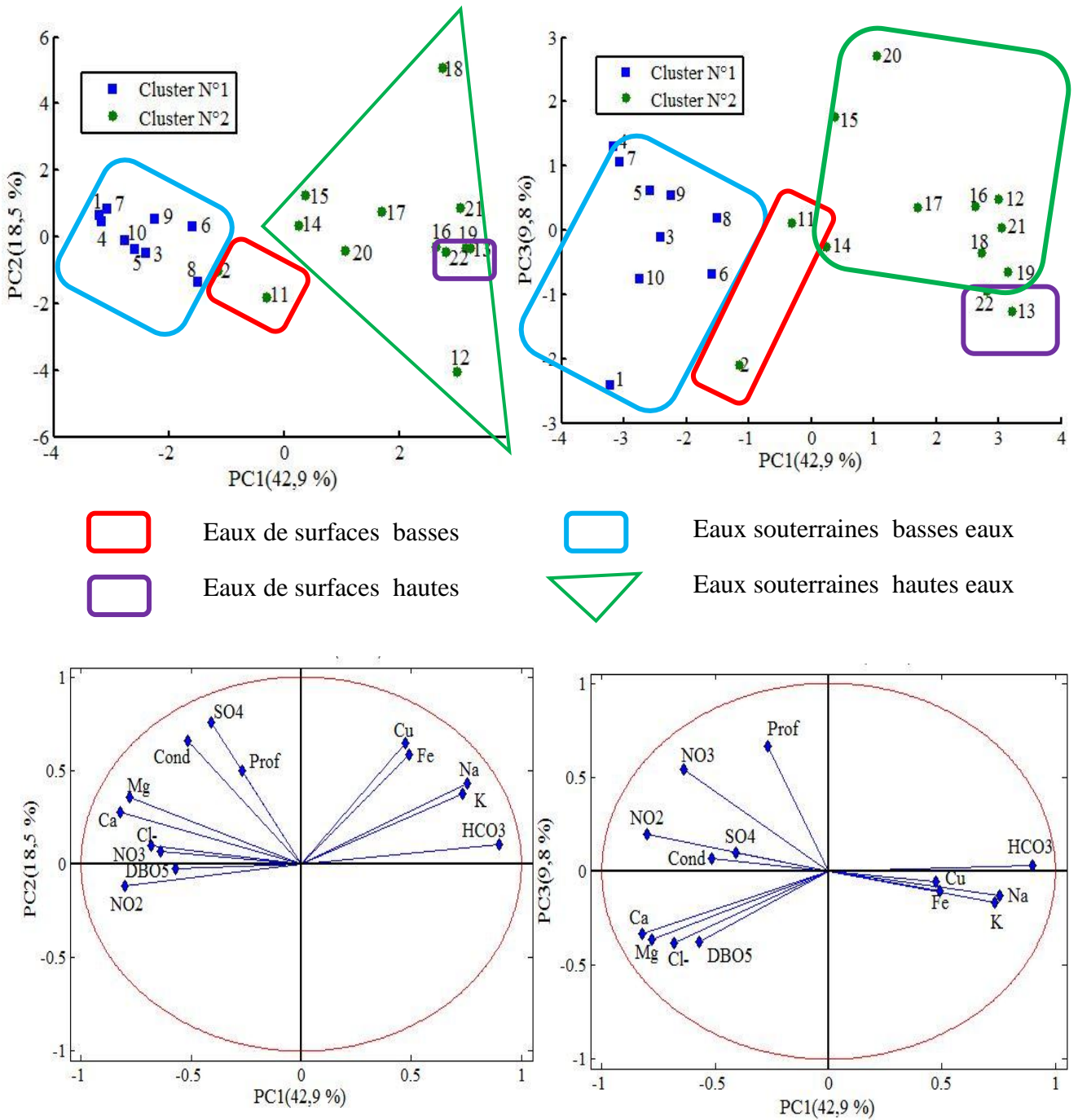


Fig.VI. 96: Description de l’algorithme d’apprentissage des cartes topologiques auto-organisatrice de Kohonen (SOM) : identification des groupes semblables similaire à une Analyse en Composantes Principales (Auteur, 2022).

Dans le cadre de ce travail, la couche d’entrée est constituée des vecteurs représentant les individus dont chacun contient 14 composants représentant les 14 paramètres physico-chimiques des eaux de la plaine d’El-Kantara . La couche de sortie est composée de 20 neurones (5 lignes × 4 colonnes). Cette taille a été choisie pour la carte de sortie car elle minimise les deux critères d’erreurs (QE=0,1496 et TE=0,00).

Les plans composants la carte SOM de l'ensemble des données permettent de distinguer deux types de couleurs, les cellules rouges foncées représentent des valeurs élevées, alors que les cellules bleues représentent des valeurs faibles (**FIG .VI. 97**). Les modes de couleurs identiques entre les variables correspondent à une corrélation positive et importante ; qu'on peut observer entre les variables suivantes ; les Sulfates, les Chlorures, la Conductivité, le Calcium, le Magnésium et profondeur d'un part et d'un autre part les Bicarbonates, le Sodium, le Potassium. Ainsi, on peut ajouter les deux corrélations positives respectivement entre le Fer et le Cuivre pour les éléments métalliques. En revanche, les Bicarbonates, le Calcium, le Magnésium, le Sodium et le Potassium montrent une corrélation négative voir la figure (**FIG .VI. 97**) et le tableau de la matrice de corrélation entre les variables (**TAB .VI. 45**).

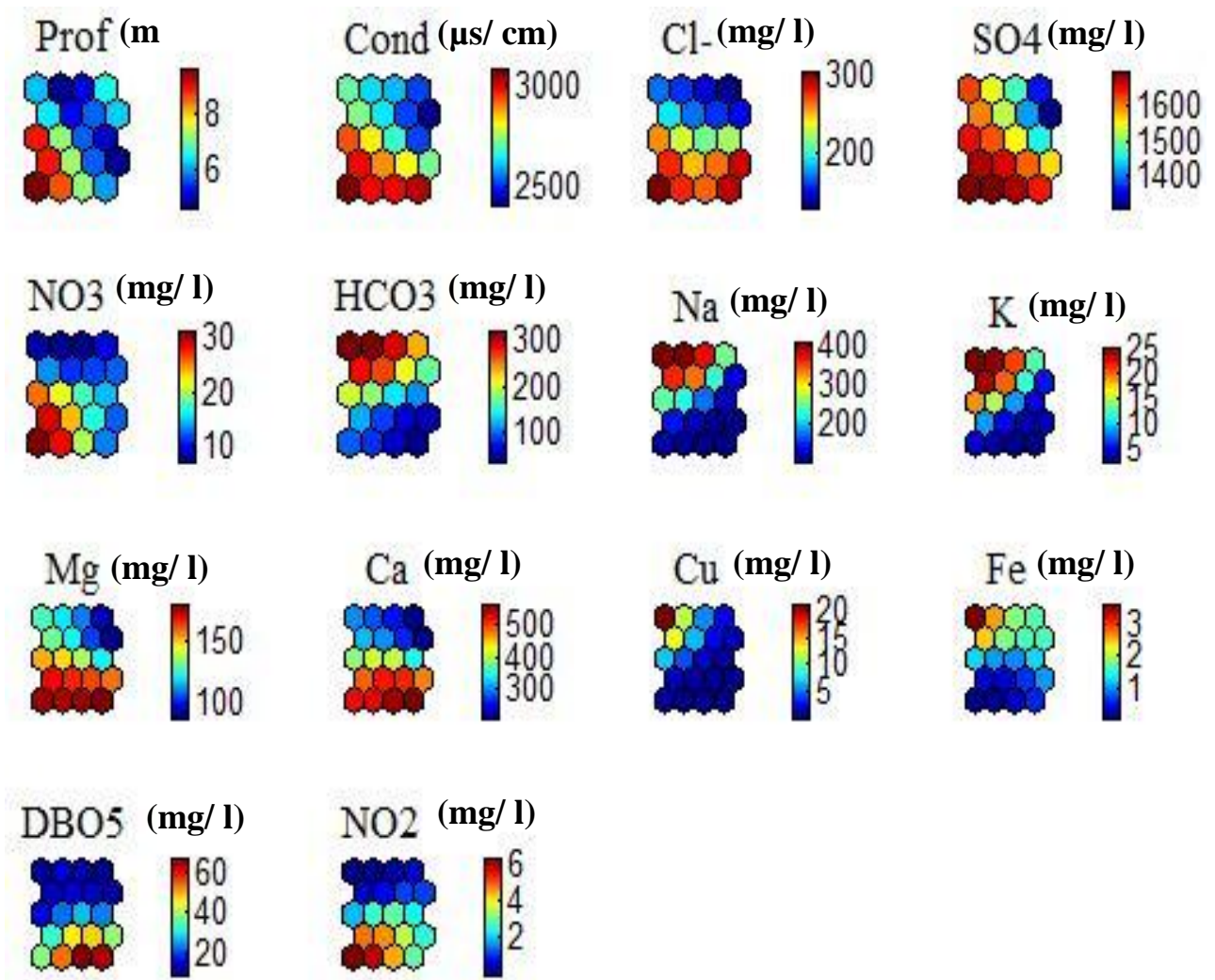


Fig.VI. 97: Gradient de valeurs des paramètres physico-chimiques sur la carte topologique auto-organisatrice de Kohonen (SOM). (Auteur, 2022).

TAB .VI. 45: matrice de corrélation entre les variables Septembre 2011 et Février 2012). (Auteur, 2022).

| | Cond | Cl- | SO4 | NO3 | HCO3 | Na | K | Mg | Ca | Cu | Fe | DBO5 | NO2 |
|------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|-----|
| Cond | 1 | | | | | | | | | | | | |
| Cl- | 0,271098 | 1 | | | | | | | | | | | |
| SO4 | 0,69252 | 0,325713 | 1 | | | | | | | | | | |
| NO3 | 0,284237 | 0,384212 | 0,410432 | 1 | | | | | | | | | |
| HCO3 | -0,404067 | -0,595282 | -0,303117 | -0,442058 | 1 | | | | | | | | |
| Na | -0,117191 | -0,460947 | 0,035557 | -0,465324 | 0,83726 | 1 | | | | | | | |
| K | -0,159437 | -0,232139 | 0,017404 | -0,317321 | 0,812611 | 0,818869 | 1 | | | | | | |
| Mg | 0,529538 | 0,751517 | 0,474594 | 0,35308 | -0,60129 | -0,315034 | -0,321181 | 1 | | | | | |
| Ca | 0,612718 | 0,597586 | 0,435807 | 0,319423 | -0,725849 | -0,432567 | -0,483694 | 0,897557 | 1 | | | | |
| Cu | 0,032973 | -0,249978 | 0,190078 | -0,317339 | 0,446448 | 0,522153 | 0,431329 | -0,107804 | -0,185397 | 1 | | | |
| Fe | 0,019385 | -0,247157 | 0,215359 | -0,340176 | 0,344045 | 0,450452 | 0,448386 | -0,231758 | -0,215733 | 0,737528 | 1 | | |
| DBO5 | 0,299416 | 0,310464 | 0,187218 | 0,14831 | -0,432611 | -0,33666 | -0,419194 | 0,504123 | 0,492786 | -0,255927 | -0,283434 | 1 | |
| NO2 | 0,189971 | 0,439955 | 0,289166 | 0,721714 | -0,638437 | -0,609784 | -0,654796 | 0,52318 | 0,576794 | -0,350294 | -0,403215 | 0,387357 | 1 |

10. 4.3 .1- Application de la Classification Ascendante Hiérarchique par SOM (SOM-CHA) sur les eaux d’El-Kantara et interprétation des résultats : Comme les autres méthodes d'analyse des données, dont elle fait partie, la classification SOM-CHA a pour but d'obtenir une représentation schématique simple. Elle consiste à calculer une matrice exprimant les distances mutuelles entre les points à classer, qui sont les nœuds de la carte, puis, en se basant sur cette matrice, pour regrouper les points les plus proches entre eux. Cette méthode permet la construction d’un arbre hiérarchique, qui révèle plusieurs partitions possibles, où chaque point est attribué à l’un des groupes d’une partition donnée. Le choix de la meilleure partition s’effectue une fois la classification hiérarchique terminée.

10. 4. 3.2- Principe de la méthode interprétation:

Une fois la carte SOM de Kohonen est obtenue, on utilise une classification ascendante hiérarchique basée sur la méthode de Ward (Ward, 1963) et la distance euclidienne. La classification ascendante hiérarchique par SOM permet de regrouper les cellules de la carte SOM en groupes de paramètres physico-chimiques des eaux de la région étudiée. Le dendrogramme obtenu par SOM-CHA, suggère que les 22 neurones doivent être regroupés en 2 classes (**FIG .VI. 98**).

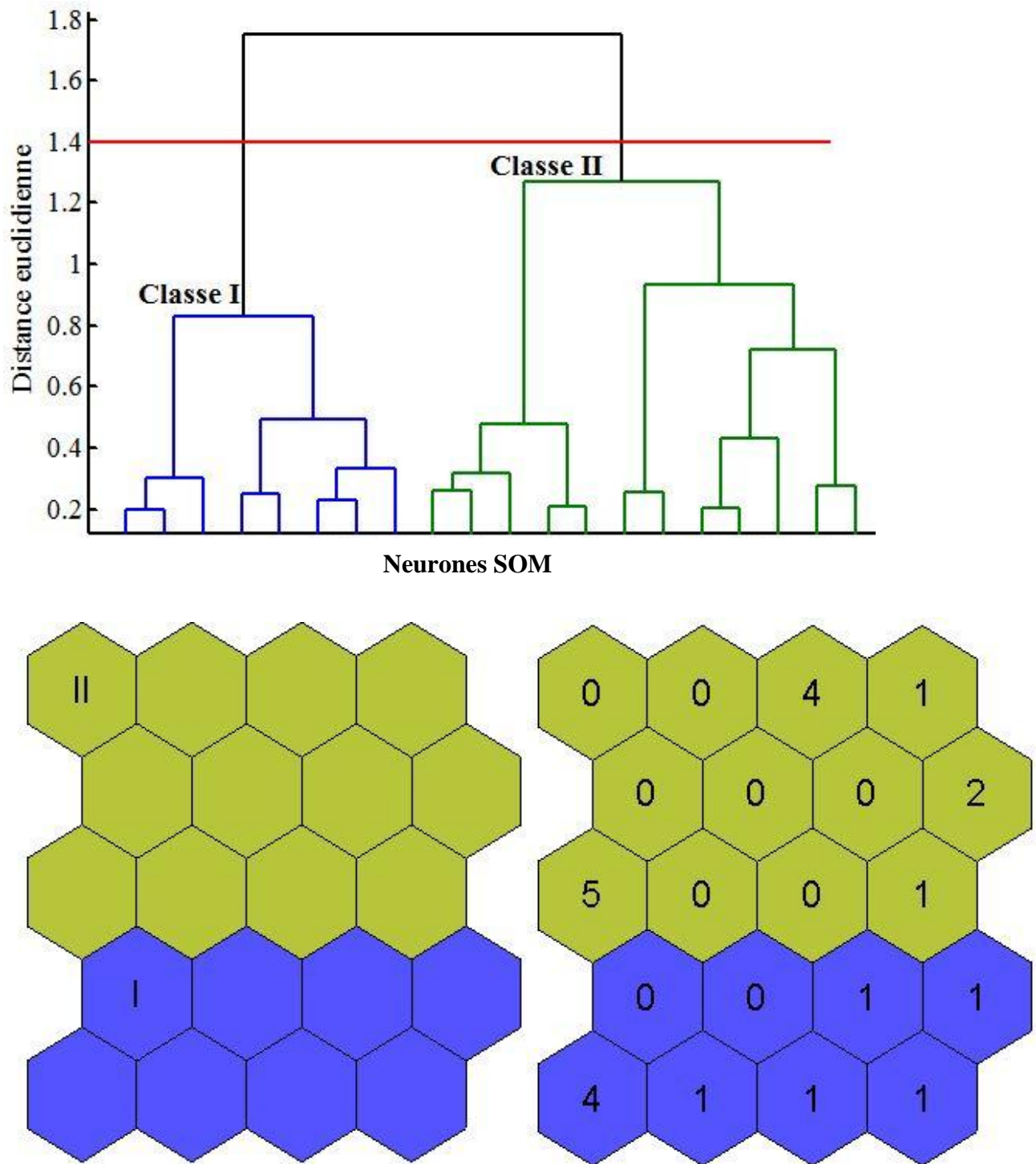


Fig.VI. 98 : Classification des neurones grâce à une classification hiérarchique ascendante, permettant une définition simultanée de zones sur la carte SOM. (Auteur, 2022).

Donc, il est possible de considérer que la carte SOM de Kohonen a réalisé un classement des différents échantillons en fonction des valeurs des paramètres physico-chimiques, et les a placés dans un nombre de groupes équivalent au nombre de neurones.

L'application d'une classification hiérarchique ascendante sur les cellules selon leurs valeurs virtuelles c'est-à-dire sur la carte SOM où les cellules des échantillons les plus proches sont les plus similaires en termes de valeurs virtuelles, la classification va donc permettre la délimitation de zones (**FIG .VI. 98**), correspondant à de grands ensembles, présentant des caractéristiques physico-chimiques semblables

La première classe est composée de 8 neurones .Elle contient 9 échantillons et donc représente 40,90 % de l'ensemble des données (**FIG .VI. 99**) . Alors, La deuxième classe est représentée par 12 neurones .Elle contient 13 échantillons et donc représente 59,10 % de l'ensemble des données (**FIG .VI. 99**) . Chaque classe regroupe les eaux dont la concentration en éléments chimiques est bien indiquée sur le tableau (**TAB .VI. 46**) .

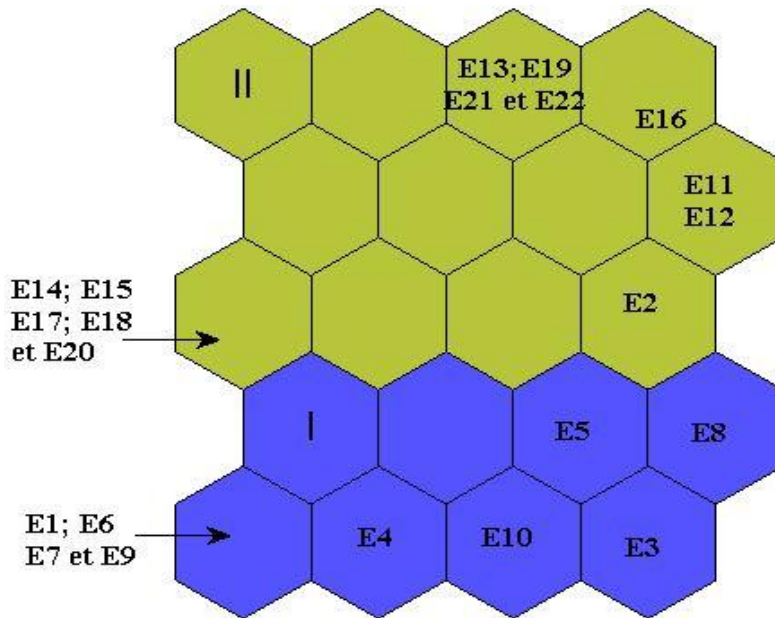


Fig.VI. 99: Répartition des échantillons sur la carte topologique auto-organisatrice de Kohonen (SOM) à partir des variables physico-chimiques des eaux de la plaine d'El-Kantara. (Auteur, 2022).

TAB .VI. 46: Tableau récapitulatif des grandeurs statistiques des paramètres physico-chimiques, des deux classes. (Auteur, 2022).

| Paramètres statistiques | Cond | Cl- | SO4 | NO3 | HCO3 | Na | K | Mg | Ca | Cu | Fe | DBO5 | NO2 | Classes |
|-------------------------|---------|--------|---------|-------|--------|--------|------|--------|--------|------|------|--------|------|-----------|
| Max | 3870,00 | 365,65 | 1833,00 | 36,51 | 100,53 | 129,93 | 3,54 | 203,66 | 721,21 | 0,29 | 1,22 | 134,00 | 8,24 | Classe I |
| Min | 421,53 | 75,84 | 129,94 | 5,23 | 14,40 | 16,73 | 0,69 | 18,52 | 87,77 | 0,06 | 0,00 | 12,00 | 1,18 | |
| Moy | 2678,77 | 229,26 | 1449,10 | 19,34 | 53,11 | 85,95 | 2,01 | 155,11 | 484,38 | 0,14 | 0,32 | 66,65 | 4,35 | |
| E-type | 1179,42 | 107,03 | 658,22 | 10,74 | 29,55 | 39,53 | 1,07 | 70,09 | 218,02 | 0,09 | 0,46 | 55,51 | 2,42 | |
| Max | 3870,00 | 365,65 | 1833,00 | 36,51 | 100,53 | 129,93 | 3,54 | 203,66 | 721,21 | 0,29 | 1,22 | 134,00 | 8,24 | Classe II |
| Min | 421,53 | 75,84 | 129,94 | 5,23 | 14,40 | 16,73 | 0,69 | 18,52 | 87,77 | 0,06 | 0,00 | 12,00 | 1,18 | |
| Moy | 2422,24 | 215,33 | 1276,49 | 18,79 | 51,63 | 78,79 | 1,94 | 137,81 | 441,77 | 0,14 | 0,39 | 66,81 | 4,23 | |
| E-type | 1293,54 | 111,76 | 697,72 | 11,26 | 31,00 | 42,40 | 1,09 | 74,39 | 236,60 | 0,09 | 0,47 | 50,61 | 2,54 | |

11-Conclusion :

Les résultats des analyses physico-chimiques montrent que:

Les terrains géologiques et la pluviométrie ont une influence sur les concentrations des éléments chimiques. On assiste en général à une dilution de l'amont vers l'aval aussi bien pour les eaux souterraines que pour les eaux de surface. Les sources de pollution se trouvent à l'amont ce qui justifie les fortes concentrations près de la zone d'activité et de la décharge publique.

Les diagrammes de Piper, Stiff ,Stabler et Schoeller-Berkaloff ont montré que les sulfates dominant et s'accompagnent généralement de Calcium et les fortes concentrations de sulfate sont liées aux marne-gypseuses et aux eaux urbaines. Ainsi, ses diagrammes a permis de déterminer trois faciès chimiques principaux dans le secteur d'étude :

-Le faciès sulfaté calcique.

-Le faciès sulfaté sodique.

-Le faciès sulfaté magnésien.

La variation de la concentration des éléments chimiques durant la période de travail montre que la région étudiée est polluée par les éléments métallique en trace (ETM) tels que le Fer, le Cuivre, le Plomb et le Chrome et les éléments indicateurs de pollution agricole (trace) ,qui sont en relation surtout avec les rejets de la zone urbaine, la décharge publique et la zone d'activité (l'agriculture et la petite industrie) .

-La Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) basée sur la méthode de Ward (Ward, 1963) amène a classer les éléments chimiques en trois (03) classes différentes (C1,C2 et C3), en fonction de leurs degré de corrélation et leurs moyennes .

-L'analyse statistique basée sur l'approche de la carte auto-organisatrice (SOM) de Kohonen a été appliquée sur une base de données, constituée de 14 paramètres physico-chimiques réalisés sur 22 échantillons des eaux d'El-Kantara entre Septembre 2011 et Février 2012 . Elle a mis en exergue les différentes corrélations positives et négatives entre les différents paramètres physico-chimiques étudiés. La classification hiérarchique de la carte SOM (SOM-HC) a détecté des variations spatiales et saisonnières en identifiant le comportement physico-chimique des eaux. Le dendrogramme obtenu par SOM-CHA, suggère que les 22 neurones doivent être regroupés en 2 classes. La première classe est composée de 8 neurones .Elle contient 9 échantillons et donc représente 40,90 % de

l'ensemble des données. Alors, La deuxième classe est représentée par 12 neurones .Elle contient 13 échantillons et donc représente 59,10 % de l'ensemble des données.

Cette différenciation serait probablement en relation avec la nature géologique des terrains traversés, la période de prélèvement et les rejets anthropiques.

Partie B : Vulnérabilité à la pollution des eaux

1-Introduction :

Devant l'état de contamination des eaux souterraines et le développement des techniques de décontamination des nappes polluées qui restent longues coûteuses et incapables de restaurer la potabilité des eaux, la nouvelle stratégie de protection de ressources en eau qui doit être instaurée est de protéger et sauvegarder ces ressources dans leur gisement avant qu'elles ne soient contaminées. Cette stratégie sera basée sur l'élaboration d'un document cartographique (carte de vulnérabilité ou carte de sensibilité) que le gestionnaire de la ressource en eau pourra utiliser lors de l'implantation d'installations, qui, à des titres variés peuvent être des sources de pollution. Le but de l'établissement de cette cartographie est de montrer quelles sont, suivant les terrains rencontrés en surface, les possibilités de pénétration et de propagation des polluants dans le terrain, de mieux apprécier la fragilité des captages d'eau potable existants, de mieux cerner les zones à risque lors du choix de nouveaux sites des captages, et de prévoir les mesures compensatoires à mettre en œuvre sur les infrastructures existantes ou à créer pour limiter les risques de pollution chronique ou accidentelle, diffuse ou ponctuelle .

Les eaux souterraines d'El-Kantara représentent une ressource en eau d'importance stratégique non négligeable, puisqu'elle est la deuxième après la ressource du barrage de Fontaine des gazelles en ce qui concerne la région d'étude en particulier. Donc, elle représente une solution alternative aux pénuries régulières des périodes de sécheresse. Sa protection est de première importance.

Dans cette optique et afin de répondre aux objectifs cités auparavant et d'examiner la vulnérabilité du système aquifère d'El -Kantara et les risques de pollution chimique de ce dernier , nous allons proposer dans cette partie du travail deux volets principaux.

Dans le premier volet, nous allons proposer une synthèse bibliographique sur les notions de pollution, de vulnérabilité et un sommaire des critères des méthodes de cartographie de la vulnérabilité les plus connues et les plus utilisés dans des milieux comme celui d'El-Kantara.

Dans le second, nous allons nous appliquer plusieurs méthodes d'évaluation :

-Les méthodes intrinsèques à savoir la méthode GOD et DRASTIC ;

-Les méthodes de vulnérabilité spécifiques à savoir la méthode de l'Indice de la pollution des eaux souterraines (IPE) (PIG).

2- Notions sur la pollution :

2.1- La pollution de l'eau souterraine : Une eau est polluée lorsque, sous l'effet de l'activité humaine, elle devient impropre à satisfaire la demande d'utilisation et/ ou qu'elle présente un danger pour l'environnement.

Une eau souterraine est qualifiée polluée si elle contient des substances qui ne présentent pas de relation avec la nature des terrains traversés en quantités et qui dépassent les normes conventionnelles selon son utilisation.

Une eau est qualifiée impropre à la consommation lorsque les concentrations de ses constituants dissous ou en suspension ne sont pas conformes aux normes conventionnelles admissibles. Donc la pollution de l'eau souterraine est provoquée par les rejets des activités domestiques et urbaines, agricoles ou industrielles dont l'eau est le véhicule de transport et de dissémination idéal. D'où trois grandes sources de pollution : domestique et urbaine, agricole et industrielle.

2.2- Le polluant : Un polluant est un agent physique, une substance minérale ou biologique, issu de l'activité humaine provoquant, sous une intensité ou une concentration anormale, une dégradation de la qualité de l'eau naturelle. Exemple : forte teneur en nitrates dans les régions agricoles. Le pouvoir polluant d'une substance est déterminé par deux facteurs principaux :

*La dose d'introduction dans le milieu récepteur, déterminé par la concentration dans l'eau et le volume d'eau en mouvement, véhicule de transport ;

*La fréquence des apports, dont la répétition accroît les risques car les sédiments et les être vivants ont un effet cumulatif.

2. 3- Principaux types de polluants : Les polluants chimiques sont nombreux et d'origine diverses, on compte trois grands groupes : les sels minéraux dissous, les hydrocarbures et les micropolluants représentés par les éléments en trace métalliques ou « ETM », les pesticides et les détergents. Dans la présente étude, on s'intéressera à la pollution par les sels minéraux dissous (salinité) et les micropolluants représentés surtout par les ETM et les indicateurs de pollution agricoles.

2. 3.1- Les sels minéraux dissous : Les principaux sels responsables de la salinité de l'eau sont les sels de Calcium (Ca^{2+}), de Magnésium (Mg^{2+}), de Sodium (Na^+), de Potassium (K^+), les Chlorures (Cl^-), les Sulfates (SO_4^{2-}) et les Bicarbonates (HCO_3^-).

2. 3.2- Les éléments en trace métalliques : Ce terme générique désigne indistinctement des métaux et métalloïdes réputés toxiques. Pour cette raison, l'appellation « éléments-traces métalliques » -ETM- ou par extension « éléments-traces » est préférable à celle de métaux lourds. Les ETM les plus connus pour leur dangerosité sont le Plomb (Pb), le Mercure (Hg), le Cadmium (Cd), le Chrome (Cr), le Cuivre (Cu), le Nickel (Ni), le Zinc (Zn), l'Arsenic (As) et le Sélénium (Se).

2. 3.3- Les éléments indicateurs de pollution agricole : Plus précisément les différentes formes d'azote et de phosphore (nutriments). Les composés qui en contiennent comme les Phosphates et les Nitrates constituent dès lors des matières nutritives de choix pour les végétaux. Les concentrations en nitrites (NO_2^-), nitrates (NO_3^-), ammoniac (NH_3) et ammonium (NH_4^+), phosphates (PO_3^-), azote (N) et phosphore (P) sont dès lors des paramètres importants pour le suivi de la qualité des eaux et proprement dis les eaux de surfaces car les teneurs importantes induisent le phénomène d'eutrophisation (étouffement de la vie aquatique).

2.4- Origine du chimisme des eaux d'El-Kantara : A partir des résultats des analyses chimiques, des graphiques et des cartes des chapitres précédents. On peut, déduire l'origine du chimisme des eaux d'El-Kantara des facteurs suivants :

-L'alimentation du système est tributaire de la pluviométrie, donc de l'infiltration des pluies. La nappe du Quaternaire est alimentée directement par la pluie et l'éocène adjacent. Les calcaires éocènes sont en contact avec les alluvions quaternaires aquifères (qui souvent drainent les calcaires maestrichtiens). Donc la présence des calcaires fracturés autour de la région permettant l'alimentation de la nappe alluviale selon les directions NE-SW et N-S.

- L'influence des formations géologiques sur la nature des faciès est nettement remarquable : les calcaires ont donné le faciès bicarbonaté calcique confirmant ainsi l'alimentation de la nappe latéralement. Les argiles et les marnes ainsi que les formations triasiques ont donné les faciès chloruré calcique et chloruré-sodique et ce par lessivage, par évaporation et par échange de base.

-La piézométrie a favorisé la naissance de ces faciès, car les eaux souterraines s'écoulent suivant la direction majeure Nord-est et Sud-ouest, ainsi avec la position des sources de pollution (la zone urbaine et la petite industrie et la décharge publique qui se situent en amont de la plaine) et se chargent progressivement au fur et à mesure qu'on se déplace de l'amont vers l'aval.

2.4 .1- Essais de détermination des apports de la région d'étude :

2.4 .1.1-Les apports anthropiques : Vu le développement considérable durant cette décennie des activités humaines, urbaines , industrielles et agricoles dans la région d'étude, plusieurs apports de contamination ont été détectés voir le chapitre 1 des généralités : l'un d'origine anthropique dû aux rejets directs d'eau usée, au stockage des produits industriels et à l'utilisation des produits chimiques dans l'agriculture (épandage pendant la période de semence en automne), et aussi l'autre origine liée aux lessivages de la décharge publique (4.92 tonnes par jour de déchets solides). L'ensemble de ces apports induit une pollution chimique ou provoquent l'augmentation de la concentration des éléments chimiques dans les eaux souterraines, ce qui conduit à une dégradation de leur qualité.

2.4 .1.2-Les rejets (eaux usées, poussières) :

- **Rejets urbains :** Le dernier recensement officiel de 2016 a estimé la population d'El-Kantara à 13902 habitants avec une augmentation de l'ordre de 2.05%. Cette forte concentration de la population entraîne une forte concentration de l'urbanisation, ce qui engendre une grande menace en matière de pollution notamment par les rejets solides et liquides, ce qui induit des apports caractérisés par de fortes teneurs en ammonium et en phosphates.

- **Rejets industriels :** Le secteur de l'industrie à El-Kantara s'est développé considérablement durant les dernières années. Ce secteur est accusé fréquemment d'être la cause de dégradation de l'environnement. Cette industrie engendre des effluents liquides et des déchets solides, qui sont jetés directement dans les oueds sans aucune forme de traitement ce qui engendre la contamination de l'eau de surface et souterraine. La plupart de ces industries sont de petites entreprises spécialisées dans la fabrication des matériaux de construction (céramique), les aliments et les boissons (les moulins d'Ezzibane), le recyclage des batteries, du plastique, le lavage des véhicules, ... ajoutant aussi les rejets dans l'atmosphère, des usines de ciments situées très proche d'El-Kantara, l'une à Ain-Touat et l'autre proche du hammam bourdj roj.

Malheureusement, nous n'avons pas pu réaliser un échantillonnage de ces poussières dans l'atmosphère.

2.4.1.2-Les Les apports naturels : Ils jouent un rôle primordial dans l'acquisition des éléments chimiques par les eaux, par la dissolution des formations géologiques, mais ne forment pas une origine de pollution (Castany,1982). Le danger de ce processus apparaît lorsque les concentrations de ces éléments dépassent les limites de potabilité, phénomène très répandu dans les régions semi-arides. Dans la plaine d'El-Kantara, on détecte une origine principale responsable de l'augmentation de ces éléments chimiques, à savoir la dissolution des formations carbonatés ainsi le lessivage des argiles et des marnes

3- Notions sur la vulnérabilité de l'eau souterraine à la pollution : Une analyse bibliographique des travaux les plus récents en matière de cartographie de vulnérabilité des eaux souterraines pour définir, les notions générales, les critères couramment retenus pour la décrire et les méthodes employées actuellement pour la représenter.

3.1- Définition: La vulnérabilité à la pollution d'une nappe d'eau souterraine matérialise la facilité avec laquelle elle peut être atteinte par une pollution ; où l'homme intervient de diverses manières comme facteur de cette dernière. Il faut signaler tout d'abord que cette pollution peut être engendrée par une source ponctuelle (décharge, cimetière, rejet d'eau usée brute, domestique ou industrielle, etc. ...), linéaire (réseau d'eau usée, réseau de drainage agricole, etc. ...).

Le terme de vulnérabilité est défini et utilisé de manière diverses. Certains auteurs l'ont défini comme une propriété intrinsèque des aquifères ; d'autres estiment que la vulnérabilité est liée aux propriétés spécifiques du contaminant. Cependant, d'autres auteurs l'associent aux activités humaines et à la qualité agro-pédologique des terrains de surface. On cite :

-La première définition remonte à 1968, Margat a proposé de définir la vulnérabilité des eaux souterraine comme le fait, pour une nappe souterraine, d'être plus ou moins exposée, par les conditions naturelles, à un risque de pollution.

-Cette définition a été reprise par Albinet et Margat (1970) pour devenir "la vulnérabilité d'un aquifère c'est la possibilité de percolation et de diffusion de polluants depuis la surface du sol jusqu'à la nappe, dans des conditions naturelles".

-Selon, Villumsen et al. (1983) la vulnérabilité dépend d'une série de paramètres, aussi bien dynamiques que statiques. Ils insistent sur le fait que la composition chimique des eaux souterraines peut être utilisée comme indicateur de la vulnérabilité et ils recommandent que les analyses chimiques des eaux soient utilisées comme vérification préliminaire des cartes de vulnérabilité.

Vrba (1991), présente la vulnérabilité à l'échelle du temps humain comme la propriété intrinsèque naturelle invariante des parties insaturées et saturées du système aquatique, elle dépend de la capacité ou l'incapacité de ce système à faire face à des processus naturels et des impacts humains.

Landreau, 1996, a participé dans l'évolution du concept de la vulnérabilité intrinsèque. Dans sa définition, il a pris en considération Les sources de pollution susceptibles de détériorer la qualité de l'eau c'est-à-dire le risque de la pollution engendré par les activités humaines.

3.2- Aspects de la vulnérabilité :

3.2.1-Vulnérabilité intrinsèque : La vulnérabilité intrinsèque est le terme utilisé pour représenter les caractéristiques du milieu naturel qui déterminent la sensibilité des eaux souterraines à la pollution par les activités humaines (Schnebelen et al, 2002). La vulnérabilité intrinsèque est indépendante du polluant ou de son type.

3.2.2-Vulnérabilité spécifique : La vulnérabilité spécifique est le terme utilisé pour définir la vulnérabilité d'une eau souterraine à un polluant particulier ou à un groupe de polluants. Elle prend en compte les propriétés des polluants et leurs relations avec les divers composants de la vulnérabilité intrinsèque. (Schnebelen et al. 2002). Il est constaté alors que la vulnérabilité spécifique est évolutive du fait qu'elle est liée directement au contaminant et ne caractérise qu'une période donnée.

3.3- Critères d'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines : La vulnérabilité d'une nappe à la pollution est une notion relative, non mesurable et sans dimension. La précision de son évaluation dépend essentiellement de la nature, de la qualité et de la fiabilité des données utilisées. Sa caractérisation est basée généralement sur l'estimation d'un certain nombre de paramètres plus ou moins importants relatifs notamment à la couverture de la nappe (sol et zone non saturée) et à la zone saturée proprement dite. Pour

évaluer la vulnérabilité intrinsèque ou spécifique, un certain nombre de critères est retenu dont les plus couramment utilisés sont les suivants :

3.3.1- Critères de la vulnérabilité intrinsèque : Les critères de caractérisation et d'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines d'une nappe aquifère sont nombreux. Ces critères sont liés aux caractéristiques du sol, de la zone non saturée et de la zone saturée.

3.3.1 .1- Critères relatifs au sol :

-La topographie : Elle permet d'avoir une idée sur le ruissellement et l'infiltration efficace (quantité d'eau s'infiltrant jusqu'à la nappe) et qui sont représentatifs à la recharge de la nappe. Plus la pente du terrain est forte, plus le contaminant sera transporté plus loin en aval, mais cela n'annule pas la possibilité de pollution.

- Le couvert pédologique: Il joue son rôle par sa nature, sa texture, sa teneur en matière organique et en argile et par sa perméabilité verticale, ainsi que sa puissance (ou épaisseur). Son rôle est important dans l'atténuation du transfert du contaminant de la surface du sol au milieu souterrain en profondeur. Certains auteurs prennent en compte la réserve utile « RU » (ou réserve facilement utilisable RFU) comme paramètre pour faire intervenir ce critère dans l'évaluation de la vulnérabilité.

3.3.1 .2- Critères relatifs à la zone non saturée :

-Profondeur de la nappe libre (Epaisseur de la ZNS): Dans cette tranche de terrain, certains phénomènes tels que la rétention, le stockage, les réactions et interactions physico-chimiques avec les composants de l'encaissant conditionnent le temps de transfert d'un polluant jusqu'à la nappe.

- Structure de la zone non saturée : Les variations du faciès, l'épaisseur des discontinuités de faciès et leur position dans le profil vertical, la texture, la teneur en matières organiques et en argile des formations, sont autant des facteurs qui contrôlent la migration des fluides vers la nappe.

- Perméabilité verticale de la zone non saturée : Elle dicte le temps de transfert vertical d'un polluant vers la nappe.

- **Amplitude de battement de nappe** : Elle peut devenir un critère de vulnérabilité dans la mesure où elle est significative (l'amplitude de battement de la nappe, contrôle l'épaisseur du recouvrement de la nappe).

3.3.1.3- Critères relatifs à la zone saturée (ZS) :

-**Type de nappe (libre ou captive)** : Une couche imperméable ou peu perméable située au-dessus d'une nappe captive constitue une protection naturelle contre une éventuelle pollution cependant une nappe libre est beaucoup plus vulnérable.

-**Paramètres hydrodynamiques de la zone saturée** : Ils déterminent la vitesse de transfert ainsi que le temps de séjour d'un polluant à l'intérieur de la nappe. Ces paramètres sont essentiellement la perméabilité (K), la transmissivité (T), le gradient hydraulique (i) et le coefficient d'emménagement (S).

-**Piézométrie** : Elle permet de caractériser l'évolution du fonctionnement hydrodynamique de la nappe, tenant en compte la géométrie de la nappe. La relation cours d'eau-nappe d'eau peut s'inverser entre la période de basses eaux et celle de hautes eaux.

-**Direction et sens d'écoulement des eaux dans la nappe** : Ce critère cible les zones et les endroits qui peuvent être touchés par un polluant.

-**Type de système hydrogéologique** : la connaissance de sa réactivité aux impulsions pluviométriques détermine son caractère transmissif, ce qui permet d'évaluer sa vulnérabilité. Si ce caractère est fort, le système hydrogéologique aura un temps de transfert rapide des eaux de la surface du sol jusqu'à la zone saturée et un faible temps de séjour et inversement.

-**Relations nappe/cours d'eau** : le drainage ou l'alimentation sont deux relations qui peuvent exister entre les eaux superficielles et les eaux souterraines (un oued et une nappe). Ces relations nous renseignent directement sur la possibilité de transférer une contamination des eaux de surface vers les eaux souterraines.

- **Epaisseur de l'aquifère** : Elle détermine la propriété de stockage d'eau dans un aquifère. Ainsi, la dilution des contaminants dans la zone saturée est en relation directe à la capacité de stockage.

3.3.1.4- Critères communs au sol, à la Zone Non Saturée et à la Zone Saturée :

-**Fracturation** : Généralement représentée par des discontinuités verticales tels que les failles

et les diaclases. Elle est caractérisée par deux paramètres essentiels la direction et la densité. Ses deux facteurs influent directement sur vitesse de pollution et notamment la vitesse d'introduction des eaux de surface chargées en contaminants vers le milieu profond.

-La recharge : C'est la quantité d'eau nette qui passe par le sol, la zone non saturée et atteint la zone saturée sur une période définie. Elle est liée à la précipitation efficace.

3.3.1.5- -Comportement du polluant potentiel : il dépend à la fois des caractéristiques du milieu contenant du polluant et de la nature et des propriétés physico-chimiques du polluant lui même. Donc, on peut définir ce comportement comme étant l'ensemble des phénomènes et processus résultant de la réaction du polluant avec les composants du milieu traversé, tels que l'adsorption, l'oxydoréduction, la biodégradation, l'évaporation, etc.

- Capacités dispersives et épuratoires des sols : C'est la capacité d'autoépuration naturelle des sols spécifique au type de polluant.

-Typologie de l'occupation du sol : L'utilisation des cartes d'occupation des sols (forêt, cultures, élevage, habitat, tissu industriel, etc...) , nous permet de déterminer les polluants potentiels, leurs natures et d'estimer les volumes . À titre d'exemple, les pesticides représentent un polluant potentiel lié à une activité agricole développée à la surface du sol volumes et la nature des polluants potentiels.

- Intrusions marines :(Présence ou non d'un biseau salé) : Ce type de pollution (salinisation) touche surtout les eaux souterraines des régions côtières suite à une surexploitation qui forme une pollution potentielle.

-Points sensibles : Ce sont des espaces d'activités spécifiques favorisant l'augmentation de la vulnérabilité de la nappe en question, par exemple les zones de décharge, zone agricole, effluents des établissements classés...

Les critères d'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque est spécifique sont résumés dans le tableau récapitulatif (**TAB .VI. 47**):

TAB .VI. 47: Tableau récapitulatif des critères de la vulnérabilité intrinsèque et spécifique
(In Drouiche, 2012).

| Vulnérabilité intrinsèque | | | Vulnérabilité spécifique |
|--|--|--|---|
| Sol | Zone non saturée (ZNS) | Zone saturée (ZS) | |
| Ruissèlement-infiltration. | profondeur de la nappe ou épaisseur de la ZNS. | Type de nappe (libre ou captive). | Occupation du sol : foret/espaces naturels, agriculture/ culture (l'irrigation augmente la percolation, le drainage la diminue), urbanisation/tissu industriel. |
| Pédologie, perméabilité verticale des sols, nature et texture du sol. | Temps de transfert, perméabilité verticale | Temps de résidence dépend des paramètres hydrodynamiques des formations aquifères. Présence ou non et position d'un horizon moins perméable. | présence ou non du biseau salé. |
| | Structure de la ZNS, variation de facies, épaisseur des discontinuités de facies, position dans le profil vertical, texture, teneur en m.o et en argile. | Relation eau souterraine/eau de surface. | Points sensibles : surfaces agricole, décharges, rejets des établissements classés, densité des voies de circulation, prélèvement dans la nappe. |
| | | Piézométrie : évolution des sens et direction d'écoulement selon la période du cycle hydrologique. | Capacités dispersives et épuratoires des sols face à un polluant spécifique. |
| | | Epaisseur de l'aquifère (quantité de réserve). | Comportement du polluant potentiel (milieu fixe) : soluble, insoluble, miscible non miscible, plus dense, plus léger que l'eau, réactivité avec le milieu traversé. |
| | | Type de système hydrogéologique : caractère plus au moins capacitif et transmissif. | Réseau hydrographique, extension et vulnérabilité (qualité des cours d'eau). |
| | | Direction et sens d'écoulement. | |
| Battement de nappe. | | | |
| Recharge : quantité d'eau atteignant la ZS sur une période donnée (recharge annuelle nette). | | | |
| Fracturation, direction et densité. | | | |

3.4- Objectifs et échelle de la carte de vulnérabilité :

L'objet d'une carte de vulnérabilité est de représenter ou visualiser les différents degrés de vulnérabilité d'une eau souterraine sur un support cartographique (le document cartographique doit représenter cette eau souterraine).

A l'heure actuelle, les cartes de vulnérabilité sont réalisées à diverses échelles allant du 1/10 000 à 1/1 000 000. L'échelle est choisie selon la nature des objectifs attendus, d'après Landreau (1996) (In Drouiche, 2012)) (FIG .VI. 100).

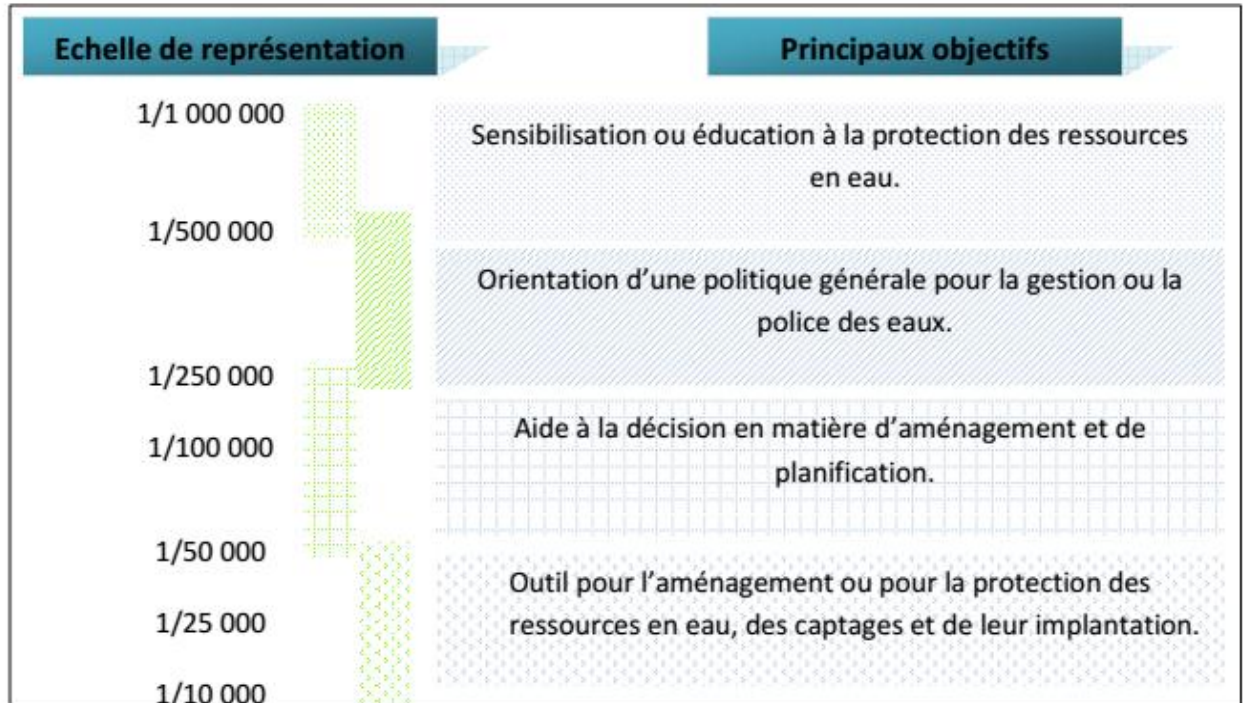


Fig.VI. 100: Relations entre l'échelle de la carte et la nature des objectifs (In Drouiche, 2012).

Dans le cas de la présente étude, on vise l'évaluation de la vulnérabilité à la pollution de la plaine d'El-Kantara. Alors, l'échelle locale convient à cet objectif. Les cartes établies serviront comme outil pour la protection de la ressource en eau souterraine de cette zone.

4- Les méthodes d'estimation de la vulnérabilité : Les méthodes d'estimation de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution sont très nombreuses. Chacun élaborant sa méthode selon ses besoins. La multiplicité des méthodes provient aussi bien des objectifs recherchés (la réglementation, les activités humaines, les polluants), que du nombre d'organismes qui développent leur propre méthode pour une utilisation spécifique à leur pays. Il est difficile de sélectionner une méthode d'évaluation de la vulnérabilité. Diverses raisons peuvent motiver le choix d'une méthode par rapport à une autre. Dans notre cas, protection des eaux souterraines et le suivi de l'évolution de la pollution dans la zone d'étude, la sélection est mise sur les méthodes intrinsèques et spécifiques. Les méthodes peuvent être répartir en trois groupes:

- * Les méthodes cartographiques : qui se basent sur la superposition de cartes ;
- * Les méthodes des systèmes paramétriques qui utilisent un système de cotation numérique ;
- * Les méthodes analytiques qui se réfèrent aux équations.

4.1-Vulnérabilité du système aquifère de la plaine d'El-Kantara par les méthodes intrinsèques :

4.1.1- Vulnérabilité du système aquifère de la plaine d'El-Kantara selon la méthode GOD (Foster 1987):

4.1.1.1- Présentation de la méthode : Ce système a été développé par Foster et Hirata. Il présente la vulnérabilité de l'aquifère face à la percolation verticale de polluants à travers la zone non saturée et ne traite pas de la migration latérale des polluants dans la zone saturée, voir la figure (**FIG .VI. 101**).

Cette méthode est basée sur l'identification de trois critères :

- * Type de nappe (Groundwater occurrence) ;
- * Type d'aquifère en termes de facteurs lithologiques (Overall aquifer class) ;
- * Profondeur de la nappe (Depth to Groundwater table) : C'est un paramètre très important. Elle constitue un facteur déterminant de la vulnérabilité. Plus cette profondeur est élevée, plus le contaminant met de long temps pour atteindre la surface piézométrique. Pour la nappe alluvionnaire d'El-Kantara, ce paramètre a été déterminé pendant les relevés piézométriques des différentes campagnes.

Le but de cette méthode est de réaliser une estimation rapide de la vulnérabilité d'un aquifère. L'indice de vulnérabilité est obtenu selon l'équation suivante : $I_v \text{ GOD} = C_G * C_O * C_D$ où C_G = cote du type d'aquifère, C_O = cote de la lithologie, C_D = cote de la profondeur à la nappe. La vulnérabilité augmente avec l'augmentation l'indice de GOD I. La classification, est faite en cinq classes allant de 0 à 1.

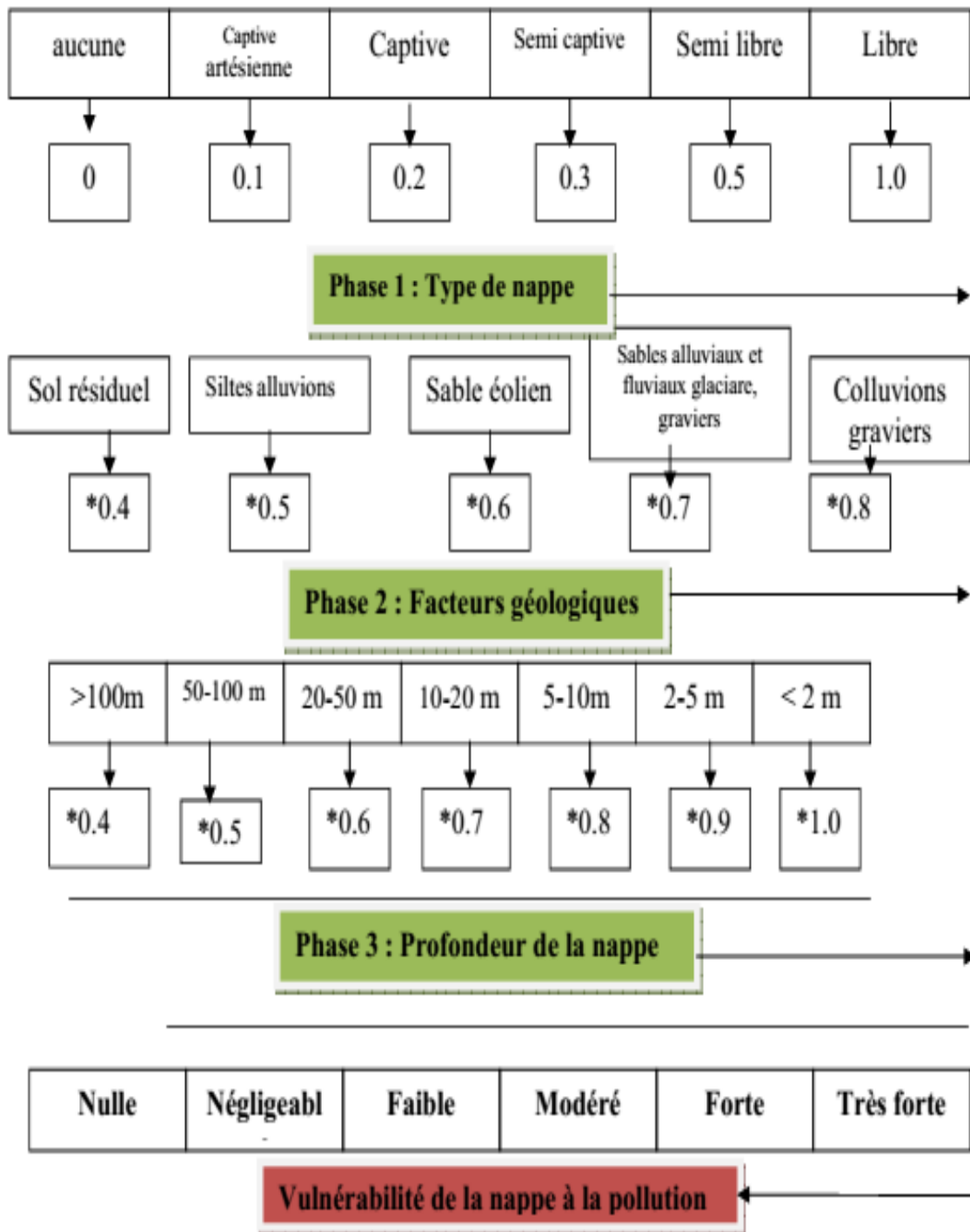


Fig.VI. 101: Système empirique GOD pour une estimation rapide de la vulnérabilité d'un aquifère (Foster, 1987).

4.1.1.2- Résultat et interprétation la carte de vulnérabilité à la pollution de la nappe Mio-Plio-Quaternaire de la région d'El-Kantara :

Le tableau (TAB .VI. 48) récapitule le calcul des différents indices de la méthode GOD.

TAB .VI. 48: Tableau récapitulatif des indices de la méthode de vulnérabilité intrinsèque GOD.

(Auteur, 2022)

| Points d'eau | xdec | ydec | P Aquifère | Cd | Cg | Co | Iv GOD |
|--------------|---------|---------|------------|-----|-----|------|--------|
| P1 | 769,778 | 213,98 | 9,5 | 0,8 | 0,9 | 0,75 | 0,54 |
| P2 | 769,61 | 213,697 | 17 | 0,7 | 0,9 | 0,75 | 0,47 |
| P3 | 769,161 | 213,468 | 6,8 | 0,8 | 0,9 | 0,75 | 0,54 |
| P4 | 768,989 | 213,308 | 2 | 0,9 | 0,9 | 0,75 | 0,61 |
| P5 | 769,942 | 213,584 | 24 | 0,6 | 0,9 | 0,75 | 0,41 |
| P6 | 770,084 | 213,897 | 23 | 0,6 | 0,9 | 0,75 | 0,41 |
| P7 | 770,526 | 214,372 | 17,9 | 0,7 | 0,9 | 0,75 | 0,47 |
| P8 | 770,652 | 214,376 | 8,7 | 0,8 | 0,9 | 0,75 | 0,54 |
| P9 | 770,951 | 214,539 | 4 | 0,9 | 0,9 | 0,75 | 0,61 |
| P10 | 768,297 | 211,931 | 7,4 | 0,8 | 0,9 | 0,75 | 0,54 |
| P11 | 768,297 | 211,931 | 3 | 0,9 | 0,9 | 0,75 | 0,61 |
| P12 | 768,356 | 212,488 | 9,7 | 0,8 | 0,9 | 0,75 | 0,54 |
| P13 | 768,153 | 212,482 | 7,5 | 0,8 | 0,9 | 0,75 | 0,54 |
| P14 | 770,615 | 213,913 | 7,6 | 0,8 | 0,9 | 0,75 | 0,54 |
| P15 | 770,615 | 213,913 | 3,5 | 0,9 | 0,9 | 0,75 | 0,61 |
| P16 | 770,69 | 213,946 | 4 | 0,9 | 0,9 | 0,75 | 0,61 |
| P17 | 770,879 | 214,414 | 6 | 0,8 | 0,9 | 0,75 | 0,54 |
| P18 | 771,826 | 214,874 | 7,5 | 0,8 | 0,9 | 0,75 | 0,54 |
| P19 | 770,879 | 214,414 | 13 | 0,7 | 0,9 | 0,75 | 0,47 |
| P20 | 772,698 | 215,333 | 8 | 0,8 | 0,9 | 0,75 | 0,54 |
| P21 | 772,796 | 215,428 | 3,7 | 0,9 | 0,9 | 0,75 | 0,61 |

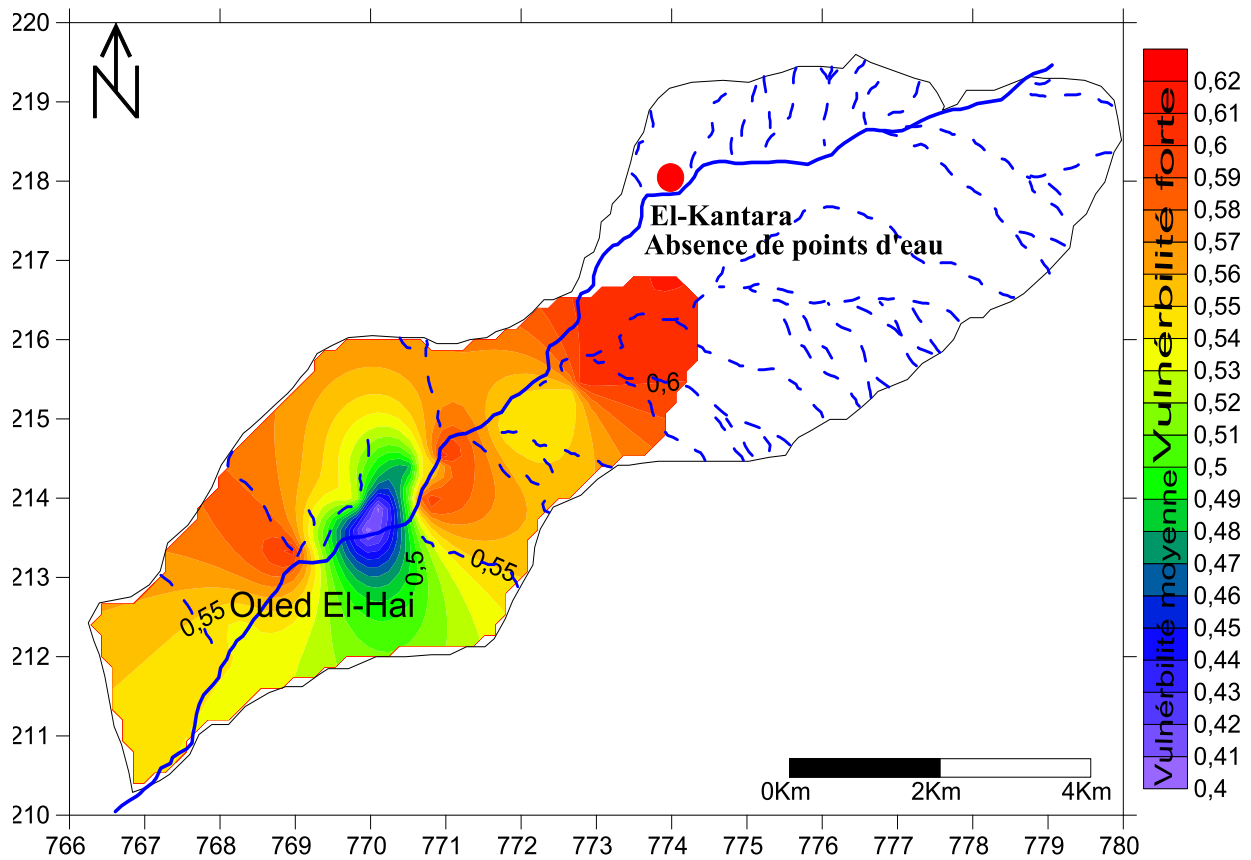


Fig.VI. 102: Carte de vulnérabilité à la pollution de la nappe Mio-Plio-Quaternaire de la région

d'El-Kantara selon la méthode GOD . (Auteur, 2019).

La carte de vulnérabilité de la région d'étude permet de visualiser les principales zones à risque, qui sont liées à des indices Iv élevés. Pour caractériser cette vulnérabilité, on s'est basé sur les plages indiciaires de vulnérabilité qui sont utilisées communément voir le tableau (TAB .VI. 49) .

TAB .VI. 49: Tableau récapitulatif des intervalles des indices de vulnérabilité intrinsèque GOD et classes correspondantes.

| Indices de vulnérabilité de la méthode GOD | Classes de vulnérabilité correspondantes |
|--|--|
| 00-0.1 | Très faible |
| 0.1-0.3 | Faible |
| 0.3-0.5 | Moyenne |
| 0.5-0.7 | Forte |
| 0.7-1 | Très forte |

L'aquifère superficiel dont il est question d'étude se trouve dans les alluvions du Mio-Plio-Quaternaire dont les formations Quaternaires occupent la plus grande superficie .

-Le Quaternaire : Il s'agit d'une série de terrasses épaisses constituées essentiellement par des conglomérats, des lentilles limono-argileuses rougeâtres et de gros galets.

-Le Miocène : Il est formé de puissantes séries de conglomérats avec des passés argilo-gréseuses et des marno-calcaires.

-Le pliocène : il est constitué essentiellement par des formations gréseuses et des galets. L'observation de cette carte montre l'importance de l'étendue des terrains à vulnérabilité forte à la pollution, qui occupent la majorité de la superficie totale et dont l'indice varie entre 0,5-0,62 . En revanche, les terrains à vulnérabilité moyenne à la pollution occupent une faible superficie, dont l'indice varie entre 0,4- 0,5 ; principalement aux alentours des puits P2,P5,P6,P7 et P19.

De ce fait, on peut dire qu'il s'agit d'une nappe globalement à vulnérabilité forte à la pollution.

4.1.2- Vulnérabilité du système aquifère de la plaine d'El-Kantara selon la méthode DRASTIC :

4.1.2.1- Présentation de la méthode :

La méthode DRASTIC a été développée par l'association NWWA (National Water Well Association) pour le compte de l'USEPA (U.S. Environmental Protection Agency). Conçue entre 1983 et 1987, afin d'estimer le potentiel de pollution des eaux souterraines (Schneblen et al. 2002). Cette méthode a été testée et appliquée à douze régions hydrogéologiques des Etats-Unis d'Amérique (Fréchette, 1987).

Elle est basée sur un système de cotation numérique et permet l'établissement des cartes de vulnérabilité qui sont la synthèse des connaissances lithologiques, pédologiques et hydrogéologiques d'une région.

Son application nécessite néanmoins la vérification de certaines conditions d'application :

- La source de pollution potentielle est localisée à la surface du sol ;
- Les polluants sont entraînés depuis la surface du sol jusqu'à la nappe par l'infiltration efficace ;
- Dans le cas où la source de pollution serait située en profondeur dans le sol, la méthode demeure valable en modifiant les paramètres affectés par la position de la source de pollution.

4.1.2.2- Les paramètres de la méthode DRASTIC :

La méthode DRASTIC permet d'évaluer la vulnérabilité verticale en se basant sur sept paramètres physiographiques et hydrogéologiques qui sont :

- [**D**] : Depth to groundwater (Distance à la nappe, épaisseur de la zone non saturée).
- [**R**] : Recharge (recharge de l'aquifère).
- [**A**] : Aquifer media (le type d'Aquifère ou nature de la zone saturée).
- [**S**] : Soil media (nature du sol).
- [**T**] : Topography (topographie et pente en %).
- [**I**] : Impact of the vadose zone (l'impact de la zone vadose ou la nature de la zone non saturée).
- [**C**] : Conductivity (la Conductivité hydraulique ou la perméabilité de l'aquifère).

4.1.2.3- Système de cotation : L'indice DRASTIC est basé sur l'évolution des 7 paramètres suscités. Chaque paramètre est assigné d'un poids relatif fixe dont la valeur, compris entre 1 et 5, afin de relativiser leur importance respective en termes de vulnérabilité. Un paramètre prépondérant se voit assigner un poids de 5 alors qu'un paramètre ayant moins d'impact sur le devenir d'un contaminant est assigné d'un poids de 1 (**TAB .VI. 50**).

TAB .VI. 50: Tableau récapitulatif des sept (7) paramètres " DRASTIC " et leur poids.

| Symbole | Paramètres | Poids |
|---------|---|-------|
| D | Profondeur de l'eau | 5 |
| R | Recharge efficace | 4 |
| A | Milieu aquifère (zone saturée) | 3 |
| S | Type de sol (Milieu sol au-dessus de la zone non saturée) | 2 |
| T | Topographie | 1 |
| I | Impact de la zone vadose (nature de la zone non saturée) | 5 |
| C | Conductivité hydraulique (perméabilité aquifère) | 3 |

Chaque paramètre est cartographié avec un index, appelé aussi note (n), allant typiquement de 1 à 10. La notation 1 correspond aux conditions de moindre vulnérabilité alors que la notation 10 reflète les conditions les plus propices à la contamination, donc un degré de vulnérabilité le plus élevé.

Les notations générales accordées aux sept paramètres de la méthode DRASTIC sont présentées dans le tableau (**TAB .VI. 51**).

L'index de vulnérabilité final (I_d) est la somme pondérée des sept paramètres selon la formule suivante :

$I_d = (D_n \times D_p) + (R_n \times R_p) + (A_n \times A_p) + (S_n \times S_p) + (T_n \times T_p) + (I_n \times I_p) + (C_n \times C_p)$ où D,R,A,S,T,I,C, sont les paramètres cités plus haut :

n : notation accordée à chaque paramètre

p : facteur de pondération accordé à chaque paramètre.

4.1.2.4-Construction de la carte de vulnérabilité :

-Profondeur de la nappe (D) :

La profondeur de la nappe est déterminée parce que le transport des polluants et leur évolution se fait dans le sol et le sous sol, le poids attribué est de l'ordre de cinq (5) du fait qu'elle contrôle la pollution. Dans le cas d'une nappe libre, la profondeur de l'eau représente la portion du sol entre la limite de la couche végétale et la surface piézométrique libre de la nappe.

Dans le cas d'une nappe captive, la profondeur de l'eau représente la tranche de sol entre la couche végétale et le toit de l'aquifère. Ce paramètre, difficile à évaluer, nécessite souvent des mesures de terrain.

TAB .VI. 51: Tableau récapitulatif Notations accordées aux paramètres de la méthode DRASTIC

(L'allemand-Barrès, 1994).

| D : DISTANCE A LA NAPPE, EPAISSEUR DE LA ZONE NON SATUREE | | R : RECHARGE (PLUIE EFFICACE) | |
|--|----------|--------------------------------------|----------|
| Valeurs en mètre | Notation | Valeurs en mm | Notation |
| 0 - 1,5 | 10 | 25,5 | 9 |
| 1,5 - 4,5 | 9 | 17,5 - 25,5 | 8 |
| 4,5 - 9 | 7 | 10 - 17,5 | 6 |
| 9 - 15 | 5 | 5 10 | 3 |
| 15 - 22 | 3 | 0 - 5 | 1 |
| 22,5 - 30 | 2 | | |
| 30 | 1 | | |

| A : NATURE DE LA ZONE SATUREE | | S : NATURE DU SOL | |
|--------------------------------------|----|--------------------------|----|
| Calcaire karstique | 10 | Peu épais ou absent | 10 |
| Basalte | 9 | Gravier | 10 |
| Sable et gravier | 8 | Sables | 9 |
| Calcaire massif | 6 | Argile, agrégats | 7 |
| Grès massifs | 6 | Limon sableux | 6 |
| Métamorphique altéré | 4 | Limon | 5 |
| Métamorphique | 3 | Limon silteux | 4 |
| Shale massif | 2 | Limon argileux | 3 |
| | | Argiles non agrégée | 1 |

| T : TOPOGRAPHIE, PENTE | | I : NATURE DE LA ZONE NON SATUREE | |
|-------------------------------|----------|--|----|
| Valeurs en % de la pente | Notation | | |
| 0 - 2 | 10 | Calcaire karstique | 10 |
| 2 - 6 | 9 | Sable et gravier | 9 |
| 6 - 12 | 5 | Sable et gravier avec silt et argile | 8 |
| 12 - 18 | 3 | Grès | 6 |
| 18 | 1 | Calcaire | 6 |
| | | Silt/Argile | 1 |

| C : PERMEABILITE | |
|---|----|
| $9,4 \cdot 10^{-4}$ m/s | 10 |
| $4,7 \cdot 10^{-4} - 9,4 \cdot 10^{-4}$ m/s | 8 |
| $32,9 \cdot 10^{-5} - 4,7 \cdot 10^{-4}$ m/s | 6 |
| $14,7 \cdot 10^{-5} - 32,9 \cdot 10^{-5}$ m/s | 4 |
| $4,7 \cdot 10^{-5} - 14,7 \cdot 10^{-5}$ m/s | 2 |
| $4,7 \cdot 10^{-7} - 4,7 \cdot 10^{-5}$ m/s | 1 |

-Acquisition et application des données de la Profondeur de la nappe (D) :

L'évaluation de ce paramètre a été faite sur la base des mesures piézométriques, effectuées dans la région d'étude en Septembre 2011. Ces mesures montrent que le niveau piézométrique de la nappe varie de 2 m à 28 m. Ces différentes valeurs permettent de distinguer plusieurs zones (**FIG .VI. 102**).

Chaque zone est affectée d'un indice de vulnérabilité partiel (ID), relatif au paramètre "Profondeur du niveau statique". La répartition des indices pour ce paramètre est reportée sur le tableau (TAB .VI. 52).

TAB .VI. 52: Tableau récapitulatif des Notations et pondérations selon la profondeur (Auteur, 2022).

| Profondeur de la nappe (m) | | | |
|----------------------------|----|----|-------|
| Intervalle | Dn | Dp | Dn.Dp |
| 1,5 – 4,5 | 9 | 5 | 45 |
| 4,5 – 9 | 7 | 5 | 35 |
| 9 – 15 | 5 | 5 | 25 |
| 15-23 | 3 | 5 | 15 |
| 23-31 | 2 | 5 | 10 |

Les indices ainsi calculés nous ont permis de dresser la carte correspondante (FIG .VI. 103). Elle fait ressortir de forts indices sur la majorité des terrains qui peuvent atteindre 45. La partie centrale très restreinte est caractérisée par les faibles indices , qui varient entre 10 et 20.

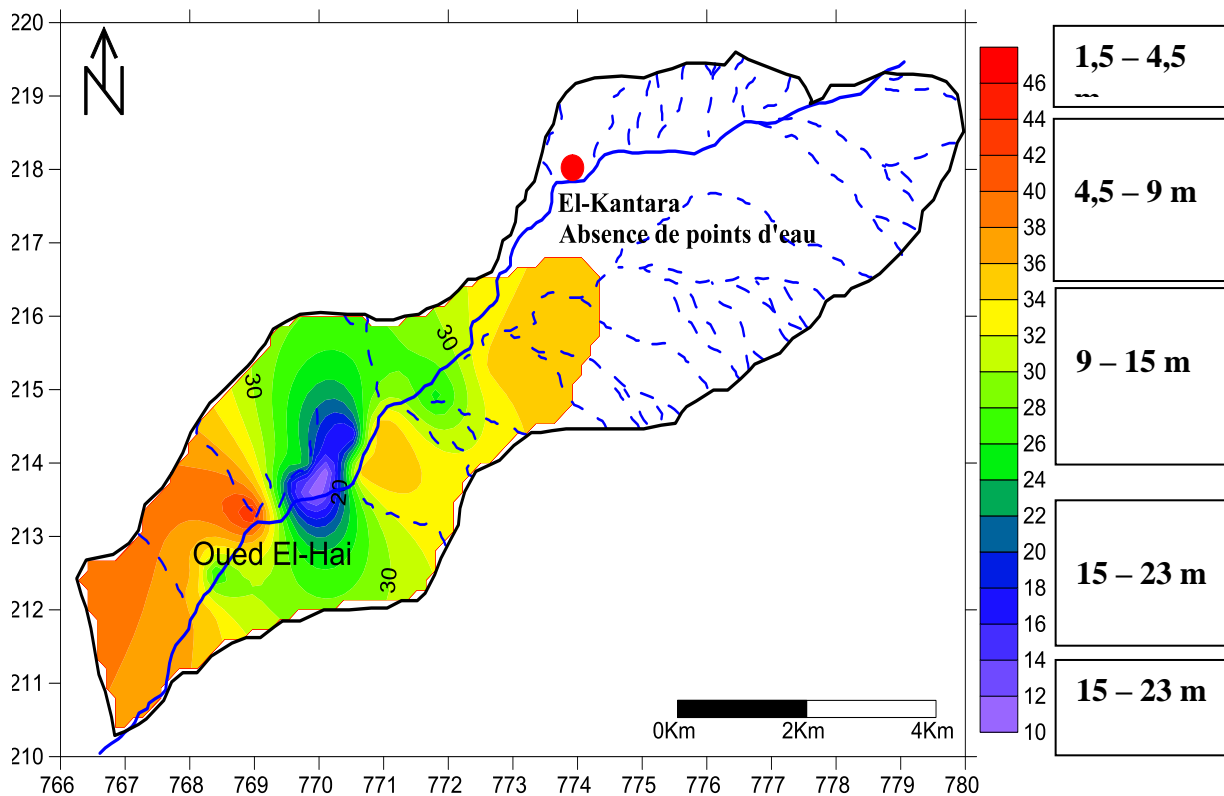


Fig.VI. 103: Carte de la profondeur d'eau et des indices (ID). (Auteur, 2022).

-La recharge efficace (R) :

La recharge nette, correspondant à l’infiltration efficace, est le seul paramètre responsable de la réalimentation des nappes. Elle représente ainsi le moyen de transfert du polluant de la surface du sol vers le milieu aquifère. La vulnérabilité des nappes augmente alors avec l’accroissement des infiltrations. Cependant, cette conclusion prête à confusion dans la mesure où une recharge importante saturerait le sol et la zone vadose, provoquant ainsi une dilution des polluants.

Par ailleurs, la recharge reste liée à plusieurs facteurs climatologiques, géologiques, topographiques et hydrologiques. Elle peut être estimée à partir des équations du bilan hydrologique ou déduite de la différence de charge des nappes entre les périodes de hautes et basses eaux.

-Acquisition et application des données :

La recharge efficace joue un rôle déterminant dans le transfert de la lame d’eau depuis la surface du sol jusqu’à l’aquifère sous-jacent. Ce paramètre est particulièrement difficile à évaluer lors des études hydrogéologiques.

Pour l’estimation de ce paramètre dans la nappe alluviale de la plaine d’El-Kantara, nous avons utilisé les résultats de bilans hydriques établis par la méthode de l’auteur Thornthwaite . La carte du paramètre Recharge nette (**TAB .VI. 53**) met en évidence la même répartition de la recharge efficace sur tout le territoire de la zone d’étude et montre un seul domaine d’indices de vulnérabilité partiels (IR) d’une valeur de recharge efficace égale à 8,97 mm, soit 0,897 cm .

TAB .VI. 53: Tableau récapitulatif des Notations et pondérations selon la Recharge (Auteur, 2022).

| RECHARGE (PLUIE EFFICACE) (mm) (R) | | | |
|------------------------------------|----------|----------|-----------|
| Intervalle | Rn | Rp | Rn. Rp |
| 5 – 10 | 3 | 4 | 12 |

-Nature de la zone saturée (le type d’Aquifère) (A):

Le milieu aquifère, ou zone saturée est le lieu approprié où peuvent être stockées des quantités d’eaux importantes.

-Acquisition et application des données :

La description du matériel constituant la zone saturée et non saturée, a été réalisée grâce à l’utilisation de la notice explicative, de la carte géologique de la région, des coupes

géologiques ,des logs de plusieurs sondages de reconnaissance qui ont été réalisés ainsi que des forages d'exploitation de la Direction hydraulique de la wilaya de Biskra captant l'aquifère principal .Ainsi, les puits creusés dans les formations quaternaires nous ont permis de faire une reconnaissance précise concernant la lithologie et la géométrie de l'aquifère principal formé essentiellement de galets ,graviers et des argiles rouges et brunâtre. Les bordures Ouest et Sud-ouest sont formées par des formations d'âge Miocène constituées essentiellement par des conglomérats avec des passés argilo-gréseuses et des marno-calcaires. Tandisque la bordure Nord-ouest est formée par des calcaires et des marnes et marnes gypseuses d'âge Eocène.

Conformément à la nature lithologique de l'aquifère, la carte relative à ce paramètre (TAB .VI. 54), montre pour l'ensemble de la plaine, hormis ses bordures latérales, un "indice Drastic" élevé égale à 24.

TAB .VI. 54: Tableau récapitulatif des Notations et pondérations selon la nature de la zone saturée (A) (Auteur, 2022) .

| Nature de la zone saturée (A) | | | |
|-------------------------------|----------|----------|-----------|
| Intervalle | An | Ap | An. Ap |
| Gravier et argiles sableuse | 8 | 3 | 24 |

-Type de sol (Milieu sol au-dessus de la zone non saturée) (S):

On s'intéresse à la couche végétale du sol de 1 à 2.5m d'épaisseur, siège d'une activité biologique et chimique intense. Le sol au sens pédologique résulte de l'altération des roches mères. Le SCS « Soil Conservation Service » a établi en 1984 une classification des sols sur la base du potentiel de pollution décroissant :

- Peu épais ou absent. ▪ Graviers. ▪ Sables.
- Tourbes, matières organiques non décomposés.
- Couches très minces et/ou en association de couches d'argiles.
- Terres grasses limono-sableuses.
- Terres grasses équilibrées en argiles, limons et sables.
- Terres argileuses, limono-argileuses.
- Matières organiques décomposées.
- Argiles non épaisses et non en association.

*L'attribution d'une cote standardisée pour le type de sol repose essentiellement sur la granulométrie. Une cote élevée, reflétant des conditions de haute vulnérabilité, est attribuée aux sols caractérisés par des particules grossières. La classification d'un sol dépend des

capacités de l'utilisateur, car le sol est formé par différents niveaux ou "horizons" qui ne sont décrit que par l'analyse des profils pédologiques. Pour la sélection d'un type de sol, il est recommandé de :

- *- Consulter la carte générale de l'occupation du sol.
- *- Définir les grandes classes de type de sol.
- *- L'adaptation de la texture du sol à la classification du SCS.

Acquisition et application des données :

Les informations dégagées à partir de la carte géologique de la plaine d'El-Kantara et les observations lors des campagnes de terrain, ont permis de dégager la nature du sol.

TAB .VI. 55 : Tableau récapitulatif des Notations et pondérations selon la nature du sol (S) (Auteur, 2022) .

| Nature du sol (S) | | | |
|--------------------------------------|----|----|--------|
| Intervalle | Sn | Sp | Sn. Sp |
| Calcaires à Argiles et conglomérats | 10 | 2 | 20 |
| Galets et lentilles argilo-sableuses | 10 | 2 | 20 |
| Conglomérat très grossier | 9 | 2 | 18 |
| Galets, Gravier et argiles sableuse | 8 | 2 | 16 |
| Alluvions argilo - sableuses | 6 | 2 | 16 |

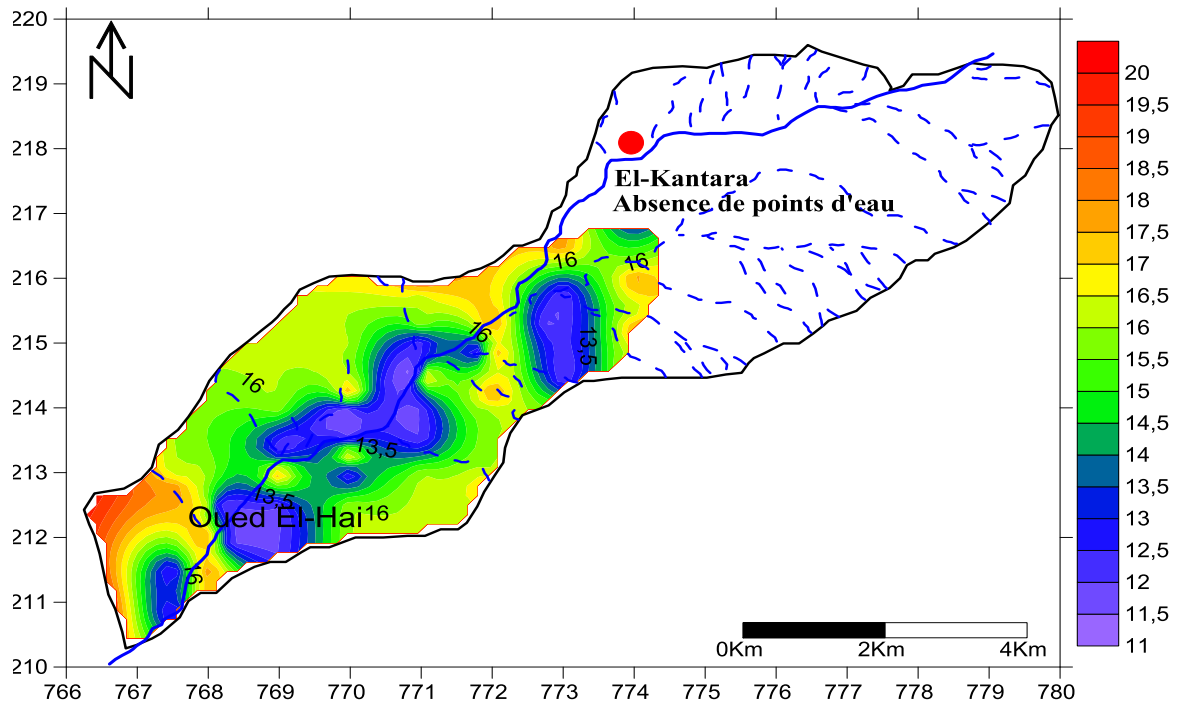


Fig.VI. 104: Carte des indices (IS) selon la nature du sol (S). (Auteur, 2022).

-

Topographie et pente (T) :

La pente du terrain influe directement sur le temps de concentration des polluants, elle contrôle certains paramètres tels que l’infiltration

-Acquisition et application des données :

L’examen de la carte topographique de la région et la carte des pentes (Kessah, 2012), fait ressortir trois plages principales de pentes telles que présentées sur le tableau (TAB .VI. 56) :

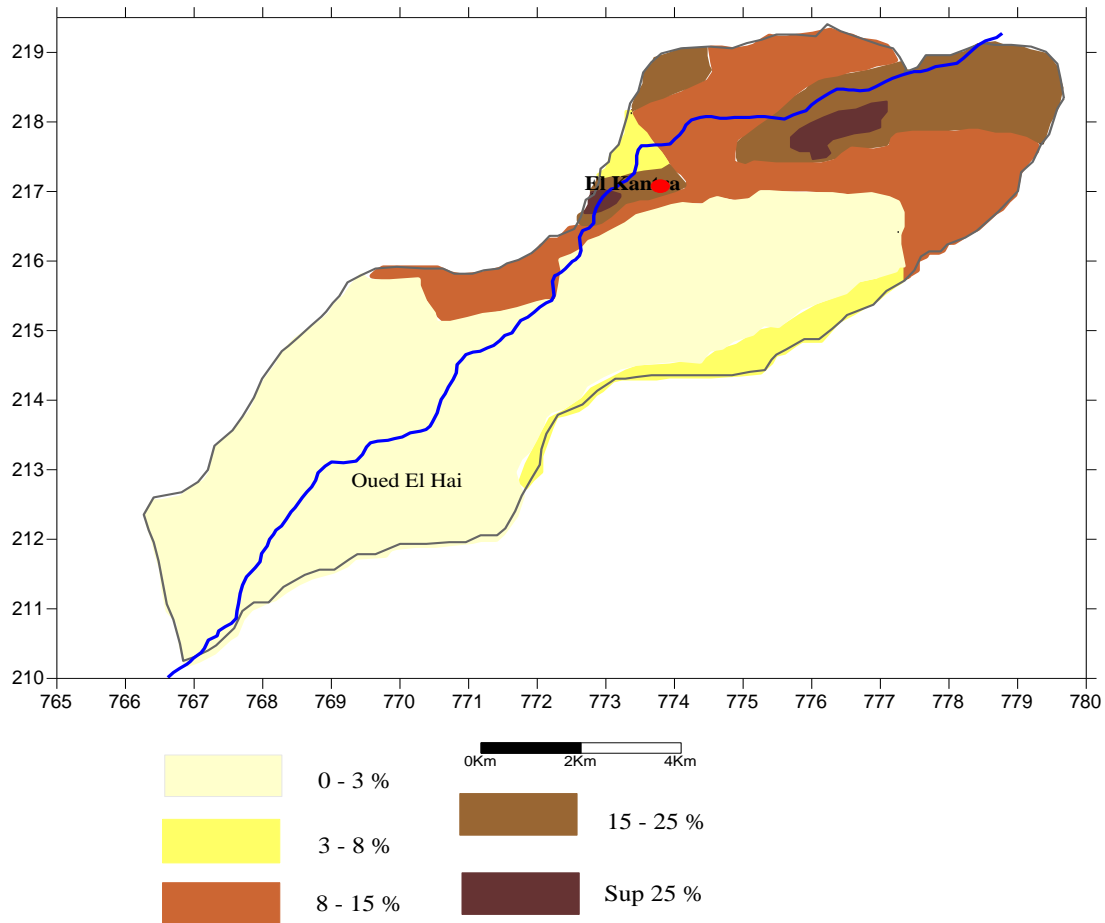


Fig.VI. 105: Carte des indices (IT) selon la Topographie (T).

TAB .VI. 56 : Tableau récapitulatif des Notations et pondérations selon la topographie (T) (Auteur, 2022).

| Topographie, Pente en % [P= (h/d)*100] (T) | | | |
|--|-----------|-----------|---------------|
| Intervalle | Tn | Tp | Tn. Tp |
| 0-3% | 10 | 1 | 10 |
| 3%-8% | 9 | 1 | 9 |
| 8%-15% | 8 | 1 | 8 |
| 15%-25% | 5 | 1 | 5 |
| >25% | 1 | 1 | 1 |

-Impact de la zone vadose (nature de la zone non saturée) (I) :

L'impact de la zone non saturée est considéré comme étant un paramètre très important par la méthode DRASTIC, car la nature et l'épaisseur de la partie comprise entre la surface du sol et l'aquifère, contrôlent dans une certaine mesure la vulnérabilité à la pollution des réservoirs.

-Acquisition et application des données :

Cette zone ne contient pas l'eau, mais dans certains cas ; comme le cas de la région d'étude, elle est caractérisée par une bonne perméabilité facilitant ainsi l'infiltration des eaux polluantes qui vont percoler vers la nappe.

Conformément à la faible superficie et à la nature lithologique de l'aquifère, la carte relative à ce paramètre (**TAB .VI. 57**), montre pour l'ensemble de la plaine une même lithologie; hormis ses bordures latérales, donc un "indice Drastic" élevé égale à 50.

TAB .VI. 57 : Tableau récapitulatif des Notations et pondérations selon Nature de la zone non saturée (vadose) (I) (Auteur, 2022)

| Nature de la zone non saturée (vadose) (I) | | | |
|---|-----------|-----------|---------------|
| Intervalle | In | Ip | In. Ip |
| Sable et gravier avec silt et argile | 10 | 5 | 50 |

-La perméabilité "Conductivité hydraulique (C) " : La perméabilité peut être considérée comme une vitesse à travers les terrains poreux traduite par le rapport entre la transmissivité et l'épaisseur de l'aquifère.

- Acquisition et application des données : Conformément à la faible superficie et à la nature lithologique de l'aquifère, et vue le manque de données. La réalisation de la carte relative à ce paramètre a été basé sur les résultats des trois essais de pompage réalisés sur terrain et l'enquête de terrain (relevés piézométriques, profondeurs de la nappes et profondeurs des puits,...). Donc, on prenant la moyenne des transmissivité calculées ($T_{moy}=1.62 \times 10^{-3} m^2/s.$) et on la divise par l'épaisseur de la nappe de chaque puits calculée durant la période des hautes eaux de Février 2012.

TAB .VI. 58 : Tableau récapitulatif des Notations et pondérations selon Conductivité hydraulique m/s(perméabilité) (C) (Auteur, 2022)

| Conductivité hydraulique m/s (perméabilité) (C) | | | |
|--|-----------|-----------|---------------|
| Intervalle | Cn | Cp | In. Ip |
| >9,4 10-4 m/s | 10 | 3 | 30 |

La carte de ce paramètre montre pour l'ensemble de la plaine un même "indice Drastic IC " élevé égale à 30 (**TAB .VI. 58**) .

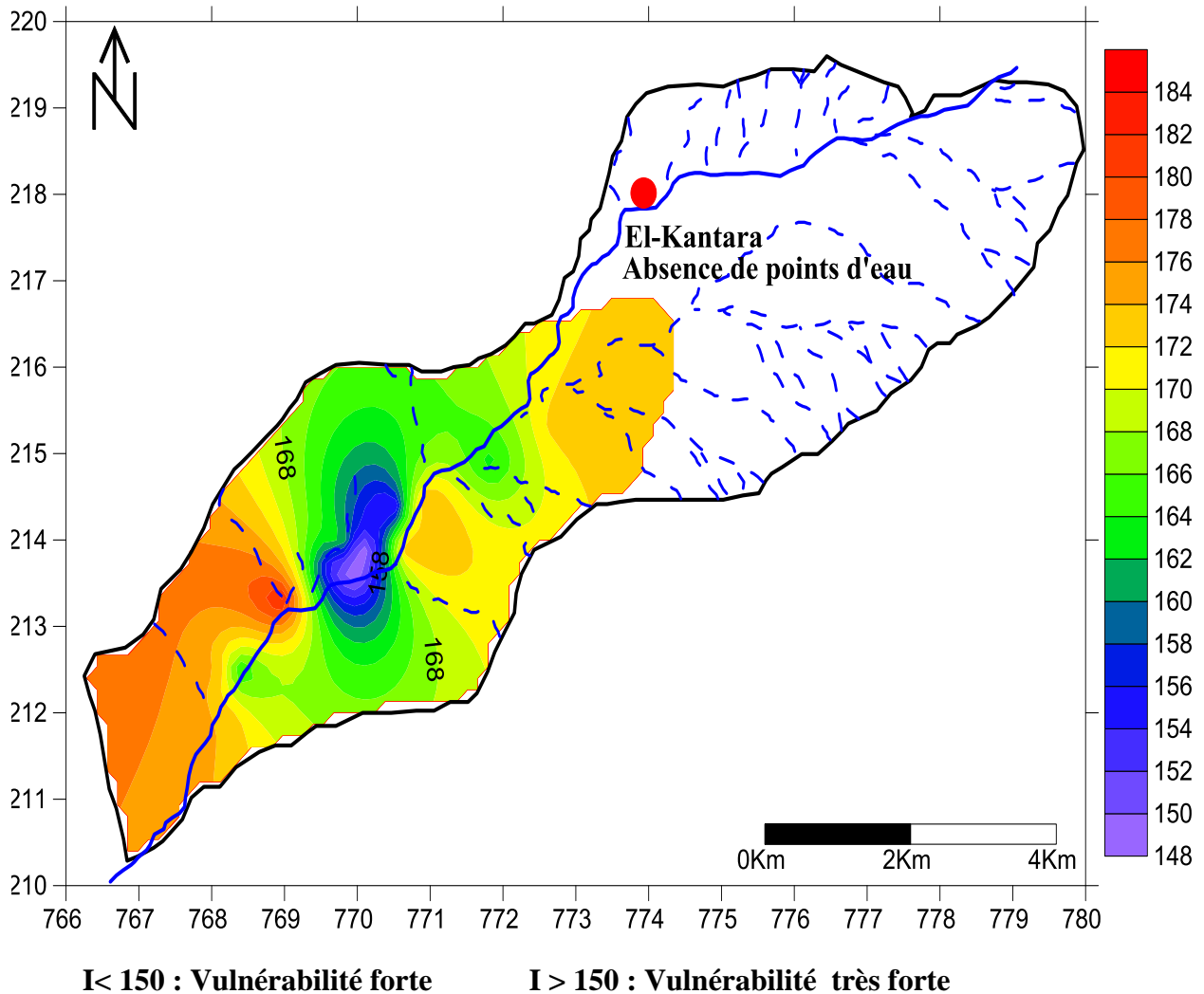


Fig.VI. 106: Carte de vulnérabilité selon la méthode DRASTIC. (Auteur, 2022).

La carte de vulnérabilité à la pollution chimique de la plaine d'El-Kantara (**FIG .VI. 106**), révèle deux zones de degré de vulnérabilité différente. Les zones de forte vulnérabilité à la pollution occupent une faible superficie du centre de la plaine au niveau des deux puits P5 et P6 qui se caractérisent par une profondeur importante et dont l'indice varie entre 148 et 150 . En revanche, les terrains à vulnérabilité très forte à la pollution occupent la majorité de la superficie totale et dont l'indice varie entre 150 et 184.

4.2-Vulnérabilité du système aquifère de la plaine d'El-Kantara par les méthodes spécifiques :

4.2.1- Présentation de la méthode de l'Indice de la pollution des eaux souterraines (IPE) (PIG) (Horton et al ,1965), (Davis et al, 1966), (Mnjunath et al, 2014), (Subba,2012), (Subba Rao et al, 2018), (El Hmaidi et al, 2020), (Kerboub et al, 2022) :

L'indice de la pollution des eaux souterraines (IPE) (PIG, pour pollution index of Grouwndwater) est une échelle numérique quantifiant l'ampleur de la contamination. Il reflète une influence composite des mesures individuelles de la qualité de l'eau sur la qualité globale de l'eau de l'aquifère. L'algorithme pour calculer IPE (PIG) est donné comme suit:

TAB .VI. 59 : Tableau récapitulatif des poids et des poids relatifs des paramètres physico-chimiques (Auteur, 2022) .

| Paramètres chimiques (Water quality measure) | Unités (Units) | Poids du Paramètre (Weight parameter) (Wp) SEP 2011/FEV 2012 | Poids relatifs (Relative weight) (Rw) SEP 2011/FEV 2012 | Poids du Paramètre (Weight parameter) (Wp) SEP 2014/FEV 2015 | Poids relatifs (Relative weight) (Rw) SEP 2014/FEV 2015 | Normes de potabilités Algériennes (Drinking water quality standard (Ds)*) |
|---|-------------------|--|---|--|---|---|
| PH | / | 5 | 0,0806 | 5 | 0,0926 | 7,5 |
| Ca ⁺² | mg/l | 2 | 0,0323 | 2 | 0,0370 | 200 |
| Mg ⁺² | mg/l | 2 | 0,0323 | 2 | 0,0370 | 150 |
| Na ⁺ | mg/l | 4 | 0,0645 | 4 | 0,0741 | 200 |
| K ⁺ | mg/l | 1 | 0,0161 | 1 | 0,0185 | 12 |
| SO ₄ ²⁻ | mg/l | 5 | 0,0806 | 5 | 0,0926 | 400 |
| HCO ₃ ⁻ | mg/l | 3 | 0,0484 | 3 | 0,0556 | 300 |
| Cl ⁻ | mg/l | 4 | 0,0645 | 4 | 0,0741 | 350 |
| NO ₂ | mg/l | 5 | 0,0806 | 5 | 0,0926 | 0,2 |
| NO ₃ ⁻ | mg/l | 5 | 0,0806 | 5 | 0,0926 | 50 |
| NH ⁴⁺ | mg/l | 5 | 0,0806 | 5 | 0,0926 | 0,5 |
| Cu ⁺² | mg/l | 2 | 0,0323 | 2 | 0,0370 | 2 |
| Fe ⁺² | mg/l | 4 | 0,0645 | 4 | 0,0741 | 0,3 |
| Pb | mg/l | 4 | 0,0645 | 4 | 0,0741 | 0,01 |
| EC | (µS/cm) | 3 | 0,0484 | 3 | 0,0556 | 2 800 |
| DBO5 | mg/l | 4 | 0,0645 | / | / | 5 |
| DCO | mg/l | 4 | 0,0645 | / | / | 20 |
| Sum (Σ) | | 62 | 1,0000 | 54 | 1,0000 | / |

-Poids du paramètre (Wp) : Dans cette approche, Une valeur numérique appelée Poids (W , pour Weight) , comprise entre 1 et 5, est attribuée à chaque paramètre chimique en tenant compte de son impact sur la santé humaine. Un poids maximum de 5 a été attribué par exemple pour les nutriments (Nitrates et Nitrites) , 4 pour les éléments métalliques en trace tels que le Fer, le Cuivre et le Plomb le TDS , 3 pour les Bicarbonates, 2 pour le Calcium et le Magnésium et un poids minimum de 1 pour le Potassium . Les poids attribués aux différents paramètres physico-chimiques sont présentés dans le tableau (TAB .VI. 59).

-Poids relatif (RW) : Un poids relatif (RW, pour Relative Weight) pour chaque paramètre chimique est calculé par l'équation suivante :

$$RW = Wp / \sum Wp \text{ (TAB .VI. 59).}$$

- L'état de la concentration (Sc, pour Status of concentration) : Est calculé en divisant la concentration (C, pour concentration) de chaque mesure de la qualité de l'eau de chaque échantillon d'eau par sa norme de qualité de l'eau potable (Ds, pour Drinking water quality standard) respective. $Sc = C / Ds$.

- Qualité globale de l'eau (Ow, Overall water quality): Le poids Relative (Wp) de chaque mesure de la qualité de l'eau est multiplié par son Sc correspondant pour quantifier la qualité globale de l'eau. Il est calculé par l'équation suivante :

$$Ow = RW * Sc.$$

- Calcul de l'indice de la pollution des eaux souterraines (IPE) (PIG): Pollution Index of Groundwater) : L'indice de pollution des eaux souterraines est calculé en ajoutant toutes les valeurs de Ow apportées par toute l'eau (mesures de la qualité de chaque échantillon d'eau). Il est calculé par l'équation suivante :

$$PIG = \sum Ow .$$

- Classification de l'indice de la pollution des eaux souterraines (IPE) (PIG) :

Cinq classes de qualité peuvent être identifiées selon les valeurs l'indice de la pollution des eaux souterraines (IPE) (PIG: Pollution Index of Grouwndwater) (TAB .VI. 60).

TAB .VI. 60 : Tableau récapitulatif de la Classification de l'eau selon l'IPE.

| Valeur de l'IPE (PIG) | Type de pollution (Type d'eau) |
|-----------------------|--------------------------------|
| < 1.0 | Pollution insignifiante |
| 1.0- 1.5 | Pollution faible |
| 1.5-2.0 | Pollution moyenne |
| 2.0-2.5 | Pollution forte |
| >2.5 | Pollution très forte |

4.2.2- Résultats et discussion de la méthode de l'Indice de la pollution des eaux souterraines (IPE) (PIG) :

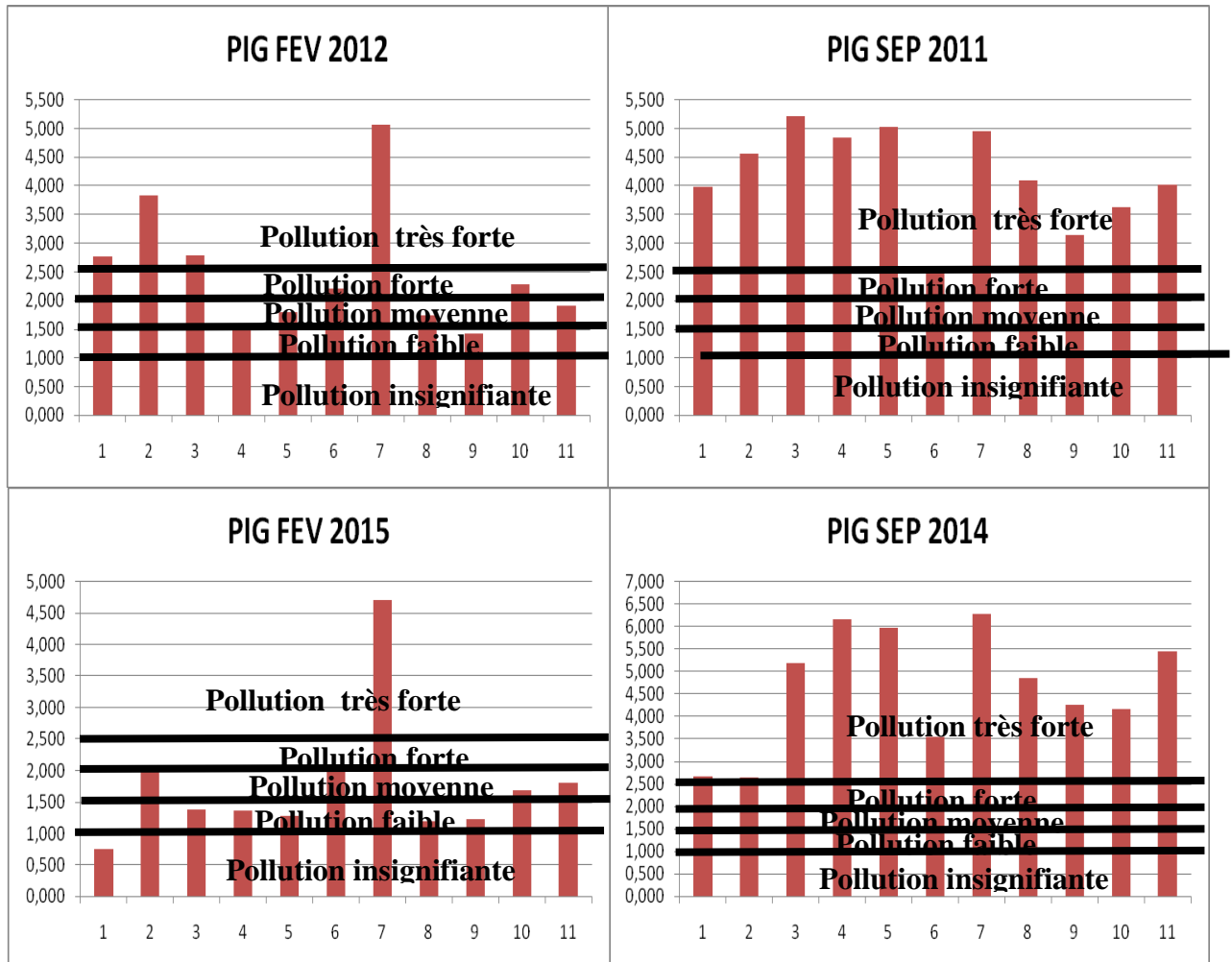


Fig.VI. 107: Histogrammes de variation de l'indice IPE (PIG) dans les eaux de la plaine d'El-Kantara.

(Auteur, 2022)

D'après la (**FIG .VI.107**), les valeurs de l'indice IPE sont comprises entre un minimum de 0,746 et un maximum de 6,287 avec une moyenne de 3,276 et un Ecart-type de 1,60, ce qui indique en générale une pollution très forte de la zone d'étude durant cette période de travail.

-Pour la campagne de SEP 2011 : Les valeurs de l'indice IPE varient d'un minimum de 2,591 enregistré au point d'eau (6) et un maximum de 5,216 enregistré au point d'eau (3) avec une moyenne de 4,190 et un Ecart-type de 0,83 .Selon les valeurs de l'indice IPE tous les points d'eaux durant cette campagne présentent une pollution très forte.

-Pour la campagne de FEV 2012 : Les valeurs de l'indice IPE varient d'un minimum de 1,430 enregistré au point d'eau (9) et un maximum de 5,064 enregistré au point d'eau (7) avec une moyenne de 2,486 et un Ecart-type de 1,10 .. Selon les valeurs de l'indice IPE, la classification des points d'eaux durant cette campagne est comme suit :

- 36 ,36 % des points d'eaux présentent une pollution très forte ;
- 18,18% des points d'eaux présentent une pollution forte ;
- 36 ,36 % des points d'eaux présentent une pollution moyenne ;
- 9,1% des points d'eaux présentent une pollution faible.

-Pour la campagne de SEP 2014 : Les valeurs de l'indice IPE varient d'un minimum de 2,646 enregistré au point d'eau (2) et un maximum de 6,287 enregistré au point d'eau (7) avec une moyenne de 4,658 et un Ecart-type de 1,31 .Selon les valeurs de l'indice IPE tous les points d'eaux durant cette campagne présentent une pollution très forte.

-Pour la campagne de FEV 2015 : Les valeurs de l'indice IPE varient d'un minimum de 1,430 enregistré au point d'eau (9) et un maximum de 5,064 enregistré au point d'eau (7) avec une moyenne de 2,486 et un Ecart-type de 1,10 . Selon les valeurs de l'indice IPE, la classification des points d'eaux durant cette campagne est comme suit :

- 9,1% des points d'eaux présentent une pollution insignifiante.
- 45,44 % des points d'eaux présentent une pollution faible.
- 18,18% des points d'eaux présentent une pollution moyenne ;
- 18,18% des points d'eaux présentent une pollution forte ;
- 9,1% des points d'eaux présentent une pollution très forte ;

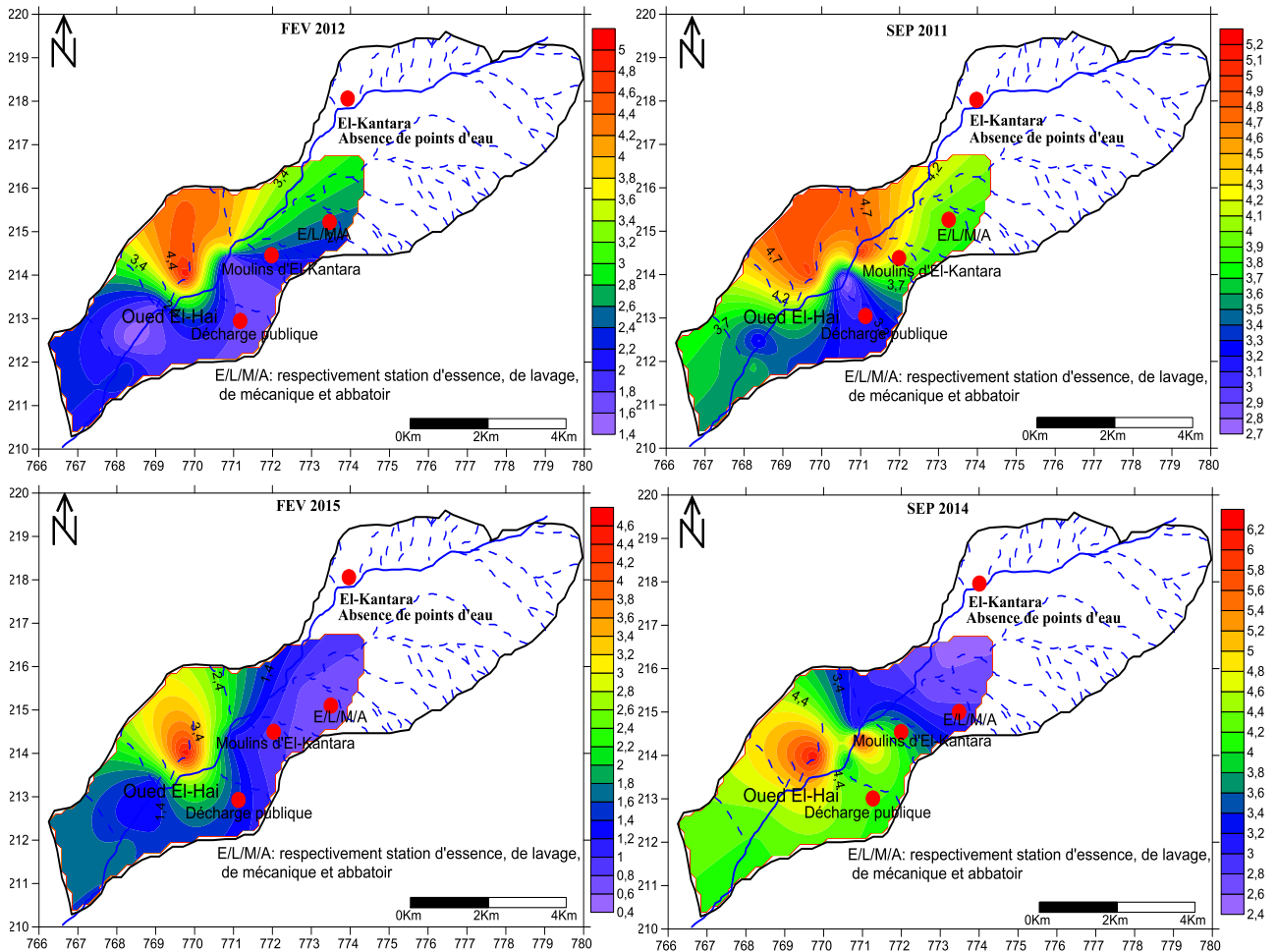


Fig.VI. 108: Carte de vulnérabilité selon la méthode IPE (PIG). (Auteur,

L'examen des cartes tracées de la période d'étude (**FIG.VI.108**) confirme que la vulnérabilité spécifique est directement liée aux sources de pollution. Donc elle est évolutive et ne caractérise qu'un instant précis. De plus la variabilité de l'indice IPE durant les périodes des hautes eaux et les périodes des basses eaux, nous avons pu faire ressortir cinq zones peuvent être identifiées selon les valeurs l'indice de la pollution des eaux .Trois zones sont importantes :

- Zone de pollution très forte qui occupe la totalité des terrains en Septembre 2011 et d'un degré moindre et respectivement en Septembre 2014, Février 2012 (le secteur NW) et Février 2015(zone très restreinte du secteur NW).
- Zone de pollution faible qui est importante en période des hautes et notamment en Février 2015.
- Zone de pollution moyenne qui est importante en période des hautes et notamment en Février 2012.

5-Conclusion :

Trois méthodes ont été adoptées pour la cartographie de la vulnérabilité à la pollution chimique de l'aquifère alluvionnaire d'El-Kantara. Elles tiennent compte de plusieurs facteurs, tels que la lithologie, la piézométrie et l'hydrochimie. L'analyse des cartes obtenues a permis de distinguer plusieurs zones de degré de vulnérabilité différent :

- L'application de la méthode de vulnérabilité intrinsèque GOD montre que 23,38% des points d'eau présentent une vulnérabilité moyenne, tandis que le reste des points d'eaux est caractérisé par une vulnérabilité forte ;

- La cartographie des zones de vulnérabilité de la nappe alluvionnaire d'El-Kantara par la méthode de vulnérabilité intrinsèque DRASTIC révèle que 9,52% des points d'eau présentent une vulnérabilité forte, alors que le reste des points d'eaux est marqué par une vulnérabilité très forte.

- L'application de la méthode de vulnérabilité spécifique basée sur l'indice de la pollution des eaux souterraines IPE montre cinq zones :

1) Zone de pollution insignifiante représente 9,1% des points d'eaux qui apparaisse uniquement durant la campagne de Février 2015.

2) Zone de pollution faible qui représente respectivement 9,1% et 45,44 % des points d'eaux durant la campagne de Février 2012 et Février 2015.

3) Zone de pollution moyenne qui représente respectivement 36 ,36 % et 18,18% des points d'eaux durant la campagne de Février 2012 et Février 2015.

4) Zone de pollution forte qui représente 18,18% des points d'eaux durant les campagnes de Février 2012 et Février 2015.

5) Zone de pollution très forte qui couvre la totalité des terrains en septembre 2011 et presque la majorité de la plaine en Septembre 2014. Alors qu'elle représente respectivement 36 ,36 % et 9,1% des points d'eaux durant la campagne de Février 2012 et Février 2015.

Conclusion générale

Conclusion générale et perspectives :

Les raisons qui nous ont incités à entreprendre cette étude ainsi que les objectifs assignés ont été exposés dans l'introduction générale. Nous avons essayé d'aborder la problématique de ce travail de thèse par plusieurs approches indépendantes espérant converger vers un même résultat. Nous avons mis beaucoup de temps pour obtenir et crier une base de données satisfaisante (terrain vierge et études rares). Ainsi, traiter, comprendre ces données de diverses natures et origines et les intégrer ensemble dans des schémas de compréhension hydrogéologique et hydrochimique n'a pas été chose facile. Néanmoins nous avons pu obtenir quelques résultats et faire des constats qui peuvent contribuer à améliorer l'état de connaissance sur les ressources en eau de la région d'étude et donner des orientations pour des investigations dans d'autres contextes.

Principaux résultats obtenus :

Les différents chapitres de notre étude ont fait l'objet de conclusions partielles. Ainsi, résumons-nous brièvement les résultats obtenus.

-Cadre général : La zone objet de notre étude est située entre deux grandes wilayas, Batan et Biskra, pourra constituer un pôle de développement pour les prochaines décennies. L'essentiel des besoins en eau provient et continuera de provenir des eaux souterraines. Les questions de leur disponibilité et qualité se poseront de manière accrue.

La région d'étude El-Kantara (partie aval du sous-bassin versant d'Oued El-Haï) se situe au pied du massif des Aurès et entourée par les monts de Bellezma. Elle se trouve dans la wilaya de Biskra au Nord-est algérien. La région d'El-Kantara se trouve dans la wilaya de Biskra au Nord-est algérien. Elle constitue une ressource importante pour l'eau d'irrigation mais aussi, et de moindre importance, pour l'eau potable. Le dernier recensement officiel de 2016 a estimé la population d'El-Kantara à 13902 habitants avec une augmentation de l'ordre de 2.05%. Leur activité principale est l'agriculture. Le type d'industrie pratiquée à travers le territoire de la région d'étude varie entre matériaux de construction et produits alimentaires. L'étude la plus récente a estimé qu'El-Kantara génère 4.92 tonnes par jour de déchets solide.

-Etude géologique : la zone d'étude est caractérisée par une série sédimentaire complète, du Trias au Quaternaire. Essentiellement des formations quaternaires et des calcaires, qui sont perméables, permettant la création de nappes alluviales et de

possibles aquifères karstiques. Tandis que le reste des formations argileuses et marneuses, ont une faible perméabilité jouant ainsi le rôle de substratum imperméable permettant le ruissellement des eaux de surface.

Le réseau hydrographique de ce bassin versant est bien développé avec une densité de drainage de $3.23\text{km}/\text{km}^2$ où dominant les formations du Quaternaire.

-Etude géomorphologique: En terme hydrologique nous pouvant dire :

-Le réseau hydrographique du bassin versant d'oued EL-Hai est bien développé avec une densité de drainage de $3.23\text{km}/\text{km}^2$ où dominant les formations Quaternaires.

-L'écoulement ne se fait qu'à la faveur des précipitations et que l'écoulement de base est inexistant ce qui pose le problème de l'alimentation de l'aquifère.

-Etude climatologique : -La région d'El-Kantara est caractérisée par un climat steppique avec des tendances sahariennes caractérisées par une saison sèche qui va du mois de Mars jusqu'au mois de Novembre. Tous les facteurs par lesquels se manifeste l'aridité à savoir; les faibles moyennes annuelles de précipitation et leur irrégularité dans l'espace et dans le temps ainsi que les fortes évaporations sont réunis dans le climat de la plaine d'El-Kantara. La précipitation moyenne ne dépasse pas $261\text{ mm}/\text{an}$ et le calcul du bilan hydrique global à l'échelle mensuelle montre qu'il est déficitaire, mais il pourrait être excédentaire s'il était établi à l'échelle journalière.

-Etude hydrogéologique : Les études géologiques et hydrogéologiques ont permis de définir trois aquifères : Le premier caractérisé par des alluvions anciennes et actuelles de la nappe phréatique du Quaternaire, le second caractérisé par des Calcaires massifs fissurés du Maestrichtien tandis que le troisième constitué par des calcaires massifs fissurés du Turonien.

L'établissement des cartes piézométries des différentes périodes d'observation de l'aquifère superficiel a montré que l'écoulement général des eaux souterraines se fait vers le Sud avec un gradient hydraulique variable entre le Nord et le Sud, et d'une période à l'autre. La transmissivité moyenne est de l'ordre de $3.94.10^{-3}\text{ m}^2/\text{s}$.

-Etude hydrochimique et qualitative des eaux :

Les résultats des analyses physico-chimiques montrent que:

Les terrains géologiques et la pluviométrie ont une influence sur les concentrations des éléments chimiques. On assiste en général à une dilution de l'amont vers l'aval

aussi bien pour les eaux souterraines que pour les eaux de surface. Les sources de pollution se trouvent à l'amont ce qui justifie les fortes concentrations près de la zone d'activité et de la décharge publique.

Les diagrammes de Piper, Stiff, Stabler et Schoeller-Berkaloff ont montré que les sulfates dominant et s'accompagnent généralement de Calcium et les fortes concentrations de sulfate sont liées aux marne-gypseuses et aux eaux urbaines. Ainsi, ces diagrammes a permis de déterminer trois faciès chimiques principaux dans le secteur d'étude :

-Le faciès sulfaté calcique.

-Le faciès sulfaté sodique.

-Le faciès sulfaté magnésien.

La variation de la concentration des éléments chimiques durant la période de travail montre que la région étudiée est polluée par les éléments métallique en trace (ETM) tels que le Fer, le Cuivre, le Plomb et le Chrome et les éléments indicateurs de pollution agricole (trace) ,qui sont en relation surtout avec les rejets de la zone urbaine, la décharge publique et la zone d'activité (l'agriculture et la petite industrie).

-La Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) basée sur la méthode de Ward amène à classer les éléments chimiques en trois (03) classes différentes (C1, C2 et C3), en fonction de leurs degrés de corrélation et leurs moyennes.

-L'analyse statistique basée sur l'approche de la carte auto-organisatrice (SOM) de Kohonen a été appliquée sur une base de données, constituée de 14 paramètres physico-chimiques réalisés sur 22 échantillons des eaux d'El-Kantara entre Septembre 2011 et Février 2012. Elle a mis en exergue les différentes corrélations positives et négatives entre les différents paramètres physico-chimiques étudiés. La classification hiérarchique de la carte SOM (SOM-HC) a détecté des variations spatiales et saisonnières en identifiant le comportement physico-chimique des eaux. Le dendrogramme obtenu par SOM-CHA, suggère que les 22 neurones doivent être regroupés en 2 classes. La première classe est composée de 8 neurones .Elle contient 9 échantillons et donc représente 40,90 % de l'ensemble des données. Alors, La deuxième classe est représentée par 12 neurones .Elle contient 13 échantillons et donc représente 59,10 % de l'ensemble des données.

Cette différenciation serait probablement en relation avec la nature géologique des terrains traversés, la période de prélèvement et les rejets anthropiques.

--Etude de la vulnérabilité à la pollution des eaux:

Trois méthodes ont été adoptées pour la cartographie de la vulnérabilité à la pollution chimique de l'aquifère alluvionnaire d'El-Kantara. Elles tiennent compte de plusieurs facteurs, tels que la lithologie, la piézométrie et l'hydrochimie. L'analyse des cartes obtenues a permis de distinguer plusieurs zones de degré de vulnérabilité différent :

- L'application de la méthode de vulnérabilité intrinsèque GOD montre que 23,38% des points d'eau présentent une vulnérabilité moyenne, tandis que le reste des points d'eaux est caractérisé par une vulnérabilité forte ;

- La cartographie des zones de vulnérabilité de la nappe alluvionnaire d'El-Kantara par la méthode de vulnérabilité intrinsèque DRASTIC révèle que 9,52% des points d'eau présentent une vulnérabilité forte, alors que le reste des points d'eaux est marqué par une vulnérabilité très forte.

- L'application de la méthode de vulnérabilité spécifique basée sur l'indice de la pollution des eaux souterraines IPE montre cinq zones :

- 1) Zone de pollution insignifiante représente 9,1% des points d'eaux qui apparaisse uniquement durant la campagne de Février 2015.

- 2) Zone de pollution faible qui représente respectivement 9,1% et 45,44 % des points d'eaux durant la campagne de Février 2012 et Février 2015.

- 3) Zone de pollution moyenne qui représente respectivement 36,36 % et 18,18% des points d'eaux durant la campagne de Février 2012 et Février 2015.

- 4) Zone de pollution forte qui représente 18,18% des points d'eaux durant les campagnes de Février 2012 et Février 2015.

- 5) Zone de pollution très forte qui couvre la totalité des terrains en septembre 2011 et presque la majorité de la plaine en Septembre 2014. Alors qu'elle représente respectivement 36,36 % et 9,1% des points d'eaux durant la campagne de Février 2012 et Février 2015.

Recommandations:

Suite à cette étude, plusieurs recommandations peuvent être suggérées pour stopper la dégradation de la qualité des eaux souterraines, améliorer les conditions environnementales et mettre en place un dispositif de surveillance dans la plaine d'El-Kantara, ainsi :

- Améliorer le réseau des observations météorologiques qui a un rôle primordial dans le bassin et surtout la région et installer des lysimètres pour étudier l'infiltration efficace, ainsi que les processus de migration des sels vers la nappe ;
- Intensifier et augmenter le nombre des prélèvements et même procéder à des analyses bactériologiques et isotopiques.
- Installer un réseau de piézomètres, sans pompage, à travers la nappe pour contrôler la fluctuation du niveau piézométrique, pour pouvoir cueillir des informations, suivre les paramètres hydrodynamiques ainsi que la qualité des eaux souterraines.
- le centre urbain d'El-Kantara doit disposer d'un réseau d'assainissement liquide tout en interdisant aux habitants de jeter leurs déchets et les rejets des eaux usées dans des fosses septiques et de ne plus les creuser à l'intérieur des maisons et des hôtels. Il serait indispensable d'envisager la construction d'une station d'épuration ;
- la réalisation du traitement préalable des rejets émanant de la petite industrie avant qu'ils atteignent les eaux le milieu naturel.
- En ce qui concerne l'agriculture, le problème majeur des eaux souterraines est l'utilisation intensive des engrais chimiques surtout dans les sols à forte perméabilité. Afin de limiter l'infiltration des éléments chimiques vers la nappe ; il serait indispensable de raisonner les apports en engrais azotés pour éviter les sur-fertilisations qui sont très répandues dans la région et maîtriser le stockage et l'utilisation des déjections animales ;
- Effectuer des enquêtes exhaustives chaque année pour estimer les superficies irriguées et les débits de pompage et établir des cartes de distribution spatiale de ces superficies et de ces débits. Ceci pourrait aider à exiger une autorisation pour tout nouveau futur creusement de puits et à regrouper éventuellement les agriculteurs sous forme de petites associations ayant chacune un ou deux puits pour une bonne gestion des ressources en eau ;

- Adopter de nouvelles techniques d'irrigation (le goutte à goutte par exemple) plus économiques de l'eau (pas de pertes par évaporation, fuites,...) que le système « gravitaire », le plus répandu dans la région.

Perspectives scientifiques :

L'étude menée dans ce travail sur les eaux de l'aquifère Mio-Plio-Quaternaire de la plaine d'El-Kantara .Elle a permis de définir , de suivre le chimisme des eaux souterraines et d'aborder la pollution saline, nutritif et métallique. Cependant il serait intéressant de la compléter par :

-Examiner les possibilités et les moyens de recharger la nappe en commençant par effectuer des études géologiques, hydrogéologiques et surtout géophysiques plus détaillées de cet aquifère.

-L'élargissement du réseau d'échantillonnage hydrochimique, bactériologique et isotopique, pour avoir une chronique de données spatio-temporelles récente et continue afin de pouvoir approfondir les connaissances géochimiques du système aquifère de la région d'étude et mieux suivre l'évolution du chimisme de ces eaux.

Bibliographie

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Adjaout.S, Allouche.H ,2017 : Inventaire actualisé des points d'eau du système aquifère de la plaine d'El-Kantara région de Biskra.Memoire de master. .Univ Ferhat Abbas Sétif 1,108p.
- Alberto W *et al*, 2001. Pattern recognition techniques for the evaluation of spatial and temporal variations in water quality. A case study: Suquia River Basin (Cordoba-Argentina). *Water Research* 35 : 2881-2894p.
- Alvarez-Guerra E., Molina A., Viguri J. R. and Alvarez-Guerra M., 2011. A SOM based methodology for classifying air quality monitoring stations.*Environmental Progress & Sustainable Energy*, 30(3), 424-438.
- Alther G, 1979. A simplified statistical sequence applied to routine water quality analysis: a case history. *Ground Water* 17 : 556-561p.
- Agence Nationale des Ressources Hydriques (ANRH Batna, 2016) : Cartes thématiques et données pluviométriques.
- Agence Nationale des Ressources Hydriques (ANRH Biskra) : Données pluviométriques.
- Aziz .H, 2014 : Application de quelques traitements statistiques aux données hydrochimiques de la nappe alluviale du fossé de Sebdou (Nord-Ouest de l'Algerie). Mem. Master. Univ. Tlemcen. p145.
- Baali.F, 2001 : Etude hydrogéologique et hydrochimique de la région karstique de Cheria w.Tébessa . Thèse de Doctorat .univ Annaba,150p.
- Bakalowicz M. 1979 : Contribution de la géochimie des eaux à la connaissance de l'aquifère karstique et de la karstification. Thèse univ "Paris VI.269p.
- Belkhiri L, Boudoukha A, Mouni L, Baouz L, 2010. Multivariate statistical characterization of groundwater quality in Ain Azel plain, Algeria. *African Journal of Environmental Science and Technology* 4(8) : 526-534p.
- Bélousov V.1974 : Géologie structurale, Ed Mir, 237p.
- Bellion Y. 1972 : Etude géologique et hydrologique de la terminaison occidentale des Monts du Bellezma (Algérie). Thèse 3ème cycle, Paris VI, 221p.

- Benabas C. 2006 : Evaluation Mio-Plio-Quaternaire des bassins continentaux de l'Algérie Nord orientale ; apport de la photo géologie et analyse Morphostructurale, thèse de Doctorat, Univ Mantouri Constantine, 256p.
- Berrada M, El Hmaidi A., Monyr N., Abrid D., Abdallaoui A., Essahlaoui A., El Ouali A., 2014. Self-organizing map for the detection of seasonal variations in Sidi Chahed dam sediments. Hydrological Sciences journal, 15p. DOI:10.1080/02626667.2014.964717.
- Bouillin J.P. 1986. Le bassin maghrébin : une ancienne limite entre l'Europe et l'Afrique à l'ouest des Alpes. Bull. Soc. Géol. France, 547-558p.
- Brinis N. 2011. Caractérisation de la salinité d'un complexe aquifère en zone aride cas de l'aquifère d'El-outaya région Nord-Ouest de Biskra. Algérie. Thèse de Doctorat, Univ Mohamed Kheider – Biskra, 230p.
- Cabanes G., Bennani Y., 2011. Apprendre les contraintes topologiques dans les cartes auto-organisatrices. In EGC, 137-148.
- Carte pluviométrique de l'Algérie (1/500 000). Agence nationale des ressources hydriques 2003
- Carte topographique de Batna et Barika (1/200 000). Institut national de cartographie Alger 1961.
- Carte géologique d' El-Kantara (1/500 00). Ministère de l'énergie et des mines Alger 1972.
- Carte géologique de Merouana (1/500 00). Ministère de l'énergie et des mines Alger 1972.
- Castany. G , 1982 : Principes et méthodes de l'hydrogéologie. Edit. Dunod. Paris. 236 P.
- CASTANY G. et MARGAT (1977) : Dictionnaire français d'Hydrogéologie. Bur. Rech. Géol. Minière, 249p.
- Coiffait P E. 1992. Un bassin post-nappe dans son cadre structural l'exemple du bassin de Constantine (Algérie Nord Orientale). Thèse Sc Nancy I 502p.
- Cottrell M., Ibbou S., Letrémy P., Journal de la société française de statistique, 144(2003) 67-106.
- Davis S.N , Dewiest R.J.M, (1966). Hydrogeology, John Wiley & Sons Inc., New York.
- Direction Hydraulique de Wilaya de Biskra (DHWB ,2016) : données hydrogéologiques et piézométriques -DREVER .J .F, 1997: The geochemistry of natural waters. 3rd ed. New York – Prentice-Hall INC. 1997; 379 pp

- .
- Droubi A, Cheverry C, Fritz B, Tardy Y. 1976. Géochimie des eaux et des sels dans les sols des polders du lac Tchad: Application d'un modèle thermodynamique de simulation de l'évaporation. *Chemical Geology* 17 : 165-177p.
 - Drouiche .A, 2012 : Contribution à l'étude de la vulnérabilité spécifique à la pollution par les éléments en traces métalliques et les hydrocarbures cas de la nappe d'eau souterraine de la Mitidja .Thèse de Doctorat, Univ USTHB, 165p.
 - Durand-Delga,M. 1964 : Mise au point sur la structure du Nord-Est de la Berbérie. Publ. Serv. Géol. Algérie, n°39, 89-131p.
 - Durand-Delga.M. 1980 : La Méditerranée occidentale : étape de la genèse et problèmes structuraux liés à celle-ci Extr.Liv. Jubilaire.Soc. Géol.Fr. Mem H Série N°10 Paris, 203-224p.
 - El Hmaidi A, Talhaoui A, Manssouri I, Jaddi H, Ousmana H, Contribution of the pollution index and GIS in the assessment of the physico-chemical quality of the surface waters of Moulouya River (NE, Morocco), *La Houille Blanche*, 2020, 3, 45–54 <https://doi.org/10.1051/lhb/2020028>
 - Eric G, Christian M et Jacques M, (2002), *Hydrogéologie, Objets, méthodes, applications*
 - Fehdi.C,2008 : Apport hydrogéochimique et isotopique dans la caractérisation des mécanismes d'acquisition de la salinité des eaux souterraines du complexe aquifère Morsott- El-Aouinet (N.E. Algérien). Thèse de Doctorat .univ Annaba,232p.
 - Farnham, I.M., Johannesson, K.H., Singh, A.K., Hodge, V.F., Stetzenbach, K.J., 2003. Factor analytical approaches for evaluating groundwater trace element chemistry data. *Analytica Chimica Acta*. 490(1-2): 123-138p.
 - Güler C, Thyne G, McCray J, Turner A, 2002. Evaluation of graphical and multivariate statistical methods for classification of water chemistry data. *Hydrogeology Journal* 10 : 455-474p.
 - Guiraud R. (1970) : sur la présence de décrochements dextres dans l'Atlas saharien. Interprétation mégamétrique. C.R.somm. Soc. Géol .Fr. Paris, fasc.8,316-318p.
 - Guiraud R. 1973 : Evolution post-triasique de l'avant pays de la chaîne Alpine enAlgérie : d'après l'étude du bassin du Hodna et des régions voisines. Thèse 3ecycle, Université de Nice.

- Guiraud R. 1990 : Evolution post-triasique de l'avant-pays de la chaîne alpine en Algérie, d'après l'étude du bassin du Hodna et des régions voisines. Geological Survey of Algeria, Mémoire 3.
- Giraudel J.L., Lek S., *Ecological Modelling* 146, 1(2001) 329-339.
- Haouchine A, 2001. Hydrogéologie en zone semi aride et aride : région de Biskra. Thèse de Doctorat .Univ des sciences et de la technologie Houari Boumediene 187p.
- Hamel .A, 2006 : Hydrogéologie des systèmes aquifères en pays montagneux a climat semi - aride. cas de la vallée d'oued El Abiod (Aurès), Thésés de Magistère.Univ Mentouri Constantine,150p .
- HILL . M, 1990: Nitrates and nitrites in food and water. Ellis Horwood, 194 pp.; New York.
- Kaiser H, 1960. The application of electronic computers to factor analysis. *Education Psychology Measurement* 20 : 141-151p.
- Horton RK, An index number system for rating water quality. *J Water Poll Cont Fed*, 1965, 37(3): 300–305.
- KASSAH .K,2021: Influence de la salinite des eaux souterraines sur la repartition des groupement vegetaux, cas de la region d'El-Kantara (N.E.W de Biskra . Algérie), . Memoire de master. Univ Elhadj Lakhdher Batna,110p.
- Kazi-tani. N 1986 . Evolution géodynamique de la bordure Nord Africaine : le domaine intraplaque Nord Algérien. Approche mégaséquentielle, Thèse de doctorat d'Etat. Univ. Pau. 886p.
- Kerboub D, 2012 : Impact des rejets urbains et industriels sur la qualité des eaux souterraines. Cas de la région d'El-Kantara. Sud-est Algérien. Memoire de magister. .Univ de Tébessa ,156p.
- Kerboub . D, Chamekh .K, Fehdi .C, Boudoukha A. (2016) : Apport des S.I.G dans la cartographie de la pollution, cas de la plaine d'El-Kantara, Sud-est Algerien. *Larhyss Journal*, n°27, Sept 2016. ISSN 1112-3680.
- Kerboub . D , Fehdi .C, (2014) : Impact des rejets urbains et industriels sur la qualité des eaux souterraines : cas de la région d'El-Kantara, Sud-est Algérien. *Afrique SCIENCE*, Vol 10, Issue 1, 2014. ISSN 1813-548X.
- Kerboub.D, Fehdi .C, El hmaidi .A, Ousmana. H, Azzi .Y, Khemissi. C, 2022: Pig based water quality assessment in El-Hai river basin, El-Kantara Plain, Algeria. *Journal of Fundamental and Applied Sciences*. 01 January 2022. ISSN 1112-9867.

- Kim, J.H., Kim, R.H., Lee, J.H., Cheong, T.J., Yum, B.W., Chang, H.W., 2005. Multivariate statistical analysis to identify the major factors governing groundwater quality in the coastal area of Kimje, South Korea. *Hydrological Processes*. 19(6): 1261-1276p.
- Kohonen T. Springer-Verlag, series in information sciences, Berlin, (2001) 501p.
- Kohonen T., *Neurocomputing* 21, 1-3, (1998)1-6.
- Lafitte. R, (1939): Etude géologique de l'Aurès. Bull. Serv. Carte géol. Algérie, 2ème sér., Stratigr. Descript. Région. N°15, 451p.
- Love, D., Hallbauer, D., Amos, A., Hranova, R., 2004. Factor analysis as a tool in groundwater quality management: two southern African case studies. *Physics and Chemistry of the Earth*. 29(15-18): 1135-1143p.
- Maachi.F, Reghais.A, 2018 : Contribution à l'étude du dimensionnement des périmètres de protection du Lac du Barrage de Fontaine des Gazelle (Wilaya de Biskra).Memoire de master. Univ Mostapha Benboulaïd Batna 2,122p.
- Mahlknecht, J., Steinich, B., Navarro, de Leon, I., 2003. Groundwater chemistry and mass transfers in the Independence aquifer, central Mexico, by using multivariate statistics and mass-balance models.
- Margat J. Roux J.C. (1986): Interaction des impacts des managements et des exploitations sur les eaux de surface et souterraines. Paris : SHF rapport n°14.
- Marius.B, 2012:Structure des assemblages de diatomées benthiques en rivière : l'environnement explique-t-il tout ? Processus écologiques et développement méthodologiques. Thèse de Doctorat, Univ Bordeaux I , 234p.
- Meng S, Maynard J, 2001. Use of statistical analysis to formulate conceptual models of geochemical behavior: water chemical data from Butucatu aquifer in Sao Paulo State, Brazil. *Journal of Hydrology* 250 : 78-97p.
- Mnjunath H , Suresh T.S , :PIG Based water quality assessment in West Suvarnamukhi River Basin, Karnataka, India, *International Journal of research (IJR)*, 2014, 2348-6848
- Monographie de Biskra et de Batna (2008 et 2016) .Direction de planification et de l'aménagement du territoire.

- Olmez, I., Beal, J.W., Villaume, J.F., 1994. New approach to understanding multiple sourcegroundwater contamination: factor analysis and chemical mass balances. *Water Research*. 28(5): 1095-1101p.
- Office National de la Météorologie (ONM) : Données pluviométriques.
- Ousmana .H, El hmaidi .A, Berrada .M, Damnati .B,Etebaai .I, 2016: Application de la methode SOM des reseaux de neurones artificiels pour la classification de la qualite environnementale des systemes lacustres dans le moyen Atlas Marocain : Cas des Lacs IFRAH, IFFER ET AFOURGAGH , Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n°25, Mars 2016, pp. 49-6.
- Ouandaogo .Y .S, 2008 : Ressources en eau souterraine du centre urbain de Ouagadougou au Burkina Faso. Qualité et vulnérabilité. Mémoire Doc., Univ. Avignon et des Pays de Vaucluse. p 254.
- Raoult.J .1974 . Géologie du centre de la chaîne numidique (Nord du Constantinois Algérie). Thèse Science Paris, Mém. Soc Géol.Fr nouv. Ser , III n°121. 1-163p.
- Reghunath, R., Murthy, T.R.S., Raghavan, B.R., 2002. The utility of multivariate statistical techniques in hydrogeochemical studies: an example from Karnataka, India. *Water Research*. 36(10): 2437-2442p.
- Richard .L ,2000 : Sur l'origine des ions chlorures dans les eaux salines des massifs granitiques CR Acad. Sc. Paris 331 : 783-788.
- Rihani .A , 2008 : Etude hydrogéologique du bassin de Bouzina (sous bassin versant de l'Oued Abdi-Massif des Aurès). Memoire de magister. Univ Elhadj Lakhdher Batna,176p.
- Rouabhia.A,2006 :Vulnerabilite et risques de pollution des eaux souterraines de la nappe des sables Miocenes de la plaine d'EL-MA EL-ABIOD Nord-est Algerien. Thèse de Doctorat .univ Annaba,197p.
- Rodier J.1996. L'analyse de l'eau, eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer. 9^e édition Dunod, Paris, France.
- Schoeller. H, 1962: Les eaux souterraines: Géochimie, eaux du gypse et des terrains salifères Masson et Cie édition Paris IV, 362 pages.
- Schoeller .H , 1962 : Les eaux souterraines. Hydrologie dynamique et chimique. Recherche, exploitation et évaluation des ressources Masson et Cie. Editions, 642 pages.
- Schoeller .H,1962 : Les eaux souterraines. Masson, Paris, 642p.
- Seltzer.P .1946. Le climat de l'Algérie recueil de données météo.Université Alger.219p.

- Sonatrach (division exploration) étude hydrogéologique des vallées aurésiennes Septembre 2000.
- Stumm W, Morgan J, 1970. Aquatic chemistry. Wiley-Interscience, New York. 583p.
- Subba Rao N, PIG: a numerical index for dissemination of groundwater contamination zones. Hydrological Process, 2012, 26, 3344–3350 <https://doi.org/10.1002/hyp.8456>.
- Subba Rao N, Sunitha B, Rambabu R, et al, Quality and degree of pollution of groundwater, using PIG from a rural part of Telangana State, India. Appl Water Sci , 2018, 8(227): 13.<https://doi.org/10.1007/s13201-018-0864-x>.
- Suk, H.J., Lee, K.K., 1999. Characterization of a ground water hydrochemical system through multivariate analysis: clustering into ground water zones. Ground Water. 37(3): 358-366p.
- Tsakovski S., Tobiszewski M., Simeonov V., Polkowska Z. and Namiesnik J., 2009. Chemical composition of water from roofs in Gdansk, Poland. Environmental Pollution,158 (1), 84-91.
- TISDALE S. L., NELSON W. L and HAVLIN J. L. (1993): Soil fertility and fertilizers. 5th. Ed. Macmillan Publishing Company, 634p; New York.
- Uriarte E. A., Martín F.D., 2005. Topology preservation in SOM. International journal of applied mathematics and computer sciences, 1(1), 19-22.
- VILA J.M. 1980. La chaîne alpine d'Algérie orientale et des confins Algéro- Tunisiens. Thèse ès Sci. Paris VI,2 t., 665p.
- Vesanto J., Alhoneimi E., IEEE Trans, neural networks, 11 (3), (2000) 586-600
- Ward, J. H., 1963. Hierarchical grouping to optimize an objective function. Journal of the American Statistical Association 58(301), 236–24
- Wildl W. 1983. La chaîne tello-rifaine (Algérie, Maroc, Tunisie) : structure stratigraphique et évolution du Trias au Miocène. Rev. Géol. dyn. Et Géogr. Phys, n°24, n° 3, 201-298p.
- Wilcox.L.V, 1955: Classification and use for irrigation waters. USDA, Circ. 969, Washington, D.C., 119 p.
- WHO, 2008: Guidelines for drinking-water quality: Incorporating first and second addenda, recommendations. 3rd ed. Vol. 1. Geneva. WHO Press. ISBN 978 92 4 154761 1 pp. 668.
- Normes de potabilité algériennes , Journ. Offi.Repu.Algeri. (Décret exécutif n ° 11-125 du 22 Mars 2011 JON°18/2011)
- Williams R, 1982. Statistical identification of hydraulic connections between the surface of a mountain and internal mineralized sources. *Groundwater* 20 : 466-478p.

- Yahiaoui .A, 1990 : La partie inférieure de la série marno-calcaire du Crétacé supérieur (Cénomanién supérieur à Coniacien inférieur, entre Batna et El-Kantara). Algérie orientale : Stratigraphie, Sédimentologie et Paléogéographie. Thèse de Doctorat, Univ. Nancy I.