

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

BADJI MOKHTAR UNIVERSITY- ANNABA
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR- ANNABA



جامعة باجي مختار - عنابة

FACULTE DES SCIENCES DE LA TERRE

DEPARTEMENT DE GEOLOGIE

LABORATOIRE RESSOURCES EN EAU ET DEVELOPPEMENT DURABLE

THESE DE DOCTORAT 3^{ème} CYCLE

HYDROGEOLOGIE

Thème

**UTILISATION D'UNE APPROCHE MULTICRITERE POUR
L'ANALYSE DE L'EAU DANS LE GOLF D'ANNABA**

Présentée par

BENCHAIB Abdelwahid

DIRECTEUR DE THESE : Larbi DJABRI Professeur Univ. Badji Mokhtar Annaba

DEVANT LE JURY :

PRESIDENT Azzedine HANI Professeur Univ. Badji Mokhtar Annaba

EXAMINATEUR Hicham CHAFFAI Professeur Univ. Badji Mokhtar Annaba

EXAMINATEUR Ammar MAOUI Professeur Univ. 8 mai 1945 Guelma

EXAMINATEUR Lassad GHRIEB MCA Univ. 8 mai 1945 Guelma

2020/2021

ملخص

منطقة عنابة تقع في الشمال الشرقي للجزائر، يحوي باطنها على بعض الجيوب المائية حيث مخزون المياه لا يلبي احتياجات القطاعات المستعملة لها مثل السكان، الفلاحة و الصناعة، بالإضافة إلى وقوع المنطقة على حافة البحر. مشكل نقص الماء يعود إلى تدهور وضعية المياه السطحية. والواقع أن الأنهار (سيبوس و مبوحة) مسؤولة عن نقل المياه الناتجة عن التصريف الصناعي والحضري، فضلاً عن تسرب مياه الري إلى المياه الجوفية وهي مياه ملوثة إلى حد كبير. وفي سياق عملنا حاولنا إبراز تأثير مصادر التلوث هذه على نوعية المياه. وقد دفعنا تنوع هذه المصادر إلى استخدام نهج متعدد المعايير لتحليل الموارد المائية في خليج عنابة.

وتؤكد النتائج المستخلصة من هذه الأساليب أن تلوث المياه له عدة أصول. ونلاحظ أن وجود البحر يلوث بشكل مباشر عندما تكون قيمة النسبة Br^-/Cl^- أكبر من 3% أو من خلال الرذاذ البحري عندما تكون القيمة أكبر من 2%.

و أظهر تحليل المكونات الرئيسية وجود علاقة بين NO_3^- و K^+ حيث يعود أصل هذا الأخير إلى أسمدة NPK. تؤكد خريطة قابلية المياه للتأثر بالتلوث المستمدة من طريقة GALDIT النتائج التي تم الحصول عليها بمختلف الطرق المستخدمة. ويظهر اختبار النمذجة، الذي أجري باستخدام الطريقة العصبية RNA أن ملوحة المياه موجودة ونتجت عن عوامل طبيعية (كالبحر وتغير المناخ) ومن صنع الإنسان (كالنفائات بمختلف أنواعها).

كلمات مفتاحية: خليج عنابة، تلوث، ملوحة، GALDIT

Abstract

Annaba region, located in the North East of Algeria, its subsoil contains some aquifers whose quantities stored do not meet the demands of the different user sectors, such as population, industry, agriculture and marine presence. This problem of lack of water is caused by the degradation of surface water quality. In fact, the rivers (Seybouse and Meboudja), which are responsible for water from industrial and urban discharges, in addition to the return of irrigation water, which is much polluted.

In the course of our work, we have tried to highlight the impact of these sources of pollution on the quality of the environment. The diversity of these sources led us to the use of a multi-criteria approach for the analysis of water resources in the Gulf of Annaba.

The results obtained from the methods confirm that water pollution has several origins. We note that the presence of the sea directly pollutes the value of the ratio $(Br^-/Cl^-) > 3$ or through the marine spray whose value of the ratio $(Br^-/Cl^-) > 2$. The principal component analysis (ACP) showed a link between NO_3^- and K^+ , the origin of which will be linked to NPK type fertilizers.

The map of water vulnerability to pollution derived from the GALDIT method, confirms the results obtained by the different methods used. Modeling test, carried out using the neuronal method (ANN), shows that the salinity of the waters is present and it results from natural factors (sea and climate change) and anthropogenic (discharges from different sources).

Keywords: Annaba golf, Pollution, salinity, GALDIT.

Résumé

La région d'Annaba, se situe dans le Nord Oriental de l'Algérie, son sous-sol contient quelques nappes aquifères dont les quantités emmagasinées ne répondent pas aux demandes des différents secteurs utilisateurs, tel que la population, l'industrie, l'agriculture et la présence marine. Ce problème de manque d'eau est causé par la dégradation de la qualité des eaux superficielles. En effet, les Oueds (Seybouse et Meboudja), charries des eaux issues des rejets industriels et urbains auxquels s'ajoute le retour des eaux d'irrigation, qui sont très polluées.

Dans le cadre de notre travail, nous avons essayé de mettre en évidence l'impact de ces sources de pollution sur la qualité des eaux. La diversité de ces sources, nous a conduits à l'utilisation d'une approche multicritère pour l'analyse des ressources en eau dans le Golf d'Annaba.

Les résultats obtenus à partir des méthodes confirment que la pollution des eaux a plusieurs origines. Nous remarquons que la présence de la mer pollue directement la valeur du rapport $(Br^-/Cl^-) > 3\%$ ou par le biais des embruns marins dont la valeur du rapport $(Br^-/Cl^-) > 2\%$. L'analyse en composantes principales (ACP) a montré un lien entre le NO_3^- et le K^+ , dont l'origine serai liée aux engrais de type NPK.

La carte de vulnérabilité des eaux à la pollution déduite de la méthode GALDIT, confirme les résultats obtenus par les différentes méthodes utilisées. Essai de modélisation, réalisé à partir de la méthode neuronale (RNA), montre que la salinité des eaux est bien présente et elle résulte des facteurs naturelles (mer et changements climatiques) et anthropiques (rejets de différentes origines).

Mots clés : Golf d'Annaba, Pollution, salinité, GALDIT.

Remerciement

Au terme de cette étude ;

*Je tiens en premier lieu à remercier **Allah Tout-Puissant** qui m'a facilité le travail en disposant dans mon chemin des gens qui m'ont aidé et de m'avoir donné le courage, la volonté et la patience très dure pour achever ce travail.*

*Je tiens tout d'abord à remercier le Pr. **DJABRI Larbi**, pour avoir accepté de diriger ce travail, je le remercie aussi pour la confiance qu'il m'a accordé au cours de la réalisation pratique et théorique de cette thèse.*

*Je tiens à remercier également le Pr **HANI Azzedine** qui m'a fait l'honneur d'accepter de présider le jury.*

*J'adresse mes remerciements à Mr le professeur **CHAFFAI Hicham**, Mr le professeur **MAOUI Ammar** et Mr le docteur **GHRIEB Lassaad** d'avoir accepté de juger et critiquer cette thèse, et qu'ils veuillent bien trouver l'expression de ma vive gratitude et mon profond respect.*

*Ma gratitude et mes respects à Mr le docteur **SAYAD Lamine**, chargé de poste graduation et Mm **Djamila**, l'ingénieure du laboratoire REDD, pour ses amples conseils, soutiens et aides morales, paperasses et matériels dès mes premiers jours en doctorat.*

*Je tiens à remercier vivement Mr le docteur **BOUGHRIRA Nabil**, le chef de département de géologie et la secrétaire accueillante Mme **Sonya**, sans oublier la serviable Mme **Dalila**, secrétaire de directeur du labo REDD, ainsi que tous les enseignants et les administrateurs du département de géologie.*

*Je ne saurais oublier mes chères collègues de ma promotion et les futurs docteurs, Mrs **KHELIFA Kheireddine**, **MEHDAOUI Ibrahim**, Mlles **LAKHAL Fatima** et **BOUHALI Zahra**, qui ne se sont jamais abstenus de me prodiguer conseils, encouragements et soutien.*

*Mes remerciements vont également à Mr le docteur **BOUGUERRA Hamza**, qui me fourni par des documents et données nécessaire pour mon travail et me partage leur expérience en outil logiciel, sans oublier Mr le docteur **MAIFI Tarek**, pour leurs conseils et orientation ce qui concerne la préparation de la thèse.*

*Je remercie et je suis très reconnaissant à Mr le docteur **ZERARKA Abdelkader** et Mr **MOUCHARA Nabil** et tous ceux qui m'enseignent pendant la licence et master « Hydrogéologie et environnement » à l'Université d'Ibn Khaldoun-Tiaret, d'avoir me bien formé, ce qui m'encourageait à engager vers le doctorat.*

*Très chaleureusement, je remercie Mr **MEHDAOUI Boualem** « Ammi Boualem » comme je l'appelle, technicien de laboratoire à l'Université d'Ibn Khaldoun-Tiaret, pour son soutien*

inconditionnel, l'encouragement et la motivation pour continuer vers l'avant ont été d'une grande aide, qu'il trouve ici toutes les expressions de mon respect.

*Je voudrai en fin rendre un hommage particulier à la patience de **mes parents**, qui ne se sont guère fatigués de prier pour moi, de me supporter, de me soutenir et financer mes études, surtout que je dérange toujours leur quiétude jusqu'à ce qu'ils soient parfaitement content de moi et pour moi. Sans omettre l'appui moral trouvé auprès de toute ma famille.*

Dedicaces

À mes parents, à qui je dois beaucoup et que je ne rembourserai jamais assez.

À ma grande famille

À mes amis et tous ceux qui ont été proches de moi de la cité universitaire

Loucif Mohammed Saleh «Célébatrium»

À tout ce qu'il ait prié pour moi ou m'a donné juste une petite pousse vers

l'avant.

Sommaire

ملخــــــــــــص	i
Abstract	ii

Résumé	iii
<i>Remerciement</i>	iv
Sommaire	vi
Préambule.....	1
Introduction générale.....	3
Chapitre I : CADRE GÉOGRAPHIQUE ET GÉOLOGIQUE	6
1 Cadre géographique	7
1.1 Présentation du site.....	7
1.2 Le réseau hydrographique.....	8
1.3 Contexte socio-économique.....	8
2 Cadre géologique	8
2.1 Introduction	8
2.2 Description des formations à l’affleurement	9
2.2.1 Massif de l’Edough	9
2.2.2 Description lithologique du massif	11
2.2.2.1 Le socle.....	11
2.2.2.2 La couverture sédimentaire.....	13
2.2.2.3 Le magmatisme tertiaire	13
2.2.3 Déformations symmétamorphiques.....	13
2.2.4 Déformations tardives	14
2.3 Formation sédimentaire	16
2.3.1 Le secondaire.....	16
2.3.2 Le Tertiaire.....	16
2.3.3 Le Quaternaire.....	16
2.3.3.1 Quaternaire ancien.....	16
2.3.3.2 Quaternaire moyen.....	16
2.3.3.3 Quaternaire récent.....	16
2.3.3.4 Quaternaire actuel.....	16
2.4 Tectonique	17
2.5 Paléogéographie.....	18
2.6 Conclusion	18
Chapitre II : HYDROCLIMATOLOGIE	19
1 Introduction.....	20
2 Climat de la zone d’étude.....	20
2.1 Précipitation.....	21

2.1.1	La répartition saisonnière des précipitations	23
2.1.2	Le coefficient pluviométrique	25
2.2	La Température.....	26
2.2.1	Phénomène de changement climatique dans la zone d'étude.....	27
2.3	Indice d'Aridité (De Martonne 1925).....	28
2.4	L'indice Ombrothermique de Gaussen.....	29
2.5	Humidité	29
2.6	Vent	30
2.7	Bilan hydrique	30
2.7.1	Evapotranspiration	31
2.7.1.1	Estimation de l'évapotranspiration réelle par la Méthode de Turc :.....	31
2.7.1.2	Estimation de l'évapotranspiration potentielle et réelle par la Méthode de Thornthwaite :	32
2.7.2	Le ruissellement	34
2.7.3	L'infiltration.....	34
3	Hydrologie de la zone d'étude	35
3.1	Les ressources en eau superficielle.....	37
3.2	Les ressources en eau souterraines	39
3.3	Besoins en eau	40
3.3.1	Besoins en eau potable de la zone d'Annaba – El Hadjar	40
3.3.2	Besoins en eau industrielle.....	40
3.3.3	Besoins en eau agricole de la région d'Annaba	40
4	Conclusion	41
Chapitre III : HYDROGÉOLOGIE.....		43
1	Introduction.....	44
2	Les aquifères identifiés au niveau de la zone d'étude (Fig.21).....	44
3	Apports de la géophysique dans la connaissance des nappes étudiées.....	48
4	Descriptions des nappes de la zone d'étude.....	53
5	Aperçu sur la situation piézométrique	54
5.1	Historique de la piézométrie de la nappe superficielle d'Annaba	54
5.2	Etats piézométriques réalisés par nos soins	54
5.2.1	Carte piézométrique de la période des basses eaux (Décembre 2011).....	54
5.2.2	Carte piézométrique de la période des hautes eaux (Avril 2016)	55
5.2.3	Carte piézométrique de la période des basses eaux (Novembre 2016)	56
5.2.4	Carte piézométrique de la période des hautes eaux (Avril 2017)	57
5.2.5	Carte piézométrique de la période des basses eaux (Juillet 2017).....	58

5.2.6	Relation Oued-Nappe	59
5.2.7	Fluctuations de Niveau piézométrique	60
5.2.7.1	Entre Avril 2016 et Avril 2017 (Hautes eaux).....	60
5.2.7.2	Entre Avril 2017et Juillet 2017 (hautes eaux-basses eaux)	61
6.1	La nappe des graviers	62
7	Conclusion	63
Chapitre IV : HYDROCHIMIE		65
1	Introduction.....	66
2	Échantillonnage et analyse physico-chimique	66
3	Qualité des eaux de la nappe souterraine	67
3.1	Paramètres physiques	67
3.1.1	La Température	67
3.1.2	Le potentiel d'hydrogène (pH).....	68
3.1.3	La conductivité électrique (CE)	69
3.2	Paramètres chimiques	73
3.2.1	Le calcium	74
3.2.2	Le magnésium	75
3.2.3	Le Sodium	76
3.2.4	Les chlorures	77
3.2.5	Les sulfates	78
3.2.6	Les Bicarbonates	79
3.2.7	Nitrates	81
3.2.8	Potassium	83
4	Recherche d'une probable intrusion marine	84
4.1	Diagramme de Piper	85
5	Origine de la salinité des eaux	86
6	Mécanisme de l'intrusion marine.....	87
7	Apports de la statistique pour l'étude des processus hydrogéochimiques	88
7.1	L'analyse en composantes principales ou (ACP).....	88
7.1.1	Mois de Décembre 2011	88
7.1.1.1	La matrice de corrélation.....	89
7.1.1.2	Analyse du cercle ACP	89
7.1.1.3	Analyse de l'espace des individus	90
7.1.1.4	Carte des familles des eaux (Décembre 2011)	91
7.1.2	Mois de Novembre 2016.....	92

7.1.2.1	La matrice de corrélation	92
7.1.2.2	Analyse du cercle ACP	92
7.1.2.3	Analyse de l'espace des individus	93
7.1.2.4	Carte des familles des eaux (Novembre 2016)	94
8	Apports de la méthode des rapports caractéristiques	95
8.1	Mois de Décembre 2011	96
8.1.1	Le diagramme {Ca / (HCO ₃ +SO ₄) vs Na / Cl}	96
8.1.2	Le diagramme (Ca / HCO ₃)	97
8.1.3	Le diagramme {Ca / (HCO ₃ +SO ₄)}	97
8.2	Mois de Novembre 2016	98
8.2.1	Le diagramme (Cl / Na)	98
8.2.2	Le diagramme {Ca / (HCO ₃ +SO ₄) vs Na / Cl}	98
8.2.3	Le diagramme (Ca / HCO ₃)	99
8.2.4	Le diagramme {Ca / (HCO ₃ +SO ₄)}	99
9	Recherche d'une potentielle intrusion marine	100
9.1	Utilisation de rapports spécifiques	100
9.1.1	Apports du rapport {(Cl / HCO ₃) vs Cl}	100
9.1.1.1	Mois de Décembre 2011	100
9.1.1.2	Mois de Novembre 2016	102
9.1.2	Apports du Rapport (Br / Cl)	104
10	Activités anthropiques	105
10.1	Le rapport (NO ₃ / f) (f : fraction de l'eau de mer en %)	106
11	La vulnérabilité à la pollution de l'aquifère superficiel de la plaine	106
11.1	Notions générales de la vulnérabilité à la pollution des aquifères	106
11.2	Vulnérabilité des aquifères côtiers par rapport à l'intrusion saline	107
11.3	Détails de la méthode GALDIT	107
11.4	Application de la méthode GALDIT à l'aquifère superficielle de la plaine d'Annaba	
	108	
11.4.1	<i>Paramètre (G)</i> : Le type d'aquifère	108
11.4.2	<i>Paramètre (A)</i> : La conductivité hydraulique de l'aquifère	108
11.4.3	<i>Paramètre (L)</i> : La hauteur de la nappe au dessus du niveau de la mer	110
11.4.4	<i>Paramètre (D)</i> : La distance par rapport à la côte	111
11.4.5	<i>Paramètre (T)</i> : L'épaisseur de l'aquifère	113
12	Les réseaux de neurones artificiels	116
12.1	Principe de la méthode neuronale	116
12.2	Connexions entre les neurones	117

12.3	L'architecture de réseau.....	118
12.4	L'algorithme de rétro-propagation.....	119
12.5	La fonction de transfère (ou d'activation).....	120
12.6	Choix des critères d'exécution.....	121
12.7	La performance de modèle.....	122
12.8	Fonctionnement du modèle.....	123
12.9	Résultats et discussion.....	125
13	Conclusion.....	128
	Conclusion générale.....	130
	Annexes.....	135
	Bibliographie.....	140

Liste des tableaux

<i>Tab. 1: Caractéristiques des stations météorologiques.</i>	21
---	----

Tab. 2: Variations des moyennes mensuelles des précipitations au niveau de la station des salines (1985-2017) et Pont Bouchet (1980 – 2018).	21
Tab. 3: Répartition saisonnière des précipitations (mm) dans les deux stations.	24
Tab. 4: Récapitulation des valeurs du coefficient pluviométrique calculé pour les deux stations références.	25
Tab. 5: Température moyenne mensuelle (°C) à la station des salines (1972-2017).	26
Tab. 6: Moyennes de la température de chaque période.	27
Tab. 7: Résultats de l'indice d'Aridité de De Martonne (IA).	28
Tab. 8: Moyenne mensuelle de l'humidité relative en (%) à la station des Salines (1980-2017).	30
Tab. 9: Moyenne mensuelle de la vitesse des vents en m/s à la station des Salines (1984-2015).	30
Tab. 10: Estimation des valeurs de la RFU selon la formule de Hallaire	30
Tab. 11: L'évapotranspiration réelle selon la formule de Turc.	32
Tab. 12: Bilan hydrologique selon Thornthwaite, station des salines (1985/2017).	33
Tab. 13: Détermination du ruissellement dans les stations étudiées.	34
Tab. 14: Estimation de l'infiltration par ETR de la méthode de Thornthwaite.	35
Tab. 15: Tableau récapitulatif des aquifères existants et leurs réserves renouvelables dans l'extrême Nord-Est algérien (Derradji, 2004).	40
Tab. 16: Besoins en eau industrielle (Derradji, 2004) (in Boughrira, 2015).	40
Tab. 17: Besoins en eau agricole de la région d'Annaba (in Boughrira, 2015).	41
Tab. 18: Description géologique et hydrogéologique du site (Debieche, 2002).	48
Tab. 19: Résultats de deux pompages d'essai effectués dans la nappe phréatique.	62
Tab. 20: Caractéristiques hydrodynamiques de la nappe des graviers.	62
Tab. 21: Estimation des transmissivités de la nappe phréatique ($m^2.s^{-1}$), (in Aoun Sebaiti, 2010).	62
Tab. 22: Variations saisonnières de la température des eaux souterraines.	67
Tab. 23: Variations saisonnières du PH des eaux souterraines.	69
Tab. 24: Variance des quatre premiers axes factoriels.	89
Tab. 25: Matrice des corrélations des paramètres physico-chimiques.	89
Tab. 26: Les associations des coefficients R acceptés.	89
Tab. 27: Variance des quatre premiers axes factoriels	92
Tab. 28: Matrice des corrélations.	92
Tab. 29: Les associations des coefficients R acceptés.	92
Tab. 30. Les valeurs de la conductivité hydraulique (K) calculées en mètre par jour et le rang attribuées à chaque puits (Novembre 2016).	109
Tab. 31: Les valeurs des niveaux piézométriques (NP) et le rang attribué à chaque puits (Novembre 2016).	110
Tab. 32: Les valeurs du rang de (paramètre D) attribués à chaque puits selon la distance à la mer.	111
Tab. 33: Les valeurs du rang de (paramètre I) attribués à chaque puits selon le rapport.....	113
Tab. 34: Les valeurs du rang de (paramètre T) attribués à chaque puits selon l'épaisseur de l'aquifère dan le même puits.	114
Tab. 35: L'indice GALDIT de chaque puits de la nappe superficielle (Novembre 2016).	115
Tab. 36: Analogie entre les neurones biologiques et artificiels.	118
Tab. 37: Corrélation entre la CE et les autres éléments d'entrée.	125
Tab. 38: Paramètres statistiques des variables sélectionnés.	125
Tab. 39: Performance des modèles RNA dans la prédiction de la CE pour les trois phases.	126
Tab. 40: Classement des variables par analyse de sensibilité.	128

Liste des figures

Fig. 1: Situation géographique de la zone d'étude.	7
---	---

Fig. 2: Carte géologique et géomorphologique de la plaine d'Annaba (Habes, 2012).	9
Fig. 3: Carte géologique du massif de l'Edough (Laouar & al., 2002).	10
Fig. 4: Coupes géologiques entre Ain Berda et l'Edough, passant par le Lac Fetzara (in Habes, 2013).	15
Fig. 5: Carte géologique montrant les formations à l'affleurement au niveau de la région Annaba. (D'après Gaud, 1976. in Hani 2003; Modifiée).	17
Fig. 6: Esquisse tectonique au niveau de la plaine d'Annaba (d'après SONATRACH, in Saadali, 2007 ; Modifiée).	18
Fig. 7: Moyennes mensuelles des précipitations aux stations des Salines (1985-2017) et Pont Bouchet (1980-2018).	22
Fig. 8: Variation interannuelle des précipitations à la station des Salines.	23
Fig. 9: Variation interannuelle des précipitations à la station Pont Bouchet.	23
Fig. 10: Portions des répartitions saisonnières des précipitations (%) dans les deux stations.	24
Fig. 11: Variations des coefficients pluviométriques calculés aux niveaux des stations étudiées.	26
Fig. 12: Variations des moyennes annuelles des températures.	27
Fig. 13: La variation de la température des périodes.	28
Fig. 14: Courbe Ombro-thermique (Salines ; 1985-2017).	29
Fig. 15: Représentation graphique du bilan hydrique de Thornthwaite de la station des Salines (1985/2017)	33
Fig. 16: Oro-hydrographie de l'Algérie du Nord (Mebarki, 2005) (in Boughrira, 2015).	36
Fig. 17: Localisation des stations pluviométriques de sous-bassin de la Seybouse (in Boughrira, 2015).	37
Fig. 18: Ressources en eau des bassins versant de L'est d'Algérie (Mebarki, 2009) (in Boughrira, 2015).	37
Fig. 19: Carte des sous bassins Hydrographiques du Nord Est de l'Algérie (Mebarki, 2005) (in Boughrira, 2015).	39
Fig. 20: Variations des débits au niveau de la station de Mirebeck 1972 – 73 à 1990 - 91 (sources A.N.R.H) (in Boughrira, 2015).	39
Fig. 22: Les aquifères situés à l'Ouest du lac Fetzara (in Khelfaoui, 2014).	46
Fig. 23: Coupe schématique montre la superposition des nappes souterraines dans la basse plaine de la seybouse (Debièche, 2002 ; Modifiée).	47
Fig. 24: Carte d'extension des différents aquifères dans la plaine présentant la distribution des forages.	49
Fig. 25: Logs stratigraphiques et valeurs de résistivité des forages implantés dans la zone d'étude (Djabri 1996, Modifiés).	50
Fig. 26: Schémas représentant les niveaux perméables et imperméables révélés de sondages mécaniques (Djabri 1996, Modifiés).	51
Fig. 27: Coupes illustrant la lithologie des aquifères de la zone Est (in Hani 2003).	52
Fig. 28: La superposition des nappes souterraines dans la basse plaine de la Seybouse (in Debieche 2002, modifiée).	53
Fig. 29: Carte piézométrique de la Plaine d'Annaba (Décembre 2011).	55
Fig. 30: Carte piézométrique de la Plaine d'Annaba (Avril 2016).	56
Fig. 31: Carte piézométrique de la Plaine d'Annaba (Novembre 2016).	57
Fig. 32: Carte piézométrique de la Plaine d'Annaba (Avril 2017).	58
Fig. 33: Carte piézométrique de la Plaine d'Annaba (Juillet 2017).	59
Fig. 34: Carte des fluctuations piézométriques entre Avril 2016 et Avril 2017.	61
Fig. 35: Carte des fluctuations piézométriques entre Avril 2017 et Juillet 2017.	61
Fig. 36: Carte d'inventaire des puits analysés.	67
Fig. 37: Variations saisonnières de la température des eaux souterraines.	68

Fig. 38: Variations saisonnières du PH des eaux souterraines.	69
Fig. 39: Carte de la distribution spatiale de la CE des eaux souterraines (mois de Décembre 2011)..	70
Fig. 40: Variations de la CE des eaux souterraines (mois de Décembre 2011).	70
Fig. 41: Carte de la distribution spatiale de la CE des eaux souterraines (mois d'Avril 2016).	71
Fig. 42: Variations de la CE des eaux souterraines (mois d'Avril 2016).	71
Fig. 43: Carte de la distribution spatiale de la CE des eaux souterraines (mois de Novembre 2016)..	72
Fig. 44: Variations de la CE des eaux souterraines (mois de Novembre 2016).	72
Fig. 45: Carte de la distribution spatiale de la CE des eaux souterraines (mois d'Avril 2017).	73
Fig. 46: Variations de la CE des eaux souterraines (mois d'Avril 2017).	73
Fig. 47: Histogramme des variations du calcium (Mois de Décembre 2011)..	74
Fig. 48: Histogramme de Variations du calcium (Mois de Novembre 2016)..	75
Fig. 49: Histogramme de variation du magnésium (mois de Décembre 2011)..	76
Fig. 50: Histogramme des variations du Magnésium (mois de novembre 2016)..	76
Fig. 51: Histogramme de variations du sodium (mois de Décembre 2011)..	77
Fig. 52: Histogramme de Variations du Sodium (mois de Novembre 2016)..	77
Fig. 53: Histogramme de variations des chlorures (mois de Décembre 2011)..	78
Fig. 54: Histogramme de variations des chlorures (mois de Novembre 2016)..	78
Fig. 55: Histogramme des variations des sulfates (mois de Décembre 2011)..	79
Fig. 56: Histogramme de variations des sulfates (mois de Novembre 2016)..	79
Fig. 57: Histogramme de variations des bicarbonates (mois de Décembre 2011)..	80
Fig. 58: Histogramme de variations des bicarbonates (mois de Novembre 2016)..	80
Fig. 59: Histogramme de variations des nitrates (mois de Décembre 2011)..	83
Fig. 60: Histogramme de variations des nitrates (mois de Novembre 2016)..	83
Fig. 61: Histogramme de variations du potassium (mois de Décembre 2011)..	84
Fig. 62: Histogramme de variations du potassium (mois de Novembre 2016)..	84
Fig. 63: diagramme de Piper (mois de Décembre 2011)..	85
Fig. 64: Diagramme de Piper (Mois de Novembre 2016)..	86
Fig. 65: Mise en évidence du mécanisme d'intrusion marine, a) Coupe schématique perpendiculaire au littoral selon le principe de Ghyben-Herzberg ; b) Impact d'un pompage sur l'interface eau douce/eau salée selon le principe de Ghyben-Herzberg (Dorfliger, 2013)..	88
Fig. 66: Cercle de corrélation des variables dans le plan formé par l'axe F1 et l'axe F2 (Décembre 2011)..	90
Fig. 67: Projection des individus sur le plan formé par l'axe F1 et l'axe F2 (Décembre 2016)..	91
Fig. 68: Carte de répartition des familles des eaux (ACP mois de Décembre 2011)..	91
Fig. 69: de corrélation des variables dans le plan formé par l'axe F1 et l'axe F2 (Novembre 2016)..	93
Fig. 70: Projection des individus sur le plan formé par l'axe F1 et l'axe F2 (Novembre 2016)..	94
Fig. 71: Carte de répartition des familles des eaux (ACP mois de Novembre 2016)..	95
Fig. 72: Relation entre Na vs Cl (mois de Décembre 2011)..	96
Fig. 73: Relation entre Ca / (HCO ₃ +SO ₄) vs Na / Cl (mois de Décembre 2011)..	97
Fig. 74: Relation Ca vs HCO ₃ (mois de Décembre 2011)..	97
Fig. 75: Relation Ca vs (HCO ₃ + SO ₄) (mois de Décembre 2011)..	98
Fig. 76: Relation Cl vs Na (mois de Novembre 2016)..	98
Fig. 77: Relation Ca / (HCO ₃ +SO ₄) vs Na/Cl (mois de Novembre 2016)..	99
Fig. 78: Relation Ca vs HCO ₃ (mois de Novembre 2016)..	99
Fig. 79: Relation Ca / (HCO ₃ +SO ₄) (mois de Novembre 2016)..	100
Fig. 80: Diagramme (Cl/HCO ₃) vs Cl (mois de Décembre 2011)..	101
Fig. 81: Carte de répartition des eaux familles des eaux {(Cl / HCO ₃) vs Cl} (Mois de Décembre 2011)..	102

Fig. 82: Relation entre le rapport (Cl/HCO ₃) et Cl (Novembre 2016).	102
Fig. 83: Variation des précipitations annuelles, station des salines (1985-2017).	103
Fig. 84: Carte de répartition des familles des eaux {(Cl / HCO ₃) vs Cl} (Mois de Novembre 2016).	104
Fig. 85: Relation entre le rapport (Br / Cl) vs Cl (mois de Décembre 2011).	105
Fig. 86: Relation entre NO ₃ et f (mois de Décembre 2011).	106
Fig. 87. Carte de la distribution spatiale du paramètre «G».	108
Fig. 88. Carte de la distribution spatiale du paramètre «A».	109
Fig. 89. Carte de la distribution spatiale du paramètre «L» ; (Novembre 2016).	111
Fig. 90. Carte de la distribution spatiale du paramètre «D».	112
Fig. 91. Carte de la distribution spatiale du paramètre «I» ; (Novembre 2016).	113
Fig. 92. Carte de la distribution spatiale du paramètre «T».	114
Fig. 93. Carte de la distribution spatiale de l'«Indice GALDIT» ou carte de vulnérabilité issue de la méthode GALDIT (mois de Novembre 2016).	116
Fig. 94. Schéma d'un neurone biologique (Hébert C, 2012).	118
Fig. 95. Schéma d'un neurone artificiel.	118
Fig. 96. Fonction de transfert sigmoïde.	121
Fig. 97. Illustration d'un réseau à 3 couches (MLP) (Ghrieb 2011, modifiée).	123
Fig. 98. Architecture du modèle RNA (MLP, BFGS24).	126
Fig. 99. Corrélation entre la CE simulée et mesurée pour les 3 phases : Apprentissage, Test et Validation.	127
Fig. 100: Fonctionnement des nappes souterraine au niveau de la plaine.	129

Préambule

La journée mondiale de l'eau, célébrée le 22 Mars 2021, a été dédiée aux valeurs de l'eau. Nous reprenons ci-après le texte de la Secrétaire Générale de l'UNESCO.

La Valeur de l'eau

Quelle est la valeur de l'eau ? La question paraît simple en apparence, mais il n'est en réalité pas facile d'y répondre. D'un côté, l'eau est, en effet, extraordinairement précieuse parce que sans elle, la vie n'existerait pas. Mais d'un autre côté, elle est tenue comme une évidence acquise si bien qu'elle est gaspillée chaque jour.

Si l'on suit les théories économiques, la valeur d'un bien dépend de sa rareté, c'est-à-dire l'écart entre des ressources limitées et des besoins illimités. L'eau, pour l'humanité, est visiblement une ressource illimitée, puisqu'on la traite sans parcimonie ni égards : ce sont ainsi, selon des estimations, environ 80 % de toutes les eaux usées industrielles et municipales qui sont reversées dans l'environnement sans le moindre traitement.

Pourtant, l'eau douce est bien une ressource rare et de plus en plus avec le temps. Les chiffres sont de ce point de vue éloquent : plus de 2 milliards de personnes vivent déjà dans des régions soumises à un stress hydrique et quelque 3,4 milliards de personnes, soit 45 % de la population mondiale, n'ont pas accès à des installations d'assainissement suffisamment fiables. Des études indépendantes établissent ainsi que, d'ici à 2030, il manquera à l'humanité 40 % de l'eau dont elle aura alors besoin. Cette situation sera encore aggravée par les grands bouleversements mondiaux, comme le COVID-19 ou le changement climatique.

On ne peut de toute façon pas réduire l'eau à un bien économique. On l'oublie souvent, mais l'eau a une valeur culturelle, au moins aussi importante, sinon plus, que sa valeur monétaire. De nombreux peuples autochtones, par exemple, accordent un statut spécial à l'eau et aux voies navigables. C'est le cas en Nouvelle-Zélande, où la loi *Te Awa Tupua*, adoptée en 2017, accorde au fleuve Whanganui le statut d'« entité vivante indivisible, des montagnes jusqu'à la mer ». En Inde, les fleuves Gange et Yamuna sont également considérés comme des entités vivantes, dotées des mêmes droits que les êtres humains. Pour les habitants de ces régions, ces cours d'eau sont assimilés à des êtres chers et ont, par conséquent, une valeur inestimable.

Comment dans ces conditions évaluer la valeur de l'eau ? L'édition 2021 du *Rapport mondial sur la mise en valeur des ressources en eau* se penche sur cette question cruciale. Elle

examine comment la valeur de l'eau est évaluée dans différents secteurs et identifie les moyens d'améliorer ces processus afin de mieux apprécier l'importance de l'eau dans nos sociétés.

Comme le souligne ce rapport, il existe peu d'approches unifiées et standardisées pour évaluer la valeur de l'eau, que ce soit au sein d'un même secteur ou entre secteurs. En outre, ces approches ne tiennent pas toujours compte des divergences de perspectives entre systèmes de croyances, cultures, genres et disciplines scientifiques. Seul le croisement de ces différents points de vue permettra de parvenir à des processus de décision plus durables, plus inclusifs, plus soucieux des questions de genre et, en un mot, plus justes. Ainsi, nous pourrons progresser sur le chemin de l'Objectif de développement durable n°6, à savoir un accès à l'eau et à l'assainissement pour tous.

Coordonnée par l'UNESCO, la réalisation de ce rapport a été rendue possible grâce au soutien que le gouvernement italien et la *Regione Umbria* apportent de longue date au Programme mondial pour l'évaluation des ressources en eau. Je souhaiterais remercier chaleureusement toutes celles et ceux qui ont participé à cet effort commun, notamment l'ensemble de la famille ONU-Eau pour son étroite et constante collaboration. Cette publication témoigne du fait que tous ensemble, nous partageons la conviction que l'eau n'est pas seulement un vecteur de développement mais aussi un droit humain fondamental. En travaillant ensemble, nous pouvons trouver des solutions qui nous aideront à progresser vers un monde durable et prospère, sans laisser personne au bord du chemin.

Comme l'exprime l'adage de la tribu du fleuve Whanganui « *Ko au te awa, ko te awa ko au* », « je suis le fleuve et le fleuve, c'est moi », les sorts de l'humanité et de l'eau sont inextricablement liés.

Par **Audrey Azoulay**, *Directrice générale de l'UNESCO*

Introduction générale

En analysant de près ce texte, nous constatons, une nouvelle mise en garde quant à la pérennité de la ressource et ceci à l'échelle mondiale. Il est tout à fait clair que ces mises en gardes concernent particulièrement les pays classés comme à stress hydrique dont l'Algérie en fait malheureusement partie.

En fait les pays à stress hydrique sont confrontés à deux problèmes qui sont :

- le manque d'eau, induit par les changements climatiques,
- les diverses formes de pollutions, freinant toutes possibilités de développement.

Ces deux problèmes doivent être pris en charge et de manière significative pour assurer aux Algériens une autosuffisance alimentaire.

Dans la mesure où certaines zones du pays restent dépourvues de ressources hydriques, ceci montre que les efforts réalisés par les pouvoirs publics sont insuffisant ou mal pris en charge par les responsables locaux.

La stratégie de l'eau programmée est très ambitieuse car elle s'appuie sur le recours aux eaux non conventionnelles, ces dernières peuvent constituer une ressource importante à condition d'être bien gérées car pouvant constituer un danger pour la population particulièrement les eaux traitées et épurées. Les agriculteurs peuvent utiliser des eaux non traitées et non épurées dans le cas de l'absence de contrôle, ce exposera la population au risque de maladies à transmissions hydriques et par la même la partie d'eau qui s'infiltrer accentue la pollution des nappes superficielles.

Notre travail, porte sur une région dont l'alimentation en eau se fait à 80 pour cent issue de la wilaya d'El Tarf, ce qui classe Annaba et ses environs parmi les zones diminuant en eau. À l'opposé à cela la zone d'étude reste importante du point de vue économique car renfermant de grands sites industriels comme SIDER, FERTIAL (ex ASMIDAL), ONALAIT...elle aussi caractérisée par une activité agricole consommatrice d'eau, car à caractère estivale, on y trouve, la tomate industrielle, le melon ; la pastèque. Ces activités industrielles et agricoles, sont à l'origine d'un exode rural important entraînant l'édification de ville entière dont les toutes récentes sont celles de Kalitoussa et Draa Errich, auparavant il y avait El Bouni et Sidi Ammar... L'édification de ces villes, souvent réalisées à la va vite au mépris des règles d'hygiène ont entraînés des effets néfastes sur l'environnement, car les canalisations destinées à l'évacuation des eaux usées sont mal finies d'où des rejets çà même le sol et à cela s'ajoute les odeurs nauséabondes qui se dégagent. Cette émancipation faite à la va vite a fait que la consommation des eaux grimpe de manière significative et ceci dans une région presque dépourvue d'eau.

Dans notre travail, nous allons essayer de répondre à toutes ces questions. Nous allons essayer de répondre à la question suivante :

**INDUSTRIE + AGRICULTURE + AEP = AUGMENTATION DE LA DEMANDE EN
EAU D’OÙ UNE POLLUTION AUX GRANDES CONSEQUENCES.**

Ces origines de la pollution, ne peuvent être mises en évidence et expliquées que par l’utilisation de plusieurs approches allant dans le sens de la mise en évidence de cette pollution. Cependant et au préalable, nous devons faire connaître la zone d’étude.

La région d’étude appartient aux zones côtières de l’Algérie et sa partie Est. Pour mémoire les zones côtières du pays contiennent plus de 80 % de la population et la région d’Annaba, n’échappe pas à cette situation. Du point de vue topographique la ville d’Annaba et sa région sont surplombées par les monts de l’Edough, dont l’altitude atteint les 1300 mètres cette position fait que la ville est exposée aux inondations en cas de pluie torrentielles, les eaux de pluies charriées d’énormes quantités de solides qui obstruent les égouts et font que la ville se trouve sous l’eau et ceci pendant quelques jours. Ces inondations peuvent être catastrophiques les dernières sont celles qui se sont produites en 1983 et depuis, ce phénomène est récurrent et chaque année durant les périodes de précipitations on assiste à des inondations.

Les inondations sont liées outre la topographie aux caractéristiques géologiques des formations en présence. Le ruissellement des eaux s’explique par une infiltration faible des eaux, ceci à pour origine la nature des formations présentes sur le terrain. En parcourant la zone d’étude, on remarque l’affleurement de plusieurs formations. Cependant dans le détail, on observe les deux catégories suivantes:

- Les formations sédimentaires, occupant la grande partie du terrain.
- les formations métamorphiques, présentes au niveau du massif de l’Edough.

Dans le détail, les formations métamorphiques, sont datées du primaire et sont constituées de gneiss, de schistes, de mica schistes, elles ont une faible perméabilité et sont pauvres en réserves en eau.

Les formations sédimentaires occupent le centre de la plaine et sont en général datées du quaternaire. Le quaternaire lui-même est partagé en :

- Quaternaire ancien, constitué par des formations alluviales (argiles, limon, sables, gravier et galets), et formant un réservoir d’eau superficielle, constituant la haute terrasse d’une altitude de 75 à 150m.
- Quaternaire moyen, correspond à la basse terrasse de 20 à 50 m, constituée par des argiles et des sables. Elle supporte des terres cultivées. Et elle se développe sur toute la région.
- Quaternaire récent, correspond à des dépôts alluvionnaires, limoneux très fins, à prédominance d’argile, particulièrement présent au niveau de la basse et la moyenne terrasse.

- Quaternaire actuel, constitué par des alluvions formés généralement de matériaux variés (argiles, sables, cailloux), résultant de l'érosion des formations traversées par l'Oued.

Cette variabilité des formations ; joue un rôle important dans la recharge des nappes.

Au niveau de la plaine d'Annaba, on note l'impact de deux évènements tectoniques.

- Le premier allant du Miocène inférieur au Miocène supérieur, les mouvements tectoniques provoquent l'enfoncement progressif des grès numidiens. Par la suite, un remplissage d'âge Plio-Quaternaire par des matériaux détritiques s'est déclenché. Pendant le Miocène inférieur, l'ensemble de la région a été soumis à des phénomènes orogéniques et à un isolement complet du massif de l'Edough. Ainsi la plaine se trouve au centre d'un bassin limité au Nord par l'anticlinal du Massif de l'Edough et au Sud par un anticlinal principal de la chaîne Numidique

- le second, va du pliocène jusqu'au Quaternaire, caractérisé par un effondrement qui déclenche des processus de formation et de comblement des deux fosses, celle de Ben Ahmed et celle de Ben M'Hidi orientée SW-NE, qui sont séparés par un haut fond appelé l'élévation de Daghoussa.

Du point de vue climat, la région étudiée fait partie des régions côtières, ces dernières jouissent de l'influence du domaine méditerranéen qui bénéficie d'un climat tempéré, avec des hivers doux et ses étés chauds et secs en font des régions très attractives pour l'Homme.

Ce dernier, agréable en hiver 12 °C à Annaba et supportable en été 25 °C dans la même ville. L'humidité y est forte et les précipitations relativement abondantes et sont concentrées sur quelques mois d'automne et d'hiver surtout.

La région d'étude est parmi les plus arrosées d'Algérie. Le total des précipitations atteint une moyenne oscillant entre 600 et 1000 mm/an. Cependant la région reste dépourvue de ressources pérennes.

Ce constat est confirmé par le travail réalisé sur la ressource souterraine démontrant que la région recèle deux nappes dans sa partie nord, ces dernières forment la nappe dite des graviers libre dans sa partie sud.

La partie consacrée à l'hydrochimie demeure importante car elle va contribuer à expliquer les problèmes posés. Ainsi, nous avons multiplié les méthodes d'approches pour cerner les problèmes posés. On commence par l'utilisation du diagramme de Piper et finir par les rapports caractéristiques. Chacune des méthodes montrent que la zone d'étude est vulnérable à la pollution. Cette situation est confirmée par l'utilisation de la méthode GALDIT, propre aux zones côtières.

La modélisation par l'utilisation de la méthode neuronale conforte des résultats obtenus dans la partie hydrochimie.

Chapitre I : CADRE GÉOGRAPHIQUE ET GÉOLOGIQUE

1 Cadre géographique

1.1 Présentation du site

La plaine d'Annaba se situe au Nord-est de l'Algérie à 600 Km à l'Est d'Alger (Fig. 1). Ses limites naturelles sont :

- au Nord, la mer méditerranée ;
- à l'Ouest le massif de Belelieta (287 m) et de Bouhamra (152 m) qui sont séparés du massif principal de l'Edough (1008 m) ;
- au Sud la chaîne numidique orientale (1411 m) ;
- enfin à l'Est, le prolongement oriental du système aquifère Annaba - Bouteldja.

La géomorphologie du site est caractérisée par une topographie plane sur l'ensemble de la plaine, marquée par des inclinaisons importantes aux bordures de la plaine, à la partie Ouest et Sud, due à l'anticlinal du massif métamorphique de l'Edough, Belelieta et celle de la chaîne Numidienne (Debieche, 2002).

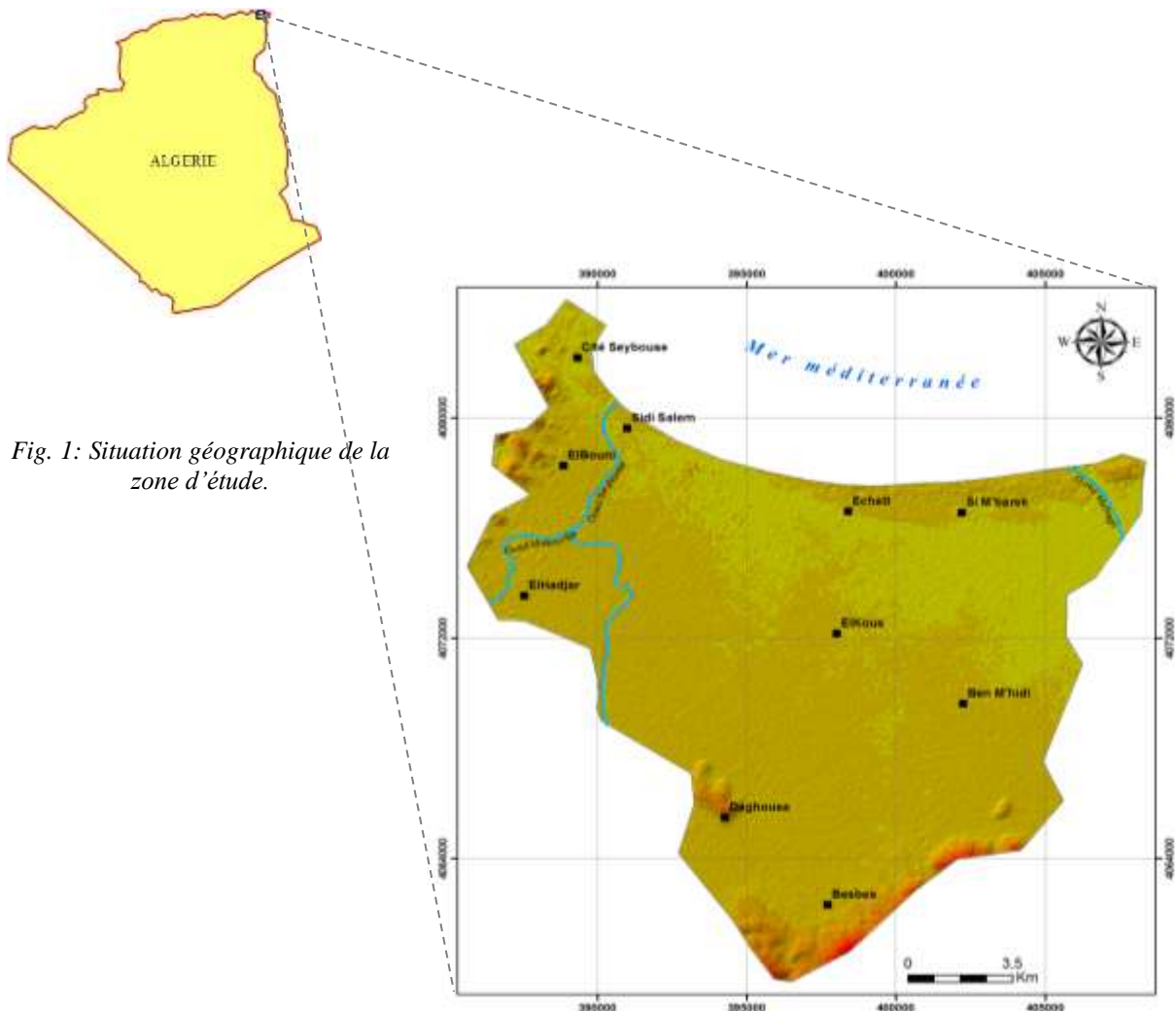


Fig. 1: Situation géographique de la zone d'étude.

1.2 Le réseau hydrographique

Il est constitué par deux oueds principaux qui parcourent la plaine :

- l'oued Seybouse (second oued d'Algérie après l'oued Chélif), présente l'axe de drainage d'un bassin versant de 6471 Km² ;
- l'oued Meboudja, le dernier affluent de l'oued Seybouse, assure la vidange du lac Fetzara (l'exutoire d'un bassin versant endoréique de 515 Km²) par un canal d'assèchement de 14 Km.

1.3 Contexte socio-économique

Cette région est connue par sa grande activité agricole et industrielle favorisant ainsi la croissance continue de la population, cette dernière est concentrée généralement au niveau des communes et des hameaux.

L'agriculture est observée sur l'ensemble de la plaine, avec une très grande variété de cultures, céréalières, maraîchères et arboricoles.

L'industrie est remarquable dans la région, elle se positionne surtout en bordure de l'oued Meboudja. Trois catégories d'industries sont observées :

- industries lourdes avec SIDER (Société Nationale de Sidérurgie) ;
- industrie chimique avec le complexe des engrais phosphatés et azotés (ASMIDAL) ;
- et enfin l'industrie agro-alimentaire présentée par de petites entreprises.

L'ensemble des rejets urbains et industriels se jette directement dans les oueds, sauf celui de l'usine ASMIDAL qui envoie ces rejets au niveau de la mer.

2 Cadre géologique

2.1 Introduction

L'aperçu géologique est fondamental pour toute étude hydrogéologique, il renseigne sur les capacités des formations à receler des nappes d'eau. L'étude géologique identifie les différents matériaux et le type d'aquifère.

La région d'étude se caractérise par l'affleurement de terrains métamorphiques et éruptifs occupant la partie Nord et Nord-ouest Massif de l'Edough, Belelieta et Bouhamra, par contre les terrains sédimentaires occupent le reste de la zone d'étude (Fig. 2).

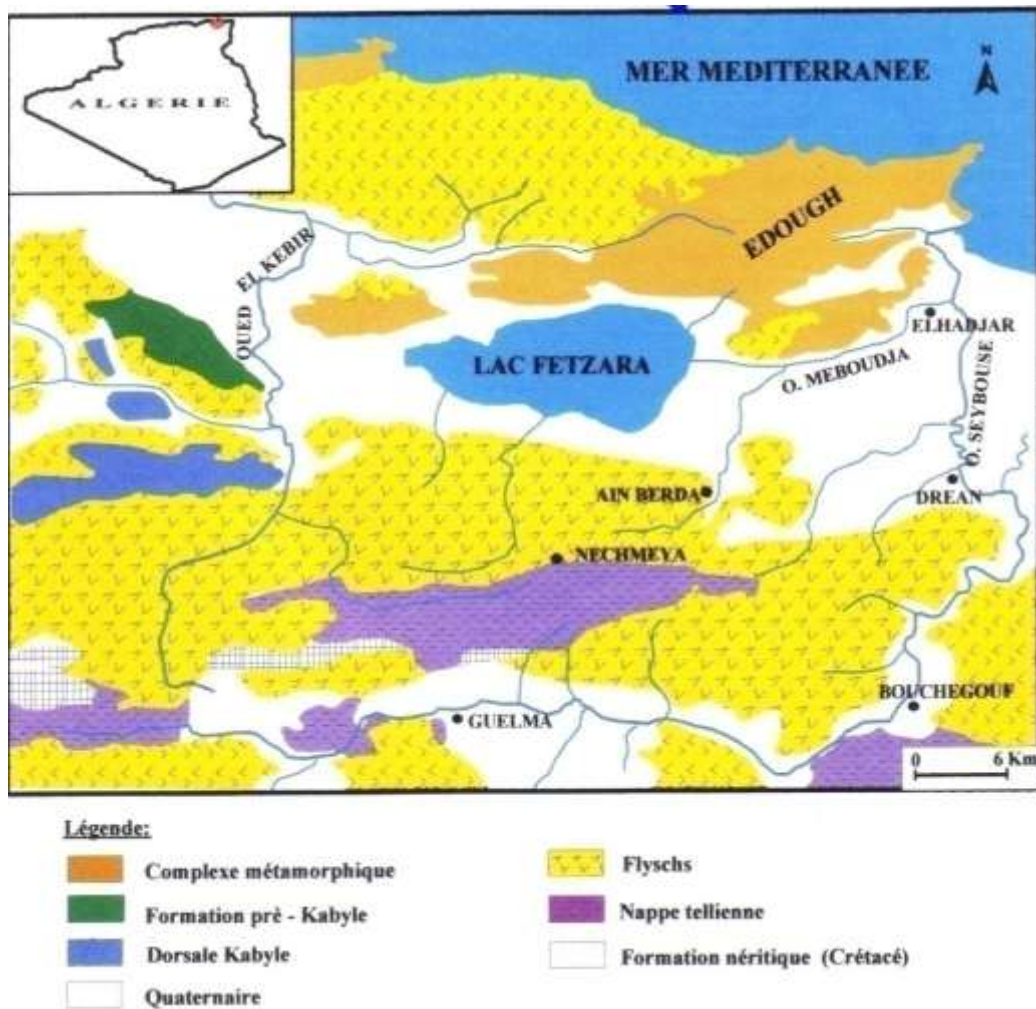


Fig. 2: Carte géologique et géomorphologique de la plaine d'Annaba (Habes, 2012).

2.2 Description des formations à l'affleurement

2.2.1 Massif de l'Edough

Le massif de l'Edough constitue le complexe métamorphique le plus oriental du littoral Algérien (Fig. 3). Il a fait l'objet de plusieurs études géologiques (Hilly, 1962; Vila, 1970; Gleizes et al., 1988; Marignac et Zimmermann, 1983; Marignac, 1985; Monié et al., 1992; Hammor, 1992; Aissa et al., 1995; Hammor et Lancelot, 1998; Laouar et al., 2002) et il est considéré comme une partie des zones internes de la chaîne alpine de l'Afrique du Nord, originaire de l'activité tectonique dans le bassin méditerranéen occidental, associée à la collision des plaques africaine et européenne durant la période Oligo-Miocène (Auzende et al. 1975; Bouillin, 1979; 1986; Cohen, 1980; Maurey et al., 2000; Laouar et al. 2005).

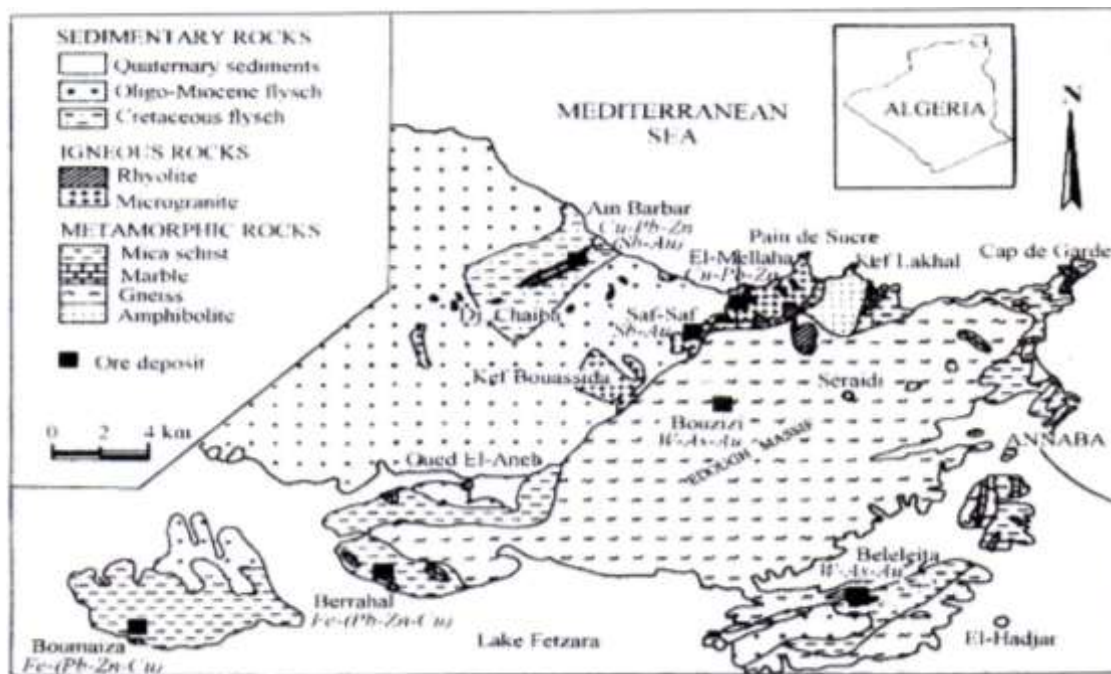


Fig. 3: Carte géologique du massif de l'Edough (Laouar & al., 2002).

Le complexe de l'Edough est composé d'une variété de roches métamorphiques d'âge Précambrien à Paléozoïque; l'ensemble de ces roches forme une antiforme d'axe NE-SW.

Les gneiss, formant la base, ont été décrits par (Ahmed-Said et Leake, 1993). Leur étude pétrologique et géochimique indique que ce sont d'anciennes roches magmatiques à caractère calco-alcalin. Ils ont été datés par la méthode U-Pb à 595 ± 51 Ma. Pour les orthogneiss de base et 606 ± 55 Ma. Pour les leucogranites supérieurs qui sont fortement déformés (Hamor et Lancelot, 1998), et donc ils ont été considérés comme des roches granitiques mises en place durant l'orogénèse panafricaine. Les métapélites qui viennent juste au-dessus des gneiss consistent en deux unités principales: des micaschistes à grenat et souvent à disthène, en alternance avec des niveaux de marbre et de skarns, d'épaisseur métrique, et une unité supérieure, d'âge Paléozoïque (Ilavsky et Snopkova, 1987) constituée de schistes alumineux à andalousite et staurotide en alternance avec des quartzites feldspathiques. Ces formations ont subi un trajet polycyclique de température et pression durant le métamorphisme; depuis des conditions de haute température - haute pression (cycle 1) jusqu'à moyennes températures et pression (cycle 2) et finalement basse pression – haute température (cycle 3) (Hamor, 1992).

Les terrains cristallophylliens sont, en partie, recouverts par un système de nappes sédimentaires résultant de l'activité tectonique oligo-miocène. Ces nappes sont constituées de marnes, d'argiles et de grès crétacés (flysch crétacé), et de grès oligo-miocènes (grès numidiens).

Durant le Miocène, à environ 16 Ma., des corps magmatiques sont mis en place au sein du complexe métamorphique et sa couverture sédimentaire (Marignac et Zimmermann, 1983). Ces roches ignées consistent en deux groupes principaux: des masses et des filons rhyolitiques, et des microgranites. Leurs pétrologies, géochimie et pétrogenèse ont été étudiées par (Ahmed-Said *et al.*, 1993) et (Laouar, 2002). L'activité magmatique et l'hydrothermalisme associés dans le massif de l'Edough sont considérés responsables de l'emplacement de plusieurs indices et gîtes polymétalliques (Laouar *et al.*, 2002): exemple, ceux de Ain Barbar (la mine la plus grande dans la région, actuellement fermée) et El-Mellaha (Boufa, 1948 ; Marignac, 1985); les gîtes à W-Sn associés aux skarns de Bouzizi et Beleleita (Aissa *et al.*, 1995); et les gîtes de Fe-Pb-Zn-Cu associés aux skarns et amphibolites de la région de Boumaiza et de Berrahal.

2.2.2 Description lithologique du massif

2.2.2.1 Le socle

Le cœur de l'antiforme de l'Edough est constitué essentiellement par la superposition tectonique (observée à l'Est du massif) de deux unités principales: l'unité inférieure est composée de gneiss fortement foliés, d'âge précambrien (Panafricain) (Hammor, 1992; Hammor et Lancelot, 1998) et l'unité supérieure constitué de micaschistes du Paléozoïque (Ilavsky et Snopkova, 1987). Des niveaux de marbre, d'amphibolites et de roches ultrabasiques sont également associés à ces deux unités.

A - Les Gneiss: Les gneiss à biotite qui forment le cœur de l'antiforme sont des roches fortement foliées et plissées et sont composés principalement par une variété œillée étroitement associée à de nombreux niveaux leptynitiques (quelques dizaines de mètres à plusieurs dizaines de mètres) riches en tourmaline et une autre variété plus ou moins migmatitique. Ces deux variétés ont été longtemps considérées comme des orthogneiss et des paragneiss respectivement (Gleizes *et al.*, 1988). Les travaux récents de (Hammor et Lancelot, 1998) ont donné les âges de 606 à 595 Ma pour les orthogneiss et de 1630 ± 50 Ma pour les paragneiss. Les orthogneiss sont constitués principalement de biotite, quartz, orthose, plagioclase et grenat.

L'andalousite, la muscovite, l'amphibole, la tourmaline, l'apatite et le zircon peuvent également être présents. Les deux sont des macrocristaux de feldspath potassique contenant plusieurs inclusions d'autres minéraux et leur taille peut atteindre 8 cm de diamètre.

L'étude géochimique (éléments majeurs, éléments en trace et isotopes de Rb-Sr) des orthogneiss (Ahmad-Said et Leake, 1993) indique que ce sont, à l'origine, des roches ignées

Chapitre I : CADRE GÉOGRAPHIQUE ET GÉOLOGIQUE

de nature acide, à caractère calco-alcalin et qui ont été, plus tard, affectées par un métamorphisme isochimique.

B - Les micaschistes: Ils sont constitués de deux ensembles principaux:

L'ensemble inférieur, qui repose directement sur les gneiss, est souvent caractérisé par la présence de niveaux plus ou moins lenticulaires de marbre d'épaisseur très variable (quelques mètres à plusieurs dizaines de mètres). Il affleure principalement dans les zones périphériques du massif de l'Edough et dans la région de La Voile Noire au Nord-Est du massif. Dans cet ensemble se trouve également intercalés des niveaux et lentilles d'amphibolites, de métagabbros, de serpentinites et des filons de quartz-grenat. Ces micaschistes sont des roches schisteuses souvent riches en disthène et grenat et leur contact avec les marbres est souvent souligné par des skarns de réaction. Leur étude géochimique (Ahmad-Said et Leake, 1993) indique qu'il s'agit d'anciens sédiments riches en illite avec quelques fragments ignés de composition intermédiaire et qui ont subi un métamorphisme de haute pression (7-9 kb) et de moyenne température (600 ± 30 °C).

L'ensemble supérieur est constitué par une série dite "des alternances" (Gleizes *et al.*, 1988; Caby et Hammor, 1992), surmontée par une unité épimétamorphique. La série "des alternances" est caractérisée par une alternance régulière de micaschistes, souvent fortement alumineux, et de quartzites feldspathiques d'épaisseur décimétrique à métrique. La découverte d'acritrches (Ilavsky et Snopkova, 1987) précise que cette série est d'âge Paléozoïque (Ordovicien à Dévonien). L'unité épimétamorphique, quant à elle, est représentée par les métapélites de Belelieta, Boumaïza et Berrahal. Elle correspond à des micaschistes à mica blanc, biotite, disthène, staurotide, rutile et parfois grenat, interstratifiés avec des marbres.

C - Les roches métabasiques: Les roches métamorphiques basiques du massif de l'Edough se trouvent généralement dans la partie supérieure des gneiss et au niveau des micaschistes. Elles comprennent des amphibolites, des pyroxénites, des péridotites, des métagabbros, etc.; le volume le plus important desquelles est celui des amphibolites de Kef Lakhal (La Voile Noire). Celles-ci sont constituées de roches massives et d'autres rubanées; le passage de l'une à l'autre est souvent graduel. La roche est composée d'hornblende, plagioclase (An_{34}), grenat, rutile, magnétite, ilménite, quartz, épidote, scapolite, diopside, zircon, apatite, et carbonates secondaires. De fines couches de micaschiste à grenat, épidotites et des filons de roches à quartz et plagioclase ainsi que des filons de quartz peuvent se trouver au sein de ces amphibolites. Les filons de quartz sont contrôlés par la tectonique (Hilly, 1962; Ahmed-Said et Leake, 1992). Parmi les roches ultrabasiques, on note la présence d'enclaves

de nature amphibolitiques et de roches riches en olivine, surtout au niveau des roches encaissantes (micaschistes). (Ahmed-Said et Leake, 1992) considèrent les amphibolites de Kef Lakhal comme roches ignées basiques à ultrabasiqes de nature effusive, formées dans un domaine de marge continentale.

2.2.2.2 La couverture sédimentaire

Elle comprend la nappe de flyschs crétacés et la nappe de flyschs numidiens. Les flyschs crétacés affleurent en fenêtre sous la nappe numidienne et occupent la région de Ain Barbar et El-Mellaha (Hilly, 1962; Marignac, 1976; 1985). Il s'agit d'intercalations d'argilites noires bleutées et de bancs peu épais de calcaires gréseux de type massylien. Les niveaux calcaires renferment des foraminifères permettant de rapporter cette série au Maestrichtien.

Les flyschs numidiens correspond à un faciès argilo-gréseux constitué par des bancs minces de grès à la base qui deviennent plus épais et plus grossiers au sommet avec la présence de dragées de quartz. L'épaisseur de cet ensemble varie de 1000 à 1500m.

2.2.2.3 Le magmatisme tertiaire

Le magmatisme tertiaire de l'Edough est représenté par des leucogranites et aplo-pegmatites d'âge Burdigalien (Aissa, 1995) et des microgranites et rhyolites d'âge Langhien (Marignac et Zimmermann, 1983). Les leucogranites et aplo-pegmatites se rencontrent souvent dans le socle de l'Edough, et sont spatialement associées à des complexes pegmatitiques. Les leucogranites restent généralement confinés dans les gneiss, alors que les aplo-pegmatites se rencontrent aussi bien dans les gneiss que dans les micaschistes, y compris ceux de la série "des alternances". Les microgranites et rhyolites de l'Edough s'intègrent dans le cadre du magmatisme de la marge nord-algérienne. Ils appartiennent d'une manière générale à l'ensemble Edough – Cap de Fer (Hilly, 1962), et dessinent, avec toutes les intrusions dispersées d'Ain Barbar, un complexe centré sur une importante anomalie magnétique suggestive de l'existence en profondeur de masses intrusives plus importantes. Dans le massif de l'Edough, les produits de ce magmatisme scellent les grands accidents et les contacts tectoniques; plus particulièrement les contacts socle – couverture.

2-3-Tectonique et structure du massif de l'Edough

2.2.3 Déformations synmétamorphiques

Le socle de l'Edough a subi une histoire tectono-métamorphique complexe, où deux séquences d'événements peuvent être individualisées:

Plissements synschisteux contemporains d'un métamorphisme de type barrovien (disthène-staurotide-grenat),

Plissements synschisteux et cisaillements ductiles, contemporains d'un métamorphisme de basse pression (andalousite-sillimanite) dans le contexte distensif d'une faille de détachement (Brunel *et al.*, 1988), d'âge burdigalien (Monié *et al.*, 1992 ; Aissa *et al.*, 1994; 1995).

2.2.4 Déformations tardives

Les déformations tardives se résument essentiellement en la formation de plis et de failles (Aissa, 1995):

Plis droits à N140°E; et brachyanticlinal N50-60°E façonnant la forme actuelle du massif (fig. 4).

Failles: un premier type de failles (F1) constitue une famille dont l'orientation dominante varie de N120° à N150°E; et correspondrait à des failles décrochantes dextres. Les failles N150° à N160°E contrôlent les minéralisations polymétalliques hydrothermales et paraissent, par ailleurs, avoir guidé la mise en place des rhyolites. Un deuxième type de failles (F2), d'orientation NE-SW, semble conjugué au type précédent, et aurait probablement joué en décrochements senestres. La grande faille de l'Oued Afris qui appartient à ce système paraît avoir guidé la mise en place de plusieurs corps microgranitiques. Un troisième type de failles (F3), moins important, qui a une direction moyenne E-W; et un quatrième type, rare, de direction moyenne N-S qui semble en liaison avec le premier type (F1).

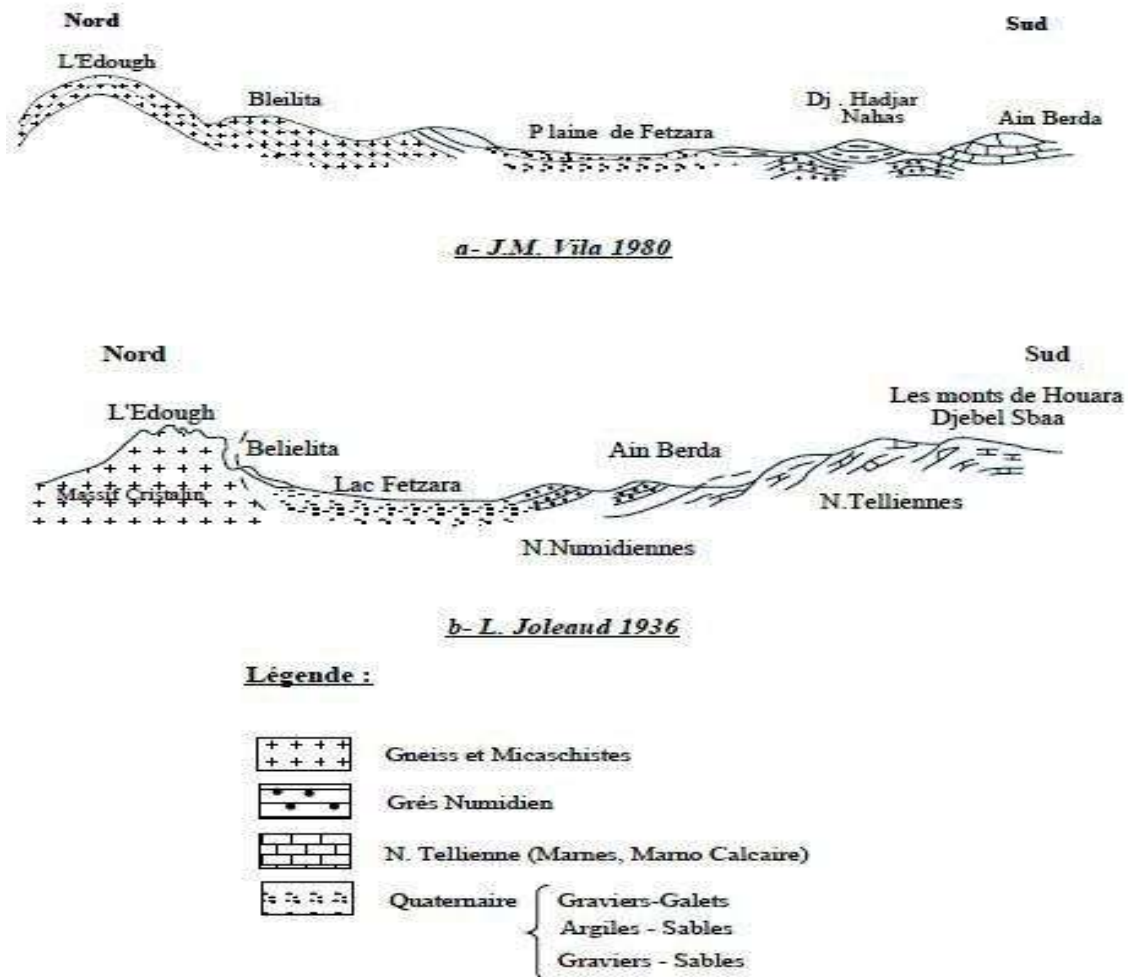


Fig. 4: Coupes géologiques entre Ain Berda et l'Edough, passant par le Lac Fetzara (in Habes, 2013).

2-4-Plaines littorales :

Ces plaines s'étendent de la vallée de la Seybouse jusqu'à la frontière tunisienne, sur une largeur d'environ 15km et une longueur de 110km.

Elles ne constituent par un ensemble homogène, car on y trouve des dunes sableuses des espaces marécageux, des plaines fertiles et petits reliefs.

De l'Ouest à l'Est, on distingue successivement la plaine de Guerbes, la dépression du Lac Fetzara, la plaine d'El Hadjar et, la plaine d'Annaba. Elles sont caractérisées par des sédiments quaternaires récents, constituant ainsi le fond de cette dépression tectonique. Les grès numidiens constituent les sommets, dont les plus importants se situent autour du village de Daghoussa.

2.3 Formation sédimentaire

2.3.1 Le secondaire

Ce sont des terrains allochtones représentés par des calcaires à silex du jurassique et par des flysch du crétacé.

2.3.2 Le Tertiaire

Présente une épaisseur importante dans la région d'étude avec trois (03) systèmes :

- L'Eocène inférieur : série transgressive, formée de calcaires massifs à faciès épinéritiques.
- L'Oligocène : comporte des niveaux argilo-gréseux numidiens qui forment le relief des montagnes du sud de la plaine.
- Le Mio-pliocène : constitue le remplissage graveleux de sablo-argileux du bassin.

2.3.3 Le Quaternaire

Il est constitué des formations continentales, alluvionnaires, colluviales, éoliennes et marines. Les études géologiques sur le Quaternaire dans la plaine de Annaba font apparaître les quatre traits suivants :

2.3.3.1 *Quaternaire ancien*

Constitué par des formations alluviales (argiles, limon, sables, gravier et galets), et formant un réservoir d'eau superficielle, constituant la haute terrasse d'une altitude de 75 à 150m.

2.3.3.2 *Quaternaire moyen*

Correspond à la basse terrasse de 20 à 50 m, constituée par des argiles et des sables. Elle supporte des terres cultivées. Et elle se développe sur toute la région.

2.3.3.3 *Quaternaire récent*

Indiqué par des dépôts alluvionnaires, limoneux très fins, à prédominance d'argile qui couvrent indifféremment l'ensemble de la plaine (S. E. Cherrad, 1979 in Kherici, 1993) il correspond à la basse et la moyenne terrasse.

2.3.3.4 *Quaternaire actuel*

Les alluvions sont représentées par des dépôts des lits actuels des Oueds, formés généralement de matériaux variés (argiles, sables, cailloux), résultant de l'érosion des formations traversées par l'Oued.

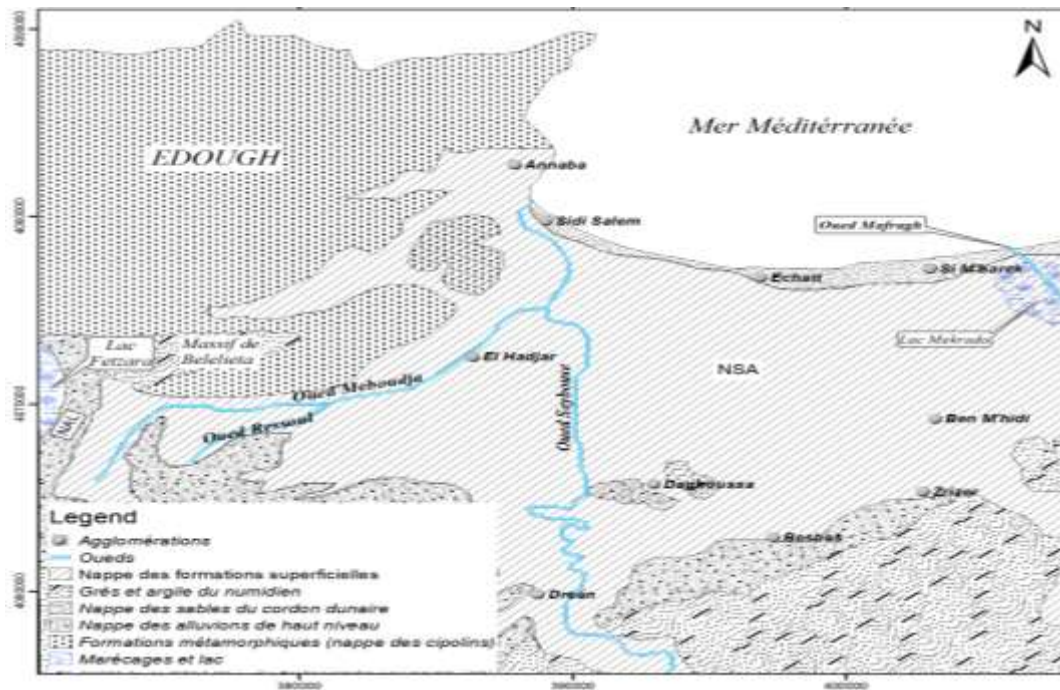


Fig. 5: Carte géologique montrant les formations à l'affleurement au niveau de la région Annaba. (D'après Gaud, 1976. in Hani 2003; Modifiée).

2.4 Tectonique

- **Les Monts de la Cheffia :** occupent la partie sud de la région. Ce sont des formations grés-argileuses du Numidien, se présentent comme une ride tectonique marquée par des anticlinaux, parfois faillés à noyaux argileux.

- **La plaine d'Annaba :** on y distingue deux événements tectoniques :

Du Miocène inférieur au Miocène supérieur, les mouvements tectoniques provoquent l'enfoncement progressif des grès numidien. Par la suite, un remplissage d'âge Plio-Quaternaire par des matériaux détritiques s'est déclenché. Pendant le Miocène inférieur, l'ensemble de la région a été soumis à des phénomènes orogéniques et à un isolement complet du massif de l'Edough. Ainsi la plaine se trouve au centre d'un bassin limité au Nord par l'anticlinal du Massif de l'Edough et au Sud par les nappes de la chaîne tellienne.

A partir du Pliocène et pendant le Quaternaire, un effondrement déclenche des processus de formation et de comblement des deux fosses, celle de Ben Ahmed et celle de Ben M'Hidi orientée SW-NE, qui sont séparés par un haut fond appelé l'élévation de Daroussa (Fig. 6).

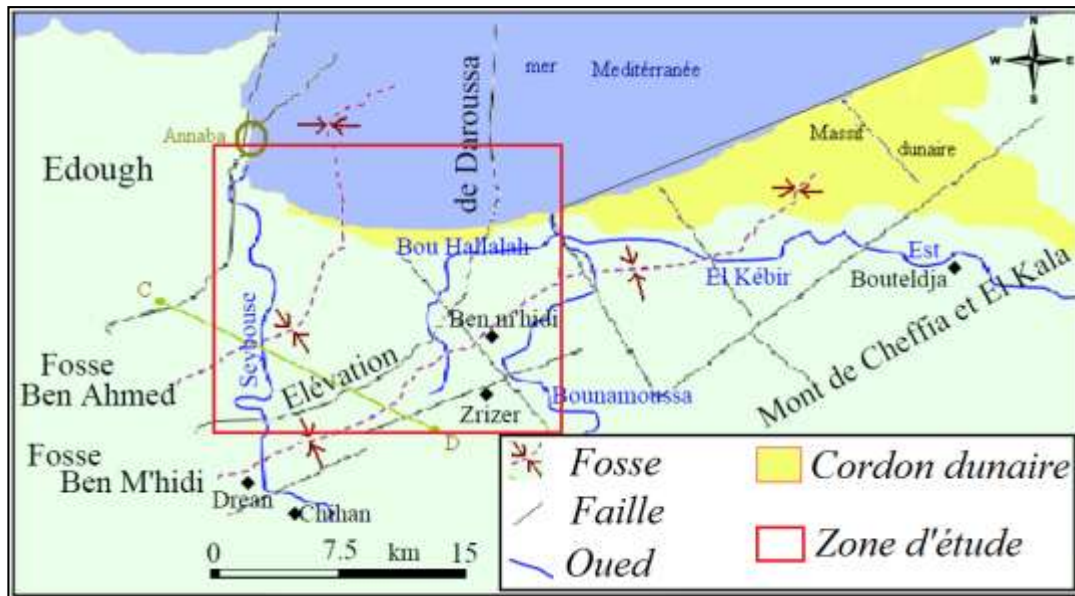


Fig. 6: Esquisse tectonique au niveau de la plaine d'Annaba (d'après SONATRACH, in Saadali, 2007 ; Modifiée).

2.5 Paléogéographie

Pendant l'ère secondaire, la mer envahit au moins une partie du massif de l'Edough.

La présence des calcaires du Jurassique affleurant sur le socle confirme cette transgression marine.

Vers la fin du Crétacé et pendant le Paléogène se sont déposées des formations Flyschoides schisteuses et gréseuses. Durant le Miocène une importante phase tectonique (phase alpine) a agi sur ces flysch, en les charriant sur le socle. Et puis, de nombreux accidents tectoniques provoquent l'effondrement de la plaine orientale de Massif de l'Edough.

Les bassins formés s'approfondissent au cours du Pliocène et jusqu'au Quaternaire et se remplissent de formations continentales.

2.6 Conclusion

L'histoire de la région d'Annaba remonte au Précambrien et s'achève au Quaternaire, a connu le dépôt d'une épaisse série sédimentaire dont la partie inférieure a subi un métamorphisme. Une activité magmatique s'est manifestée à partir du Miocène. Cette activité a une relation avec la tectonique compressive puis dispersive. La tectonique distensive a permis la formation des dépressions qui vont être remplies par des alluvions (sable, graviers, des cailloutis...).

Chapitre II : HYDROCLIMATOLOGIE

1 Introduction

L'Algérie, de par sa position en latitude, correspond à l'une des zones de contact et de lutte entre des masses d'air d'origine ou d'affinité polaire et arctique d'une part, et des masses d'air dites tropicales d'autre part. Les avancées des premières vers le Sud au-delà de 30°N ne sont exclues en aucune saison, surtout dans les hautes couches de la troposphère ; mais sauf exception, elles n'agissent avec efficacité dans l'évolution du temps qu'entre le début de l'automne et la fin du printemps. Quant à l'air tropical, il peut provenir de l'Atlantique ou du continent africain, par courant dirigé vers le Nord, le Nord-Ouest ou le Nord-Est. Il est susceptible d'affecter, selon les circonstances, des régions diverses du Sahara à la Méditerranée. Lorsque des masses d'air anticycloniques appartenant à l'une ou l'autre de ces deux catégories fondamentales envahissent largement une portion du Maghreb, elles y déterminent un type de temps stable, chaud ou froid en fonction de la saison. Si au contraire, l'Algérie est balayée par le passage de front de discontinuité, elle subit un temps capricieusement variable avec des risques de précipitations inégalement réparties d'une région à l'autre.

L'Algérie donc, du fait de sa situation géographique se trouve partagée en trois zones climatiques distinctes ; la première à climat méditerranéen au Nord, la seconde semi-aride vers l'intérieur du pays (hauts plateaux) et enfin un climat aride qui caractérise le grand Sahara. Le domaine méditerranéen bénéficie d'un climat tempéré, avec des hivers doux et ses étés chauds et secs en font des régions très attractives pour l'Homme.

Les régions côtières jouissent de ce dernier, agréable en hiver (12 °C à Alger) et supportable en été (25 °C dans la même ville). L'humidité y est forte et les précipitations relativement abondantes : avec 762 mm de moyenne, concentrés sur quelques mois d'automne et d'hiver surtout.

La plaine d'Annaba appartient aux zones côtières, de ce fait elle demeure exposée aux aléas climatiques régissant ces zones. Pour réaliser notre travail, nous commencerons par donner un aperçu sur l'évolution du climat dans cette région ce qui nous permettra de mieux comprendre les processus d'échanges entre les eaux superficielles et souterraines de la région.

2 Climat de la zone d'étude

Pour réaliser notre travail, nous avons pris en considération deux stations météorologiques (Tab.1), l'une des Salines située au niveau de l'aéroport Rabah Bitat d'Annaba et l'autre de Pont Bouchet située au niveau de l'agence de l'ANRH. Les deux stations sont distantes de 15 kilomètres. Ces deux stations sont situées au niveau de notre secteur d'étude. La station des salines enregistre les températures et les précipitations, par contre, la station de Pont Bouchet

n'enregistre que les précipitations. Nous avons recueilli au niveau de la station des Salines les données climatiques mensuelles des températures allant de 1972 à 2017, pour les précipitations on a obtenu les données allant de 1985 à 2017. Concernant la station de Pont Bouchet, nous avons les enregistrements des précipitations sur une période de 38 années soit de 1980 à 2018.

Tab. 1: Caractéristiques des stations météorologiques.

Station	Longitude	Latitude	Altitude (m)	Période (année)	T (C°)	P (mm)
Salines	07°45' E	37° N	3	1985-2017	17,8	652,87
Pont Bouchet	07°45'E	36°58'N	6	1980-2018	-	632,9

2.1 Précipitation

Toute étude climatologique repose sur une analyse bien détaillée des précipitations, car la pluie est un facteur qui conditionne l'écoulement saisonnier et par conséquent, le régime des cours d'eau ainsi que celui des nappes.

a- Variations mensuelles des pluies :

Les variations des moyennes mensuelles des précipitations sur une période d'observation de 32 ans pour la station des Salines entre 1985 et 2017, et 38 ans à la station de Pont Bouchet entre 1980 et 2018 sont résumées dans le tableau suivant (Tab.2) et représentées dans des histogrammes (Fig.1):

Tab. 2: Variations des moyennes mensuelles des précipitations au niveau de la station des salines (1985-2017) et Pont Bouchet (1980 – 2018).

Stations	Mois												Total Anuel
	Sept	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	
Saline	39,89	53,92	93,61	105,99	98,32	76,37	70,92	53,12	37,87	12,0 3	3,53	8,46	652,87
Pont Bouchet	36,08	71,27	94,33	92,48	92,94	81,93	74,28	36,29	28,23	9,42	1,77	13,91	632,9

Le tableau précédent montre que la précipitation moyenne dépasse 630 mm/an au niveau des stations prises en considération (Les Salines & Pont Bouchet). Les mois plus pluvieux sont Novembre, Décembre, Janvier et Février, montrant que les plus fortes précipitations sont enregistrées entre l'automne et l'hiver. Les mois de Juin, Juillet et Aout, caractérisant la saison estivale sont particulièrement secs, où le total des précipitations enregistré avoisine les 20 mm.

Les histogrammes des précipitations moyennes mensuelles (Fig.7) montrent la variation des précipitations d'un mois à un autre. Le maximum des précipitations est enregistré au mois de

décembre pour la station des Salines avec une moyenne de (105,99 mm), pour la station de Pont Bouchet, le mois de novembre est le plus pluvieux avec (94,33 mm). Par contre, le minimum est remarqué au mois de juillet pour les deux stations, les précipitations moyennes sont de 3,53 mm et de 1,77 mm respectivement aux stations des Salines et de Pont Bouchet.

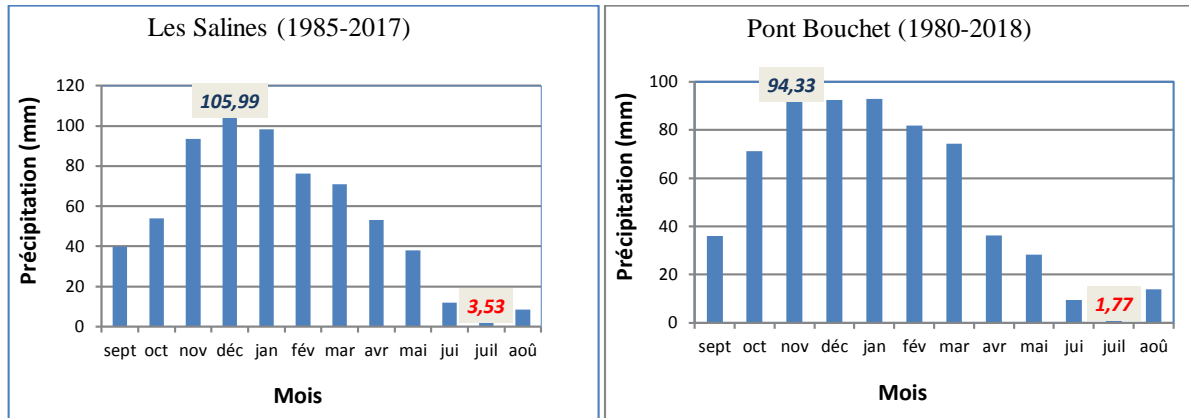


Fig. 7: Moyennes mensuelles des précipitations aux stations des Salines (1985-2017) et Pont Bouchet (1980-2018).

b- Les variations des moyennes annuelles des pluies :

Afin de mieux visualiser les années les plus pluvieuses durant la période d'observation, nous avons calculé la précipitation moyenne annuelle pour chaque station. La figure 8 & 9, montre, les variations annuelles des précipitations par rapport aux moyennes calculées pour chaque station. Ainsi nous pouvons déduire les constatations suivantes :

- ✓ L'observation de la (Fig 8), se rapportant à la station des Salines ($P_m = 653$ mm/an), montre une succession des années sèches et humides. En matière de périodicité, nous remarquons que les années humides sont plus nombreuses que les années sèches. Ceci se traduit par un gain pour les nappes et les barrages. Dans le détail, nous nous remarquons que 14 années peuvent être considérées comme excédentaires c'est le cas des années (1986 à 1987), (1991 à 1993), (1997 à 2000), (2002 à 2006), (2008 à 2011) et de (2014 à 2015), avec des périodes très arrosées comme (1997 à 2000), (2002 à 2006), (2008 à 2011) et de (2014 à 2015), pour ces années le taux de précipitations enregistré est supérieur ou égal à 800 mm. Par contre, les années les plus déficitaires sont de (2000 à 2002), (2006 à 2008) et de (2015 à 2017) avec une précipitation inférieure à 500 mm.

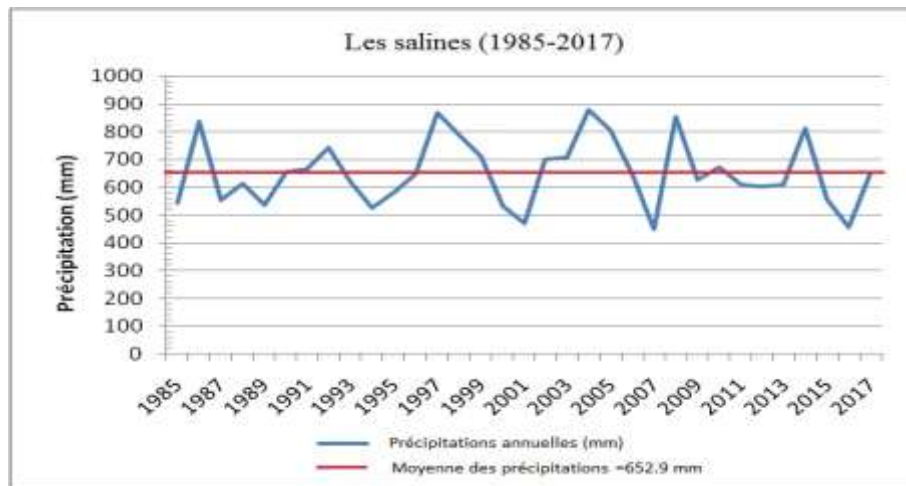


Fig. 8: Variation interannuelle des précipitations à la station des Salines.

- ✓ Pour la station du Pont Bouchet (Fig.9), $P_m = 635$ mm/an, le graphe indique 17 années excédentaires, se répartissant sur les années (1986 à 1987), (1990 à 1993), (1995 à 1996), (2001 à 2004) et de (2007 à 2016), dans le même registre nous notons que les années (2001 à 2004) et de (2007 à 2016), sont les plus arrosées avec une précipitation de plus de 800 mm. Contrairement, les années déficitaires sont (1996 à 1997), (1999 à 2001), (2004 à 2007) et de (2016 à 2017), lors de ces périodes les précipitations enregistrées sont de l'ordre de 500 mm/an.

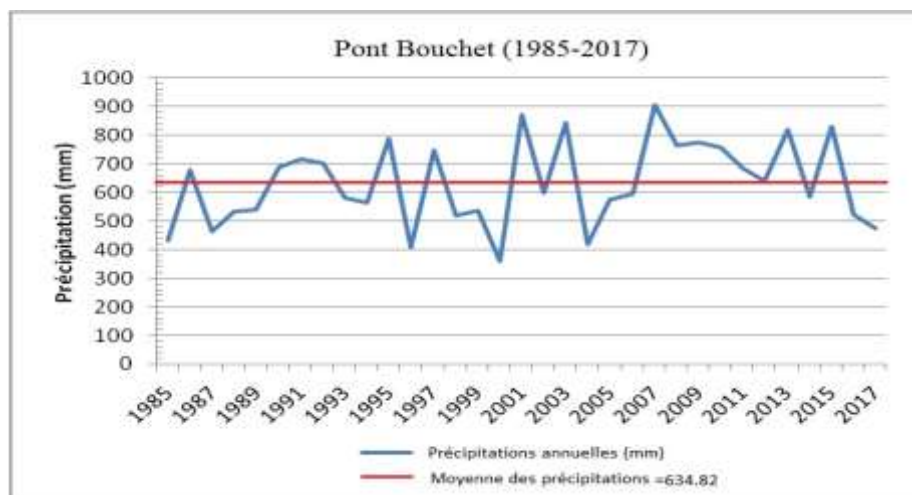


Fig. 9: Variation interannuelle des précipitations à la station Pont Bouchet.

2.1.1 La répartition saisonnière des précipitations

Le (Tab.3), récapitule la répartition des précipitations selon les saisons. Nous remarquons que le taux des précipitations le plus important est enregistré en hiver, il est de 280,68 mm en trois mois, ce qui représente 42,9% au Salines. Pour Pont Bouchet, nous enregistrons pour la même saison 267,35 mm soit 42,2% du total. Au cours de la saison automnale il tombe 187,42 mm

Chapitre II : HYDROCLIMATOLOGIE

soit 28,7% aux salines contre 201,68mm correspondent à 31,8% au Pont Bouchet. Lors du printemps il tombe 161,91 mm aux Salines donc 24,8%, mais à Pont Bouchet, on enregistre 138,8 mm donc 22%. En été les précipitations sont faibles avec 24,02 mm soit 3,6% aux Salines et 25,1 mm équivalant à 4% à Pont Bouchet.

Tab. 3: Répartition saisonnière des précipitations (mm) dans les deux stations.

Station	Les Salines (1985-2017)												
Saisons	Automne			Hiver			Printemps			Eté			Total
Mois	sept	oct	nov	déc	jan	fév	mar	avr	mai	jui	juil	août	
P (mm)	187,42			280,68			161,91			24,02			652,87
P (%)	28,7			42,9			24,8			3,6			100
Station	Pont Bouchet (1980-2018)												
P (mm)	201,68			267,35			138,8			25,1			632,9
P (%)	31,8			42,2			22			4			100

À partir des constats précédents, nous avons réalisé la (Fig.10), qui montre la répartition annuelle des précipitations en fonction des pourcentages calculés.

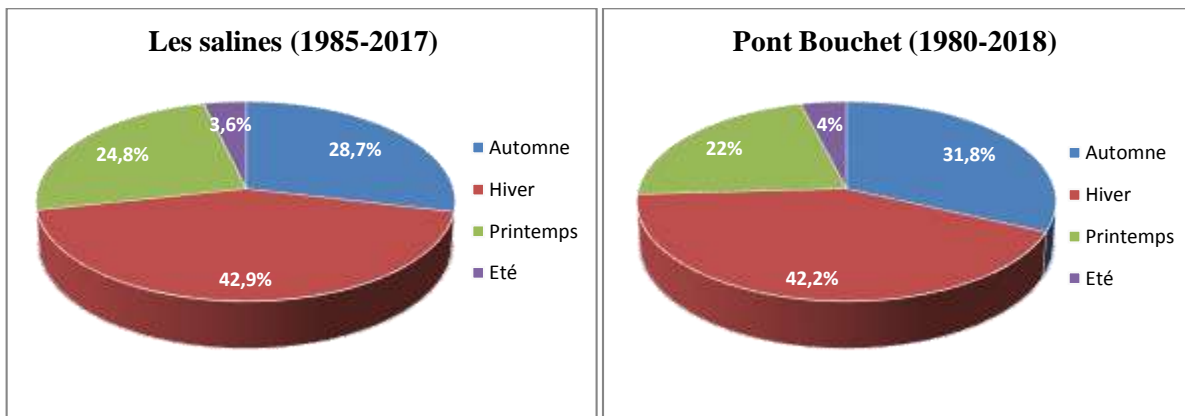


Fig. 10: Portions des répartitions saisonnières des précipitations (%) dans les deux stations.

L'observation de la figure Fig.10, montre que la saison hivernale est la plus pluvieuse dans la région, où il tombe en moyenne de 267,35 à 280,68mm soit autour de 42% à 43% des pluies totales annuelles entre les deux stations.

La répartition des précipitations sur la saison du printemps et celle de l'Automne est presque identique ; elles représentent entre 22% et 31,8% de la totalité des précipitations pour les deux stations. En été, la pluviométrie est faible, elle représente seulement 24,02 à 25,1mm, soit aux environs de 3,6 à 4% du total des pluies.

2.1.2 Le coefficient pluviométrique

Le coefficient pluviométrique annuel **H** est un paramètre très important pour la détermination des années excédentaires et des années déficitaires (Tab.4). Il est déterminé par la formule suivante :

$$H = Pi/P$$

Avec :

- P_i : pluviométrie annuelle d'une année donnée en mm.
- P : Moyenne de la pluviométrie annuelle d'une période donnée en mm.

Si $H > 1$: l'année correspondante est **excédentaire**.

Si $H < 1$: l'année correspondante est **déficitaire**.

Tab. 4: Récapitulation des valeurs du coefficient pluviométrique calculé pour les deux stations références.

Année\Station	Les Salines	Pont bouchet
Années excédentaires	15	16
Années Déficitaires	18	17
Moyenne	652.87mm	634.82mm

L'observation du précédent tableau montre un équilibre entre les années excédentaires et déficitaires au niveau de la station de Pont Bouchet par contre au niveau de la station des Salines les années déficitaires sont légèrement supérieures aux années excédentaires.

La (Fig 11), illustre les variations annuelles des indices pluviométriques au niveau des deux stations références. L'observation de la figure dans le détail montre une alternance entre les années déficitaires et les années excédentaires. Nous remarquons la même évolution entre les deux stations en matière de déficit et d'excédent. Cette similitude disparaît au cours de la période 1998-2003, nous remarquons une variation inverse entre les deux stations. C'est-à-dire quand la station des Salines montre un déficit $H < 1$, celle de Pont Bouchet, indique un excédent $H > 1$. Cette variation, nous amène à dire qu'il ne pleut pas de la même manière (intensité), aux niveaux des deux stations.

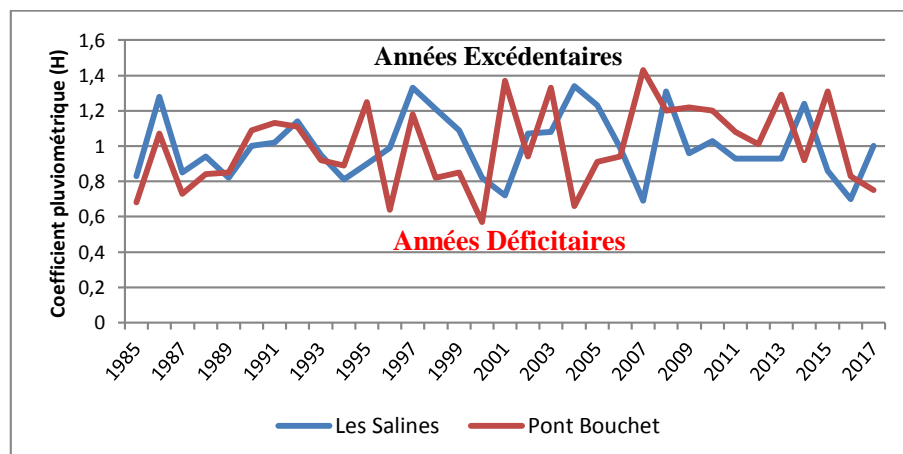


Fig. 11: Variations des coefficients pluviométriques calculés aux niveaux des stations étudiées.

2.2 La Température

La température est un élément fondamental du climat, elle joue un rôle déterminant dans l'étude de l'évaporation et de l'évapotranspiration. Pour réaliser notre travail, nous disposons des mesures enregistrées au niveau de la station des Salines, elles s'étalent sur la période allant de 1972 jusqu'à 2017, elles sont répertoriées dans le tableau 5.

Tab. 5: Température moyenne mensuelle (°C) à la station des salines (1972-2017).

Station salines	Mois												Annuelle
	Automne			Hiver			Printemps			Été			
	Sept	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	
Min	11,2	13,3	9,8	10,2	9,1	9,0	10,9	13,3	14,8	12,1	22,1	22,5	9,0
Max	25,7	23,0	18,5	23,9	18,0	14,0	16,0	17,6	20,4	27,6	32,9	28,3	32,9
Moyenne	23,2	20,0	15,7	13,0	11,7	11,7	13,2	15,2	18,3	21,9	25,1	25,5	17,8

Le précédent tableau, montre que les mois les plus froids sont décembre, Janvier, Février et à degré moindre Mars. Au cours de ces quatre mois la Température moyenne ne dépasse pas 14 °C. La saison estivale reste la plus chaude. À partir du mois de Juin, les températures augmentent et atteignent un maximum au mois de Juillet et Aout, où elles atteignent et dépassent parfois 25°C.

La (Fig 12), montre les variations de la température par rapport à la valeur moyenne calculée (17,8 °C). L'observation de la figure montre une succession d'années chaudes et d'années froides. Les années chaudes dominant par rapport aux années froides. La dernière année froide remonte à 1993, au cours de cette année la température moyenne avait atteint 16,4°C, soit 1,4°C par rapport à la moyenne. L'année 2014, demeure l'année la plus chaude présente, la température a avoisiné 18,9°C. Cette augmentation annonce peut être l'influence des changements climatiques.

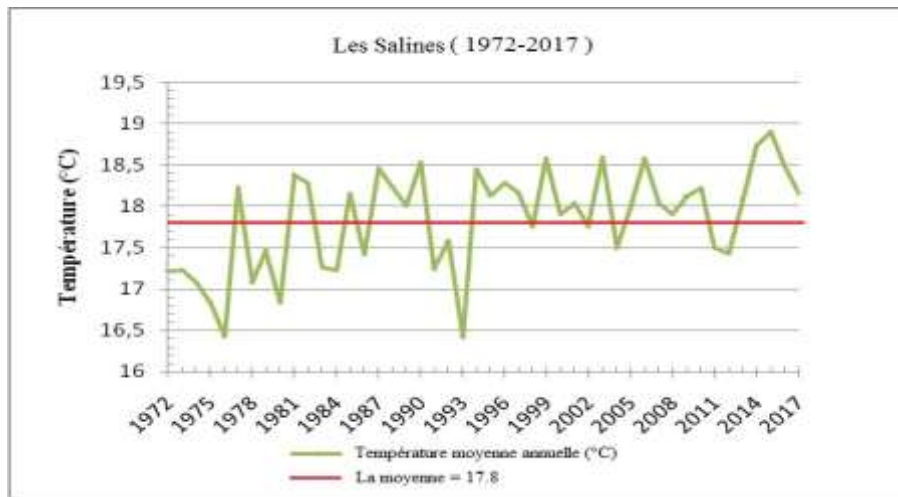


Fig. 12: Variations des moyennes annuelles des températures.

2.2.1 Phénomène de changement climatique dans la zone d'étude

Pour mettre en évidence un probable impact des changements climatiques sur la région, nous avons observé les variations des températures moyennes sur trois périodes différentes, ces dernières se répartissent comme suit :

- la première période s'étale de 1972-1986,
- la seconde va de 1986-1990,
- la dernière période couvre les années allant de 1990-2017.

Les valeurs moyennes calculées sont reportées dans le tableau, suivant (Tab.6).

Tab. 6: Moyennes de la température de chaque période.

Période	1972-1986	1986-1990	1990-2017
Moyenne	17,4	18,13	18,03

L'observation du précédent tableau, montre une augmentation de la température importante entre les deux premières périodes. Cette augmentation dépasse (1 °C), ce qui laisse supposer une variation climatique avérée.

La figure 13, montre clairement les variations décrites à partir du précédent tableau. Cette augmentation des températures, aura un impact sur les quantités d'eau qui seront emmagasinées.

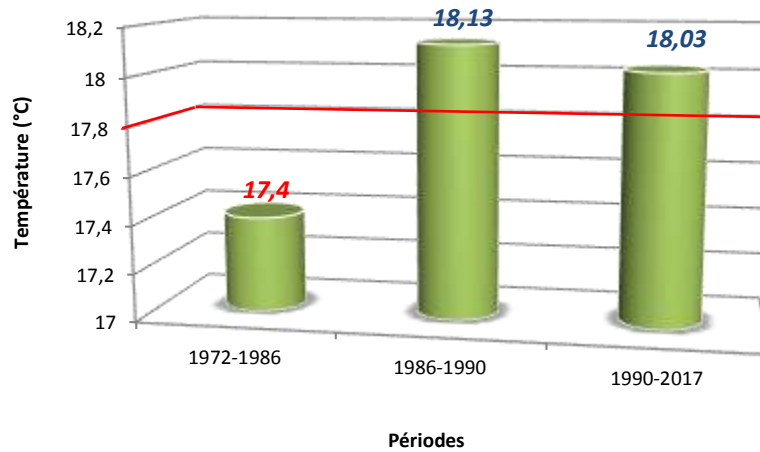


Fig. 13: La variation de la température des périodes.

2.3 Indice d'Aridité (De Martonne 1925)

* Notion d'aridité

L'aridité est un phénomène climatique impliquant une faiblesse des précipitations annuelles et un fort déficit de celles-ci par rapport à l'évapotranspiration potentielle (ETP). Étant un concept climatique à référence spatiale, l'aridité est différente de la sécheresse, qui est un concept météorologique à référence temporelle. Donc, une région peut être qualifiée d'aride et non une période. L'indice d'aridité de De Martonne a été tiré à partir de la modification du facteur de pluie de Lang en 1923. Cet indice permet de caractériser le pouvoir évaporant de l'air à partir de la température (Boughrira, 2015), selon l'équation suivante :

$$I_A = P / (T + 10)$$

P : les hauteurs annuelles des précipitations en mm.

T : les températures moyennes annuelles en °C.

10 : constante, utilisée pour éviter les valeurs négatives lorsque la température moyenne de l'air est inférieure à 0°C (Boughrira, 2015).

Pour :

20 < I_A < 30 : climat tempéré.

10 < I_A < 20 : climat semi-aride.

7.5 < I_A < 10 : climat steppique.

05 < I_A < 7.5 : climat désertique.

Tab. 7: Résultats de l'indice d'Aridité de De Martonne (I_A).

Station	P	T	I _A	Climat
Les Salines (1985-2017)	652,87	18,04	23,28	climat tempéré

2.4 L'indice Ombrothermique de Gaussen

Cet indice a été proposé par Gaussen en 1952. Il est, largement, utilisé pour sa simplicité et son efficacité. L'indice de Gaussen s'exprime par un diagramme Ombrothermique qui permet de calculer la durée de la saison sèche. Il tient compte des précipitations et des températures moyennes mensuelles qui sont portées sur deux axes, sa formule est :

$$P = 2 T$$

P : précipitations mensuelles en mm.

T : température moyenne mensuelle en °C.

La (Fig.14) ci-dessous, présente le diagramme Ombrothermique de Gaussen qu'a été réalisé à partir des moyennes des températures et des précipitations durant la période (1985-2017).

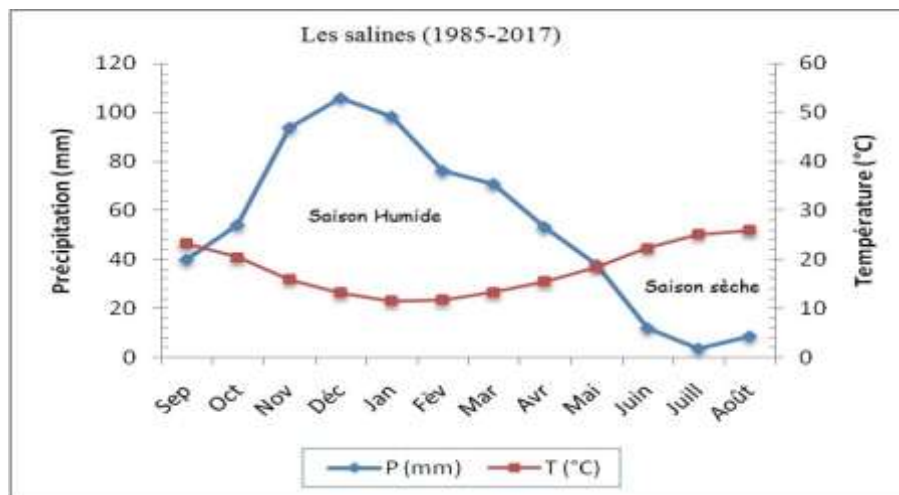


Fig. 14: Courbe Ombro-thermique (Salines ; 1985-2017).

À partir de diagrammes Ombro-thermique des deux stations, on a constaté que l'année hydrologique de la zone d'étude est caractérisée par deux saisons bien distinctes : l'une humide, s'étale du mois d'octobre jusqu'au mois de mai, et l'autre saison sèche s'étale du mois de juin au mois d'août.

2.5 Humidité

L'humidité relative de l'air correspond au rapport de la tension de vapeur réelle observée à la tension de vapeur saturante à la même température. Les moyennes mensuelles de l'humidité relative (Saline 1980-2017) varient de 66,25 % en été (Aout) à 74,65 % en hiver (Décembre) avec une moyenne annuelle étant de 69,6 % (Tab.8).

Chapitre II : HYDROCLIMATOLOGIE

Tab. 8: Moyenne mensuelle de l'humidité relative en (%) à la station des Salines (1980-2017).

Mois	Sept	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	Annuelle
Moyenne	67,07	67,5	69,05	74,65	73,5	72,25	71,75	71	68,48	67	66,75	66,25	69.60

2.6 Vent

Les vents ont un effet important sur les phénomènes d'évaporation de précipitation et à un degré moindre sur les températures. La région d'étude est prédominée par des vents de direction NW-SE et leur vitesse moyenne est de l'ordre de 3,54 m/s (Tab.9).

Tab. 9: Moyenne mensuelle de la vitesse des vents en m/s à la station des Salines (1984-2015).

Mois	Sept	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	Annuelle
Moyenne	3,44	3,03	3,37	3,18	3,83	3,77	3,87	3,66	3,18	3,67	3,83	3,76	3.54

2.7 Bilan hydrique

Le bilan permet d'évaluer les apports et les sorties en eau sur une période déterminée. L'évaluation du bilan d'eau est nécessaire aux paramètres physiques du milieu, tels que les éléments climatologiques, pédologiques qui interviennent dans le cycle de l'eau. Le calcul de ce bilan est nécessaire pour mieux définir les besoins globaux et chiffrés du milieu et essentiellement pour l'évaluation du volume des ressources en eau souterraine (infiltration) et de surface (ruissellement). Le bilan hydrologique d'un bassin peut se traduire par l'équation suivante:

$$P = ETR + I+R + \Delta RFU$$

Avec :

P : lame moyenne mensuelle précipitée en mm.

ETR : Evapotranspiration réelle en mm.

I : L'infiltration efficace atteignant les eaux souterraines en (mm).

R : Ruissellement en mm,

ΔRFU : Variation de la réserve facilement utilisable, c'est-à-dire de la lame d'eau stockée dans le sol, utilisable par les plantes. La RFU commence à alimenter l'ETR quand les précipitations deviennent inférieures à l'ETP (Hani, 2011). (Le RFU = 100 mm pour les deux stations, voir le Tab.10).

Tab. 10: Estimation des valeurs de la RFU selon la formule de Hallaire

Secteur	Caractéristiques de sol et profondeur d'enracinement	RFU (mm)

La plaine d'Annaba	<ul style="list-style-type: none"> • Sols argilo-limoneux: C-f = 15 % • Profondeur moyenne d'enracinement: 450 mm 	100
--------------------	---	-----

2.7.1 Evapotranspiration

Dans les études hydrogéologiques, les deux éléments principaux du bilan, l'évaporation et la transpiration sont réunies en un seul : l'évapotranspiration. L'évapotranspiration ou l'évaporation totale (E. T) est l'ensemble des phénomènes d'évaporation (processus physique) et de transpiration (phénomène biologique).

On distingue :

- L'évapotranspiration réelle (E.T.R).
- L'évapotranspiration potentielle (E.T.P).

a) L'évapotranspiration réelle (ETR) :

L'évapotranspiration réelle correspond à la quantité d'eau effectivement évapo-transpirée au-dessus de la surface étudiée, elle dépend de la lame d'eau stockée dans le sol et la pluviosité. Par définition, on appelle évapotranspiration, la somme de l'évaporation et de la transpiration réelle pour une surface donnée et une période définie (Zerrouki, 2007). Nous avons essayé d'estimer l'évapotranspiration réelle par :

- *Formule de Turc.*
- *Formule de Thornthwaite.*

b) L'évapotranspiration potentielle (ETP) :

L'évapotranspiration potentielle (ETP) exprimée en hauteur de lame ou tranche d'eau évaporée, la somme des volumes d'eau pouvant s'évaporer et transpirer sur une surface donnée et durant une période bien définie, en considérant des apports d'eau suffisants (Zerrouki, 2007).

2.7.1.1 Estimation de l'évapotranspiration réelle par la Méthode de Turc :

Cette formule consiste à évaluer directement l'évapotranspiration réelle à partir de la hauteur moyenne de la pluie et de la température moyenne annuelle, résultats représentés dans le (Tab.11).

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}} \qquad L = 300 + 25T + 0.05T^2$$

ETR : Evapotranspiration réelle annuelle en mm.

P : Précipitation moyenne annuelle en mm.

T : température moyenne annuelle en °C.

Tab. 11: L'évapotranspiration réelle selon la formule de Turc.

Saline 1985-2017	
PA	654,03
TA	18,1
ETR	519,07
<i>PA : précipitation annuelle (mm).</i>	
<i>TA : Température annuelle (mm).</i>	
<i>ETR : Evapotranspiration Réelle (mm).</i>	

2.7.1.2 Estimation de l'évapotranspiration potentielle et réelle par la Méthode de Thornthwaite :

Cette méthode est utilisée pour les climats subhumide et semi-aride, et vue les caractéristiques intermédiaires du climat méditerranéen, cette formule a été appliquée. Elle est basée sur la notion de réserve d'eau facilement utilisable (RFU). On admet que la hauteur d'eau stockée dans le sol qui est repris par l'évapotranspiration est de 100 mm au maximum (Gaud 1976). Pour l'estimation de l'évapotranspiration potentielle nous avons utilisé la formule de Thornthwaite qui a établi une correction entre la température moyenne mensuelle et l'évapotranspiration mensuelle, cet auteur définit d'abord un indice thermique mensuel (i), où :

$$ETP = 16 \left(\frac{10 \times T}{I} \right)^a \times K \quad a = 0.016I + 0.5$$

$$I = \sum i = \sum \left(\frac{T}{5} \right)^{1.514}$$

Avec :

T: Température moyenne annuelle (° C).

i : Indice thermique mensuel.

I : Somme des indices mensuels.

ETP : Evapotranspiration potentiel mensuelle (mm).

K : terme correctif dépend de mois et de la latitude.

Le principe de calcul du bilan hydrologique de Thornthwaite est le suivant :

- ✓ 1er cas : si pour un mois $P \geq ETP$ on pose que l'ETP = ETR, la quantité d'eau qui reste (P-ETR) va alimenter la RFU jusqu'à son maximum (100 mm) et si elle dépasse cette valeur il y aura un excès (EXC) qui va partir soit sous forme d'infiltration efficace vers la nappe, soit sous la forme de ruissellement.
- ✓ 2ème cas : si $P < ETP$, la valeur de ETR = P + RFU, jusqu'à égalisation avec ETP.

Chapitre II : HYDROCLIMATOLOGIE

- ✓ 3ème cas : Si $P < ETP$ et la RFU est nulle, il va se produire un déficit agricole $Da = ETP - ETR$, ce dernier paramètre représente alors le besoin des cultures à l'irrigation (Hamzaoui, 2019).

Les résultats de calcul de ces paramètres pour la station Salines, sont présentés dans le (Tab. 12).

Tab. 12: Bilan hydrologique selon Thornthwaite, station des salines (1985/2017).

Mois	P (mm)	T (°C)	i	k	ETP (mm)	ETR (mm)	RFU (mm)	DÉF (mm)	EXC (mm)
Sept	39,89	23,2	10,22	1,03	105,39	39,89	0	65,5	0
Oct	53,92	20,5	8,44	0,97	78,26	53,92	0	24,34	0
Nov	93,61	16,0	5,8	0,86	43,53	43,53	50,08	0	0
Dec	105,99	13,2	4,35	0,81	28,67	28,67	100	0	27,4
Jan	98,32	11,5	3,54	0,87	23,83	23,83	100	0	74,49
Fev	76,37	11,8	3,66	0,85	24,27	24,27	100	0	52,1
Mar	70,92	13,4	4,42	1,03	37,26	37,26	100	0	33,66
Avr	53,12	15,5	5,55	1,1	52,7	52,7	100	0	0,42
Mai	37,87	18,5	7,24	1,21	80,68	80,68	57,19	0	0
Jui	12,03	22,3	9,64	1,22	116,06	69,22	0	46,84	0
Juil	3,53	25,2	11,55	1,24	147,71	3,53	0	144,18	0
Aou	8,46	26,0	12,1	1,16	146,38	8,46	0	137,92	0
Tot	654,03	18,1	86,51		884,74	465,96		418,78	188,07

Afin de bien comprendre les résultats obtenus, une représentation graphique des données a été tracée en (Fig.15) ; on remarque que la réserve en eau facilement utilisable (RFU), commence à se reconstituer à partir du mois de novembre, pour atteindre son maximum 100 mm à partir de décembre jusqu'à Avril pour la station des salines, période pendant laquelle apparaît un excédent qui va se traduire en écoulement ou une infiltration qui alimente les nappes. À partir du mois de mai la réserve commence à s'épuiser jusqu'au mois de juin où elle devient nulle, période qui traduit un déficit agricole, et l'irrigation est indispensable.

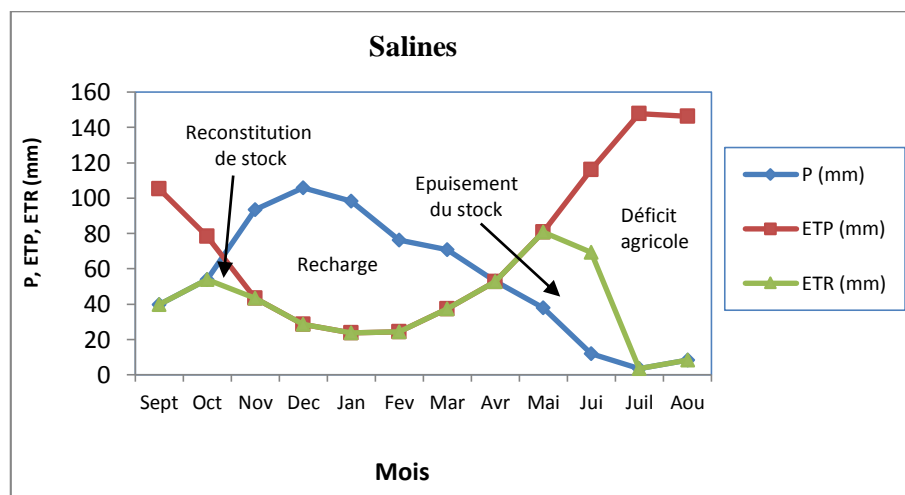


Fig. 15: Représentation graphique du bilan hydrique de Thornthwaite de la station des Salines (1985/2017

).

Ce graphe (Fig.15), montrent que l'évapotranspiration maximale a été observée pendant les mois de juillet et d'août pour des valeurs de 147.7 et 146.3 mm, ce qui produit un déficit agricole et la nécessité d'une irrigation pour les zones agricoles. Par contre, pendant les mois de décembre, janvier et février, on observe une alimentation de la nappe avec une valeur de 76.37 à 105.9 mm/mois. Lorsque la recharge dépasse la RFU, le surplus d'eau va soit s'infiltrer vers la nappe, soit partir sous forme du ruissellement.

2.7.2 Le ruissellement

Le ruissellement de surface est la quantité d'eau au cours d'une précipitation, échappée à l'infiltration et à l'évaporation. Le coefficient de ruissellement R a été estimé (Tab.13) avec la formule de Tixeront-Berkaloff (Atoui 2014).

$$R = \frac{P^3}{3 ETP^2} \quad \text{Si } P < 600$$

$$R = \frac{P^3}{3} \quad \text{Si } P > 600$$

R : ruissellement (mm).

P : précipitation moyenne mensuelle (mm).

ETP : évapotranspiration potentielle (mm).

Tab. 13: Détermination du ruissellement dans les stations étudiées.

	Salines 85-2017	Pont Bouchet 80-2017
P (mm)	654,03	606,7
R (mm)	93,25	74,44

Ce tableau montre les résultats de la formule d'où la valeur de 93.25 mm/an pour la station des salines et 74.44 mm/an pour celle de Pont Bouchet ce qui représente 14% et 12% respectivement de la précipitation. Par contre, le reste de la hauteur des pluies, va partir sous forme d'infiltration.

2.7.3 L'infiltration

L'infiltration est un paramètre très important dans le bilan hydrique, est définie comme étant le mouvement de l'eau dans un sol en passant par la surface, elle dépend de plusieurs facteurs, les plus importants sont :

- ✓ La nature du sol.
- ✓ La perméabilité et la porosité du terrain

- ✓ La couverture végétale.
- ✓ L'intensité de la pluie
- ✓ Topographie du terrain

Elle peut être calculée par la formule du bilan globale :

$$P = R + I + ETR \quad \text{Donc : } I = P - R - ETR.$$

Avec :

R : ruissellement (mm).

P : précipitations (mm).

I : infiltration (mm).

ETR : évapotranspiration réelle (mm).

Si $I > 0$: Les entrées sont supérieures aux sorties.

Si $I < 0$: Les entrées sont inférieures aux sorties.

Les résultats de l'infiltration sont notés dans le tableau suivant :

Tab. 14: Estimation de l'infiltration par ETR de la méthode de Thornthwaite.

	Salines 1985-2017	Pont Bouchet 1980-2017
P (mm)	654,03	606,7
R (mm)	93,25	74,44
ETR (mm)	465,96	436,95
I (mm)	94,82	95,31

Le (Tab.14) nous montre que les valeurs de l'infiltration oscillent entre 94.82 et 95.31 mm avec un pourcentage de 14.49% et 15.7% des précipitations moyennes mensuelles enregistrées dans les stations des Salines et pont Bouchet respectivement.

3 Hydrologie de la zone d'étude

Les caractéristiques géographiques, orographiques, hydrographiques, climatiques et géologiques, ainsi montrées sur la (Fig.16), font ressortir que les plaines de la région d'Annaba, constituées par des sols lourds et compacts, souffrent au cours de la saison pluvieuse d'un excès d'eau résultante:

- d'une part, de la pluviométrie abondante reçue sur leur impluvium.
- d'autre part, des débordements et divagations des oueds dont les débits importants sont la conséquence de l'imperméabilité de leurs bassins versants montagneux;
- enfin, de la stagnation prolongée des eaux d'inondation dans toutes leurs dépressions.

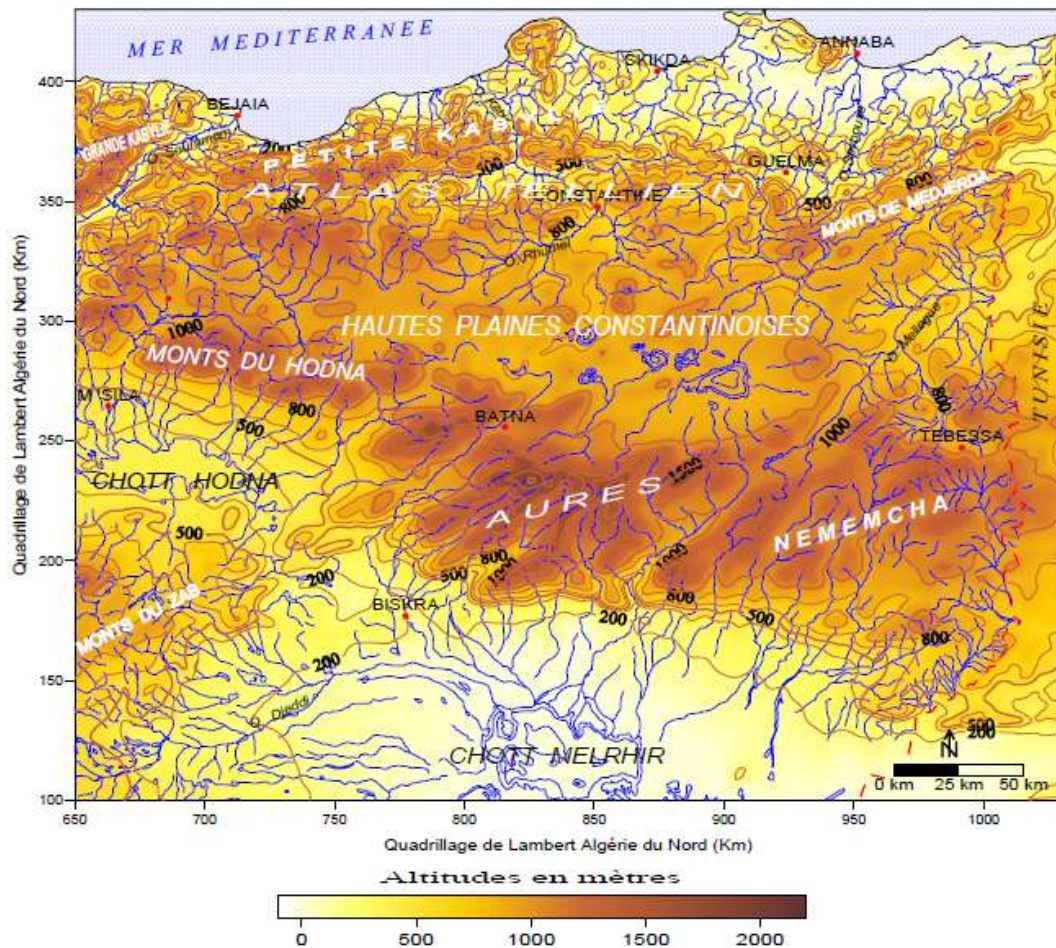


Fig. 16: Oro-hydrographie de l'Algérie du Nord (Mebarki, 2005) (in Boughrira, 2015).

La région d'Annaba est traversée essentiellement par les oueds Kébir, Bounamoussa, Seybouse et son affluent à l'Ouest le Ressoul. Ces oueds contribuent pour une grande part à l'alimentation des nappes (Hani, 2003).

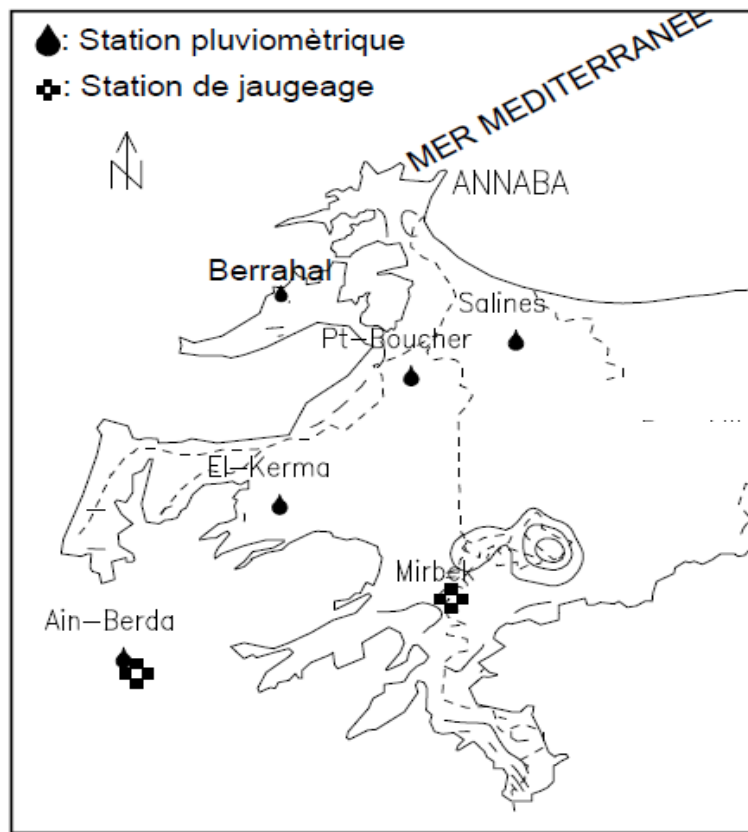


Fig. 17: Localisation des stations pluviométriques de sous-bassin de la Seybouse (in Boughrira, 2015).

3.1 Les ressources en eau superficielle

Les deux grands bassins versants de la région sont drainés par les deux principaux cours d'eau, la Seybouse et la Mafragh qui sont alimentés par un grand nombre d'affluents (Derradji, 2004).

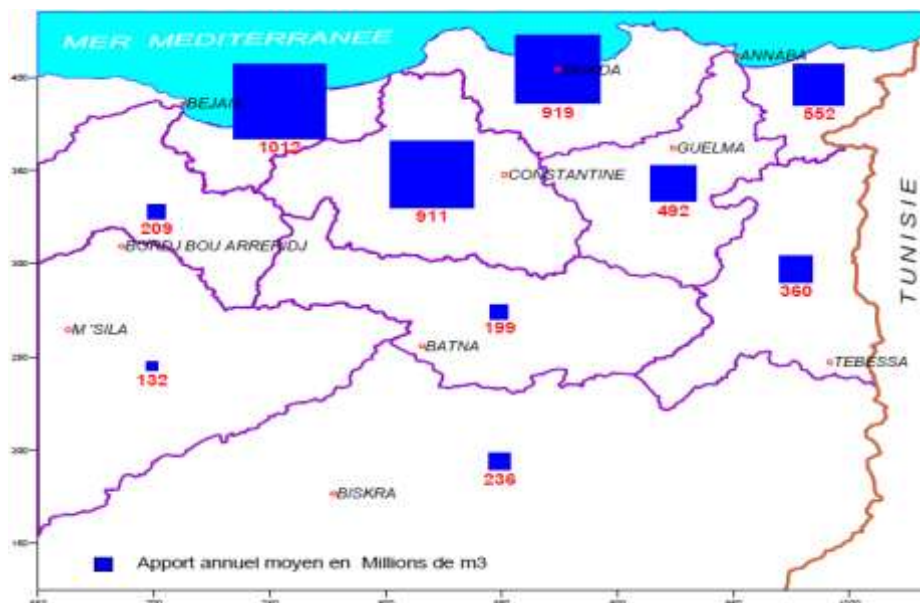


Fig. 18: Ressources en eau des bassins versant de L'est d'Algérie (Mebarki, 2009) (in Boughrira, 2015).

On a ainsi le découpage des sous-bassins de l'Algérie du Nord (Fig.19), et la plaine ; en cinq zones distinctes, desservies chacune, par un réseau particulier, constitué par un ensemble de canaux de drainage et de colature correspondant à l'assainissement de leur impluvium propre.

On distingue donc :

- le réseau de l'oued Meboudja supérieur,
- celui de l'oued Ressoul ;
- celui de l'oued Mellah ;
- celui de l'oued al Hout ;
- celui de l'oued Monaim.

Le périmètre était arrosé, ou plutôt inondé, par de nombreux oueds dont les cours sont sensiblement parallèles et orientés SW-NE. Ce sont :

- **L'Oued Méboudja supérieur**, en bordure du bourrelet oriental du Lac Fetzara et dont le bassin versant est de l'ordre de 3.400 ha ;
- **L'Oued Ressoul**, le plus important de tous dont la partie avale longe le versant W du Koudiat el Ladet ; il a son origine dans la région de Guelaat Bou-Sbaa, se développe sur 37 km et collecte les eaux d'un bassin versant de 13.150 ha environ ;
- **L'Oued Mellah**, qui longe le versant E du Koudiat el Ladet, à 9 km environ et a un bassin versant de 2.250 ha ;
- **L'Oued bou Athout**, qui draine la face N des coteaux compris entre Dréan et Aîn berda et dont le bassin versant est de l'ordre de 5.100 hectares.

La Seybouse est la plus importante de la région. Longue de 239 km, elle draine un bassin versant de plus de 6000 km².

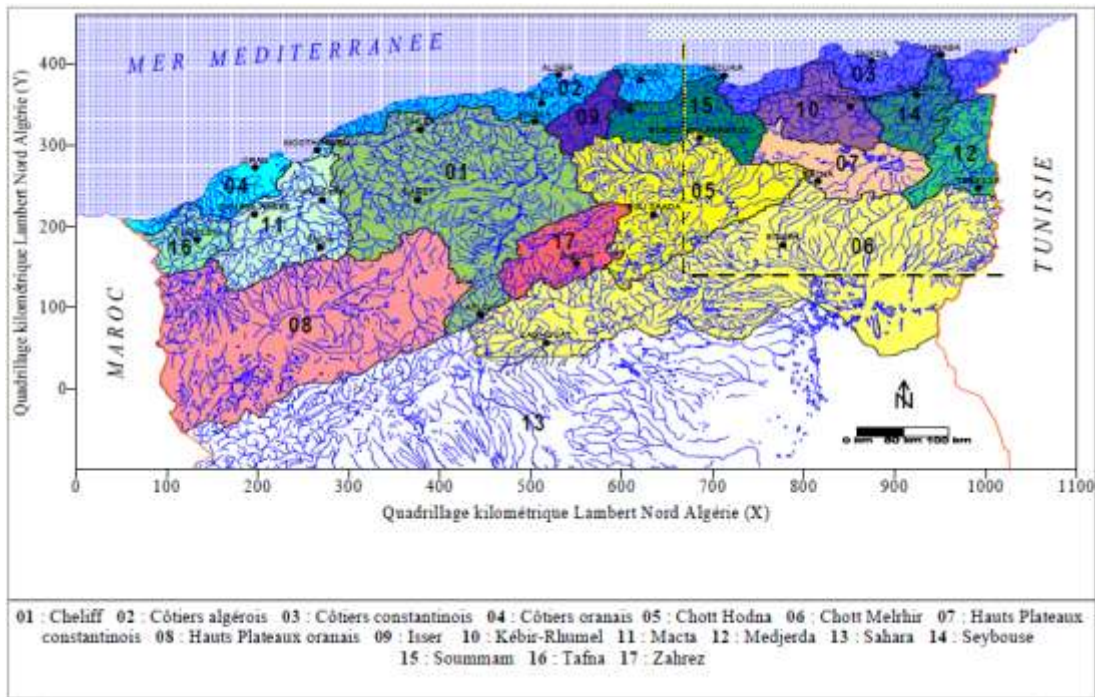


Fig. 19: Carte des sous bassins Hydrographiques du Nord Est de l'Algérie (Mebarki, 2005) (in Boughrira, 2015).

La (Fig.20) suivante révèle que les plus grandes fréquences correspondent aux débits compris entre 25 et 30 $m^3 \cdot s^{-1}$ à Mirbek, pendant les années où la plus grande quantité d'eau précipitée (1972-1973/ 1984-1985/86 87). Les plus faibles fréquences correspondent, par contre, aux débits compris entre 0 et 5 $m^3 \cdot s^{-1}$.

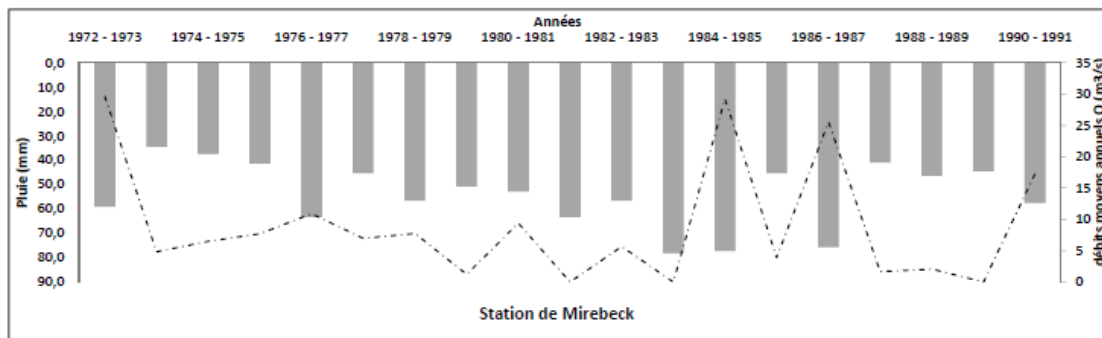


Fig. 20: Variations des débits au niveau de la station de Mirebeck 1972 – 73 à 1990 - 91 (sources A.N.R.H) (in Boughrira, 2015).

3.2 Les ressources en eau souterraines

La région de Annaba recèle quant à elle plus de $60 \cdot 10^6 m^3$ et qui est composé des alluvions récentes et actuelles, terrasses, gneiss altérés, cordon dunaire, nappe des graviers et cipolins (Derradji F, 2004).

Tab. 15: Tableau récapitulatif des aquifères existants et leurs réserves renouvelables dans l'extrême Nord-Est algérien (Derradji, 2004)

ZONES	Les systèmes aquifères	Superficie (Km ²)	H _{moy} (m)	S ou m _e	Réserves renouvelables (10 ⁶ m ³)
Annaba	Alluvions récentes et actuelles	320	1.0	0.13	40
	Les terrasses	Faible potentialité hydrique			
	Gneiss altérés	67	1.2	0.02	1.5
	Cordon dunaires	10	3	0.1	3
	Les graviers	300	20	0.002	13
	Les cipolins	80	5	0.005	2
Total Annaba	SYSTEME ANNABA LA MAFRAGH				60
T. Zones	ANNABA + EL-TAREF				135

H_{moy} : hauteur moyenne ; **S** : coefficient d'emmagasinement ; **m_e** : porosité efficace.

3.3 Besoins en eau

3.3.1 Besoins en eau potable de la zone d'Annaba – El Hadjar

Cette zone regroupe la ville d'Annaba considérée comme le centre le plus important de l'extrême Nord-Est algérien, et l'une des plus grandes zones industrielles de la région grosse consommatrice d'eau.

3.3.2 Besoins en eau industrielle

La région de l'extrême Nord-Est algérien dispose de plusieurs unités industrielles grosses consommatrices d'eau ainsi que de quelques unités relevant de la petite et moyenne industrie. Après enquête auprès des services de l'hydraulique (D.H.W. DE Annaba et El Tarf), les besoins en eau exprimés par ces unités industrielles s'élèvent à 52070 m³/j soit 19 Hm³/an répartis comme suit (Tab.16) :

Tab. 16: Besoins en eau industrielle (Derradji, 2004) (in Boughrira, 2015).

Unités industrielles	Besoins en eau	
	m ³ /j	Hm ³ /an
Sider	38880	14
Asmidal	8640	03
Orlait	3154	1,15
Aéroport	200	0,073
Tomate (Ben M'hidi)	548	0,2
Tomate (Bouteldja)	548	0,2
Eban(el Tarf)	100	0,04
Total	52070	18,66

3.3.3 Besoins en eau agricole de la région d'Annaba

En se basant sur le (Tab.17), on constate que la demande la plus élevée est représentée par le périmètre d'El Hadjar (plus de 5 millions de m³/ an).

Tab. 17: Besoins en eau agricole de la région d'Annaba (in Boughrira, 2015).

Périmètre	Superficie (Ha)	Volume alloué (Hm ³ /an)	m ³ /an
Annaba	82,5	0,30	3000000
El Hadjar	1424	5,12	5120000

4 Conclusion

La région d'étude compte parmi les régions les plus arrosées de l'Algérie. Elle est caractérisée par un climat méditerranéen, doux et humide en hiver et chaud et sec en été. Les précipitations moyennes annuelles varient entre 634.82mm et 652.87mm sous une température moyenne annuelle de l'ordre de 18°C. La reconstitution de la réserve en eau RFU, commence à partir du mois de novembre, pour atteindre son maximum de 100 mm durant les mois entre décembre et avril, période pendant laquelle apparaît un excédent de l'ordre de 188,07 mm, 169,75 mm respectivement pour les stations des Salines et Pont Bouchet. À partir du mois de mai, la RFU commence à s'épuiser jusqu'à fin du mois de juin où elle devient nulle, période qui traduit un déficit agricole atteignant 447,51mm selon la station de Pont Bouchet. Les valeurs de ruissellement et celle de l'infiltration déduites à partir de l'équation du bilan hydrique de Thornthwaite donnent respectivement 93,25 mm et 94,82mm pour la station des Salines, et 74,44 mm et 95,31mm pour la station de Pont Bouchet. Cette étude nous montre que les pluies, n'assurent pas le stockage permanent de l'eau dans la réserve d'eau facilement utilisable (RFU), ce qui produit un besoin des sols agricoles à l'irrigation surtout pendant la période d'été, par les eaux des oueds, de la nappe ou par les eaux du barrage. Les eaux d'origine extérieure à la nappe, vont produire une recharge supplémentaire de la nappe et une modification de la composition chimique des eaux.

La région des plaines d'Annaba est traversée essentiellement par les oueds Kébir, Bounamoussa, Seybouse et son affluent à l'Ouest le Ressoul contribuant pour une grande partie à l'alimentation des nappes souterraines. Les deux grands bassins versants de la région sont drainés par les deux principaux cours d'eau, la Seybouse et la Mafragh qui sont alimentés par un grand nombre d'affluents.

Le périmètre était arrosé, ou plutôt inondé, par de nombreux oueds qui ce sont : Oued Méboudja supérieur, avec un bassin versant de l'ordre de 3.400 ha ; Oued Ressoul, le plus important, collecte les eaux d'un bassin versant de 13.150 ha environ ; Oued Mellah, qu'a un bassin versant de 2.250 ha et Oued bou Athout, dont le bassin versant est de l'ordre de 5.100 hectares. La Seybouse est la plus importante de la région. Longue de 239 km, elle draine un bassin versant de plus de 6000 km².

La nappe côtière d'Annaba recèle quant à elle plus de 60.10^6 m^3 et qui est composée des alluvions récentes et actuelles, terrasses, gneiss altérés, cordon dunaire, nappe des graviers et cipolins. Cette zone est considérée comme le centre le plus important de l'extrême Nord-Est algérien, et l'une des plus grandes zones industrielles et agricoles de la région grosse consommatrice d'eau.

Chapitre III : HYDROGÉOLOGIE

Pour mieux comprendre, décrire et expliquer le comportement d'une nappe et son interaction avec son environnement, on doit nécessairement bien connaître les caractéristiques hydrogéologiques et hydrodynamiques de cette nappe. Les caractéristiques ainsi déterminées, nous permettront à mener à bien tout projet de recherche qu'elle soit appliquée ou fondamentale.

La plaine d'Annaba, a fait l'objet de plusieurs études hydrogéologiques dont la plus ancienne fut réalisée par Gaud. B en 1974 et la dernière fut l'œuvre de Mme Aichouri. I en 2018. D'autres travaux ont été réalisés entre ces deux périodes, c'est le cas de Djabri. L en 1996 ; Debieche. T.H en 2002 ; Hani. A en 2003 ; Khadri. S en 2008 ; Aoun Sebaiti. B en 2010. Cette partie sera consacrée à la description des aquifères recensés au niveau de la plaine et la mise en évidence des liens hydraulique existant entre les différentes nappes.

1 Introduction

La région d'étude caractérisée par la présence d'activités agricole et industrielle intense, de ce fait ses ressources souterraines et superficielles sont très sollicitées et souvent ne suffisent pas aux besoins affichés par l'agriculture et l'industrie. Ce qui explique que cette wilaya est en grande partie alimentée à partir de la wilaya d'El Tarf. En effet, dans cette wilaya sont implantés les barrages et les forages dont une grande partie alimente les secteurs de l'agriculture et l'industrie. Les eaux destinées à l'AEP, proviennent également de la wilaya d'El Tarf. Nous donnons ci-après un aperçu sur les aquifères recensés au niveau de la zone d'étude.

2 Les aquifères identifiés au niveau de la zone d'étude (Fig.5 page 17)

✓ **La nappe superficielle d'Annaba (NSA) :** Cette nappe est contenue dans des formations sablo-argileuses incluant des lentilles de sables ; des argiles grises compactes en constituent le substratum. Ces lentilles sont plus fréquentes à proximité de l'Oued Seybouse et à la périphérie des affleurements des grès numidiens. La nappe est libre, sauf en quelques points où elle est captive sous des niveaux d'argiles. L'épaisseur de la nappe libre peut atteindre 18m. Cette nappe est captée par des forages (dans sa partie profonde) et par des puits (dans sa partie libre). Ces ouvrages sont en continuelle exploitation.

✓ **La nappe des graviers :** Elle couvre l'ensemble de la zone d'étude. Elle est captive dans sa partie nord vers les Salines et elle devient libre dans sa partie sud vers Dréan. Elle présente de bonnes qualités hydrauliques.

✓ **La nappe des alluvions de la haute terrasse :** Elle s'étend le long des massifs numidiens à l'Ouest et au Sud de la plaine d'Annaba. Ces alluvions graveleuses et caillouteuses à matrice argileuse ont des possibilités aquifères très limitées.

✓ **La nappe des cipolins :** Elle se situe dans les massifs de bordure de Belilieta et de Boukhadra (proche du massif de l'Edough). Elle est contenue dans des lentilles de cipolins, fissurés, existant au sein des gneiss et micaschistes du monoclinale métamorphique du Boukhadra. Ces calcaires sont en contact avec les alluvions de la plaine. Leur superficie est inférieure à 100ha. Les débits extraits sont très insignifiants de ce fait souvent les ouvrages réalisés sont abandonnés.

✓ **La nappe des travertins :** Elle est mal délimitée. Elle a été localisée dans le secteur compris entre Fardaous, la butte de Daroussa, Chbaïta et la ferme Hallala Aissa.

✓ **La nappe d'accompagnement du Lac Fetzara (NAL):** Elle s'étend le long des massifs numidiens à l'Ouest et au Sud de Annaba. Ces alluvions graveleuses et caillouteuses à matrice argileuse recèlent des possibilités aquifères assez importantes dans la partie Ouest, avec la zone du lac Fetzara. Plus de 200 puits sont implantés dans cette partie. Cette nappe est captée par des puits servants à l'irrigation ou à l'alimentation en eau potable. Ce qui se traduit par des pompages importants.

✓

Quelques indications sur les caractéristiques hydrogéologiques des aquifères

Le Lac Fatzara, situé à l'Ouest de la plaine, constitue un récepteur des eaux issues des apports d'eau se faisant à partir des zones limitrophes tel que les monts de l'Edough, la région d'Azzaba. La figure suivante (Fig. 22) donne un aperçu sur les aquifères en relation avec le lac Fetzara, ainsi, nous constatons un apport d'eau au lac par les nappes de la région de Berrahal. L'apport par ces nappes reste très faible. Les eaux des nappes auront un impact très limité sur la qualité des eaux du lac.

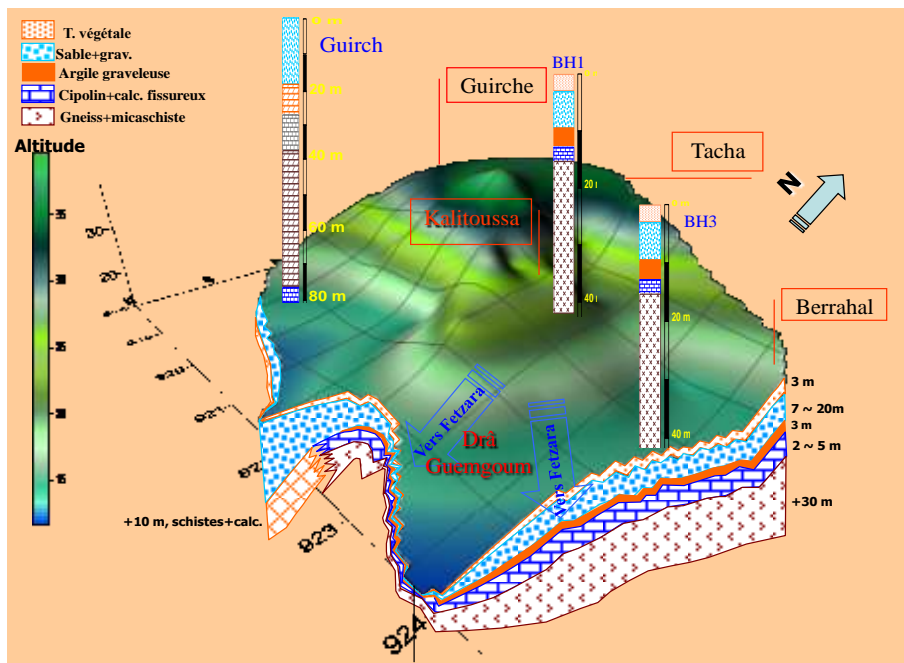


Fig. 21: Les aquifères situés à l'Ouest du lac Fetzara (in Khelfaoui, 2014).

La partie Sud de la zone d'étude (Fig.23), plus connue comme étant la basse plaine de la Seybouse, renferme trois nappes souterraines avec des potentialités hydrauliques différentes ainsi on dénombre:

- Deux nappes sont dites superficielles, c'est le cas de la nappe du cordon dunaire et la nappe sablo-argileuse,
- La seconde peu profonde, occupant la partie Sud,
- Enfin la nappe profonde donc captive, présente dans la zone extrême Nord, cette même nappe devient libre au sud d'Annaba et est connue sous l'appellation de nappe des graviers dans la région de Dreaan (In Debièche, 2002).

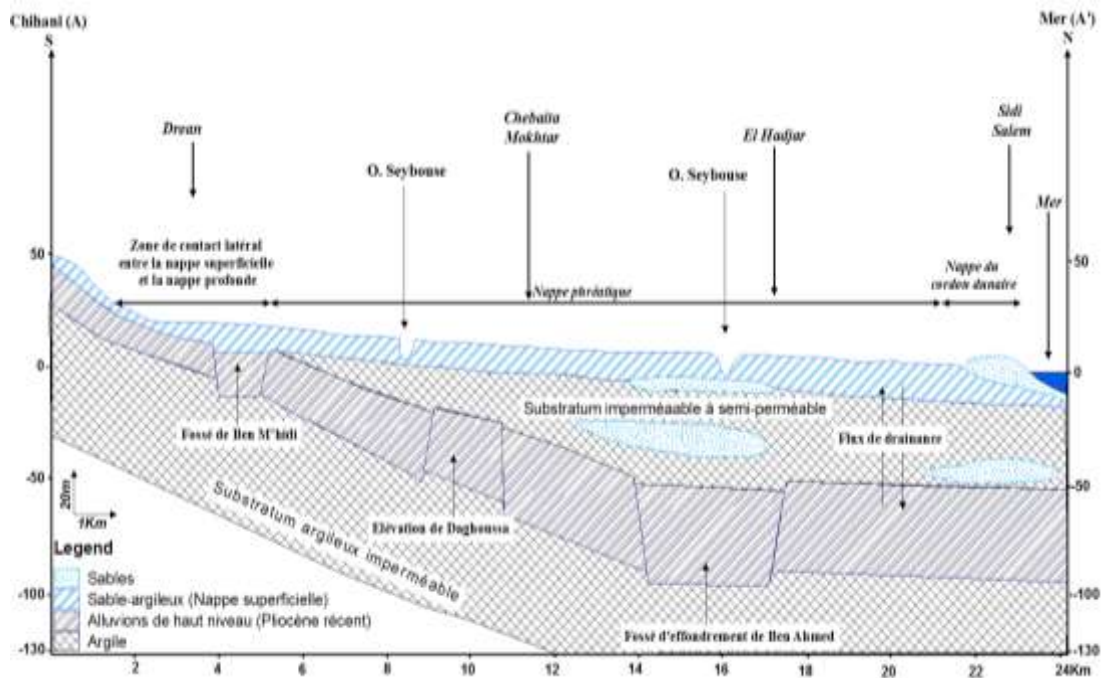


Fig. 22: Coupe schématique montre la superposition des nappes souterraines dans la basse plaine de la seybouse (Debièche, 2002 ; Modifiée).

- Nappes superficielles :

L'observation de la carte (Fig.21), montre l'emplacement des nappes superficielles présentes dans la région. Nous remarquons qu'elle est limitée au nord par la mer Méditerranée, ce qui expose ses eaux au risque d'intrusion marine.

- Nappe profonde des graviers

C'est la nappe la plus intéressante, elle est située en dessous de l'aquifère superficiel. La nappe des graviers est limitée :

- Au Nord : une limite à potentiel imposé par la mer.
- Au Sud : une limite d'alimentation par la nappe des terrasses et les grès numidiens.
- A l'Ouest : une limite d'alimentation par les nappes secondaires des cipolins fissurés et des gneiss altérés des massifs de Bouhamra et de Belieleta.
- A l'Est : le manque de sondage au niveau des marécages de Mekrada, laisse des incertitudes sur la nature de la limite Est, mais elle reste toujours supposée étanche.




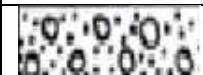

Le réservoir de la nappe est constitué par des graviers, sables et galets plio-quaternaires et encaissé dans un bassin d'effondrement. Le toit de la nappe est semi-perméable à imperméable, formé d'argiles sableuses ou d'argiles. A travers ce toit intervient le phénomène de drainance dans la zone centrale. Ce toit disparaît complètement et laisse place à une nappe libre au Sud de Dreaan et El Asfour et au pourtour de la butte de Daroussa.

La perméabilité de cette nappe varie de 10^{-4} m/s à 10^{-5} m/s. La transmissivité de l'aquifère oscille entre 3.10^{-2} et $3,5.10^{-3}$ m²/s dans la région de Dreaan, entre 4.10^{-2} et 5.10^{-3} m²/s, au Nord de Ben M'Hidi et dans la région de la Mafragh et entre 10^{-3} et 2.10^{-3} m²/s dans la région

de Bouteldja. Les coefficients d'emmagasinement sont parfois très faibles, de l'ordre de 10^{-4} dans les zones où la nappe est captive et atteignent 10^{-2} dans les zones où elle est libre.

Le (Tab.18) suivant tiré de la thèse de T.H Debieche (2002), récapitule la nature des formations géologiques contenant ou formant les aquifères de la plaine d'Annaba.

Tab. 18: Description géologique et hydrogéologique du site (Debieche, 2002).

Ere	Système	Lithologie	Epaisseur (m)	Log Stratigraphique	Hydrogéologie	
					Perméabilité	Type de nappe
Quaternaire	Récent	Sable	5-15		Perméable	Nappe du cordon dunaire
	Moyen	Sablo-argileuse	0-20		Semi-perméable	Nappe phréatique
	Ancien	Argile avec des lentilles sableuses	250		Imperméable	Substratum
Tertiaire	Pliocène		10-250		Perméable	Nappe des graviers
	Miocène		250		imperméable	Substratum

3 Apports de la géophysique dans la connaissance des nappes étudiées

Les résultats issus des études géophysiques réalisées au niveau de la zone d'étude par différentes compagnies (Sonatrach en 1966) et Strojexport en 1975), nous permettent de déterminer la nature et l'extension verticale des formations traversées par les sondages mécaniques. La comparaison des données de forages et les valeurs de résistivités nous permettent de cerner l'extension des aquifères. Dans cet objectif, nous avons pris en considération onze forages implantés au niveau de la zone d'étude (fig.24). Il s'agit des forages (FA1, F23, F129, (F104, F144 PR-C), (F144, F145 PR-4), F146, F159, F173 et F212) (fig. 25).

Pour confirmée la composition lithologique des aquifères, nous avons comparé les données de sondages mécaniques et les données géophysiques. Les graphes réalisés montrent une bonne correspondance entre les données, cependant quelques décalages sont observés, ils seraient liés au mode de lecture ou à l'imperfection des forages réalisés.

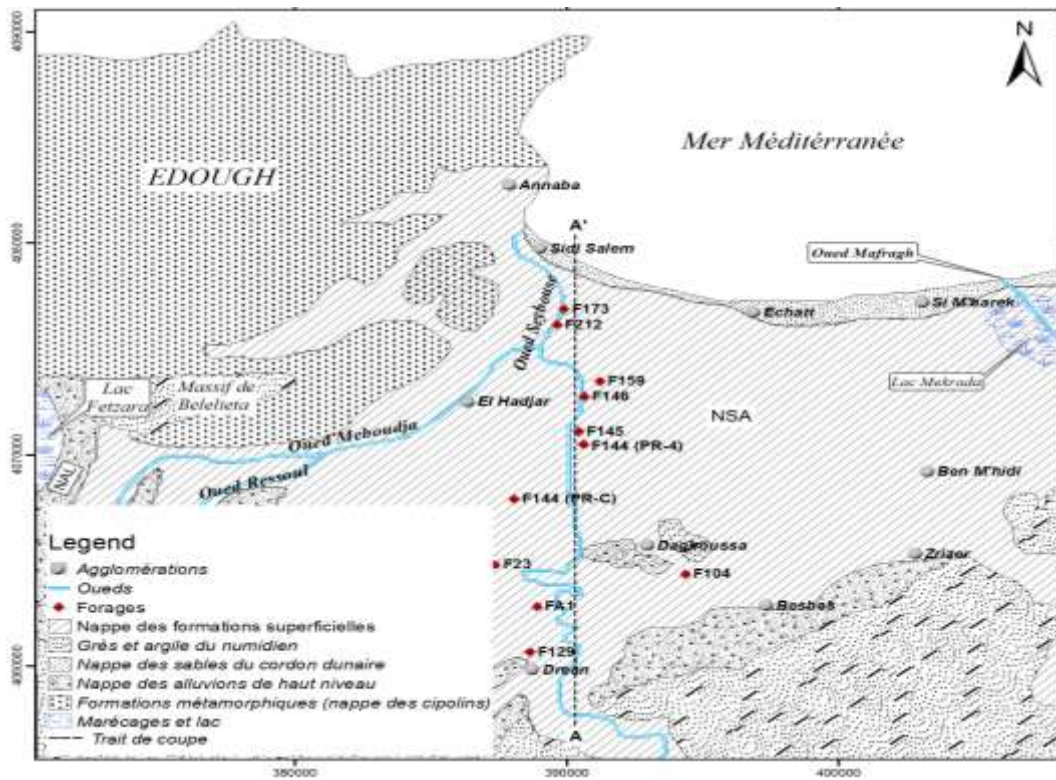
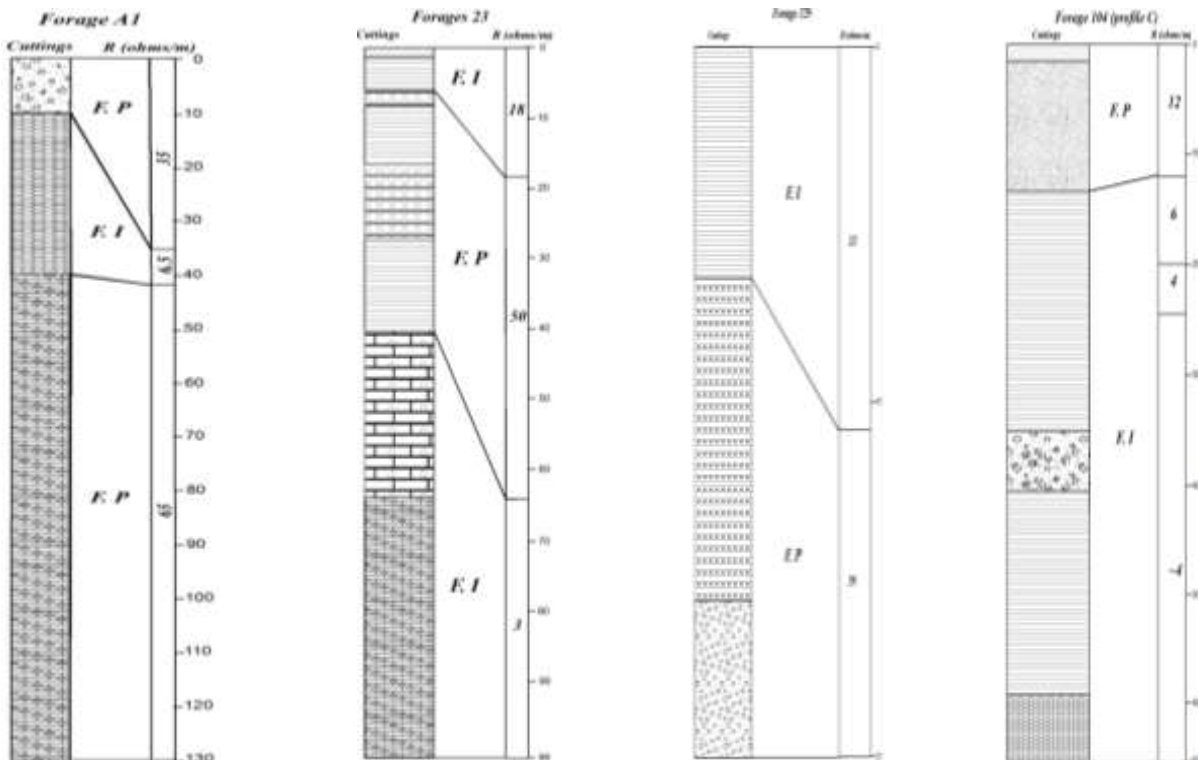


Fig. 23: Carte d'extension des différents aquifères dans la plaine présentant la distribution des forages.



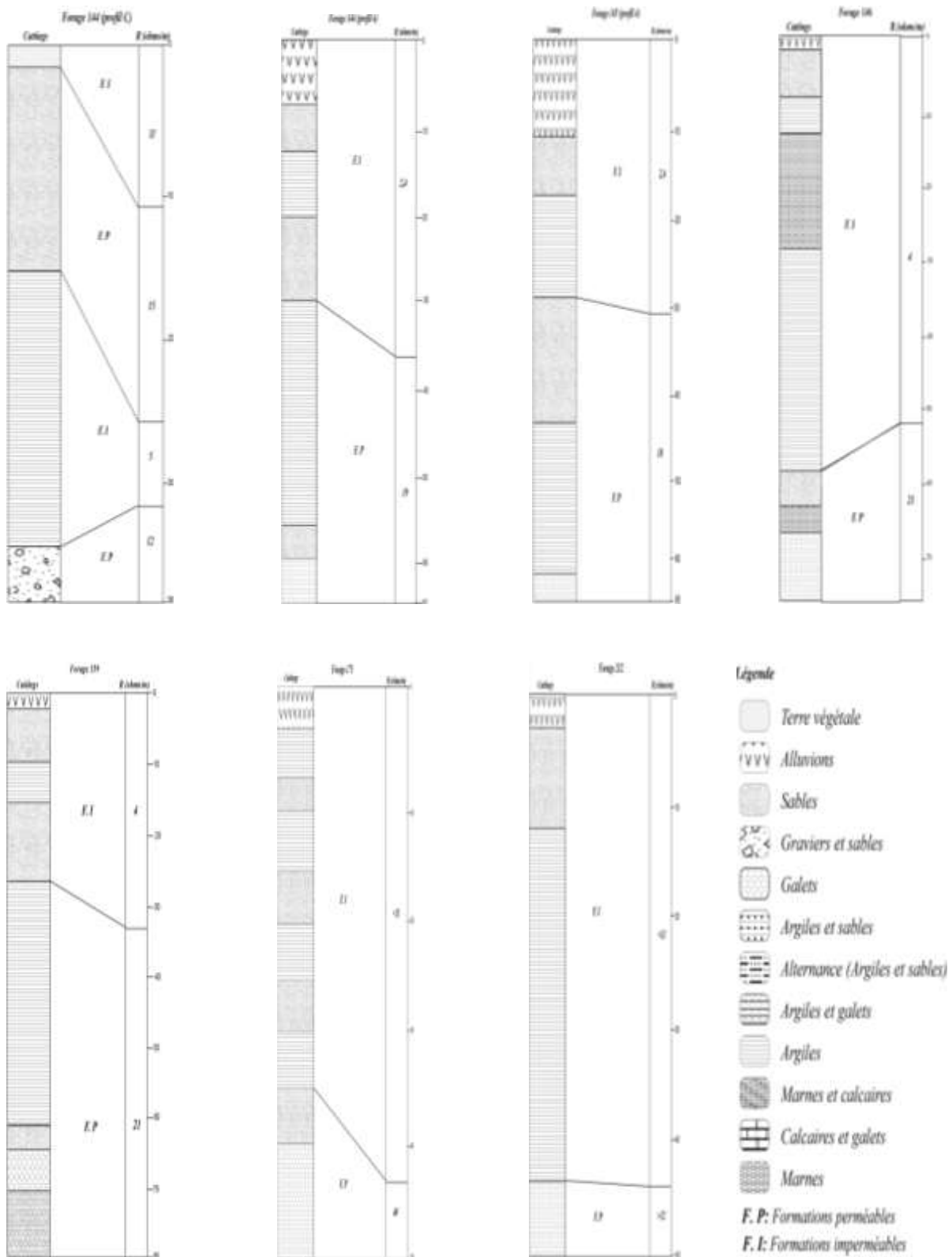


Fig. 24: Logs stratigraphiques et valeurs de résistivité des forages implantés dans la zone d'étude (Djabri 1996, Modifiés).

A l'issue de la comparaison réalisée, nous remarquons une bonne corrélation entre les résultats obtenus par la géophysique (résistivité) et la colonne lithologique des forages. Les quelques décalages observés n'altèrent en rien les bonnes correspondances et sont probablement liés à l'erreur humaine lors de la récupération des cuttings.

Pour confirmer un peu plus les résultats issus de la comparaison entre la résistivité et la colonne lithologique, à partir des valeurs de la résistivité, nous avons définie les formations selon leur perméabilité, ce qui revient à la mise en évidence de formations perméables ou imperméables. Ceci à été Comparé aux valeurs de résistivités. La figure 26, dans sa globalité montre une bonne alternance entre les deux types de formations. Elle montre également une bonne correspondance entre la colonne lithologique et la résistivité.

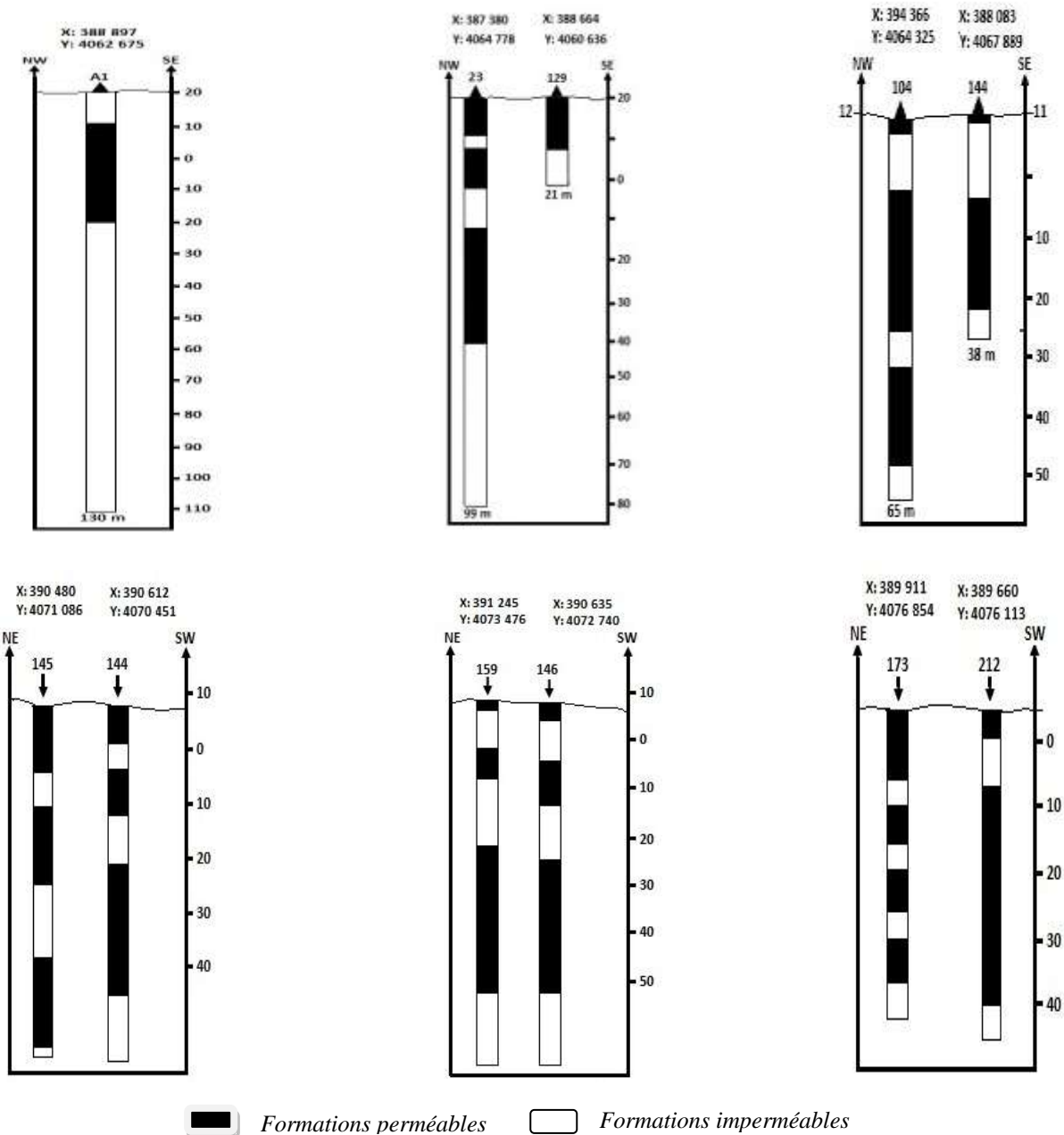


Fig. 25: Schémas représentant les niveaux perméables et imperméables révélés de sondages mécaniques (Djabri 1996, Modifiés).

Conclusion sur les résultats obtenus

Les résultats issus des comparaisons réalisées, confirment la superposition de deux nappes.

-La première superficielle captée par les puits domestiques (agriculteurs) et la seconde

profonde captée par les forages. La première nappe peut être considérée comme discontinue dans l'espace, elle apparaît dans différentes zones et prend différentes appellations.

- La nappe profonde présente la particularité d'être captive au niveau de la zone Nord et devient libre vers le Sud au niveau de Drean, à ce stade elle est confondue avec la première. Ce milieu aquifère se caractérise par une hétérogénéité des dépôts, constitué par les sables du cordon dunaire au niveau de la bordure Nord, par contre le reste de la zone est constitué par les formations alluvionnaires ou par les formations métamorphiques. L'analyse des coupes lithologiques de forage a permis d'identifier la structure profonde des principaux aquifères (latéralement et verticalement). Les (Fig.23 et 27), illustrent la nature de ces horizons aquifères d'Ouest en l'Est.

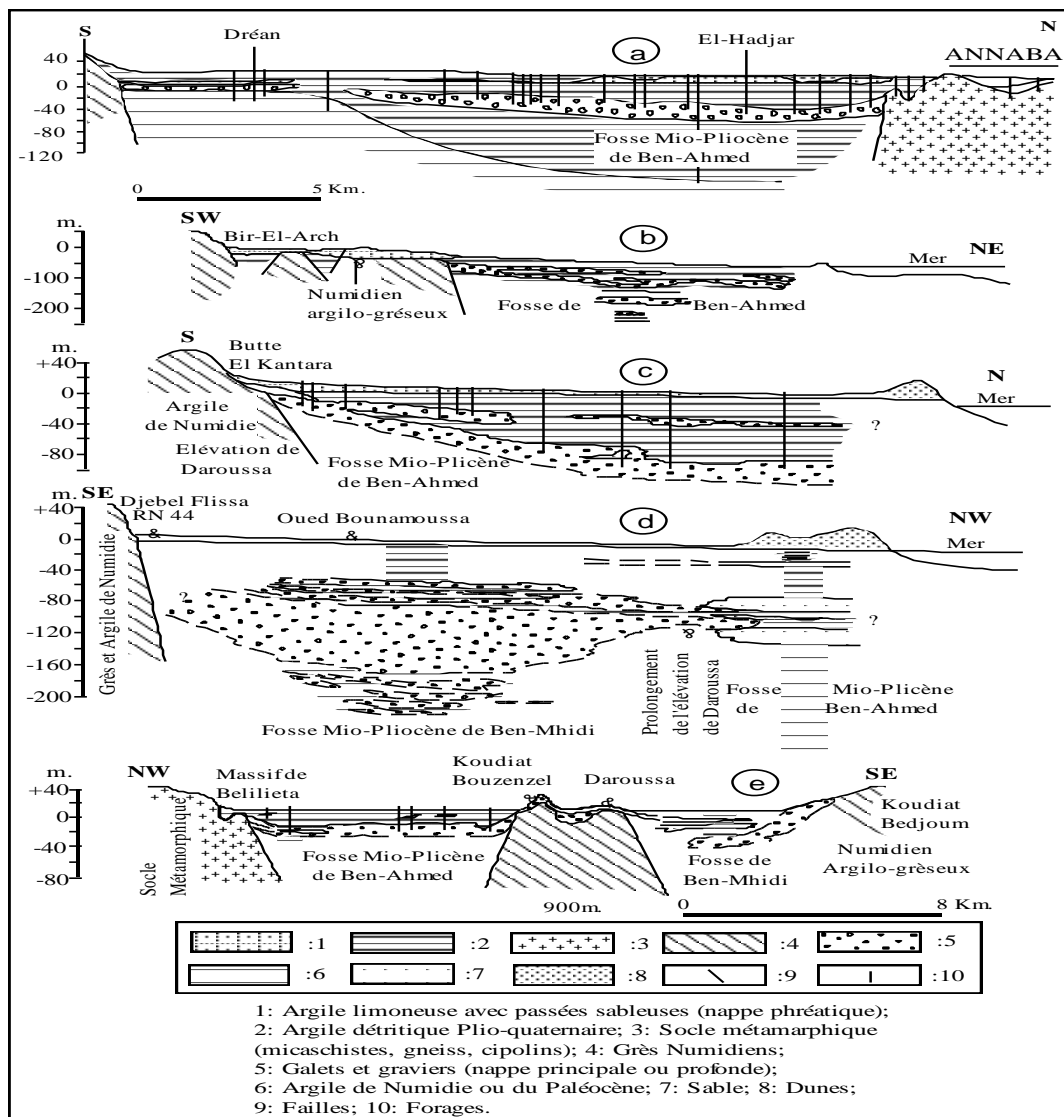


Fig. 26: Coupes illustrant la lithologie des aquifères de la zone Est (in Hani 2003).

L'observation de la précédente (Fig.27), indique une extension limitée des nappes. À ce titre nous déduisons :

- Coupe (a) : dans sa partie nord, on dénombre deux nappes superposées, la première

étant libre et dans sa partie supérieure et captive en profondeur. Cette nappe est marquée par son contact avec la mer d'où le risque d'intrusion marine vers la nappe. La partie sud contient la nappe des graviers libre et présentant de bonnes caractéristiques hydrodynamiques.

- Coupe (b) : au nord on retrouve deux nappes superposées par contre au sud le Numidien (argilo-gréseux), joue le rôle de limite étanche et interrompe l'extension des nappes.
- Coupe (c) : au nord, on retrouve les deux nappes superposées vers le sud la nappe est limitée par la butte d'El Kantara, générée par le jeu de failles. Ceci limite l'extension de la nappe.
- Coupe (d) : cette coupe révèle la disparition de la nappe superficielle, la nappe profonde est limitée par les accidents tectoniques.
- Coupe (e) : les nappes sont fragmentées et compartimentées par les différentes élévations liées aux accidents tectoniques.

D'une manière générale au niveau de la région d'Annaba, les nappes sont bien distinguées, cependant de part et d'autre la tectonique semble avoir influencée l'emplacement des nappes.

4 Descriptions des nappes de la zone d'étude

La nappe étudiée

Notre travail portera sur la nappe superficielle. Cette nappe se trouve confondue avec la nappe des graviers (profond) dans la zone de Dréan, la (Fig.28) montre une coupe schématique Sud-Nord, selon le trait de coupe (A-A') tracé dans la carte de (Fig.24), présentant la superposition des nappes souterraines dans la basse plaine de la Seybouse .

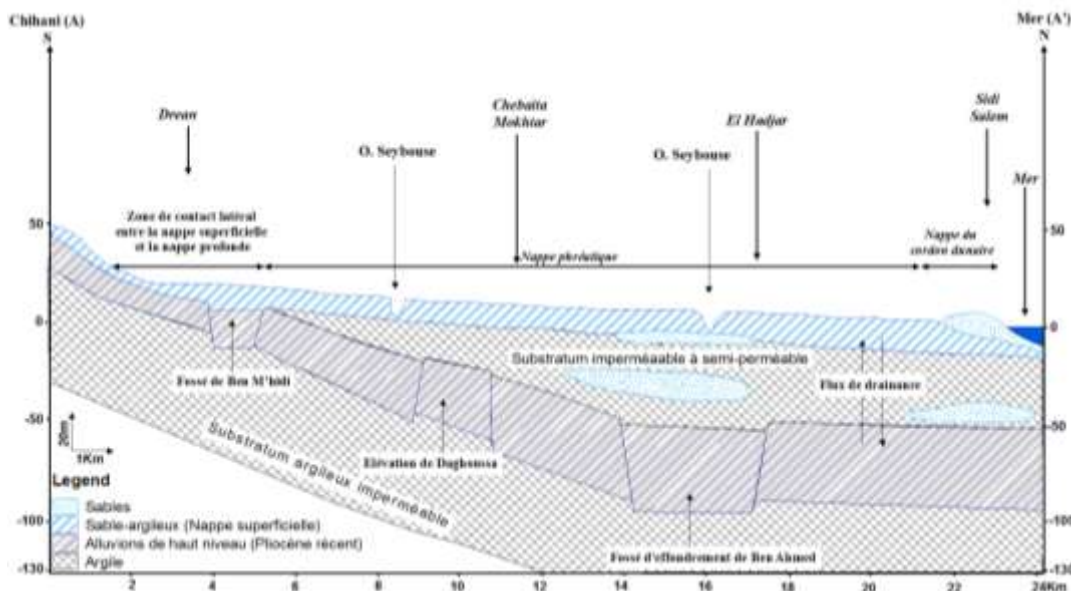


Fig. 27: La superposition des nappes souterraines dans la basse plaine de la Seybouse (in Debieche 2002, modifiée).

5 Aperçu sur la situation piézométrique

Le phénomène régissant l'intrusion marine dans les aquifères côtiers est due à l'importance du processus d'alimentation et d'exploitation dans ces aquifères, c'est à dire à l'hydrodynamique de la nappe. De ce fait il devient indispensable de connaître la charge d'eau dans la nappe et ses fluctuations, les directions d'écoulement, les zones d'alimentation et/ou des dépressions ainsi que les différentes communications existantes entre les nappes (nappe superficielle-nappe profonde), oued-nappe, et nappe-mer.

5.1 Historique de la piézométrie de la nappe superficielle d'Annaba

Pour réaliser cet historique, nous disposons des piézométries portant sur l'aquifère superficielle réalisées par de nombreux chercheurs et à différentes dates, ainsi les premiers résultats à notre dispositions remontent un historique de la piézométrie de l'aquifère superficielle réalisée par différents auteurs. Debieche en 2002, a effectué des mesures en Aout et Decembre 1999 ; (Boumaiza, 2003), une carte piézométrique pour la nappe de cordon dunaire en Avril 2003 et (Khadri, 2009) en juillet 2007, la piézométrie de la zone entourant l'oued Seybouse de la région de Bouchegouf vers l'exutoire à la mer, dont on est intéressé par la partie aval (la plaine d'Annaba).

5.2 Etats piézométriques réalisés par nos soins

Pour comprendre mieux le niveau de plans d'eau de la nappe superficielle et son écoulement dans le temps et dans l'espace dans cette nappe côtière, on a effectué des mesures sur les niveaux statiques à partir des puits domestiques distribués dans la plaine, ceux qui nous ont permis de dresser cinq cartes piézométriques, trois se rapportant aux mois de Décembre 2011 ; Avril 2016 ; Novembre 2016 ; Avril 2017 et Juillet 2017. Chaque carte est accompagnée par son réseau de mesures utilisé. Les mesures sont réalisées à l'aide d'une sonde piézométrique de 100 m à double signalisation (sonore et lumineuse).

5.2.1 Carte piézométrique de (Décembre 2011)

L'observation de la carte (Fig.29) montre une surface piézométrique irrégulière, la morphologie des courbes indique un écoulement général de direction Sud-Nord.

Au Nord, on remarque des dépressions indiquant des pompages en activité, Ces dépressions sont observées au niveau de la Cité Seybouse, d'Echatt et de Sidi M'Barek. Cette situation d'échange mer-nappe peut entraîner une intrusion marine. Toujours au niveau de Sidi

M'Barek, vers l'extrême nord apparait, une ligne de partage des eaux liée à la topographie générée par les dunes de sable présentes dans cette région.

Ces dépressions, se caractérisent par un écoulement rapide marquant un gradient hydraulique important oscillant entre $0,2 \times 10^{-2}$ et $1,8 \times 10^{-2}$, due certainement aux effets des pompages des eaux souterraines.

Au centre de la zone, on note la présence d'une dépression piézométrique indiquant un écoulement rapide le gradient hydraulique calculé est égal à $0,37 \times 10^{-2}$, c'est le cas dans la région d'El Kous et à Ben M'Hidi.

La zone Ouest, c'est-à-dire du côté d'Annaba, El Hadjar et El Bouni, on note une convergence des écoulements vers les pompages en activités.

Au niveau de la partie Sud, la bute de Daghoussa, joue le rôle d'une ligne de partage des eaux, au contre bas de cette zone les écoulements sont relativement lents et le gradient hydraulique calculé baisse par rapport aux précédents, il atteint $0,2 \times 10^{-3}$.

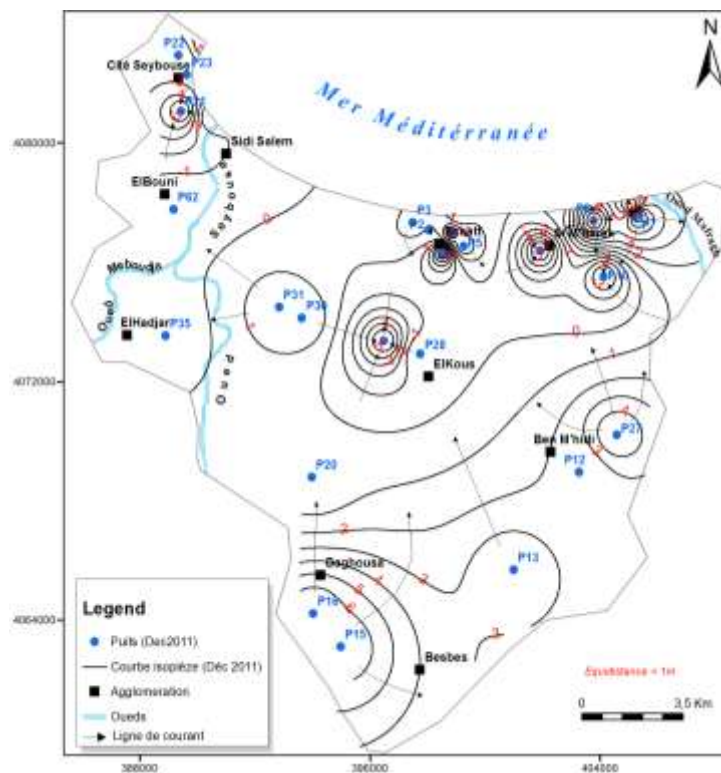


Fig. 28: Carte piézométrique de la Plaine d'Annaba (Décembre 2011).

5.2.2 Carte piézométrique de (Avril 2016)

L'examen de la carte piézométrique (Fig.30) nous en permet d'identifier que l'écoulement global de direction Sud-Nord. Certaines parties de la carte semblent indiquer la présence de lignes de partages des eaux ; ces dernières n'étaient pas présentées sur la première carte. Cette présence est probablement liée aux précipitations tombées au cours de cette période et ayant entraînés un débordement au niveau de certains puits.

La zone Nord-Est, particulièrement au niveau d'Echatt et Sidi M'Barek, on remarque deux écoulements :

- Un premier allant dans le sens Nord-Sud, montrant une alimentation marine de la nappe ;
- Le second, situé au niveau de Sidi M'Barek, dont l'origine serait liée à la topographie de la région. Dans cette zone le gradient hydraulique varie entre $0,38 \times 10^{-2}$ et $1,8 \times 10^{-2}$.

L'allure des courbes au niveau de la zone Ouest particulièrement à El Hadjar et au niveau de la zone industrielle de Pont Bouchet), montre un écoulement dirigé de la nappe vers les Oueds Seybouse et Meboudja. Cette situation serait provoquée par les quantités d'eau tombées et entraînées une recharge importante des puits. Le gradient hydraulique calculé atteint $0,18 \times 10^{-2}$.

Au Sud, particulièrement la zone Daghoussa-Besbes ; la bute Daghoussa, est à l'origine de la ligne de partage des eaux. On remarque qu'au fur et à mesure qu'on s'éloigne de Daghoussa, la vitesse des écoulements diminue. Le gradient hydraulique dans cette zone est égal à $0,15 \times 10^{-2}$.

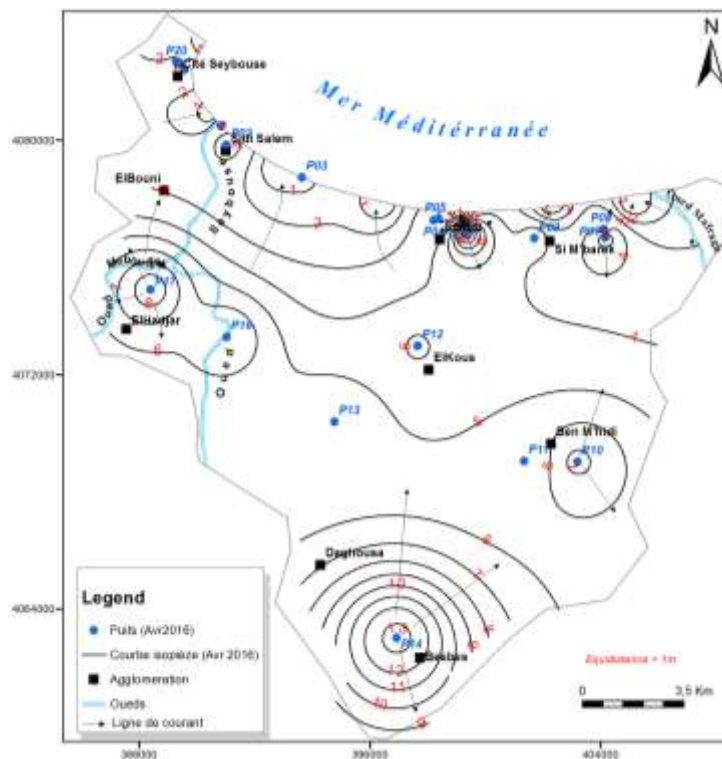


Fig. 29: Carte piézométrique de la Plaine d'Annaba (Avril 2016).

5.2.3 Carte piézométrique de (Novembre 2016)

La carte piézométrique (Fig.31) établie dans cette période montre un écoulement souterrain de direction Sud-Nord en général. Les zones de Sud de la plaine étudiée entre Daghoussa et Besbes, et à l'Est d'El-Hadjar, les courbes isopièzes sont fermées, indiquant une recharge de l'aquifère avec des valeurs de gradient hydraulique intéressantes de $1,63 \times 10^{-3}$ à $2,36 \times 10^{-3}$.

Dans la zone centrale, les courbes piézométriques se trouvent irrégulières et plus espacées suite à un gradient hydraulique faible de $0,6 \times 10^{-3}$ à $1,95 \times 10^{-3}$. On remarque un écoulement presque identique le long de la cote où se repose le cordon dunaire dont la nappe se décharge dans la mer, le gradient ici est de l'ordre de $0,96 \times 10^{-3}$ avec des niveaux piézométriques variant entre 1 et 3 mètres.

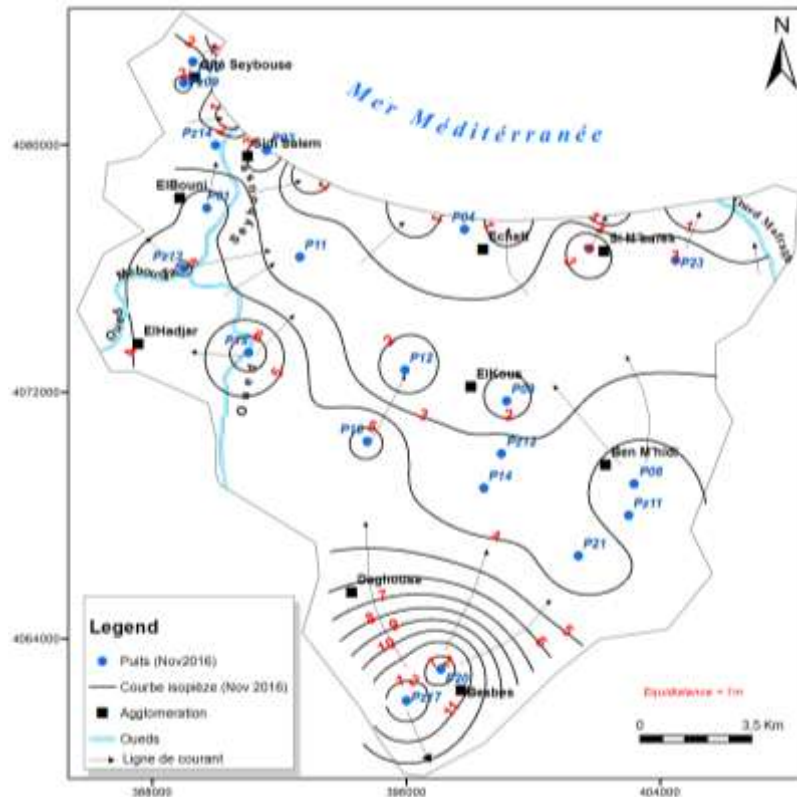


Fig. 30: Carte piézométrique de la Plaine d'Annaba (Novembre 2016).

5.2.4 Carte piézométrique de (Avril 2017)

L'observation de la carte (Fig.32) montre un écoulement global de Sud vers le Nord.

Dans le détail ; nous observons au niveau de la frange littorale un écoulement orienté Nord-Sud. Cet écoulement caractérise la zone de Annaba, Echatt et Ben M'Hidi.

Vers le Sud, on remarque la présence de zone indiquant les lignes de partage des eaux. Cette situation a été signalé lors la carte précédente, elle serait probablement induite par les précipitations tombées.

Nous remarquons qu'au fur et à mesure qu'on se rapproche du littoral, les écoulements sont plus rapides et le gradient hydraulique devient fort et ceci contrairement à la zone Sud où les courbes son assez espacées.

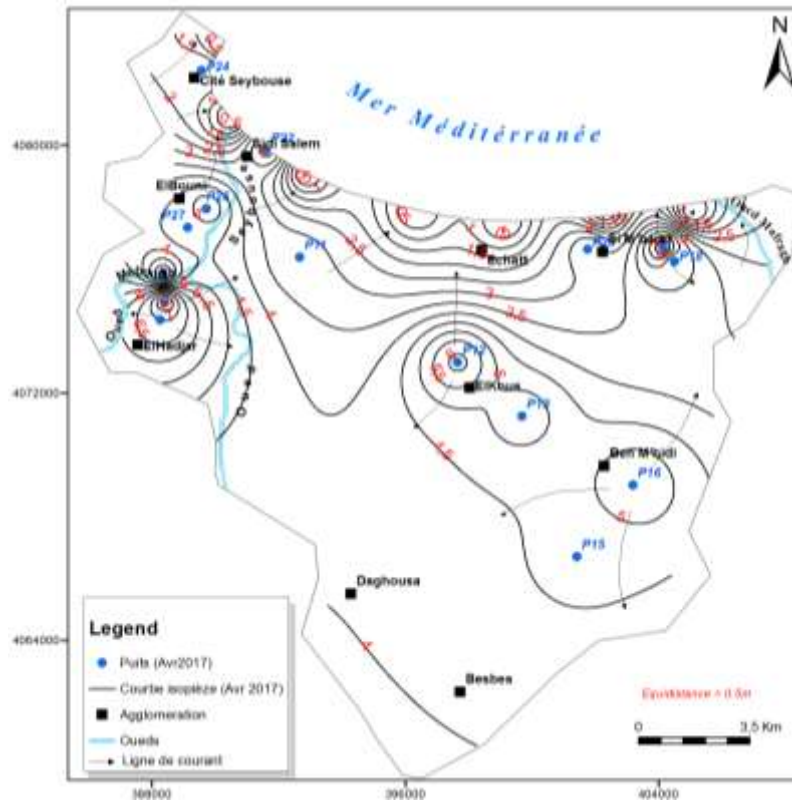


Fig. 31: Carte piézométrique de la Plaine d'Annaba (Avril 2017).

5.2.5 Carte piézométrique de (Juillet 2017)

L'observation de la carte (Fig.33) montre l'impact des pompages qui se déroulent au cours de cette saison. La zone d'étude se caractérise par des cultures estivales tel que la tomate, la pastèque, d'où la nécessité d'irriguer au cours de cette période ; ce qui entraîne une sollicitation de la nappe.

Au cours de cette période, la physionomie de la carte change complètement, les pompages en activité font que les lignes de partage des eaux laissent place à des dépressions indiquant les pompages en cours.

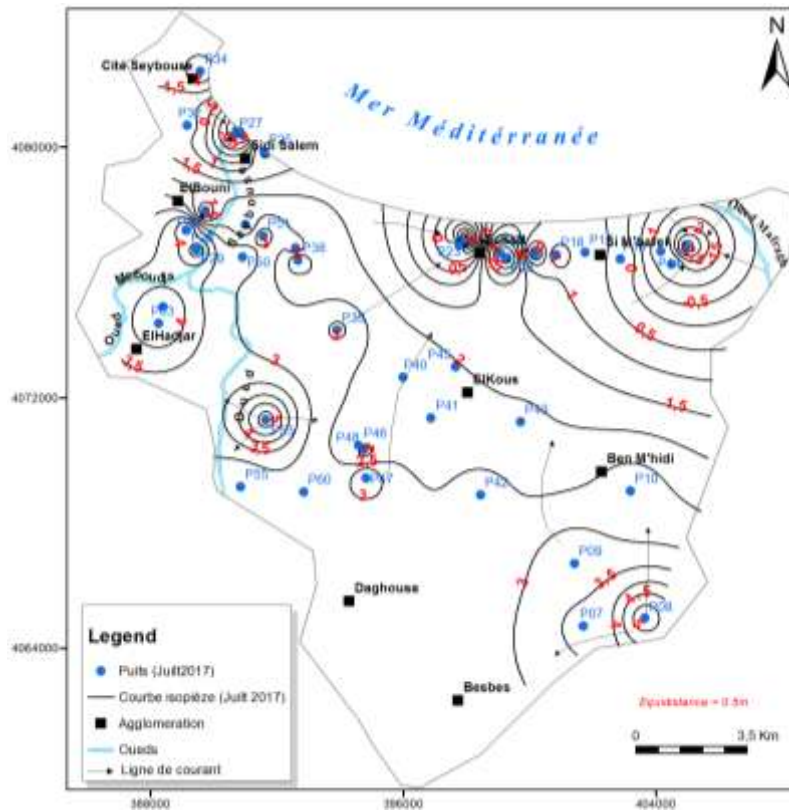


Fig. 32: Carte piézométrique de la Plaine d'Annaba (Juillet 2017).

L'interprétation des cartes piézométriques, montre le niveau d'eau dans les puits varie fortement en fonction de la période de mesure. Ainsi, nous avons remarqué un écart très important entre les mesures effectuées en période de pluies et les mesures réalisées au cours de la période estivale. Ceci montre que la nappe reste très vulnérable aux variations saisonnières.

5.2.6 Relation Oued-Nappe

L'interprétation des cartes piézométriques met en évidence une relation de drainance entre l'oued et la nappe superficielle. Selon les lignes de courant tracées sur les courbes piézométriques, en Décembre 2011, où on peut dire que c'est une période d'une recharge partielle de la nappe. A l'Ouest de la plaine, on remarque que l'oued Seybouse est alimenté par la nappe à partir de la zone de partage des eaux souterraine. Par contre, cet oued alimente la nappe auprès de l'exutoire par l'influence de la dépression piézométrique existant au Sud de Cité Seybouse. De l'autre côté, à l'Est, on observe que l'oued Mafragh draine la nappe. La carte piézométrique en période des hautes eaux Avril (2016 et 2017), met en évidence que l'ensemble des oueds Seybouse, Meboudja et la Mafragh, sont alimentés par la nappe. La recharge durant cette période est considérable. La carte des écoulements souterrains, révèle que l'oued Seybouse en Novembre 2016, recharge la nappe de l'Est d'Elhadjar jusqu'à l'embouchure. Au contraire, l'oued Mafragh à l'Est draine la nappe. La carte relative à la

période des basses eaux Juillet 2017, montre que l'ensemble des oueds de la plaine étudiée assurent la recharge de la nappe superficielle.

5.2.7 Fluctuations de Niveau piézométrique

5.2.7.1 Entre Avril 2016 et Avril 2017 (Hautes eaux)

À fin d'étudier l'évolution du niveau piézométrique de la période des hautes eaux entre les années 2016 et 2017, nous avons considéré le mois d'Avril, où la précipitation moyenne estimée est de 41.8 mm en 2016 et de 25.3 mm en 2017. Selon les précipitations et les cartes piézométriques de ces deux périodes, on peut dire que la nappe est plus chargée en Avril 2016 qu'en Avril 2017. D'après l'allure de la carte des fluctuations de niveau piézométrique obtenue (Fig.34) par une soustraction entre les deux cartes des deux périodes à l'aide d'un logiciel de SIG, nous pouvons visualiser les zones suivantes :

- La zone Sud, entre Daghoussa et Besbes, et l'autre se localise au Nord (la côte), dans la ville d'Echatt où les variations sont importantes et atteignent par endroits 9 et 7 mètres respectivement.
- La zone ouest, entre Elhadjar et la ligne côtière entre Cité Seybouse et Sidi Salem passant par Elbouni, on observe que la nappe se fluctue jusqu'à deux mètres. Le reste est nul dans l'extrême Nord-Est de la plaine (Sidi M'barek). Les valeurs négatives peuvent être expliquées par un pompage excessif au niveau de puits en Avril 2016.

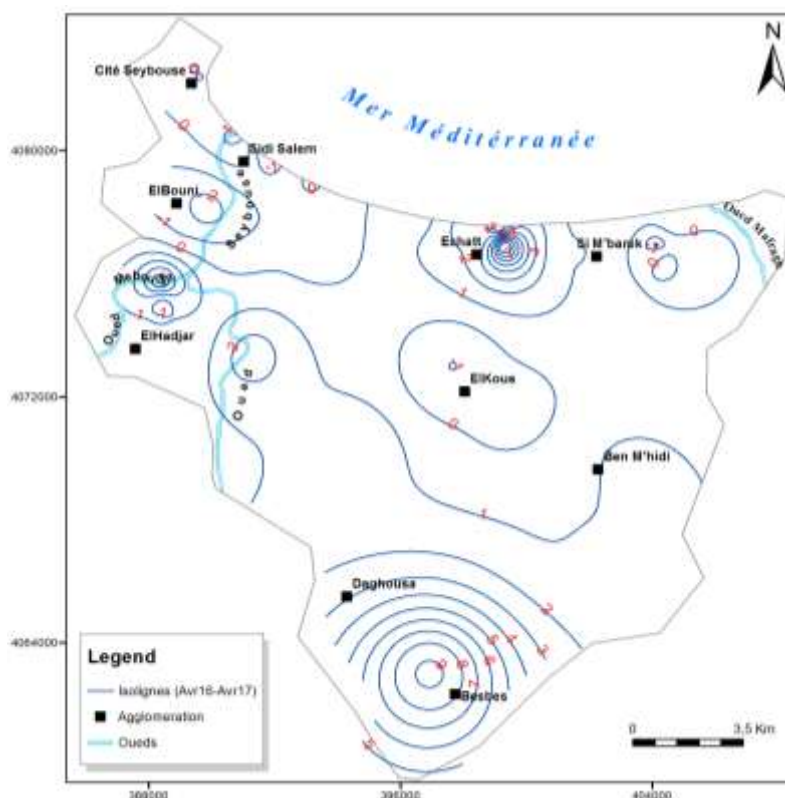


Fig. 33: Carte des fluctuations piézométriques entre Avril 2016 et Avril 2017.

5.2.7.2 Entre Avril 2017 et Juillet 2017 (hautes eaux-basses eaux)

La carte des variations de niveau de la nappe (Fig.35) entre la période des hautes eaux (Avril) et celle des basses eaux (Juillet) de l'année 2017 montre un battement évident qui se varie d'une région à l'autre comme les suivantes :

- La zone entre Besbes et Ben M'hidi au Sud de la région le niveau de la nappe diminue d'un mètre.
- La zone centrale, montre un abaissement piézométrique atteint les 4 mètres.
- La zone cotière, (Echatt) les isobathes indiquent une baisse de deux mètres. Cependant, à l'Ouest (Sidi Salem) la valeur égale à 3 mètres.
- La zone Ouest de la plaine étudiée entre ElHadjar et ElBouni, l'abaissement est variée entre 0 et 4 mètres.

Les valeurs négatives sont aussi expliquées par un pompage excessif au niveau de puits en Avril 2017.

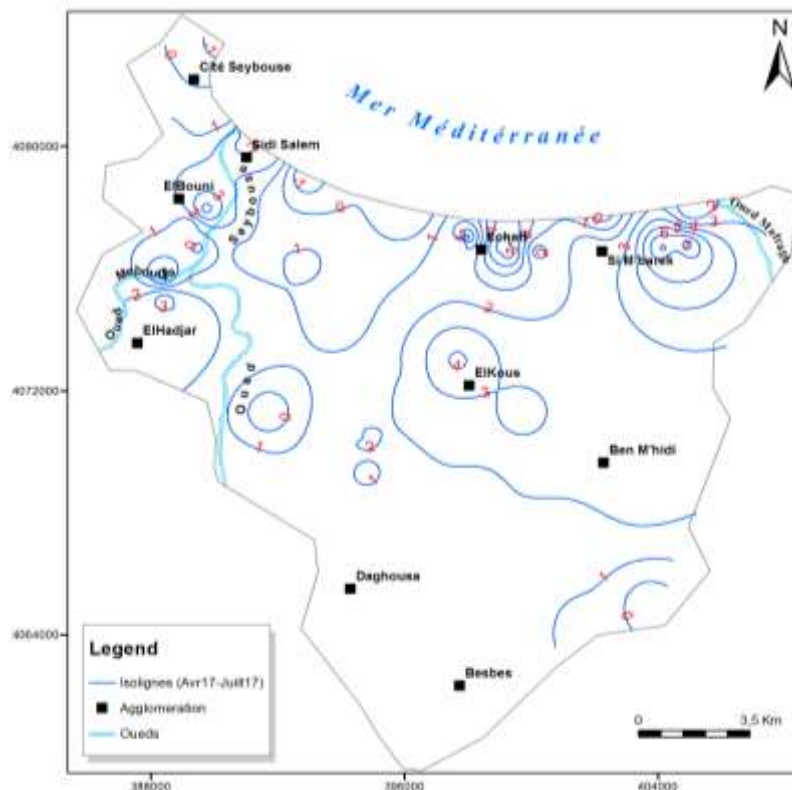


Fig. 34: Carte des fluctuations piézométriques entre Avril 2017 et Juillet 2017.

6 Quelques caractéristiques hydrodynamiques des nappes

Les observations de terrain ou des résultats acquis lors de différentes études (Khérici, 1993 ; Djabri, 1996 et Debieche, 2002), indiquent que l'aquifère phréatique de la plaine de Annaba

présente des caractéristiques hydrodynamiques médiocres. A ce titre, les résultats obtenus par des essais par pompage sont condensés dans le (Tab.19) suivant :

Tab. 19: Résultats de deux pompages d'essai effectués dans la nappe phréatique.

Coordonnées		Transmissivité (m ² .s ⁻¹)	Coefficient d'emmagasinement	Epaisseur de la nappe (m)	Perméabilité (m.s ⁻¹)
X	Y				
957.15	401.550	2 x 10 ⁻⁶	-	5	4 x 10 ⁻⁷
957.250	399.8	8 x 10 ⁻⁵	2%	5	1,6 x 10 ⁻⁵

6.1 La nappe des graviers

L'interprétation des données de pompages d'essai faites par A. Hani (2003), en tenant compte des limites naturelles et de la particularité des terrains de la zone d'étude (hétérogénéité du milieu). Ainsi, dans la nappe des graviers les valeurs de transmissivité les plus élevées sont situées le long de la Seybouse et les plus faibles à l'Ouest dans la région d'El-Kerma. Les valeurs du coefficient d'emmagasinement sont en moyenne de 11.5 % pour la nappe libre. Pour la nappe captive des graviers, elles varient de 10⁻⁴ à 10⁻³ dans le secteur de Drean-Chihani où elle devient libre.

Le dépouillement des données a également permis de définir la perméabilité de l'horizon semi-perméable qui varie de 10⁻⁸ à 10⁻⁷ m/s.

Le (Tab.20), donne des indications sur les caractéristiques hydrodynamiques de la nappe des graviers.

Tab. 20: Caractéristiques hydrodynamiques de la nappe des graviers.

Paramètres	Méthodes utilisées			Méthode automatique (6eme Itération)
	Descente Jacob	Remontée Jacob	Descente Theis	
Transmissivité	3,5 x 10 ⁻³	4,0 x 10 ⁻³	3,5 x 10 ⁻³	3,5 x 10 ⁻³
Coefficient d'emmagasinement	3,6 x 10 ⁻⁴	-	4,3 x 10 ⁻⁴	4,0 x 10 ⁻⁴

Aoun Sebati B (2010), a établie des limites des valeurs de transmissivité en fonction de la nature du terrain. Les estimations sont reportées dans le (Tab.21) suivant.

Tab. 21: Estimation des transmissivités de la nappe phréatique (m2.s-1), (in Aoun Sebaiti, 2010).

Zone	Epaisseur nappe (m)	Dominante de la formation		sablo-argileuse à passées sableuses
		Argileuse	sablo-argileuse	
A	4	9,2x10 ⁻⁷ < T < 14x10 ⁻⁵	1,1x10 ⁻⁵ < T < 9,2x10 ⁻⁵	-
B	4	2,3x10 ⁻⁶ < T < 1,2x10 ⁻⁵	1,1x10 ⁻⁵ < T < 2,3x10 ⁻⁵	4,4x10 ⁻⁵
C	2	2,2x10 ⁻⁶	-	-
D	1	5,8x10 ⁻⁷ < T < 3x10 ⁻⁶	3,5x10 ⁻⁶ < T < 4,6x10 ⁻⁶	1,1x10 ⁻⁵ < T < 2,2x10 ⁻⁵

7 Conclusion

La plaine d'Annaba est constituée par des sédiments mio-plio-quaternaires comblant une zone d'effondrement. Les travaux réalisés dans la région ont montré qu'il existait deux fosses séparées par un haut-fond qui porte la butte de Daroussa :

- la fosse Ben-Ahmed, orientée S-N,
- la fosse Ben-M'hidi, orientée SW-NE.

Le remplissage de ces fosses comporte plusieurs horizons aquifères lenticulaires à continus sur toute l'étendue de la plaine d'Annaba. Ces formations sont très variées tant par la dimension des grains que par la géométrie des couches conférant aux matériaux des propriétés hydrauliques différentes dans l'espace. Dans ce remplissage hétérogène on distingue 2 principales nappes dans la zone d'étude; la nappe superficielle (la nappe concernée par l'étude), contenue dans les argiles sableuses, et la nappe des graviers. Ces deux nappes sont largement exploitées par de nombreux ouvrages de captage destinés à l'alimentation des populations et pour répondre aux besoins de l'industrie et de l'agriculture.

La nappe superficielle présente une potentialité importante, vu son extension spatiale sur toute la plaine et sa faible profondeur. Selon les cartes piézométriques, les apports de la nappe proviennent des bordures (socle métamorphique et grès du Numidien) ainsi que des précipitations efficaces. Cette nappe est très vulnérable à la pollution, étant donné sa faible profondeur, l'existence de plusieurs sites industriels et agricoles ainsi que l'existence des formations sablo-argileuses qui laissent les polluants chimiques s'infiltrer vers la nappe.

L'hydrodynamique de cette nappe est influencée aussi par d'autres paramètres : le pompage, l'irrigation et les échanges hydrodynamiques entre les deux ressources à potentiel différent (Les eaux de surface et la nappe profonde), ces derniers peuvent jouer un rôle majeur dans le changement de la direction d'écoulement des eaux et dans la modification de leur hydrochimie. D'après les coupes hydrogéologique on peut distinguer : la nappe du cordon située le long de la cote avec une perméabilité varie entre 10^{-4} et 10^{-3} m/s, et la nappe phréatique occupant toute la plaine et en contact hydraulique directe avec le cordon dunaire, sa perméabilité au centre de la plaine oscille entre 4×10^{-7} et $1,6 \times 10^{-5}$ m/s.

La piézométrie cartographiée des cinq campagnes révèle que le sens global de l'écoulement des eaux souterraines est de Sud vers le Nord. Mettant en évidence l'échange entre le système aquifère et l'oued, par le drainage de la nappe par l'oued en période des hautes eaux, et l'alimentation de la nappe par l'oued dans la période des basses eaux. Ainsi, l'apparition des zones de partage des eaux, ce qui indique la recharge de la nappe surtout dans le temps des hautes eaux. Par contre, l'existence des zones dépressives provoquées généralement par les

pompages excessives et qui caractérisent beaucoup plus la période des basses eaux où on a pu évaluer un gradient hydraulique très important.

Chapitre IV : HYDROCHIMIE

1 Introduction

Dans les aquifères côtiers l'utilisation de l'outil ; hydrochimique demeure incontournable pour la mise en évidence des mécanismes régissant la qualité des zones. Le golf d'Annaba, se distingue par une interférence de plusieurs sources de pollution, nous citons par exemple la présence de la mer, cette dernière reçoit de nombreux rejets liquides issus des différents quartiers de la ville. Le sol de la plaine recèle des nappes d'eau, ces dernières sont soumises aux aléas climatiques et aux méfaits de l'homme. Cette situation nous amène à rechercher les différentes sources de pollution pour déterminer la contribution de chaque facteur dans la dégradation de la qualité des eaux. Pour réaliser notre étude, nous avons réalisé des prélèvements et des analyses d'eau de la zone d'étude.

2 Échantillonnage et analyse physico-chimique

Nous avons commencé notre travail par la détermination d'un réseau de surveillance des points d'eau. Ainsi un choix a été fait selon les informations recueillies sur place (Nom du propriétaire, équipement du puits, date de mise en exploitation,...). Une fois les informations demandées connues, nous avons commencé par faire une campagne de mesure du niveau piézométrique et de prélèvement pour analyse. Au même moment, nous avons mesuré sur site les paramètres physiques (T° , pH, Conductivité, Oxygène dissous, ...). Cette opération de mesure est répétée à chaque sortie sur terrain. Le réseau, choisi couvre toute la plaine (Fig.36).

Les résultats des analyses chimiques utilisés, proviennent des deux campagnes suivantes :

- La première campagne, réalisée par l'ANRH (Décembre 2011), contient les analyses des eaux de 24 puits ;
- la seconde réalisée par nos soins au mois de Novembre 2016 et porte sur les analyses des eaux de 16 puits. Les analyses ont été réalisées par le Laboratoire d'analyse et contrôle de qualité Centre d'expertises en génie mécanique (Universal LAB) à Bouzareah, Alger. Les méthodes analytiques utilisées pour les analyses chimiques sont : la titrimétrie, l'UV visible et la spectrométrie d'absorption atomique.

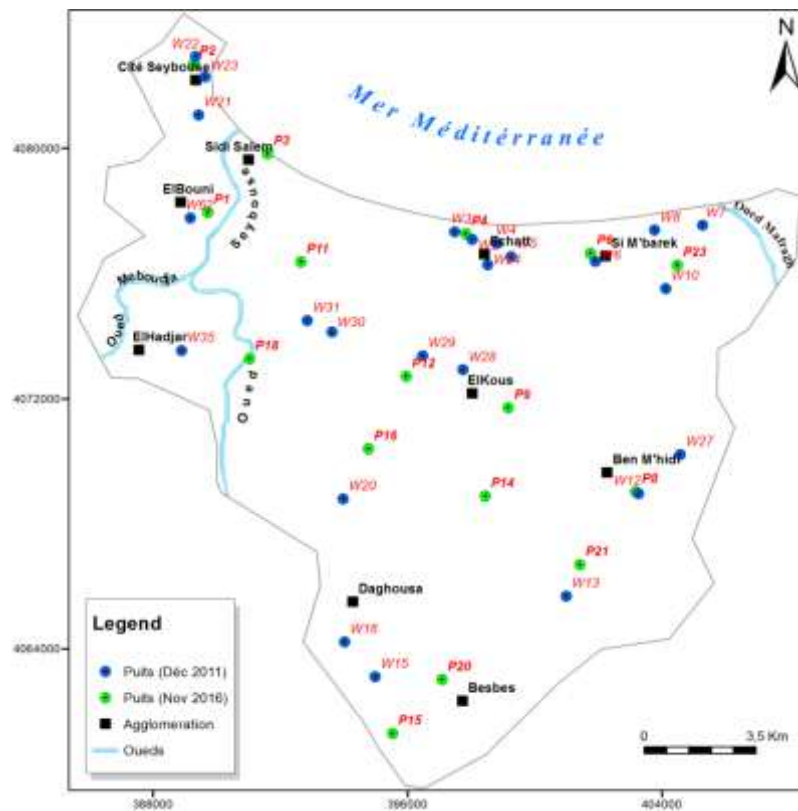


Fig. 35: Carte d'inventaire des puits analysés.

3 Qualité des eaux de la nappe souterraine

3.1 Paramètres physiques

Au cours de notre étude on a effectué des mesures in situ des paramètres physiques (Température, PH et la Conductivité Électrique) en mois d'Avril 2016, Avril 2017 et juillet 2017 en plus, les deux mois mentionnés précédemment.

3.1.1 La Température

La température de l'eau est un paramètre très important, elle régit les activités chimiques, bactériologiques et l'évaporation de l'eau. Elle varie en fonction de la saison et de la profondeur.

Dans les eaux du système aquifère suivi, les températures mesurées sont relativement stables et sont supérieures à celle de l'air sauf le mois estival (juillet 2017) où l'air est plus chaud (Tab.22).

Tab. 22: Variations saisonnières de la température des eaux souterraines.

Période	Min	Max	Moy (eau)	Moy (air)
Dec_2011	14,3	22,9	17	12,9
Avr_2016	7,6	21,8	18	16
Nov_2016	16,3	23,4	19,7	17

Avr_2017	18	21,44	19,2	15,5
Juill_2017	20,6	32,5	23,2	25,9

L'observation de l'histogramme (Fig.37), indique que les températures moyennes sont comprises entre 17 °C et 23 °C, ce qui montre une faible variation des températures entre les deux saisons. Ceci signifie l'absence d'une variation notable, ceci montre une faible variation de la température dans l'espace et dans le temps d'où un effet des variations climatiques.

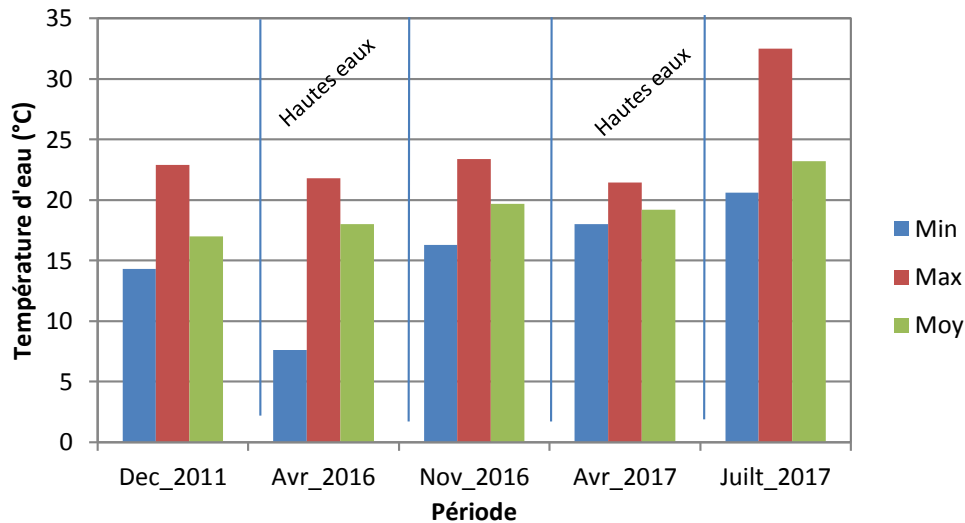


Fig. 36: Variations saisonnières de la température des eaux souterraines.

3.1.2 Le potentiel d'hydrogène (pH)

La valeur du pH, conditionne la potabilité ou non d'une eau. Les échelles de classification selon la valeur du pH, sont :

- une solution de pH = 7 est dite neutre ;
- une solution de pH < 7 est dite acide ;
- une solution de pH > 7 est dite basique.

Dans le détail de la classification, nous pouvons obtenir les classes suivantes:

- * pH (de 1 à 3) : acides forts et potentiellement très dangereux ;
- * pH (de 4 à 5) : acides faibles ;
- * pH (de 6 à 7) : acides neutres (eau potable) ;

Une solution de pH > 7 est dite basique ou alcaline,

- *pH (de 7 à 8) : bases neutres (eau potable) ;
- *pH (de 8 à 9) : bases faibles ;
- *pH (de 10 à 14) : bases fortes.

Les valeurs moyennes de pH enregistrées durant les cinq campagnes d'échantillonnage varient entre 6,19 et 8,9 (Tab.23 ; Fig.38). Cependant, on note la présence de quelques points d'eau

qui ont un pH supérieur ou égal à 8,5. Cette variation n'affecte pas le pH des eaux de la région. Ces valeurs montrent que les eaux ont un pH, proche de la neutralité.

Tab. 23: Variations saisonnières du PH des eaux souterraines.

Période	Min	Max	Moy
Dec_2011	5,48	9,95	6,19
Avr_2016	7,18	8	7,56
Nov_2016	7,09	8	7,53
Avr_2017	5,09	10,5	8,9
Juilt_2017	6,9	10,5	7,7

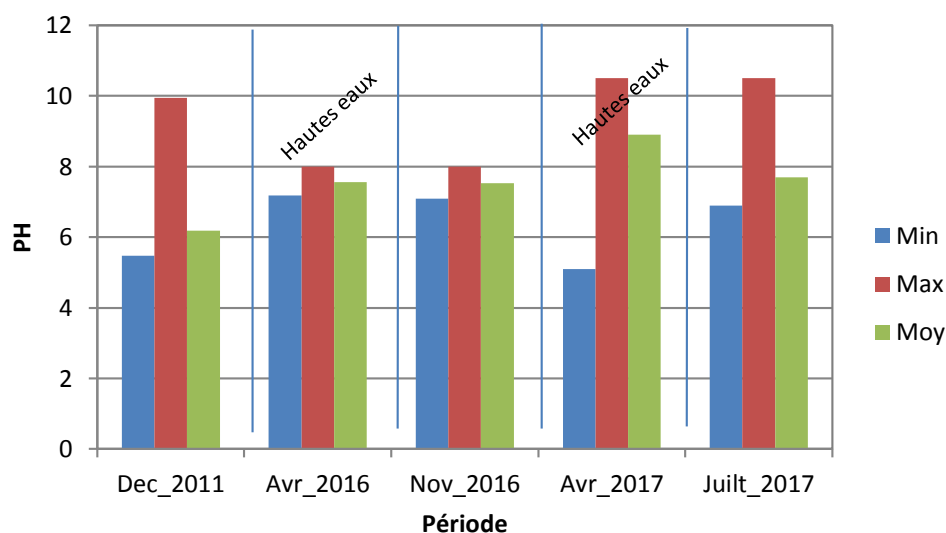


Fig. 37: Variations saisonnières du PH des eaux souterraines.

3.1.3 La conductivité électrique (CE)

La conductivité électrique permet d'apprécier la minéralisation des eaux. Elle se mesure soit sur site soit au laboratoire. La mesure de la conductivité électrique d'une eau s'effectue à l'aide d'un conductimètre, ou se fait à l'aide d'un multi-paramètre (T, pH, conductivité). Elle s'exprime en $\mu\text{S}/\text{cm}$ ou mS/cm (micro ou milli Siemens par centimètre). La valeur de la conductivité est ramenée toujours à la température standard de 25°C .

La distribution spatiale de la conductivité électrique au mois de Décembre 2011 (Fig.39), montre des valeurs assez élevées oscillants entre 4730 et 6480 $\mu\text{S}/\text{cm}$, ces fortes conductivités se localisent dans la zone Est de la plaine particulièrement à Echatt, Ben M'Hidi et le Sud-ouest de l'aéroport. Toujours au niveau du littoral bordant la ville d'Echatt, le puits W24, indique une conductivité très élevée atteignant 15 450 $\mu\text{S}/\text{cm}$, indiquant probablement une influence marine (Fig.40). Cependant sur le reste de la plaine la conductivité n'est pas très élevée allant de 551 à 2680 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

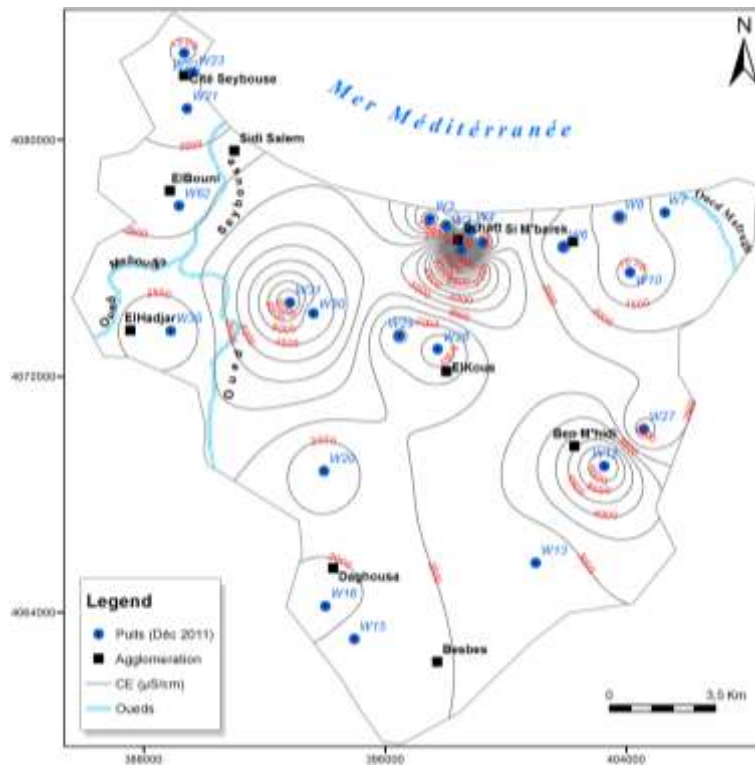


Fig. 38: Carte de la distribution spatiale de la CE des eaux souterraines (mois de Décembre 2011).

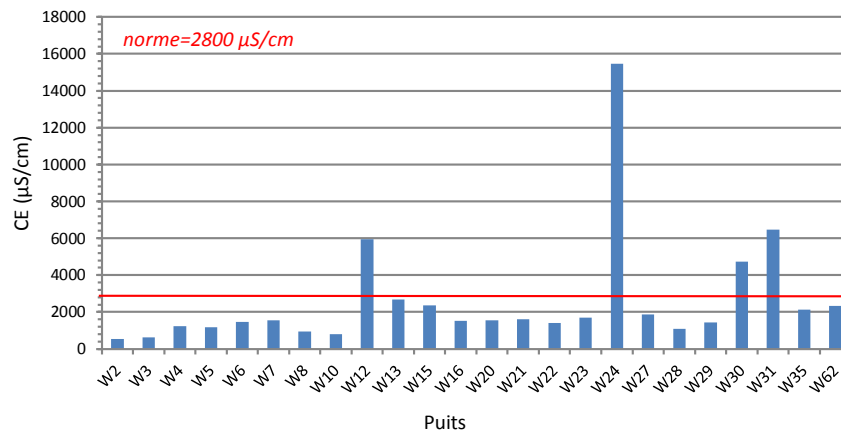


Fig. 39: Variations de la CE des eaux souterraines (mois de Décembre 2011).

La carte relative aux mesures effectuées au mois d'Avril 2016 (Fig.41), montre que la conductivité mesurée oscille entre 2712 et 4380 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Fig.42). On retrouve une répartition similaire à la précédente, c'est-à-dire, les fortes conductivités se localisent au niveau de la zone Est Echatt et Ben M'Hidi c'est également le cas de la zone Sud-est d'El Hadjar au lieu dit Ziani Ahmed où la conductivité atteint 6580 $\mu\text{S}/\text{cm}$ au niveau du puits P16 juste à côté de l'Oued Seybouse.

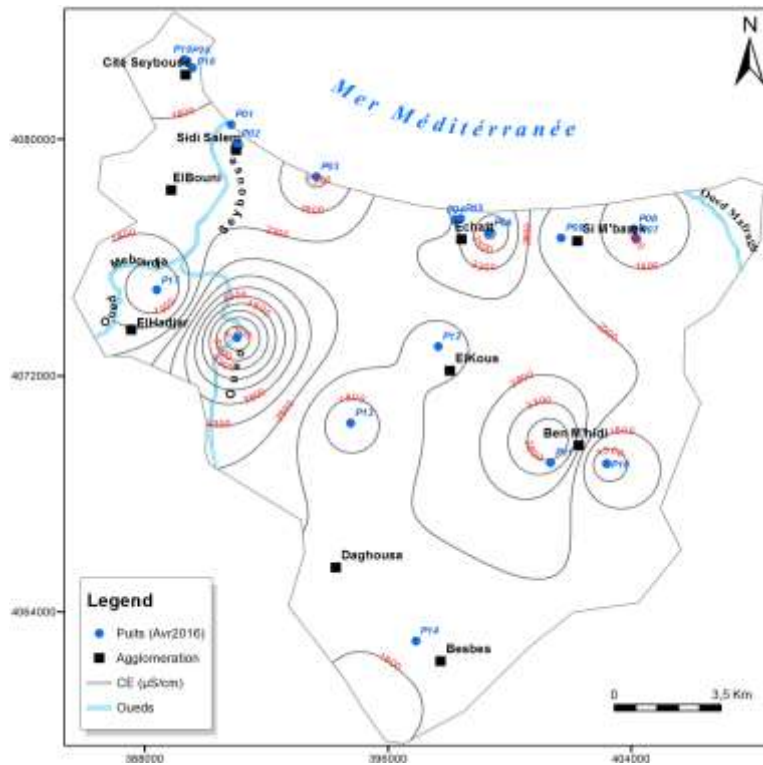


Fig. 40: Carte de la distribution spatiale de la CE des eaux souterraines (mois d'Avril 2016).

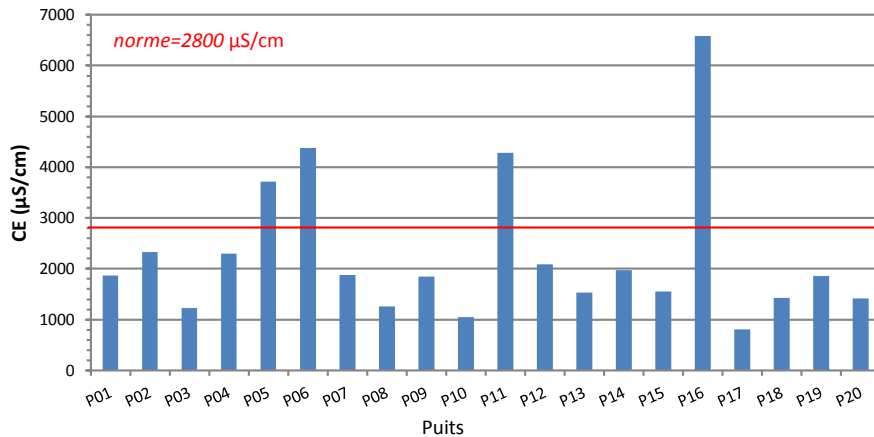


Fig. 41: Variations de la CE des eaux souterraines (mois d'Avril 2016).

Sur le reste de la plaine les valeurs de la conductivité varient entre 803 et 2334 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Fig.42).

Les résultats de mesures de la conductivité électrique réalisées au mois de Novembre 2016 (Fig.43), indiquent une minéralisation très importante, dépassant 4000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Les plus fortes conductivités se localisent au niveau de la partie Nord-ouest et Sud-est, allant de la zone industrielle d'El Allaligie jusqu'à Zerizer. Les conductivités mesurées oscillent entre 9180 $\mu\text{S}/\text{cm}$ au puits P11 et 10600 $\mu\text{S}/\text{cm}$ au puits P21 (Fig.44).

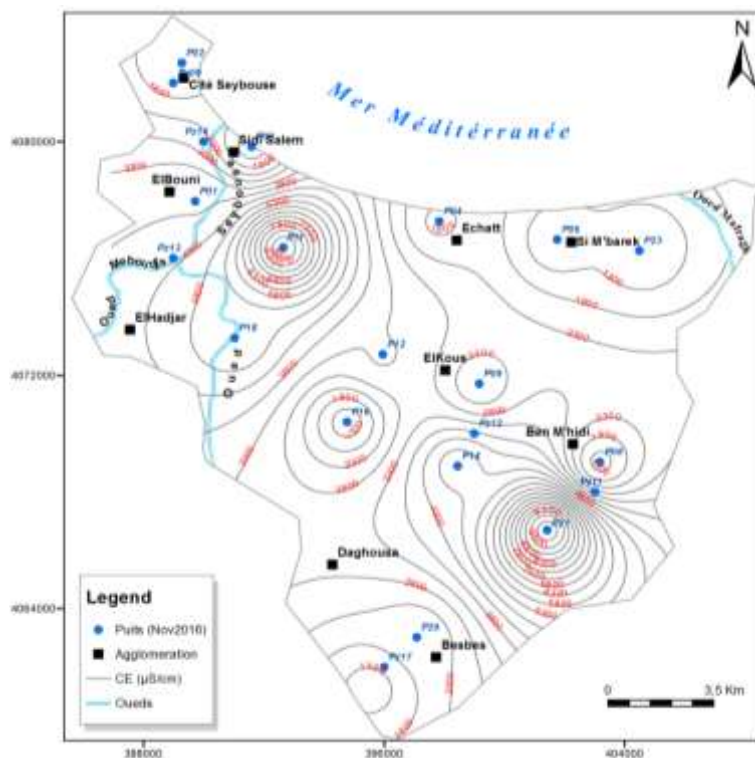


Fig. 42: Carte de la distribution spatiale de la CE des eaux souterraines (mois de Novembre 2016).

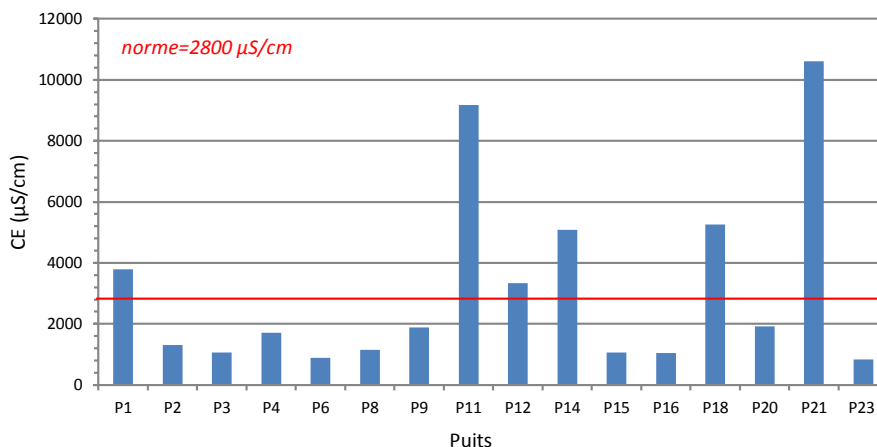


Fig. 43: Variations de la CE des eaux souterraines (mois de Novembre 2016).

Le Nord-est, le centre et le Sud de la plaine, se caractérisent par des conductivités moins importantes que les précédentes (Fig.44).

La carte relative au mois d'Avril 2017 (Fig.45), montre des conductivités très élevées particulièrement au Nord-ouest de la plaine entre Cité Seybouse, El Allaligue, Sidi Salem et Chaouli Belkacem, oscillant de 5000 µS/cm et plus 10000 µS/cm dans le puits A22. À l'Est entre Echatt et Sidi M'Barek de 4000 µS/cm jusqu'à 9910 µS/cm dans le puits A20 et plus de 10000 µS/cm au niveau de puits A18. Un seul puits marque une conductivité électrique égale à 4280 µS/cm au nord de Besbes (Fig.46). La région Sud-est, entre Ben M'Hidi et Zrizer, la

minéralisation va de 4570 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 9310 $\mu\text{S}/\text{cm}$, cette conductivité caractérise les alentours du puits A15. Le reste des puits n'indique pas de fortes conductivités.

Nous déduisons que le changement saisonnier est l'un des facteurs qui provoquent la variations des valeurs des conductivités, ceci est due au fait que le niveau statique est proche de la surface du sol et par conséquent l'influence des variations saisonnières se fait rapidement.

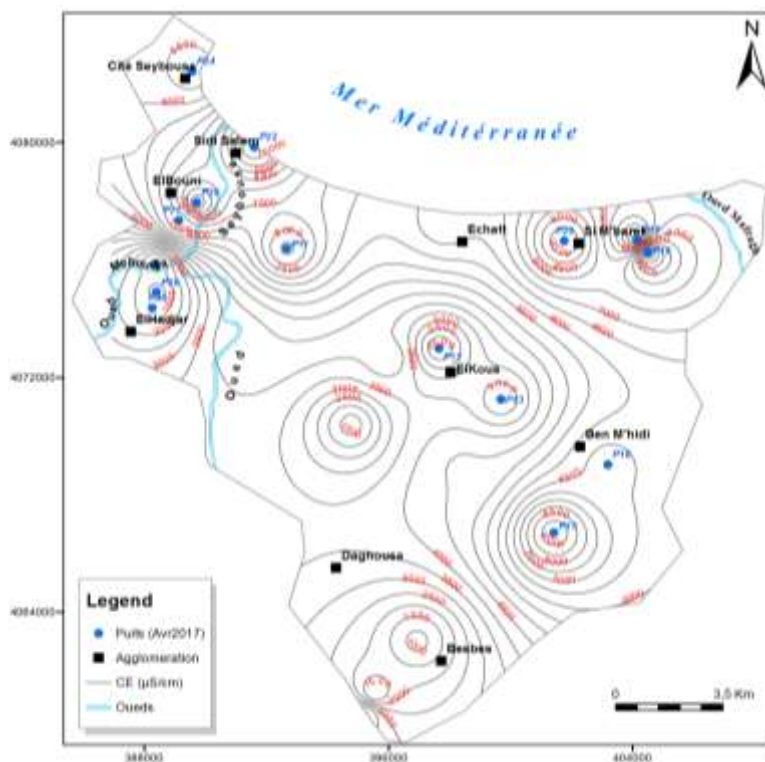


Fig. 44: Carte de la distribution spatiale de la CE des eaux souterraines (mois d'Avril 2017).

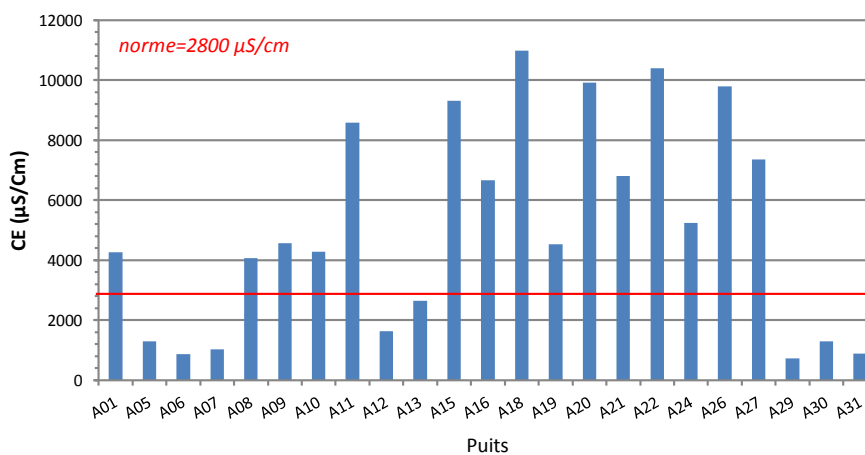


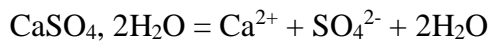
Fig. 45: Variations de la CE des eaux souterraines (mois d'Avril 2017).

3.2 Paramètres chimiques

Nous allons étudier les variations temporelles des éléments majeurs.

3.2.1 Le calcium

La présence des ions Ca^{2+} dans l'eau est liée principalement à deux origines naturelles : soit la dissolution des formations carbonatées (CaCO_3), soit la dissolution des formations gypseuses ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).



✓ **Mois de Décembre 2011** : les concentrations en calcium oscillent entre 34,11 et 702,1 mg/l, avec une moyenne de 185,7 mg/l (Fig.47). Les valeurs les plus élevées (> 200 mg/l) sont observées au niveau de cinq (05) puits. Les puits indiquant un dépassement sont W6 situé à Sidi M'Barek, W12 à Ben M'Hidi, W24 et W31 à Chaouli Belkacem et le puits W24 avec 702,1 mg/l, ces teneurs élevées peuvent être provoquées par la dissolution des formations carbonatées ou l'échange cationique par l'effet de l'invasion d'eau de mer. Nous remarquons que ces puits sont localisés dans la partie Nord-est de la plaine.

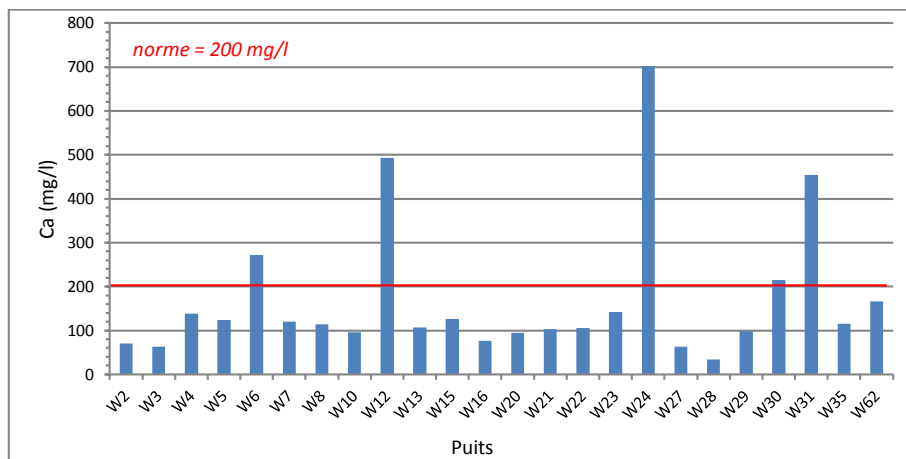


Fig. 46: Histogramme des variations du calcium (Mois de Décembre 2011).

✓ **Mois de Novembre 2016** : Comparativement aux concentrations déterminées au mois de Décembre 2011, les concentrations montrent une baisse très significative (Fig.48). Seul le puits P21, indique une concentration de l'ordre de 250 mg/l. La baisse des concentrations est probablement liée à la dilution des eaux car le mois de novembre est pluvieux (≈ 72 mm).

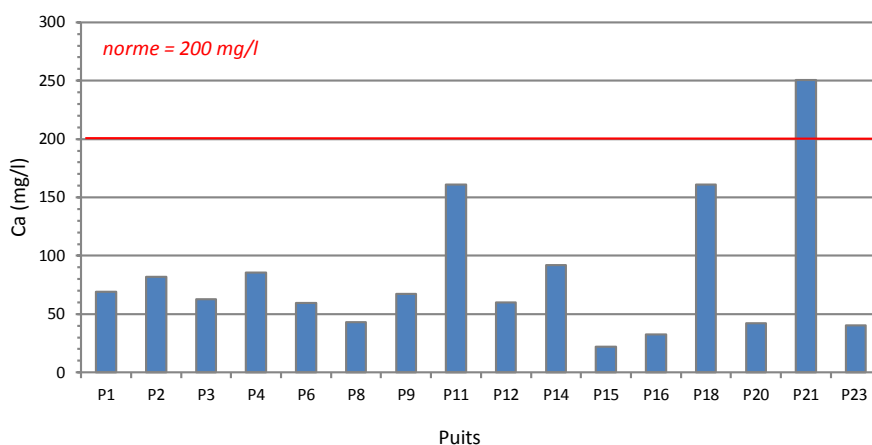
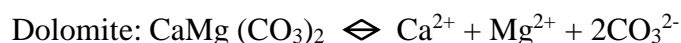
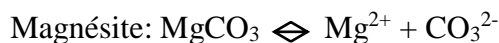


Fig. 47: Histogramme de Variations du calcium (Mois de Novembre 2016).

3.2.2 Le magnésium

Ses origines sont comparables à celles du calcium, car il provient de la dissolution des formations carbonatées à fortes teneurs en magnésium (magnésite et dolomite) selon les relations suivantes :



L'eau de mer a une teneur en Mg^{2+} égale à 1295 mg/l, bien plus élevée que l'eau douce; le mélange eau douce-eau salée le long du littoral peut provoquer l'augmentation notable de Mg^{2+} .

✓ **Mois de Décembre 2011 :** Les concentrations en magnésium sont relativement faibles varient entre 4,95 et 340 mg/l avec une moyenne de 61 mg/l (Fig.49). Les teneurs les plus importantes se localisent dans les zones de Ben M'Hidi cas du puits W12 et d'Echatt puits W24, ce dernier se caractérise par une teneur très élevée de l'ordre de 340 mg/l. Les puits W13 à Zerizer, W31 à Chaouli Belkacem et le puits W62 à El Allaligue, présentent également des concentrations de l'ordre de 70 mg/l. Le puits W30, indique également une richesse des eaux en magnésium de 150 mg/l. Pour le reste des puits les concentrations déterminées sont faibles, ne dépassant pas 50 mg/l, ceci concerne 79% des échantillons.

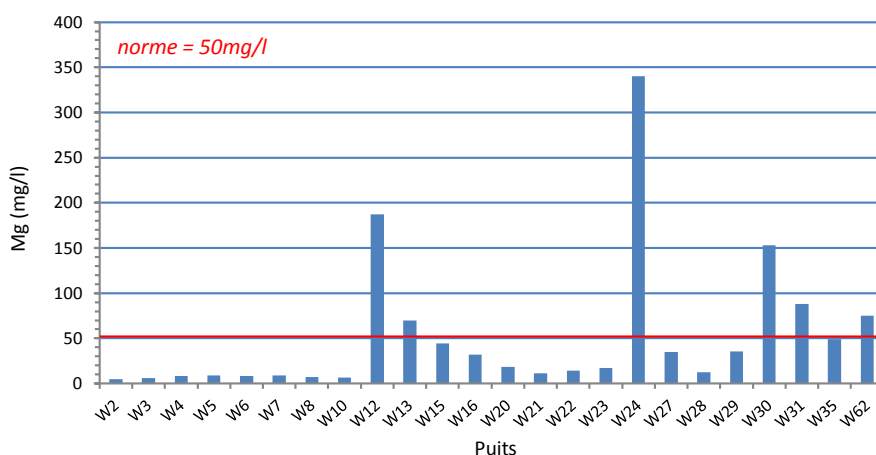


Fig. 48: Histogramme de variation du magnésium (mois de Décembre 2011).

✓ **Mois de Novembre 2016** : Comparativement à la campagne de Décembre 2011, en faisant abstraction du puits W24, nous remarquons un accroissement de la concentration particulièrement au niveau des puits P1, P11, P12, P14, P18 et P21 localisés dans les zones d'El Allaligue, Chaouli Belkacem, Bordj Semar et dans le secteur compris entre Zerizer et Bordj Semar et Ziani ahmed (Sud-est ElHadjar). L'ensemble des puits énumérés montre des concentrations allant de 90 mg/l (P1) à 200 mg/l (P18) (Fig.50).

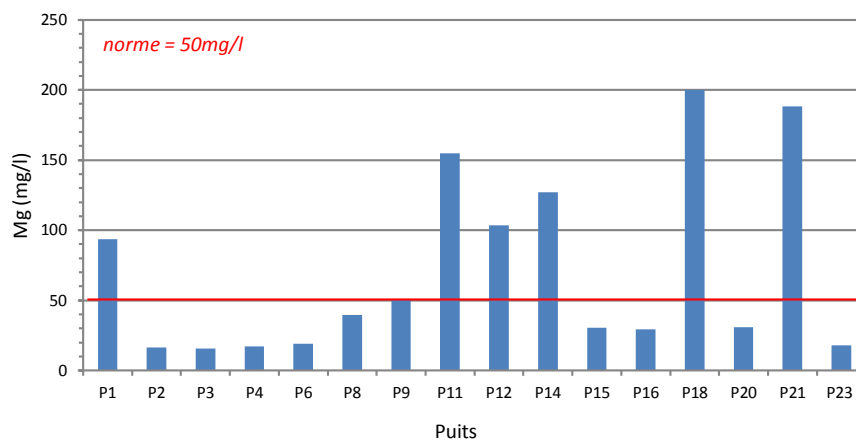
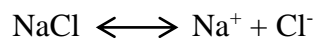


Fig. 49: Histogramme des variations du Magnésium (mois de novembre 2016).

3.2.3 Le Sodium

L'origine de cet élément est liée principalement à la dissolution des formations salifères et aux échanges entre la nappe et la mer. La dissolution des minéraux salifères se fait selon la relation suivante :



✓ **Mois de Décembre 2011** : Cette période se caractérise par une richesse des eaux en sodium. A titre indicatif le sodium dans les eaux du puits W24, sont de l'ordre de 2000 mg/l (Fig.51). Les puits indiquant de fortes concentrations se localisent aux zones d'El-Hadjar, Allaligue et Chaouli Belkacem et la région Sud et le Sud-est dans les zones de Besbes ; Zrizer et Ben m'hidi.

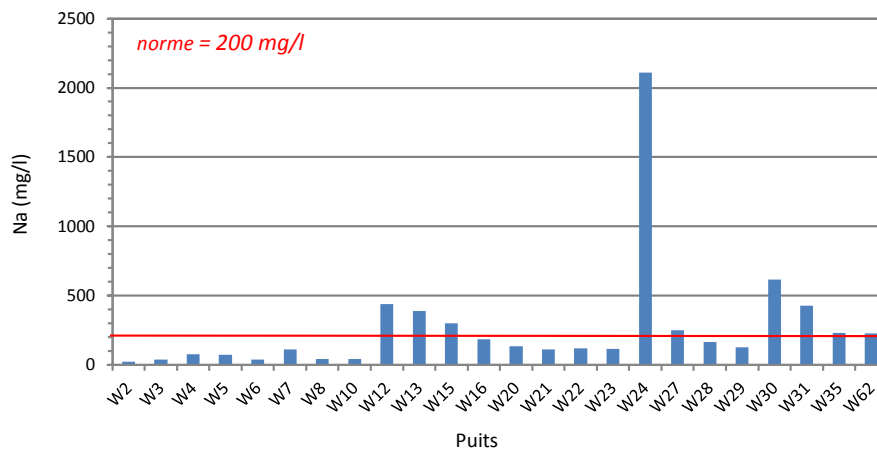


Fig. 50: Histogramme de variations du sodium (mois de Décembre 2011).

✓ **Mois de Novembre 2016 :** Les teneurs en sodium sur certains puits atteignent plus de 500 mg/l cas du puits (P11) (Fig. 52). D'autres puits montrent un excès en sodium, c'est le cas des puits, P1, P9, P12, P14, P20 et P21. L'ensemble de ces puits se localisent dans les zones suivantes à savoir le centre de la plaine entre El Allaligie, Elkous et Bordj semar, le Sud et Sud-est c'est-à-dire Besbes, la zone comprise entre Bordj semar, Zrizer et Ben m'hidi.

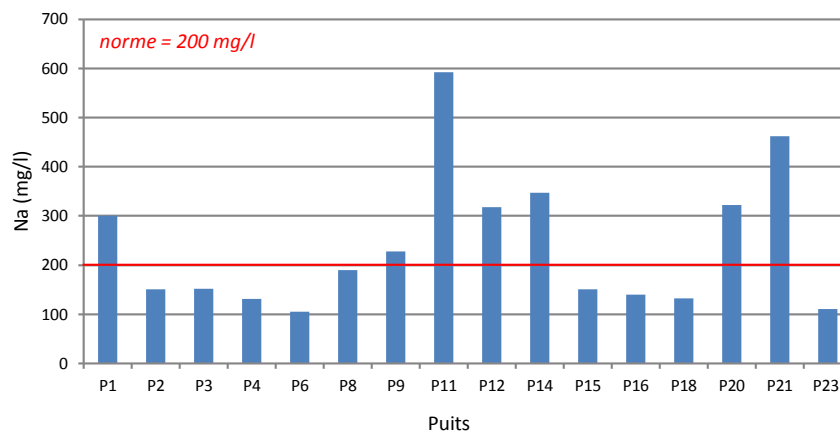


Fig. 51: Histogramme de Variations du Sodium (mois de Novembre 2016).

3.2.4 Les chlorures

Les chlorures peuvent avoir une origine multiple, soit l'intrusion des eaux marines, la contamination par des eaux usées, soit la dissolution des sels par lessivage des terrains salifères. La dissolution de ces sels étant très facile d'où leur présence en fortes concentrations dans les eaux ayant traversées les formations argilo-sableuses ou argileuses

✓ **Mois de Décembre 2011 :** Les eaux analysées sont riches en chlorures. Certains puits comme le puits W24, montre des concentrations en chlorures dépassant 5000 mg/l (Fig.53). Le puits W24, se localise dans la localité d'Echatt non loin de la côte. Cette concentration est probablement liée à la proximité de la mer dans cette zone.

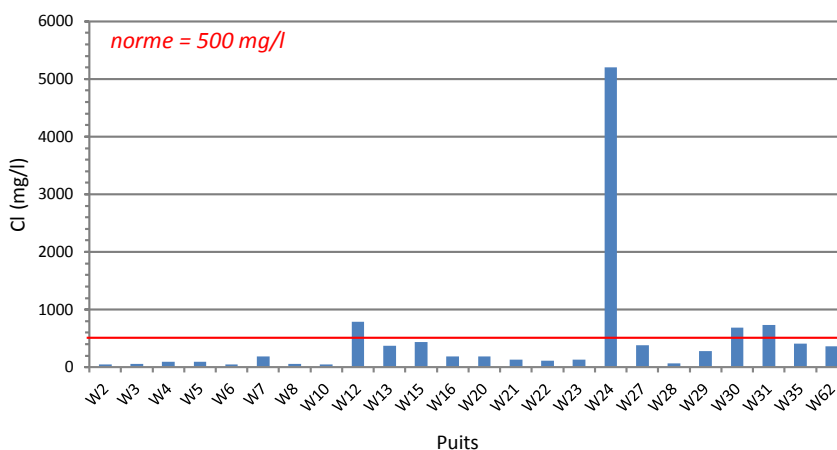


Fig. 52: Histogramme de variations des chlorures (mois de Décembre 2011).

✓ **Mois de Novembre 2016 :** Au cours de cette période nous remarquons une baisse considérable des concentrations. Le maximum des concentrations avoisine 1900 mg/l (Fig.54). Cette concentration caractérise les puits P11 et P21. Ces deux puits se localisent dans les zones Nord-ouest et l'Est aux lieux dits Chaouli Belkacem (P11) et Ben M'Hidi (P21) respectivement. Cette baisse des concentrations est liée à la dilution provoquée par les précipitations dans cette période (≈72mm).

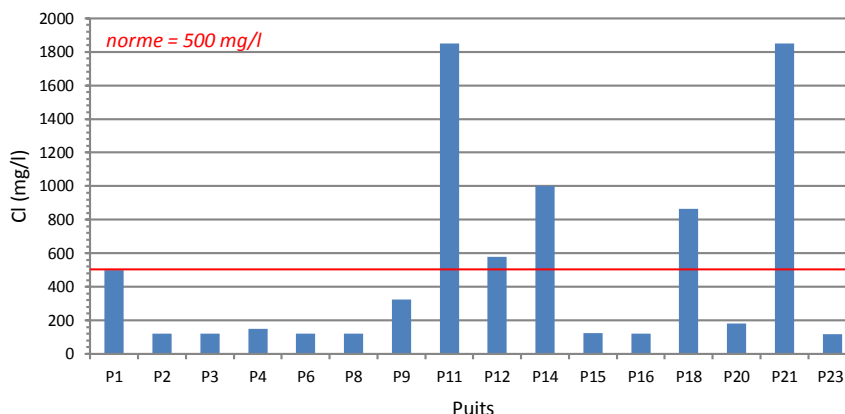


Fig. 53: Histogramme de variations des chlorures (mois de Novembre 2016).

3.2.5 Les sulfates

Les sulfates dans les eaux peuvent provenir de la dissolution des formations gypsifères, selon la réaction chimique suivante :



✓ **Mois de Décembre 2011 :** Les concentrations en sulfates varient entre 40,1 et 1140 mg/l (Fig.55), ce qui montre une richesse des eaux en sulfates. Cette particularité serait due à la dilution qui s'opère entre les eaux provenant de la zone amont (région de Guelma) et les

eaux de la plaine. Cependant nous remarquons que les puits présentant de fortes concentrations sont les (W30 et W31), situés à Chaouli belkacem, le puits (W24), implanté à Echatt et les puits W6 et W12 présents à Sidi m'barek et Ben M'Hidi respectivement.

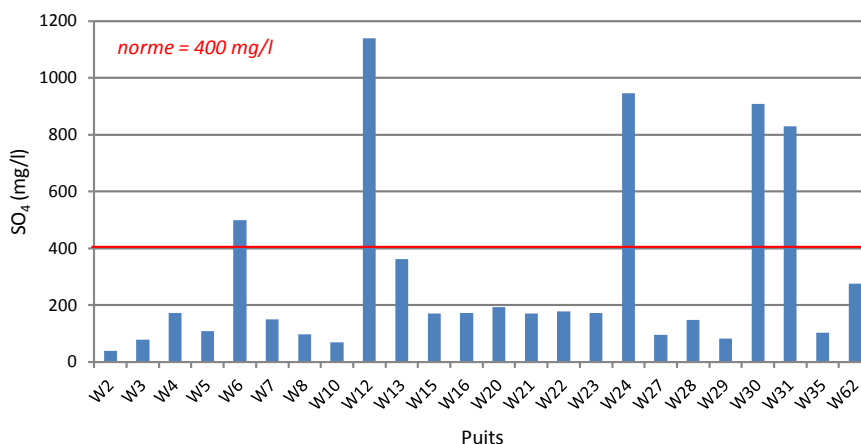


Fig. 54: Histogramme des variations des sulfates (mois de Décembre 2011).

✓ **Mois de Novembre 2016** : Comparativement aux résultats acquis au cours de la période Décembre 2011, on note une baisse significative des concentrations en sulfates (Fig.56). Cette baisse s'explique par le fait que les prélèvements ont été réalisés en période pluvieuse ($\approx 72\text{mm}$). Toujours et comparativement aux résultats acquis au mois de décembre 2011, nous remarquons que seul le P1, indique une concentration importante de l'ordre de 295 mg/l, ce puits se localise Dans la zone d'El Allaligue, à proximité de la confluence des Oued Meboudja et Seybouse.

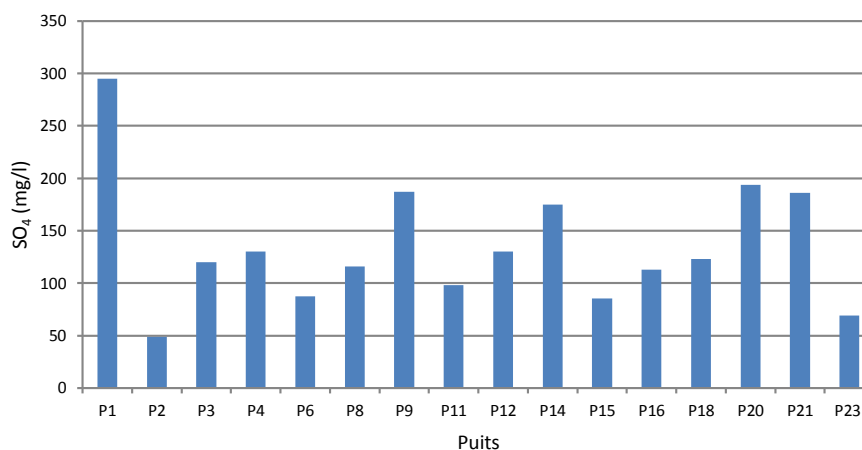
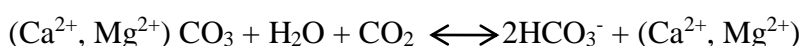


Fig. 55: Histogramme de variations des sulfates (mois de Novembre 2016).

3.2.6 Les Bicarbonates

Les bicarbonates résultent de la dissolution des roches carbonatées et gypsifères. Cette dissolution se fait selon l'équation suivante :



✓ **Mois de Décembre 2011** : Les teneurs maximales en bicarbonates, sont de l'ordre de 380 mg/l. L'observation de l'histogramme (Fig.57), montre une richesse des eaux au niveau de 13 puits dépassant les 200 mg/l. Cependant les puits W12, W13, W23, W30 et W62 situés aux régions de Ben M'Hidi, Zrizer, Cité Seybouse, Chaouli Belkacem et El Allaligue, indiquent des concentrations allant de 272,66 mg/l jusqu'à 380 mg/l au puits W13.

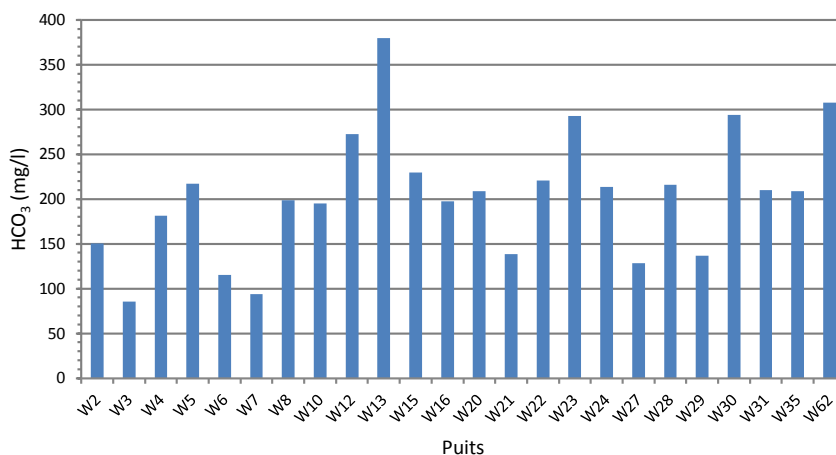


Fig. 56: Histogramme de variations des bicarbonates (mois de Décembre 2011).

✓ **Mois de Novembre 2016** : Les eaux analysées présentent des concentrations importantes en bicarbonates. Les teneurs ainsi déterminées dépassent les 600 mg/l cas du puits P12 (Fig.58). Ces mêmes avoisinent les 500 mg/l au niveau des puits P1, P2, P4, P18 et P20. Notons que seuls les puits P11, P21 et P23 présentent des concentrations relativement faibles ne dépassant pas 150 mg/l. Cet excès en bicarbonates est lié aux apports d'eau riches en bicarbonates générées par la dilution qui s'opère dans la partie amont caractérisée par la présence de formations calcaires.

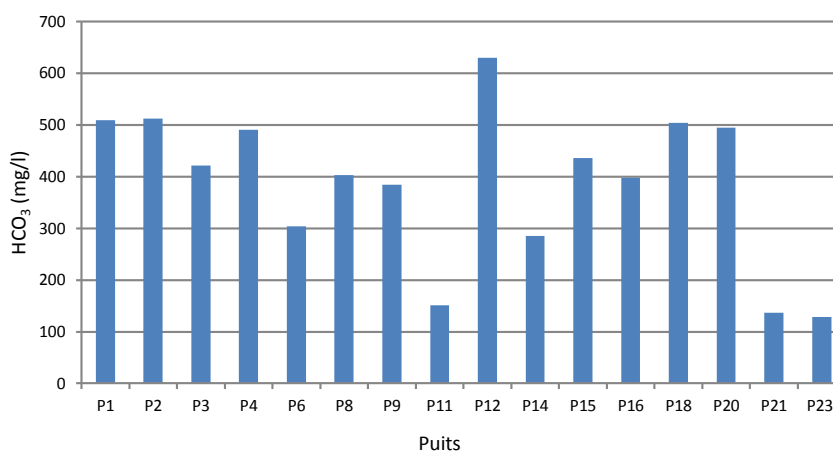


Fig. 57: Histogramme de variations des bicarbonates (mois de Novembre 2016).

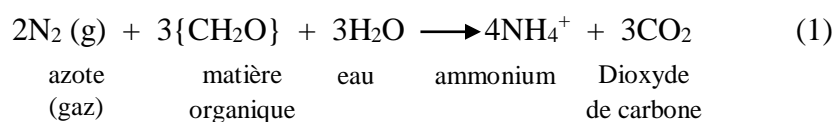
3.2.7 Nitrates

Les concentrations des nitrates à l'état naturel sont de l'ordre de 20 mg/l. Ainsi ils sont fréquents dans les eaux. Cependant, dans le cas de pollution aigue, il a accroissement des teneurs pouvant dépasser les normes requises. La détection des nitrates dépend du milieu réducteur oxydé et aller jusqu'à sont l'un des polluants les plus fréquents des eaux souterraines à faibles profondeurs. L'origine des nitrates dans l'eau est principalement due aux épandages des engrais, mais il peut avoir d'autres origines (urbaines, ..).

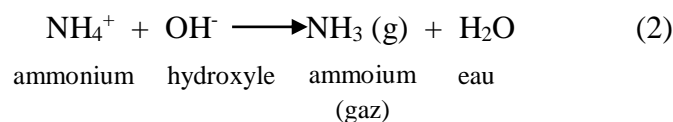
Dans la nature la transformation de l'azote dans l'atmosphère ou dans le sol, se fait selon les trois processus de base impliqués dans le recyclage de l'azote:

- la fixation de l'azote diatomique N₂ ;
- la nitrification ;
- la dénitrification.

▪ La **fixation de l'azote** correspond à la conversion de l'azote atmosphérique en azote utilisable par les plantes et les animaux. Elle se fait par certaines bactéries qui vivent dans les sols ou dans l'eau et qui réussissent à assimiler l'azote diatomique N₂. Il s'agit en particulier des cyanobactéries et de certaines bactéries vivant en symbiose avec des plantes (entre autres, des légumineuses). La réaction chimique type est:

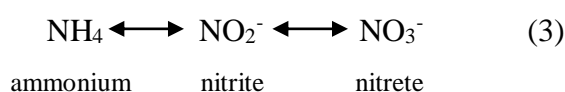


Dans les sols où le pH est élevé, l'ammonium se transforme en ammoniac gazeux:

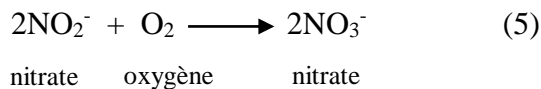
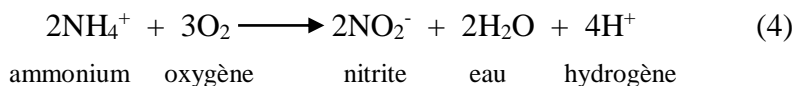


La réaction nécessite un apport d'énergie de la photosynthèse (cyanobactéries et symbiotes de légumineuses). Cette fixation tend à produire des composés ammoniacés tels l'ammonium NH₄⁺ et son acide conjugué l'ammoniac NH₃. Il s'agit ici d'une réaction de réduction qui se fait par l'intermédiaire de substances organiques notées {CH₂O} dans l'équation (1).

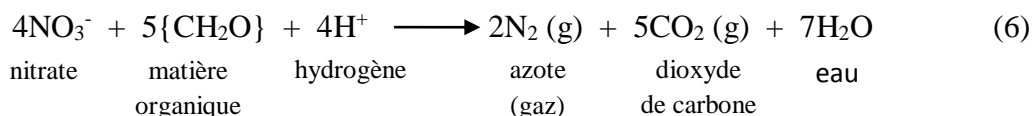
▪ La **nitrification** transforme les produits de la fixation (NH₄⁺, NH₃) en NO_x (soient NO₂⁻ et NO₃⁻), des nitrites et nitrates. C'est une réaction d'oxydation qui se fait par catalyse enzymique reliée à des bactéries dans les sols et dans l'eau. La réaction en chaîne est de type:



soit:



▪ La **dénitrification** retourne l'azote à l'atmosphère sous sa forme moléculaire N₂, avec comme produit secondaire du CO₂ et de l'oxyde d'azote N₂O, un gaz à effet de serre qui contribue à détruire la couche d'ozone dans la stratosphère. Il s'agit d'une réaction de réduction de NO₃⁻ par l'intermédiaire de bactéries transformant la matière organique. La réaction est de type :



L'activité humaine contribue à l'augmentation de la dénitrification, entre autres, par l'utilisation des engrais qui ajoutent aux sols des composés ammoniacués (NH₄⁺, NH₃) et des nitrates (NO₃⁻).

✓ **Mois de Décembre 2011** : L'observation de l'histogramme (Fig.59), indique une richesse des eaux en nitrates au niveau de cinq (05) puits, c'est le cas des puits W7, W21, W30, et surtout les puits W12 et W31 où les nitrates atteignent des concentrations très élevées. Ces puits se localisent à Ben M'Hidi (W12), à Chaouli Belkacem (W30 et W31). Les fortes concentrations sont probablement liées à l'utilisation abusive des engrais de type NPK, bons pour la fraise. Dans le secteur de Ben M'Hidi, les cultures sous serre sont utilisées c'est le cas particulièrement de la fraise.

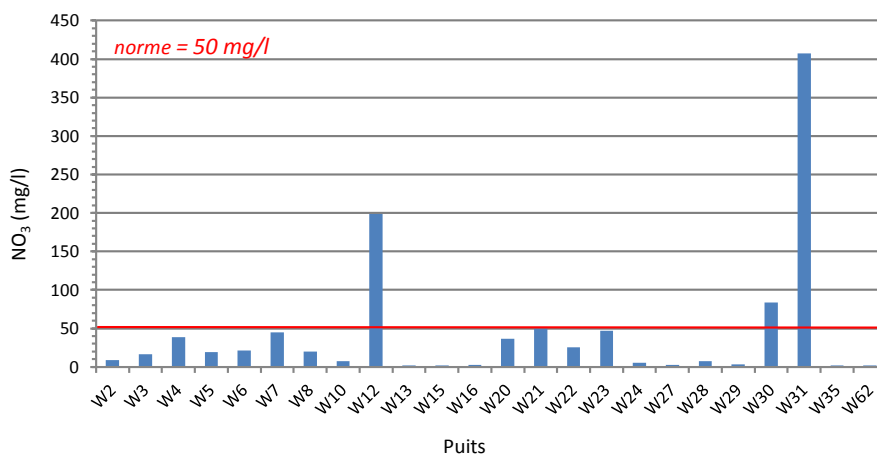


Fig. 58: Histogramme de variations des nitrates (mois de Décembre 2011).

✓ **Mois de Novembre 2016** : L'histogramme réalisé (Fig.60), montre des concentrations faibles indiquant une absence de pollution par les nitrates.

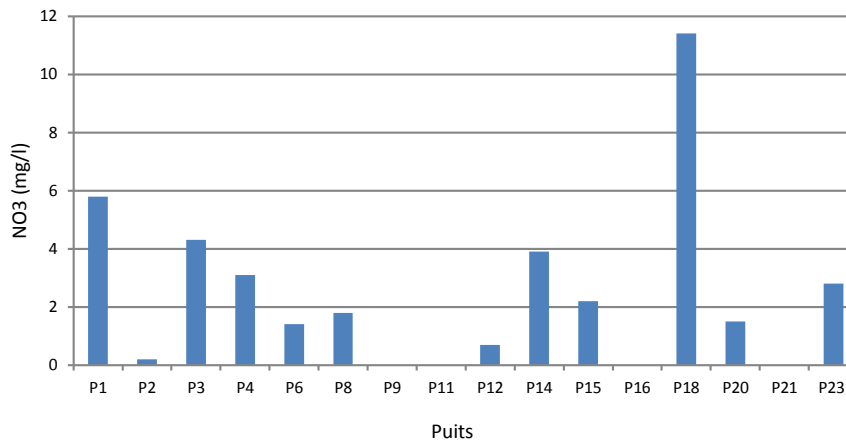


Fig. 59: Histogramme de variations des nitrates (mois de Novembre 2016).

3.2.8 Potassium

Le potassium est assez abondant sur la terre, mais peu fréquent dans les eaux. En effet, il est facilement adsorbé et recombéné dans les sols, sur les argiles notamment. Les sources principales de potassium sont les roches métamorphiques, les roches cristallines.

✓ **Mois de Décembre 2011** : Au cours de cette période on remarque que quelques points d'eau sont riches en potassium (Fig.61), c'est le cas des puits W7 et W8 situés à Sidi M'Barek, les puits W12 et W27 à Ben M'Hidi, le puits W13 à Zrizer, le puits W20 à Hadjaj, les puits W21, W22 et W23 implantés au niveau de la Cité Seybouse, le puits W24 à Echatt, les puits W30 et W31 à Chaouli Belkacem. Nous remarquons que les fortes teneurs en potassium, sont liées aux engrais de type NPK, utilisées par les agriculteurs au cours de cette période.

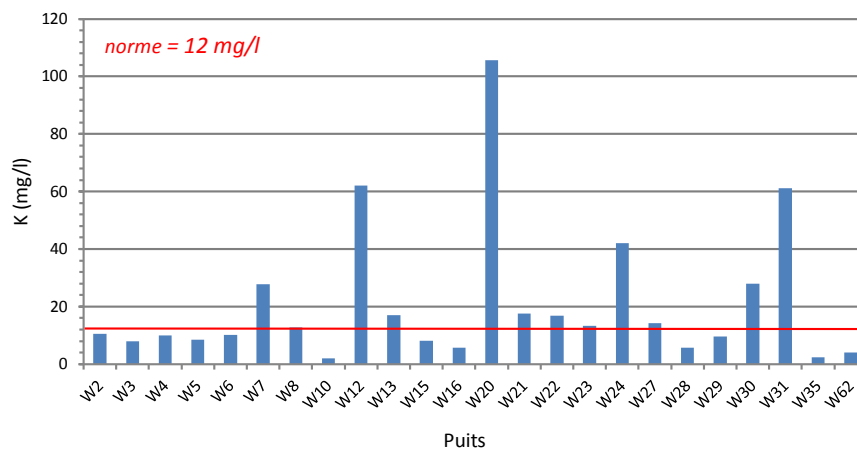


Fig. 60: Histogramme de variations du potassium (mois de Décembre 2011).

✓ **Mois de Novembre 2016 :** Comparativement aux concentrations déterminées en Décembre 2011, celles déterminées en Novembre 2016, sont moins élevées (Fig.62), la concentration maximale déterminée est de l'ordre de 45,6 mg/l au lieu de 105 mg/l (Décembre 2011). L'observation de l'histogramme montre que les quatre puits suivants : le puits P2 à Cité Seybouse, le puits P3 situé à Sidi Salem, le puits P4 situé à Echatt et le puits P6 situé à Sidi M'Barek, sont les riches en potassium. On note une baisse des concentrations en potassium par rapport à la campagne de Décembre 2011.

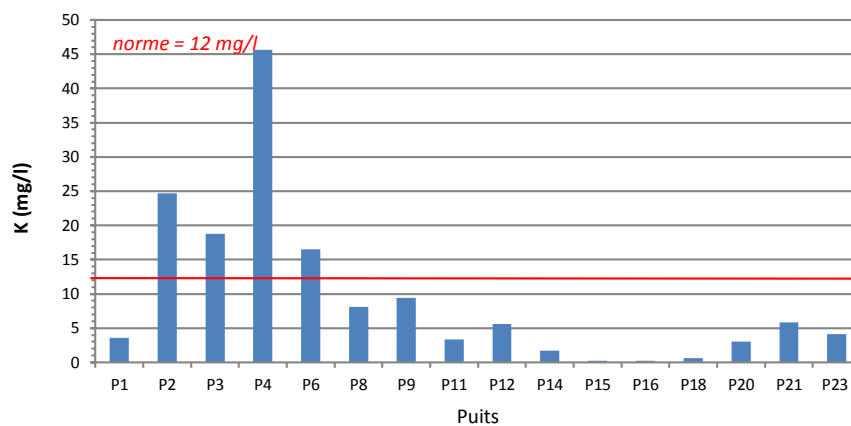


Fig. 61: Histogramme de variations du potassium (mois de Novembre 2016).

4 Recherche d'une probable intrusion marine

La zone d'étude est située sur le littoral de la ville d'Annaba et se prolonge vers la ville d'Echatt (wilaya d'El Tarf). Cette position privilégie un probable échange entre les eaux de la nappe et les eaux de la mer. Pour mettre en évidence cette éventuelle relation, nous avons utilisé le diagramme de Piper.

4.1 Diagramme de Piper

Le diagramme de Piper donne la tendance des faciès chimique des eaux. Il permet de visualiser les familles des eaux en fonction de leurs tendances.

✓ **Mois de Décembre 2011** : L'observation du diagramme réalisé (Fig.63), montre la présence de trois familles d'eau :

La première caractérisant les eaux hyper chlorurées calciques ou hyper sulfatée calcique, cette famille est constituée de cinq échantillons ;

La deuxième famille caractérisant les eaux chlorurées ou sulfatées calciques ou magnésiennes, cette famille est la plus importante et est constituée de 10 échantillons ;

La troisième et la quatrième famille, contiennent chacune un (01) échantillon.

D'après l'analyse du diagramme, on remarque que les eaux calciques dominent au cours de cette période d'analyse.

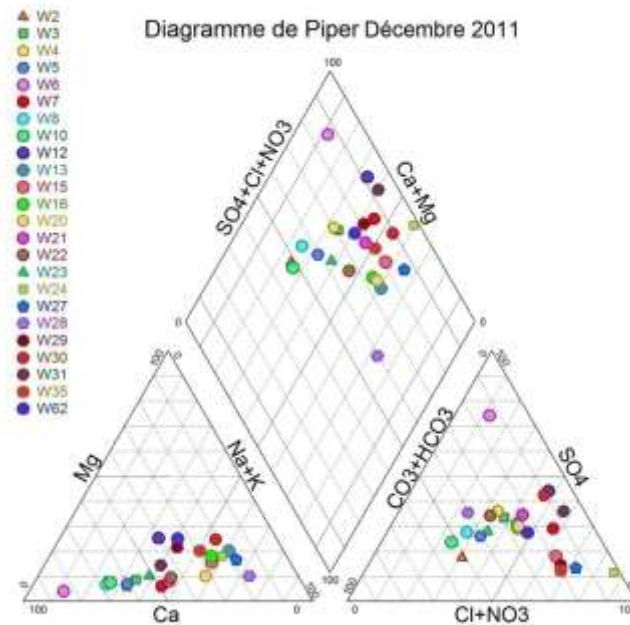


Fig. 62: diagramme de Piper (mois de Décembre 2011).

✓ **Mois de Novembre 2016** : L'observation du diagramme réalisé (Fig.64), montre la présence d'une seule famille, celle des eaux hyper chlorurées ou sulfatées calciques. La présence du calcium est liée au contact de l'eau avec la roche allant vers un enrichissement des eaux en calcium.

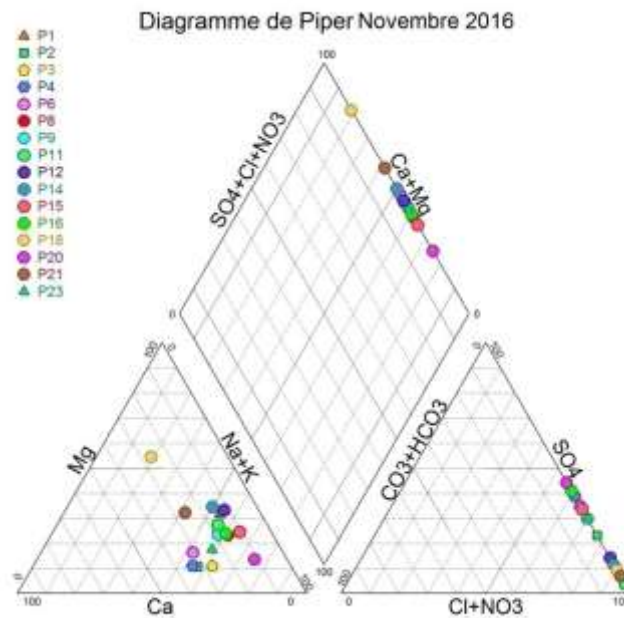


Fig. 63: Diagramme de Piper (Mois de Novembre 2016).

Entre les deux périodes considérées, on remarque qu'on passe d'une eau caractérisée par une qualité hétérogène lors de la première vers une qualité homogène (eaux chlorurées ou sulfatées calciques). Ce changement, serait, liée au fait qu'au cours de cette période la recharge de la nappe est importante et les apports se font à partir de la zone amont dont les eaux sont riches en calcium et dans ces cas même (bordure de mer), l'apport est supérieur aux extractions par pompage ralentie les échanges entre la mer et la nappe.

En fait, l'eau des nappes alluviales a une qualité qui dépend de celle de la nappe qui l'approvisionne et de celle des Oueds.

5 Origine de la salinité des eaux

En zone côtière, et en cas d'exploitation intensive il est logique que la salinisation des eaux soit provoquée par l'intrusion marine, cependant au niveau de la zone d'étude, on dénombre d'autres sources de salinisation. En effet les apports se faisant à partir de la zone amont, indiquent de fortes concentrations en calcium, ce qui laisse supposer l'absence d'une intrusion marine franche particulièrement au cours de la période relative au mois de novembre 2016.

L'échange mer-nappe, ne se fait pas au cours de cette période pour les deux raisons suivantes :

- au cours de cette période les précipitations sont importantes, ce qui implique une recharge importante de la nappe se traduisant par un apport en eau douce, repoussant ainsi les eaux salées vers la mer ;
- la seconde cause réside dans le fait que les cultures pratiquées au niveau de la zone sont des cultures estivales (Melons, Pastèques, Tomates industrielles, ...), donc au cours de la

période la sollicitation de la nappe reste faible contrairement à la période estivale où l'irrigation est importante d'où un probable déséquilibre de l'interface eau douce-eau salée.

6 Mécanisme de l'intrusion marine

Le principe d'intrusion saline a été décrit au tournant du dixième siècle (1901) par Ghyben et Herzberg, à partir d'observations dans des aquifères des côtes de la mer du Nord aux Pays-Bas et sur les côtes septentrionales de la mer Baltique en Allemagne. De manière simplifiée, la position de l'interface eau douce/eau salée peut être estimée en considérant les rapports de la masse volumique de l'eau douce et de l'eau salée. Considérant un point à la surface de la nappe d'eau douce dans le réservoir souterrain, appelé aquifère (roche qui contient de l'eau et permet son écoulement), l'interface se situe sous le niveau de la mer, à une profondeur égale à quarante fois l'élévation du niveau de la nappe au-dessus du niveau de la mer (Fig.65a). Lors de l'exploitation d'un forage dans un aquifère côtier, un cône de rabattement se forme au droit du forage au niveau de la surface de la nappe, qui modifie l'interface entre l'eau douce et l'eau salée. Selon le principe de Ghyben-Herzberg, un rabattement d'un mètre provoqué par un pompage entraîne une remontée de l'eau salée de quarante mètres (Fig.65b) (Dorfliger, 2013).

L'équation de Ghyben-Herzberg s'écrit sous la forme suivante :

$$H = h \frac{\rho}{\rho_s - \rho}$$

Où ρ est la masse volumique de l'eau douce (1g/cm^3);

ρ_s : est la masse volumique de l'eau salée (en moyenne $1,025\text{ g/cm}^3$).

H : est la profondeur du biseau sous le niveau marin et h est la hauteur piézométrique mesurée à partir du niveau marin

Pour ces valeurs de densité, la profondeur de l'interface sous le niveau de la mer s'écrira sous la forme :

$$H \approx 40h$$

Cette expression montre qu'en fonction de la différence de densité des deux liquides, la position et la profondeur de l'interface est déterminée par la hauteur d'eau douce au-dessus du niveau moyen de la mer (hauteur piézométrique de la nappe).

Cependant, cette formule doit être utilisée avec précaution car elle suppose des conditions hydrostatiques et un régime permanent très rarement réunis dans la nature.

La situation réelle des aquifères côtiers est plus complexe et doit être décrite en considérant un espace tridimensionnel et les apports ou extractions d'eau, qui sont variables dans le temps et

l'espace. Les propriétés physiques du milieu, ainsi que les écoulements souterrains créent une zone de mélange, dont les caractéristiques et la géométrie sont influencées par les hétérogénéités du milieu souterrain. En fonction de la géométrie et de la disposition des terrains, plusieurs aquifères peuvent être superposés, ainsi que plusieurs biseaux salés (Cf. Schéma suivant).

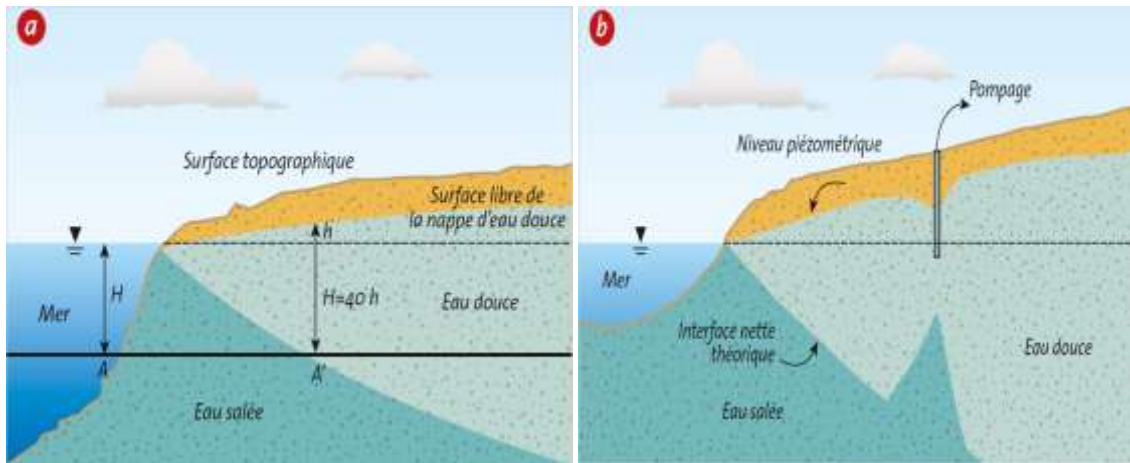


Fig. 64: Mise en évidence du mécanisme d'intrusion marine, a) Coupe schématique perpendiculaire au littoral selon le principe de Ghyben-Herzberg ; b) Impact d'un pompage sur l'interface eau douce/eau salée selon le principe de Ghyben-Herzberg (Dorfliger, 2013).

7 Apports de la statistique pour l'étude des processus hydrogéochimiques

7.1 L'analyse en composantes principales ou (ACP)

L'ACP est une méthode d'analyse statistique multidimensionnelle. Il s'agit d'une méthode factorielle et linéaire qui traite des caractères numériques jouant tous le même rôle. Chaque échantillon d'eau d'une campagne de prélèvement constitue une unité statistique (U.S). Les différents paramètres soumis à l'analyse constituent les variables qui caractérisent ces unités statistiques. Le but recherché est de déterminer la structure des variables, leur répartition ainsi que leur implication. Pour réaliser cette étude nous avons utilisé comme variables les teneurs en éléments majeurs (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^-), ainsi que la conductivité électrique (CE), la température (T°) et le PH, en utilisant le logiciel STATISTICA 8.

7.1.1 Mois de Décembre 2011

Au cours de cette campagne la matrice des données comporte onze (11) variables et 24 individus. Nous avons obtenus 80, 21 % des renseignements pour les axes F1 et F2 (Tab.24).

Tab. 24: Variance des quatre premiers axes factoriels.

Axe	Valeurs propres	Pourcentage de variance	Pourcentage cumulé
F1	5,71	63,48	63,48
F2	1,51	16,73	80,21
F3	0,97	10,79	91
F4	0,53	5,87	96,87

7.1.1.1 La matrice de corrélation

La matrice de corrélation (Tab.25), montre qu'il existe des corrélations positives entre les éléments considérés. Le choix du coefficient de corrélation (R) est en fonction du nombre des individus traités, pour notre cas nous avons 24 échantillons donc le coefficient « R » accepté est de 0,68, ce qui nous permet de dégager des associations montrées dans le (Tab.26).

Tab. 25: Matrice des corrélations des paramètres physico-chimiques.

	CE	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁺	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	T°	PH
CE	1										
K ⁺	0,41	1									
Ca ²⁺	0,92	0,46	1								
Mg ²⁺	0,96	0,37	0,87	1							
Na ⁺	0,97	0,29	0,80	0,94	1						
Cl ⁻	0,95	0,27	0,80	0,90	0,98	1					
SO ₄ ²⁺	0,78	0,52	0,87	0,83	0,65	0,58	1				
HCO ₃ ⁻	0,24	0,12	0,19	0,36	0,24	0,12	0,37	1			
NO ₃ ⁻	0,32	0,53	0,52	0,24	0,09	0,05	0,61	0,11	1		
T°	0,30	0,11	0,13	0,35	0,34	0,26	0,18	0,43	0,03	1	
PH	-0,04	-0,15	-0,04	0,03	-0,04	-0,03	-0,07	0,28	-0,12	0,23	1

L'observation du précédent tableau permet de déterminer les associations suivantes :

Tab. 26: Les associations des coefficients R acceptés.

Couple	Valeur de R	Couple	Valeur de R	Couple	Valeur de R
Ca ²⁺ _ Mg ²⁺	0,87	Mg ²⁺ _ Na ⁺	0,94	CE _ Ca ²⁺	0,92
Ca ²⁺ _ SO ₄ ²⁺	0,87	Mg ²⁺ _ Cl ⁻	0,9	CE _ Mg ²⁺	0,96
Ca ²⁺ _ Na ⁺	0,8	Mg ²⁺ _ SO ₄ ²⁺	0,83	CE _ Na ⁺	0,97
Ca ²⁺ _ Cl ⁻	0,8	Na ⁺ _ Cl ⁻	0,98	CE _ Cl ⁻	0,95
				CE _ SO ₄ ²⁺	0,78

7.1.1.2 Analyse du cercle ACP

L'observation du cercle ACP (Fig.66), formé par les axes F1F2 (80, 21 % de l'information), montre une opposition entre les eaux fortement minéralisées et les eaux faiblement minéralisées. Selon l'axe F1 (63,48 % de l'information), nous remarquons un regroupement des éléments chimiques, traduisant une hétérogénéité de la composition chimique des eaux. Nous remarquons que le pH, n'intervient pas.

Dans le détail, nous remarquons que la partie négative de l'axe F1, contient les variables (Cl^- , Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , SO_4^{2-}), ces dernières sont l'origine de la minéralisation observée d'où la présence de la conductivité électrique sur cet axe.

En observant l'axe F2 (16,73%), on note une opposition entre les eaux sulfatées calciques et les eaux chlorurées sodiques. Cette répartition montre deux origines de la salinité.

Nous remarquons que le potassium et les nitrates évoluent ensemble, confirmant ainsi leur origine exogène liée à l'utilisation des engrais de type NPK.

Les bicarbonates et surtout le pH, n'interviennent pas dans l'acquisition du chimisme des eaux au cours de cette période. Le fait que le pH, se démarque des autres éléments peu être due au mode de mesure (appareil).

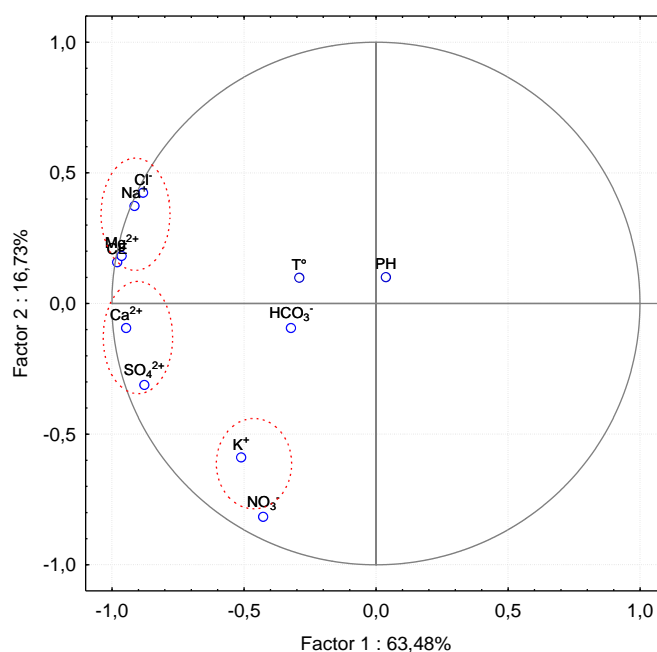


Fig. 65: Cercle de corrélation des variables dans le plan formé par l'axe F1 et l'axe F2 (Décembre 2011).

7.1.1.3 Analyse de l'espace des individus

La projection des individus sur le plan factoriel F1F2 (Fig.67), montre que l'axe F1 est défini par les eaux minéralisées à fortement minéralisées c'est le cas des puits W30, W12, W31 et W24. Cette minéralisation peut avoir deux origines :

- les apports issus de la zone amont caractérisés par les eaux sulfatées calciques,
- les échanges nappe-mer, donnant une eau chlorurée sodique.

L'axe F2, dans sa partie négative, montre une pollution anthropique des eaux liée à l'utilisation des engrais de type NPK. Confirmée par la présence des nitrates et du potassium dans les eaux des puits W20, W12 et W31.

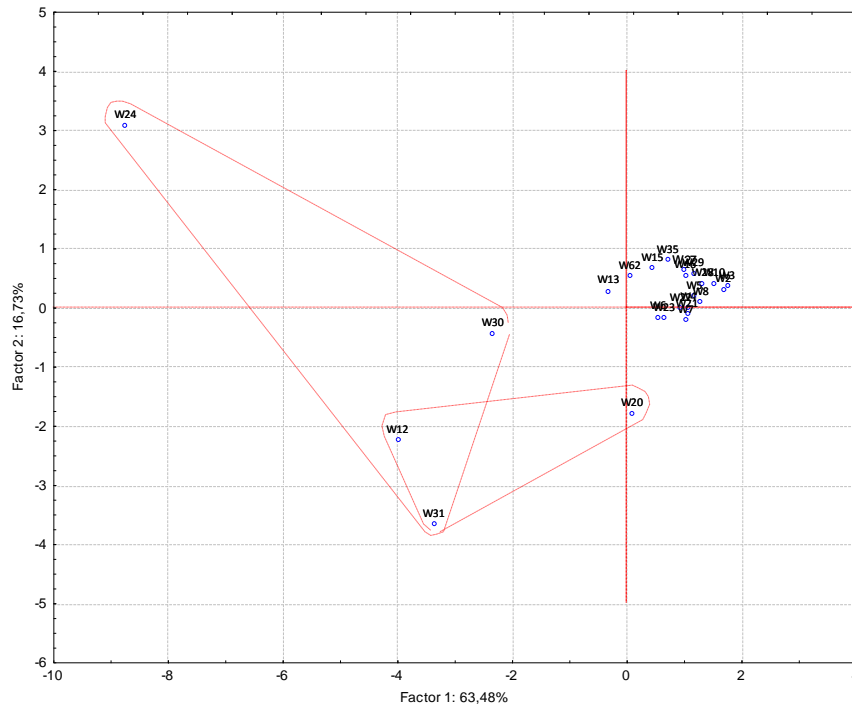


Fig. 66: Projection des individus sur le plan formé par l'axe F1 et l'axe F2 (Décembre 2016).

7.1.1.4 Carte des familles des eaux (Décembre 2011)

La carte de répartition des familles des eaux (fig.68), montre que les eaux polluées par les engrais se situent au centre de la plaine où l'irrigation est intensément pratiquée.

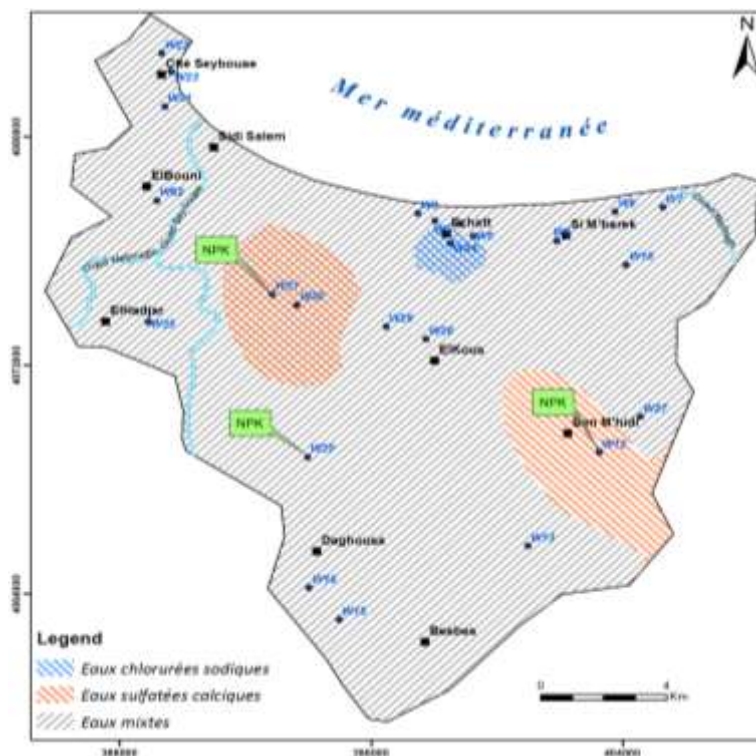


Fig. 67: Carte de répartition des familles des eaux (ACP mois de Décembre 2011).

7.1.2 Mois de Novembre 2016

Dans cette campagne, le tableau de données comporte sept (07) variables avec 16 individus (U.S), prélevés d'une campagne d'échantillonnage répartis sur la zone d'étude. Nous avons obtenus 97,82 % de l'information pour un total de quatre axes. Les axes F1F2, donnent 83,55 % des renseignements (Tab.27).

Tab. 27: Variance des quatre premiers axes factoriels

Axes	Valeurs propres	Pourcentage de variance	Pourcentage cumulé
F1	4,65	66,38	66,38
F2	1,20	17,17	83,55
F3	0,64	9,08	92,63
F4	0,36	5,20	97,82

7.1.2.1 La matrice de corrélation

L'observation du (Tab.28) relatif à la matrice des corrélations, montre deux types de corrélations. La première directe et la seconde inverse. Selon le nombre d'échantillon pris en considération, le coefficient de corrélation accepté est 0,79. Cette valeur de r, nous permet de dégager les associations citées dans le (Tab.29).

Tab. 28: Matrice des corrélations.

	CE	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁺	HCO ₃ ⁻
CE	1,00						
Ca ²⁺	0,91	1,00					
Mg ²⁺	0,89	0,83	1,00				
Na ⁺	0,84	0,59	0,64	1,00			
Cl ⁻	0,99	0,88	0,88	0,85	1,00		
SO ₄ ²⁺	0,30	0,16	0,32	0,39	0,23	1,00	
HCO ₃ ⁻	-0,46	-0,42	-0,23	-0,36	-0,51	0,16	1,00

Tab. 29: Les associations des coefficients R acceptés.

Couple	Valeur de R	Couple	Valeur de R
CE - Ca ²⁺	0,91	Ca ²⁺ - Mg ²⁺	0,83
CE - Mg ²⁺	0,89	Ca ²⁺ - Cl ⁻	0,88
CE - Na ⁺	0,84	Mg ²⁺ - Cl ⁻	0,88
CE - Cl ⁻	0,99	Na ⁺ - Cl ⁻	0,85

7.1.2.2 Analyse du cercle ACP

L'observation du cercle ACP (Fig.69), formé par les axes F1F2 (83,55 %), Selon l'axe F1, on note une compétition entre les eaux fortement minéralisées et les eaux riches en bicarbonates. La minéralisation observée est particulièrement liée aux chlorures qui s'accompagnent soit de

calcium ou de sodium. Ce mélange calcium, sodium est favorisé probablement par l'échange de base qui se produit entre l'eau et la roche. Les sulfates se démarquent et n'interviennent pas directement dans la minéralisation observée.

Selon l'axe F2, les eaux bicarbonatées ou sulfatées magnésiennes ou sodique, s'opposent aux eaux chlorurées calciques.

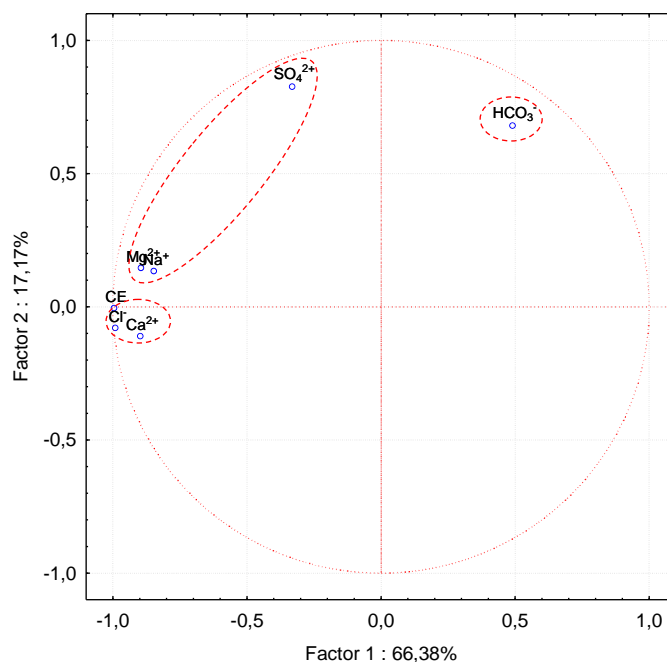


Fig. 68: de corrélation des variables dans le plan formé par l'axe F1 et l'axe F2 (Novembre 2016).

7.1.2.3 Analyse de l'espace des individus

La projection des individus sur le plan factoriel F1F2 est présentée dans la (Fig.70).

Pour expliquer les origines de la minéralisation observée, nous nous sommes intéressés à la répartition des puits au niveau de la zone d'étude (Fig.71). Ces puits se localisent au niveau de deux zones :

- la première famille constituée par les P2, P3, P4, P6 et P23, tous ces points sont situés sur la zone littorale et leur minéralisation est probablement liée à la présence de la mer.
- la deuxième famille, contenant les puits P8, P9, P15, P16 et P20, occupant la zone Sud et Sud-est de la plaine en amont de la zone marécageuse de Boukhemira, qui s'étend jusqu'à la commune d'Echatt et joue le rôle de barrière bloquant les échanges entre les eaux de la mer et les eaux de la nappe.

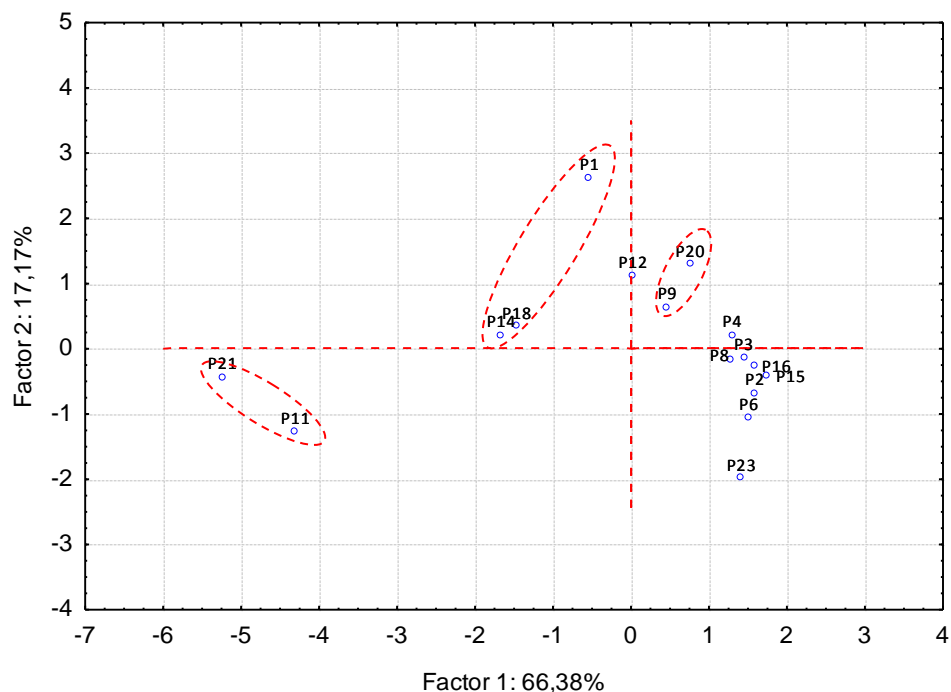


Fig. 69: Projection des individus sur le plan formé par l'axe F1 et l'axe F2 (Novembre 2016).

7.1.2.4 Carte des familles des eaux (Novembre 2016)

La carte réalisée (Fig.71), donne un aperçu sur les familles déterminées et leurs emplacements au niveau de la plaine.

On note que la famille des eaux appelées eaux mixtes, c'est-à-dire sans domination d'une famille particulière, occupent le flan Est en grande partie et une petite partie du flan sud de la plaine. Entre ces deux flans interfère les autres familles (bicarbonatées, chlorurées et sulfatées), ces familles occupent le centre de la plaine. La famille des eaux sulfatées sodiques ou magnésiennes occupe la zone Sud-ouest de la plaine, la qualité des eaux de cette famille est probablement liée à l'interaction des eaux et des argiles, cette famille est présente dans la zone du lac Fetzara.

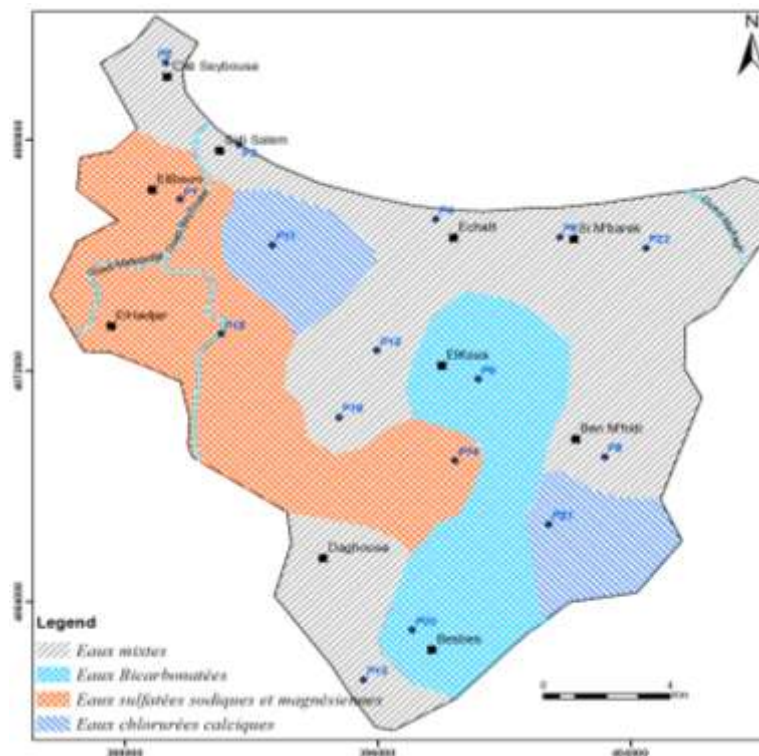


Fig. 70: Carte de répartition des familles des eaux (ACP mois de Novembre 2016).

L'analyse en composantes principales, nous a montré la présence d'affinité ente les familles d'eau pouvant provoquer la salinité des eaux observée au cours des périodes considérées. Pour déterminer l'apport de chaque élément chimique dans l'acquisition de la salinité, nous allons déterminer les relations liant les éléments chimiques deux à deux en optant pour la méthode des rapports.

8 Apports de la méthode des rapports caractéristiques

Il est admis qu'un hydrologue qui essaie de déchiffrer les conditions hydrogéologiques peut utiliser les modèles hydrochimiques qui sont le résultat d'un échange cationique. À mesure que les aquifères deviennent de plus en plus exploités et pollués, la qualité de l'eau le long des lignes d'écoulement changera, mais en raison de l'échange cationique, la composition de l'eau peut encore refléter des aspects de la qualité de l'eau antérieure. Dans des conditions chimiques en régime permanent, la composition d'un échangeur de cations sera en équilibre avec les eaux souterraines résidentes. Lorsque la composition de l'eau change en raison de la pollution ou de l'acidification, ou en raison d'une interface en mouvement eau douce-eau salée, l'échangeur de cations réajuste sa composition aux nouvelles concentrations des eaux souterraines. Les rapports caractéristiques sont un moyen d'interprétation utilisé dans plusieurs études. L'utilisation des diagrammes croisés, constituent une bonne approche surtout quand on a des eaux à composition chimique hétérogène. Cette méthode, nous permet de déterminer les éléments à l'origine de la composition chimique.

8.1 Mois de Décembre 2011

Le diagramme (Cl / Na)

L'observation du diagramme réalisé (Fig.72), montre un alignement des points selon la droite de pente 1, cet alignement montre que les deux éléments ont presque la même origine. Cependant dans le détail, on note que les concentrations atteignent 40 meq/l, ramenés aux concentrations exprimées en mg/l, nous obtenons : Cl (meq/l) = 40 donne 1220 mg/l et pour le Na (meq/l) = 40 donne 920 mg/l. Ces concentrations sont très loin de celle des eaux de mer qui avoisinent pour les chlorures (19260 mg/l) et pour le sodium (10680 mg/l).

Les concentrations des eaux de mer nous permettent de considérer les eaux de la région comme étant des eaux douces légèrement salées.

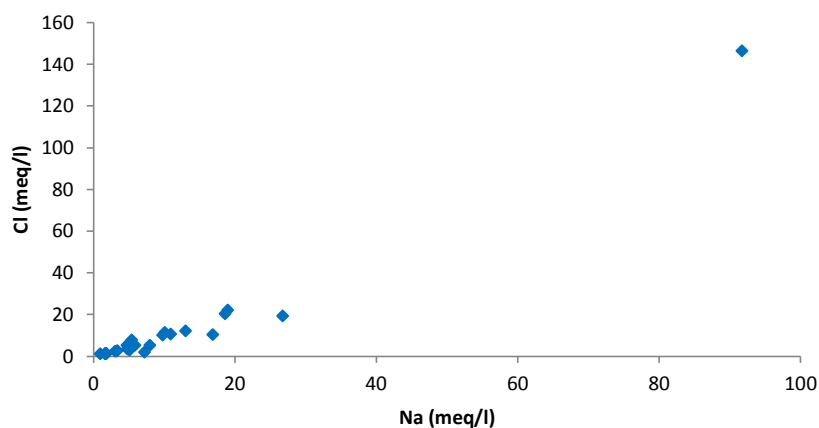


Fig. 71: Relation entre Na vs Cl (mois de Décembre 2011).

8.1.1 Le diagramme {Ca / (HCO₃+SO₄) vs Na / Cl}

L'observation du diagramme réalisé (Fig.73), indique la présence de trois (03) familles se répartissant comme suit:

- une première famille constituée de 3 échantillons et caractérisée par la domination des anions ($R < 1$), ainsi les bicarbonates, les sulfates et les chlorures dominant ;
- la seconde famille importante et montrant la domination du calcium par rapport aux bicarbonates et aux sulfates ;
- la troisième famille indique une richesse des eaux en sodium dont l'origine est liée aux échanges de base. Ainsi l'eau libère le calcium et capte le sodium issu des argiles.

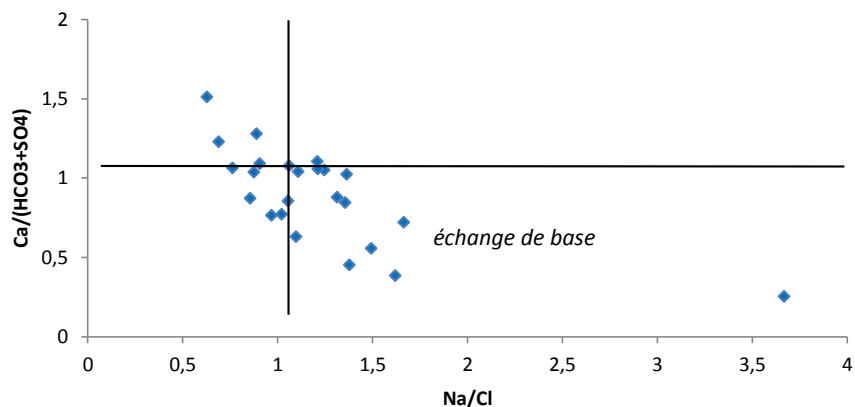


Fig. 72: Relation entre $Ca / (HCO_3+SO_4)$ vs Na / Cl (mois de Décembre 2011).

8.1.2 Le diagramme (Ca / HCO₃)

L'observation du diagramme réalisé (Fig.74), montre deux tendances:

- la première démontrant la même origine du calcium et des bicarbonates et concerne les échantillons dont les concentrations atteignent un maximum de 7 meq/l. Dans ce cas les deux éléments proviendraient des carbonates ;
- la seconde où le calcium se démarque des bicarbonates. Ainsi le calcium proviendrait de la dissolution probable des formations salifères.

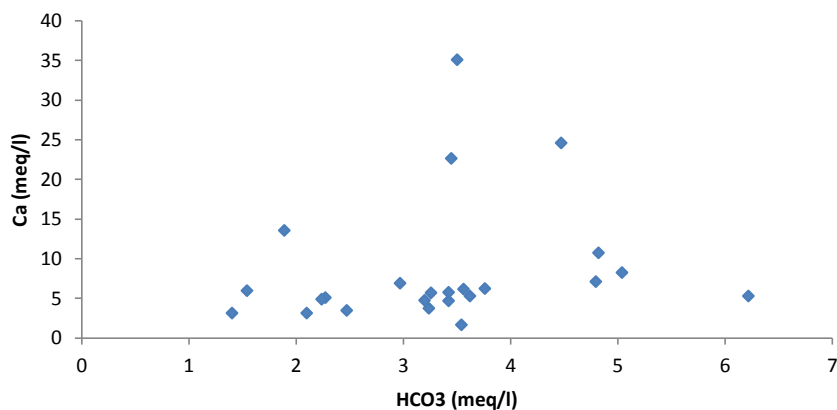


Fig. 73: Relation Ca vs HCO₃ (mois de Décembre 2011).

8.1.3 Le diagramme {Ca / (HCO₃+SO₄)}

On note un alignement des échantillons (Fig.75), ceci indique que la présence du calcium est liée aux carbonates et aux formations salifères. Cependant quelques échantillons ne suivent pas l'alignement indiquant que les bicarbonates et les sulfates peuvent être associés aux autres éléments tel que le sodium et à un degré moindre le magnésium.

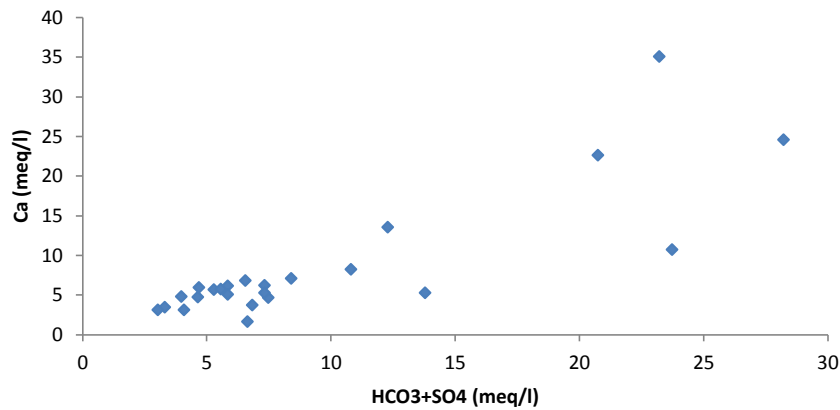


Fig. 74: Relation Ca vs (HCO₃ + SO₄) (mois de Décembre 2011).

8.2 Mois de Novembre 2016

8.2.1 Le diagramme (Cl / Na)

L'observation du diagramme (Fig.76), indique la présence de deux tendances ;

- la première montrant un léger alignement de points montrant une même origine des deux éléments considérés, à ce stade les eaux sont douces ;
- la seconde où les deux éléments se démarquent l'un de l'autre montrant ainsi que les deux éléments n'ont pas la même origine.

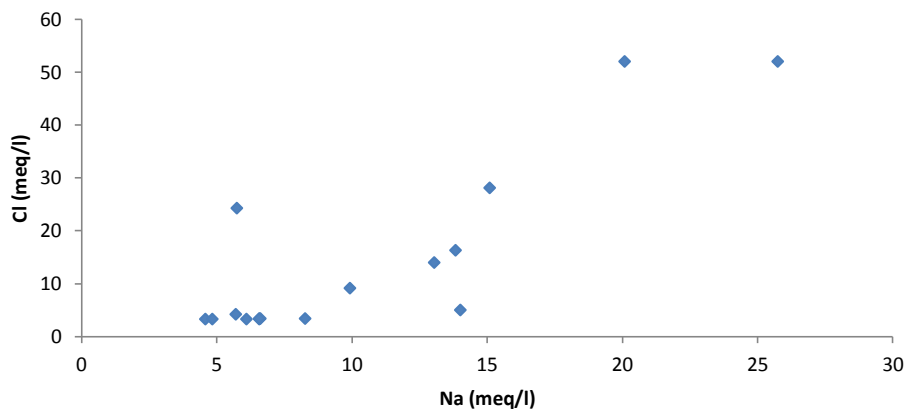


Fig. 75: Relation Cl vs Na (mois de Novembre 2016).

8.2.2 Le diagramme {Ca / (HCO₃+SO₄) vs Na / Cl}

L'observation de la figure suivante (Fig.77), montre une compétition entre deux familles :

- la première comprenant quatre échantillons et montrant une domination anions, de ce fait les eaux sont riches en chlorures, bicarbonates et sulfates ;
- la seconde déterminée par une domination du sodium traduisant ainsi un échange de base entre le calcium et le sodium. Ce dernier accompagne les bicarbonates et les sulfates.

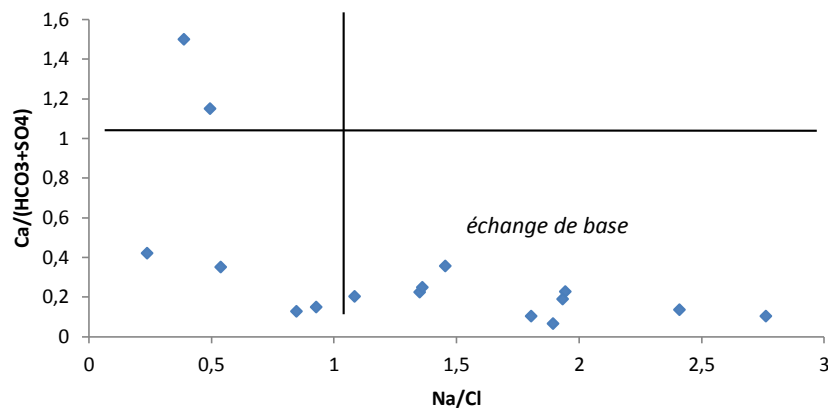


Fig. 76: Relation $Ca / (HCO_3+SO_4)$ vs Na/Cl (mois de Novembre 2016).

8.2.3 Le diagramme (Ca / HCO₃)

L'observation du diagramme réalisé (Fig. 78), indique la présence de trois tendances :

- la première où les points s'alignent selon une droite, démontrant que les eux éléments ont la même origine, ils seraient issus de la dissolution des carbonates ;
- la seconde famille se caractérisant par un excès de calcium dans les eaux. Dans ce cas les concentrations en bicarbonates avoisinent 5 meq/l, alors le calcium atteint plus de 14 meq/l,
- la troisième famille, est la plus importante et montre un excès de bicarbonates dans les eaux alors que le calcium reste stable autour de 5 meq/l. Ceci confirme l'échange de base démontré précédemment

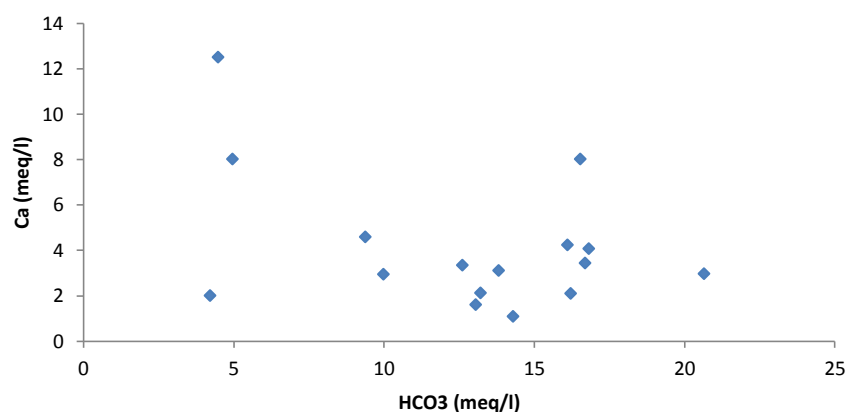


Fig. 77: Relation Ca vs HCO_3 (mois de Novembre 2016).

8.2.4 Le diagramme {Ca / (HCO₃+SO₄)}

L'observation du diagramme réalisé (Fig. 69), montre la présence de deux familles :

- la première constituée de trois (03) échantillons et montrant un excès de calcium dans les eaux ;

- la seconde famille caractérise un excès des bicarbonates et des sulfates. Ceci laisse supposer que l'échange de base est intense.

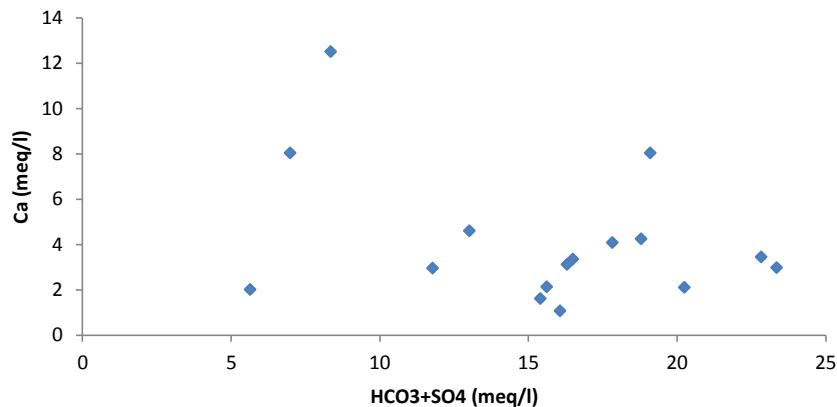


Fig. 78: Relation Ca / (HCO₃+SO₄) (mois de Novembre 2016).

L'observation réalisée dans la partie précédente, n'a pas permis d'être affirmatif en matière d'intrusion marine. De ce fait nous avons poursuivie nos investigations pour confirmer ou infirmer la présence d'une intrusion marine durant les périodes considérées.

9 Recherche d'une potentielle intrusion marine

9.1 Utilisation de rapports spécifiques

Certains rapports sont utilisés spécialement pour l'étude de la relation mer-nappe. Parmi ces rapports, il y a (Cl / HCO₃ vs Cl), (Br / Cl), (Sr / Ca), ...Chacun de ces rapports est un bon indicateur des origines de la salinité des eaux.

9.1.1 Apports du rapport {(Cl / HCO₃) vs Cl}

Le rapport (Cl / HCO₃ vs Cl) est utilisé pour classer le degré d'effet d'intrusion d'eau de mer. La classification (Revelle 1941) utilisée classe les eaux en trois catégories :

- eaux souterraines non affectées, le ratio est de 0,5 ;
- eaux souterraines légèrement à modérément avec un ratio allant de 0,5 à 6,6 ;
- eaux souterraines fortement affectées par l'intrusion marine, dans ce cas le ratio est supérieur à 6,6.

9.1.1.1 Mois de Décembre 2011

Le diagramme suivant (Fig.80), montre les eaux analysées se répartissent en cinq (05) classes :

- la première classe traite des eaux fortement affectées par l'intrusion marine, cette classe contient un seul échantillon ;

- la seconde famille concerne les eaux sérieusement affectées par l'intrusion marine et se compose de huit (08) échantillons ;
- la troisième classe est la classe à eaux modérément affectées par l'intrusion marine et comporte quatre (04) échantillons ;
- la quatrième famille est celle des eaux légèrement affectées par l'intrusion marine et contient sept (07) échantillons ;
- la cinquième famille dénommée famille des eaux non affectées par l'intrusion marine et est composée de quatre (04) échantillons.

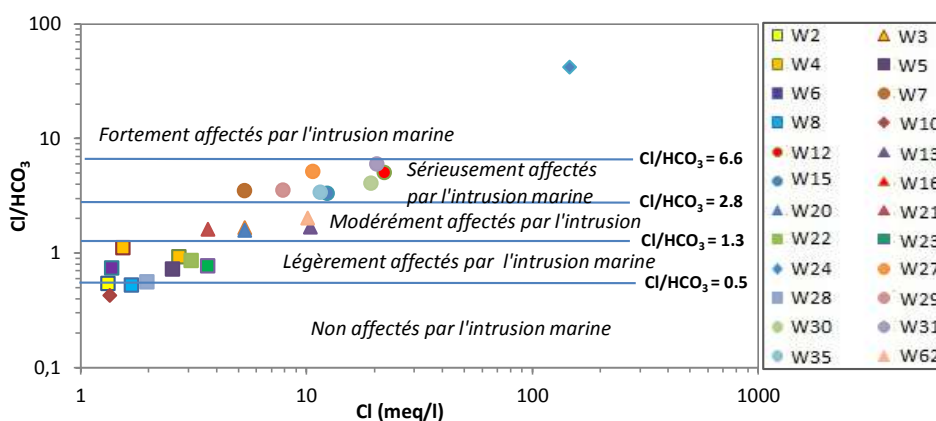


Fig. 79: Diagramme (Cl/HCO₃) vs Cl (mois de Décembre 2011).

Carte des familles des eaux {(Cl/HCO₃) vs Cl} (Décembre 2011)

L'observation du diagramme précédent, montre la présence de cinq (05) familles se répartissant de la manière suivante (Fig.81) :

- la famille des eaux fortement affectées par la présence marine, elle se situe dans la zone marécageuse de Boukhemira ;
- la famille des eaux sérieusement affectées par la salinité marine, elle occupe plusieurs zones sur la plaine, elle se localise, à l'Est, à l'Ouest et au Sud de la plaine. Ces diverses positions, indiquent différentes origines de la salinité des eaux ;
- la famille des eaux modérément affectées par une salinité d'origine marine, elle est importante et occupe la zone Ouest et est présente dans la partie Sud. Les autres familles caractérisant un faible impact de la mer sur la salinité des eaux se localisent respectivement au niveau de la zone Ouest (Cité Seybouse) et au droit de l'Aéroport, dans ces zones il n'y a pas de pompage, c'est-à-dire il y a un équilibre interface eau douce, eau salée.

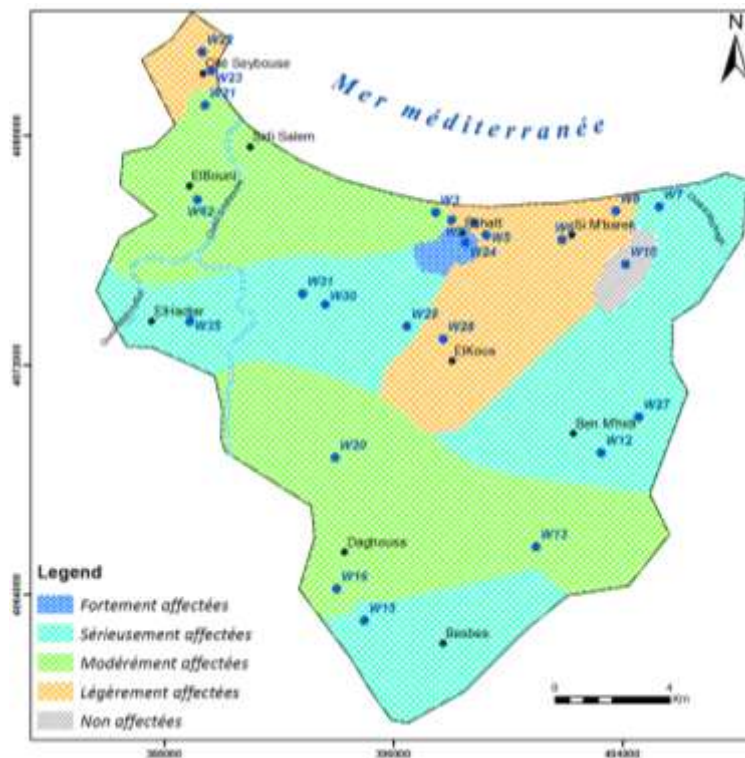


Fig. 80: Carte de répartition des familles des eaux $\{(Cl / HCO_3) \text{ vs } Cl\}$ (Mois de Décembre 2011).

9.1.1.2 Mois de Novembre 2016

L'observation du diagramme réalisé (Fig.82), montre que la plupart des eaux analysées se répartissent sur deux familles :

- la première, celle des eaux légèrement affectées par l'intrusion marine et contient cinq (05) échantillons ;
- la seconde correspond à la famille des eaux non affectées par l'intrusion marine et comprend six (06) échantillons.

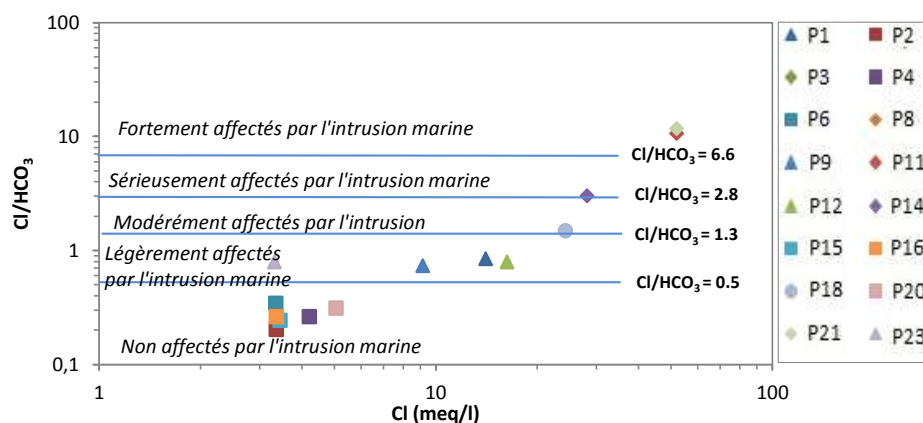


Fig. 81: Relation entre le rapport (Cl/HCO_3) et Cl (Novembre 2016).

En procédant à la comparaison des deux diagrammes, nous remarquons une disparition de l'influence marine sur la salinité des eaux de la région. Cette situation serait liée à la dilution provoquée par les précipitations tombées au cours de cette période. Cette hypothèse est étayée

par le graphique (Fig.83), démontrant les variations des précipitations interannuelles au niveau de station des Salines, dont l'observation montre les précipitations enregistrées au cours de l'année 2011 sont inférieures à la valeur moyenne de 650 mm/an par contre au cours de l'année 2016, la précipitation moyenne enregistrée dépasse les 650 mm/an, ce qui explique la dilution observée.

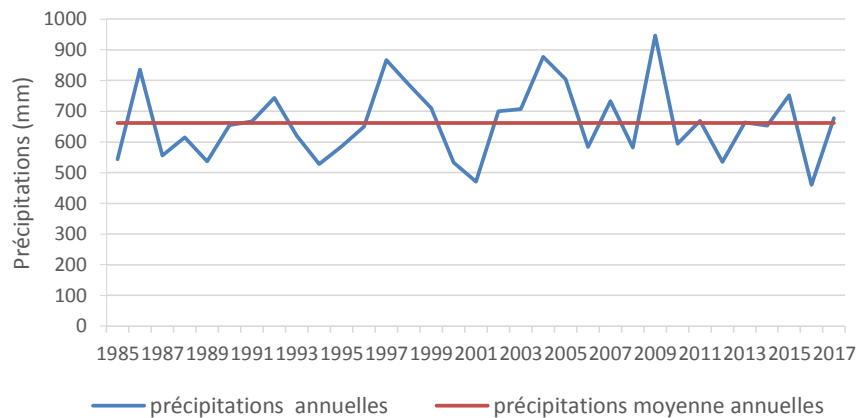


Fig. 82: Variation des précipitations annuelles, station des salines (1985-2017).

Carte des familles des eaux {(Cl / HCO₃) vs Cl} (Novembre 2016)

La carte (Fig.84), réalisée au mois de Novembre 2016, ne présente pas de similitude avec celle réalisée du mois de Décembre 2011. La carte montre une domination des eaux dont la minéralisation est indépendante de l'influence marine.

Nous remarquons que les zones indiquant une salinité importante sont situées loin de la zone littorale, ainsi les familles des eaux sérieusement et fortement affectées par la salinité, se localisent dans les parties Nord-ouest et Sud-est.

Au niveau de la zone Sud-ouest, la présence du Lac Fatzara et les argiles présentes en masse influencent la salinité.

Au niveau de la zone Sud-est, la salinité est liée au retour des eaux d'irrigation. En effet après l'irrigation, la composition chimique des eaux qui retournent vers la nappe, sont plus chargées et en s'infiltrant à nouveau entraînant une augmentation de la salinité quand bien même locale.

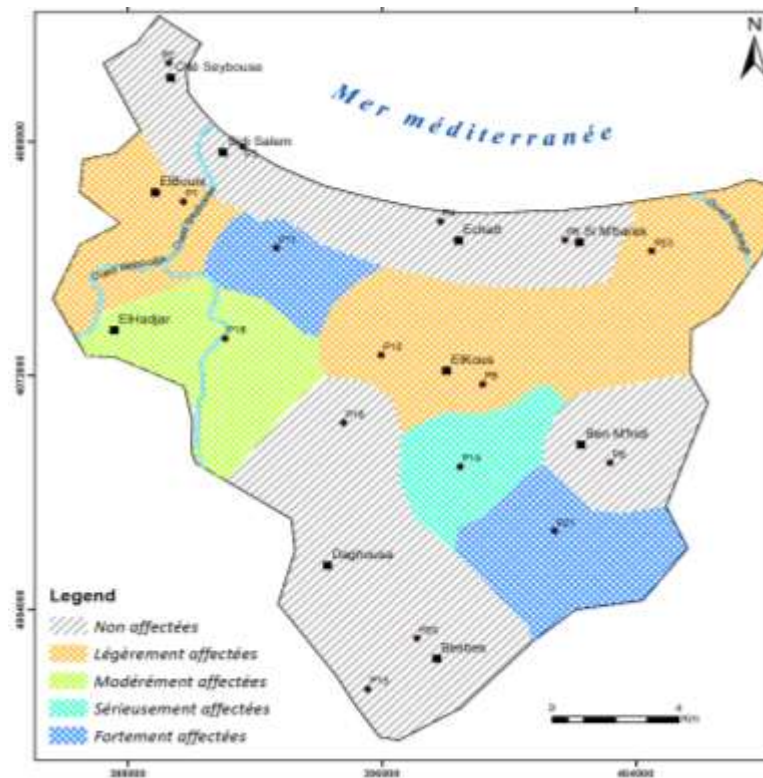


Fig. 83: Carte de répartition des familles des eaux $\{(Cl / HCO_3) vs Cl\}$ (Mois de Novembre 2016).

9.1.2 Apports du Rapport (Br / Cl)

Le rapport Br / Cl peut être utilisé comme un traceur fiable tout comme le chlore et le brome qui, habituellement, se comportent d'une manière conservatrice (c'est-à-dire ne réagissent pas avec la matrice de la nappe aquifère) sauf dans le cas où il y a une présence considérable de la matière organique. En effet, l'utilisation de ces éléments conservés permet d'obtenir des renseignements sur l'origine des solutions et/ou l'identification d'éventuelles contributions d'eau marine car leurs teneurs ne sont ni influencées par les processus redox ni contrôlées par les minéraux de faible solubilité (Barbecot, 1999 ; Maliki, 2000 et Fedrigoni, Krimissa, Zouari, Maliki, & Zuppi, 2001).

L'eau de mer (avec le rapport $Br/Cl = 1,5 \cdot 10^{-3}$) est distinguée des reliques de l'eau de mer évaporée (eaux hyper-salines $Br/Cl > 1,5 \cdot 10^{-3}$, Mer Morte = $2,5 \cdot 10^{-2}$ (Starinsky, Bielski, Lazar, Steinitz, & Raab, 1983)), des produits de dissolution des évaporites (environs de 10^{-3}) et des sources anthropogéniques comme les effluents des eaux usées (proportions Br / Cl jusqu'à $1,25 \cdot 10^{-3}$ (Vengosh, Gert, Lange, & Starinsky, 1998)) ou le retour d'eau d'irrigation (fortes proportions Br / Cl). Ce rapport reste ainsi constant si ces deux éléments ont une origine commune.

On s'intéresse d'abord aux valeurs du rapport Br / Cl, les valeurs calculées (Fig.85), oscillent entre 0.0009 et 3.5 ‰, démontrant que la salinité des eaux à deux origines :

Une première dont la valeur du rapport $Br / Cl \geq 3 \text{ ‰}$, dans ce cas la mer impacte la salinité des eaux ;

Une seconde englobe le reste des échantillons, dans ce cas la salinité observée peut avoir plusieurs origines :

- Pour les échantillons prélevés à proximité de la mer, la salinité des eaux est liée aux embruns marins ou à l'utilisation des aérosols,
- Pour les échantillons prélevés aux niveaux des zones éloignées de la cote, la salinité des eaux est liée aux apports se faisant à partir de la zone amont.

Pour avoir de plus amples informations sur les origines de la salinité des eaux, nous avons réalisé le graphe (Br / Cl vs Cl). Le graphique réalisé (Fig.85) pour la période de Décembre 2011, montre la présence de quatre (04) familles suivantes :

- Une première famille dont le rapport $Br / Cl > 1,5 \text{ ‰}$, constituée de huit (08) échantillons, indiquant que la présence de la mer influence grandement la salinité des eaux ;
- La seconde famille dont le rapport Br / Cl , oscille entre 1,3 et 1,5 ‰, contenant trois (03) échantillons, dans ce cas la salinité des eaux est liée soit à l'influence marine soit aux aérosols utilisés par les agriculteurs ;
- La troisième famille contenant six (06) échantillons. Le rapport Br / Cl , varie entre 1 et 1,3 ‰, pour cette famille la salinité est liée aux facteurs anthropiques ou géologiques ;
- la quatrième famille contenant sept (07), dont la salinité est probablement liée à la dilution des formations géologiques.

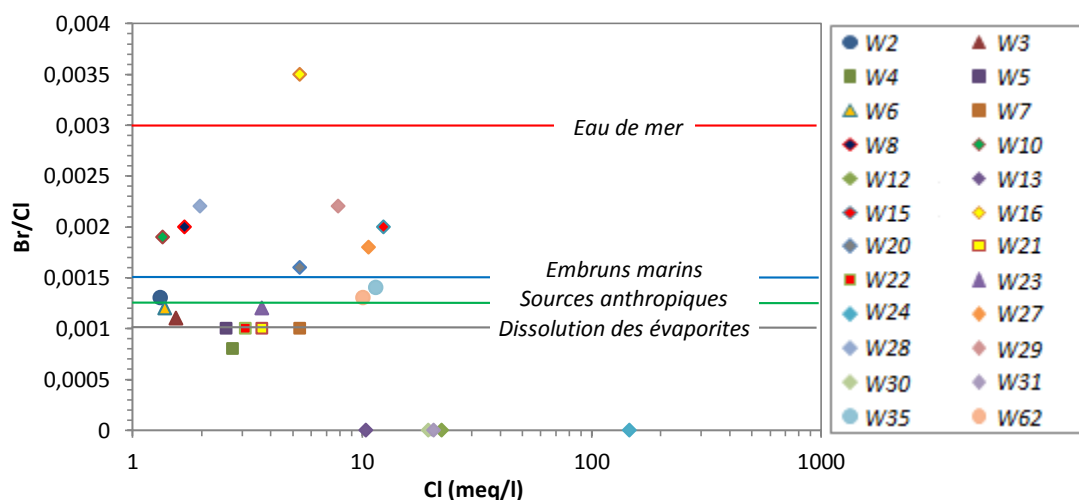


Fig. 84: Relation entre le rapport (Br / Cl) vs Cl (mois de Décembre 2011).

10 Activités anthropiques

En raison du développement de l'agriculture dans la région, les eaux, sont confrontées à une dégradation de leur qualité. Parmi les polluants susceptibles d'être détectés il y a les

nutriments et particulièrement les nitrates dont l'origine serait liée à l'utilisation des engrais de type NPK (Cf. résultats des analyses de Décembre 2011).

10.1 Le rapport (NO_3 / f) (f : fraction de l'eau de mer en %)

La relation entre la contamination par nitrates et par l'intrusion marine est représentée sur la (Fig.86), qui révèle une augmentation des nitrates accompagnée d'une augmentation de la fraction d'eau de mer, pour une grande majorité des échantillons, indiquant un enrichissement par suite du mouvement de retour des eaux d'irrigation. Des concentrations élevées en nitrate à faible fraction d'eau de mer pour deux échantillons, ce qui semble indiquer que la contamination par les nitrates n'a aucun rapport avec l'intrusion d'eau de mer. Cependant, la contamination par les nitrates peut être attribuée aux activités humaines, y compris l'abus d'engrais, les eaux usées industrielles et les eaux usées domestiques. On remarque que sept (07) échantillons dans le diagramme, disposent dans le domaine d'intrusion marine. La période de Novembre 2016 est caractérisée par des faibles teneurs en nitrates, où les concentrations oscillent entre 0 et 11.4 mg/l, n'indiquant pas une pollution des eaux par les nitrates.

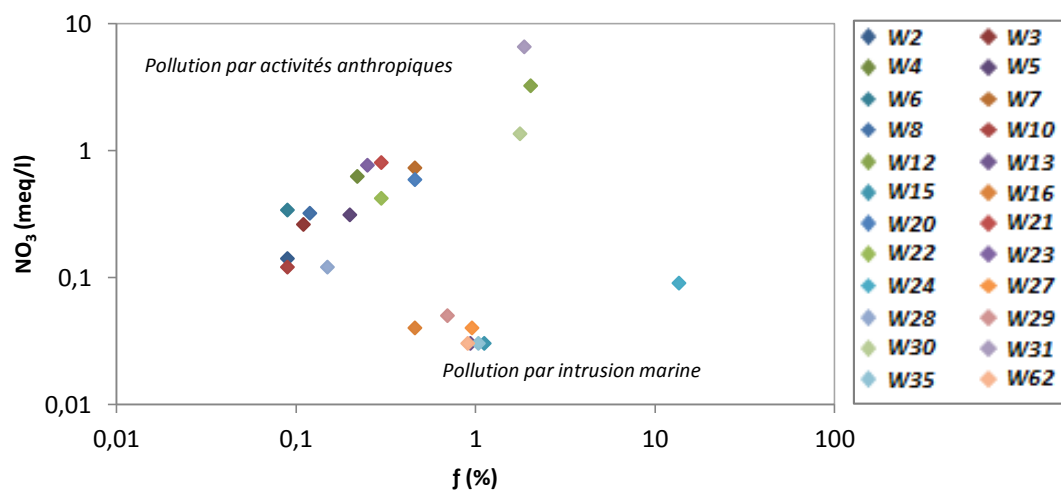


Fig. 85: Relation entre NO_3 et f (mois de Décembre 2011).

11 La vulnérabilité à la pollution de l'aquifère superficiel de la plaine

11.1 Notions générales de la vulnérabilité à la pollution des aquifères

La vulnérabilité d'un aquifère, est le degré relatif de protection naturelle d'un aquifère contre la contamination par des sources anthropiques à la surface du sol. Elle est défini en fonction des caractéristiques hydrogéologiques de l'aquifère, sans tenir compte du type et de l'intensité des activités humaines en surface. La vulnérabilité d'un aquifère à la contamination repose non seulement sur des facteurs hydrogéologiques, mais également sur des facteurs

d'utilisation des terres, les facteurs hydrogéologiques ne devraient pas changer de manière appréciable au fil du temps, alors que l'utilisation des terres pourrait. Pour la gestion durable et la protection de la qualité des ressources en eaux souterraines, une évaluation de la vulnérabilité doit être effectuée pour toute zone aquifère afin d'utiliser ces informations comme indicateur de la vulnérabilité de l'aquifère et de la nécessité d'enquêtes détaillées. En particulier dans les aquifères côtiers perméables de basse altitude, où le niveau des eaux souterraines est proche de la surface du sol, une légère augmentation de la recharge des eaux souterraines et l'élévation du niveau de la mer peuvent augmenter les niveaux des eaux souterraines et par conséquent accroître la vulnérabilité des aquifères.

11.2 Vulnérabilité des aquifères côtiers par rapport à l'intrusion saline

L'analyse de la vulnérabilité d'un aquifère par rapport à l'intrusion saline est un cas particulier à la fois de la vulnérabilité spécifique et de la vulnérabilité intrinsèque, d'une certaine manière. Des critères de salinisation doivent être pris en compte en plus des critères relatifs à la vulnérabilité intrinsèque. Dans ce sens, il s'agit d'une vulnérabilité spécifique. En termes de méthode de cartographie à index, la méthode GALDIT est la seule méthode dédiée à la vulnérabilité des aquifères côtiers par rapport à l'intrusion saline

11.3 Détails de la méthode GALDIT

C'est une méthode de cartographie de la vulnérabilité à la pollution des aquifères côtiers, traitant des risques d'intrusion saline. Elle a été initialement développée par Chachadi et Lobo-Ferreira en 2001. La méthode GALDIT, est une approche de «cartographie à index » simple d'utilisation, nécessitant peu de données. La détermination de l'indice de vulnérabilité des eaux souterraines par rapport à l'intrusion saline est fondée sur la combinaison de six paramètres pouvant influencer l'intrusion saline potentielle :

- 1- Le type d'aquifère : libre, captif et semi-captif (**G**roundwater occurrence) ;
- 2- La conductivité hydraulique de l'aquifère (**A**quifer hydraulic conductivity) ;
- 3- La profondeur de la nappe au dessus du niveau de la mer (**D**ePTH to groundwater Level above sea) ;
- 4- La distance par rapport à la côte (**D**istance from the shore) ;
- 5- L'impact de l'état actuel de l'intrusion saline dans la zone d'étude (**I**mpact of existing status of seawater intrusion in the area) ;
- 6- L'épaisseur de l'aquifère (**T**hickness of the aquifer) ;

Une indexation de la vulnérabilité et une classification des potentialités d'une intrusion saline dans un contexte géologique donné sont établis à partir des six paramètres de GALDIT (Voir Annexes).

11.4 Application de la méthode GALDIT à l'aquifère superficielle de la plaine d'Annaba

11.4.1 Paramètre (G) : Le type d'aquifère

Les études hydrogéologiques menées dans la plaine d'Annaba par plusieurs auteurs s'accordent à considérer la nappe superficielle comme une seule nappe d'un aquifère semi-libre et emmagasinée dans les remplissages Mio-Pliocène et Quaternaire de la plaine, de ce fait le modèle lui accorde la valeur 5 (Fig.87).



Fig. 86. Carte de la distribution spatiale du paramètre «G».

11.4.2 Paramètre (A) : La conductivité hydraulique de l'aquifère

Elle désigne la capacité des formations géologiques de la nappe phréatique à permettre le transfert de l'eau c'est à dire à faciliter son écoulement. La carte de la distribution spatiale du paramètre «A» (Fig.88), réalisée en interpolant sur SIG les valeurs de conductivité hydraulique calculées (Tab.30), à partir de la transmissivité moyenne de terrain et l'épaisseur de l'aquifère dans chaque puits extraites de la carte d'épaisseur de l'aquifère superficielle et la carte de répartition de la transmissivité d'après les travaux de (Debieche, 2002), (Hani, 2003) et (Aoun Sbaiti, 2010). La carte obtenue comporte les unités suivantes :

-La valeur de rang 10 a été attribuée à la grande partie de la zone d'étude, présentant une perméabilité élevée.

La valeur 7.5 a été attribuée à la zone Nord-ouest où la Cité Seybouse et El-Hadjar, montrant une perméabilité moyenne.

Tab. 30. Les valeurs de la conductivité hydraulique (K) calculées en mètre par jour et le rang attribués à chaque puits (Novembre 2016).

Puits	X utm	Y utm	Epaisseur	Transmissivité de terrain	K (m/j)	Range	
P1	389734,00	4077952,71	16	0,004	21,6	7,5	Moyenne
P2	389279,85	4082690,32	10	0,003	25,92	7,5	Moyenne
P3	391604,57	4079832,32	10	0,004	34,56	7,5	Moyenne
P4	397829,65	4077267,93	3	0,004	115,2	10	Elevée
P6	401754,28	4076637,04	2	0,004	172,8	10	Elevée
P8	403175,86	4069021,06	4	0,004	86,4	10	Elevée
P9	399161,61	4071708,21	6	0,003	43,2	10	Elevée
P11	392657,53	4076361,38	7	0,004	49,37	10	Elevée
P12	395962,22	4072705,33	6	0,005	72	10	Elevée
P14	398440,23	4068888,23	6	0,003	43,2	10	Elevée
P15	395537,07	4061291,76	1	0,003	259,2	10	Elevée
P16	394767,72	4070390,24	6	0,005	72	10	Elevée
P18	391037,84	4073277,27	6	0,004	57,6	10	Elevée
P20	397084,54	4063015,39	1	0,003	259,2	10	Elevée
P21	401410,92	4066686,76	4	0,004	86,4	10	Elevée
P23	404480,55	4076254,84	2	0,003	129,6	10	Elevée

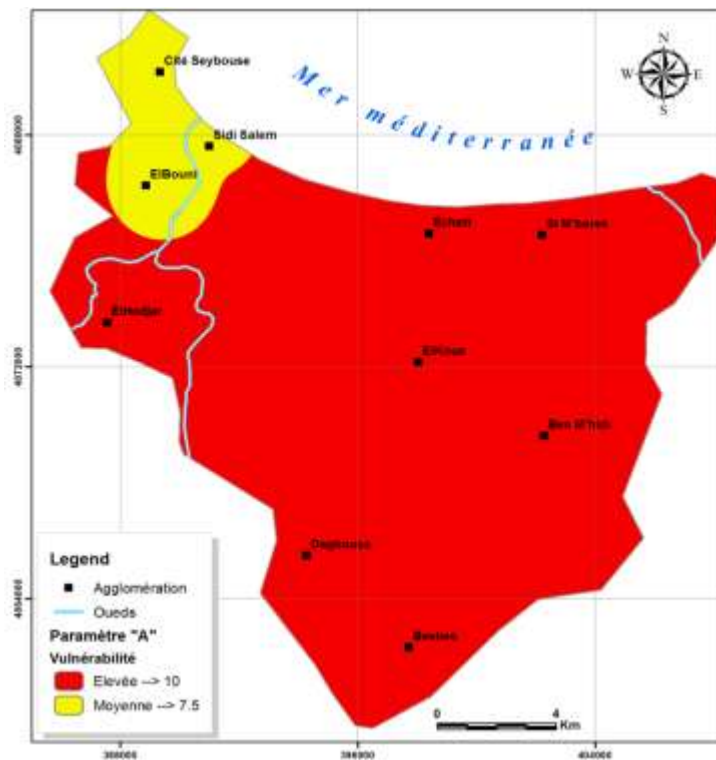


Fig. 87. Carte de la distribution spatiale du paramètre «A».

La carte précédente, montre deux zones d'inégales extensions. La première indiquant une perméabilité importante occupant les 9/10 de la zone d'étude. La seconde située en contre bas de l'Edough, dans cette partie interfère les formations sédimentaires et les formations métamorphique dont la perméabilité est relativement faible.

11.4.3 Paramètre (L) : La hauteur de la nappe au dessus du niveau de la mer

Le rapport entre le niveau des eaux souterraines et le niveau moyen de la mer est l'un des moyens utilisé pour évaluer la vulnérabilité des zones côtières à l'intrusion saline. Ce rapport détermine la force de la pression hydraulique à éloigner le front des eaux salées. Cependant, il faut noter que les niveaux de la nappe varient et que la vulnérabilité à l'intrusion marine atteint son maximum lorsque les côtes d'eau en dessous du niveau de la mer atteignent leurs niveaux minimum.

Dans la présente étude, ce paramètre (L) (Fig.89) a été obtenu à partir d'un levé piézométrique de la nappe superficielle de la plaine d'Annaba réalisé pour la période de Novembre 2016 (Tab.31).

- La valeur 7.5 a été attribuée aux zones au niveau du centre, d'une superficie presque négligeable par rapport à la plaine étudiée, présentant un risque de vulnérabilité moyenne.
- La valeur 5 qui présente une vulnérabilité faible, a été attribuée aux petites zones localisées d'une manière dispersive entre le centre, le Nord et l'extrême Ouest de la plaine.
- La valeur minimale de rang 2.5 indiquant une vulnérabilité très faible, a été attribuée à presque la totalité de la plaine.

Tab. 31: Les valeurs des niveaux piézométriques (NP) et le rang attribué à chaque puits (Novembre 2016).

Puits	X utm	Y utm	NP (m)	Range	
P01	389734,00	4077952,71	4,65	2,5	Très faible
P02	389279,85	4082690,32	2,28	2,5	Très faible
P03	391604,57	4079832,32	4	2,5	Très faible
P04	397829,65	4077267,93	1,84	5	Faible
P06	401754,28	4076637,04	4,04	2,5	Très faible
P08	403175,86	4069021,06	4,85	2,5	Très faible
P09	399161,61	4071708,21	1,4	7,5	Moyenne
P11	392657,53	4076361,38	2,5	2,5	Très faible
P12	395962,22	4072705,33	1,19	7,5	Moyenne
P14	398440,23	4068888,23	3,47	2,5	Très faible
P15	395537,07	4061291,76	54,85	2,5	Très faible
P16	394767,72	4070390,24	5,31	2,5	Très faible
P18	391037,84	4073277,27	6,52	2,5	Très faible
P20	397084,54	4063015,39	12,35	2,5	Très faible
P21	401410,92	4066686,76	3,5	2,5	Très faible
P23	404480,55	4076254,84	3,01	2,5	Très faible
Pz09	389000	4082000	3,2	2,5	Très faible
Pz11	403000	4068000	4,08	2,5	Très faible
Pz12	399000	4070000	3,38	2,5	Très faible

Pz13	389000	4076000	5,07	2,5	Très faible
Pz14	390000	4080000	2,83	2,5	Très faible
Pz17	396000	4062000	12,57	2,5	Très faible

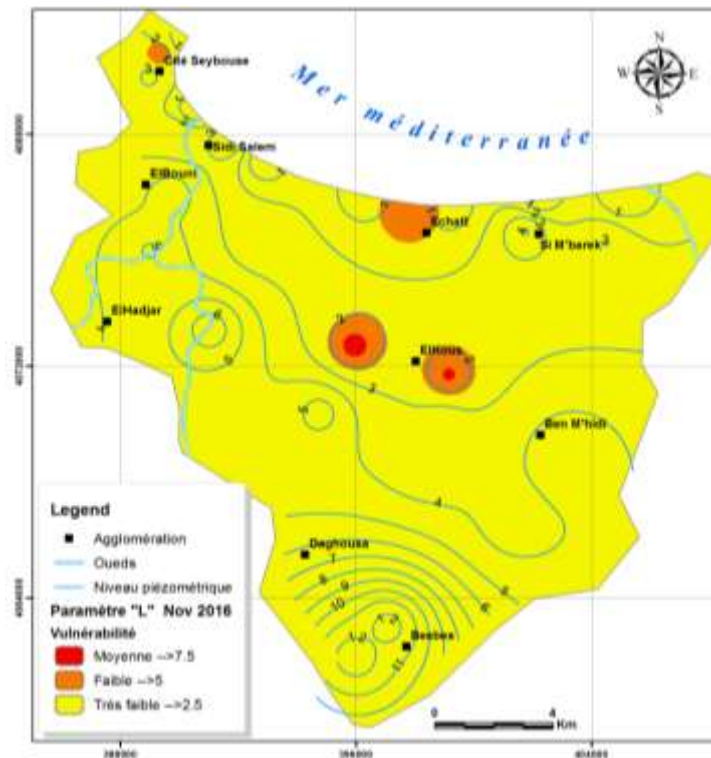


Fig. 88. Carte de la distribution spatiale du paramètre «L» ; (Novembre 2016).

La carte réalisée montre que la profondeur de l'eau est très proche de la surface du sol, ce qui accentue le risque de pollution.

11.4.4 Paramètre (D) : La distance par rapport à la côte

La vulnérabilité par rapport à l'intrusion de l'eau salée augmente sensiblement à mesure que l'on se rapproche de la mer. Le modèle GALDIT distingue trois distances (500 m, 750 m et 1000 m) perpendiculaires à la ligne de côte et aux cours d'eau des oueds (notre travail n'est pas concerné par les oueds). La carte de la distribution spatiale du paramètre "D" (Fig.90). Ces distances sont classées selon les niveaux d'importance ci-après (Tab.32).

Tab. 32: Les valeurs du rang de (paramètre D) attribués à chaque puits selon la distance à la mer.

Puits	X utm	Y utm	Distance à la mer (m)	Range	
P01	389734,00	4077952,71	2640	2,5	Très Faible
P02	389279,85	4082690,32	580	7,5	Moyenne
P03	391604,57	4079832,32	21	10	Elevée
P04	397829,65	4077267,93	386	10	Elevée
P06	401754,28	4076637,04	1043	2,5	Très Faible
P08	403175,86	4069021,06	8755	2,5	Très Faible
P09	399161,61	4071708,21	5852	2,5	Très Faible
P11	392657,53	4076361,38	2580	2,5	Très Faible
P12	395962,22	4072705,33	5185	2,5	Très Faible

P14	398440,23	4068888,23	8700	2,5	Très Faible
P15	395537,07	4061291,76	16535	2,5	Très Faible
P16	394767,72	4070390,24	7702	2,5	Très Faible
P18	391037,84	4073277,27	6057	2,5	Très Faible
P20	397084,54	4063015,39	14633	2,5	Très Faible
P21	401410,92	4066686,76	10986	2,5	Très Faible
P23	404480,55	4076254,84	1779	2,5	Très Faible

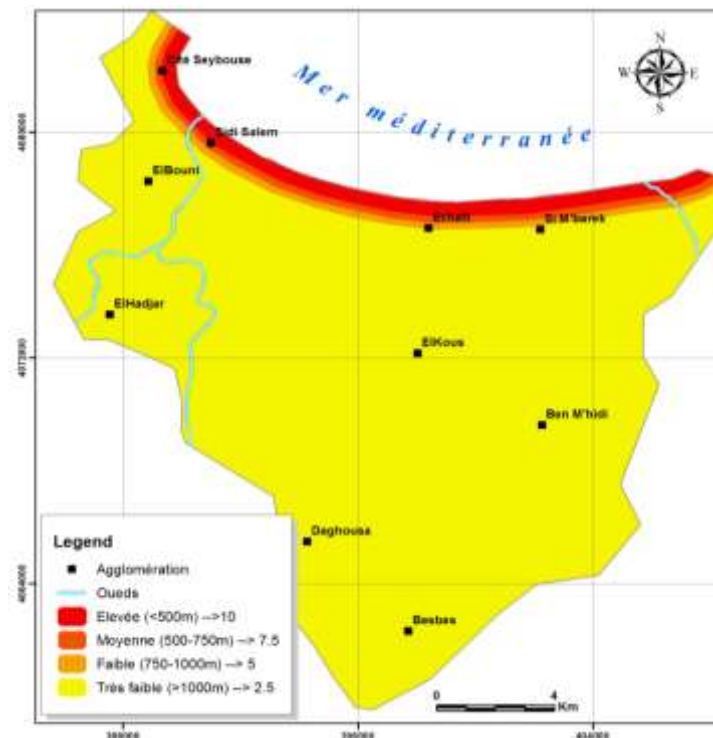


Fig. 89. Carte de la distribution spatiale du paramètre «D».

On note que 4 puits sont exposés à l'intrusion marine, ce nombre augmente avec les pompages.

Paramètre (I) : Impact de l'intrusion d'eau salée existante

La carte de la distribution spatiale du paramètre «I» (Fig.91), développée par interpolation des données de Bicarbonates HCO_3^- de la qualité de l'eau de l'aquifère (Novembre 2016) (Tab.33).

Dans cet étude, nous avons considéré comme nulle la contribution généralement plus faible du CO_3^{2-} dans le rapport recommandé de $\text{Cl}^- / [\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}]$, car les valeurs de CO_3^{2-} n'étaient pas connues pour la zone d'étude. En observant la carte ci-dessous, on peut dire que :

- La valeur de rang 10 a été attribuée à la zone Nord-ouest entre El hadjar et Sidi salem et celle de Sud-est entre Besbes et Ben m'hidi, d'une manière très importante, montrant une vulnérabilité élevée.
- La valeur 7.5 d'une vulnérabilité moyenne caractérisant une partie de centre, Nord-ouest et le Sud de la plaine.
- La valeur 2.5 a été attribuée aux zones dispersées dans la plaine où la vulnérabilité est très faible.

Tab. 33: Les valeurs du rang de (paramètre I) attribués à chaque puits selon le rapport

Puits	X utm	Y utm	r Cl/HCO ₃ ⁻	Range	
P1	389734,00	4077952,71	0,98	2,5	Très Faible
P2	389279,85	4082690,32	0,23	2,5	Très Faible
P3	391604,57	4079832,32	0,29	2,5	Très Faible
P4	397829,65	4077267,93	0,31	2,5	Très Faible
P6	401754,28	4076637,04	0,39	2,5	Très Faible
P8	403175,86	4069021,06	0,30	2,5	Très Faible
P9	399161,61	4071708,21	0,85	2,5	Très Faible
P11	392657,53	4076361,38	12,27	10	Elevée
P12	395962,22	4072705,33	0,92	2,5	Très Faible
P14	398440,23	4068888,23	3,50	10	Elevée
P15	395537,07	4061291,76	0,28	2,5	Très Faible
P16	394767,72	4070390,24	0,30	2,5	Très Faible
P18	391037,84	4073277,27	1,72	7,5	Moyenne
P20	397084,54	4063015,39	0,36	2,5	Très Faible
P21	401410,92	4066686,76	13,58	10	Elevée
P23	404480,55	4076254,84	0,92	2,5	Très Faible

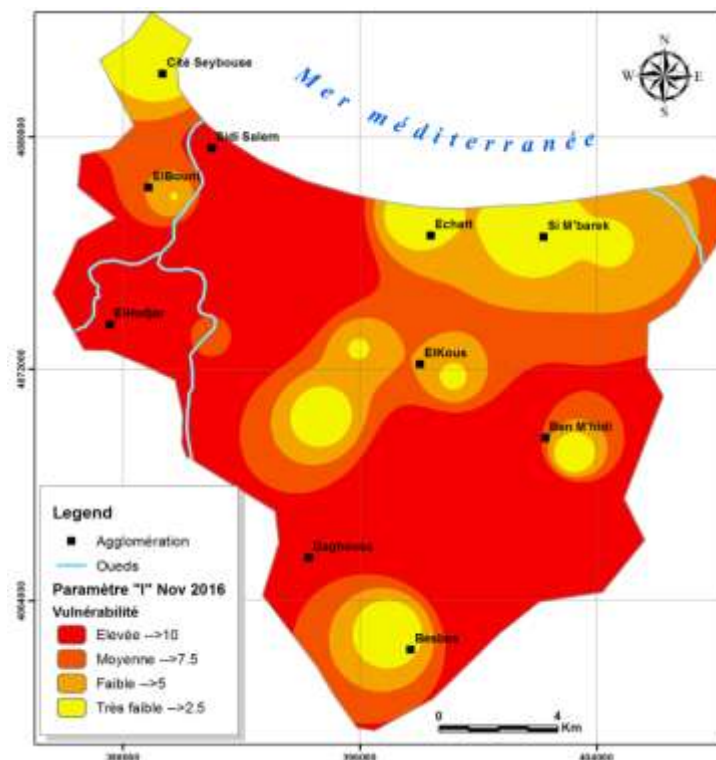


Fig. 90. Carte de la distribution spatiale du paramètre «I» ; (Novembre 2016).

La carte du rapport Cl-/HCO₃⁻, montre la présence de 4 groupes n'inégale extension. Nous remarquons que sur presque l'ensemble de la plaine les chlorures sont importants et sont dominants par rapport aux bicarbonates, indiquant une contamination des eaux par les chlorures, dont l'origine serait géologique ou marine.

11.4.5 Paramètre (T) : L'épaisseur de l'aquifère

Ce facteur est considéré comme facteur amplificateur de la magnitude de l'intrusion saline

dans les régions côtières. En effet plus l'épaisseur de la nappe aquifère n'est grande, plus l'intrusion saline a de grande chance de s'étendre, le contraire est vrai. L'épaisseur de l'aquifère superficielle de la plaine varie entre 0 et 18 m (Tab.34). La carte de la distribution spatiale du paramètre "T" (Fig.92), extraite de la carte des épaisseurs de l'aquifère superficielle élaboré par (Hani, 2003).

Tab. 34: Les valeurs du rang de (paramètre T) attribués à chaque puits selon l'épaisseur de l'aquifère dan le même puits.

Puits	X utm	Y utm	Epaisseur (m)	Range	
P1	389734,00	4077952,71	16	10	Elevée
P2	389279,85	4082690,32	10	7,5	Moyenne
P3	391604,57	4079832,32	10	7,5	Moyenne
P4	397829,65	4077267,93	3	2,5	Très Faible
P6	401754,28	4076637,04	2	2,5	Très Faible
P8	403175,86	4069021,06	4	2,5	Très Faible
P9	399161,61	4071708,21	6	5	Faible
P11	392657,53	4076361,38	7	5	Faible
P12	395962,22	4072705,33	6	5	Faible
P14	398440,23	4068888,23	6	5	Faible
P15	395537,07	4061291,76	1	2,5	Très Faible
P16	394767,72	4070390,24	6	5	Faible
P18	391037,84	4073277,27	6	5	Faible
P20	397084,54	4063015,39	1	2,5	Très Faible
P21	401410,92	4066686,76	4	2,5	Très Faible
P23	404480,55	4076254,84	2	2,5	Très Faible

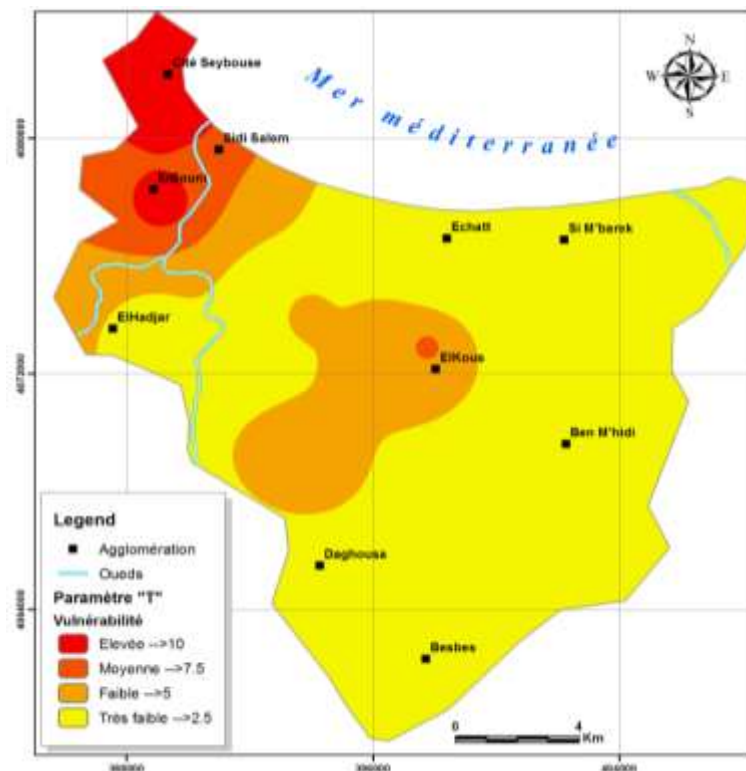


Fig. 91. Carte de la distribution spatiale du paramètre «T».

La partie Est et le centre de la carte, indiquent une faible profondeur de la nappe, ce qui expose ces deux zones à la pollution. La zone Ouest montre que la nappe est un peu protégée dans cette partie, cependant la présence des cours d'eau (Seybouse, Meboudja), sont des facteurs accélérant le processus de pollution.

L'indice GALDIT

Le résultat final est une carte de vulnérabilité (*Fig.93*), qui prend en charge les six paramètres de l'acronyme GALDIT. Il reflète la vulnérabilité du système hydrogéologique à l'intrusion d'eau de mer en rassemblant l'indice global par classes.

Les indices globaux (Tab.35), obtenus par cette combinaison varient entre 3.66 et 6.16, répartis en deux classes correspondant aux degrés de vulnérabilité fluctuant de « faible » à « moyenne » où la classe dominante est « Faible », couvrant la grande majorité de la plaine sauf les régions d'El-Hadjar, Cité Seybouse et entre Elkous et Echatt à la côte.

Tab. 35: L'indice GALDIT de chaque puits de la nappe superficielle (Novembre 2016).

Puits	X utm	Y utm	Indice GALDIT	Vulnérabilité
P01	389734,00	4077952,71	4,66	Faible
P02	389279,85	4082690,32	5,66	Moyenne
P03	391604,57	4079832,32	6,33	Moyenne
P04	397829,65	4077267,93	6,83	Moyenne
P06	401754,28	4076637,04	4,16	Faible
P08	403175,86	4069021,06	4,16	Faible
P09	399161,61	4071708,21	5,83	Moyenne
P11	392657,53	4076361,38	5	Moyenne
P12	395962,22	4072705,33	5,83	Moyenne
P14	398440,23	4068888,23	5	Moyenne
P15	395537,07	4061291,76	4,16	Faible
P16	394767,72	4070390,24	4,5	Faible
P18	391037,84	4073277,27	4,83	Faible
P20	397084,54	4063015,39	4,16	Faible
P21	401410,92	4066686,76	4,66	Faible
P23	404480,55	4076254,84	4,16	Faible

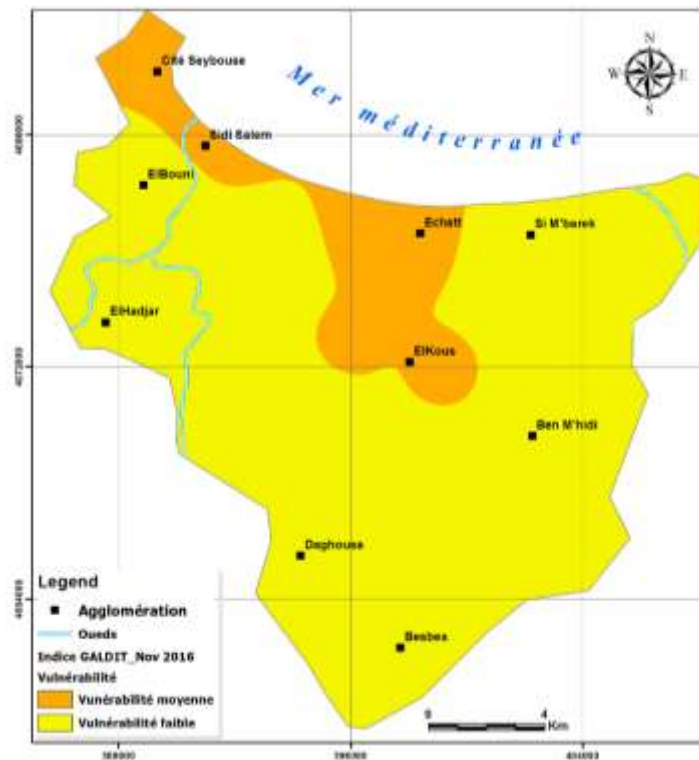


Fig. 92. Carte de la distribution spatiale de l'«Indice GALDIT» ou carte de vulnérabilité issue de la méthode GALDIT (mois de Novembre 2016).

La carte élaborée (fig. 93), montre la présence de deux familles, la première indique :
 -une vulnérabilité moyenne et elle du nord-ouest jusqu'au centre de la plaine et toujours dans la partie nord.

-la seconde famille dite « vulnérabilité faible », occupe le reste de la zone d'étude.

L'application de la méthode GALDIT, dans un contexte difficile comme celui de la région d'Annaba, donne des résultats appréciables pour la période d'observation considérée. Nous remarquons que la plaine d'Annaba et ceci malgré l'interférence de plusieurs sources de pollutions est loin d'être contaminée pour la période considérée qui est une période pluvieuse au cours de laquelle s'effectue une dilution par les eaux de précipitations.

12 Les réseaux de neurones artificiels

12.1 Principe de la méthode neuronale

Un réseau de neurones artificiels (RNA) est un système adaptable qui révèle les relations entre les ensembles de données d'entrée et de sortie, qui est capable d'estimer un ensemble de données précédemment invisible ayant des caractéristiques similaires à l'ensemble d'entrée (Haykin 1999; Govindaraju 2000).

Les réseaux de neurones artificiels sont issus des premiers travaux réalisés dans le domaine de l'intelligence artificielle pour modéliser le fonctionnement du cerveau humain (Mc Culloch et Pitts, 1943) en se basant principalement sur le concept des neurones. Ils s'agissent d'un

modèle empirique non linéaire, non paramétrique et n'a pas nécessairement besoin d'un arrière-plan de signification physique plus élevé du sujet (Fortin et *al.*, 1997). Il se compose d'éléments de traitement interconnectés (neurones) travaillant conjointement pour résoudre un problème spécifique. D'une manière similaire au fonctionnement du cerveau humain où les neurones reçoivent des signaux d'entrée et produisent des signaux de sortie, une donnée de sortie pourrait être prédite, en utilisant un réseau de neurones artificiels, à partir de données d'entrée (Kley, G., and N. Caradot, 2013).

R. Hecht Nielsen 1990 a donné la définition suivante : un réseau de neurones est un système de calcul composé d'éléments de traitement simples fortement interconnectés, qui traitent l'information par leur changement d'état dynamique en réponse à une entrée externe (Ghrieb, 2011). Le RNA est utilisé dans le domaine d'hydrogéologie et hydrologie, dans le domaine de la gestion de l'eau, le RNA est utilisé pour la prévision des paramètres de la qualité de l'eau, la prévision de la demande de l'eau, la modélisation et la relation pluie-débit, la prévision des flux et la gestion des aquifères côtiers (SAKAA 2013).

12.2 Connexions entre les neurones

Les réseaux de neurones sont organisés en couches lesquelles de (l'entrée, cachée et de sortie); ces couches se composent par un ensemble de nœuds (les unités) connectés par des liens orientés, ou connexions. Ces unités de base contiennent une fonction d'activation. Elles reçoivent des signaux provenant de l'extérieur ou d'autres neurones du réseau. Ils calculent une fonction, simple en général, de ces signaux et envoient à leur tour des signaux vers un ou plusieurs autres neurones des couches suivantes ou vers l'extérieur à travers celle de sortie. Le fonctionnement d'un neurone artificiel a été inspiré du fonctionnement schématisé du neurone humain (Fig.94). Le (Tab.36) résume l'analogie entre les neurones biologiques et artificiels.

D'une manière simple, des entrées (X_1, X_i, \dots, X_n) sont présentées au réseau par l'intermédiaire de la couche d'entrée, qui les communique aux couches cachées où le traitement s'effectue en utilisant des connexions pondérées. Puis, les couches cachées transmettent la réponse à la couche de sortie (S). Les connections entre les neurones se font par des poids (W_1, W_i, \dots, W_n) (Fig.95). L'algorithme d'apprentissage ajuste de manière itérative les valeurs des poids de connexion dans la structure RNA (Aryafar 2019).

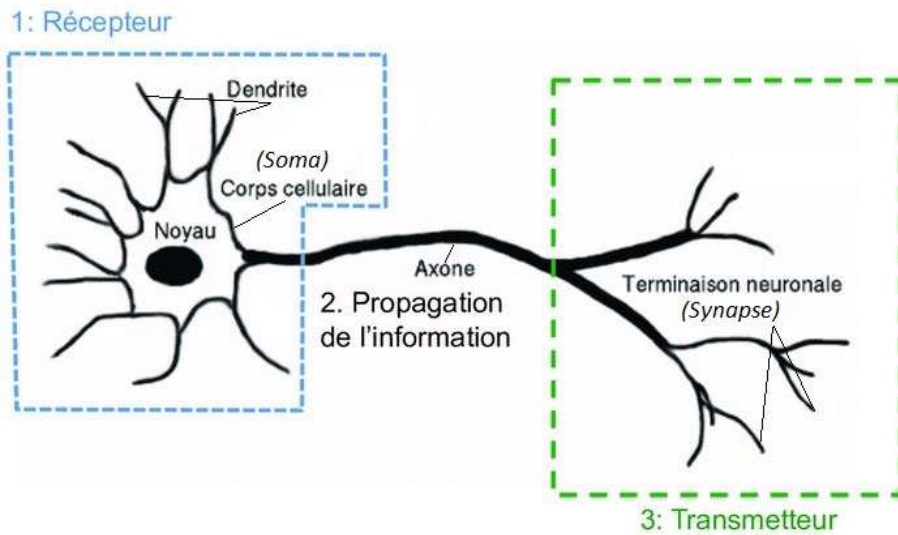


Fig. 93. Schéma d'un neurone biologique (Hébert C, 2012).

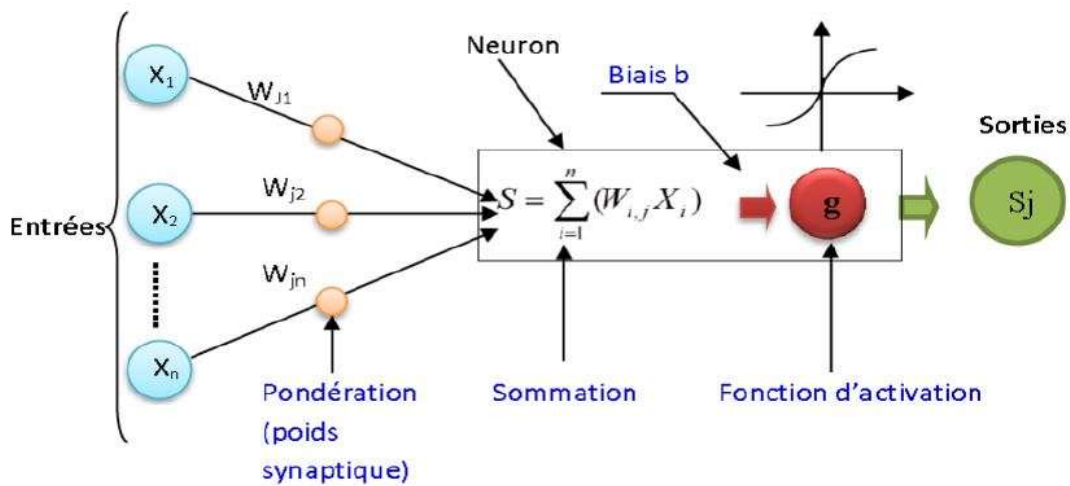


Fig. 94. Schéma d'un neurone artificiel.

Tab. 36: Analogie entre les neurones biologiques et artificiels.

Neurone bio.	Neurone art.
Soma	Neurone
Dendrite	Entrée (Input)
Axone	Sortie (Output)
Synapse	Poids

12.3 L'architecture de réseau

L'architecture est un concept très important qui joue un rôle déterminant dans la classification des RNA. Dans la littérature on utilise souvent le mot structure comme synonyme d'architecture (Maren et al. 1990; Hertz et al. 1991). Chaque architecture a sa propre organisation qui est adapté à des applications bien spécifiques (Sarle 1994; Haykin 1994).

L'architecture du réseau précise le nombre de couches qui le composent et le nombre de neurones dans chaque couche, ainsi que le poids des connexions. Il existe une grande variété d'agencements possibles de neurones artificiels (Lippmann, 1987), mais actuellement, le modèle le plus populaire est le Perceptron Multicouches (PMC), ou bien, le MLP (Muti-Layer Perceptron) avec deux algorithmes de rétro-propagation : le Broyden-Fletcher- Goldfarb-Shanno (BFGS Quasi-Newton) et le gradient conjugué (SCG) (Hagan et *al*, 1996), ce qui est utilisé dans la présente étude. Choisir l'Architecture d'un Perceptron Multicouche (PMC) consiste à fixer le nombre des couches, le nombre des cellules par couche, la nature des différentes connexions entre les neurones et la nature des neurones sur chaque couche (SAKAA 2013).

Les Perceptrons Multicouches (PMC) sont des réseaux neuronaux pour lesquels les neurones sont organisés en couches successives (Bishop, 1995; Riad et *al*, 2004). Le modèle PMC se compose de trois couches: une couche d'entrée, une couche cachée et une couche de sortie. Au niveau de cette architecture, chaque couche contient des unités de calcul (neurones) connectées à tous les neurones de la couche précédente et de la couche suivante par la voie des poids (W_{ij} et W_{jk}) (excepté pour les couches d'entrée et de sortie) et il n'y a pas de connexions entre les cellules d'une même couche (Yao Blaise KOFFI et al.2014 ; Najjar and Zhang (2000) ; Najjar and Ali (1998a) & (1998b).

Le nombre de neurones dans les couches d'entrée et de sortie est défini en fonction du nombre de variables d'entrée et de sortie du système sous investigation, respectivement (Ghorbani 2015). Le choix du nombre de couches cachées dépend généralement de la complexité du problème à résoudre, en théorie une seule couche cachée peut être suffisante pour résoudre un problème donné (Brakni 2011).

La fonction de transfert appliquée est de type sigmoïde. Le réseau de neurones utilisé est l'algorithme de rétropropagation de l'erreur qui correspond au Perceptron multicouche (Rumelhart et *al.*, 1986).

12.4 L'algorithme de rétro-propagation

L'algorithme d'apprentissage de rétro-propagation consiste dans un premier temps à circuler vers l'avant les données d'entrées jusqu'à l'obtention d'une entrée calculée par le réseau, puis la seconde étape est de comparer la sortie calculée à la sortie réelle connue (Rumelhart et *al.*, 1986). Les poids sont modifiés de telle sorte qu'à la prochaine itération, l'erreur commise est minimisée, en prenant en considération la présence des couches cachées, l'erreur est rétro-propagée vers l'arrière jusqu'à la couche d'entrée tout en modifiant la pondération. Le processus est répété sur tous les exemples jusqu'au temps où l'on obtienne une erreur de sortie considérée comme négligeable (Brakni 2011).

12.5 La fonction de transfère (ou d'activation)

Les neurones de la couche cachée ont la capacité de traiter l'information reçue. Chaque neurone effectue deux opérations bien distinctes, à savoir une somme pondérée de ses entrées, suivie d'une transformation par une fonction d'activation ou de transfert non linéaire, qui peut prendre de nombreuses formes différentes. Plusieurs fonctions de ce type existent, notre choix est porté cependant sur la fonction sigmoïde. Habituellement, cette fonction est la plus, utilisée, il s'agit d'une fonction continue, non décroissante, différentiable, bornée entre 0 et 1 et dérivée d'elle-même (Yin et *al.*, 2004).

À chaque connexion entre les neurones de deux couches successives est associé à un poids modifiable au cours de l'apprentissage en fonction des jeux de données en entrée et en sortie. Si les états des neurones de la couche d'entrée sont déterminés par les variables à l'entrée du réseau, les autres neurones (de la couche cachée et de sortie) doivent évaluer l'intensité de la simulation en provenance des neurones de la couche précédente par la relation suivante (Ghrieb 2011) :

$$S_j = \sum_{i=1}^n X_i W_{ij} + b_j$$

S_j : somme des poids entre les entrées du $j^{\text{ème}}$ neurone de la couche cachée ;

X_i : valeur de sortie du $i^{\text{ème}}$ neurone de la couche précédente ou d'entrée ;

W_{ij} : poids synaptique du neurone i de la couche d'entrée au neurone j de la couche cachée ;

b_j : est le biais ou le seuil d'activation du neurone j .

La réponse des neurones est une fonction d'activation non linéaire de type sigmoïde qui est défini par la formule suivante :

$$f(S_j) = \frac{1}{1 + e^{-S_j}}$$

$f(S_j)$, est pratiquement linéaire entre 0 et 1.

La (Fig.96) montre le graphique de la fonction sigmoïde. L'erreur calculée entre la valeur réelle observée et la valeur calculée, de la même variable, est propagée par le réseau et les poids sont ajustés. Les processus cycliques de l'alimentation et de la propagation d'erreur sont répétés jusqu'à ce que l'erreur de vérification soit minimale (Liu et *al.*, 2003).

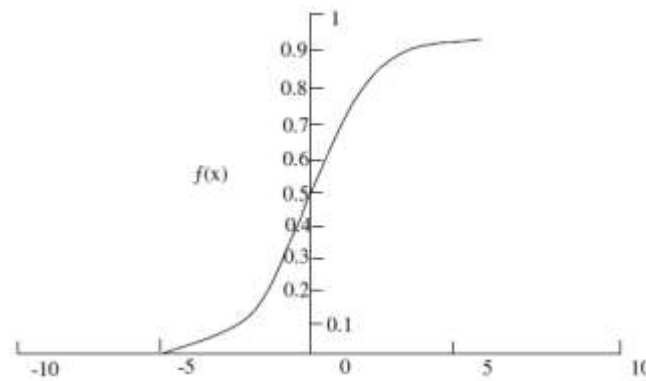


Fig. 95. Fonction de transfert sigmoïde.

12.6 Choix des critères d'exécution

Afin de répondre à la problématique de cette étude, telle que la prédiction de la conductivité électrique (CE), nous avons choisi l'architecture de perceptrons multicouches PMC en utilisant un algorithme de rétro-propagation avec fonction sigmoïde comme fonction de transfert. Ce choix est dû principalement à la popularité de ces deux derniers dans la gestion des relations non linéaire entre les variables, ce qui est le cas pour notre étude.

L'application de ce modèle a été effectuée sur les paramètres physico-chimiques des eaux souterraines analysés sur les périodes de (Février, Aout et Décembre 1999) d'après (T.H Debieche, 2002), de Décembre 2011 fournis par l'ANRH d'Annaba et la notre de Novembre 2016, pour créer un modèle du RNA en utilisant le logiciel STATISTICA version 8.0.

La base de données a été divisée en trois phases : La phase d'apprentissage, la phase de test et la phase de validation. L'apprentissage est la propriété la plus intéressante du modèle des réseaux de neurones.

L'entraînement ou l'apprentissage est le processus de choisir les poids optimaux sur les arêtes reliant les unités du réseau entre elles. Dans cette passe, les données d'entrée sont multipliées par les poids initiaux, puis sont additionnées pour donner le filet à chaque neurone. Le réseau d'un neurone passe par une fonction de transfert pour produire la sortie du neurone. Étant donné que l'ajustement des poids de réseau est effectué avec la dérivée de la fonction de transfert, des fonctions de transfert continu sont souhaitables (Diamantopoulou 2005)

L'objectif est d'utiliser l'ensemble d'apprentissage afin de calculer les poids dont la sortie équivalente du réseau sera aussi proche que possible de la sortie désirée pour autant d'exemples de l'ensemble d'apprentissage que possible.

Une fois le réseau de neurones entraîné, il est nécessaire de le tester sur une base de données différente de celle utilisée pour l'apprentissage. Ce test permet d'apprécier les performances du modèle élaboré. Si ces performances ne sont pas satisfaisantes, il faudra soit modifier l'architecture de réseau, soit modifier la base d'apprentissage. La démarche expérimentale

exige cependant une étape de validation avant toute utilisation. Elle est en effet nécessaire, pour vérifier la fiabilité de la représentation interne du réseau. Elle consiste en fait à simuler l'utilisation du réseau (Heddami, 2006).

12.7 La performance de modèle

Afin d'étudier la performance relative du réseau, Les paramètres statistiques qui ce sont le coefficient de détermination R^2 et la racine de l'erreur quadratique moyenne RMSE (Root Mean Square Error) ont été élaborés. Les expressions sous-jacentes ainsi que les forces et faiblesses de ces paramètres sont données ci-dessous :

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \hat{X}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}_i)^2}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \hat{X}_i)^2}{N}}$$

Où

X_i est la valeur mesurée de l'élément,

\hat{X}_i est la valeur calculée de l'élément par le modèle,

\bar{X}_i est la moyenne de l'élément mesurée et N le nombre de données de l'ensemble de calage.

Le coefficient de détermination (R^2) décrit le degré d'association entre les données expérimentales et celles obtenues par le modèle. C'est un nombre compris entre 0 et 1; de sorte que plus les coefficients de corrélation sont élevés, l'ajustement du modèle est meilleur, donc, il a une correspondance exacte avec les données expérimentales. Il est cependant fortement affecté par les valeurs extrêmes. Par ailleurs, RMSE est une bonne mesure de l'exactitude, mais uniquement pour comparer les erreurs de prévision exécutée par le PMC à d'autres types communs du RNA comprenant le RBF, le GRNN et linéaire.

Les réseaux de neurones artificiels ont la capacité de déterminer quels intrants sont essentiels. Une analyse de sensibilité peut être réalisée afin d'identifier l'importance des variables d'entrée. Ceci indique quelles variables sont considérées comme les plus utiles pour être retenu par le modèle RNA. Les modèles RNA supprime les variables d'entrée avec une faible sensibilité. La sensibilité est présentée par le Ratio et Rang. Cela indique la performance du réseau si cette variable est "indisponible". Le ratio indique le rapport entre l'erreur et l'erreur de base (c'est à dire l'erreur du réseau si toutes les variables sont "disponibles"). Le Rang énumère simplement les variables dans l'ordre de leur importance (Sakaa 2013).

12.8 Fonctionnement du modèle

L'enquête sur la conductivité électrique CE dans cette étude est basée sur les paramètres physico-chimiques des eaux souterraines. À partir d'une corrélation effectuée entre 11 candidats d'entrée y compris la conductivité électrique, les variables les plus importantes et sélectionnées pour les utilisées à l'entrée du réseau étaient le calcium (Ca^{2+}), le magnésium (Mg^{2+}), le sodium (Na^+), les chlorures (Cl^-) et les sulfates (SO_4^{2-}). Le modèle a ensuite été utilisé pour prédire la CE. Ces éléments ont été mesurés pour 120 puits d'eau souterraine distribués dans la plaine d'Annaba, dans les périodes citées précédemment. On peut représenter la structure du modèle RNA par la forme suivante :

$$\{CE\} = ANN [Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^+, Cl^- \text{ et } SO_4^{2-}]$$

Le réseau caractérisant le modèle élaboré, est schématisé et donné dans la (fig.97). Le schéma présente une structure typique des signaux qui transmettent des nœuds de la couche d'entrée, en traversant celles de la couche cachée atteignant par la suite le nœud de sortie.

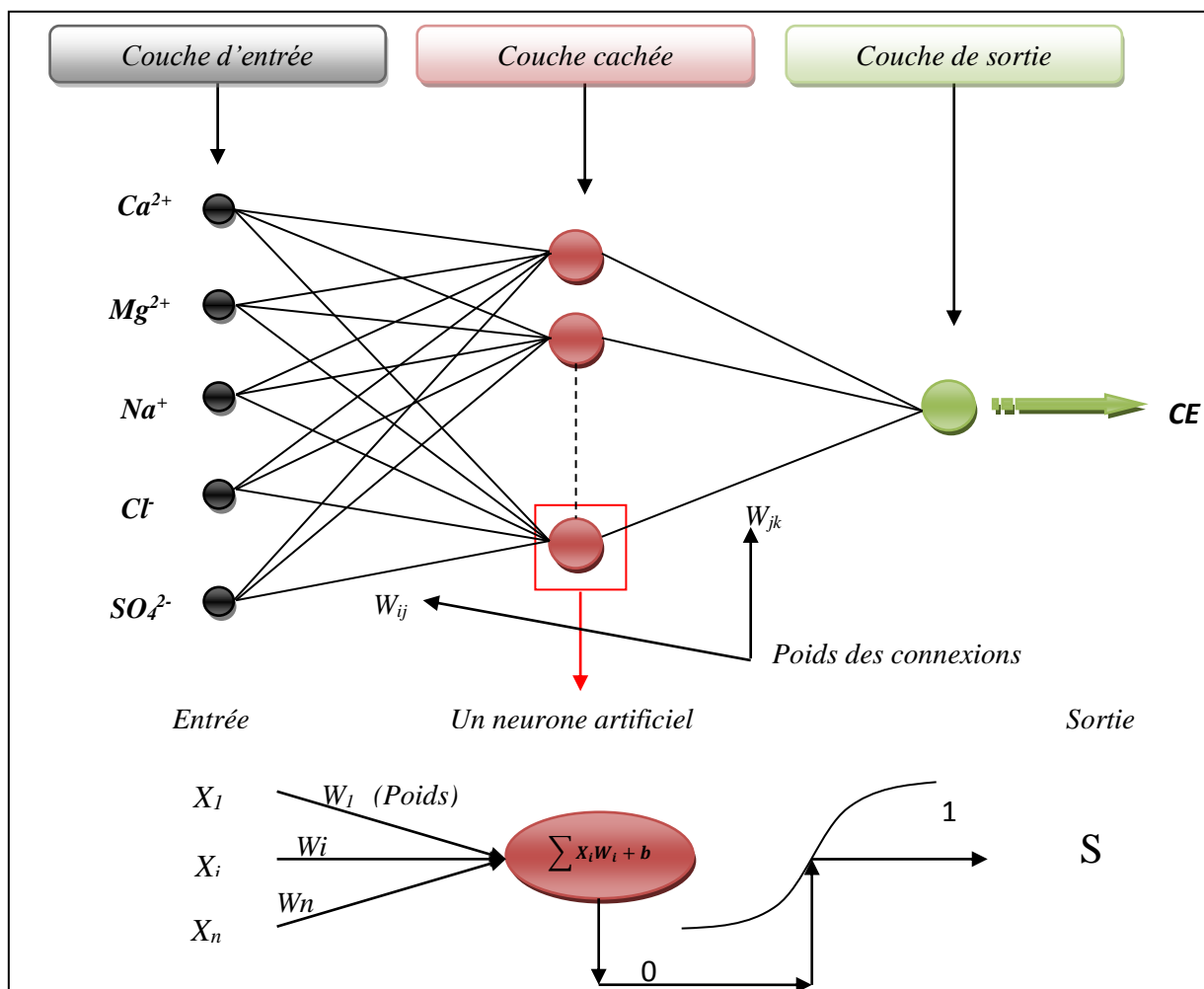


Fig. 96. Illustration d'un réseau à 3 couches (MLP) (Ghrieb 2011, modifiée).

Un poids numérique est associé à chacun de liaisons d'entre-nœud des trois couches. Le poids de W_{ij} représente la force des raccordements des nœuds entre l'entrée et la couche cachée tandis que W_{jk} représente la force des raccordements des nœuds entre la couche cachée et celle de sortie. Chaque nœud caché (j) reçoit des signaux d'après l'ensemble des nœuds d'entrée (i) qui porte les valeurs (X_i) des variables d'entrée. Chaque signal vient à travers une connexion à un poids (W_{ij}).

Le signal entrant I reçu par un nœud caché (I_j) est la somme pondérée des signaux entrants X_i par les poids correspondants W_{ij} , plus une constante reflétant la valeur seuil de nœuds b_j .

$$I_j = \sum_{i=1}^n X_i W_{ij} + b_j$$

Le signal I dans un nœud caché (I_j) est transféré de sa part à un nœud de sortie (O_j), en utilisant une fonction de transfert non linéaire (f) de type sigmoïde, donnée par l'équation suivante:

$$O_j = f(I_j) = \frac{1}{1 + e^{-I_j}}$$

O_j passe comme signal au nœud de sortie I_k , l'ensemble des signaux O_j transférés vers le nœud de sortie I_k , sous la somme :

$$I_k = \sum_{j=1}^n O_j W_{jk} + b_k$$

Les signaux d'un nœud de sortie (I_k) sont transformés en utilisant une fonction de type sigmoïde à un résultat de mesure (R_k) qui est :

$$R_k = f(I_k) = \frac{1}{1 + e^{-I_k}}$$

Après que le nombre des neurones dans les trois couches ait été arrangé de façon que les résultats, statistiquement soient plus plausibles, trois partitions différentes de la base de données sont alors utilisées pour les simulations. La base de données a été divisée en trois phases afin d'éviter le sur-apprentissage (Xiao et Chadarasekar, 1997), Pour détecter la perturbation du modèle, on utilise qu'une partie de données par l'apprentissage et une autre partie sera réservée pour tester la performance du modèle afin de décider l'arrêt de l'apprentissage avec des nœuds cachés optimales (Braddock et *al*, 1997). Cet arrêt est fait lorsque l'erreur de la validation du modèle commence à augmenter (Lallahem et Mania, 2003a, b ; Hani et *al*, 2006).

Donc, nous avons partitionné la base de données en : une phase d'apprentissage (60% de données), une phase de test (20%) et une phase de validation (20% de données). La validation est une technique utilisée couramment dans les modèles ANN, et a un impact significatif sur la répartition des données (Burdon et al, 1997).

12.9 Résultats et discussion

Parmi les onze paramètres d'analyse d'eaux souterraines, les variables d'entrée les plus importantes (indépendantes) et bien corrélés avec la conductivité électrique définies selon les corrélations du (Tab.37) sont le calcium (Ca^{2+}), le magnésium (Mg^{2+}), le sodium (Na^+), les chlorures (Cl^-) et les sulfates (SO_4^{2-}). Les modèles ont ensuite été utilisés pour prédire la CE (dépendant).

Tab. 37: Corrélation entre la CE et les autres éléments d'entrée.

	T°	PH	CE	Ca2+	Mg2+	Na+	K+	Cl-	SO42-	NO3-	HCO3-
T°	1,00	0,18	-0,07	-0,07	0,01	0,01	-0,05	0,01	-0,07	-0,02	0,31
PH	0,18	1,00	0,06	-0,03	0,06	0,07	-0,32	0,02	-0,21	-0,04	0,46
CE	-0,07	0,06	1,00	0,84	0,96	0,95	0,02	0,97	0,71	0,34	-0,10
Ca²⁺	-0,07	-0,03	0,84	1,00	0,84	0,78	0,17	0,81	0,75	0,38	-0,03
Mg²⁺	0,01	0,06	0,96	0,84	1,00	0,92	0,00	0,94	0,70	0,28	0,00
Na⁺	0,01	0,07	0,95	0,78	0,92	1,00	-0,02	0,97	0,69	0,29	-0,06
K⁺	-0,05	-0,32	0,02	0,17	0,00	-0,02	1,00	0,01	0,33	0,16	-0,18
Cl⁻	0,01	0,02	0,97	0,81	0,94	0,97	0,01	1,00	0,68	0,23	-0,11
SO₄²⁻	-0,07	-0,21	0,71	0,75	0,70	0,69	0,33	0,68	1,00	0,47	-0,13
NO₃⁻	-0,02	-0,04	0,34	0,38	0,28	0,29	0,16	0,23	0,47	1,00	-0,17
HCO₃⁻	0,31	0,46	-0,10	-0,03	0,00	-0,06	-0,18	-0,11	-0,13	-0,17	1,00

Les paramètres statistiques : moyenne, maximum, minimum et l'écart type, ont été calculés et illustrés dans le (Tab.38).

Tab. 38: Paramètres statistiques des variables sélectionnés.

Variables	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
CE	551	23536	3327,82	3880,31
Ca2+	21,95	812	189,8	160,05
Mg2+	4,95	495	72,34	88,54
Na+	23,27	3670	367,92	565,23
Cl-	47,16	6274	578,73	1049,97
SO₄²⁻	40,1	1140	215,17	193,65

Le (Tab.39) montre les meilleurs résultats du modèle RNA pour les périodes d'apprentissage, de test et de validation, après une examinations de plus de 200 réseaux. Les types de réseaux considérés sont : MLP (BFGS 24), MLP (BFGS 28), MLP (BFGS 34), MLP (CG 26), ces modèles ont été construits pour prédire les valeurs de la CE sur le réseau neuronal. Dans cette recherche, pour déterminer la performance idéale parmi les cinq modèles obtenues, le

coefficient de détermination (R^2), l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et le coefficient de corrélation (r) ont été utilisés. Ce qu'on a permis de choisir le meilleur modèle optimal de RNA, lequel le MLP, d'un algorithme (BFGS 24) à trois couches, d'une couche cachée avec 6 nœuds (Fig.98).

Tab. 39: Performance des modèles RNA dans la prédiction de la CE pour les trois phases.

Modèle	Architecture	Apprentissage			Test			Validation		
		RMSE	R^2	r	RMSE	R^2	r	RMSE	R^2	r
MLP (BFGS24)	5-6-1	421,273	0,974	0,987	510,641	0,937	0,968	453,826	0,95	0,974
MLP (BFGS28)	5-4-1	401,079	0,976	0,988	531,098	0,932	0,965	454,208	0,95	0,974
MLP (BFGS34)	5-3-1	425,837	0,973	0,986	610,95	0,91	0,954	547,485	0,927	0,963
MLP (CG26)	5-5-1	440,363	0,971	0,985	639,789	0,901	0,949	505,299	0,938	0,968
MLP (CG35)	5-5-1	373,016	0,979	0,99	629,433	0,904	0,951	499,896	0,939	0,969

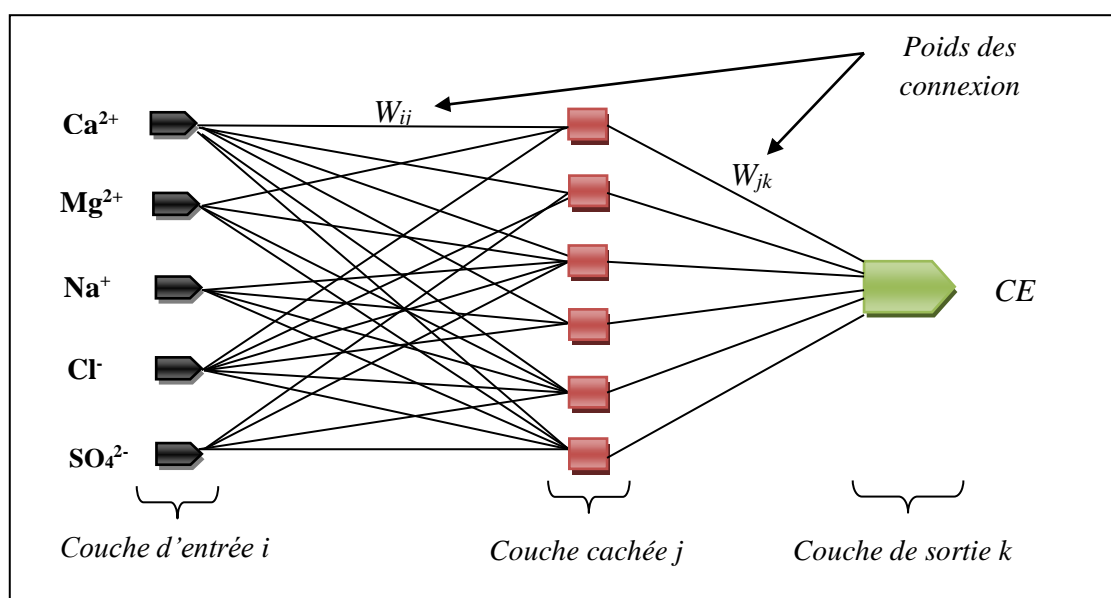


Fig. 97. Architecture du modèle RNA (MLP, BFGS24).

Le modèle a une très bonne performance avec un coefficient de corrélation supérieur à 0.97 pour la validation; il montre un excellent accord entre la conductivité observée et simulée (Fig.99).

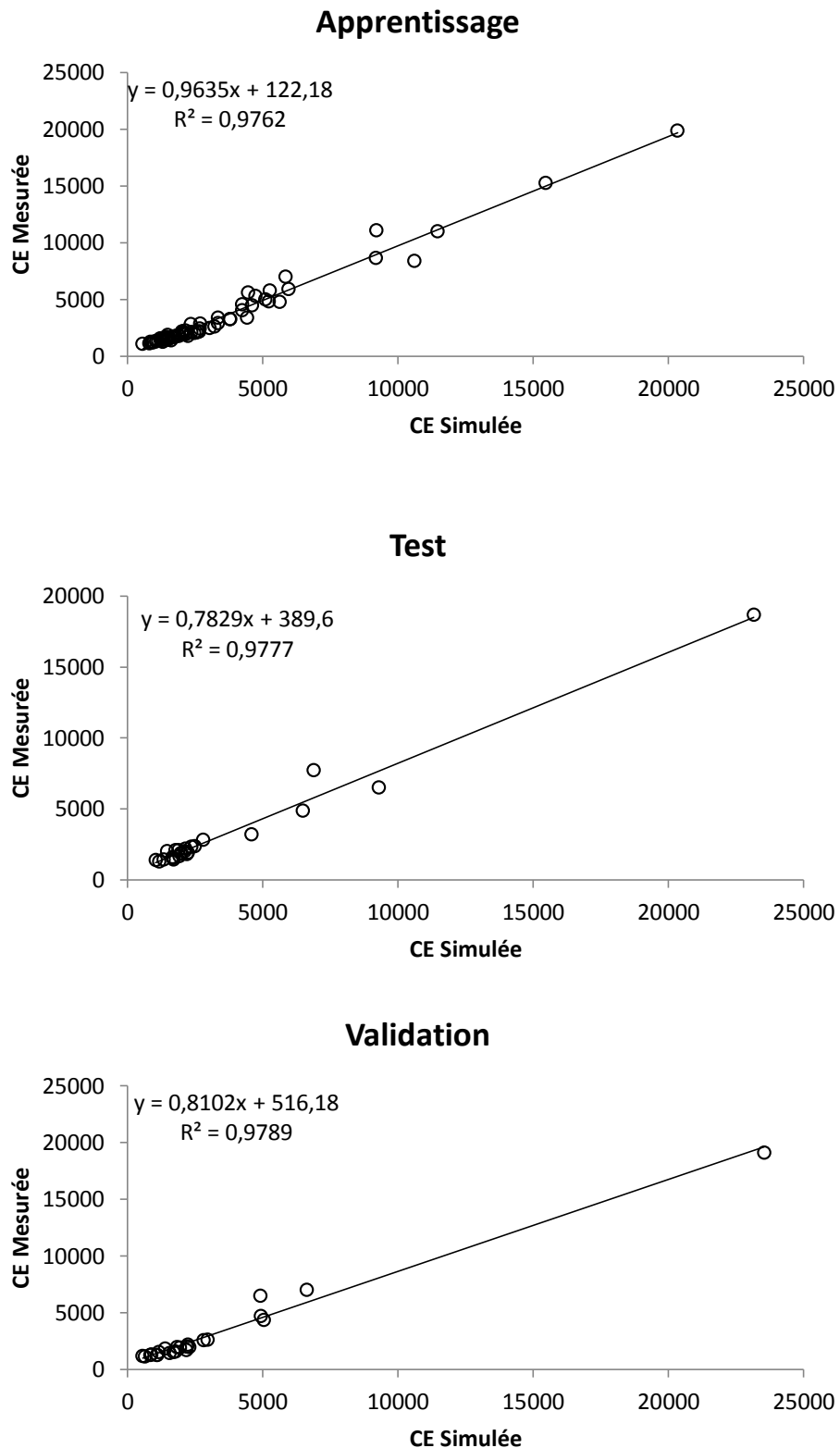


Fig. 98. Corrélation entre la CE simulée et mesurée pour les 3 phases : Apprentissage, Test et Validation.

L'analyse de sensibilité du RNA des variables de qualité de l'eau pendant l'analyse dans les 3 phases, indique les facteurs les plus importants influençant la conductivité électrique dans les eaux de surface et souterraines (Tab.40).

Tab. 40: Classement des variables par analyse de sensibilité.

Variables	Cl-	Mg ²⁺	Na+	Ca ²⁺	SO ₄ ²⁻
Ratio	11,02	3,75	2,68	1,26	1,20
Rang	1	2	3	4	5

13 Conclusion

Le travail réalisé, porte sur un comparatif de la qualité des eaux au cours de deux périodes différentes. Les résultats obtenus montrent que les eaux de la nappe superficielle restent très influencées par les facteurs externes parmi lesquels on note :

- les formations géologiques à l’affleurement ;
- le climat ;
- l’exploitation de la nappe ;
- l’impact de l’agriculture et l’industrie ;

Chacun des facteurs énumérés influence la qualité des eaux.

Les différentes méthodes appliquées dans la réalisation de notre travail ont montrés que la minéralisation des eaux est tantôt d’origine naturelle tantôt anthropique.

La minéralisation est d’origine naturelle, quand il pleut, les eaux issues des précipitations entraînent une dilution qui se traduit par une baisse des concentrations et par conséquent une baisse de la minéralisation.

La salinité est d’origine anthropique, en l’absence de précipitations importantes et de sollicitations accrues de la nappe, il en résulte une dégradation de la qualité des eaux, cette dégradation est liée à la surexploitation de la nappe en pareil situation.

Le schéma suivant récapitule le fonctionnement de la nappe en pareil cas :

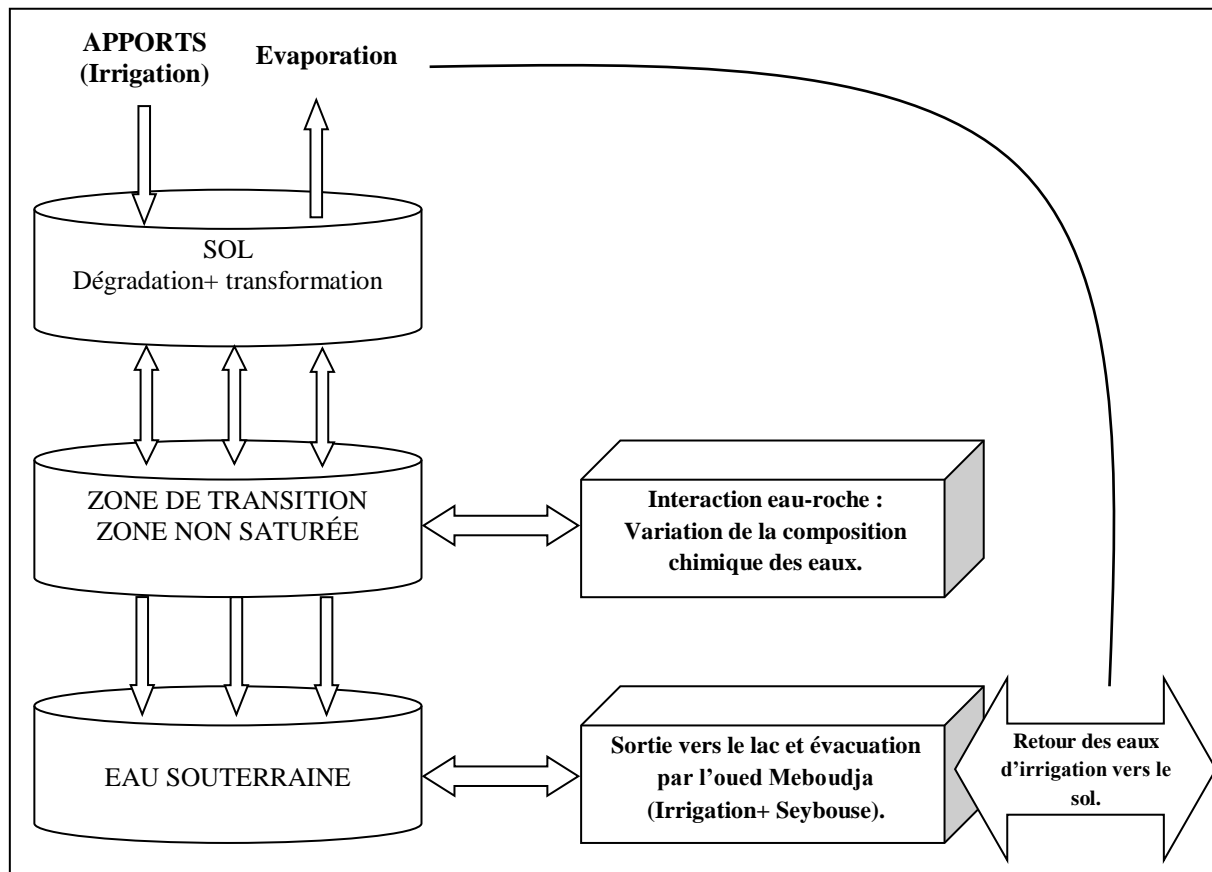


Fig. 99: Fonctionnement des nappes souterraine au niveau de la plaine.

Conclusion générale

L'Algérie fait partie des pays à stress hydrique, cette situation ne semble pas affecter les responsables du secteur de l'eau qui ne font aucun effort en matière de sensibilisation et de répression pour la sauvegarde de cette denrée qui se raréfie d'année en année. Le bilan global en quelques années a chuté de 2 milliards de mètres cube.

Cette raréfaction de la ressource s'accroît d'année en année, elle est impactée par le gaspillage et les méfaits des variations climatiques.

À l'instar des pays à stress hydrique, l'Algérie est confronté aux deux problèmes qui sont

- le manque d'eau, induit par les changements climatiques,
- les diverses formes de pollutions, freinant toutes possibilités de développement.

Ces deux problèmes doivent être pris en charge et de manière significative pour assurer aux Algériens une autosuffisance alimentaire.

La stratégie de l'eau programmée est très ambitieuse car elle s'appuie sur le recours aux eaux non conventionnelles, ces dernières peuvent constituer une ressource importante à condition d'être bien gérées car pouvant constituer un danger pour la population particulièrement les eaux traitées et épurées. Les agriculteurs peuvent utiliser des eaux non traitées et non épurées dans le cas de l'absence de contrôle, ce exposera la population au risque de maladies à transmissions hydriques et par la même la partie d'eau qui s'infiltrer accentue la pollution des nappes superficielles.

Notre travail, porte sur une région à vocation agro-industrielle, accompagnée par une urbanisation massive augmentant la demande en eau pour satisfaire les demandes.

Paradoxalement, la wilaya d'Annaba est alimentée en eau à partir de la wilaya d'El Tarf et ceci à plus de 80 %. Ce manque d'eau s'accompagne par l'implantation sur les territoires de la wilaya de complexes industriels particulièrement consommateurs d'eau et producteurs de polluants, parmi ces complexes, nous dénombrons : SIDER, FERTIAL (ex ASMIDAL), ONALAIT...elle aussi caractérisée par une activité agricole consommatrice d'eau, car à caractère estivale, on y trouve, la tomate industrielle, le melon ; la pastèque, ...Ces activités industrielles et agricoles, sont de gros utilisateurs d'eau.

Par ailleurs l'industrie implantée au niveau de la wilaya est à l'origine d'un exode rural important entraînant l'édification de ville entière dont les toutes récentes sont celles de Kalitoussa et Draa Errich, auparavant il y avait El Bouni et Sidi Ammar... L'édification de ces villes, souvent réalisées à la va vite au mépris des règles d'hygiène ont entraînés des effets néfastes sur l'environnement, car les canalisations destinées à l'évacuation des eaux usées

sont mal finies d'où des rejets çà même le sol et à cela s'ajoute les odeurs nauséabondes qui se dégagent.

Dans notre travail, nous allons essayer de répondre à toutes ces questions. Nous allons essayer de répondre à la question suivante :

INDUSTRIE + AGRICULTURE + AEP + MER = AUGMENTATION DE LA DEMANDE EN EAU D'OU UNE POLLUTION AUX GRANDES CONSEQUENCES.

L'industrie, l'agriculture, la mer,... participent directement ou indirectement dans la pollution des eaux.

Cette diversité des facteurs de pollution, ne peut être mise en évidence et expliquées que par l'utilisation de plusieurs approches allant dans le sens de la mise en évidence de cette dégradation de la qualité des eaux de la zone d'étude.

Il est connue que la ville d'Annaba et sa plaine font partie des zones côtières de l'Algérie. Pour rappel, les zones côtières du pays contiennent plus de 80 % de la population et la région d'Annaba, n'échappe pas à cette règle.

Du point de vue topographique la ville d'Annaba et sa région sont surplombées par les monts de l'Edough, dont l'altitude atteint les 1300 mètres cette position fait que la ville est exposée aux inondations en cas de pluie torrentielles, les eaux de pluies charries d'énormes quantités de solides qui obstrues les égouts et font que la ville se trouve sous l'eau et ceci pendant quelques jours. Ces inondations peuvent être catastrophiques les dernières sont celles qui se sont produits en 1983 et depuis, ce phénomène est récurrent et chaque année durant les périodes de précipitations on assiste à des inondations.

Les inondations sont liées outre la topographie aux caractéristiques géologiques des formations en présence. Le ruissellent des eaux s'explique par une infiltration faible des eaux, ceci à pour origine la nature des formations présentes sur le terrain. En parcourant la zone d'étude, on remarque l'affleurement de plusieurs formations. Cependant dans le détail on observe les deux catégories suivantes:

-Les formations sédimentaires, occupant la grande partie du terrain.

-les formations métamorphiques, présentes au niveau du massif de l'Edough.

Dans le détail, les formations métamorphiques, sont datées du primaire et sont constituées de gneiss, de schistes, de mica schistes, elles ont une faible perméabilité et sont pauvres en réserves en eau.

Les formations sédimentaires occupent le centre de la plaine et sont en général datées du quaternaire. Le quaternaire lui-même est partagé en :

- Quaternaire ancien, constitué par des formations alluviales (argiles, limon, sables, gravier et galets), et formant un réservoir d'eau superficielle, constituant la haute terrasse d'une altitude de 75 à 150m.

- Quaternaire moyen, correspond à la basse terrasse de 20 à 50 m, constituée par des argiles et des sables. Elle supporte des terres cultivées. Et elle se développe sur toute la région.

- Quaternaire récent, correspond à des dépôts alluvionnaires, limoneux très fins, à prédominance d'argile, particulièrement présent au niveau de la basse et la moyenne terrasse.

- Quaternaire actuel, constitué par des alluvions formés généralement de matériaux variés (argiles, sables, cailloux), résultant de l'érosion des formations traversées par l'Oued.

Cette variabilité des formations, joue un rôle important dans la recharge des nappes.

Au niveau de la plaine d'Annaba, on note l'impact de deux événements tectoniques.

- le premier allant du Miocène inférieur au Miocène supérieur, les mouvements tectoniques provoquent l'enfoncement progressif des grès numidiens. Par la suite, un remplissage d'âge Plio-Quaternaire par des matériaux détritiques s'est déclenché. Pendant le Miocène inférieur, l'ensemble de la région a été soumis à des phénomènes orogéniques et à un isolement complet du massif de l'Edough. Ainsi la plaine se trouve au centre d'un bassin limité au Nord par l'anticlinal du Massif de l'Edough et au Sud par un anticlinal principal de la chaîne Numidique

- le second, va du pliocène jusqu'au Quaternaire, caractérisé par un effondrement qui déclenche des processus de formation et de comblement des deux fosses, celle de Ben Ahmed et celle de Ben M'Hidi orientée SW-NE, qui sont séparés par un haut fond appelé l'élévation de Daghousa.

Du point de vue climat, la région étudiée fait partie des régions côtières, ces dernières jouissent de l'influence du domaine méditerranéen qui bénéficie d'un climat tempéré, avec des hivers doux et ses étés chauds et secs en font des régions très attractives pour l'Homme.

Ce dernier, agréable en hiver (12 °C à Annaba) et supportable en été (25 °C dans la même ville). L'humidité y est forte et les précipitations relativement abondantes et sont concentrées sur quelques mois d'automne et d'hiver surtout.

La région d'étude est parmi les plus arrosées d'Algérie. Le total des précipitations atteint une moyenne oscillant entre 600 et 1000 mm/an. Cependant la région reste dépourvue de ressources pérennes.

Ce constat est confirmé par le travail réalisé sur la ressource souterraine démontrant que la région recèle deux nappes dans sa partie nord, ces dernières forment la nappe dite des graviers libre dans sa partie sud.

La partie consacrée à l'hydrochimie demeure importante car elle contribue à expliquer les problèmes posés.

Cette partie a été traitée en utilisant plusieurs techniques. Nous avons débuté notre travail par une vérification de la fiabilité des analyses. Nous avons remarqué que le pourcentage d'erreur n'excédait pas 10 %, ce qui reste acceptable dans la mesure où les eaux sont chargées et que les analyses ont été faites à Alger.

Nous avons débuté l'interprétation par l'analyse des paramètres physiques mesurés in situ (température, pH et conductivité). Le constat établi montre que certains puits présentent des minéralisations assez élevées, ces ouvrages se situent sur la partie proche du littoral, ce qui confirme une influence de la mer.

Les paramètres chimiques (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , Cl^- , HCO_3^- et SO_4^{2-}), varient en fonction des mois de prélèvement, cependant les concentrations déterminées, ne posent pas de problèmes majeurs. Les nitrates par contre montrent de fortes concentrations dépassant les normes et sont associées au potassium, montrant l'utilisation de manières excessives des engrais de type NPK.

Le diagramme de Piper, montre une variation entre les deux périodes considérées, de ce fait on note qu'on passe d'une eau caractérisée par une qualité hétérogène lors de la première vers une qualité homogène (eaux chlorurées ou sulfatées calciques). Ce changement, serait, lié au fait qu'au cours de cette période la recharge de la nappe est importante et les apports se font à partir de la zone amont dont les eaux sont riches en calcium et dans ces cas même (bordure de mer), l'apport est supérieur aux extractions par pompage ralentie les échanges entre la mer et la nappe.

En fait, l'eau des nappes alluviales a une qualité qui dépend de celle de la nappe qui l'approvisionne et de celle des Oueds.

L'analyse en composantes principales, montre que le potassium et les nitrates évoluent ensemble, confirmant ainsi leur origine exogène liée à l'utilisation des engrais de type NPK.

Les bicarbonates et surtout le pH, n'interviennent pas dans l'acquisition du chimisme des eaux au cours de cette période. Le fait que le pH, se démarque des autres éléments peut être due au mode de mesure.

Le cadre de la zone d'étude et la minéralisation observée, montrent que cette dernière peut être liée à plusieurs facteurs. Ainsi la présence de la mer, constitue un premier facteur, ainsi nous avons traité du rapport caractéristique Br^-/Cl^- , d'après les résultats obtenus il s'avère que la présence marine soit par contact direct mer-nappe ou par les embruns marins, contribue à la salinité des eaux de la région.

Toujours en utilisant les rapports caractéristiques entre les éléments chimiques, nous remarquons une bonne correspondance entre le sodium et les chlorures. Cette répartition est due aux échanges de base qui s'opèrent entre la roche et l'eau.

Les résultats obtenus, montrent que la nappe est sujette à une pollution de deux formes, la première naturelle (roche ou mer) et la seconde anthropique. Afin de déterminer le degré de pollution des eaux de la nappe, nous avons utilisé la méthode GALDIT, cette dernière a la particularité de s'appliquer aux zones côtières. Les résultats obtenus montrent que la zone littorale est la plus vulnérable à la pollution, ceci est lié à la présence marine et aux différents rejets qui convergent vers cette zone.

La modélisation par l'utilisation de la méthode neuronale conforte des résultats obtenus dans la partie hydrochimie.

Annexes

Méthode GALDIT

Le principe d'attribution de classe de vulnérabilité repose sur trois composantes :

Pondération : un poids est attribué à chacun des six paramètres en considération son importance relative par rapport à l'intrusion saline. Un poids allant typiquement de 1 (influence faible moindre) à 4 (grande influence) est proposé par les auteurs.

Notation (ou rang) : une valeur de 2.5 à 10 est attribuée à chaque paramètre en fonction de ses attributs (plus la valeur est importante plus la vulnérabilité est grande). Par exemple, les valeurs attribuées sont obtenues à partir de tables de correspondance entre les caractéristiques hydrogéologiques locales et la valeur du paramètre.

Classification : la classification des aquifères côtiers par rapport à l'intrusion saline est déterminée par un indice de vulnérabilité final correspondant à la somme pondérée et normée des notes de rang attribuées aux six paramètres GALDIT, selon la formule suivante :

$$IG = \frac{\sum_{i=1}^6 P_i R_i}{\sum_{i=1}^6 P_i}$$

Où p_i est le poids accordé (1 à 4) à chaque paramètre i ; R_i est le rang ou la notation accordée à chaque paramètre de (2.5 à 10). Les poids (p_i) et les notations (R_i) des attributs des six paramètres de la méthode GALDIT par rapport à l'intrusion saline sont décrits ci-dessous :

Paramètre G (type d'aquifère)

Dans le contexte naturel, les eaux souterraines prennent place généralement au sein de formations géologiques qui donnent naissance à des aquifères libres, captifs ou semi-captifs. Le contexte géologique des aquifères côtiers (géométrie, organisation des formations perméables et imperméables) a une influence indéniable sur la présence et sur l'extension d'une intrusion saline. En général, la valeur du paramètre G est attribuée sur la base suivante (Tab.9):

Tab. 41: Le poids et le rang attribués au paramètre G.

Paramètre G	Poids	Attributs du paramètre	Rang (Note)
		Classes	
Type d'aquifère	1	Aquifère captif	10
		Aquifère libre	7.5
		Aquifère semi-captif	5
		Aquifère contraint ⁽¹⁾	2.5

⁽¹⁾Barrière alignée parallèlement à la côte.

Ainsi, un aquifère libre, en conditions naturelles serait plus affecté par une intrusion saline qu'un aquifère captif, ce dernier étant sous une pression plus grande qu'uniquement la pression atmosphérique. De même, un aquifère captif est plus sujet à l'intrusion saline en comparaison d'un aquifère semi-captif, la semi-captivité maintenant la pression hydraulique au minimum, à cause des pertes associées à des aquifères adjacents. L'aquifère captif est plus vulnérable du fait de l'existence de cônes de dépression plus grands et de l'expulsion immédiate d'eau des puits lors des pompages ; dans ce cas la valeur du rang est le plus élevée (10).

Dans le cas d'un système aquifère multicouche, la valeur la plus importante devrait être adoptée (note de 10). Ainsi, lors de l'attribution des poids relatifs au paramètre G, il est important d'examiner avec attention la position et le type d'aquifères présents dans la zone d'étude.

Paramètre A (conductivité hydraulique de l'aquifère)

Le paramètre A est utilisé pour déterminer la vitesse d'écoulement de l'eau au sein de l'aquifère. Par définition, la conductivité hydraulique traduit l'aptitude du milieu à transmettre l'eau au sein de l'aquifère. La conductivité hydraulique résulte de l'inter-connectivité des pores dans les sédiments non consolidés et des fractures pour les milieux consolidés. L'importance du front d'intrusion saline est influencé par la conductivité hydraulique – plus la conductivité est grande, plus le front de pénétration de l'intrusion saline est important. Une conductivité hydraulique faible a pour conséquence également un grand cône de dépression lors d'un pompage pour un débit donné, par rapport à un aquifère caractérisé par une conductivité hydraulique élevée. Ainsi, il est aussi nécessaire de prendre en considération la présence de barrières hydrauliques telles que des niveaux argileux et des dykes imperméables parallèles à la côte, qui peuvent constituer des obstacles à l'intrusion saline. Des valeurs caractéristiques pour le paramètre L sont données ci-dessous (Tab.10).

Tab. 42: Le poids et le rang attribués au paramètre A.

Paramètre A	Poids	Attributs du paramètre		Rang (Note)
		Classes		
Conductivité hydraulique de l'aquifère (m/j)	3	Elevée	> 40	10
		Moyenne	10 – 40	7.5
		Faible	5 – 10	5
		Très faible	< 5	2.5

Paramètre L (Profondeur de la nappe par rapport au niveau de la mer)

Le niveau piézométrique par rapport au niveau moyen de la mer est un paramètre important (poids maximal de 4) pour évaluer la vulnérabilité à l'intrusion saline dans une zone donnée, car il détermine le potentiel hydraulique capable de repousser le front d'intrusion saline. Tel que défini par l'équation de Ghyben-Herzberg, pour chaque mètre d'eau douce stockée au-dessus du niveau de la mer, ce sont 40 mètres d'eau douce qui sont présents sous l'interface eau douce eau salée ainsi définie. L'attribution des notes du paramètre L doit prendre en considération les variations du niveau piézométrique sur le long terme. De manière générale, il est important de ne pas considérer uniquement une valeur piézométrique moyenne, mais d'examiner avec attention les périodes pour lesquelles le niveau piézométrique est le plus bas, au-dessus du niveau de la mer, correspondant à la plus grande vulnérabilité potentielle. Pour l'attribution des valeurs, les auteurs proposent la notation suivante (Tab.11).

Tab. 43: Le poids et le rang attribués au paramètre L.

Paramètre L	Poids	Attributs du paramètre		Rang (Note)
		Classes		
Hauteur de la nappe par rapport au niveau de la mer (m)	4	Elevé	< 1.0	10
		Moyen	1.0 – 1.5	7.5
		Faible	1.5 – 2	5
		Très faible	> 2	2.5

Paramètre D (distance perpendiculaire à la côte)

La distance de l'aquifère par rapport à la mer est aussi un critère important de la vulnérabilité (poids maximal de 4) (Tab.12). En général, l'impact de l'intrusion saline décroît en s'éloignant de la côte. La valeur maximale de l'indice peut être fixée à 10 pour des distances de la côte inférieures à 500 m. Une valeur de 2.5 est acceptable pour des distances supérieures à 1000 m.

Tab. 44: Le poids et le rang attribués au paramètre D.

Paramètre D	Poids	Attributs du paramètre		Rang (Note)
		Classes		
Distance par rapport à la côte (m)	4	Très courte	< 500	10
		Courte	500 – 750	7.5
		Moyenne	750 – 1000	5
		Eloignée	> 1000	2.5

Il faut noter que ce paramètre doit être pris en considération avec prudence dans le cas d'aquifères karstiques côtiers; l'intrusion saline dépend de la présence de conduits karstiques. Ce paramètre n'est peut-être pas directement transposable pour ce type d'aquifère (Dorfliger, et al., 2011).

Paramètre I (impact de l'état actuel de l'intrusion saline de la zone concernée)

La zone d'étude considérée peut être plus ou moins déjà affectée par une intrusion saline et l'équilibre hydraulique naturel entre l'eau douce et l'eau salée peut être ainsi déjà modifié. Cet état doit être pris en compte lors de la cartographie de la vulnérabilité à l'intrusion saline. Dans cette méthode, il est proposé d'utiliser le ratio $Cl^- / (HCO_3^- + CO_3^{2-})$ comme critère d'évaluation de l'intrusion saline dans l'aquifère côtier. L'ion chlorure (Cl^-) est dominant dans l'eau de mer et peu présent dans les eaux souterraines alors que c'est l'inverse pour le bicarbonate ($HCO_3^- + CO_3^{2-}$). Si le ratio est supérieur à 2 ppm (ou milligramme par litre), une note maximale de 10 est attribuée au paramètre I. Un ratio inférieur à 1 montre que l'intrusion saline est très faible (Tab.13).

Tab. 45: Le poids et le rang attribués au paramètre I.

Paramètre I	Poids	Attributs du paramètre		Rang (Note)
		Classes		
Impact de l'état actuel de l'intrusion saline de la zone d'étude : $Cl^- / (HCO_3^- + CO_3^{2-})$	1	Elevé	> 2	10
		Moyen	1.5 – 2	7.5
		Faible	1 – 1.5	5
		Très faible	< 1	2.5

Paramètre T (épaisseur de l'aquifère)

L'épaisseur de l'aquifère ou de la zone saturée d'un aquifère libre joue un rôle important dans l'extension et l'ampleur de l'intrusion saline en zones côtières. Il a été clairement démontré que plus l'épaisseur de l'aquifère est importante, plus l'extension de l'intrusion saline devrait être importante et inversement. Suivant ce principe, des valeurs de rang correspondantes à différentes épaisseurs d'aquifère sont attribuées comme suit (Tab.14):

Tab. 46: Le poids et le rang attribués au paramètre T.

Paramètre T	Poids	Attributs du paramètre		Rang (Note)
		Classes		
Epaisseur de l'aquifère (m)	2	Large	> 10	10
		Moyenne	7.5 – 10	7.5
		Petite	5 - 7.5	5
		Très petite	< 5	2.5

Tab. 47: Synthèse des poids et rangs de la méthode GALDIT.

Paramètres	Poids	Rangs			
		Très faible	faible	Moyen	Elevé
		2.5	5	7.5	10
G : Type d'aquifère	1	contraint	semi-captif	libre	captif

A : conductivité hydraulique (m/jour)	3	< 5	5 - 10	10-40	> 40
L : Profondeur de la nappe (niveau piézométrique) (m)	4	>2.5	1.5 – 2	1 – 1.5	<1
D : Distance à la côte (m)	4	> 1000	750-1000	500-750	< 500
I : Impact de l'intrusion saline (mg/l)	1	< 1	1 – 1.5	1.5 - 2	> 2
T : Epaisseur de l'aquifère (m)	2	< 5	5 – 7.5	7.5-10	> 10

Considérant les poids et les notes proposés ci-dessus (Tab.16), la valeur minimale de l'indice GALDIT est de 2.5 et la valeur maximale de 10. La vulnérabilité d'un aquifère côtier par rapport à l'intrusion saline peut être répartie en 3 classes de vulnérabilité :

Tab. 48: Classes de la vulnérabilité de l'indice GALDIT.

Classe de vulnérabilité	Indice GALDIT
Vulnérabilité forte	> 7.5
Vulnérabilité moyenne	5 – 7.5
Vulnérabilité faible	< 5

Bibliographie

Ahmed-Said Y & Leake B.E., (1992): The composition and origin of Kef Lakhal amphibolites and associated amphibolite and olivinerich enclaves, Edough, NE Algeria. *Mineralogical Magazine* 56, pp 459–468.

Ahmed-Said Y & Leake B.E., (1993): The Cap de Garde pelites and gneisses, Edough, Annaba, NE Algeria: their petrology, geochemistry and origin. *Bulletin du Service Géologique de l'Algérie* 4, pp 3–24.

Aichouri I., (2016): Modélisation de l'intrusion marine dans l'aquifère côtier d'Annaba. Apport des analyses salinométriques. Thèse de Doctorat. Université Badji Mokhtar Annaba. 114 p.

Aissa D.E., Cheilletz A., Marignac CH., Feraud G., Gasquet D., Ruffet G., (1994): Confirmation par datation $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ de l'âge Burdigallien de la distension dans le massif de l'Edough . NE Algérie. Conséquences métallogéniques. 15^{ème} RST, Abstr., Nancy, P. 91, Soc. Géol. Fr. ED.

Aissa D.E., Cheilletz A., Gasquet D & Marignac C., (1995): Alpine metamorphic core complexes and metallogensis: The Edough case (NE Algeria). In: Pasava, J., Kribek, B., Zak, K. (Eds.), *Mineral deposits: from their origin to their environmental impacts*. Balkema, Rotterdam, pp 23–26.

Aoun-Sebaiti B., (2010): Gestion optimisée des ressources en eau d'une nappe côtière. Application à la plaine d'Annaba (Nord-est Algérien). Thèse de Doctorat. Université de Lille Sciences et Technologies, 211 p.

Andersen MS., Nyvang V., Jakobsen R., Postma D., (2005): Geochemical processes and solute transport at the seawater/freshwater interface of a sandy aquifer. *Geochim Cosmochim Acta* 69:3979–3994. Doi:10.1016/j.gca.2005.03.017

ANRH , Agence Nationale des Ressources Hydriques d'Annaba.

Appelo C. & Postma D., (2005): *Geochemistry, groundwater and pollution*. A.A. Balkema Publishers, Leiden, The Netherlands a member of Taylor & Francis Group plc.

Aris A., Abdullah M., Ahmed A. & Woong K., (2007): Controlling factors of groundwater hydrochemistry in a small island's aquifer. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 4 (4) , 441–450.

Aryafar A., (2019): Evolving genetic programming and other AI-based models for estimating groundwater quality parameters of the Khezri plain, Eastern Iran. *Environmental Earth Sciences* 78:69. Doi.org/10.1007/s12665-019-8092-8

Atteia O., (2015) : *Chimie et pollutions des eaux souterraines*, (Lavoisier, Éd.), CEDEX, 2015), chapitre IV. Page 118.

Attoui B., (2014): Etat de la vulnérabilité à la pollution des eaux des grands réservoirs d'eaux souterraines de la région d'Annaba- El-Tarf et identification des sites d'enfouissement de déchets. Thèse de doctorat en sciences de l'Université Badji Mokhtar Annaba. 134p.

Auzende J.M., Bonnin J. & Olivet J.L., (1975): La marge nord africaine considérée comme marge active. Bulletin de la Société Géologique de France 7, pp 486–495.

Bahir M., Chkir N., Trabelsi R., Haj Ammar F., Zouari K. & Chamchati H., (2012): Hydro-geochemical behaviour of two coastal aquifers under severe climatic and human constraints: comparative study between Essaouira basin in Morocco and Jeffara basin in Tunisia. Int. J. Hydrology Science and Technology , Vol. 2, No. 1, pp.75–100.

Barbecot F., (1999): Approche géochimique des mécanismes de salinisation des aquifères cotiers – Chronologie 14 C – 226 Ra. Paris: Université Paris XI.

Batchi M., Al karkouri J., El maaqili M. & Fenijiro I., (2014): Cartographie de la vulnérabilité à l'intrusion marine de l'aquifère cotier de Mnasra (Littoral Du Gharb, Maroc-Nord-Occidental). Marine Sciences and Coastal Research , 54-69.

Bechiri N., (2011): Evolution du chimisme des eaux de surface et Souterraines dans le bassin versant de la Seybouse (Nord-Est Algérien). Mémoire de Magister de l'Université Badji Mokhtar Annaba.97p.

Belabed BE., (2010): La pollution par les métaux lourds dans la région d'Annaba « Sources de contamination des écosystèmes aquatiques ». Thèse de doctorat en sciences de l'Université Badji Mokhtar Annaba. 176p.

Ben hamouda M. F., (2008): Approche hydrogéochimique et isotopique des systèmes aquifères cotiers du cap bon: cas des nappes de la côte orientale et d'El Haouaria, Tunisie. Thèse de doctorat En Sciences. Institut National Agronomique-Tunisie. P233.

Bishop C., (1995): Neural Networks for Pattern Recognition. Oxford: University Press.

Bolfa J., (1948): Contribution à l'étude des gîtes métallifères de la kabylie de collo et de la région deône. Bulletin du service de la carte géologique de l'Algérie 6, 216p.

Bouchaou L., Michelot J., Vengosh A., Hsissou Y., Qurtobi M., Gaye C., et al., (2008): Application of multiple isotopic and geochemical tracers for investigation of recharge, salinization, and residence time of water in the Souss-Massa aquifer, southwest of Morocco. J. Hydrol., 352 , 267-287.

Bouderbala A., (2015): Contribution des méthodes hydrochimiques et géophysiques à l'acquisition de la minéralisation dans les zones cotières cas de la nappe alluviale de l'oued nador - Tipaza (Algérie). Thèse de Doctorat en sciences. Université Hassiba Benbouali de Chlef. 195p.

Bougherira N., (2015): Mécanismes de transfert des polluants métalliques dans la vallée de la Meboudja (W. d'Annaba). Thèse doctorat en sciences de l'Université Badji Mokhtar Annaba. 156p.

Bouillin J.P., (1979): La transversale de Collo et d'El-Milia (Petite Kabylie): une région clef pour l'interprétation de la tectonique alpine de la chaîne littorale d'Algérie. Mémoire de la Société Géologique de France 57, 135, 84p.

Bouillin J.P., (1986): Le "bassin maghrébin": une ancienne limite entre l'Europe et l'Afrique à l'ouest des Alpes. Bulletin de la Société Géologique de France 8, pp 547–558.

Boumaiza L., (2003): Contribution à l'étude des caractéristiques hydrogéologique et hydrochimiques des dépôts sableux d'Echatt (Nord-Est Algérien). Mémoire d'ingénieur Université d'Annaba. P71-72.

Bouragba L., Mudry J., Bouchaou L., Hsissou Y & Tagma T., (2011): Characterization of groundwater in the Souss upstream basin: Hydrochemical and environmental isotopes approaches. African Journal of Environmental Science and Technology, 5(4) , 307-315.

Bourbia H., (2011): Faisabilité de l'implantation de bassins d'alimentation d'un aquifère. Cas du massif dunaire de Bouteldja. (Extrême nord-est Algérien). Mémoire de Magister de l'Université Badji Mokhtar Annaba. 137p

Braddock RD., Kremmer ML., Sanzogni L., (1997): Feed-forward artificial neural network model for forecasting rainfall run-off. Proceedings of the International Congress on Modelling and Simulation (Modsim 97), the Modelling and Simulation Society of Australia Inc., Hobart, Australia, pp. 1653–1658.

Brakni E., (2011): Réseaux de neurones artificiels appliqués à la méthode électromagnétique transitoire infiniTEM. Maîtrise en ingénierie. Université du Québec en Abitibi Témiscamingue.

Brunel M., Hammor D., Misseri M., Gleizes G & Bouloton J., (1988): Cisaillements synmétamorphes avec transport vers le Nord-Ouest dans le massif cristallin de l'Edough (Wilaya de Annaba, Algérie) : Une faille normale ductile hercynienne, Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris, 306, série II, pp 1039-1045.

Burden FR., Brereton RG., Walsh PT., (1997): Cross-validatory selection of test and validation sets in multivariate calibration and neural networks as applied to spectroscopy. Analyst 122(10):1015–1022. doi:10.1039/A703565I.

Caby R., Hammor D., (1992): Le massif cristallin de l'Edough (Algérie) : un "Metamorphic Core complex" d'âge miocène dans les Maghrébides. Comptes rendus de l'Académie des sciences. Série 2. Mécanique, physique, chimie, sciences de l'univers, sciences de la terre, 314 (08) 829-835.

Capacciona B., Diderob M., Palettab C & Didero L., (2005): Saline intrusion and refreshing in a multilayer coastal aquifer in the Catania Plain (Sicily, Southern Italy): dynamics of degradation processes according to the hydrochemical characteristics of groundwaters. *J. Hydrol* (307), 1–16.

Chachadi A. G & Lobo-Ferreira J. P., (2005): Assessing aquifer vulnerability to seawater intrusion using GALDIT method: Part2-GALDIT indicator descriptions. IHAS and LNEC, proceeding of the Fourth Inter Celtic Colloquium on Hydrogeology and Management of Water Ressources. Gurmaraes, Portugal: Universidade do Minho, July 11-13.

Cidu R., biddau R & Fanfani L., (2009): Impact of past mining activity on the quality of groundwater in SW Sardinia (Italy). *Journal of Geochemical Exploration*, 100 , 125–132.

Cohen C.R., (1980): Plate tectonic model for the Oligo-Miocene evolution of the western Mediterranean. *Tectonophysics* 68, pp 283-311.

Custodio E., (2002): Coastal aquifers as important natural hydrogeological structures. Proceedings of the XXXII IAH and VI ALHSUD Congress Groundwater and Human Development, Mar del Plata, Italy, October 2002, pp 1905–1918.

Custodio E, Bruggeman G. A., (1987): Hydrogeochemistry and tracers. In: Custodio E (ed) *Groundwater problems in coastal areas studies and reports in hydrology*, vol 45. UNESCO, Paris, pp 213–269.

Debieche T.H., (2002): Évolution de la qualité des eaux (salinite, azote et Métaux lourds) sous l'effet de la pollution saline, Agricole et industrielle : Application à la basse plaine de la seyhouse - nord-est algérien. Thèse de docteur de l'Université de Franche-Comte. 199p.

De Montety V., Olivier R., Christine V. C., Bernard B., Daniel H & Vincent V., (2008): Origin of groundwater salinity and hydrogeochemical processes in a confined coastal aquifer: Case of the Rhône delta (Southern France). *Applied Geochemistry* (23), 2337–2349.

Derradji F., (2004): Identification quantitative et qualitative des ressources en eau de la région d'Annaba-El Tarf (Nord Est de l'Algérie), Thèses de doctorat ès sciences, Université d'Annaba.

Diamantopoulou M. J., (2005) : The Use of a Neural Network Technique for the Prediction of Water Quality Parameters. *Operational Research. An International Journal* Vol.5, No. 1, pp. 115-125

Djabri L., (1996): Mécanismes de la pollution et vulnérabilité des eaux de la Seyhouse. Origines géologiques, industrielles, agricoles et urbaines. Doctorat ès Sciences de l'Université d'Annaba. 280 p.

Djabri L., Hani A., Mania J., Mudry J., (2000): Conséquences des pratiques agricoles sur la qualité des eaux du bassin de la Seybouse (Est algérien). Colloque international ESRA'2000, Poitiers, France S3, P39-42.

Djabri L., Rouabhia A., Hani A et al., (2008): Origin of water salinity in a lake and coastal aquifer system. *Environ Geol* 54, 565–573. Doi.org/10.1007/s00254-007-0851-2

Djabri L., Bouhsina S., Hani A., Chaffai H., Bougherira N., Abdeslam I & al., (2019): Essai de cartographie du risque d'intrusion marine par une approche multicriteres : Cas de la nappe de collo (N-E, Algerien). *Larhyss Journal* , 7-20.

Dorfliger N., (2013): Entre terre et mer, les eaux souterraines du littoral. *Geosciences* , pp.74-81.

Dorfliger N., Schomburgk S., Bouzit M., Petit V., Caballero Y., Durst P & al., (2011): Montée de niveau marin induite par le changement climatique: Conséquence sur l'intrusion saline dans les aquifères cotiers en mitropole, Rapport intermédiaire, BRGM RP-60829-Fr, 302p., 122 ill., 4ann.

ElAchheb A., Mania J & Mudry J., (2003): Mécanismes d'acquisition de la minéralisation des eaux souterraines dans le bassin Sahel-Doukkala (Maroc Occidental). Approche par des traceurs hydro-géochimiques. IGME. Madrid.

El Mansouri B., Loukili Y & Esselaoui D., (2003): Mise en évidence et étude du phénomène de l'upconing dans la nappe côtière du Rharb (NW du Maroc). Madrid, 84-7840: Instituto Geológico y Minero de España (IGME).

Fedrigoni L., Krimissa M., Zouari K., Maliki A & Zuppi G. M., (2001): Origine de la minéralisation et comportement hydrogéochimique d'une nappe phréatique soumise à des contraintes naturelles et anthropiques sévères: exemple de la nappe de Djebeniana (Tunisie). *C. R. Acad. Sei*, (pp. 665-671). Paris, 332.

Fortin V., Ouarda T., Rasmussen T.P. & Bobée B., (1997) : Revue bibliographique des méthodes de prévision des débits. *Revue des Sciences de l'Eau*, 4 : pp. 461-487

Gaud B., (1976) : Etude hydrogéologique du système d'Annaba-Bouteldja. Synthèse des connaissances et recherche des conditions de modélisation. Rapport A.N.R.H. (inédit), Annaba, 2 vol. 230p. 10 planches.

Ghorbani M. A., (2015): Use of artificial neural networks for electrical conductivity modeling in Asi River. *Appl Water Sci*. DOI 10.1007/s13201-015-0349-0

Ghrieb L., (2011): Impact de la minéralisation des formations triasiques sur la qualité de l'eau et du sol en zone semi- aride : Cas de la plaine Bekkaria-Tébessa (Extrême Nord-est Algérien). Thèse de doctorat. Université Badji Mokhtar Annaba. P134.

Giménez E & Morell I., (1997): Hydrogeochemical analysis of salinization processes in the coastal aquifer of Oropesa (Castellon, Spain). *Environ Geol* 29 , 118–131.

Gleizes G., Bouloton J., Bossière G., Collomb P., (1988): Données lithologiques et pétro-structurales nouvelles sur le massif cristallophyllien de l'Edough (Est-Algérien). *C. R. Acad. Sci. Paris*, t. 306, Série II, p. 1001-1008, 1988.

Govindaraju RS., (2000): Artificial neural network in hydrology II: hydrologic application, ASCE task committee application of artificial neural networks in hydrology. *J Hydrol Eng* 5:124–137

Habes S., (2013): Caractéristiques chimiques d'un lac appartenant aux écosystèmes humides du Nord de l'Algérie; Cas : Lac Fetzara Nord - Est Algérien. Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar Annaba. 218p.

Habes S., Djabri L., Hani A., Bouhsina S & Mudry J., (2012): Quantification des apports et des exores d'un lac : cas du lac Fetzara, région d'Annaba (Nord-Est Algérien). *Rev. Sci. Technol.*, Synthèse 24 : 21-28.

Hadj-said S., (2007): Contribution à l'étude hydrogéologique d'un aquifère en zone cotière : Cas de la nappe de Guerbes. Thèse de doctorat. Université Badji Mokhtar. Annaba. P176.

Hagan M, Demuth H, Beale M., (1996): *De Jes us Neural network design*, 2nd edn. PWS Publishing Co Boston, MA.

Hammor D & Lancelot J., (1998): Métamorphisme miocène de granites panafricains dans le massif de l'Edough (Nord-est de l'Algérie). *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, Vol. 327, pp 391-396.

Hammor D., (1992): Du Panafricain au Miocène : 600 millions d'années d'évolution polycyclique dans le massif de l'Edough (Algérie Nord Orientale). Retraces par la pétrologie, la tectonique et la géochronologie (U/Pb, Rb/Sr, Sm/Nd et ³⁹Ar/⁴⁰Ar). Thèse de l'UST Langue doc, Univ. de Montpellier II, pp. 205.

Hamzaoui L., (2019): Gestion intégrée des ressources en eau dans le bassin versant de la Seybouse-Cas de région d'Annaba et de Guelma. Thèse de doctorat en sciences. Université Badji Mokhtar Annaba. P155.

Hani A., (2003): Analyse méthodologique de la structure et des processus anthropiques : application aux ressources en eau d'un bassin côtier méditerranéen. Thèse de Doct. d'Etat Univ. Badji Mokhtar Annaba. 214 p.

Hani A., Lallahem S., Mania J., Djabri L., (2006): On the use of finite difference and neural network models to evaluate the impact of underground water overexploitation. *Hydrol. Process* 20:4381– 4390. doi:10.1002/hyp.6173.

Haykin S., (1994): Neural Networks: A Comprehensive Foundation, Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.

Haykin S., (1999): Neural networks: a comprehensive foundation, 2nd edn. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.

Hébert C., (2012): Matrices de microélectrodes tout diamant et composite diamant / nanotubes de carbone pour la neurophysiologie : du matériau aux composants d'interface. Thèse de doctorat. Université de Grenoble, France.

Hecht-Nielsen R., (1990): Solution for a distributed hydrological model and applications. Neuro-computing, Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, USA. pp. 89-93.

Heddam S., (2006): Contribution à la modélisation de la qualité des eaux par les réseaux de neurones. Mémoire de magister en science. Institut National Agronomique- Alger. p 93.

Hertz J., Krogh A. & Palmer R.G., (1991): Introduction to the theory of neural computation. Addison-Wesley, Reading, Massachusetts.

Hilly J., (1962): Etude géologique du massif de l'Edough et du Cap de Fer (Est constantinois). Bull. n°19 carte géologique Algérie, Alger, 339p.

https://www.larousse.fr/encyclopedie/divers/Alg%C3%A9rie%C2%A0_g%C3%A9ographie_physique/185613#10936957

Ilavsky J & Snopkova P., (1987): Découverte d'acritarches paléozoïques dans les terrains métamorphiques de l'Edough (Wilaya d'Annaba, Algérie). Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris, 305(série II), pp 881-884.

Khadri S., (2009): Qualité des eaux de la vallée de la Seybouse dans sa partie aval (impact des néofacteurs de pollution). Mémoire de magister. Université d'Annaba. 134 p.

Khechana S., (2014): Perspective et méthode de la gestion intégrée des ressources en eau dans une zone hyper-aride. Application sur la vallée d'Oued-Souf (Sud-Est algérien). Thèse de doctorat en sciences de l'Université Badji Mokhtar Annaba. 123p.

Khelfaoui H., (2014): Modélisation des écoulements et de transport de masse dans une région industrielle : Exemple de la nappe de Berrahal, Nord-Est Algérien. Thèse de doctorat en science. Université Badji Mokhtar Annaba. 195 p.

Kherici N., (1985): Aquifère sableux de bords de mer. Hydrodynamique et hydrochimie. Exemple de la nappe de Bouteldja (Nord Est algérien). Thèse de Docteur 3ème cycle USTL, Montpellier. 202p.

Kherici N., (1993): Vulnérabilité à la pollution chimique des eaux souterraines d'un système de nappes superposées en milieu industriel et agricole (Annaba la Mafragh (Nord - Est Algérien)). Thèse de doctorat Es-Sciences, Université d'Annaba. 170p.

Kley G & Caradot N., (2013): "Review of sewer deterioration models."

Koffi Y.B. & al., (2014) : Application des réseaux de neurones formels pour la prévision des débits mensuels du Bandama blanc à la station de Tortiya (Nord de la Côte d'Ivoire). *Afrique SCIENCE 10(3) 134 – 145.*

Kouzana L., Ben Mammou A & Gaaloul N., (2007): Intrusion marine et salinisation des eaux d'une nappe côtière (Korba, Cap-Bon. Tunisie). *Geo-Eco-Trop 31 , 57–70.*

Lallahem S & Mania J., (2003a): A nonlinear rainfall–runoff model using neural network technique: example in fractured porous media. *Math Comput Model 37:1047–1061.* doi:10.1016/S0895-7177 (03)00117-1.

Lallahem S & Mania J (2003b): Evaluation and forecasting of daily groundwater outflow in a small chalky watershed. *Hydrol Process 17:1561–1577.* doi:10.1002/hyp.1199.

Lambrakis N., (2006): Multicomponent heterovalent chromatography in aquifers. Modelling salinization and freshening phenomena in field conditions. *Journal of Hydrology (323(1-4)), 230-243.*

Laouar R., (2002): Etudes pétrogénétiques et métallogénétiques des complexes ignés tertiaires du nord-est de l'Algérie: une étude isotopique stable. Thèse de doctorat, Université d'Annaba, Algérie, 171 pp.

Laouar R., Boyce A.J., Ahmed-said Y., Ouabadi A., Fallick A.E. & Toubal A., (2002): Stable isotope study of the igneous, metamorphic and mineralized rocks of the Edough complex, Annaba, North-East Algeria. *Journal of African Earth Sciences, Vol. 35 (2), pp 271-283.*

Laouar R., Boyce A.J., Arafa M., Ouabadi A & Fallick A.E., (2005): Petrological, geochemical, and stable isotope constraints on the genesis of the Miocene igneous rocks of Chetaibi and Cap de Fer (NE Algeria). *Journal of African Earth Sciences Vol. 41, pp 445–465.*

Ledoux E., (1986): Modèle mathématique en hydrogéologie. Centre d'information géologique. Ecole National des Mines. Paris.

Lippmann R.P., (1987): An Introduction to Computing with Neural Nets. *IEEE ASSP Magazine, April 1987, 4 (2), 4-22.* Données hydrologiques. Ecol. Nat. Sup. de Géol. Appli/Inst. Nat. Polytech. De Lorraine, 95 p.

Liu J., Savenije H.H.G. & Xu J., (2003): Forecast of water demand in Weinan City in China using WDF-ANN model. *Phys. and chemist. of the Earth 28, 219-224.*

Luoma S., (2016): Groundwater vulnerability of a shallow low-lying coastal aquifer in southern Finland under climate change. Geological Survey of Finland. Espoo: Geological Survey of Finland.

- Magaritz M., Goldenberg L., Kafri U & Arad A., (1980):** Dolomite formation in the seawater– freshwater interface. *Nature* , 287.
- Maliki M. A., (2000):** Etude hydrogéologique, hydrochimique et isotopique de la nappe profonde de Sfax (Tunisie). Tunis: Univ. Tunis II.
- Maren A.J., Harston C.T. & Pap R.M. (1990):** Handbook of neural computing applications. Academic Press Inc., San-Diego, California.
- Marignac C., (1976):** Mise en évidence des successions paragénetiques dans les principaux filons minéralisés du district filonien polymétallique d'Ain-Barbar (Willaya d'Annaba, Algérie). *Sciences de la Terre* XX 4, pp 333-401.
- Marignac C & Zimmermann J.L., (1983):** Ages K-Ar de l'évènement hydrothermal et des intrusions associées dans le district minéralisé Miocène d'Aïn-Barbar (Est Constantinois, Algérie). *Mineralium Deposita*, 18, pp 457-467.
- Marignac C., (1985):** Les minéralisations filoniennes d'Ain Barbar (Algérie). Un exemple d'hydrothermalisme lié à l'activité géothermique alpine en Afrique du nord. Thèse de Doctorat d'Etat (2 tomes), I.N.P. Lorraine, Nancy, France.
- Matray J. M. (1988):** Hydrochimie et géochimie isotopique des saumures pétrolières du Trias et du Dogger dans le bassin de Paris. Paris: Université Paris XI.
- Maury R.C., Fourcade S., Coulon C., El Azzouzi M., Bellon H., Coutelle A., Ouabadi A., Semroud B., Megartsi M., Cotton M., Belanteur O., Louni-Hacini A., Piqué A., Capdevila R., Hernandez J & Réhault J.P., (2000):** Post-collisional neogene magmatism of the Mediterranean Maghreb margin a consequence of slab breakoff. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, Paris 331, pp 159-173.
- Mc Culloch W. S. & Pitts W., (1943):** A logical Calculus of the Ideas Imminent in Nervous Activity. *Bulletin of Mathematical Biophysics*, 5: pp. 115-133.
- Mebarki A., (1984):**Ressources en Eau et Aménagement en Algérie, Le Bassin du Kebir Rhumel Algérie, Ed Office Des Publications Universitaires.
- Mebarki A., (2005):** Hydrologie des bassins de l'Est Algérien : Ressource en eau, Aménagement et environnement, Thèse de doctorat, Université de Constantine.
- Milnes E., Meilhac C., Yeo D., Renard P., Hunkeler D., Schnegg P & al., (2006):** Hydrogeochemical and hydrogeological investigation in the Akrotiri aquifer: identification of multiple salinisation processes and implementation criteria for monitoring networks. SWIM-SWICA.
- Monie P., Montigny R & Maluski H., (1992):** Age Burdigalien de la tectonique ductile extensive dans le massif de l'Edough (Kabylie, Algérie). Données radiométriques ^{39}Ar - ^{40}Ar . *Bulletin de la Société Géologique de France*, N°5, pp 571-584.

- Montety V., Radakovitch O., Vallet-Coulomb C., Blavoux B., Hermitte D & Valles, V., (2008):** Origin of groundwater salinity and hydrogeochemical processes in a confined coastal aquifer: Case of the Rhône Delta (Southern France). *Journal Appl. Geochem.* 23:2337–2349.
- Mtoni Y., Mjemah I., Bakundukize C., Van Camp M., Martens K & Walraevens K., (2013):** Saltwater intrusion and nitrate pollution in the coastal aquifer of Dar es Salaam, Tanzania. *Environ. Earth Sci* , 70 (3).
- Nafâa K., (1985):** Nappes superposées en région côtière, hydrodynamique et hydrochimie (aquifère de Annaba) Nord Est algérien. Thèse Docteur Ingénieur. USTL, Montpellier, 159p.
- Najib S., Fadili A., Mehdi K., Riss R & Makan A., (2017):** Contribution of hydrochemical and geoelectrical approaches to investigate salinization process and seawater intrusion in the coast. *J. Contam. Hydrol.* Doi.org/10.1016/j.jconhyd.2017.01.003
- Najjar Y. & Zhang X., (2000):** Characterizing the 3D Stress-Strain Behavior of sandy Soils: A Neuro-Mechanistic Approach. ASCE Geotechnical Special Publication No. 96, Filz,G. and Griffiths, D. (Editors): pp. 43-57.
- Najjar Y. & Ali H., (1998a):** On the Use of BPNN in Liquefaction Potential Assessment Tasks. *Artificial Intelligence and Mathematical Methods in Pavement and Geomechanical Systems*, Attoh-Okine (Editor): pp. 55-63.
- Najjar Y. & Ali H., (1998b):** CPT-Based Liquefaction Potential Assessment: A Neuronet Approach. ASCE Geotechnical Special Publication No.75, Dakoulas P. & al., (Editors), (1). pp. 542-553.
- Pulido-Leboeuf P., (2004):** Seawater intrusion and associated processes in a small coastal complex aquifer (Castell de Ferro, Spain). *Applied geochemistry* (19), 1517–1527.
- PulidoLeboeuf P., Pulido-Bosch A., Calvache M. L., Vallejos A & Andreu J. M., (2003):** Strontium, SO₄²⁻/Cl⁻ and Mg²⁺ /Ca²⁺ ratios as tracers for the evolution of sea water into coastal aquifers: The example of Castell de Ferro-aquifer. *C.R.Geoscience* (335), 1039-1048.
- Revelle R., (1941):** Criteria for recognition of seawater in groundwaterners. *Trans. Am. Geophys. Union* 22, (pp. 593–597).
- Riad S, Mania J, Bouchaou L, Najjar Y., (2004):** Predicting catchment flow in a semi-arid region via an artificial neural network technique. *Hydrol Process* 18:2387–2393. doi:10.1002/hyp.1469.
- Rouabhia A., (2006):** Vulnérabilité et risques de pollution des eaux souterraines de la nappe des sables miocènes de la plaine d'EL MA EL ABIOD nord-est algérien. Thèse de doctorat ès sciences de l'Université Badji Mokhtar Annaba. 167p.

Rumelhart D.E., Hinton E. & Williams J., (1986): Learning internal representation by error propagation. Parallel distributed processing. Vol.1. MIT Press, Cambridge, Massachusetts. pp. 318-362.

Saadali B., (2007): Concentration des éléments chimiques des sources dans le massif dunaire de Bouteldja .Mémoire de magister .Université d'Annaba. P 17.

Sakaa B., (2013): Développement durable, vers un modèle de gestion intégrée des ressources en eau dans le bassin versant de Saf-Saf, Nord-Est Algérien. Thèse de doctorat ÈS Science. Université Badji Mokhtar Annaba, P145.

Sappa G., Ergul S., Ferranti F., Sweya L & Luciani G., (2015): Effects of seasonal change and seawater intrusion on water quality for drinking and irrigation purposes, in coastal aquifers of Dar es Salaam, Tanzania. J. Afr. Earth Sci. 105 , 64–84.

Sarle W.S., (1994): Neural networks and statistical models. Proceedings of the Nineteenth Annual SAS Users Group International Conference (SAS Institute), Cary, North Carolina, pp. 1538-1550.

Slama F., Bouhlila R., (2016): Multivariate statistical analysis and hydrogeochemical modeling of seawater-freshwater mixing along selected flow paths: Case of Korba coastal aquifer Tunisia, Estuarine, Coastal and Shelf Science. Doi: 10.1016/j.ecss.2016.10.005

Slama F., Bouhlila R & Renard P., (2010): Identification of groundwater salinization sources using experimental, multivariate statistical analysis and numerical modelling tools: case of Korba coastal aquifer (Tunisia). Krakow: XXXVIII IAH congress.

Sonatrach., (1966): Esquisse structurale de la plaine d'Annaba. Rapport A.N.R.H., inédit. Annaba, Algérie.

Souid F., Agoubi B., Telahigue F., Chahlaoui A & Kharroubi A., (2017): Groundwater salinization and seawater intrusion tracing based on Lithium concentration in the shallow aquifer of Jerba Island, Southeastern Tunisia. Journal of African Earth Sciences. Doi: 10.1016/j.jafrearsci.2017.11.013

Starinsky A., Bielski M., Lazar B., Steinitz G & Raab M., (1983): Strontium isotope evidence on the history of oilfield brines, Mediterranean Coastal Plain, Israel . Geochimica et Cosmochimica Acta , 687-695.

Strojexport., (1975): Prospection géophysique de la plaine d'Annaba. Réinterprétation. Rapport A.N.R.H., inédit, Annaba, Algérie, 30 p.

Tellam J. (1995): Hydrochemistry of the saline groundwaters of the lower Mersey Basin Permo-Triassic sandstone aquifer, UK. Journal of Hydrology , 45-84.

Trabelsi R., Zairi M., Smida H & Ben Dhia H., (2005): Salinisation des nappes côtières : cas de la nappe nord du Sahel de Sfax, Tunisie. C. R. Acad. Sci 337, (pp. 515-24). Paris.

- Trabelsi R., Zaïri M., Smida H & Ben Dhia H., (2005):** Salinisation des nappes côtières : cas de la nappe nord du Sahel de Sfax, Tunisie. *C. R. Geoscience* (337), 515–524.
- Vengosh A., Gert G., Lange D & Starinsky A., (1998):** Boron isotope and geochemical evidence for the origin of Urania and Bannock brines at the eastern Mediterranean: effect of water-rock interactions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 3221-3228.
- Vila J.M., (1970):** Le Djebel Edough un massif externe du Nord-Est de la Berbérie. *Bulletin de la Société Géologique de France* 7 (tome XII), pp 805–812.
- Xiao RR & Chandrasekhar V., (1997):** Development of a neural network based algorithm for rainfall estimation from radar observations. *IEEE Trans Geosci Remote Sens* 35:160–171.
- Yamanaka M & Kumagai Y., (2006):** Sulfur isotope constraint on the provenance of salinity in a confined aquifer system of the southwestern Nobi Plain, central Japan. *J. Hydrol* (325), 35–55.
- Yin, Zhilin Li, Onyx WH Wai, Bruce King., (2004):** Integration of multi-source data for water quality classification in the Pearl River estuary and its adjacent coastal waters of Hong Kong, *Continental Shelf Research* 24, 1827–1843.
- Zahi F., (2014):** Contribution à l'étude hydrochimique du sous bassin versant du lac Fetzara (Nord-est Algérien). Approche géochimique et fonctionnement des sols et des eaux. Thèse de doctorat ès sciences de l'Université Badji Mokhtar Annaba. 152p.
- Zenati N., (1999):** Relation nappe-lac, Confirmation par l'hydrochimie, Cas de la nappe superficielle de la plaine Ouest d'El Hadjar, lac Fetzara N-E algérien. Mémoire de Magister, option : Chimie et Environnement, Université Badji Mokhtar Annaba, 151p.
- Zerrouki H., (2007):** Diagnostic pour une éventuelle réhabilitation des eaux de la Seybouse à la basse plaine d'Annaba. Mémoire de Magister de l'Université Badji Mokhtar Annaba. 86p.
- Zhenyun S., Xianfang S., Hongmei B., Lihu Y., Ying M., Yinghua Z & al., (2016):** Origin of groundwater salinity and hydrochemical processes in an unconfined aquifer: case of Yang-Dai River basin in Qinhuangdao (China). *Environ Earth Sci* 75:54. Doi : 10.1007/s12665-015-4825-5

