



Faculté des Sciences de la Terre

Département de Géologie

Thèse

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de Doctorat en sciences

Option
Hydrogéologie
Par

HAMZAOUI Wahiba

Gestion intégrée des ressources en eau dans le
bassin versant de la Seybouse - Cas de la région
d'Annaba et de Guelma

**DIRECTEUR DE THESE : HANI Azzedine Professeur (Université
d'Annaba**

DEVANT LE JURY :

Président : DJABRI Larbi

Pr : Université d'Annaba

Examineurs :

KACHI Slimane

Pr : Université de Guelma

Maoui Amar

Pr : Université de Guelma

GHerieb Lassaad

MCA : Université de Guelma

MAJOUR Habiba

MCA : Université d'Annaba

المخلص

في مستجمعات مياه سيبوس ، أصبحت الموارد المائية غير كافية شكل ملفت وذلك لتلبية الطلب المتزايد ، لا سيما في منطقتي عناية وقالمة. هاتان المدينتان ، تشكلان قطبًا صناعيًا وزراعيًا في الحوض ، فبالإضافة إلى عدد السكان الكبير ، هما تضعان ضغطًا على هذه الموارد.

□ بالإضافة إلى كمية المياه في منطقتنا الدراسية ، هناك العديد من المشاكل المرتبطة بهذا المورد ، ومن بينها تدهور جودة مياه المياه الجوفية الساحلية سبب ظاهرة التسلل البحري عد الاستغلال المكثف مياه الجدو المائي. وقد سمحت لنا الطرق الهيدروكيميائية مثل مخططات ايبير وستيف وكذلك قطع الترايز المتداخلة تسليط الضوء على تلوث مياه منسوب المياه الساحلية مياه البحر.

□ بالإضافة إلى مشكلة كمية المياه في منطقتنا الدراسية ، يوجد العديد من المشاكل المرتبطة بهذا المورد ، ومن بينها تدهور النوعية على مستوى المياه الجوفية الساحلية سبب ظاهرة التسلل البحري عد الاستغلال المكثف لهذه المياه الجوفية. وقد سمحت لنا الطرق الهيدروكيميائية مثل مخططات ايبير وستيف وكذلك قطع الترايز المتداخلة تسليط الضوء على تلوث المياه الجوفية الساحلية مياه البحر.

□ والتالي ، في مواجهة هذه القضايا ، يفرض الوضع الحرج في حوض سيبوس هج اداريا جديدا إداريًا جديدًا يجب دمجه ويهدف إلى إراك وإلزام جميع الجهات الفاعلة التي يجب أن تتبنى السلوكيات الصحيحة. قرارات لضمان استدامة هذا المورد.

□ ولهذا الغرض ، يتم استخدام نموذج متكامل لإدارة المياه يعكس العلاقة بين السبب والنتيجة مع دورة المياه أكملها. تم تصنيف المتغيرات الهيدرولوجية والاجتماعية-الاقتصادية إلى خمس فئات: التلوث ، ووعية المياه ، ورأي الخبراء حو تأثير تقييم مخاطر النشاط البشري على صحة الإنسان.

□ تم وصف المتغيرات ذات الصلة استخدام الشبكات العصبية الاصطناعية (ANN) وسيتم تصنيفها استخدام التحليل الإحصائي متعدد المتغيرات. واستنادا إلى نتائج هذا البحث ، سيتم وضع توصيات جديدة لضمان الإدارة المستدامة للمياه.

□ الكلمات المفتاحية : سيبوس ، الموارد المائية، التسلل البحري، التسيير المدمج للموارد المائية ، الشبكة الاصطناعية العصبية ،

Résumé

Dans le bassin versant de la Seybouse, les ressources en eau deviennent de plus en plus insuffisantes pour satisfaire la demande en croissance continue, notamment dans la région d'Annaba et celle de Guelma. Ces deux villes, constituent deux pôle industriels et agricole dans le bassin qui en plus de la population importante, exercent une pression sur cette ressource.

Outre que le problème de la quantité d'eau dans notre région d'étude, plusieurs problèmes sont liés à cette ressource, parmi lesquels la dégradation de la qualité des eaux de la nappe côtière par le phénomène de l'intrusion marine suite à l'exploitation intensif des eaux de la nappe. Les méthodes hydro-chimiques comme les diagrammes de Piper et de Stiff ainsi que les diagrammes croisés des concentrations, nous ont permis la mise en évidence la contamination des eaux de la nappe côtière par les eaux de la mer.

Ainsi, face à ces enjeux, la situation critique au niveau du bassin de la Seybouse imposent une nouvelle optique de gestion qui doit être intégrée et vise à impliquer et à obliger tous les acteurs qui se doivent d'adopter les bon comportements et les bonnes décisions pour assurer la pérennité de cette ressource.

Pour cela, un modèle de gestion intégrée de l'eau traduisant la relation de cause à effet abordant le cycle entier de l'eau est utilisé. Des variables hydrologiques et socio-économiques ont été classées en cinq catégories : des contraintes de pollution, de qualité de l'eau, de l'opinion des experts d'impact de l'activité humaine l'évaluation du risque sur la santé humaine.

Les variables pertinentes ont été caractérisées en utilisant les réseaux de neurones artificiels (RNA) et seront classées en utilisant l'analyse statistique multivariée. Sur la base des résultats de cette recherche de nouvelles recommandations seront élaborées pour assurer la gestion durable de l'eau.

Mots Clés : Seybouse, Intrusion marine, ressources en eau, Gire, RNA

Abstract

In the Seybouse watershed, water resources are becoming increasingly insufficient to meet growing demand, particularly in the Annaba and Guelma regions. These two cities, constitute two industrial and agricultural pole in the basin which in addition to the important population, put a pressure on this resource.

In addition to the problem of quantity of water in our region of study, several problems are linked to this resource, among which the degradation of the quality of the waters of the coastal water table by the phenomenon of the marine intrusion following the exploitation intensive waters of the water table. Hydrochemical methods such as Piper and Stiff diagrams as well as cross-plots of concentrations have allowed us to highlight the contamination of the waters of the coastal water table by sea water.

Thus, faced with these issues, the critical situation in the Seybouse basin imposes a new management approach that must be integrated and aims to involve and oblige all actors who must adopt the right behaviors and good decisions to ensure the sustainability of this resource. For this purpose, an integrated water management model reflecting the cause-and-effect relationship to the entire water cycle is used. Hydrological and socio-economic variables were classified into five categories: pollution, water quality, and expert opinion of the impact of human activity, and risk assessment on human health.

Relevant variables have been characterized using Artificial Neural Networks (ANN) and will be classified using multivariate statistical analysis. Based on the results of this research, new recommendations will be developed to ensure the sustainable management of water.

keyword (s): Seybouse, Marine intrusion, water resources, Gire, ANN

Remerciement

الحمد لله الذي فضله تتم النعم

Je voudrais dans un premier temps remercier, mon directeur de thèse M.HANI, professeur en hydrogéologie à l'Université de Baji Mokhtr Annaba, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à guider et à alimenter ma réflexion.

Je remercie également tous les membres du jury M. Djabri, Mme. Madjour, M. Kachi, M. Maoui et M. Gherieb qui ont accepté d'examiner et de juger mon travail.

Un grand merci je l'adresse à ma collègue Aoun-Sebaiti pour son aide et sa contribution à enrichir ce travail.

J'adresse mes sincères remerciements à M. Chafai pour son aide se surtout son encouragement, ainsi à toutes les personnes qui par leurs conseils et leurs critiques ont guidé mes réflexions et ont mis à ma disposition toutes les données et la documentation nécessaires pour mon travail et spécialement les personnes travaillant dans les services sollicités pour la fourniture des données à Annaba, El Tarf et Guelma.

Je tiens également à remercier tous mes collègues du département de Géologie et de l'Hydraulique, pour leurs aides, conseils et encouragement. j ne peut pas citer les noms parce qu'ils sont nombreux.

Je tiens à témoigner toute ma reconnaissance à ma chère mère qui n'a jamais cessé de m'encourager, à mon mari Harrat pour l'aide et les conseils qu'il m'a apporté.

Je remercie en particulier Mme. MAjour Habiba, Melle.Attoui Badra, Melle. Khadri Samira, Mme. Latifi Sabah, M. Sayad Lamine, M. Gherieb Issam et M ; Sakaa Bachir pour leurs aides, soutient, disponibilité et encouragement.

Enfin, je remercie mes amies Warda et Ilhem pour Leur soutien incondtionnel et leurs encouragements ont été d'une grande aide.

Dédicaces

Aujourd'hui j'ai terminé ce travail Dieu merci... Hélas, une autre étoile qui à éclairé mon chemin n'est plus là... à la mémoire de mon cher père et mon cher frère ...

A ma chère maman qui attend ce jour avec impatience

A Mon mari qui a été toujours à mon côté

A mes trois petit « Articles » Yahia, Mouslim et Zeineb.

A mon frère Khemici et mes sœurs Yamina, Nabila et Jiwa

A ma belle mère et mes belles sœurs et beaux frères

A ma nièce Nada merci ma petite pour tout ce que tu as fais pour moi

A tous mes neveux et nièces...

je dédie ce travail...

Hamzaoui Wahiba

TABLE DES MATIERES

□ لخص

Résumé

Abstract

Remerciement

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

INTRODUCTION

GENERALE.....

.....01

CHAPITRE 01

CADRE PHYSIQUE DE LA ZONE D'ETUDE

I.1. Situation géographique	03
I.2. Aperçu socio économique.....	04
I.3. Aspect géomorphologique	04
I.3.1. les terrasses de la Seybouse.....	04
I.3.2. Les montagnes.....	05
I.3.3. Le domaine des plaines	05
I.3.4. La dépression du lac Fetzara.....	06
I.3.5. La végétation.....	06
II.1. La géologie de la basse Seybouse.....	07
II.1.1. Le Ne protérozoïque- Paléozoïque.....	07
II.1.2. Le Mésozoïque- Cénozoïque.....	08
II.1.3. Le Quaternaire	09
II.2. Géologie de la moyenne Seybouse	11
II.2.1. Le Trias.....	11
II.2.2. Le Néritique.....	11
II.2.3. Le Jurassique.....	11
II.2.4. Le Crétacé.....	11
II.2.5. Le domaine des nappes	12
II.2 .5.1. La nappe Numidienne.....	12
II.2 .5.2. Le domaine des flysch.....	12
II.2 .5.3. La Nappe Ultra Tellienne.....	12
II.2 .5.4. La Nappe Tellienne.....	12
II.2 .5.5. L'unité néritique constantinoise	12

III. Conclusion	13
-----------------------	----

CHAPITRE 02

CADRE HYDRO-CLIMATOLOGIQUE

I. Introduction.....	14
II. Etude des paramètres climatiques	14
II.1. la pluviométrie.....	14
II.2. la température.....	17
II.2.1.3. L'humidité	19
II.2.1.4. Le vent	19
II.3. Le bilan hydrique.....	19
II.3.1. Estimation de l'évapotranspiration potentielle et réelle	19
II.3.1.1. Formule de turc	20
II.3.1.2. Formule de Thornthwaite (bilan d'eau)	20
II.4. Réseau hydrographique	25
II.5. Conclusion	27

CHAPITRE 03

CADRE HYDROGEOLOGIQUE

I. Identification des nappes de la région de la basse Seybouse.....	29
I.1. La nappe des formations superficielles.....	29
I.2. La nappe des graviers.....	30
I.3. La nappe des alluvions de la haute terrasse.....	30
I.4. La nappe des cipolins.....	30
I.5. La nappe des travertins.....	30
I.6. La nappe libre du cordon dunaire.....	30
II. Identifications des nappes de la région de la moyenne Seybouse	32
II.1 La nappe de la plaine alluviale de Guelma.....	32
II.2. La nappe de Hammam Bradâa.....	34
III. Etude piézométrique	35
III.1. La nappe du cordon dunaire.....	35

III. 2. La nappe profonde ou de graviers d'Annaba	36
III.3. La nappe superficielle de la plaine d'Annaba et de Bouchegouf	37
III.4. La nappe des alluvions de Guelma.....	38
IV. Conclusion	40

CHAPITRE 04

L'INTRUSION MARINE DANS LA NAPPE COTIERE DE LA PLAINE D'ANNABA

I.Introduction	41
II. l'évolution de l'intrusion marine.....	41
II.1. Facteurs déterminants dans l'évolution de l'intrusion marine.....	41
II.2. Rôle des facteurs hydrodynamiques et de l'exploitation.....	43
III. Mise en évidence des intrusions marines vers les aquifères étudiés.....	47
III. 1. Méthodologie	47
III.2. Les facteurs hydrodynamiques.....	47
III.3. Etude hydrochimique.....	49
a) Diagramme Piper.....	49
b) Diagrammes Stiff.....	50
c) Diagrammes croisés des concentrations.....	52
IV. Conclusion.....	56

CHAPITRE 05

GESTION INTEGREE DES RESSOURCES EN EAU

DEFINITION ET DESCRIPTION D'UN MODELE DE GESTION INTEGREE DES RESSOURCES EN EAU (GIRE).....	57
---	----

I. Les concepts de la Gestion Intégrée des Ressources en Eau (GIRE).....	57
I.1. Les indicateurs de la gestion intégrée des ressources en eau	58
I.2. Les méthodologies utilisées pour développer les indicateurs.....	59
I.3. Application Du Modèle De Gestion Intégrée Dans La Région De La Basse Et Moyenne Seybouse.....	62
II. METHODOLOGIE.....	65
II.1 Le plan d'analyse.....	65
II.2. Les outils d'analyse.....	66
II. 2.1 Les statistiques descriptives	66
II .2.2. Les réseaux de Neurones Artificiels (RNA)	66
II.2.3. Les matrices de corrélation	71

II.2.4. Les techniques d'exploration multivariée : L'Analyse en Composantes Principales (ACP).....	71
II.3. Définition des variables.....	72
II.3.1. La Catégorie des variables de la force motrices ou socioéconomiques (Driving force)	72
II.3.2. La Catégorie de pollution (Presion)	73
II.3.3. La Catégorie des variables qualité de l'eau (State = Etat).....	74
II.3.4. La Catégorie des variables d'impact sur la santé humaine et l'environnement	74
II.3.5. La Catégorie réponses des gestionnaires : (Response = réponse).....	74
III. Résultats et Discussion	75
III.1 Impact Des Variables Socio- Economiques Sur La Ressource En Eau	75
III.1.1. Le réseau de neurone RNA.....	78
III.1.2. La matrice de corrélation.....	82
III.1.3. L'analyse en composante principale ACP.....	83
III.2. Impact Des Variables des Pression sur La Ressource En Eau.....	85
III.2.1. Le réseau de neurone RNA.....	90
III.2.2. La matrice de corrélation.....	93
III.2.3. L'analyse en composante principale ACP.....	94
III.3. Impact Des Variables D'état Sur La Ressource En Eau.....	97
III.3.1. Le réseau de neurone RNA.....	98
III.3.2. La matrice de corrélation.....	100
III.3.3. L'analyse en composante principale ACP.....	101
III.4. La catégorie des variables D'impact sur l'environnement et la santé publique.....	104
III.5. La catégorie des variables de réponses des gestionnaires	104
III.5.1. Le réseau de neurone RNA.....	108
III.5.2. La matrice de corrélation.....	110
III.5.3. L'analyse en composante principale ACP.....	111
III. Conclusion.....	114
CONCLUSION GENERALE	115
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	

Liste des figures

Fig .1. Situation de la région d'étude.....	03
Fig.2. carte de la géologie de la région d'étude.....	07
Fig.3. Esquisse structurale des plaines d'Annaba-Bouteldja.....	09
Fig.4. Coupe géologique à travers la région d'étude.....	10
Fig . 5. Carte des précipitations moyennes annuelles de l'Est Algérien.....	15
Fig. 6. Précipitations de la station des Salines (80/2015).....	16
Fig. 7. Précipitations de Pont Bouchet (80/2015).....	16
Fig. 8. Précipitations de la station de Guelma (85/2015).....	16
Fig. 9. Précipitations de la station de Héliopolis (85/2015).....	16
Fig. 10. Courbe ombro-thermique des salines (1980-2015).....	18
Fig. 11. Courbe ombro-thermique de la station de Guelma (1985-2015).....	18
Fig.12. Représentation graphique du bilan hydrique de Thornthwaite de la station des Salines.....	23
Fig.13. Représentation graphique du bilan hydrique de Thornthwaite de la station de Pont Bouchet.....	24
Fig .14. Représentation graphique du bilan hydrique de Thornthwaite de la station de Guelma.....	24
Fig.15. Représentation graphique du bilan hydrique de Thornthwaite de la station de Héliopolis.....	25
Fig .16. Carte du réseau hydrographique.....	26
Fig.17. Extension des différents aquifères dans les plaines de Annaba-Bouteldja.....	28
Fig. 18. Coupes Hydrogéologiques a travers de la plaine de Annaba.....	30
Fig.19. Coupe hydrogéologique dans la plaine de Guelma NS.....	31
Fig.20. Coupe hydrogéologique dans la plaine de Guelma WE.....	32
Fig.21. Coupe hydrogéologique Est-Ouest (nappe Hammam Bradâa).....	34
Fig. 22. Carte piézométrique de la nappe du cordon dunaire chatt.....	35
Fig. 23. Carte piézométrique de la nappe de graviers d'annaba.....	36
Fig. 24. Carte piézométrique de la nappe superficielle de la plaine de Annaba et de Bouchegouf	37
Fig. 25. Carte piézométrique de la nappe de la plaine de Guelma.....	38

Fig.26. Schéma hydrodynamique d'un aquifère côtier à nappe libre selon la relation de Ghyben-Herzberg.....	43
Fig .27. Position de l'interface et détermination de la profondeur de l'interface selon le modèle de Ghyben-Herzberg	44
Fig.28. Géométrie des graviers dans le système aquifère d' Annaba.....	47
Fig.29. Représentation des résultats d'analyse des échantillons d'eau dans le diagramme de Piper.....	49
Fig.30. Diagramme de Stiff de l'eau douce.....	49
Fig.31. Diagramme de Stiff de l'eau de mer.....	50
Fig.32. . Représentation des eaux de l'aquifère d' Annaba selon Stiff (Nappe des graviers)...	50
Fig.33. Relation entre : Na- Cl/ Ca- Cl / Mg- Cl / NO ₃ - Cl / SO ₄ - Cl des eaux souterraines et de l'eau de mer.....	52
Fig.34. Variation des rapports Mg ²⁺ /Ca ²⁺ et SO ₄ ²⁻ /Cl en fonction des teneurs en chlorures (méq/l).....	54
Fig.35. Le modèle PSR pour développer les indicateurs.....	59
Fig.36. Le modèle DPSIR pour développer les indicateurs.....	60
Fig. 37. Calcul d'un état de neurone.....	67
Fig. 38. L'Architecture d'un MLP à Trois Couches.....	68
Fig. 39. Diagrammes en secteurs de quelques variables de la catégorie socio-économie	77
Fig.40. Le réseau MLP à trois couches des variables socioéconomiques.....	79
Fig.41. Graphique du Qext mesurés et Qext calculé par le modèle RNA	80
Fig.42. Analyse en Composantes Principales : variable socio-économie.....	83
Fig.43. Représentation graphiques des individus de la catégorie : variable socio-économie	84
Fig.44. Diagrammes en secteurs des variables de pollution et de pression	89
Fig.45. Réseau MLP à trois couches des variables sources de pollution.....	91
Fig.46. TDS mesurés et TDS calculés par le modèle RNA	92
Fig.47. Analyse en Composantes Principales : variable de pollution.....	94
Fig.48. représentation graphiques des individus de la catégorie : variable de pollution.....	97
Fig.49. histogrammes des paramètres physico-chimiques des eaux.....	98

Fig.50. Le réseau MLP à trois couches des variables d'état.....	98
Fig.51. Débits mesurés et débits calculés par le modèle RNA pou mes variables D'état de l'eau.....	99
Fig.52. Analyse en Composantes Principales : variable d'état.....	102
Fig.53. projection des individus de la catégorie des variables d'état.....	102
Fig.54. Diagrammes en secteur des variables de réponse des gestionnaires.....	106
Fig.55. Le réseau MLP à trois couches des variables de réponse.....	108
Fig.56. Débits mesurés et débits calculés par le modèle MLP pour les variables de réponses des gestionnaires.....	108
Fig.57. Analyse en Composantes Principales : variable de décision des gestionnaires.....	111
Fig.58. projection des individus de la catégorie des réponses des gestionnaires.....	112

Liste des tableaux

Tab. 1. coordonnées des stations météorologiques et période d'observation.....	14
Tab. 2. précipitation moyennes mensuelles des stations Salines et Pont Bouchet (1980/2015) et de Guelma (1985/2015) et Héliopolis (1985/2015).....	16
Tab. 3. Températures moyennes mensuel de la station des Salines (1980/2015) et Guelma (1985/2015).....	17
Tab.4. Moyenne mensuelle de l'humidité relative à la station des Salines en % (1980-2015).....	19
Tab.5. Moyenne mensuelle de la vitesse des vents en m/s à la station des Salines (1984-2015).....	19
Tab.6. L'évapotranspiration réelle selon la formule de Turc.....	20
Tab.7. Bilan de l'eau selon CW Thornthwaite , station des salines (1980/2015).....	21
Tab.8. Bilan de l'eau selon C.W Tthorntwaite, station de Pont Bouchet (1980-2015).....	22
Tab.9. Bilan de l'eau selon C.W Thornthwaite, station Guelma (1985-2015).....	22
Tab.10. Bilan de l'eau selon C.W Thornthwaite, station Héliopolis (1985-2015).....	23
Tab.11. Les affluents de la Seybouse (source Agence des bassins hydrographiques).....	27
Tab.12. Statistiques des variables de la catégorie socio-économie	78
Tab. 13. Analyse de sensibilité pour le Qext des variables socio-économiques	80
Tab.14. Matrice de corrélation pour les variables socioéconomiques.....	81
Tab.15. Poids factoriels des variables socio-économiques.....	82
Tab.16. Statistiques des variables de la catégorie pollution.....	90
Tab.17. Analyse de sensibilité pour le TDS des variables de pression	92
Tab.18. Matrice de corrélation pour les variables de pression	93
Tab.19 Poids factoriels des variables de pression.....	93
Tab.20. statistiques des variables de la catégorie Etat de l'eau.....	97
Tab. 21 Analyse de sensibilité pour le Q ext des variables d'état de l'eau.....	99
Tab.22. Matrice de corrélation pour les variables socioéconomiques.....	100
Tab.23. Poids factoriels des variables de l'état de l'eau.....	101

Tab.24. Statistiques des variables de réponses des gestionnaires.....	107
Tab. 25. Analyse de sensibilité pour le Qext des variables de réponses des gestionnaires..	109
Tab.26. Matrice de corrélation pour les variables des réponses des gestionnaires	109
Tab.27. Poids factoriels des variables des décisions des gestionnaires.....	111

Introduction générale

L'eau potable représente une ressource vitale pour l'être humain. Malgré son abondance sur la Terre, cette eau est constituée à 97,2 % d'eau salée et à 1,96 % d'eau douce très peu accessible dans la plupart du temps.

Sa liaison directe avec la vie de l'homme et son maintien d'une part, et avec son développement social et économique de l'autre part, lui confère avec mérite le surnom de « l'or bleu ». Ainsi cet or qui est devenu de plus en plus rare, se trouve confronté à des aléas climatiques sévères tels que la sécheresse, le changement climatique anticipé, à l'utilisation exponentielle de cette ressource dans le domaine agricole et industriel et à satisfaire une population mondiale qui ne cesse d'augmenter. Face à cette situation critique, seule la démarche d'une « Gestion Intégrée des Ressources en Eau » par bassin versant semble être la solution idéale pour préserver et protéger cette ressource pour dans l'état actuel ainsi que pour les générations de future.

L'Algérie qui fait partie des pays à faibles ressources hydriques au regard des critères internationaux de pénurie (seuil de 1000 m³/hab/an), est loin d'être à l'abri de cette situation alarmante. Cette faiblesse des ressources en eau est par ailleurs aggravée par :

- La mauvaise répartition spatiale des ressources et l'irrégularité saisonnière des apports
- Les pertes importantes dues à la vétusté des réseaux d'eau domestique et agricole
- Les problèmes de pollution et d'assainissement
- L'insuffisance des infrastructures existantes malgré les efforts de ces dernières années et les Coûts d'investissement sans cesse croissants.

En présence de ces conditions, les aquifère du bassin versant de la Seybouse et malgré leur potentiel hydrique assez important, se trouvent non seulement fortement sollicités pour répondre aux besoins de la population importante ainsi que ceux de ses activités socio-économiques mais aussi, subit une pression anthropique traduite par la dégradation de la qualité des eaux, l'incapacité de satisfaire les besoins en eau et la baisse du niveau piézométrique induisant ainsi l'intrusion marine.

Notre contribution à l'étude de la Gestion intégrée des ressources en eau dans basse et moyenne Seybouse s'est faite à travers cinq chapitres au cours desquels nous avons fait le point sur :

- Le cadre physique générale de la région d'étude dans le premier chapitre.
- L'aspect hydro-climatologique et essayer d'estimer les différentes paramètres du bilan hydrique dans le deuxième chapitre ;

- L'identification des différents aquifères dans le chapitre de l'hydrogéologie.
- le phénomène de l'invasion marine au niveau de l'aquifère côtier d'Annaba dans le quatrième chapitre.
- La présentation des outils et le plan d'analyse des données ainsi que la validation du modèle de la gestion intégrée des ressources en eau dans la zone d'étude.

Cadre physique de la zone d'étude

I.1. Situation géographique

Situé dans la région Nord-Est de l'Algérie et divisé en trois grandes parties, haute, moyenne et basse Seybouse, le bassin versant de la Seybouse s'étend sur une superficie de 6471 km² et une longueur de 240 km (fig.1). Il couvre 68 communes dans sept wilayas : Annaba, El Tarf, Guelma, Souk Ahras, Skikda, Constantine et Oum El Bouaghi.

Notre Zone d'étude (basse et moyenne Seybouse) occupe une superficie de 1796 km² de ce bassin et s'étale sur trois wilayas qui sont Annaba, El Tarf et Guelma. Elle est limitée par :

- Par la mer méditerranée au Nord
- Les monts de Mahouna, Ain Larbi et Sedrata au Sud
- Le massif de l'Edough, les monts de Houara et Débagh à l'Ouest
- Le Prolongement oriental du système aquifère Annaba-Bouteldja et les monts de Nadour N'Bail à l'Est.



Fig.1. Situation de la région d'étude

I.2. Aperçu socio économique

Cette région est connue par sa grande activité agricole et industrielle favorisant ainsi la croissance continue de la population. L'agriculture est observée sur l'ensemble de région et notamment celle de Guelma avec une très grande variété de culture : céréales, maraichères et arboriculture et d'élevage de volailles et bétails.

L'irrigation dans le bassin de la Seybouse occupe une superficie de 13975 hectares, elle est de type gravitaire dans le bassin du Haut Charef et se fait par aspersion dans la basse Seybouse.

Vers le Nord, la zone devient plus industrialisée. On y rencontre de différentes branches de l'industrie : industrie chimique (complexe d'engrais phosphatés et azotés ASMIDAL) et l'industrie agroalimentaire.

I.3. Aspect géomorphologique

Dans le large espace drainé par cet important cours d'eau on distingue plusieurs milieux naturels qui laissent entrevoir les formes géomorphologiques suivantes :

I.3.1. les terrasses de la Seybouse

La Seybouse présente le long de son cours des terrasses alluviales étagées à des cotes diverses. Les principales unités géomorphologiques que l'on pouvait remarquer sont :

- Hautes terrasses (située à des altitudes allant de 100 à 150 m) : ce sont des formations argileuses pratiquement imperméables qui ne présentent aucun intérêt hydrogéologique. Elles sont localisées surtout entre Drean et Ain El Berda.
- Moyennes terrasses (situées à des altitudes moyennes variant entre 20 et 50 m) ce sont des formations constituées de cailloutis à la base, assez fines au sommet, formées de graviers, de galets et spécialement d'argiles sableuses. Elles présentent un intérêt hydrogéologique peu important.
- Basse terrasses (située à des altitudes moyennes de 15 m) : elles sont formées des dépôts alluvionnaires constitués de matériel argilo-limoneux avec des galets, graviers et sables. Ce sont des formations accumulatives des eaux souterraines

I.3.2. Les montagnes

- *Le massif de l'Edough*

C'est le massif principal qui caractérise la région de Annaba. De plus de 1008 m, il s'élève brusquement au dessus des autres reliefs qui l'entourent. Sa masse principale de direction

NE-SW, présente une ligne de crête longue de 26 km qui débute depuis le lac Fetzara au Sud et s'élève progressivement jusqu'au point culminant (1008m) à Kef Sebaa pour redescendre ensuite depuis Seraidi vers Cap de Garde au Nord.

Au sud ce massif est flanqué par le Djebel Boukantas (511 m) et Belilta (285 m) et se prolonge vers Annaba par le petit massif de Boukhadra (156 m).

- ***Le tell Nord Guelmien***

Le tell Nord Guelmien présente une allure nettement dissymétrique. Le versant sud dominé par les fortes pentes, les vallées de l'Oued Bouhamdane et le bassin de Guelma drainé par l'Oued Seybouse. En revanche, le versant nord descend plus lentement vers le lac Fetzara.

Le Djebel Haouara culminant à 981 m, domine fièrement toute cette région. Plus au nord, un massif gréseux affleure en allant de Bouati Mohamed à Ain Berda.

I.3.3. Le domaine des plaines

- ***La plaine d'Annaba***

C'est la plaine drainée par les deux oueds : Seybouse au Sud et Bounamoussa au Nord. Elle se situe au centre d'un synclinaurium limité par le massif de l'Edough au Nord et la chaîne Numidienne au Sud.

- ***La plaine d'El Hadjar***

Elle présente une forme inclinée vers la mer et occupe la partie Est du fond de la cuvette du lac Fetzara et se prolonge vers la plaine de Annaba. La liaison entre le lac et la plaine d'El Hadjar se fait par l'oued Meboudja.

- ***La plaine alluviale de Guelma*** Située dans la vallée de l'Oued Seybouse, elle est traversée d'Ouest en Est par l'oued Seybouse depuis Medjez Ammar jusqu'à Nador. C'est une zone d'effondrement comblée par des dépôts miocènes (argiles et marnes à gypse) et quaternaires (alluvions hétérogènes sous forme de terrasses).

I.3.4. La dépression du lac Fetzara

La dépression du lac Fetzara est séparée de la plaine de Guerbes par les petits massifs de Boumaiza et Berrahal, tous deux forment un arc de cercle qui sépare le massif de l'Edough du Tell Nord Guelmien. La bordure Nord correspond à la retombée du massif de l'Edough et Belielta.

Le lac est couvert de juncs (plante aquatique) vers le littoral, puis de scirpes et enfin de phragmites à 2 ou 3 m de la cote. Son fond est limoneux, riche en matières organiques résultant de la décomposition sur place des plantes. Cette vase repose, par l'intermédiaire

d'argile molle d'épaisseur variant entre 0 et 40 m (Zenati, 2000), sur une argile compact (argile de Numidie).

I.3.5. La végétation

La nature des terrains du sous bassin de la Seybouse combinée d'altitude, donc d'humidité et de température, détermine un couvert végétal très varié. L'essentiel de la couverture végétale est représenté par des cultures diverses. On distingue deux catégories :

- Le domaine agricole : représenté par les grandes cultures et parcours des oliviers.
- La végétation naturelle : regroupe toute la végétation naturelle, les forêts, les maquis et les broussailles.

II. Cadre géologique

Les études géologiques réalisées dans la région (Joleaud, 1936 ; Hilly, 1962 ; Vila, 1980, Lahondère, 1987 ; Gleizes, 1988 ; Hammor 1992) montrent l'existence de deux types de terrains ; métamorphique et sédimentaire (fig. 2). Les âges de ces terrains se répartissent du Néo-protérozoïque au Quaternaire.

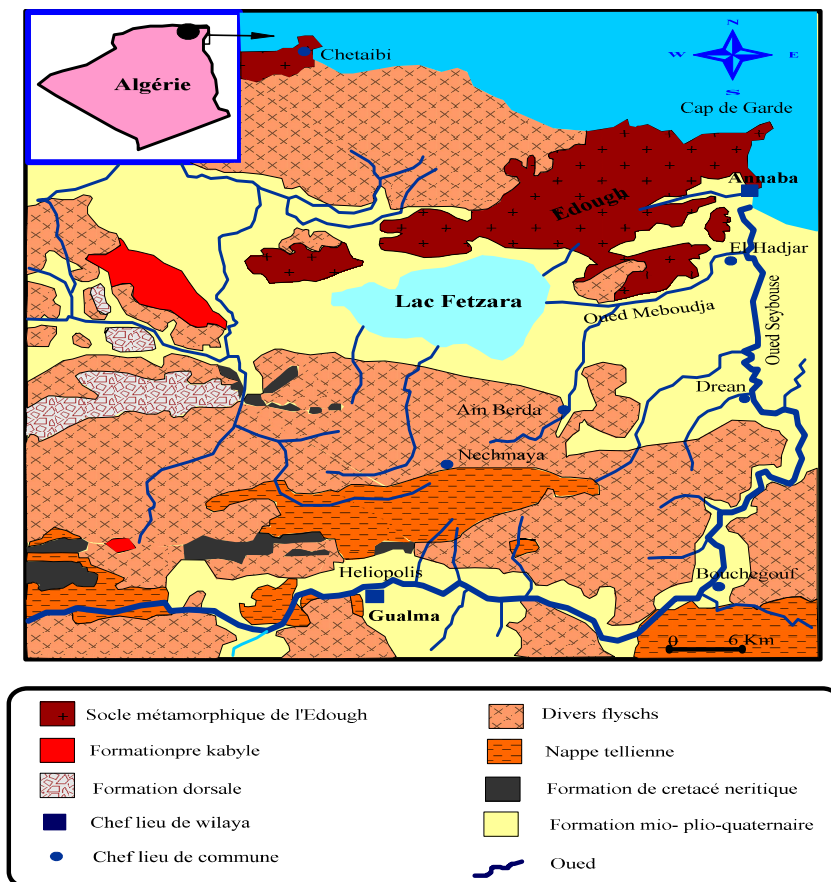


Fig.2. carte de la géologie de la région d'étude

II.1. La géologie de la basse Seybouse

II.1.1. Le Ne protérozoïque- Paléozoïque

Le massif de l'Edough constitue le complexe métamorphique le plus oriental du littoral algérien. Il est composé d'une variété de roches métamorphiques d'âge Précambrien à Paléozoïque, l'ensemble de ces roches forme un antiformal d'axe NE-SW (Hilly, 1962 ; Vila, 1970 ; Gleizes et al.1988 ; Marignac et Zimmermann, 1983 ; Marignac, 1985 ; Bouguerra, 1990 ; Monié et al. 1992 ; Hammor, 1992 ; Aissa et al. 1995 ; Hammor et Lancelot, 1998 ; Laouar et al. 2002). Les gneiss forment la base et les métapélites viennent juste au-dessus des gneiss et constituent 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 andalousite et staurotides en alternance avec des quartzites feldspathiques.

II.1.2. Le Mésozoïque- Cénozoïque

Le massif de l'Edough est couvert vers le Sud et l'Ouest par des terrains sédimentaires formant une série de nappes assez complexes (Neumann et Vila, 1967 ; Marignac, 1985). De bas en haut, la structure est la suivante:

- L'autochtone est représenté par une formation néritique d'âge crétacé et composé surtout de calcaires épais, massifs avec parfois des fissures ou vides karstiques.
- Le flysch mauritanien d'âge Cénomane à Oligocène et qui affleure à Ain Berda constituées de plusieurs faciès : brèches, calcaires et grès micacés ;
- La dorsale Kabyle est composée de deux unités : une unité inférieure (Néocomien à Eocène) composée de sédiments pélagique et une unité supérieure (Eocène à Oligocène) caractérisée par des formations néritiques.
- Le flysch massilien d'âge crétacé est composé de grès, argiles et marnes ;
- Le flysch Numidien est composé de grès d'âge Oligo-Miocène.

La plupart de ces roches sédimentaires sont recouvertes par des sables Mio-pliocène jusqu'au Quaternaire.

- Le Trias affleure à quelques kilomètres au sud de la région de Bouchegouf (Talbi et al, 1991).

La structure de la couverture sédimentaire s'explique par le phénomène de diapir triasique. Il comporte des formations évaporitiques composées par des marnes gypseuses, argiles bariolées, dolomies, calcaires et sels.

- Le Mio-Pliocène est constitué par les faciès suivant :

- Faciès marin (Plaisancien) : ce sont des marnes bleues avec intercalations de calcaires.
- Faciès continental : il est caractérisé par des conglomérats, des grès et des argiles qui sont liés aux dépôts d'effondrement, et qui constitue le réservoir de la nappe captive des plaines d'Annaba-Bouteldja.
- Faciès fluviatile : il est bien développé dans la plaine d'Annaba et est formé essentiellement par des galets et d'argiles le long des oueds.

Les travaux géophysiques de la sismique de réflexion réalisés par SONATRACH en 1969 et Sotrajexport en 1975 ont pu déterminer la structure profonde des la plaine d'Annaba et mettre en évidence l'existence de deux fossés suite à un effondrement dans le remplissage du Mio-Plio-Quaternaire : le fossé de Ben Ahmed, orienté S-N et celui de Ben M'hidi de direction SW-NE. Tous les deux sont séparés par le haut fond de Daroussa (fig3) (Hani, 2003).

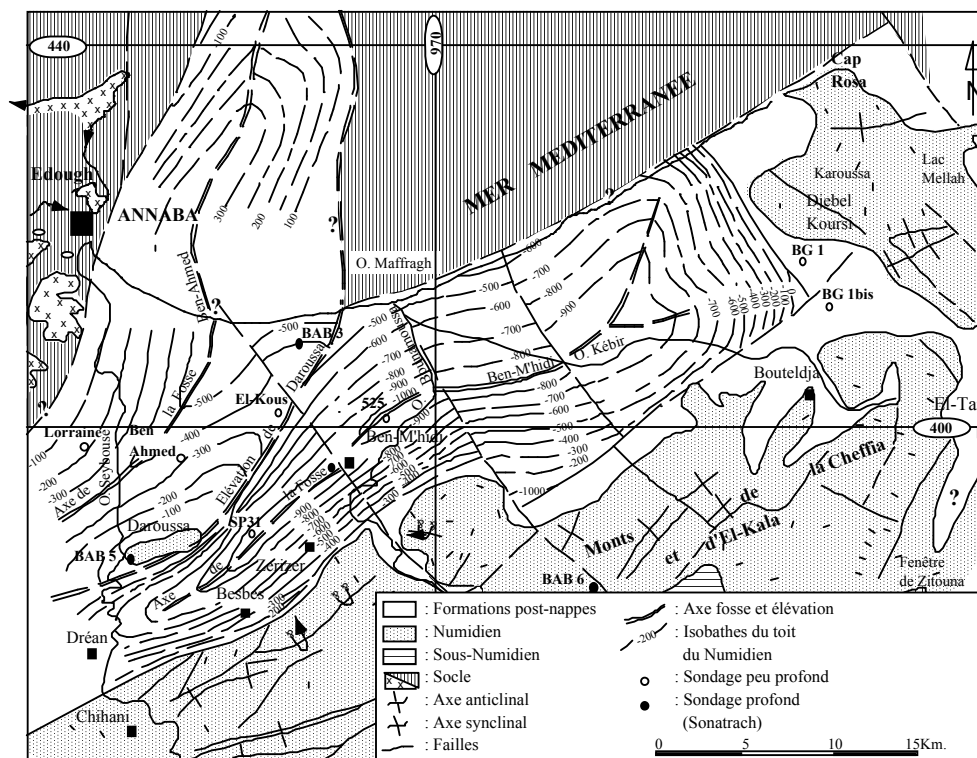


Fig.3. Esquisse structurale des plaines d'Annaba-Bouteldja
(Sonatrach, 1969 in Hani, 2003)

II.1.3. Le Quaternaire

Le Quaternaire dans la région comme l'a détaillé L. Joleaud (1936) est représenté en trois niveaux :

- **Le Quaternaire ancien** (haute terrasse) : avec une altitude qui varie entre 75 et 150 m, est constitué par des formations alluviales (argiles, limons, sables, graviers et galets) et qui forme un réservoir d'eau superficielle.
- **Le Quaternaire moyen** : Il correspond à la basse terrasse avec une épaisseur de 20 à 50 m et est constitué par des argiles et des sables.
- **Le Quaternaire récent** : Il correspond aux sables des cordons dunaires littoraux et aux limons alluvionnaires de la Seybouse.
- **Le Quaternaire actuel** est formé par des alluvions représentées par des dépôts du lit actuel de l'Oued Seybouse, généralement de matériaux variés (argiles, sables et des cailloux) résultant de l'érosion des formations traversées par l'oued.

Cette description géologique a fait apparaître que dans la zone d'étude, seules les formations du Mio-Pliocène et du Quaternaire peuvent constituer des réservoirs d'eau importants. Par contre, les formations anciennes qui apparaissent à l'entourage du site, sont rarement exploitées.

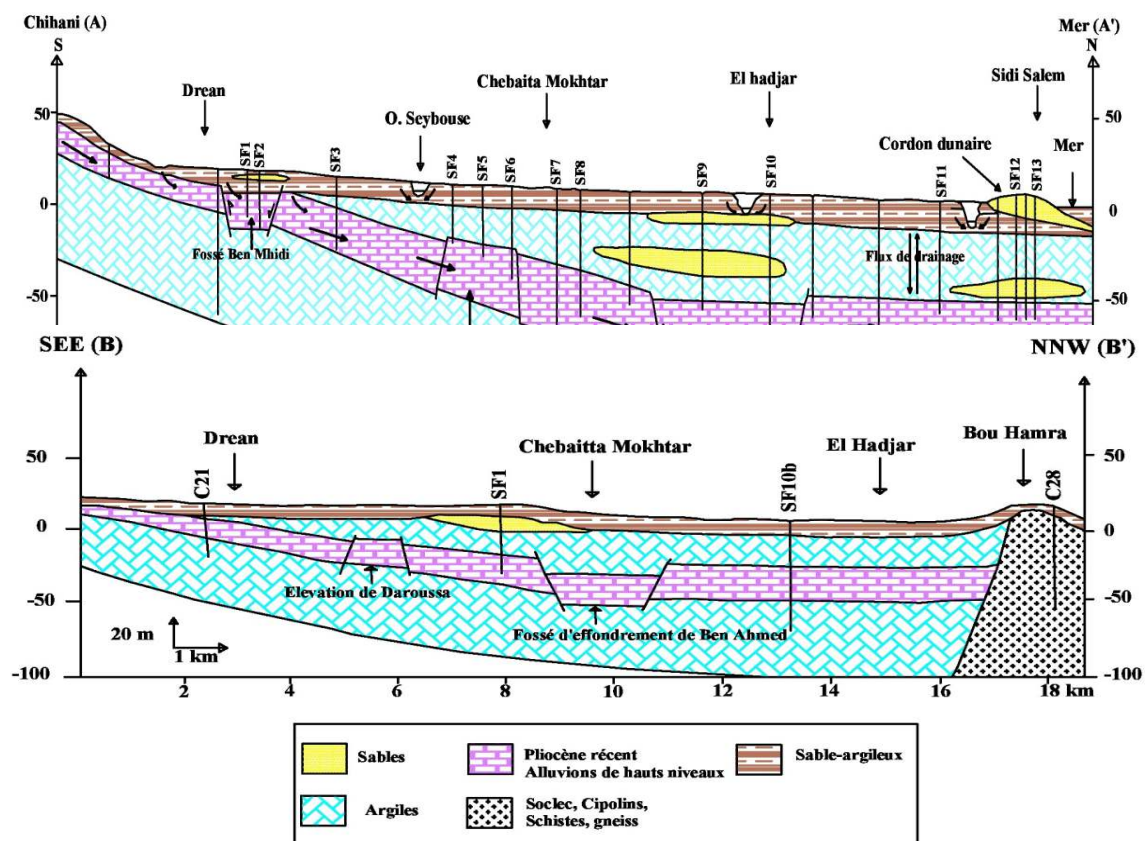


Fig.4. Coupe géologique à travers la région d'étude (Debieche, 2002, modifiée 2019)

II.2. Géologie de la moyenne Seybouse

Du primaire jusqu'au Quaternaire, les terrains qui affleurent dans la région sont :

II.2.1. Le Trias

C'est la formation la plus ancienne datée dans la région. Elle ne représente pas beaucoup d'affleurement, on la trouve uniquement au nord du massif Nador N'bail sous trois faciès :

- Trias inférieur : constitué d'argile d'aspect schisteux affleurant au nord du massif du Nador.
- Trias moyen : formé de calcaire lité à cassures, contenant quelques bancs de calcaires vermiculés (calcaires à ficoïdes).
- Trias supérieur : se rencontre à l'est du Djebel Debagh, caractérisé par des alternances de marnes et schistes de faibles épaisseurs.

II.2.2. Le Néritique

C'est un faciès Jurassique-Crétacé plus au moins karstifié. Il apparaît aussi sous forme de fenêtre au Djebel Mahouna, Djebel Debagh, Nador et plus à l'Ouest au Djebel Taya.

II.2.3. Le Jurassique

Ce sont des dolomies noires avec des schistes calcaireux de faibles épaisseurs qui affleurent dans la région de Djebel Debagh.

II.2.4. Le Crétacé

- Le Crétacé inférieur : affleure à Dj. Debagh et Hammam Bredaa, il se présente sous forme de calcaire massifs lissés et de dolomie à Algues d'âge Aptien.
- Le Crétacé moyen : il est représenté par des calcaires massifs ou lithiques et calcaranites.
- Le Crétacé supérieur : il est caractérisé par des niveaux de calcaires dolomitiques riches en Orbitolines et des débris à Rudistes datant de Cénomaniens-Vraconien.

II.2.5. Le domaine des nappes

II.2.5.1. La nappe Numidienne : elle affleure au Nord-est et au Sud-est de la région (Djebel Bezioun), au centre et à l'Est (les massifs boisés de Houara et Beni Mezline) et au Nord et au Sud des massifs néritiques constantinois. Cette nappe forme les hauteurs des

reliefs gréseux de part et d'autre de la Seybouse, et est caractérisée par la présence de deux faciès essentiels les grès et les intercalations argileuses (Vila, 1980, Lahondère et al, 1979).

II.2 .5.2. Le domaine des flysch : ce sont des dépôts de mer profondes d'âge allant du Crétacé inférieur jusqu'au l'Oligocène. Nous distinguons :

- **Les flysch de Penthièvre :** formés au Sud-est de Djebel Debagh par une série continue depuis le Cénomaniens jusqu'à l'Oligocène. On y rencontre :
 - Les flysch grés-micacés à patine jaunâtre d'âge Oligocène
 - Flysch grés –micacé à patine jaunâtre d'âge Oligocène.
 - Flysch à micro brèches rouges formés par des argiles à micro brèches assez fine du Priabonien à l'Oligocène.
 - Flysch conglomératique à Nummulites d'âge Lutétien.

- **Les flysch de Guerouche :** Ce flysch affleure au Sud de la pointe orientale de Djebel Debagh et à l'Ouest du foret de Beni Mezlin. On distingue :
 - Les grés du Crétacé inférieur : c'est une série gréseuse à minces intercalations argilo-schisteuses grises ou brunâtres.
 - Le complexe de base à calcaires fins : c'est une série argilo-gréseuse avec de nombreuses intercalations de biomicrites claires.

II.2 .5.3. La Nappe Ultra Tellienne : ce sont des séries superposées anormalement au Crétacé néritique constantinois du Djebel Debagh et du Douar Bouzitoune dans la région de Guelma (Durand Delga, 1969).

II.2 .5.4. La Nappe Tellienne : correspond au domaine tellien externe, constitué par des nappes allochtones de matériel épais et profond d'âge Crétacé-Paléogène qui chevauchent l'autochtone et apparaissent en fenêtres.

II.2 .5.5. L'unité néritique constantinoise : la série la plus complète est représentée par terminaison orientale de Djebel Debagh qui passe sous les nappes pour réapparaître en fenêtre à la piscine romaine d'Héliopolis et dans le coin Sud –est de Nador. Cette série comprend des niveaux siliceux à la surface du charriage, d'aspect de grés roux d'âge Numidien. Plusieurs centaines de mètres de calcaires allant du Campanien-Maestrichtien jusqu'au Barrémien renferment plusieurs types de fossiles et présentent des faciès assez divers, des bancs de dolomies noires de base de 250 à 300 m d'épaisseur largement cristalline.

III. Conclusion

La région d'étude fait partie de l'ensemble géologique du Tell algérien nord oriental. Elle est définie par des formations géologiques de type métamorphique et sédimentaire allant du Néoprotérozoïque au Quaternaire.

Les deux évènements tectoniques qui ont affecté la plaine d'Annaba dans un premier temps, durant le Miocène inférieure au Miocène supérieure provoquant ainsi l'enfoncement progressif des grès numidiens et par la suite le remplissage Plio-Quaternaire par des matériaux détritiques, ont permis de lui attribuer un caractère hydrogéologique à potentiel hydrique assez important.

Les caractéristiques géologiques des formations des plaines de Guelma et Annaba, nous ont permis de distinguer les réservoirs d'eau suivants :

- le réservoir de la nappe superficielle (plaine de Guelma), présenté par les alluvions, constituées essentiellement par des sables, cailloutis, galets, limons et conglomérats.
- le réservoir de la nappe des hautes terrasses (plaine de Guelma), représenté par des galets, conglomérats, limons et sables.
- le réservoir de la nappe superficielle (plaine d'Annaba), représenté par des alluvions argilo-limoneuses au niveau de la nappe phréatique et par les sables de la nappe du cordon dunaire ;
- le réservoir de la nappe des graviers (plaine d'Annaba), représenté par des galets et des graviers intercalés avec des lentilles de sable et d'argile.

Cadre hydro-climatologique

I. introduction

L'étude des facteurs hydro climatiques (pluviométrie, température, vent humidité ...) est indispensable pour quantifier les ressources en eau qui existent de le bassin versant et déterminer la part de l'eau qui s'infiltré et celle qui ruisselle etc...

L'objectif de notre étude est l'analyse de ces facteurs et la détermination des différents termes du bilan d'eau.

Pour faire l'analyse des paramètres climatiques, nous avons sélectionné quatre stations météorologiques qui existent dans la région d'étude (station de Annaba, de Pont bouchet, de Guelma et celle de Héliopolis) dont les coordonnées géographiques sont mentionnées dans le tableau 1. Les données que nous avons travaillé dessus s'étalent sur une période de 35 ans pour les stations de la région d'Annaba et une période de 30 ans pour la région de Guelma.

Tab. 1. coordonnées des stations météorologiques et période d'observation

Stations	Longitude	Latitude	Altitude (m)	Période d'observation
Salines	07°45' E	37° N	50	1980-2015
Pont Bouchet	07°45'E	36°58'N	06	1980-2015
Guelma	07° 28' E	36°28' N	227	1985-2015
Héliopolis	07° 27' E	36°30' N	224	1985-2015

II. Etude des paramètres climatiques

II.1. la pluviométrie

Les précipitations est un facteur fondamental pour caractériser le climat d'une région. Elles jouent un rôle primordial dans l'alimentation des nappes souterraines ainsi que dans le comportement hydrologique des cours d'eau.

Dans la région d'étude, la pluviométrie se caractérise par une forte intensité en hiver et une diminution remarquable en été. En effet, les valeurs des précipitations moyennes annuelles coïncident bien avec la carte des précipitations établie par le service de l'ANRH sur une période de 45 ans (fig 5) et qui montre une variation de la pluviométrie du Sud où elles sont

de l'ordre de 350 mm vers le Nord où elles sont de l'ordre de 600 mm pour atteindre les 700 mm par endroit.

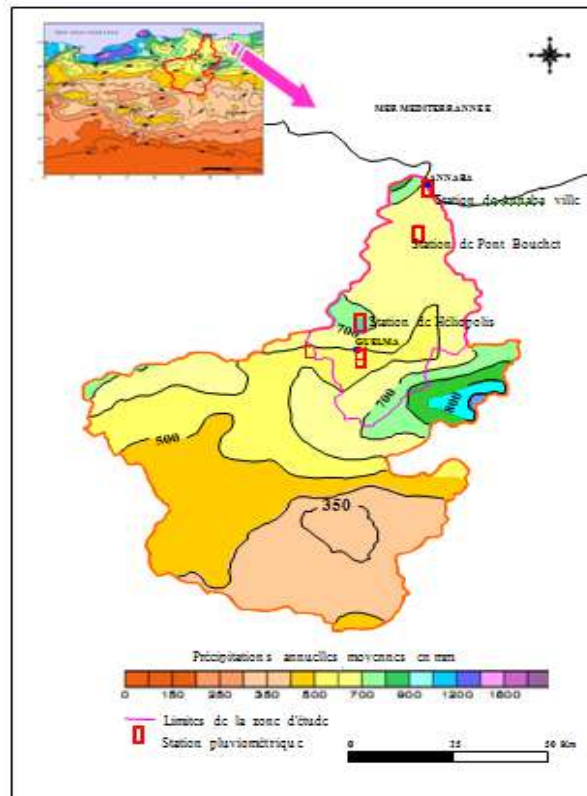


Fig.5. Carte des précipitations moyennes annuelles de l'Est Algérien (in Bechiri.N, 2011)

a- Les précipitations moyennes mensuelles

Les précipitations moyennes mensuelles calculées pour les quatre stations sont mentionnées dans le tableau 2.

Tab.2. précipitation moyennes mensuelles des stations Salines et Pont Bouchet (1980/2015) et de Guelma (1985/2015) et Héliopolis (1985/2015)

Stations	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou
Salines	37,75	63,93	85,54	113,76	100,36	77,90	74,94	55,45	35,76	11,91	2,56	6,10
Pont Bouchet	37,13	59,71	88,12	107,60	91,81	74,85	64,41	53,09	34,24	11,37	2,11	11,21
Guelma	40,12	45,02	67,60	82,38	81,47	72,31	66,92	59,38	47,31	16,40	3,57	14,52
Héliopolis	35,60	43,30	63,90	91,80	88,00	70,20	65,00	57,60	42,00	15,70	4,50	11,90

Les histogrammes suivants (fig.6) montrent clairement la variation des précipitations mensuelles dans les stations étudiées.

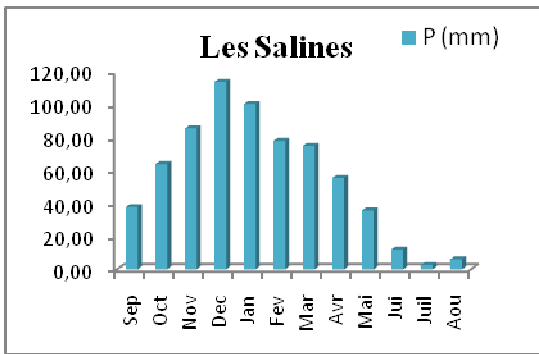


Fig. 6. Précipitations de la station des Salines (80/2015)

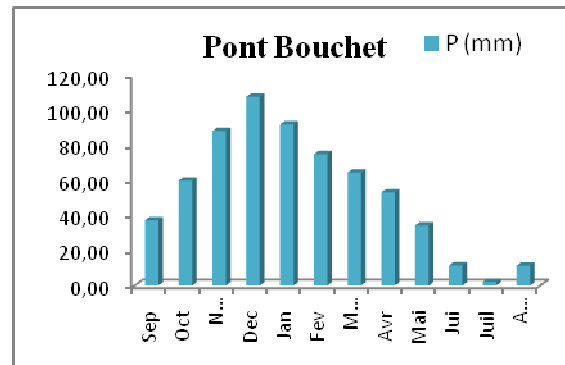


Fig.7. Précipitations de de Pont Bouchet (80/2015)

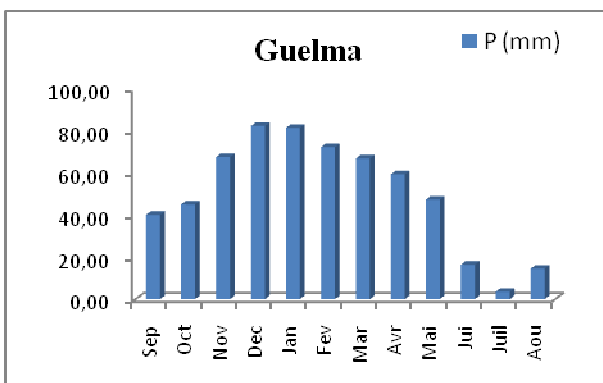


Fig.8. Précipitations de la station de Guelma (85/2015)

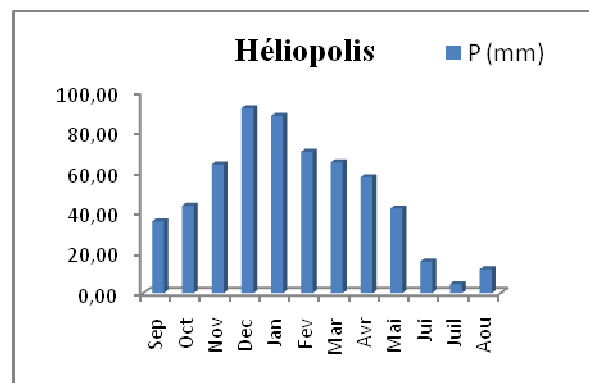


Fig.9. Précipitations de la station de Héliopolis (85/2015)

Les histogrammes des précipitations moyennes mensuelles des quatre stations de Pont Bouchet, les salines, Guelma et Héliopolis (fig.6,7,8 et 9.) montrent que le mois le plus pluvieux dans cette région est celui de Décembre avec des précipitations moyennes atteignant 107.60 et 113.79, 78.97 et 93.63 mm respectivement, et que le mois de juillet est le mois le plus chaud pendant lequel nous avons enregistré des quantités de pluies ne dépassant pas les 2.6 mm pour les deux stations de la basse Seybouse et les 10.1 mm pour la moyenne Seybouse.

II.2. la température

Les températures moyennes mensuelles et annuelles régissent directement, en interaction avec les autres facteurs météorologiques (précipitation, insolation, etc.), le phénomène d'évaporation et par la même le déficit d'écoulement annuel et saisonnier.

Les observations des températures extrêmes dont on dispose, sont prises au niveau de la station des Salines, qui est la seule à pouvoir enregistrer ces mesures à Annaba, sur une

période de 35 ans. Et celle de Guelma sur une période 30 ans. Les valeurs sont portées dans le Tableau3.

Tab.3. Températures moyennes mensuel de la station des Salines (1980/2015) et Guelma (1985/2015)

		Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou
Les Salines	T Min °C	21.9	12.34	13.9	7	9.2	8.4	11.62	12.2	15.68	20.6	24.25	22.05
	T Max °C	26	22.219	17.8	14.83	14.1	13.5	14.85	17.2	19.67	24.8	28.2	28.7
	T Moy °C	23.44	20.70	15.92	12.41	11.46	11.58	13.14	15.26	18.32	22.27	24.60	25.56
Guelma	T Min °C	21,4	17,1	12,6	7,3	7,3	7,2	11	11,9	10,6	15,7	24,2	25,4
	T Max °C	23,95	20,08	14,70	10,97	9,77	10,14	12,39	14,92	18,81	23,35	27,14	27,52
	T Moy °C	26,3	22,8	17,2	14	12,2	12,5	15,8	17,4	21,6	24	29,7	30,6

A partir de ce tableau on constate une variation progressive des températures au cours des mois de l'année, cette variation est bien représentée dans la courbe ombrothermique (fig.10) de la station des Salines et dans la (fig. 11) de la station de Guelma. On remarque que le mois le plus froid pour la station des Salines est janvier avec une température moyenne de l'ordre de 11.46°C alors que le mois le plus chaud est août avec une température moyenne de 25.56 °C. la même constatation pour la station de Guelma où on note que le mois de Janvier est le mois le plus froid où la moyenne de température enregistré et 12.2 °C tandis qu'au mois de Aout mois le plus chaud la température moyenne est de 30.6 °C.

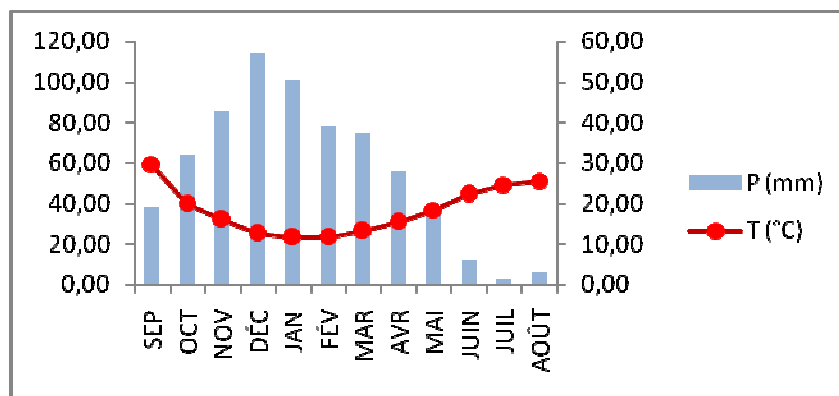


Fig.10. Courbe ombro-thermique des salines (1980-2015)

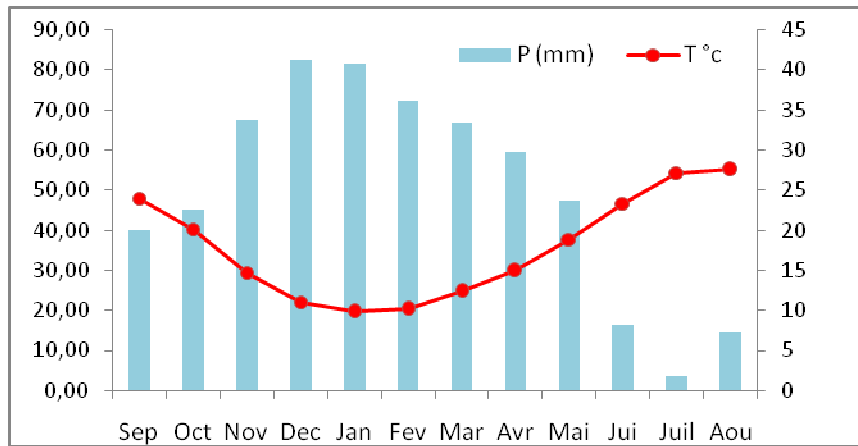


Fig.11. Courbe ombro-thermique de la station de Guelma (1985-2015)

II.2.1.3. L'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 varient de 71.90 % en été (juillet) à 79.89 % en hiver (janvier) avec une moyenne annuelle étant de 75.66 % (Tableau 4).

Tab.4. Moyenne mensuelle de l'humidité relative à la station des Salines en % (1980-2015)

Mois	sep	oct	Nov	dec	Jan	fev	mar	Avr	mai	jui	Juil	aout
Moyenn	74.0	75.1	76.6	78.3	79.8	77.2	75.5	75.5	76.4	74.3	71.9	72.7
e	3	9	2	4	9	1	8	3	5	9	0	6

II.2.1.4. Le 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 3.75 m/s (Tableau5).

Tab.5. Moyenne mensuelle de la vitesse des vents en m/s à la station des Salines (1984-2015)

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Août
Moyenne	3.64	3.28	3.63	3.94	3.79	3.9	3.8	3.89	3.65	3.75	4	3.78

II.3. Le bilan hydrique :

II.3.1. Estimation de l'évapotranspiration potentielle et réelle :

L'évapotranspiration est la quantité d'eau évaporée à partir du sol, des surfaces d'eau libres et celle transpirée par les végétaux.

II.3.1.1. Formule 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.

$$ETR = \frac{P}{\left(0.9 + \frac{P^2}{L^2}\right)^{\frac{1}{2}}} \quad (1)$$

$$L = 300 + 25T + 0.05T^3 \quad (2)$$

ETR : Evapotranspiration réelle annuelle en mm

P : Précipitation moyenne annuelle en mm

T : température moyenne annuelle en °C

Tab.6. L'évapotranspiration réelle selon la formule de Turc

	Les Salines	Pont Bouchet	Guelma	Héliopolis
P (mm)	665.96	635.65	595.08	589.5
T °C	17.80	17.80	17.81	18.27
L	1026.99	1026.98	1027.71	1061.67
ETR (mm)	579.09	562.52	535.42	536.41

II.3.1.2. Formule de Thornthwaite (bilan d'eau) :

Cette méthode est basée sur la notion de **RFU** (réserve en eau dans le sol facilement utilisable par les plantes). Dans notre cas la **RFU** admet 100 mm comme valeur maximale.

Outre que les données pluviométriques et la température, cette méthode introduit le coefficient thermique **K** et l'indice de température mensuel **i** pour l'estimation de l'**ETR** selon la relation suivante :

$$ETP (mm) = 16 \left(\frac{10T}{I} \right)^a * K \quad (3)$$

$$I = \sum i \quad (4)$$

$$i = \left(\frac{t}{5} \right)^{1.5} \quad (5)$$

$$a = \left(\frac{1.6}{100} \right) * I + 0.5 \quad (6)$$

Avec :

t : Température moyenne mensuelle ° C

i : Indice thermique mensuel

I : Somme des indices mensuels

ETP : Evapotranspiration potentiel mensuelle en mm

K : terme correctif dépend de la durée d'insolation

Les résultats des calculs selon cette méthode sont reportés dans les tableaux 7, 8, 9 et 10.

Tab.7. Bilan de l'eau selon CW Thornthwaite , station des salines (1980/2015)

	P (mm)	T°C	i	k	ETP(mm)	ETR (mm)	RFU	Exc (mm)	Def (mm)
S	37,75	23,44	10,37	1,03	108,97	37,75	0,00	0,00	71,22
O	63,93	19,70	7,97	0,97	74,35	63,93	0,00	0,00	10,42
N	85,54	15,92	5,77	0,86	44,41	44,41	41,13	0,00	0,00
D	113,76	12,41	3,96	0,81	26,36	26,36	100,00	28,53	0,00
J	100,36	11,46	3,51	0,87	24,43	24,43	100,00	75,93	0,00
F	77,90	11,58	3,57	0,85	24,33	24,33	100,00	53,57	0,00
M	74,94	13,14	4,32	1,03	37,27	37,27	100,00	37,67	0,00
A	55,45	15,26	5,42	1,10	52,52	52,52	100,00	2,93	0,00
M	35,76	18,32	7,14	1,21	81,06	81,06	54,70	0,00	0,00
J	11,91	22,27	9,60	1,22	117,38	66,61	0,00	0,00	50,77
J	2,56	24,60	11,16	1,24	143,47	2,56	0,00	0,00	140,91
A	6,10	25,56	11,83	1,16	144,09	6,10	0,00	0,00	137,99
Annuel	665,96	17,81	84,62		878,64	467,32		198,64	411,32

Tab.8. Bilan de l'eau selon C.W Thornthwaite, station de Pont Bouchet (1980-2015)

	P (mm)	T°C	i	k	ETP (mm)	ETR (mm)	RFU (mm)	Exc (mm)	Def (mm)
S	37,13	23,95	10,72	1,03	112,50	37,13	0,00	0,00	75,37
O	59,71	20,08	8,21	0,97	76,10	59,71	0,00	0,00	16,39
N	88,12	14,70	5,12	0,86	37,57	37,57	50,55	0,00	0,00
D	107,60	10,97	3,29	0,81	20,42	20,42	100,00	37,73	0,00
J	91,81	9,77	2,76	0,87	17,65	17,65	100,00	74,16	0,00
F	74,85	10,14	2,92	0,85	18,49	18,49	100,00	56,36	0,00
M	64,41	12,39	3,95	1,03	32,64	32,64	100,00	31,77	0,00
A	53,09	14,92	5,23	1,10	49,41	49,41	100,00	3,68	0,00
M	34,24	18,81	7,43	1,21	83,97	83,97	50,27	0,00	0,00
J	11,37	23,35	10,31	1,22	127,06	61,64	0,00	0,00	65,42
J	2,11	27,14	12,95	1,24	171,29	2,11	0,00	0,00	169,18
A	11,21	27,52	13,22	1,16	164,47	11,21	0,00	0,00	153,26
Annuel	635,65	17,81	86,10		911,56	431,94		203,71	479,62

Tab.9. Bilan de l'eau selon C.W Thornthwaite, station Guelma (1985-2015)

	P (mm)	T°C	i	k	ETP (mm)	ETR (mm)	RFU (mm)	Exc (mm)	Def (mm)
S	40,12	23,95	10,72	1,03	112,50	40,12	0,00	0,00	72,38
O	45,02	20,08	8,21	0,97	76,10	45,02	0,00	0,00	31,08
N	67,60	14,70	5,12	0,86	37,57	37,57	30,03	0,00	0,00
D	82,38	10,97	3,29	0,81	20,42	20,42	91,99	0,00	0,00
J	81,47	9,77	2,76	0,87	17,65	17,65	100,00	55,81	0,00
F	72,31	10,14	2,92	0,85	18,49	18,49	100,00	53,82	0,00
M	66,92	12,39	3,95	1,03	32,64	32,64	100,00	34,28	0,00
A	59,38	14,92	5,23	1,10	49,41	49,41	100,00	9,97	0,00
M	47,31	18,81	7,43	1,21	83,97	83,97	63,34	0,00	0,00
J	16,40	23,35	10,31	1,22	127,06	79,74	0,00	0,00	47,32
J	3,57	27,14	12,95	1,24	171,29	3,57	0,00	0,00	167,72
A	14,52	27,52	13,22	1,16	164,47	14,52	0,00	0,00	149,95
Annuel	597,00	17,81	86,10		911,56	443,11		153,89	468,45

Tab.10. Bilan de l'eau selon C.W Thornthwaite, station Héliopolis (1985-2015)

	P (mm)	T°C	i	K	ETP (mm)	ETR(mm)	RFU (mm)	Exc (mm)	Def (mm)
S	35,60	24,15	10,85	1,03	112,37	35,60	0,00	0,00	76,77
O	43,30	20,23	8,30	0,97	75,23	43,30	0,00	0,00	31,93
N	63,90	14,90	5,22	0,86	37,00	37,00	26,90	0,00	0,00
D	91,80	11,46	3,51	0,81	21,02	21,02	97,68	0,00	0,00
J	88,00	10,23	2,96	0,87	18,14	18,14	100,00	67,54	0,00
F	70,20	10,73	3,18	0,85	19,43	19,43	100,00	50,77	0,00
M	65,00	12,85	4,17	1,03	33,32	33,32	100,00	31,68	0,00
A	57,60	16,06	5,85	1,10	54,69	54,69	100,00	2,91	0,00
M	42,00	19,44	7,81	1,21	86,91	86,91	55,09	0,00	0,00
J	15,70	23,95	10,72	1,22	130,99	70,79	0,00	0,00	60,20
J	4,50	27,25	13,03	1,24	170,72	4,50	0,00	0,00	166,22
A	11,90	27,98	13,56	1,16	168,06	11,90	0,00	0,00	156,16
Annuel	589,50	18,27	89,16		927,88	436,60		152,90	491,28

Pour mieux comprendre les différents paramètres de ce bilan nous les avons représenté graphiquement dans les figures12.

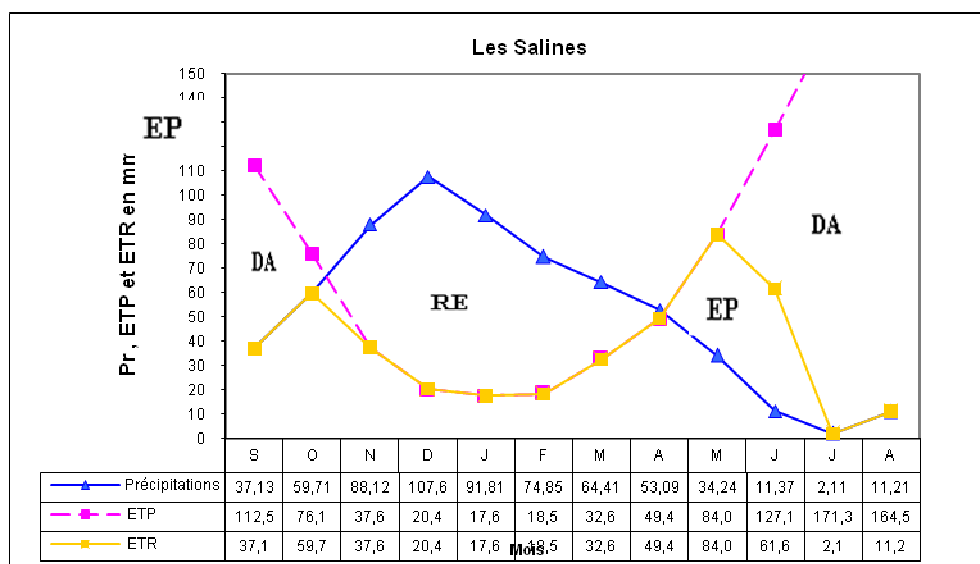


Fig.12. Représentation graphique du bilan hydrique de Thornthwaite de la station des Salines

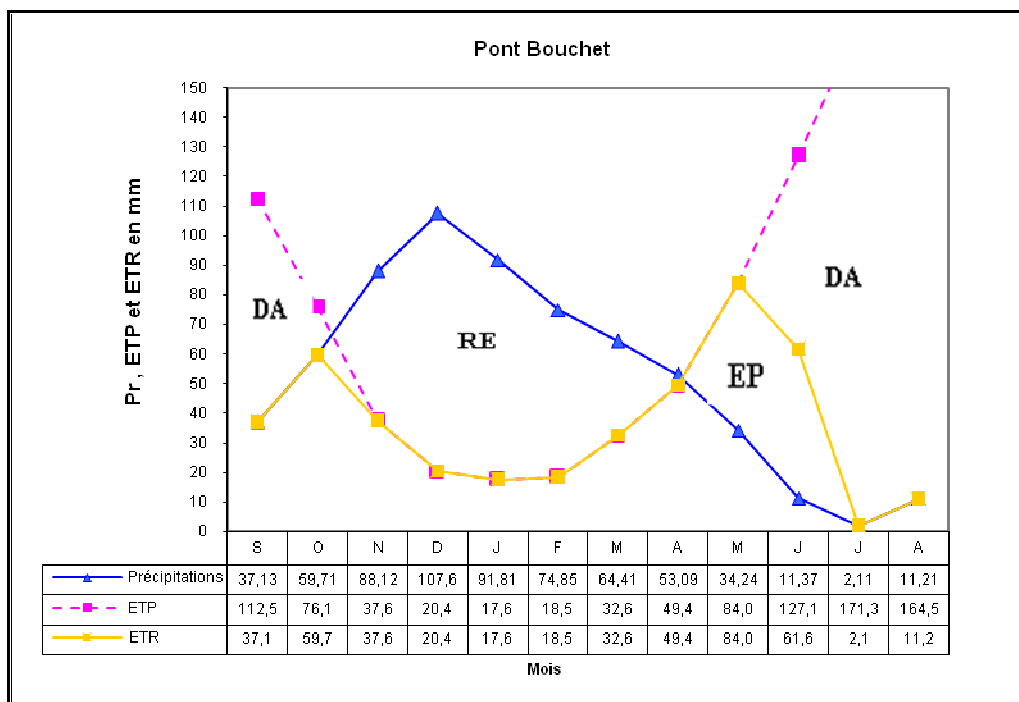


Fig.13. Représentation graphique du bilan hydrique de Thornthwaite de la station de Pont Bouchet

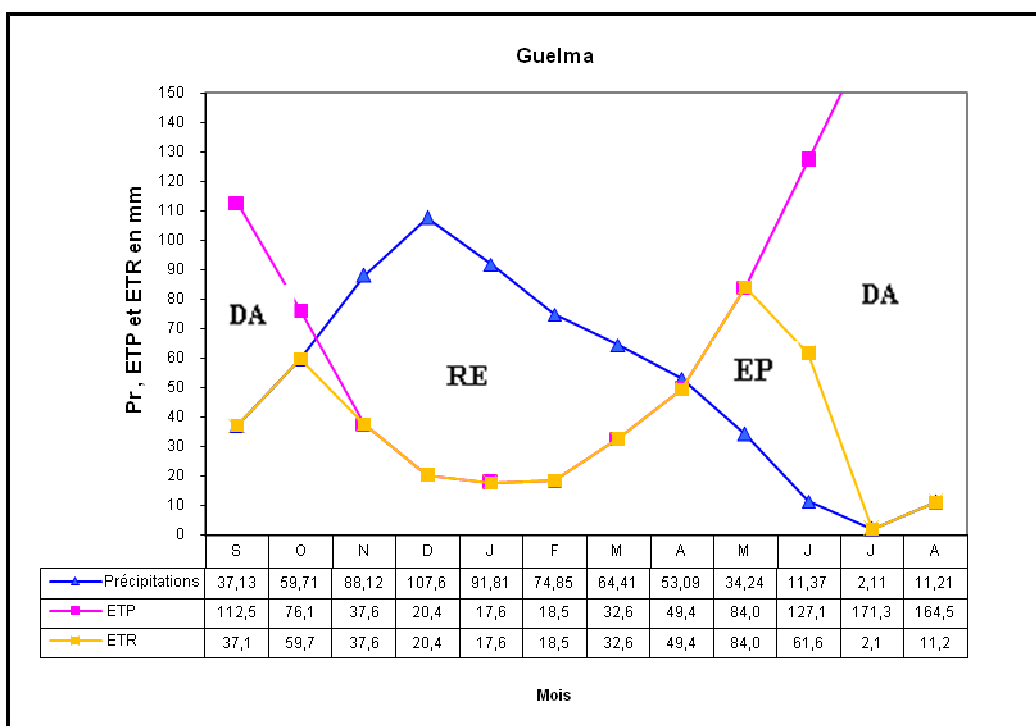


Fig .14. Représentation graphique du bilan hydrique de Thornthwaite de la station de Guelma

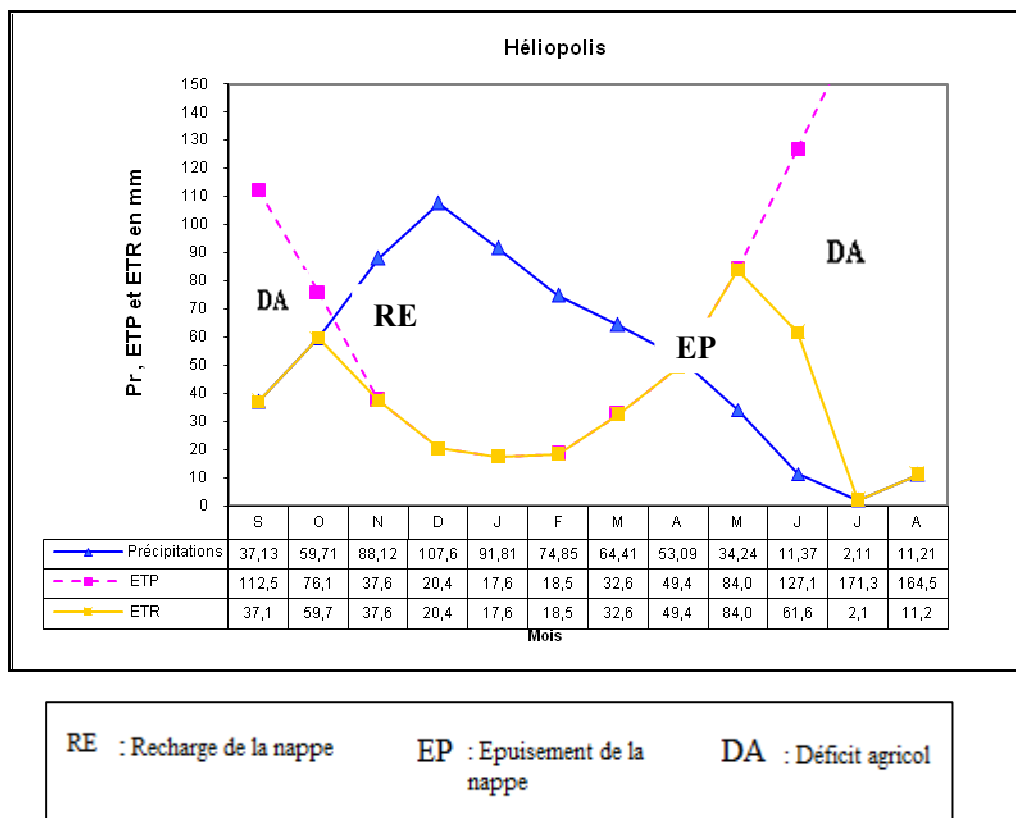


Fig.15. Représentation graphique du bilan hydrique de Thornthwaite de la station de Héliopolis

Ainsi, on remarque que la réserve en eau du sol RFU dans quatre stations (fig.12, 13,14 et 15) commence à se reconstituer à partir du mois du novembre, pour atteindre son maximum 100 mm à partir de décembre jusqu'à avril, période pendant laquelle apparaît un excédent qui va se traduire en écoulement ou une infiltration qui alimente la nappe. A partir du mois de mai, la réserve commence à s'épuiser jusqu'au mois de juillet où elle devient nulle, période qui traduit un déficit agricole nécessitant l'irrigation.

II.4. Réseau hydrographique :

L'oued Seybouse est le deuxième oued en Algérie, il draine un vaste bassin d'une superficie 6471 km² avec un débit annuel de 441 millions de m³ (ABH) et un chevelu hydrographique très dense de plus de 3000 km (fig.16).

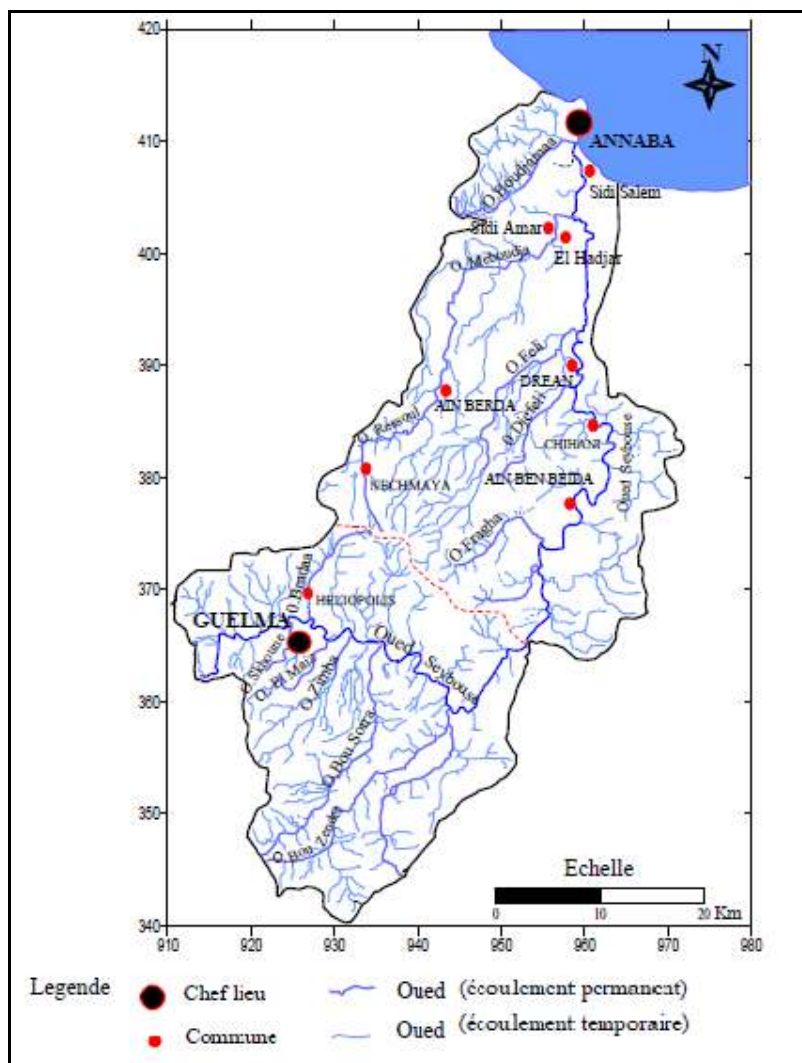


Fig.16. Carte du réseau hydrographique (Bichiri, 2011)

Depuis les hautes plaines de Sellawa et de Heracta, l'oued Seybouse s'écoule dans une vallée de direction sud-nord. Il résulte de la confluence de l'oued Charef qui prend sa naissance dans les hautes plaines (Berriche et Ain Babouche) et rencontre à l'Ouest de Guelma l'Oued Bouhamdane qui coule dans une direction Sud-ouest, Nord-est le long du versant sud-tellien. La rencontre de ces deux cours d'eaux, donne naissance à l'Oued Seybouse qui s'écoule d'Ouest en Est jusqu'à sa confluence avec l'oued Mellah, affluent issu du versant septentrional des monts de Medjerda. Depuis, la Seybouse change de direction pour rejoindre plus au Nord, la mer méditerranée, après avoir reçu les apports de l'oued Meboudja et traversé la plaine côtière comprise entre Dzean et Annaba (tab. 11)

Nous notons que la majorité des apports de l'oued Bouhamdane sont captés par le barrage de Hamam Debagh et que l'oued Charef supérieur est exploité par le barrage de Foum El Khanga.

Tab.11. Les affluents de la Seybouse .source (Agence des bassins hydrographiques)

Ordre	Nom de l'affluent	Wilaya	Commune	Type
1	O. Cherf	Guelma	Medjez Amar	Permanent
2	O.Bouhamdane	Guelma	Medjez Amar	Permanent
3	O.Touta	Guelma	El Fedjouj	Collecteur
4	O.Skhoun	Guelma	Guelma	Collecteur
4	O.Maiz	Guelma	Guelma	Collecteur
5	O.Zimba	Guelma	Belkheir	Collecteur
6	Chaaba Mekkouka	Guelma	Boumahra	Collecteur
7	O.Bousra	Guelma	Boumahra	Collecteur
8	O.Halia	Guelma	Hammam N'bail	Permanent
9	O.Malah	Guelma	Bouchegouf	Permanent
10	O.Frarah	Guelma	O.Fragha	Temporaire
11	O.Lesfah	Guelma	O.Fragha	Temporaire
12	O.Sbaa	El tarf	Dréan	Temporaire
13	O.Meboudja	Annaba	El Hadjar	Permanent

*(Source ABH)***II.5. Conclusion :**

La synthèse des données climatiques montre que la région d'étude est soumise à un climat méditerranéen, humide et doux en hiver et sec et chaud en été. La moyenne annuelle de la température pour l'ensemble de la région varie ou alentours de 17.80°C et la moyenne annuelle des précipitations y varie entre 635.65 mm Et 665.96 mm dans la basse Seybouse et de 589.5 mm à 597.5 mm dans la moyenne Seybouse,

La réserve en eau, RFU, commence à se reconstituer à partir du mois de novembre, pour atteindre son maximum de 100 mm à partir de décembre jusqu'à avril, période pendant laquelle apparaît un excédent de l'ordre de 198.64 mm, 203.7 mm, 153.89 mm et 152.9 mm respectivement pour les stations des Salines, Pont Bouchet, Guelma et Héliopolis. A partir du mois de mai, la RFU commence à s'épuiser jusqu'au mois de juin où elle devient nulle, période qui traduit un déficit agricole.

Cadre hydrogéologique

L'étude hydrogéologique du bassin versant est un outil indispensable pour l'identification et la caractérisation des différents aquifères qui existent et pour avoir une idée sur les potentialités en eau souterraine.

I. Identification des nappes de la région de la basse Seybouse

L'identification des aquifères et la détermination de leur caractéristiques hydrogéologiques permettent d'avoir une idée sur les potentialités en eau souterraine de la région.

I.1. La nappe des formations superficielles

Cette nappe est contenue dans des formations sablo argileuses incluant des lentilles de sables. Les argiles grises compactes constituent le substratum. Les lentilles de sables sont plus fréquentes à proximité de l'oued Seybouse, et à la périphérie on note des affleurements des grès numidiens. Cette nappe est globalement libre sauf en quelques points où elle est captive sous des niveaux d'argiles. L'épaisseur de cette nappe varie de 5 à 18 m.

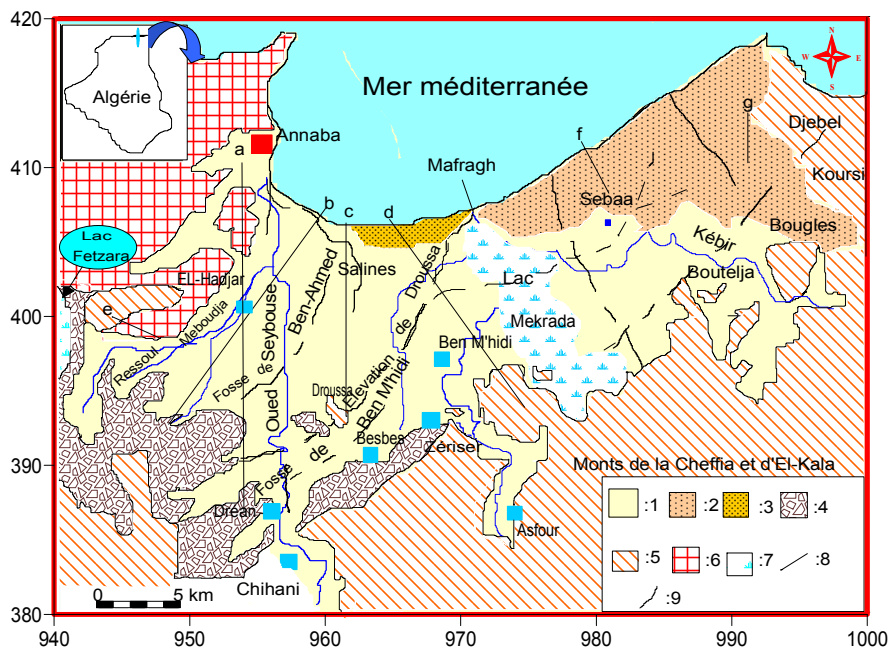


Fig.17. Extension des différents aquifères dans les plaines de Annaba-Bouteldja

(D'après Gaud, 1976, in Hani 2003).

1 : Nappe des formations superficielles ; 2 : Nappe des sables du massif dunaire de Bouteldja ; 3 : Nappe des sables du cordon dunaire ; 4 : Nappe des alluvions de haut niveau ; 5 : Grès et argiles du Numidien ; 6 : Formations métamorphiques (nappe des cipolins) ; 7 :Marréages ; 8 : Failles ; 9 : Fosses.

I.2. La nappe des graviers

Elle se situe en dessous de l'aquifère superficiel et elle est contenue dans des graviers, sable et cailloutis Plio-Quaternaires d'une profondeur allant de 2 à 70 m (fig17). Cette nappe est captive dans sa presque totalité, mais elle devient libre en bordure Sud- Ouest, quand les graviers affleurent en surface. Son coefficient d'emménagement est parfois très faible de l'ordre de 10^{-4} dans la partie où la nappe est captive et atteint 10^{-2} dans les zones où elle est libre.

I.3. 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.

I.4. La nappe des cipolins

Cette nappe est située dans les massifs de bordure du 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 à une profondeur de 2 à 80 m et une transmissivité variant de 5.10^{-5} à 10^{-3} m²/s (selon Kherici, 1993). Ces calcaires sont en contact avec les alluvions de la plaine. Leur superficie est inférieure à 100ha.

I.5. 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 Hallalal Aissa,

I.6. La nappe libre du cordon dunaire

Elle est contenue dans les dunes le long de la cote méditerranéenne sur une largeur de 0.5 à 2 km , à l'Ouest de la Mafragh. Elle présente l'intérêt de protéger la nappe phréatique des venues d'eau salées. Cette nappe est alimentée directement par les eaux de pluie et elle présente une porosité efficace de l'ordre de 10 % (B Gaud 1976). La perméabilité y est de 10^{-4} à 10^{-3} m/s (Khérici, 1993).

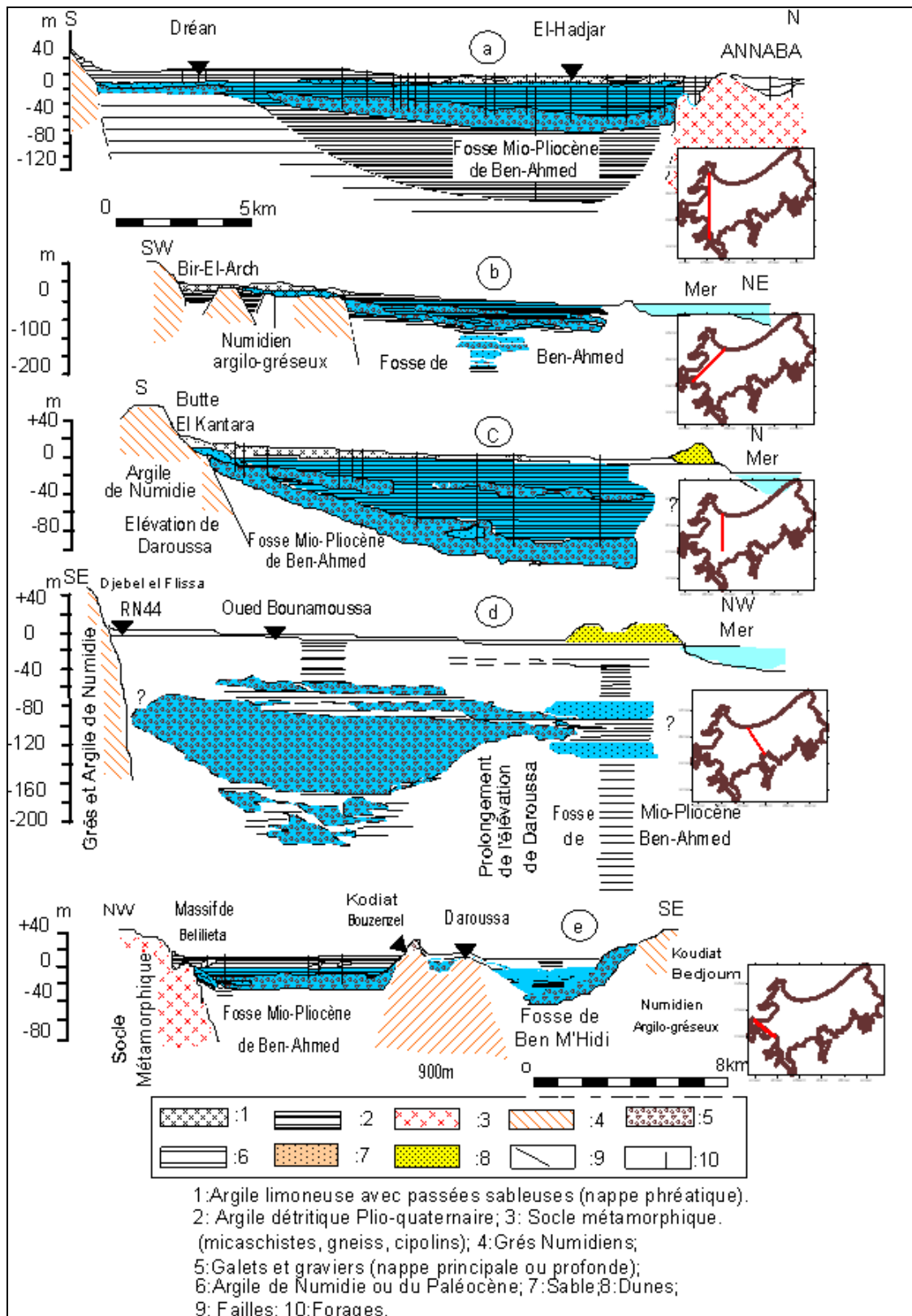


Fig. 18. Coupes Hydrogéologiques a travers de la plaine de Annaba (ANRH, 1976).

II. Identifications des nappes de la région de la moyenne Seybouse

Le bassin de Guelma présente plusieurs ensembles lithologiques caractérisant des zones hydrogéologiques différentes.

Au Sud, les formations calcaires fracturées favorisent l'infiltration et la formation de nappes aquifères. Sur la rive gauche de la Seybouse, nous rencontrons des formations où l'infiltration est très faible à cause des formations lithologiques moins perméables. Enfin nous distinguons deux systèmes aquifères différents, le premier se localise au centre du bassin versant et est constitué d'alluvions quaternaires (poudingues, graviers, galets, marnes et limons) à forte perméabilité. Cet aquifère représente la nappe alluviale de Guelma. Le deuxième aquifère représente la nappe des calcaires de Hammam Bradaa. Tous les deux renferment la principale ressource en eau souterraine du bassin versant de la moyenne Seybouse.

II.1 La nappe de la plaine alluviale de Guelma :

La plaine est située dans la vallée de l'Oued Seybouse. Elle est traversée par l'oued Seybouse d' Ouest en Est, depuis Medjez Ammar jusqu'à Nador. Elle se présente sous forme d'une zone d'effondrement comblée par des dépôts miocènes (argiles et marnes à gypse) et quaternaires (alluvions hétérogènes sous forme de terrasses). Ces alluvions sont perméables et sont alimentés par les eaux d'infiltrations des pluies et les apports latéraux du bassin versant de l'oued Seybouse. Elle est constituée de trois terrasses distinctes (basses, moyennes et hautes) (fig. 19 et 20).

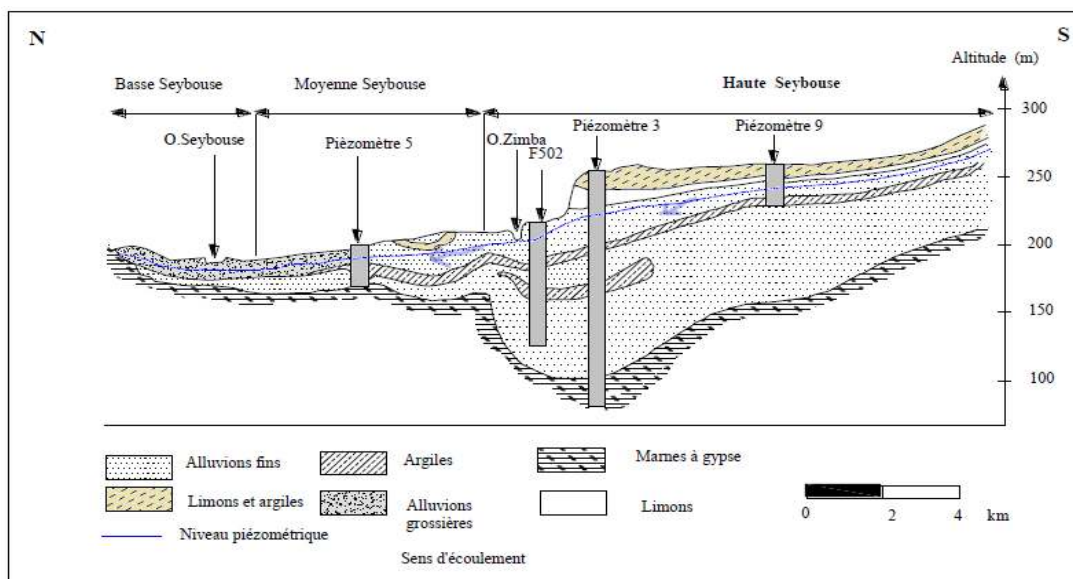


Fig.19. Coupe hydrogéologique dans la plaine de Guelma NS (d'après B.Gaud, 1976).

A partir de la coupe (fig.19) localisée à l'Est de la ville de Belkhir d'orientation Nord- Sud, nous pouvons localiser la nappe de la haute terrasse et faire les constatations suivantes :

- La basse terrasse formée de cailloutis et de sables d'une épaisseur d'environ 30 m. C'est une superposition des alluvions grossières et des alluvions fines.
- La moyenne terrasse est formée par des sables fins d'une épaisseur de 25 à 35 m avec la présence d'une intercalation d'une couche argileuse de 8 m.
- Les hautes terrasses sont constituées par les dépôts Plio-Quaternaires grossiers d'une épaisseur de 100 m jusqu'à 110 m et qui sont formés de cailloutis et de graviers avec des petites lentilles d'argiles de faible épaisseur.
- Le substratum Miocène Marneux et présente un sous bassement au centre de la plaine.

Une autre coupe (fig.20) de la même orientation N-S mais qui est dressée dans la partie Ouest de la ville de Belkhir, nous a permis de mettre en évidence le contact direct par le biais d'une faille entre les travertins au sud de la ville de Guelma et les alluvions de la haute terrasse.

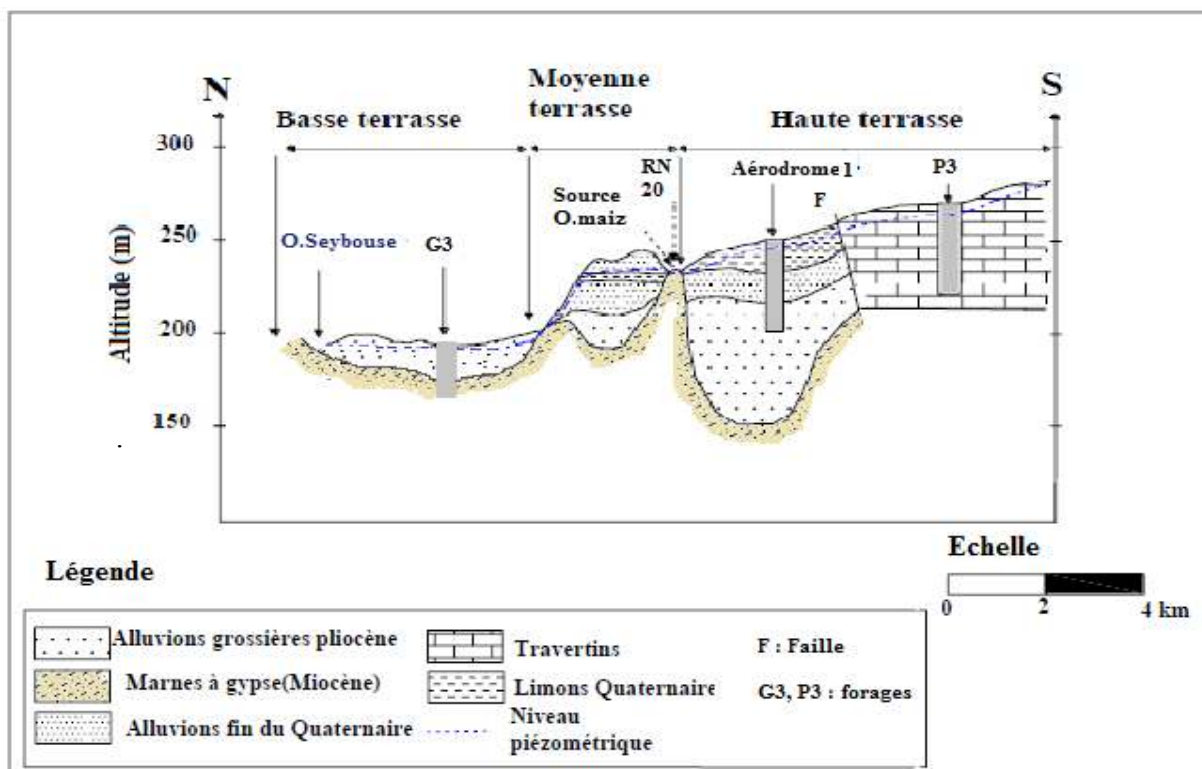


Fig.20. Coupe hydrogéologique dans la plaine de Guelma WE (d'après B.Gaud, 1976).

Ainsi, à partir de cette coupe nous pouvons constater du Nord au Sud :

- La basse terrasse qui forme la nappe actuelle de la Seybouse. Elle est constituée par des alluvions grossières d'une épaisseur moyenne de l'ordre de 20 m reposant sur un substratum marneux à gypse;
- La moyenne terrasse est constituée d'un matériel relativement fin en alternance avec des passées argileuses d'une épaisseur plus au moins importantes d'environ 40 m et repose sur un substratum marneux à gypse
- La haute terrasse a une épaisseur plus importante (environ 100 m), grâce à un remplissage alluvionnaire, composé essentiellement de sables, graviers et de cailloutis avec de petites intercalations argileuses.
- La forme du substratum marneux témoigne de l'ancien lit de la Seybouse qui a été positionné plus au Sud que son parcours actuel. L'affleurement des marnes à gypse du Miocène forme un seuil qui sépare les nappes aquifères des vallées ancienne et actuelle.
- La partie sud est occupée par les calcaires travertineux du Pliocène qui sont en contact direct avec les alluvions des hautes terrasses. D'après la colonne stratigraphique du piézomètre P3, il s'agit de tufs vacuolaires ou spongieux, de calcaires blancs crayeux fissurés avec de nombreuses recristallisations de calcite.

II.2. La nappe de Hammam Bradâa

Les calcaires Néritiques forment le Djebel Debagh (Sud-Est de Guelma). Ils se prolongent en profondeur vers le Nord-Est pour réapparaître sous forme de fenêtre au niveau de Hammam Ouled Ali et Hammam Bradâa.

D'après la coupe hydrogéologique d'orientation Est-Ouest (fig 21), les formations carbonatées dans la région de Hammam Ouled Ali sont représentées par quelques dizaines de mètres du calcaire sénonien supérieur, calcaire biodétrique ou micritique analogue à celui de Douar Bouzitoune (Héliopolis). Ces formations plongent en profondeur vers l'Est, sous les nappes de charriage pour réapparaître d'abord dans la région de Bouzitoune, puis en petite fenêtre près de la source romaine. Elles sont exploitées par un seul forage de 173 m de profondeur avec un débit de 20 l/s, alimentant le village (Bichiri, 2011) La réalisation du forage de El Fedjoudj a permis de superposer la continuité de cette formation depuis Djebel Debagh jusqu'à Hammam Bradaa.

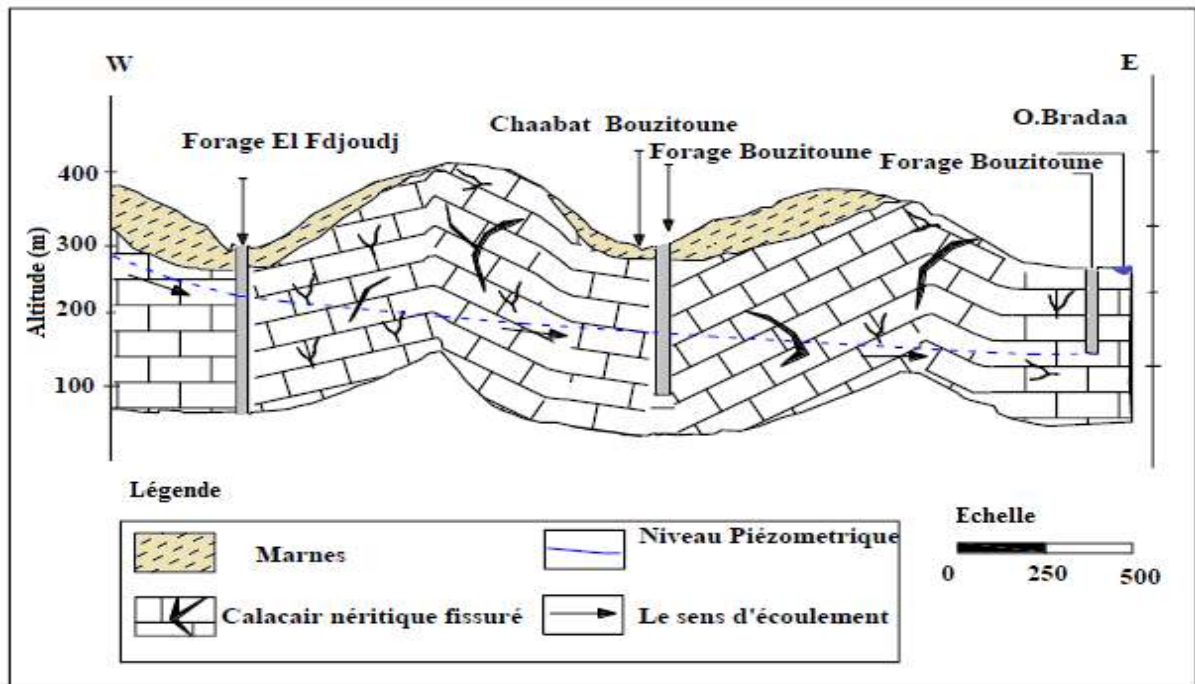


Fig.21. Coupe hydrogéologique Est-Ouest (nappe Hammam Bradâa).

(D'après Brahmia, 2009)

III. Etude piézométrique

L'étude piézométrique joue un rôle essentiel dans la connaissance des conditions des écoulements souterrains et dans la détermination de plusieurs paramètres tel que le gradient hydraulique la vitesse et le sens d'écoulement les conditions aux limites...

Dans notre étude nous nous sommes basés sur les cartes piézométriques établies dans des travaux précédents (Hani, 2003, Kherici, 1993, ...) et nous avons essayé de les interpréter.

III.1. La nappe du cordon dunaire

La carte piézométrique obtenue en période des hautes eaux (Avril 2003) permis de constater que dans la partie Nord-est les courbes sont serrées traduisant un gradient hydraulique fort 3.10^{-3} et un écoulement rapide, les lignes de courant sont dirigées vers l'oued Mafragh (fig22).

Dans la partie centrale les courbes sont concentriques se qui peut être expliqué par une zone d'alimentation de cette nappe.

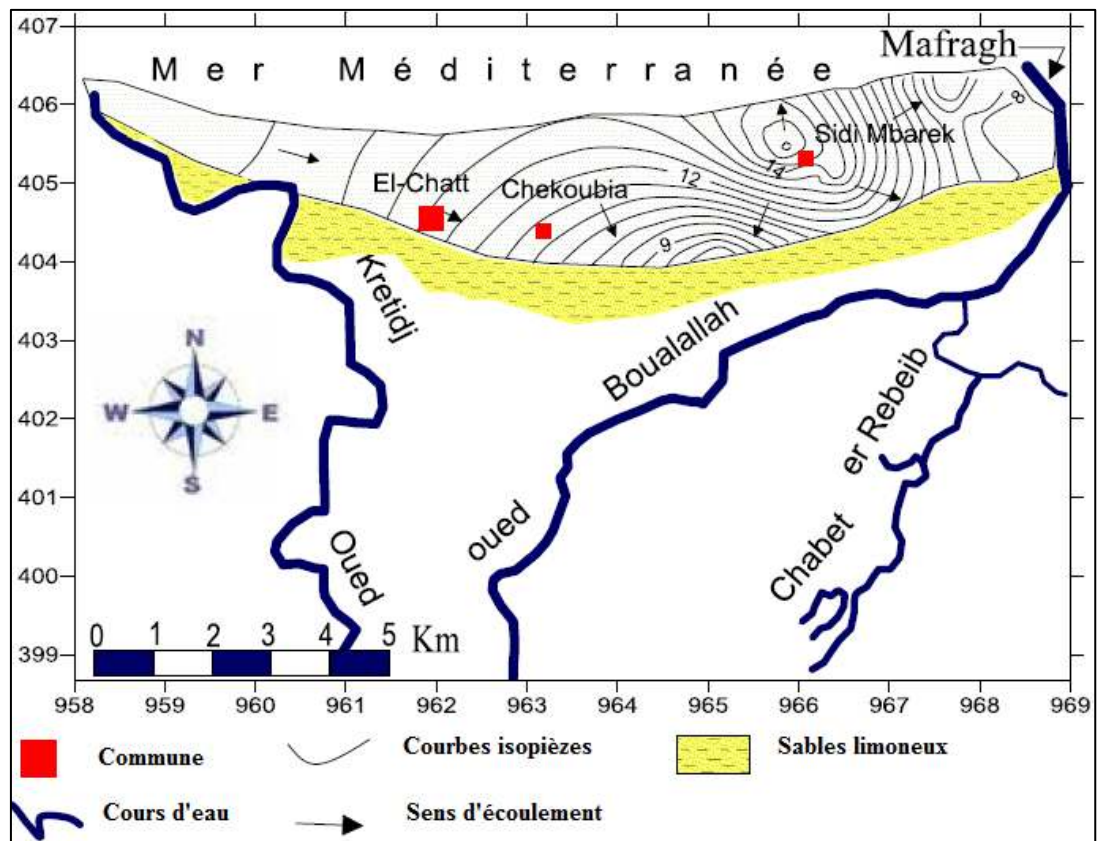


Fig.22. Carte piézométrique de la nappe du cordon dunaire Chatt
(Avril 2003, Boumaiza, 2003)

III. 2. La nappe profonde ou de graviers d’Annaba

Le sens d’écoulement dans cette nappe est Sud-Nord marquant une dépression piézométrique autour du champ de captage des Salines (fig. 23) ou l’exploitation est intense. L’alimentation principale de la nappe s’effectue à partir des précipitations et ensuite par l’écoulement superficiel du réseau hydrographique du bassin versant sans négliger des apports de moindre importance à partir des des matériaux limitrophes (Hani, 2003).

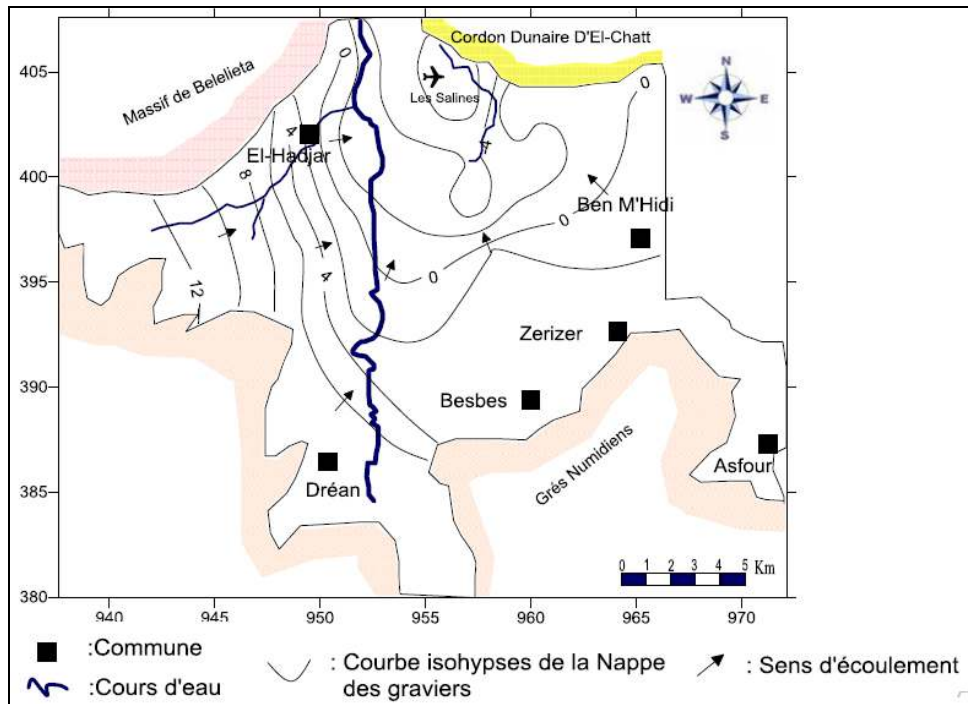


Fig.23. Carte piézométrique de la nappe de graviers d'Annaba
(octobre 1996, Hani, 2003)

III.3. La nappe superficielle de la plaine d'Annaba et de Boucheouf

L'examen de la carte piézométrique établie en juillet 2007 par Khadri. S (fig.24), montre une surface piézométrique assez régulière avec un espacement des courbes en même direction que l'écoulement SW-NE.

Globalement, les courbes convergent vers l'oued Seybouse traduisant ainsi une alimentation de ce dernier par la nappe sauf dans la zone de confluence de oued Meboudja avec la Seybouse où on constate une certaine divergence des courbes.

Les courbes sont serrées dans la partie amont de la région traduisant un fort gradient hydraulique ($1.6 \cdot 10^{-2}$), il marque un écoulement rapide dû à la pente et une perméabilité faible. Vers la partie aval de la région, les courbes sont plus espacées avec un gradient hydraulique faible de ($3.5 \cdot 10^{-3}$) ce qui indique une forte perméabilité et écoulement lent.

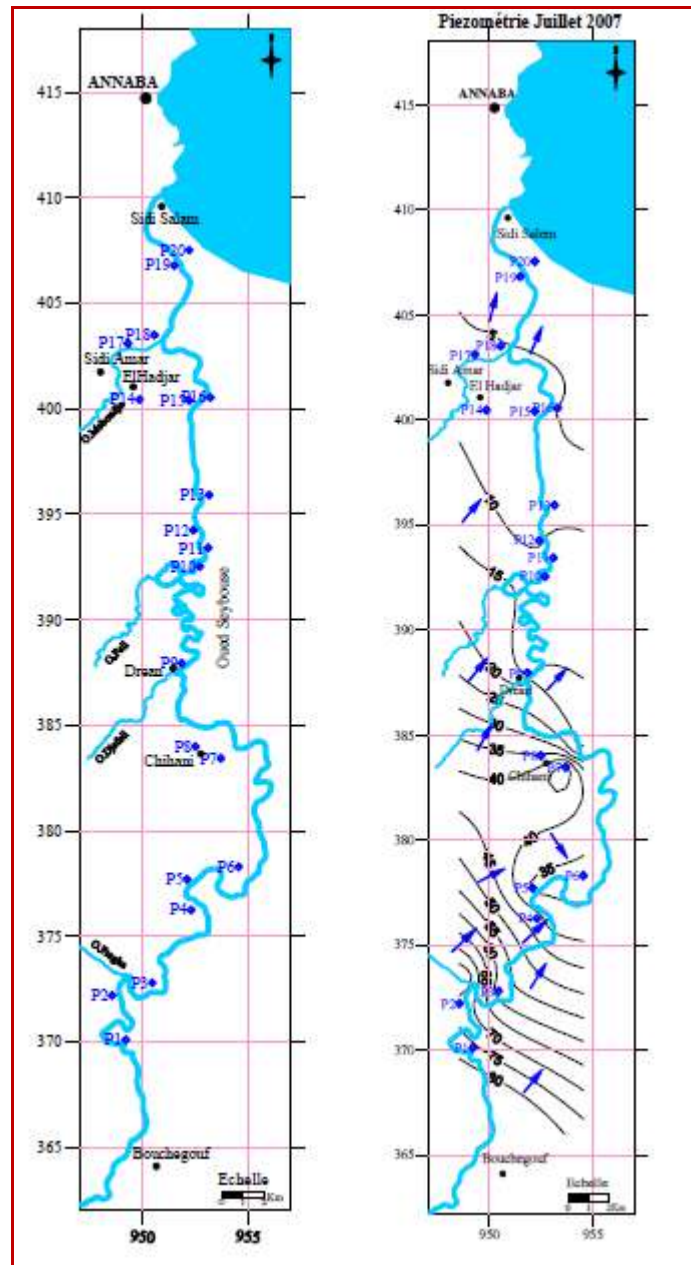


Fig.24. Carte piézométrique de la nappe superficielle de la plaine d'Annaba et de Bouchegouf (Juillet 2007, Khadri, 2009)

III.4. La nappe des alluvions de Guelma

La carte piézométrique établie par Mouchara.N, 2009, dans la période des basses eaux (septembre 2007) (fig.25), montre globalement un écoulement qui suit la direction du Sud vers le Nord et des isopièzes qui se resserrent parallèlement dans la partie Sud-ouest de la ville de Guelma (zone des travertins) traduisant un gradient hydraulique important de l'ordre 0.06.

IV. Conclusion

L'étude hydrogéologique est un outil de base pour la détermination des caractéristiques des nappes et des aquifères.

- Dans la basse Seybouse on distingue 3 principales nappes; la nappe superficielle contenue dans les argiles sableuses, la nappe des graviers et la nappe des sables du massif dunaire de Bouteldja qui constitue la bordure Est du système. Ces trois nappes se trouvent fortement sollicitées face à l'augmentation démographique et le progrès agricole et industriel dans la région.

La cartographie piézométrique et l'étude de l'évolution du niveau piézométrique permettent de définir le sens de l'écoulement souterrain qui converge dans la globalité de la région vers l'oued Seybouse mettant ainsi en évidence la relation qui existe entre l'oued et la nappe, on note que dans la zone de confluence avec la Meboudja c'est l'oued qui semble alimenter la nappe.

- Dans la moyenne Seybouse on distingue deux nappes ; La nappe alluviale de Guelma et la nappe de Hammam Bradaa.

La carte piézométrique montre des isopièzes serrés dans partie amont et plus espacées dans la partie aval avec un écoulement vers l'oued Seybouse et de direction Sud-Nord.

L'intrusion marine dans la nappe côtière de la plaine d'Annaba

V. Introduction

Les eaux souterraines connaissent une dégradation de leur qualité en relation avec l'augmentation de la demande suite à l'accroissement démographique rapide, l'urbanisation accélérée, la diversification des activités économiques et agricoles et l'amélioration du niveau de vie des citoyens. Cette dégradation est généralement exprimée par la pollution des eaux et leur salinisation en cas d'un aquifère côtier.

L'exploitation d'un aquifère côtier, en général délicate, se heurte à un problème de quantité et de qualité. En effet, les changements climatiques accompagnés de sécheresses prolongées peuvent être à l'origine de la rupture de l'interface eau douce-eau salée entraînant l'avancée du biseau salé. Ainsi, une forte exploitation entraîne une inversion du gradient hydraulique et par conséquent une augmentation de la salinité. Ceci se traduit par une évolution spatio-temporelle de la piézométrie et de la qualité chimique des eaux de ces nappes.

La dégradation de la qualité des eaux souterraines en zones côtières devient un sujet inquiétant, résultant de multiples actions naturelles et anthropiques (Nadjib, 2015). La salinisation par l'intrusion marine constitue l'une des principales causes de cette dégradation dans le domaine côtier Algérien (Bouderbala, 2015).

L'aquifère côtier de la zone étudiée de la plaine d'Annaba est un exemple des aquifères les plus exploités dans la région par des pompes intensives destinées à l'alimentation en AEP et de l'industrie, ce qui s'est répercuté négativement sur sa qualité. Ce travail est consacré à l'étude de l'évolution de l'intrusion marine dans cette région où les nappes sont devenues vulnérables à la contamination par les sels et dont les aquifères sont en contact direct avec la Méditerranée.

VI. l'évolution de l'intrusion marine

II.1. Facteurs déterminants dans l'évolution de l'intrusion marine

Ce phénomène se traduit par l'avancée de l'interface eau douce- eau salé vers la nappe côtière. Son ampleur et son extension dépend de plusieurs facteurs (hydrodynamiques, géométriques, exploitation et débit de la nappe,...).

a) Profondeur de la nappe

Les nappes d'eaux souterraines dans les zones côtières circulent à des profondeurs généralement faibles, et qui diminuent au fur et à mesure qu'on se rapproche de la côte

marine. Ce qui fait de ces secteurs, des zones considérées à priori comme les plus vulnérables au phénomène de l'intrusion marine.

b) Débit de la nappe

Avec les activités agricoles et les investissements réalisés dans les régions côtières, la demande en eau pour l'irrigation et pour l'alimentation augmente. Toute exploitation intense de la nappe côtière par creusements anarchiques des puits, va entraîner un déséquilibre hydrodynamique de l'interface «eau douce-eau salée marine». Cela se traduit par une diminution des débits souterrains et un abaissement du niveau de la nappe. Celui-ci va devenir inférieur à celui de la mer, ce qui va provoquer un écoulement des eaux marines vers l'aquifère côtier.

Ainsi, les aspects liés à l'exploitation d'un aquifère en zone côtière peuvent être énumérés comme suit (Younsi, 2001) : baisse du niveau de la nappe, pénétration du biseau salée vers les terres, salinisation des eaux de la nappe côtière à cause de cette pénétration (principalement dans les deux premiers kilomètres du rivage), abandon des puits à cause des fortes salinités des eaux,...

Par ailleurs, les nappes d'eau souterraine côtières sont alimentées principalement par l'infiltration et la percolation des eaux de pluies efficaces. Le taux d'infiltration efficace conditionne l'évolution piézométrique et par conséquent l'évolution de la qualité des eaux souterraines. En effet, une importante infiltration efficace va favoriser une surélévation du niveau de la nappe et une augmentation de son débit, ce qui va permettre de chasser le biseau basé et empêcher son avancée vers le continent.

c) Perméabilité

L'intensité de la pollution des eaux souterraines (transport, vitesse de propagation des solutés,...) dépend essentiellement de la perméabilité des terrains aquifères. Dans les terrains à perméabilité d'interstice tels que les sables, la pollution ne se transmet qu'à une très faible vitesse, surtout s'il y a des particules argileuses. Dans les terrains à perméabilité de fissures (terrains cristallins et carbonatés), la vitesse de propagation des solutés est relativement plus rapide, elle est proportionnelle au degré de fissuration. Par contre, dans les terrains karstiques, la pénétration est rapide et souvent instantanée.

d) Géométrie de l'aquifère et topographie du substratum

L'étalement du biseau salé à l'intérieur de la plaine côtière est régi par la topographie du substratum. En règle générale, plus ce dernier est incliné vers la mer, plus il y aurait une avancée rapide des eaux de mer vers l'aquifère côtier.

II.2. Rôle des facteurs hydrodynamiques et de l'exploitation

Une zone d'interface se forme entre l'eau douce plus légère s'écoulant vers la mer et l'eau de mer sous-jacente plus lourde. Cette interface n'est pas statique et, notamment en cas de surexploitation de l'aquifère. On parle alors d'intrusion marine ; les deux milieux vont ainsi s'affronter selon des règles simples en théorie, mais complexes dans la réalité. Si bien que souvent l'impact d'une invasion d'eau salée dans un aquifère littoral peut se révéler irréversible.

Déterminer la forme ainsi que la position de la zone de contact entre l'eau douce et l'eau de mer a motivé de nombreuses recherches depuis plus d'un siècle. Les premiers travaux sur les aquifères littoraux poreux ont été réalisés à la fin du XIX siècle par Ghyben (1889) et Herzberg (1901) sur la base du principe des équilibres hydrostatiques. Dans un aquifère poreux à l'équilibre, les deux milieux se mélangent très peu. En effet l'eau douce, moins dense ($\rho_f=1000\text{g/l}$) flotte sur l'eau de mer ($\rho_s=1025\text{g/l}$) avec un contact incliné assimilé à une surface courbe (fig.26).

Conformément à l'illustration ci-dessus, la loi de Ghyben-Herzberg définit la position du contact entre les deux milieux à l'équilibre par l'équation suivante :

$$\rho_f.(h_2+h_1)= \rho_s.h_2,$$

soit approximativement $h_2=40.h_1,$

avec :

h_2 : la profondeur de l'interface, .

h_1 : la charge hydraulique (ou niveau piézométrique) par rapport au niveau de base,

ρ_f : densité de l'eau douce

ρ_s : densité de l'eau de mer.

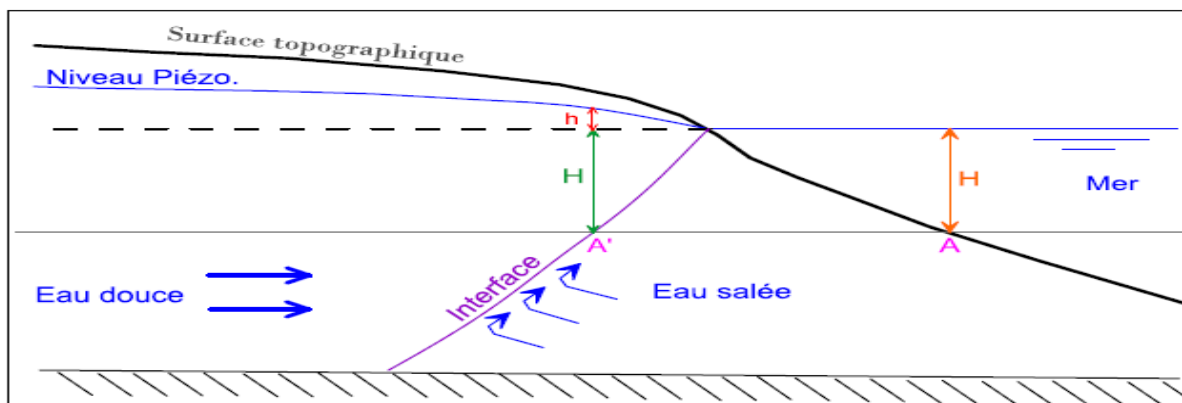


Fig.26. Schéma hydrodynamique d'un aquifère côtier à nappe libre selon la relation de Ghyben-Herzberg.

En première approximation, l'interface entre l'eau douce et l'eau de mer peut être assimilée à une limite franche. Cette approximation correspond au cas de deux fluides non miscibles, de densités différentes, en équilibre hydrostatique. L'eau de mer immobile et l'aquifère est supposé homogène avec une répartition hydrostatique des pressions. On considère plus fréquemment un équilibre dynamique, en régime permanent, où la composante verticale de l'écoulement dans l'aquifère est négligeable (hypothèse de Dupuit).

La profondeur de l'interface est déterminée en résolvant l'équation d'équilibre entre les charges de deux fluides de densité différente (cas analogue à un tube en U comme sur la figure 27). La profondeur de l'interface est alors proportionnelle à la piézométrie ; la référence étant le niveau moyen local de la mer.

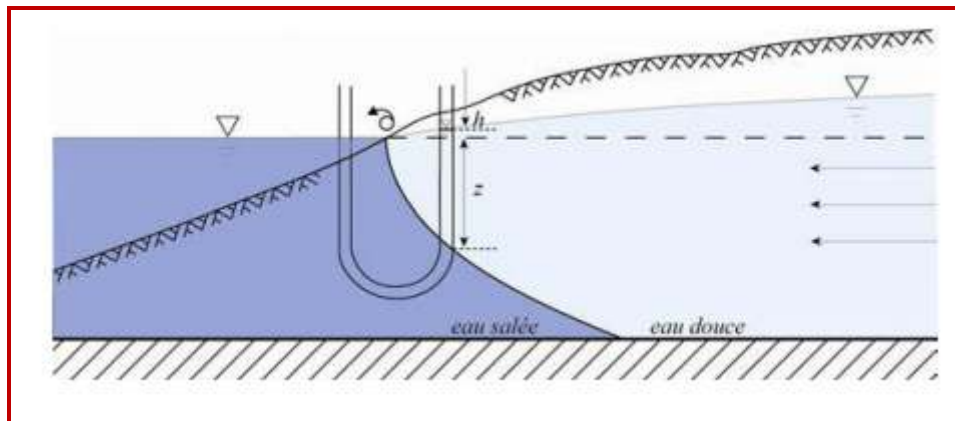


Fig.27. Position de l'interface et détermination de la profondeur de l'interface selon le modèle de Ghyben-Herzberg (Custodio, 2002, modifiée par De Montety, 2008).

L'équilibre hydrostatique est rompu lorsqu'un changement de poids intervient sur l'une des deux colonnes, généralement lié à la variation d'épaisseur des couches d'eau. Dans le cas où l'aquifère se recharge suffisamment, la nappe d'eau s'épaissit, devient plus lourde et la position de l'interface migre en profondeur. L'eau douce s'écoule alors vers la mer. Dans le cas contraire, la couche d'eau douce s'amincit, devient plus légère, la position de l'interface remonte et l'eau salée s'introduit dans l'aquifère. On observe alors une avancée du biseau salé. La couche d'eau saumâtre envahit l'aquifère. La géométrie réelle des interfaces eau douce-eau salée est généralement bien plus complexe que celle décrite par la loi de Ghyben-Herzberg étant donnée l'imbrication de strates de perméabilité différente dans des nombreux aquifères côtiers, notamment dans un milieu deltaïque (Custodio, 2010) et dans les milieux hétérogènes karstiques. La distribution souvent complexe des zones à forte et à faible salinité

reflète l'historique des transgressions-régressions antérieures qui ont pu laisser des lentilles d'eaux salées ou douces dans certaines parties de l'aquifère (Montety, 2008).

Un scénario d'intrusion marine peut être observé dans les conditions naturelles, notamment en cas de sécheresse et d'abaissement saisonnier des charges hydrauliques. Il devient cependant, de plus en plus fréquent en zone côtières surpeuplées. La surexploitation modifie les charges hydrauliques et entraîne l'établissement d'un nouvel équilibre et la migration du biseau salé. La surconsommation de la ressource par un pompage excessif pour subvenir aux besoins des activités humaines (irrigation intensive, industrie, consommation domestique...) entraîne le rabattement de la nappe. Ce prélèvement provoque une remontée verticale du biseau salé sous le forage, qui peut donc atteindre 40 fois la valeur de rabattement observé. Cette arrivée indésirable d'eau salée détériore de façon quasi-irréversible la qualité de la ressource.

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.

Il existe d'autres formulations pour étudier les phénomènes d'intrusion marine. On peut citer par exemple celle de Todd (1980) qui dérive de la loi de Darcy et s'écrit sous la forme :

$$Q = 0,5 \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right) K \frac{b}{L}$$

Où Q est le débit d'eau douce s'écoulant vers la mer (m³/s) ;

K est la perméabilité de l'aquifère côtier (m/s) ;

b l'épaisseur saturée de la nappe libre (m) ;

L est la longueur de l'intrusion marine dans l'aquifère côtier.

En d'autres termes, cette équation montre que la longueur de la pénétration du biseau salé vers les terres dépend fortement de la perméabilité des terrains aquifères en contact direct avec la mer et de la puissance de la zone saturée en eau. Elle est par contre inversement proportionnelle au débit de l'écoulement souterrain vers la mer.

Il en ressort que la longueur de l'invasion marine vers l'aquifère côtier est importante dans le cas où le débit de la nappe est faible et quand la perméabilité du secteur littoral est élevée.

Par contre, dans le cas d'un aquifère peu perméable avec un débit d'écoulement souterrain élevé c'est-à-dire avec des gradients hydrauliques importants ou une grande épaisseur saturée, la pénétration des eaux salées vers le continent est faible voire peu significative.

Les équations précédentes ont montré que la longueur de l'intrusion marine dépend du débit d'écoulement souterrain. En effet, toute exploitation intensive en zone littorale au-dessus des réserves souterraines, diminue le débit de la nappe vers la mer qui constitue son exutoire et provoque un déplacement de la zone de transition eau douce-eau marine vers l'intérieur des terres.

D'une manière générale, le débit d'exploitation d'un aquifère côtier doit être compatible avec le taux d'alimentation de la nappe.

Une remontée de la zone de transition peut apparaître même si la nappe n'est pas régionalement surexploitée. Ils s'agit d'une remontée locale de l'interface entre les deux liquides sous les puits de sorte que l'eau salée atteint les crépines des ouvrages : phénomène connu sous le nom « d'upconing » (Bear *et al.*, 1968, Bear et al, 2001). Il en découle une pollution importante des eaux pompées par les sels marins.

III. Mise en évidence des intrusions marines vers les aquifères étudiés

VII. 1. Méthodologie

Plusieurs auteurs dont (Kafri and Arad, 1979 ; Lebbe *et al.*, 1989 ; Spechler, 1994 ; El Achheb *et al.*, 2003 ; Demirel, 2004 ; Gemail *et al.*, 2004 ; Grassi and Cortecci, 2004 ; Pulido – Le Boeuf, 2004 ; Trabelsi *et al.*, 2005 ; Wilson *et al.*, 2006) ont étudié le phénomène de l'invasion marine et ont contribué par leurs travaux à mettre en évidence le mécanisme et à localiser l'interface eau douce/ eau marine par des méthodes analytiques, géophysiques et de modélisation. D'autre part, des chercheurs comme Hudak, 2000, Martos *et al.*, 2001, Allen and Suchy, 2001, Pulido-Le Boeuf *et al.*, 2003, Farber et al. 2004, Grassi and Cortecci, 2004 ont étudié ce phénomène du point de vu chimique et ont pu définir les réactions chimiques qui caractérisent régissent la minéralisation des eaux souterraines en éléments chimiques.

La mise en évidence de ce phénomène dans l'aquifère côtier d'Annaba, repose sur l'étude des facteurs hydrodynamiques et des propriétés géochimiques des eaux.

III.2. Les facteurs hydrodynamiques

Le problème de l'invasion marine est d'une grande importance dans le bassin versant de la Seybouse notamment la partie Nord de la plaine d'Annaba où les aquifères sont en contact direct avec la mer.

Les facteurs hydrodynamiques qui caractérisent les aquifères côtiers favorisent et augmentent le processus (Chen et al, 1997). En effet :

- Les caractéristiques géométriques et le pendage des graviers montrent que l'aquifère déboucherait en mer à quelques kilomètres de la côte (fig.28);

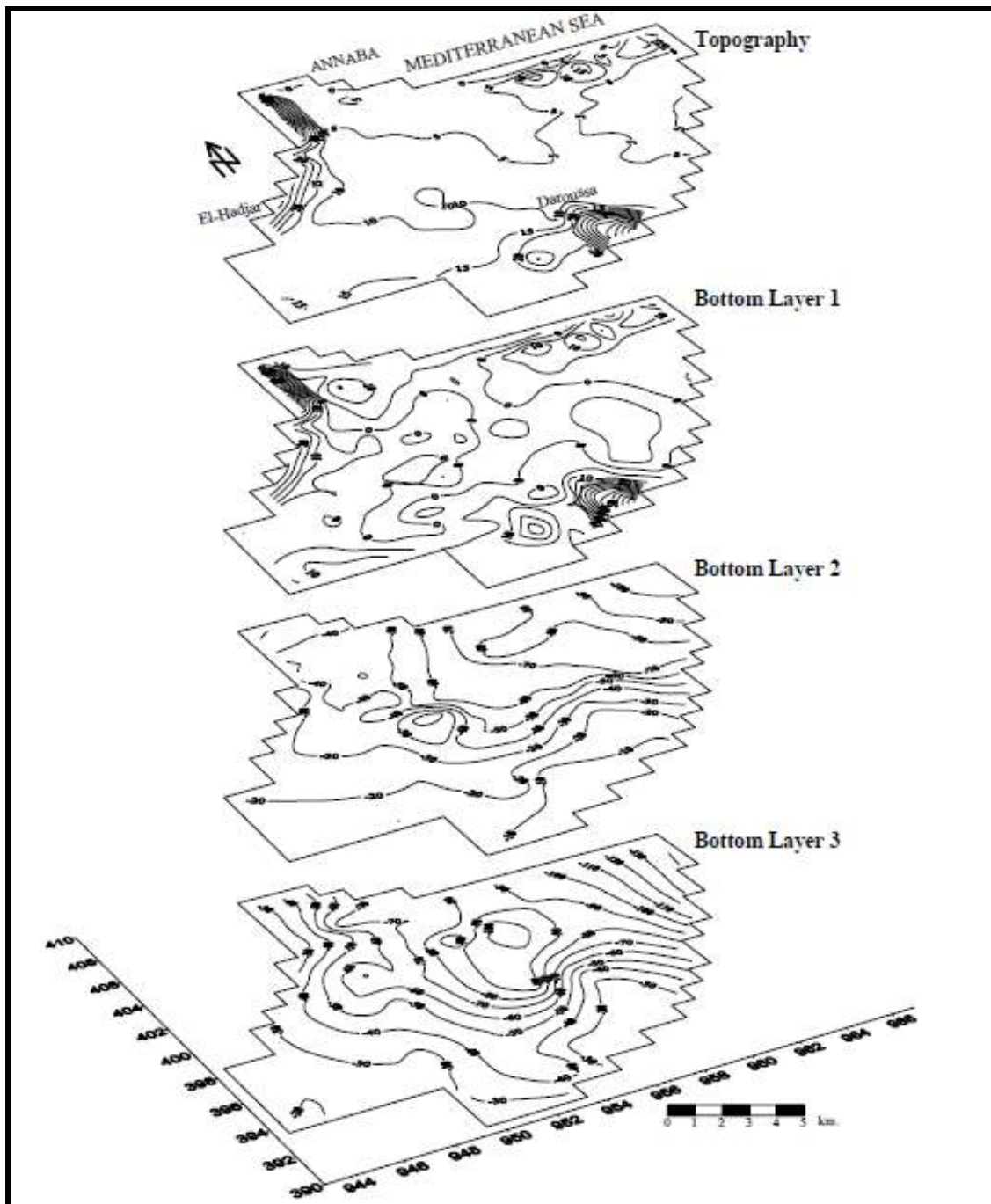


Fig.28. Géométrie des graviers dans le système aquifère d'Annaba (Hani, 2003).

- L'épaisseur de la nappe des graviers et galets varie selon l'axe de la fosse de Ben-Ahmed de quelques mètres en bordure ouest du système, à près de 25 m au Nord, et elle diminue à moins de 10 m sur l'élévation de Daroussa. D'autre part, un autre

niveau à éléments grossiers, de près de 8 m d'épaisseur, a été localisé à une profondeur de 35 à 40 entre la butte de Boukhadra et El-Khous, (Djabri *et al*, 2000) ;

- Tout le long de la Seybouse, Les valeurs de la perméabilité de cette nappe sont les plus élevées ;
- Les gradients hydrauliques sont faibles ;
- La sollicitation de la nappe et les pompages excessifs au niveau des champs de captage des Salines et d'Allélick provoquent un abaissement jusqu'à -8 m des niveaux piézométriques provoquant ainsi une extension permanente vers les terres de l'isopièze de côte 0.

III.3. Etude hydrochimique

Plusieurs diagrammes peuvent être utilisés en hydrochimie pour la mise en évidence de l'intrusion marine qui en absence d'équilibre entre l'aquifère et le mélange d'eau est accompagné par un changement des caractéristiques chimiques de ce mélange.

En effet, ce changement est du aux carbonates et aux argiles qui permettent la dissolution et la précipitation de quelques minéraux ainsi que l'échange cationique qui agit contrairement aux changements provoqués par l'intrusion marine. En plus de ces processus la réduction des sulfates, est l'un des facteurs modifiant l'hydrochimie des eaux salinisées par l'intrusion des eaux de mer (Petelas and Diamantis, 1999).

d) Diagramme de Piper

Le diagramme de piper utilisé souvent pour caractériser le faciès chimique d'un ensemble d'échantillons, peut être également utilisé pour détecter l'invasion marine dans les nappes côtières. La figure 29 montre que la totalité des échantillons sont riche en chlorures, la répartition des anions montre une domination du sodium accompagné du potassium. On peut noter qu'un grand nombre d'échantillons sont riches en calcium et potassium. Les eaux étudiées montrent un faciès chimique chloruré sodique.

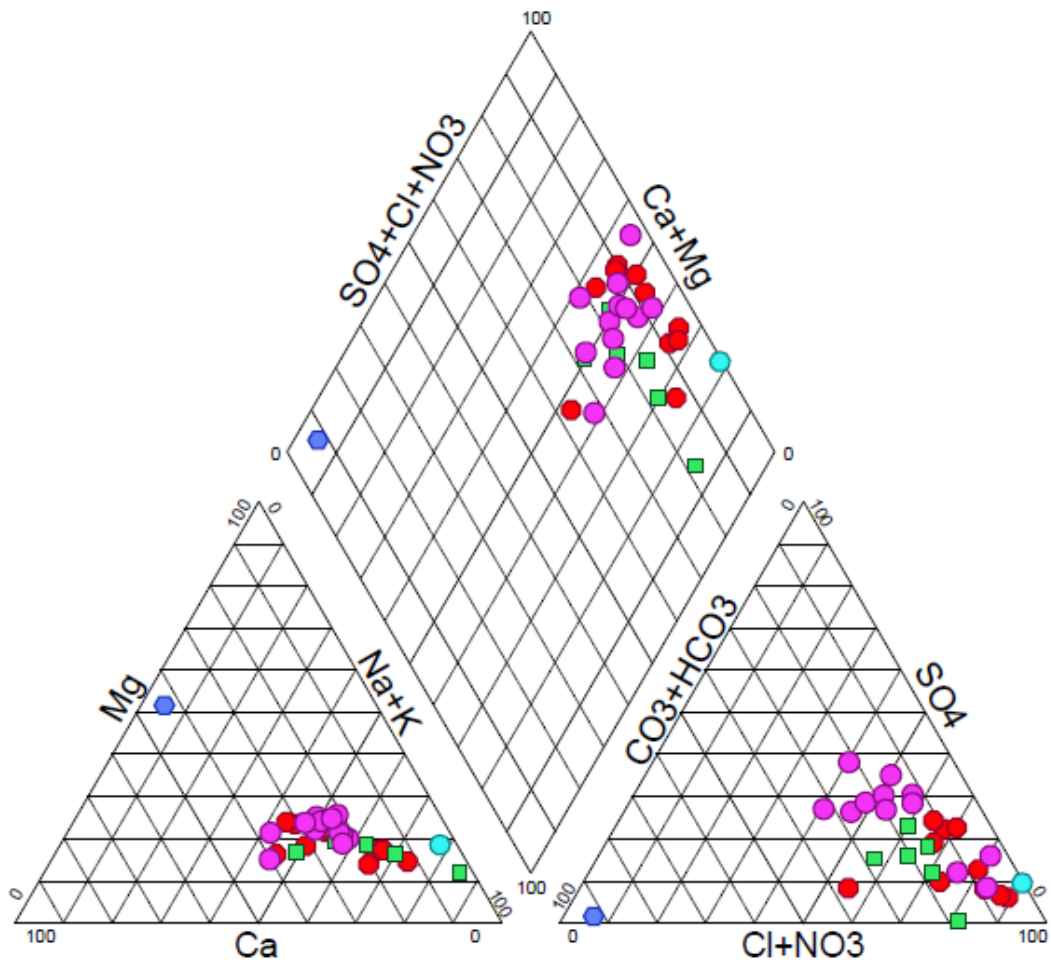


Fig.29. Représentation des résultats d'analyse des échantillons d'eau dans le diagramme de Piper (Aoun-Sebaiti, 2010)

e) Diagrammes Stiff

La représentation des échantillons dans le diagramme de Stiff, nous donne une forme géométrique de polygone selon la teneur des éléments chimiques considérés. En se basant sur la forme géométrique du polygone nous pouvant distinguer entre les différentes familles chimiques des échantillons (fig. 30 et 31).

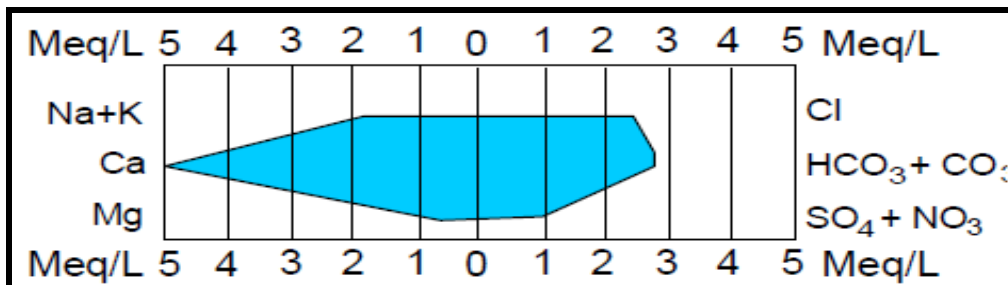


Fig.30. Diagramme de Stiff de l'eau douce

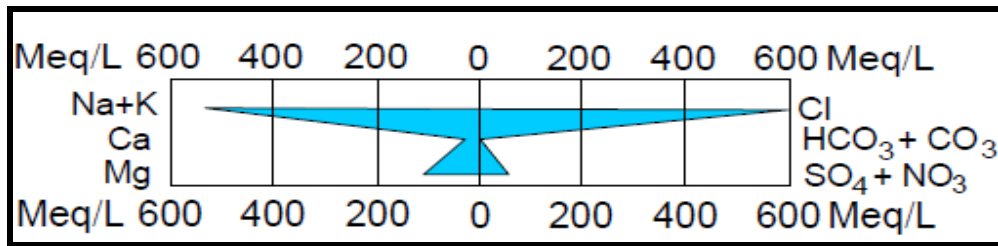


Fig.31. Diagramme de Stiff de l'eau de mer

En effet, les trois axes du diagramme de Stiff sont respectivement, de haut en bas, Na-Cl, Ca-HCO₃, Mg-SO₄ (fig.32) nous permettent de constater que les eaux de la nappe sont regroupées en trois groupes chimiques homogènes :

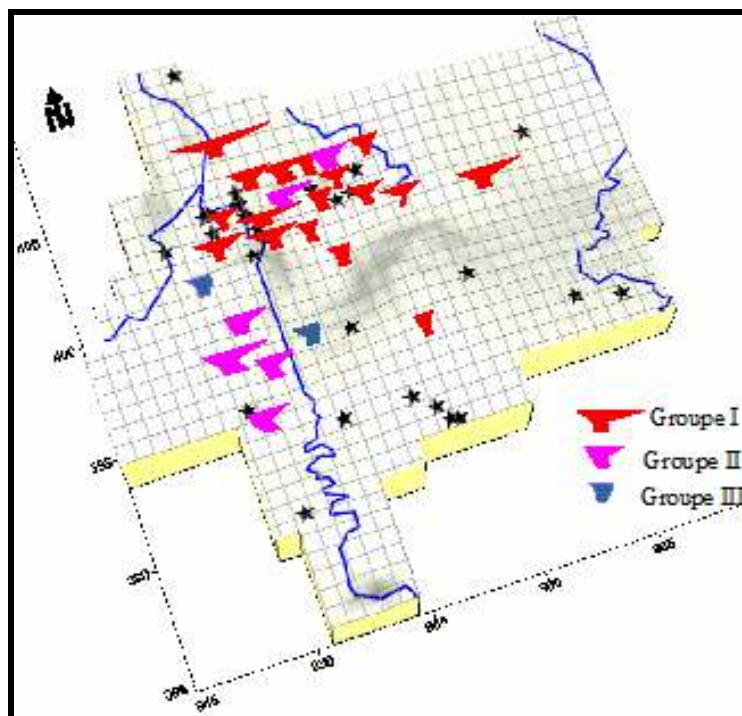


Fig.32. Représentation par les diagrammes de Stiff des eaux de l'aquifère d'Annaba (Nappe des graviers) (In Aichouri, 2016)

Dans le groupe I, près de 70% de l'efficacité total, présente les eaux côtières des salines et Sidi Salem et même les régions d'El Hadjar et de Ben M'hidi. Les eaux du secteur Sud de la plaine sont présentés près de 19% du total, les eaux les moins minéralisées sont regroupées dans le groupe III, sont présentés 11% de l'efficacité.

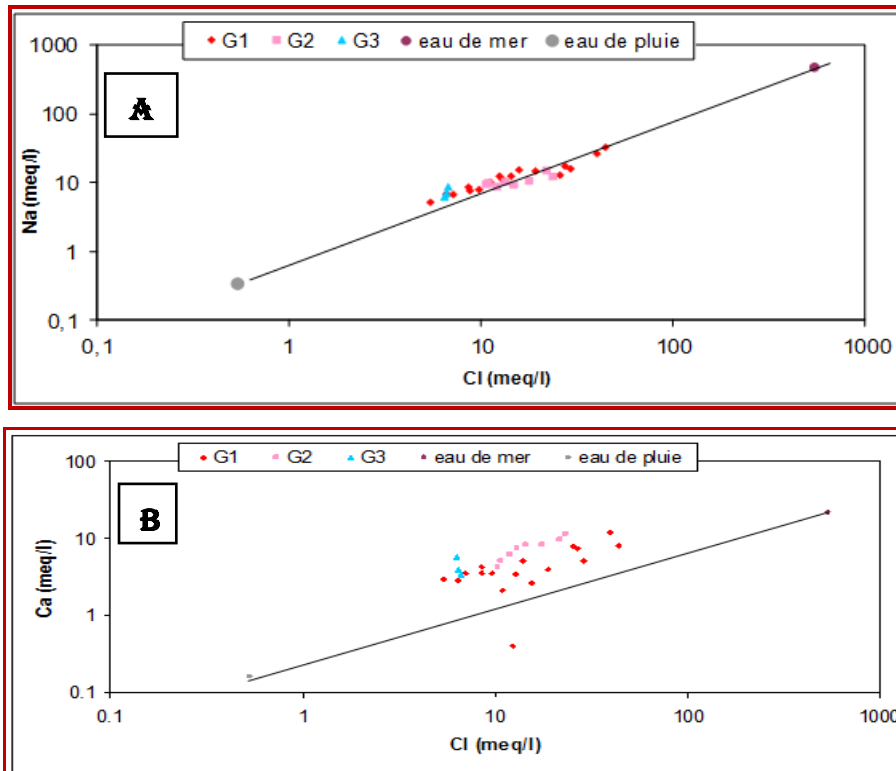
La répartition spatiale des groupes du diagramme de Stiff, nous donne une idée sur l'origine de la salinité des eaux de la nappe.

c. Diagrammes croisés des concentrations

Les diagrammes croisés des concentrations des éléments majeurs avec l'ion du chlore sont le deuxième moyen utilisés dans cette étude pour déceler l'invasion marine. Selon Tellam,

1995 ; le chlore est un élément conservé et ne participe pas aux interactions eau-roche, donc il caractérise l'origine de la salinité des eaux constituant un traceur du mélange.

La disposition des différents points par rapport à la ligne de mélange eau douce-eau salée peut être de grande utilité pour identifier d'autres phénomènes qui sont annexés au processus de mélange (fig.33).



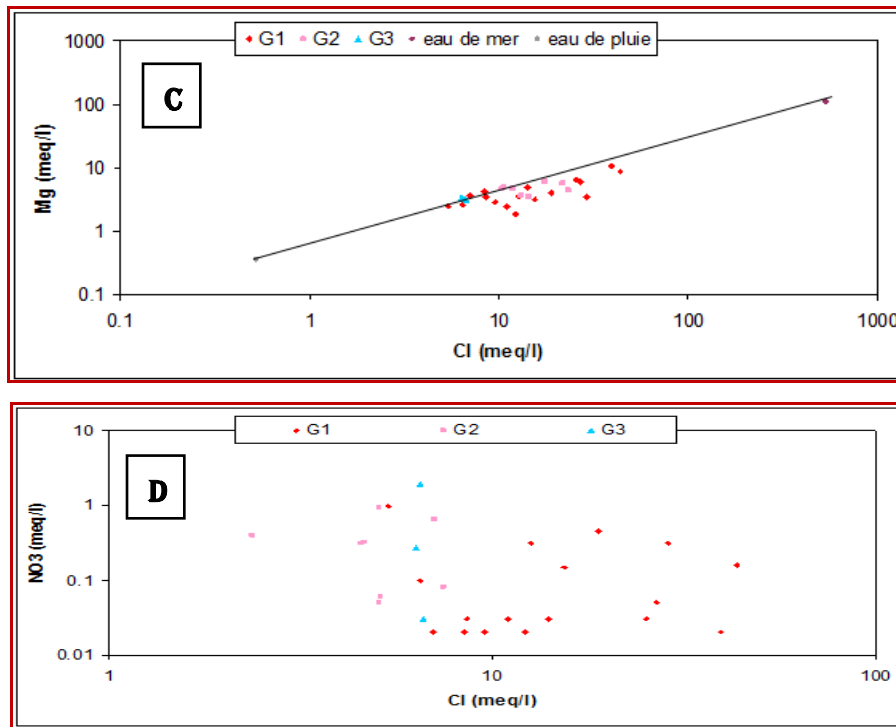


Fig.33. Relation entre : Na- Cl/ Ca- Cl / Mg- Cl / NO₃- Cl / SO₄- Cl des eaux souterraines et de l'eau de mer. (In Aichouri, 2016)

Selon la figure (33 A) représentant le diagramme Na-Cl, on peut observer que les points des groupes I et II se répartissent sur et au dessous de la droite de mélange des eaux de mer-eaux douces. Les points qui se localisent sur la droite montrent la présence du processus de mélange eau douce eau salée sans réactions d'échanges ioniques (Kouzana *et al*, 2007).

Les points qui se localisent au dessous de la droite de mélange montrent un appauvrissement en sodium (El Achheb *et al*, 2003). Ceci peut être expliqué par des réactions d'échange cationique et que la teneur en sodium devrait équilibrer la teneur en chlorure.

La figure (33B) indique un accroissement en calcium par rapport à la droite de mélange eau de mer – eau de pluie. On peut constater que le groupe I présente le minimum d'accroissement ou d'enrichissement en calcium, par contre les groupes II et III présentent le maximum.

Concernant la figure (33C) ; les points du graphique Mg-Cl, se localisent sous la droite de mélange montrant ainsi un appauvrissement de Magnésium qui est dû à l'interaction entre l'eau et la roche.

La figure (33D) et qui représente le diagramme NO₃-Cl, indique une augmentation simultanée des nitrates et des chlorures et ceux pour les échantillons des groupes I et II, cela peut être expliqué par l'enrichissement par les mouvements de retour des eaux d'irrigation (Cardona *et al.*, 2004 ; Richter and Kreitler, 1993).

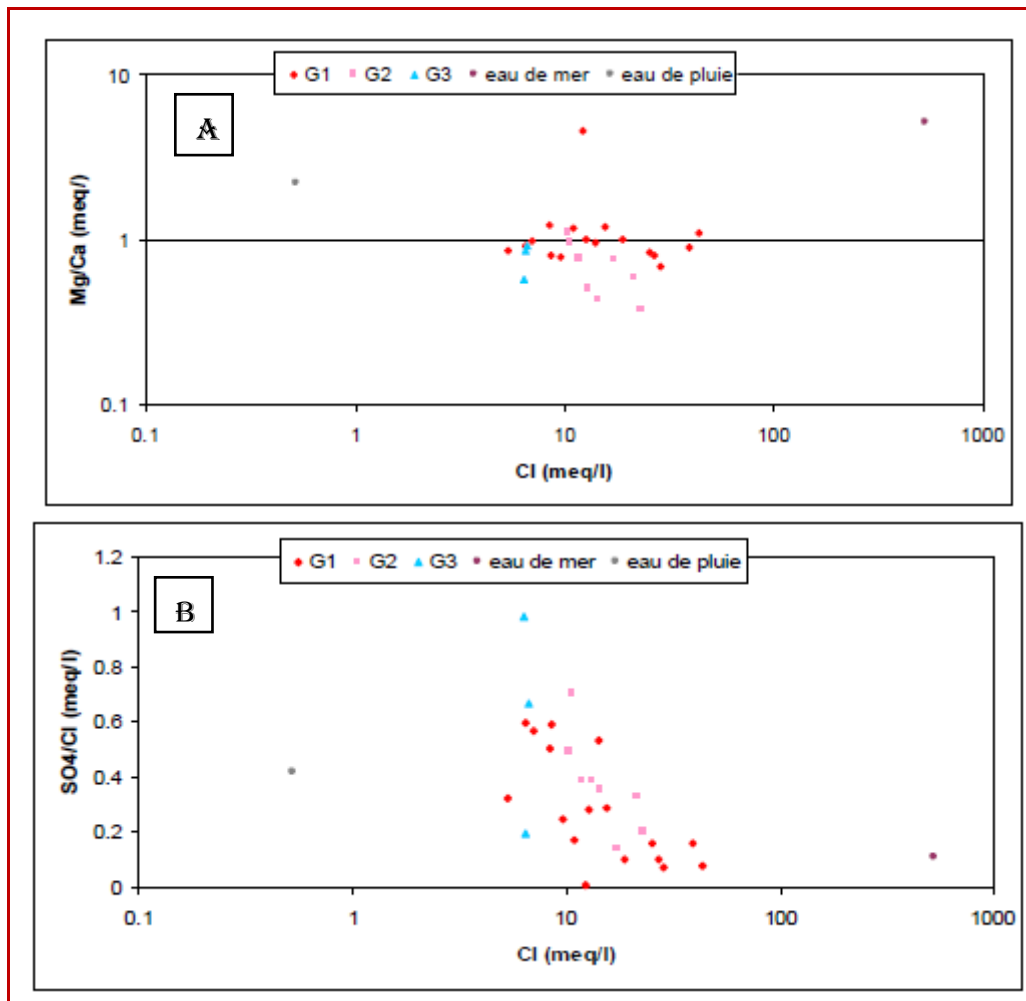


Fig.34. Variation des rapports Mg^{2+}/Ca^{2+} et SO_4^{2-}/Cl en fonction des teneurs en Chlorures (méq/l) (In Aoun-sbaiti, 2010)

Le rapport Mg^{2+}/Ca^{2+} (fig.34 A) augmente en fonction de la proportion d'eau de mer introduite dans le mélange (représentée par la quantité de chlorures) (Tellam, 1995 ; Trabelsi *et al.* 2005). L'augmentation de la teneur en magnésium et la diminution de la teneur en calcium sont dus surtout aux réactions d'échange ionique qui caractérisent les mouvements de mélange eau douce-eau de mer. On peut constater que les points du groupe I montrent des valeurs importantes de ce rapport expliquant l'origine marine de la minéralisation de ces eaux. Quelques points des groupes II se bornent sur la droite de mélange eau de pluie-eau de mer authentifiant ainsi le phénomène de retour des eaux d'irrigation. Les points des groupes III et l'autre partie des points des groupes II se localisent en dessous de la droite de mélange, indiquant les faibles valeurs du rapport Mg/Ca en raison de la richesse de l'ion calcium, qui a pour origine le gypse et la calcite présents dans le réservoir.

Le rapport $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$ diminue lorsque la proportion d'eau de mer (représentée par la quantité de chlorures) augmente dans le mélange eau douce - eau de mer (Pulido-Le Boeuf *et al.*, 2003 ; Trabelsi *et al.*, 2005 ; Vengosh and Rosenthal, 1994). La figure (34 B) indique que les plus faibles valeurs du rapport sont présentées par les points du groupe I expliquant l'origine marine des eaux. Les points du groupe III qui présentent des grandes valeurs du rapport $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$ montre une autre origine de la minéralisation ; cette augmentation du rapport peut être due à la dissolution du gypse dans le réservoir. (Trabelsi *et al.*, 2005).

IV. Conclusion

Pour satisfaire aux besoins industriels et agricoles de la population de la région d'Annaba qui présentent un accroissement accentué ; un pompage intensif et irrationnel des puits de la partie Nord de la plaine provoqué et aggravé le problème de la contamination de la nappe des graviers par les eaux marine.

Le diagramme de Piper montre une dominance des chlorures et du sodium illustre un faciès chloruré sodique.

A partir du diagramme de Stiff, on peut constater qu'une partie des eaux de la nappe (groupe I) se rapproche dans leurs formes de celle des eaux de la mer (nappe des salines et Sidi Salem et au niveau d'El Hadjar et Ben M'hidi. Le groupe II caractérise les échantillons de la zone Sud de la plaine. Les eaux faiblement minéralisées, représentées par le groupe III

Les diagrammes croisés des concentrations qui montrent la relation entre le Cl et les autres éléments majeurs par rapport à la droite du mélange eau de pluie et eau de mer expliquent ; le phénomène d'échange ionique entre la roche et l'eau et qui se traduit par l'appauvrissement des eaux de la nappe en Na et un enrichissement en Ca et en Mg. L'augmentation de NO_3^- dans les eaux des groupes I et II reflète le retour des eaux d'irrigation dans cette zone.

DEFINITION ET DESCRIPTION D'UN MODELE DE GESTION INTEGREE DES RESSOURCES EN EAU (GIRE)

I. Les concepts de la Gestion Intégrée des Ressources en Eau (GIRE)

Face aux pressions combinées de l'augmentation accélérée de la demande et de la détérioration continue de la qualité de l'eau aussi bien à l'échelle internationale que locale, les modèles de gestion du passé ne suffisent plus à la tâche ; il faut désormais sortir du mirage technologique et repenser en profondeur les approches qui permettront de satisfaire les besoins de l'homme tout en maintenant la qualité des systèmes naturels qui supportent l'existence même de la collectivité humaine (Burton, 2001).

A l'issue du sommet de la terre de 1992, le chapitre 18 de l'agenda 21 a traduit la nécessité d'une gestion intégrée du sol, de l'eau et des écosystèmes à l'échelle du bassin versant qui s'avère comme l'unité géographique la plus appropriée. La gestion intégrée des ressources en eau (GIRE) est ainsi basée sur la perception de l'eau comme une partie intégrante des milieux aquatiques et naturels et un bien social et économique dont la qualité et la quantité déterminent la nature de son utilisation

L'article 26 du plan d'action du Sommet Mondial du Développement Durable (SMDD) tenu à Johannesburg en 2002 appelle à développer la GIRE et des plans d'efficacité de l'eau avant l'année 2005 au sein des pays en voie de développement. Ainsi, l'approche de GIRE encourage le développement et la gestion coordonnés de l'eau, des terres et des ressources connexes, en vue de maximiser, de manière équitable, le bien-être économique et social en résultant sans compromettre la pérennité d'écosystèmes vitaux.

Néanmoins, la gestion intégrée des ressources en eau ne concerne pas seulement la gestion des ressources physiques et son application ne signifie pas qu'il faut tout détruire et recommencer à nouveau. Généralement, elle consiste en une adaptation, une édification sur des institutions existantes et des procédures de planification pour atteindre une approche plus intégrée. Elle implique ainsi la réforme des systèmes humains pour permettre aux individus de retirer les bénéfices de cette ressource sans compromettre la pérennité d'écosystème vitaux ni la possibilité pour les générations futures de satisfaire leurs besoins en eau.

En effet, lors de la mise en place d'une politique intégrant une multiplicité des domaines, il est primordial de pour les gestionnaires de pouvoir en suivre l'adéquation avec les enjeux locaux. Pour cela il s'avère indispensable de déterminer les différents indicateurs pour la mise en œuvre de la GIRE et qu'on peut les grouper dans deux types : les indicateurs d'impact sur la disponibilité et les tendances des ressources en eau traduisent l'état et l'évolution des différents aspects liés à l'eau sur le bassin versant alors que les indicateurs de processus

d'avancement traduisent l'adoption et le niveau de mise en œuvre d'une politique GIRE (Jonch-Clausen, 2004).

I.1. Les indicateurs de la gestion intégrée des ressources en eau

La donnée, l'indicateur et l'indice sont des termes ou des notions qui sont étroitement liés. Ainsi, une donnée et un fait qualitatif ou quantitatif renseignant sur les caractéristiques du système étudié et constitue un élément de base pour travailler avec l'indicateur. (Lacour.F, 2007)

Un indicateur est un outil de communication, de description et de support à la décision donnant le plus clairement possible les directions à suivre ou les tendances à corriger et portant ainsi une signification qui dépasse la donnée. (IFEN, 1999). Ils sont donc employés pour l'évaluation, le suivi, la prévision car ils traduisent d'une façon synthétique la situation en focalisant et en condensant l'information sur des questions complexes de management ou de suivi lors des processus de prise de décision au niveau du bassin. L'objectif principal d'un indicateur est de clarifier et de définir des objectifs, d'évaluer les orientations actuelles et futures en ce qui concerne les buts et les valeurs, d'évaluer dans le temps des modifications, des conditions spécifiques et de déterminer l'impact des programmes et de transmettre des messages. Sa caractéristique principale est qu'il porte une signification qui dépasse la donnée quantitative fournie.

Le Plan Bleu a expliqué les indicateurs comme des moyens de consolider et résumer les informations quantitatives, mais surtout ce sont des moyens privilégiés de communiquer et d'objectiver les situations et les politiques. Le Plan Bleu a développé des indicateurs pour faciliter et illustrer l'observation des liens entre le développement et l'environnement.

À cet égard, deux groupes d'indicateurs ont été développés. Le premier est le groupe d'indicateurs de performance environnementale qui cherche à mesurer l'écart entre la réalité et les objectifs environnementaux comme quantifiés et fixés par les politiques. Le deuxième est le groupe d'indicateurs de développement durable qui ont l'intention de mesurer les progrès vers la réalisation du développement durable dans les pays méditerranéens. L'approche générale du Plan Bleu pour les indicateurs est :

- des problèmes aux indicateurs : les problèmes sont mieux analysés à l'aide d'indicateurs quantifiables.
- un outil privilégié pour le dialogue : la sélection et la quantification des indicateurs constitue un outil extraordinaire pour le dialogue et la participation du public.

- une procédure qui évolue dans le temps : la valeur ajoutée pour les indicateurs réside dans leur calendrier et leur réajustement constant, en tenant compte de l'évolution souvent rapide des questions en jeu et comment elles sont perçues.

Enfin, la combinaison de plusieurs indicateurs forme ce qu'on appelle indice. Si l'indice combine plusieurs dimensions d'un système on parle alors d'indice pluridimensionnel. Si l'indice ne mesure qu'une composante du système on parle d'indice sectoriel.

Ainsi, les indices synthétiques peuvent résumer en une valeur la situation d'un pays ou d'un bassin versant.

I.2. Les méthodologies utilisées pour développer les indicateurs

La modélisation s'est révélée constituer une étape préalable indispensable à l'élaboration d'un système d'indicateurs qui permet de conserver un certain niveau de complexité tout en offrant une représentation organisée et simplifiée de la réalité, accessible à l'ensemble des acteurs participant à son élaboration. Le modèle permet d'organiser les indicateurs dans un ensemble cohérent.

➤ Le Modèle de : Pression - Etat (State) - Réponse : (PSR)

Le modèle PSR créé par l'Organisation de Coopération et de Développement Economique (OECD) considère que les activités des hommes du système humain "les pressions" sur l'environnement affectent la qualité et la quantité des ressources naturelles "Etat", la société répond à ces changements de l'environnement, l'utilisation des terres la sensibilisation et les politiques sectorielles "Réponse". Le modèle PSR souligne la relation cause-effet. Il aide les décideurs et le public à observer les liens entre l'homme, les systèmes de ressources naturelles et l'entreprendre des propres interventions politiques. Il fournit une classification dans les indicateurs de pressions environnementales, les indicateurs des conditions environnementales (Etat) et les indicateurs des réponses institutionnelles. Bowen a expliqué que le modèle PSR comme un cadre où les problèmes environnementaux et les solutions sont représentés et expliqués par des variables qui insistent sur la relation cause-effet entre les activités humaines qui exercent des pressions sur l'environnement, la condition de l'environnement et la réponse institutionnelle (Figure 35). L'approche du PSR rend explicite la nécessité de se concentrer sur les facteurs qui influencent sur le système environnemental et les conséquences associées.

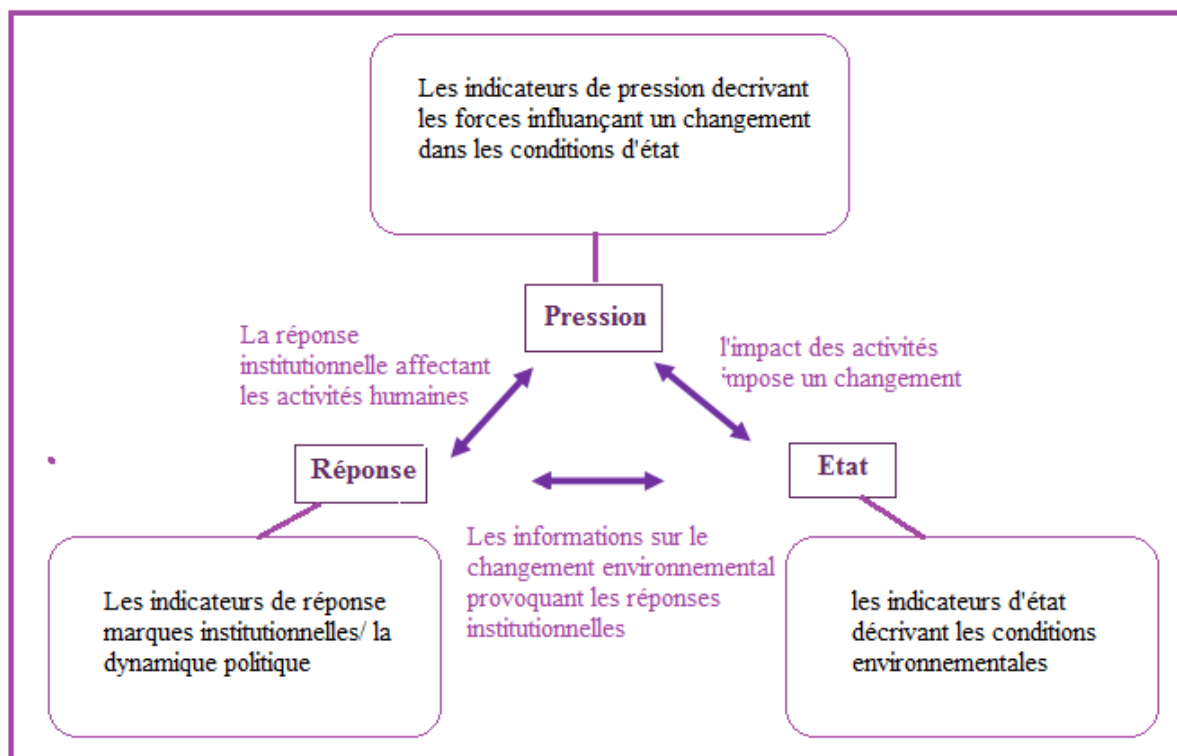


Fig.35. Le modèle PSR pour développer les indicateurs
(Source Riley C., Bowen R., 2003)

➤ **Le Modèle de : Force motrice (Driving force) - Pression-Etat (State) – Impact - Réponse (DPSIR)**

Les inconvénients rencontrés par l'application du modèle PSR ont contribué dans l'élargissement du modèle décrit comme DPSIR développé par l'Agence Européenne pour l'Environnement (AEE) de la commission européenne. Le modèle de : Force motrice (Driving force)-Pression-Etat (State)-Impact-Réponse DPSIR définit cinq catégories d'indicateurs comme sont expliqués dans la Figure 36 où :

D : les forces motrices (Driving forces) englobant les facteurs socio-économiques et sectoriels influençant sur l'ensemble des variables pertinentes.

P : les indicateurs de pression décrivant les variables qui provoquent directement les problèmes environnementaux.

S : les indicateurs d'état (state) illustre les conditions existantes et le changement observable de l'environnement.

I : les indicateurs d'impact décrivent les effets maximaux des changements d'état sur l'homme et l'écosystème.

R : les indicateurs de réponse présentent les effets au niveau des administrateurs et les politiciens pour traiter et résoudre les problèmes.

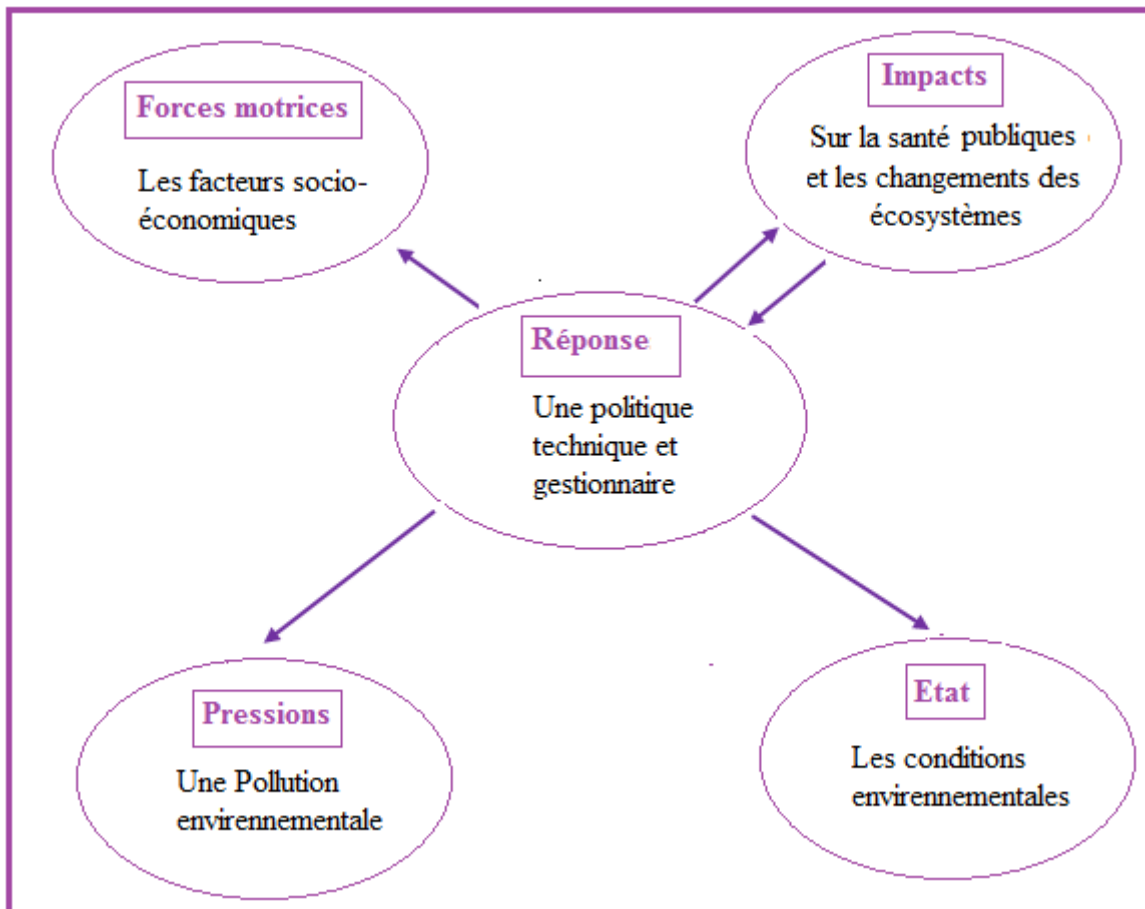


Fig.36. Le modèle DPSIR pour développer les indicateurs
(Source Agence Européenne pour l'Environnement "AEE", 1999)

Le modèle DPSIR définit donc cinq indicateurs qui sont :

- Les Forces motrices qui sont définies comme les besoins sociaux qui exigent l'existence d'une activité économique donnée ;
- La Pression qui correspond aux facteurs qui ont une influence négative sur l'environnement ;
- l'Etat correspondant à l'état actuel de l'environnement ;
- Les Impacts sur les écosystèmes et la santé humaine en raison des modifications de l'environnement ;
- Les Réponses des organismes, des gestionnaires et des politiques vis-à-vis des problèmes environnementaux.

L'approche DPSIR représente plus efficacement les complexités de l'interaction socio-environnementale et met en lumière la nécessité de comprendre et de mesurer la nature et l'ampleur de cette dynamique. L'intégration plus efficace de la condition sociale, de la dynamique environnementale et de la réponse institutionnelle peut enrichir un processus d'informer les décideurs sur l'utilisation durable des ressources et les pratiques du développement (Bowen et Riley, 2003).

I.3. Application Du Modèle De Gestion Intégrée Dans La Région De La Basse Et Moyenne Seybouse

Comme nous l'avons décrit précédemment, Le bassin de la Seybouse est situé dans le Nord Est de l'Algérie et couvre une superficie de 6471 km² avec une longueur de 240 km. La région renferme dans son sol un potentiel hydrique assez important destiné à des fins domestiques, industrielles et agricoles. Ce potentiel est contenu notamment dans les formations alluviales des plaines de Guelma, Bouchegouf et Annaba et dans formations métamorphiques de l'Edough et calcaires de Guelma et Bouchegouf.

Plus d'un million (1.0852.774) habitants, répartis en soixante-huit communes, et sept wilayas : Annaba, El Tarf, Skikda, Constantine, Oum El Bouaghi, Guelma et Souk Ahras. Trente-trois communes sont entièrement incluses dans le bassin et trente-cinq partiellement. Un tel nombre de population forme une pression réelle sur la ressource en eau.

Notre région d'étude, Annaba-Guelma est une région à vocation agricole et industrielle.

L'agriculture est observée notamment dans la plaine de Guelma avec une très grande variété.

Céréales, cultures maraîchères et culture industrielle sont les principales spéculations des périmètres irrigués. Au total on distingue deux grands périmètres d'irrigation :

- Celui de Guelma-Bouchegouf (12900 ha)
 - et celui de Bounamoussa (4500 ha).

Le périmètre d'irrigation de la plaine de Guelma-Bouchegouf s'étend sur 80 km du confluent de l'oued Bouhamdène et de l'oued Cherf jusqu'au Nord de Dréan. Il est divisé en six secteurs autonomes sur le plan aménagement et desserte en eau.

Les besoins en eau sont calculés sur la base d'un débit fictif continu de 0.46 l/s/ha pour une durée de 25 jours par mois et 18h/j sur une campagne de 8 mois/an. Ils sont de l'ordre de 71.5 hm³.

La partie nord de la zone étudiée est la plus industrialisée. On y rencontre différentes branches de l'industrie : l'industrie lourde (Société Nationale de Sidérurgie, Société nationale de

métal...), industrie chimique (Complexe d'engrais phosphatés et azotés) et industrie agroalimentaire (conditionnement de la tomate pour Annaba, le sucre à Guelma) et la fabrication des motocycles également à Guelma.

Au total on y recense 86 unités industrielles importantes mais 8 seulement ont leur propre station d'épuration (Aoun-Sebaiti, 2010).

Compte tenu de sa situation à proximité de la mer méditerranée, la pêche constitue une activité prédominante, néanmoins, le milieu aquatique marin est menacé par la pollution due aux différents rejets.

Sur le bassin de la Seybouse, les pluies varient en moyenne de 597 mm au Sud, à 666 mm au Nord. Pour l'ensemble du bassin, vingt-cinq points de mesure sont installés, dont cinq disposent de séries de données de longue durée.

La moyenne annuelle de l'évapotranspiration estimée par la méthode de Thornthwaite, sur la période 1980-2015 est de 467 mm à Annaba, de 443 mm à Guelma.

Cette région renferme plusieurs zones humides dont la plus importante est le lac Fetzara qui couvre une superficie de plus de 5.800 hectares, auxquelles se rajoutent plusieurs milliers d'hectares de terres inondables en saison hivernale constituant ainsi de vastes prairies humides. Sa grande étendue et son caractère relativement temporaire font de ce site une zone humide représentative et rare de type de zone humide naturelle de la région méditerranéenne. En effet, vers la fin de la saison hivernale, d'importants effectifs d'anatidés regagnent le lac Fetzara venant des sites Ramsar, les lacs Oubeira et Tonga, qui, au vu de l'augmentation excessive de leurs niveau d'eau, rend difficilement accessible l'alimentation pour les Anatidés herbivores. Le lac Fetzara est une zone humide d'importance internationale vu que la moyenne des effectifs des oiseaux d'eau et particulièrement des Anatidés et de la Foulque macroule hivernants recensés au niveau du site dépasse habituellement 20.000 oiseaux par an. Le lac abrite, habituellement, 1% de la population mondiale du Canard siffleur et de l'Oie cendrée.

Le bassin de la Seybouse est confronté aujourd'hui à des problèmes multiples de nature quantitative et qualitative. Le problème de la pénurie d'eau face à l'augmentation de la demande peut connaître une grande ampleur au cours des vingt prochaines années, du fait que l'augmentation de la demande en eau potable devrait atteindre 20%. Le problème de la pollution urbaine, agricole et industrielle constitue une pression supplémentaire sur cette ressource. Cette pollution provient des différentes agglomérations, usines et zones agricoles situées sur les deux rives de l'oued. La pollution a atteint un degré élevé. 4,5 millions de m³

sont rejetés annuellement dans la rivière, sur lesquels 3 millions de m³ sont des huiles usagées (Aoun-Sebaiti, 2010).

La mise en place d'une gestion durable de l'eau, au plan qualitatif comme quantitatif, est donc impérative pour l'avenir de la population et des écosystèmes du bassin de la Seybouse, et conditionne le développement économique et social en protégeant les ressources superficielles et souterraines, en rationalisant les usages domestiques, agricoles et industriels, mais aussi en luttant contre la pollution et en protégeant l'environnement.

II. METHODOLOGIE

II.1 Le Plan D'analyse

Les objectifs du plan d'analyse sont :

La caractérisation et la classification par ordre de priorité les variables effectives possibles appartenant aux variables de base dans le cadre des cinq catégories du modèle de DPSRI décrit. L'ensemble des variables sélectionnées, ainsi que les communes (observations) ont été classées et organisées de telle sorte que les communes sous stress de l'eau ont été bien identifiées.

Un modèle de prévision reliant entre la mobilisation de l'eau d'une part et les forces socio-économiques, les facteurs déterminants de la qualité de l'eau, et les interventions politiques d'une autre part. La prévision entre la qualité de l'eau et la pression de pollution a été également mise en place.

Pour élaborer ce travail, nous avons choisi le RNA (les Réseaux de Neurone Artificiels), ainsi que les statistiques multivariées et cela en utilisant le logiciel STATISTICA 8.

L'analyse des données a été effectuée suivant trois étapes :

- La création d'un modèle RNA, la caractérisation et la classification des variables efficaces pour la modélisation des relations de prévision.
- La transformation des variables qui n'ajustent pas à la loi normale et la matrice de corrélation des variables sélectionnées dans la première étape.
- Procéder aux techniques d'analyse multivariées différentes pour les variables sélectionnées qui ont été classées avec les communes pertinentes.

Les résultats des analyses de la première et la troisième étape ont été également réintroduits pour compléter le modèle DPSRI avec les variables sélectionnées et les communes qui sont

sous le stress hydrique. L'ensemble des résultats sera une base pour étudier l'évaluation stratégique de l'environnement.

II.2. Les Outils D'analyse

Les outils d'analyse utilisés dans ce travail sont : les statistiques descriptives, les réseaux de Neurone Artificiels (RNA), l'analyse des matrices de corrélation, l'analyse multivariée incluant l'analyse des facteurs et les composantes principales.

II.2.1. Les Statistiques Descriptives

Les statistiques descriptives sont la base de toute analyse de données. En effet, avant d'approfondir l'analyse dans les détails, il faut commencer par la description globale à l'aide de ces statistiques. Elles servent à analyser et à décrire les données en calculant leurs paramètres statistiques comme pour notre étude : la moyenne, l'écart-type, la variance et l'asymétrie.

II. 2.2. Les Réseaux De Neurones Artificiels (RNA)

Un modèle de réseau neuronal est un modèle connexionniste qui simule le traitement de l'information ayant lieu dans le système nerveux en utilisant les informations numériques auxquelles il affecte des calculs analogues à ceux d'un neurone. Le RNA est utilisé dans le domaine d'hydrogéologie et hydrologie (Lallahem et Mania, 2003), dans le domaine de la gestion de l'eau, ce modèle est utilisé pour la prévision des paramètres de la qualité de l'eau (Maier, Dandy, 1996), la prévision de la demande de l'eau (Liu et al, 2003), la gestion des aquifères côtiers (Jalala et Mania, 2004).

Un neurone est caractérisé par trois concepts : son état, ses connexions avec d'autres neurones et sa fonction de transition. Il possède un état interne, et reçoit des signaux qui lui permettent de changer l'état, l'ensemble des états possibles d'un neurone pourra être par exemple : 0 ou 1, où 0 sera interprété comme l'état inactif et 1 l'état actif. Pour calculer un tel état, on doit donc considérer les connexions entre ce neurone et ceux qui l'entourent. Cependant dans le modèle connexionniste, chaque nœud i du réseau a un niveau (seuil) d'activation numérique $a_i(t)$ qui lui est associé au temps (t) :

$a_i(t) = [a_1(t), a_2(t), a_3(t), a_4(t), \dots]$ qui représente l'état courant du neurone au temps (t) . A chaque instant, le niveau d'activation de chaque nœud, ou chaque sortie qui en dépend fonctionnellement, est communiqué aux nœuds voisins (n) .

$e_j(t)$ est la quantité totale d'activation en entrée que le nœud j reçoit de ses voisins à chaque instant (t) . Une connexion entre deux neurones a une valeur numérique associée appelée poids de connexion, ces poids sont utilisés pendant les calculs qui mettent à jour les liens entre

chaque nœud. Dans la sortie, les poids des liens reliant le nœud i au nœud j sont notés w_{ji} . La matrice W des poids de connexions est choisi pour représenter la mémoire à long terme et peut être une fonction du temps, donc la sortie A_j est donnée comme :

$$A_i = W_0 + \sum_j W_{ij} X_j$$

L'état X_i du neurone i est une fonction en activité A_i : $X_i = f(A_i)$

La fonction f est appelée fonction de transition ou de transfère et peut avoir plusieurs formes différentes, les plus utilisées sont : la fonction identique, la fonction à seuil et la fonction sigmoïdale. Cette dernière est continue, différentiable et bornée sur l'intervalle $[0,1]$. Elle peut être définie par l'une des deux formes suivantes :

$$F(x) = A \frac{e^{kx} - 1}{e^{kx} + 1}$$

Ou bien

$$F(x) = A \frac{1}{e^{-kx} + 1}$$

Ces deux fonctions sont bornées, cependant quand x tends vers à l'infinie la fonction :

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \left[A \frac{e^{kx} - 1}{e^{kx} + 1} \right] = A$$

$F(x) = A$

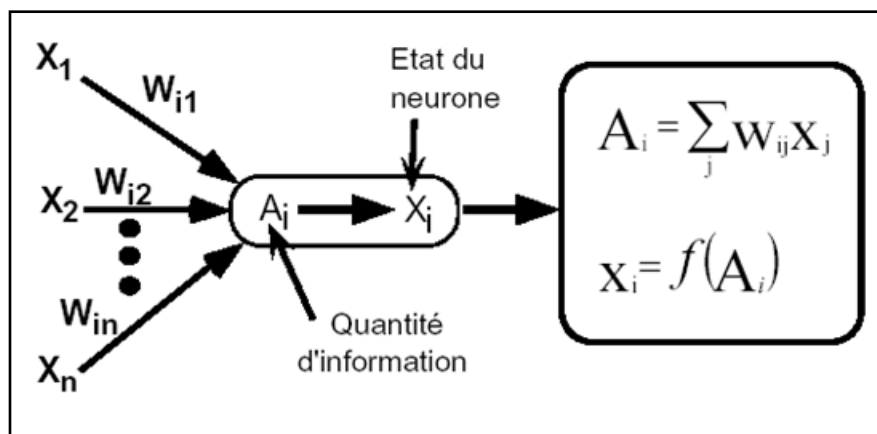


Fig.37. Calcul d'un état de neurone

L'état x_i d'un neurone i est une fonction des états des neurones j , de son voisinage, et des poids des connexions w_{ij} .

La fonction exponentielle est utilisée au niveau de la couche de sortie afin d'assurer des valeurs de sorties positives et non bornées, le paramètre A régule la valeur de saturation et le paramètre k , réel et positif sert à réguler la pente de la courbe en un point hors saturation.

Les Perceptrons Multicouches (MLP) selon (Bishop, 1995; Riad et al, 1998) sont des réseaux neuronaux pour lesquels les neurones sont organisés en couches successives, les connexions sont toujours dirigées des couches inférieures vers les couches supérieures. Choisir l'Architecture d'un Perceptron Multicouche (MLP) 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 (Fig.38).

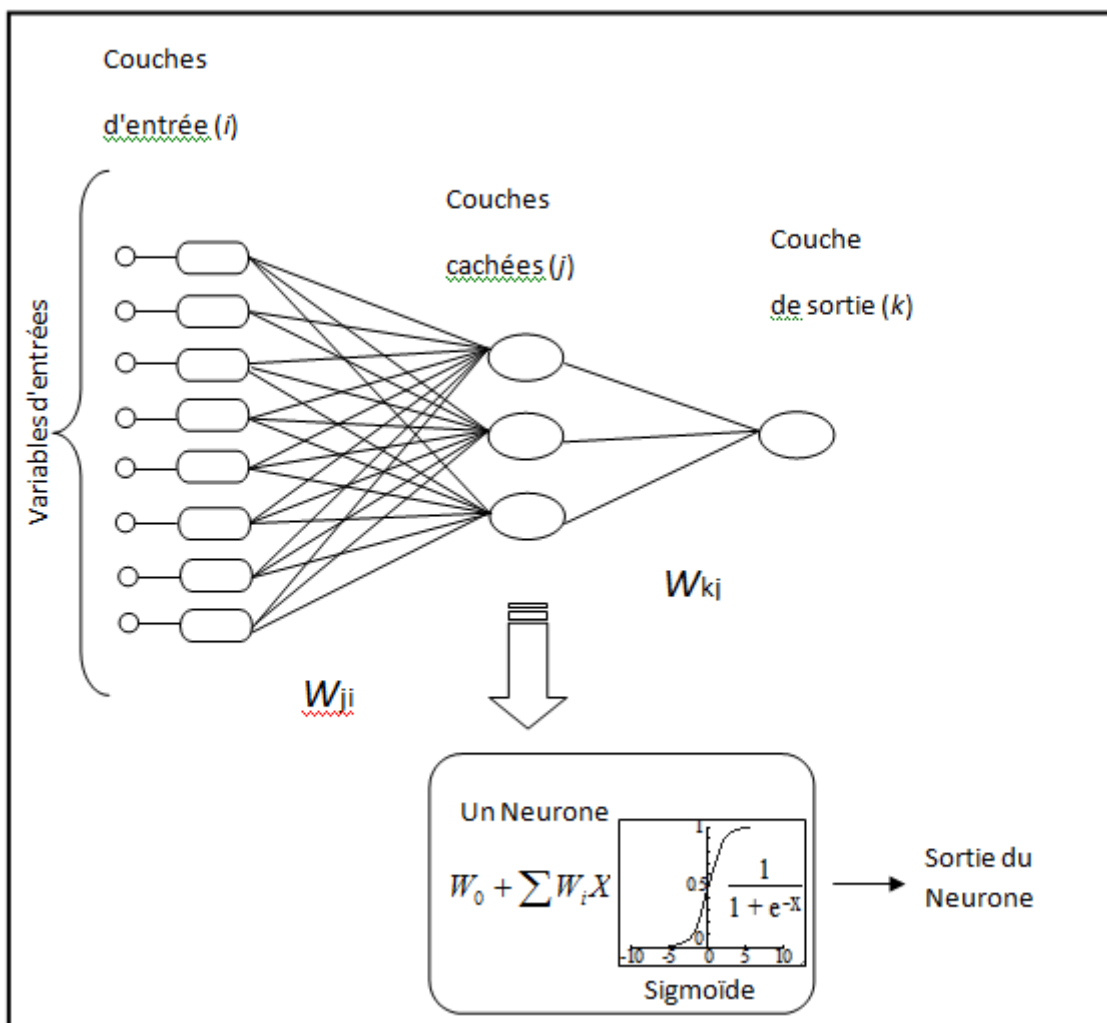


Fig. 38. L'Architecture d'un MLP à Trois Couches

a / Le calage du modèle

Après la détermination du nombre des neurones dans les trois couches de façon que les résultats, statistiquement soient plus plausibles, les données utilisées pour la simulation seront partitionnées pour former les trois phases du calage et du fonctionnement du modèle : une phase d'apprentissage (Training) (60% de données), une phase de validation (Verification) (20% de données) et une phase de test (Testing) (20%).

Une partie sera utilisée par l'apprentissage pour pouvoir détecter les perturbations du modèle, et une autre partie sera réservée pour tester la performance du modèle afin de décider l'arrêt de l'apprentissage quand l'erreur de la validation du modèle commence à augmenter (Lallahem et Mania, 2003).

b/ Critère de Performance du Modèle

Pour tester et évaluer la performance des modèles conceptuels plusieurs critères sont proposés par l'organisation mondiale de la météorologie (WMO, 1975), et utilisés dans le domaine de simulation. Ils peuvent être soit des indicateurs graphiques ou des mesures numériques.

La Somme de l'Erreur Carré (SOSE), et le coefficient de détermination R^2 sont des indicateurs numériques pour définir un réseau (MLP) optimal (Lallahem et Mania, 2003; Riad et al, 2003; Najjar et al, 1996).

$$SOSE = \sum_{i=1}^N (Q_i - \hat{Q}_i)^2$$

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (Q_i - \bar{Q}_i)(\hat{Q}_i - \bar{\hat{Q}}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (Q_i - \bar{Q}_i)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (\hat{Q}_i - \bar{\hat{Q}}_i)^2}} \right]^2$$

Où :

Q_i : est la valeur de la sortie observée;

\hat{Q}_i : est la valeur de la sortie prévue;

\bar{Q}_i : est la valeur de la moyenne des valeurs des \hat{Q}_i ;

La SOSE donne une indication quantitative de l'erreur du réseau. Elle mesure l'écart entre la valeur prévue et celle observée correspondante. Le coefficient de détermination R^2 représente la proportion de variation des valeurs des sorties. Il est utilisé pour évaluer la qualité de l'ajustement de notre modèle de régression.

Des valeurs de sortie de 90% indiquent que la performance du modèle est très bonne, la performance du modèle est bonne lorsque $80\% < R^2 < 90\%$, le modèle est non performant si : $60\% < R^2 < 80\%$ (Lallahem et Mania, 2003). La valeur idéale pour la SOSE est zéro.

II .2.3. Les matrices de corrélation

La matrice de corrélation est un tableau qui présente l'inter corrélation entre toutes les variables analysées. Elle calcule la direction et le degré d'association entre chaque deux variable de données. La direction soit positive ou négative, le degré d'association (liaison) est indiqué par un coefficient de corrélation, une corrélation est dite parfaite si son coefficient est de +1, ce la veut dire que l'augmentation de la variable explicative est proportionnelle avec l'augmentation de la variable expliquée. Cependant, elle est dite inverse, si le coefficient est de -1, ce qui implique que l'augmentation de la variable explicative augmente inversement avec l'augmentation de la variable expliquée. Donc le coefficient de corrélation r mesure l'association linéaire entre deux variables ayant des valeurs distribuées normalement.

II.2.4. La technique d'exploration multi variée : L'Analyse en Composantes Principales (ACP)

L'analyse en composantes principales (ACP) est une méthode d'analyse multi-variée qui permet de préciser les relations qui existent entre un grand nombre de variables et les phénomènes à l'origine de ces relations. Elle réduit ce nombre de variables afin de pouvoir le projeter dans un espace bidimensionnel engendré par des couples d'axes fonctionnels ou facteurs. Deux types d'analyses sont disponibles, selon les données normalisées ou bien centrées. Dans le premier cas, l'analyse est effectuée par la matrice de corrélation, alors que le deuxième cas, l'analyse est effectuée par la matrice de covariance. Cependant, la méthode de base se compose d'une matrice symétrique diagonale : de corrélation ou de covariance. La particularité de ce modèle est le graphisme qui fournit une aide visuelle pour le classement des variables et des cas (observations). Les variables actives dans le RNA sont utilisées dans les calculs des composantes principales. L'ACP produit des résultats sous deux formes : les tables de calculs et les graphiques, les tables de calculs sont utilisées pour interpréter les

résultats et les graphiques associés aident au classement des variables et des observations visuellement, elle produit également un large éventail de résultats.

L'objectif principal de l'ACP est de récupérer un espace vectoriel de dimension inférieure sur laquelle l'origine des points (variables et observations) peut être prévu, de sorte que la structure sous-jacente des données pourrait être détecté.

Les variables pertinentes ont été caractérisées en utilisant les réseaux de neurones artificiels (RNA), Les variables choisies seront classées en utilisant l'analyse statistique multivariée, l'analyse factorielle et l'analyse en composantes principales ainsi que la classification hiérarchique. Sur la base des résultats de cette recherche de nouvelles recommandations seront élaborées pour assurer la gestion durable de l'eau.

II.3. Définition des variables

Dans notre étude, nous avons considéré l'année 2010 comme l'année de référence pour la collection et l'analyse des données. La mobilisation de l'eau à partir des aquifères et des barrages (Qext) constitue une variable de première importance elle dépend des variables socio-économiques, d'état, d'impact et de réponse et elle représente la quantité d'eau mobilisée pour les différents usages de chaque commune, elle est mesurée en hectomètre cube par an ($\text{hm}^3 \cdot \text{an}^{-1}$). Le (TDS) le total des sels dissous qui est également une variable très importante dépend de la pression de pollution. Elle représente la concentration totale des substances dissoutes dans l'eau (sels inorganiques et quelques matières organiques). Le TDS est mesuré en milligramme par litre ($\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$).

II.3.1. La Catégorie des variables de la force motrices ou socioéconomiques (Driving force)

- ***La population (Pop)*** :C'est la population totale de l'année 2010, elle est mesurée en nombre.
- ***L'occupation du sol (Occup S)*** : Elle représente le rapport entre les surfaces urbanisées et les surfaces agricoles dans chaque commune, elle est mesurée en pourcentage (%).
- ***Le tourisme (Tourism)*** : Cette variable reflète le nombre de visiteur qui séjournent dans la région. Mesurée en nombre.
- ***Le taux de raccordement aux réseaux de l'eau potable (Tx EP)*** : Il représente la proportion de la population connectée aux réseaux de l'alimentation de l'eau potable (AEP). Mesuré en pourcentage (%).

- **Le taux de raccordement aux réseaux des eaux usées (Tx EU) :** Il représente la proportion de la population connectée aux réseaux des eaux usées. mesuré en pourcentage (%).
- **La dotation journalière de l'eau potable (Dot EP) :** Cette variable signifie la quantité d'eau journalière distribuée à l'habitant dans chaque commune. Mesurée en litre par jour et par habitant (l/j/hab).
- **Prix de l'eau (Prix E) :** Le prix de l'eau est le quotient du coût total des dépenses (distribution) par le volume vendu, il est estimé en dinar algérien par mètre cube d'eau (DA/m³).
- **La collection des taxes (Tax E) :** C'est le rapport de la taxation des services eaux sur les revenus collectés. Mesurées en pourcentage (%).
- **La consommation de l'eau d'agriculture (Con E Ag) :** Cette variable reflète la quantité d'eau consommée par l'agriculture dans chaque commune, elle est mesurée en million de mètre cube par an (hm³.an⁻¹).
- **Rôle de la femme (Intég Fem) :** Il signifie la proportion des femmes qui travaillent.
- **Les pertes d'eau (Perte E) :** Cette variable représente la proportion de la quantité d'eau perdue dans les systèmes des réseaux de distribution de l'eau potable dans chaque commune, elle est estimée en pourcentage (%).

II.3.2. La Catégorie de pollution (Presion)

- **Les déchets solides sauvages (Dec Sauv) :** Quantité des déchets sauvages domestiques, industriels et médicaux, ils sont mesurés en tonnes par jour (tonne/j).
- **La génération des eaux usées domestiques (EU Dom) :** Les eaux usées domestiques représentent l'eau usagée générée par les abonnés, les institutions publiques, les hôpitaux Etc. elles sont mesurées en hectomètre cube par an (hm³.an⁻¹).
- **Les pesticides (Pesticid) :** Les pesticides représentent tous les produits photo-sanitaires utilisés dans l'agriculture tels que les herbicides, insecticides et les fongicides, ils sont mesurés en tonnes par an (tonne/an).

- **Les engrais chimiques (Engr Ch) :** Ils représentent la quantité des engrais chimiques utilisés en agriculture pour l'amélioration du rendement, les engrais incluent les ammonitrates, les sulfates de potassium, les phosphates et les sulfates ammoniacaux, ils sont mesurés en tonnes par an (tonne/an).
- **Les engrais (Engr Org) :** Les engrais organiques représentent la quantité des déchets organiques générés par les animaux domestiques qui sera transféré par les bactéries en sels ammoniacaux (NH_4), puis en nitrites (NO_2) et ensuite en nitrates (NO_3), ils sont mesurés en tonnes par an (tonne/an).
- **Les stations d'énergie (les pompes à essences) (St Carb) :** Cette variable représente le nombre de station d'essences qui fournit l'énergie pour la circulation des véhicules. Ces stations ont un réservoir sous sol (enterré), donc elles seront considérées comme source de pollution par les hydrocarbures.
- **Les eaux usées industrielles (EU Ind) :** Ces eaux usées sont générées par les différentes installations existantes dans le bassin versant, elles sont mesurées en million de mètre cube par an ($\text{hm}^3.\text{an}^{-1}$).

II.3.3. La Catégorie des variables qualité de l'eau (State = Etat)

Les composantes de la catégorie sont les paramètres qui caractérisent la qualité des eaux de la région : Calcium (Ca), Magnésium (Mg), Sodium (Na), Potassium (K), Bicarbonates (HCO_3), les chlorures (Cl), les sulfates (SO_4), le potentiel hydrogène (pH), le TDS et le résidu sec (RS). Tous les éléments chimiques sont mesurés en (mg/l).

II.3.4. La Catégorie des variables d'impact sur la santé humaine et l'environnement

- **Les maladies à transmission hydrique**

C'est le nombre de personnes affectées par les maladies à transmission hydrique telles que la Fièvre Typhoïdes, les Dysenteries et l'Hépatite virale A, en général, qui sont causées par une contamination des réseaux de l'alimentation en eau potable par les eaux usées.

II.3.5. La Catégorie réponses des gestionnaires : (Response = réponse)

- **Le stockage des eaux pluviales (Stock E Plui) :** Le stockage des eaux de pluies représente le volume d'eau collecté par les barrages, les retenues collinaires et les réservoirs d'eau d'irrigation, il est mesuré en million de mètre cube par an ($\text{hm}^3.\text{an}^{-1}$).

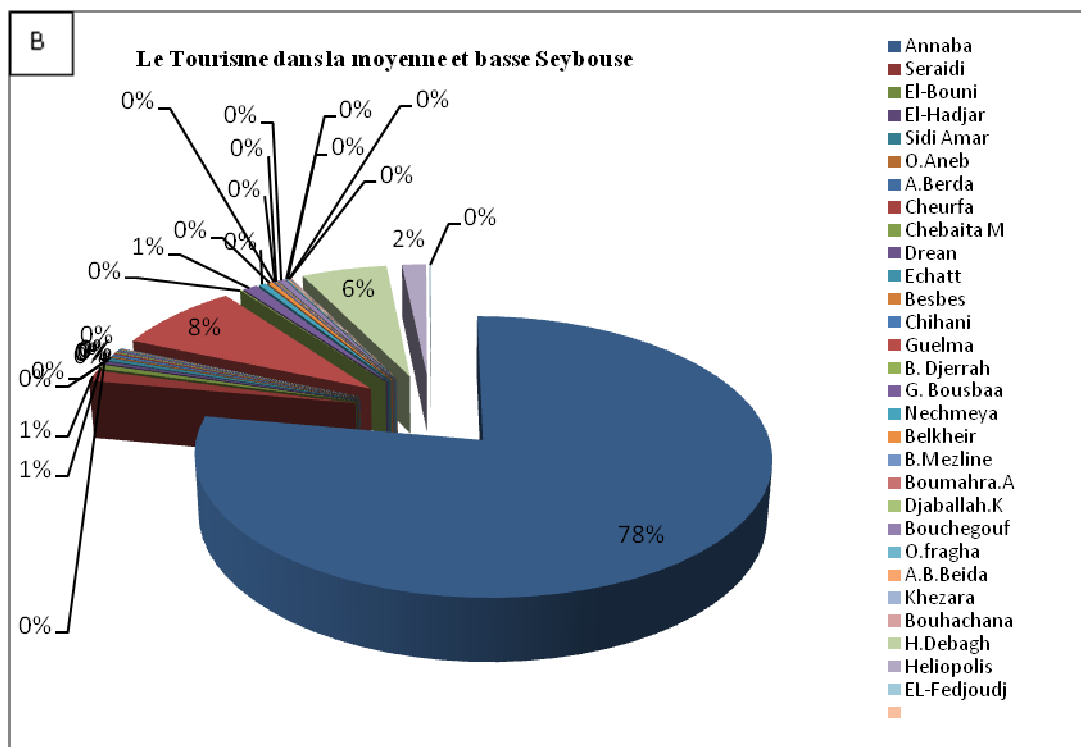
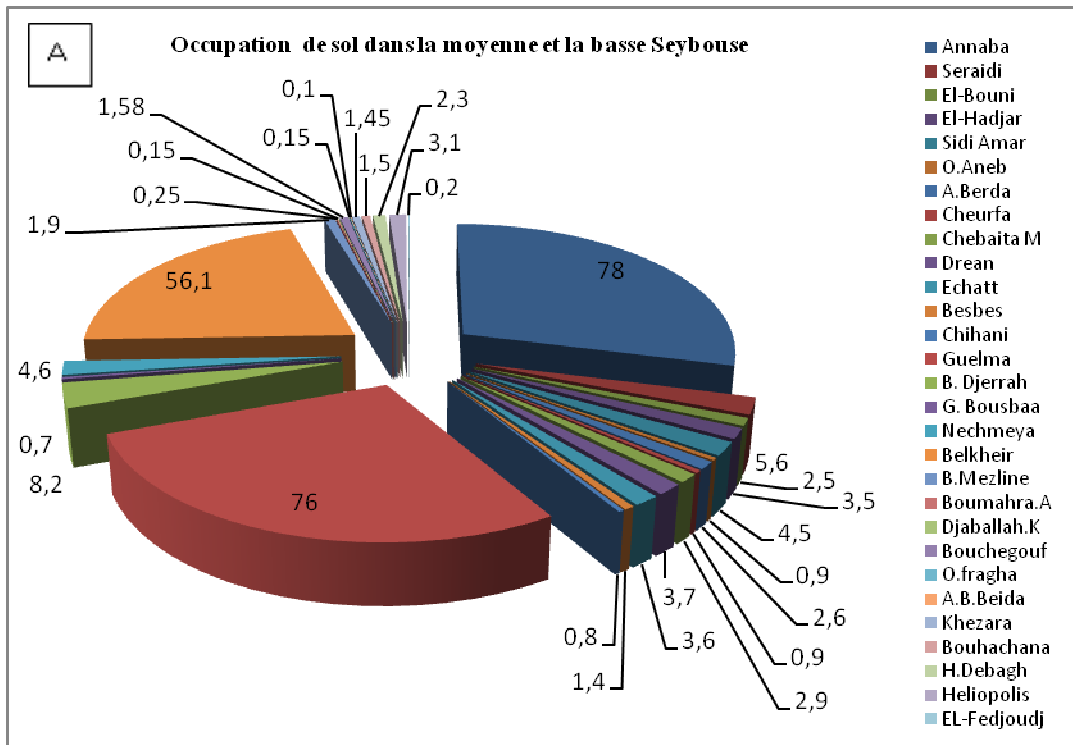
- ***L'importation de l'eau (Impor E)*** : Cette variable représente la quantité d'eau importée à partir des ressources hors commune, elle est mesurée en hectomètre cube par an (hm³.an⁻¹).
- ***L'efficacité dans l'eau d'irrigation (Eff eau irr)*** : Cette variable indique la proportion de la consommation de l'eau d'irrigation par rapport à la production totale de l'eau d'irrigation, elle mesurée en pourcentage (%).
- ***L'efficacité des systèmes d'information (Eff sys inf)*** : Elle indique l'existence des systèmes d'information, en incluent les ressources humaines, les équipements de mesure et les logiciels qui aident à améliorer la gestion des ressources en eau, elle est mesurée en %.
- ***L'éducation et la sensibilisation sur l'eau (sensibilisation)*** : Représente le nombre de personnes qui ont participé à des campagnes éducatives sur l'utilisation rationnelle de l'eau.

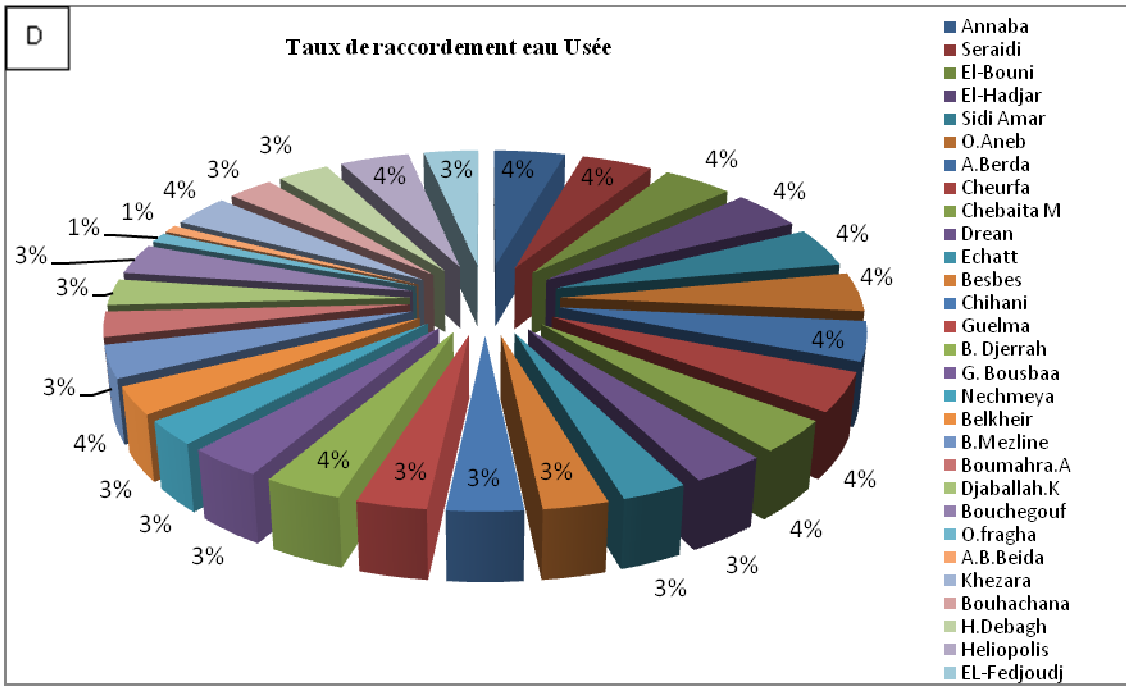
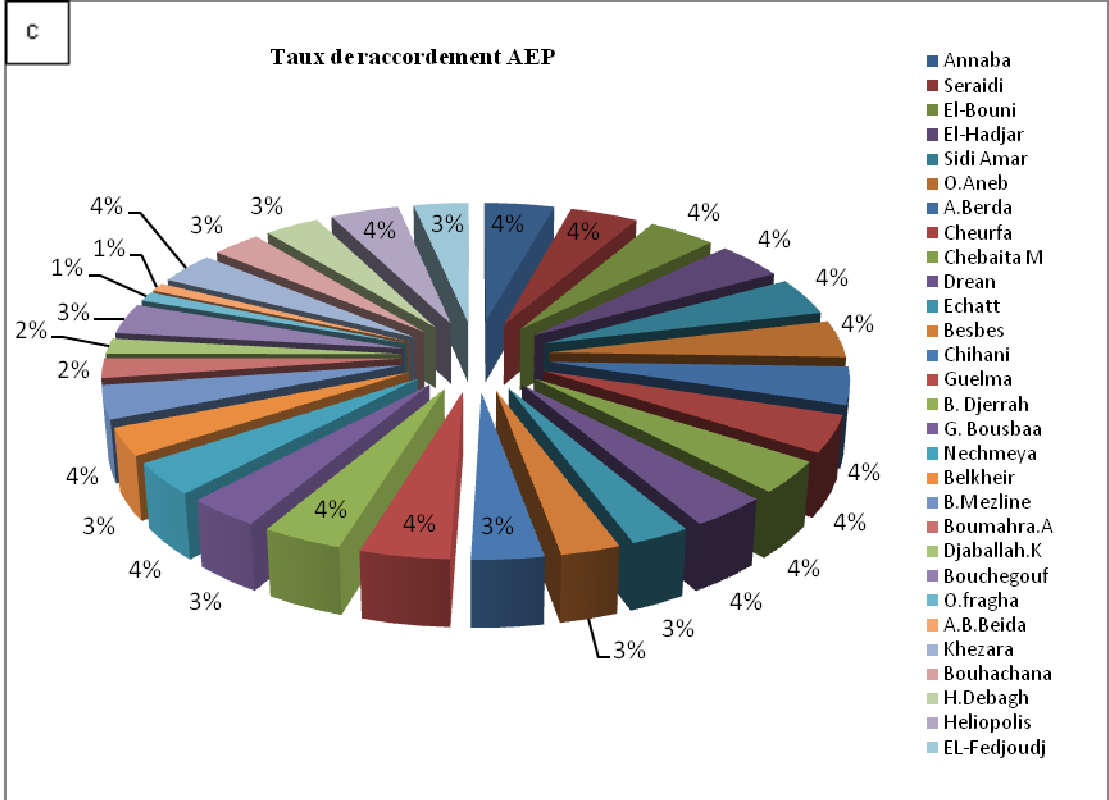
III. Résultats et Discussion

III.1 – Impact Des Variables Socio- Economiques Sur La Ressource En Eau

L'étude des données relatives à la mobilisation de l'eau et celles des variables de type socioéconomiques nous permet de mieux déceler leur effet sur la ressource en eau. Ces données ont été représentées par des graphiques en secteur (Fig. 39A,B,C,D et E) pour avoir une idée sur leur importance et leur distribution dans chaque commune de la région d'étude.

Les différentes variables socioéconomiques et qui représentent les variables d'entrée le (Input) pour le modèle sont la population (Pop), l'occupation du sol (Occup S), le tourisme (Tourism), le taux de raccordement aux réseaux AEP (Tx EP), le taux de raccordement aux réseaux des eaux usées (Tx EU), la dotation journalière en eau potable (Dot EP), le prix de l'eau (Prix E), la collection des taxes (Taxe), la consommation de l'eau pour l'agriculture (Con E Agr), Le rôle des femmes (Intég Fem), et les fuites d'eau (Perte E). La variable sortie (output) est la mobilisation de l'eau (Qext).





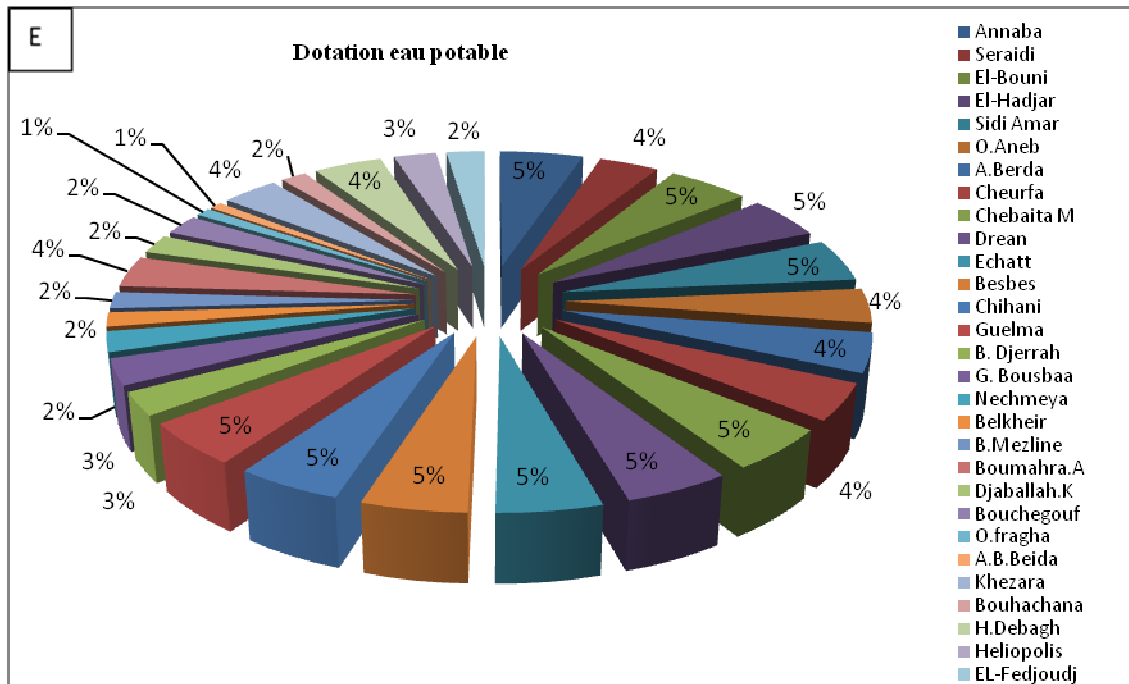


Fig.39. Diagrammes en secteurs de quelques variables de la catégorie socio-économie

III.1.1. Le réseau de neurone RNA

Pour une meilleure représentation de ses données le réseau MLP (Multilayer Perceptron) reste le mieux adapté et il peut être représenté par cette formule :

$$[Q_{ext}] = ANN \left[\begin{matrix} Pop, OccupS, Tourism, dotE, TxEP, TxEU, \\ PrixE, Taxe, ConE Agr, IntégrFem, PerteE \end{matrix} \right]$$

Le Tableau 12 présente les résultats des statistiques descriptives des variables de cette catégorie, et montre une asymétrie globalement positive mais également avec des coefficients d'asymétrie assez importants pour des variables : population, tourisme, occupation du sol, prix et taxe de l'eau et rôle de la femme qui ne s'ajustent pas à la loi Gaussienne. Le reste des variables (taux du raccordement des eaux potables, taux du raccordement des eaux usées, dotation journalière, Consommation d'eau en agriculture et les pertes des eaux) ont une faible asymétrie traduisant ainsi un bon ajustement à la loi normale.

Tab.12 statistiques des variables de la catégorie socio-économie

	Moy	Min	Max	Ec-Type	Coef.Var.	Assym
Pop	33648,69	4732	260123	55067,76	163,66	3,1
Tourism	3997,45	67	90200	16709,23	418	2,26
OccupS	9,28	0,1	78	21,33	229,8	2,82
TxEp	79,17	22	99	21,29	26,89	-1,46
TxEU	75,72	19	98	19,69	26,01	-1,22
DotEP	129,62	30	195	51,41	39,66	-0,43
PrixE	6,53	6,5	7	0,13	1,97	3,59
TaxE	7,03	7	7,5	0,13	1,83	3,59
ConEAg	1,88	0	8,48	2,09	111,28	1,34
IntégFem	11,55	1	67	15,54	134,52	2,47
PerteE	28,07	15	35	6,09	21,69	-0,43

Après avoir lancé le modèle, le meilleur RNA trouvé est le MLP à trois (03) couches et à six (06) noeuds cachés (Figure 40) avec bien sure un minimum de SOSE (Sum Of Square Error) de 0.0013 par rapport aux autres types d'ANN et un coefficient de détermination de 80% traduisant ainsi une bonne performance du modèle.

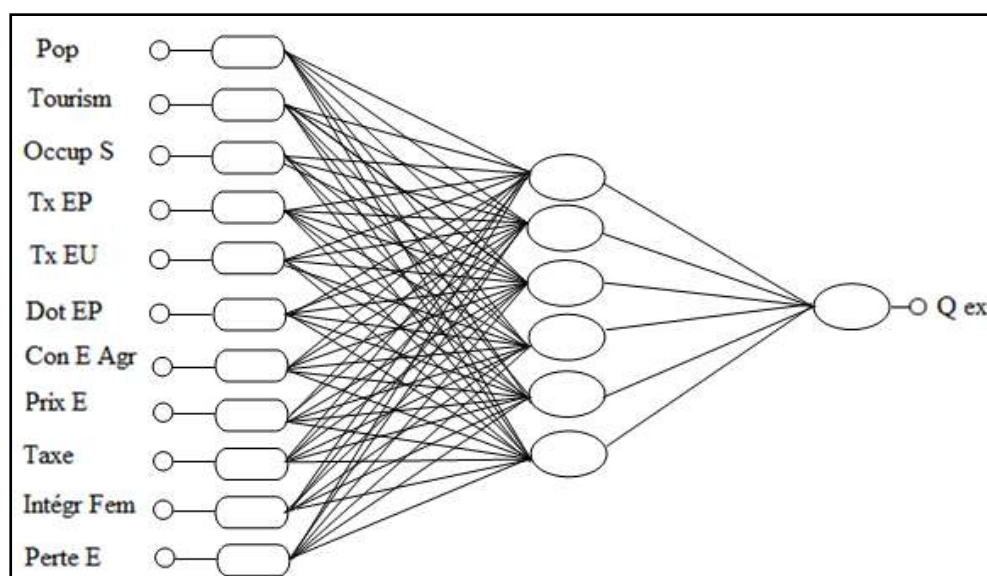


Fig.40. Le réseau MLP à trois couches des variables socioéconomiques

Légende :

- Qext** mobilisation de l'eau mesurée en hm³.an-1
- Pop** population mesurée en nombre
- Occup S** occupation du sol mesurée en hectares
- Tourism** nombre des hôteliers par an

Tx EP	taux de raccordement aux réseaux de l'AEP (%)
Tx EU	taux de raccordement aux réseaux des eaux usées (%)
Dot EP	dotation journalière de l'eau potable l.hab-1.j-1
Intég Fem	des femmes (%)
Perte E	pertes ou fuites d'eau (%)

La performance des trois phases : apprentissage, vérification et validation est respectivement de 0.982777, 1.00000, 100000, et cela indique un excellent accord entre la mobilisation de l'eau (Qext) mesurée et calculée.

La figure 41 illustre le diagramme du débit mesuré et celui calculé pour les données de la catégorie des variables socio-économiques simulés pour les trois phases de modélisation (l'apprentissage, le test et la validation). L'ensemble des points sont réparties statistiquement selon une droite ($y = 0.396x + 3.126$). Les résultats obtenus montrent une très bonne concordance expliquée par un coefficient de corrélation élevé pour la phase d'apprentissage, la phase de test et la phase de validation. Et un coefficient de détermination de 80%.

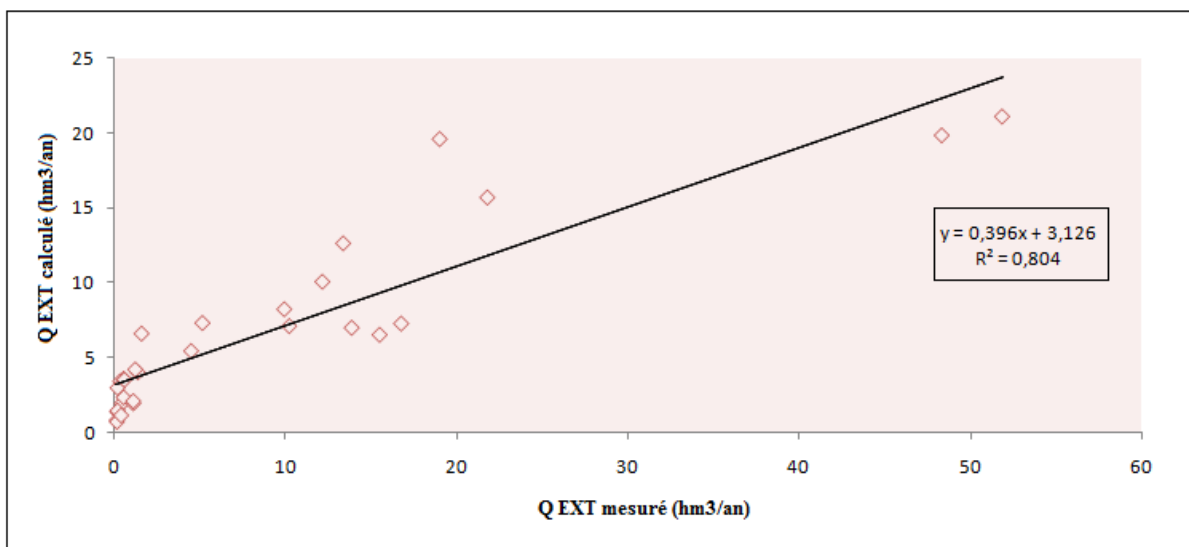


Fig.41. Graphique du Qext mesurés et Qext calculé par le modèle RNA

L'analyse de sensibilité du RNA des variables socio-économiques de l'apprentissage et de vérification (Tab. 15), indique que la population en premier lieu, l'intégration des femmes et en fin la dotation journalière sont les facteurs les plus importants influençant la mobilisation de l'eau Qext.

Tab. 13. Analyse de sensibilité pour le Qext des variables socio-économiques

	Pop	Tourism	OccupS	TxEp	TxEU	DotEP	PrixE	TaxE	ConEAg	IntégFem	PerteE
1.MLP 11-6-1	9,82	1,6	1,05	1,1	1,02	2,42	1,09	1,08	1,19	3,83	2,08
2.MLP 11-2-1	1,74	1,63	2,03	0,92	0,98	4,53	0,99	1	1,07	1,05	1,87
3.MLP 11-7-1	52,13	2,41	6,61	4,47	1,24	22,31	1,18	1,13	1,07	2,26	4,71
4.MLP 11-2-1	19,34	1,4	1,64	1,86	1,03	8,97	1	1	1,02	6,51	2,44
5.MLP 11-7-1	5,04	9,52	1015,8	1,94	2,08	5,13	1,1	1,1	1,07	24,03	3,11

III.1.2. La matrice de corrélation

Pour mieux comprendre la relation entre les variables socio-économique et la mobilisation des l'eau Qext, la matrice de corrélation s'avère jusqu'à présent le moyen le plus utile. Le tableau 14 montre que la variable mobilisation de l'eau présente une corrélation linéaire significative respectivement avec les variables population (pop), le degré d'intégration des femmes (Intég Fem), la dotation (Dot E), le tourisme (Tourism) et les pertes (Perte E) et qui sont classées selon l'ordre d'importance du coefficient de corrélation. Ainsi nous constatons que ces facteurs influencent beaucoup plus la mobilisation des eaux Qext ce qui semble confirmer les résultats de sensibilité dans le tableau 13 et de cela nous pouvons mettre le point sur le rôle primordiale de la femme dans la gestion de cette ressource.

La variable population a une corrélation positive avec plusieurs facteurs tels que le rôle de la femme ainsi que la dotation.

Les pertes ou les fuites se corrént significativement avec notamment le Qext, la dotation journalière, le taux de raccordement aux eaux potables et usées et en fin avec la population et le rôle de la femme.

Tab.14. Matrice de corrélation pour les variables socioéconomiques

	Q ext	Pop	Tourism	OccupS	TxEP	TxEU	DotEP	PrixE	TaxE	ConEAg	IntégFem	PerteE
Q ext	1	0,84	0,62	0,41	0,44	0,48	0,64	0,24	0,24	0,01	0,7	0,59
Pop	0,84	1	0,73	0,72	0,37	0,33	0,74	0,14	0,14	-0,11	0,91	0,41
Tourism	0,62	0,73	1	0,68	0,21	0,22	0,27	-0,06	-0,06	-0,17	0,73	0,23
OccupS	0,41	0,72	0,68	1	0,24	0,1	0,19	-0,07	-0,07	-0,28	0,77	0,28
TxEP	0,44	0,37	0,21	0,24	1	0,91	0,59	0,24	0,24	0,04	0,41	0,59
TxEU	0,48	0,33	0,22	0,1	0,91	1	0,62	0,3	0,3	-0,03	0,3	0,61
DotEP	0,64	0,74	0,27	0,19	0,59	0,62	1	0,27	0,27	0,08	0,48	0,66
PrixE	0,24	0,14	-0,06	-0,07	0,24	0,3	0,27	1	1	0,3	0,33	0,32
TaxE	0,24	0,14	-0,06	-0,07	0,24	0,3	0,27	1	1	0,3	0,33	0,32
ConEAg	0,01	-0,11	-0,17	-0,28	0,04	-0,03	0,08	0,3	0,3	1	0,02	-0,24
IntégFem	0,7	0,91	0,73	0,77	0,41	0,3	0,48	0,33	0,33	0,02	1	0,41
PerteE	0,59	0,41	0,23	0,28	0,59	0,61	0,66	0,32	0,32	-0,24	0,41	1

III.1.3. L'analyse en composante principale ACP

L'analyse en composante principale ACP, nous permet de classer les variables, de regrouper les observations ayant des caractéristiques similaires et de les représenter graphiquement pour avoir une meilleure compréhension de leur corrélation.

L'ACP des variables socio-économique montre que le premier facteur F1 présente le plus grand pourcentage d'inertie 44.42 % et que le second facteur F2 représente 20.92 % de l'information donnée par cette méthode tableau 15.

Tab.15. Poids factoriels des variables socio-économiques

	Factor 1	Factor 2
Q ext	-0,86	0,08
Pop	-0,86	0,39
Tourism	-0,67	0,56
OccupS	-0,61	0,59
TxEP	-0,69	-0,3
TxEU	-0,67	-0,37
DotEP	-0,73	-0,25
PrixE	-0,39	-0,74
TaxE	-0,39	-0,74
ConEAg	0,05	-0,47
IntégFem	-0,86	0,23
PerteE	-0,72	-0,21

La figure 42 représentant le cercle des variables socio-économiques montre un groupe corrélé négativement avec l'axe F2 (20.95) qui est formé par les variables : population (Pop), rôle de la femme (Intég Fem), dotation journalière (Dot E), taux de raccordement des eaux potables et des eaux usées, le tourisme ainsi que le débit extrait (Qext). Tandis que l'occupation de sol et le prix et la taxe de l'eau semblent avoir un effet plus ou moins négligeable sur le Qext. Le deuxième facteur F1 (40.22%) représente une corrélation négative du groupe formé de l'alimentation en eau d'irrigation, la taxe et le prix de l'eau. Nous notons une corrélation plus ou moins faible entre la consommation en eau pour l'irrigation et la quantité d'eau mobilisée Qext cette situation peut être expliquée dans cette par l'intervention du facteur « fuite en eau » qui représente non seulement les pertes à partir des réseaux d'alimentation mais aussi en raison de l'utilisation illicite des eaux (Aoun-Sebaiti, 2010).

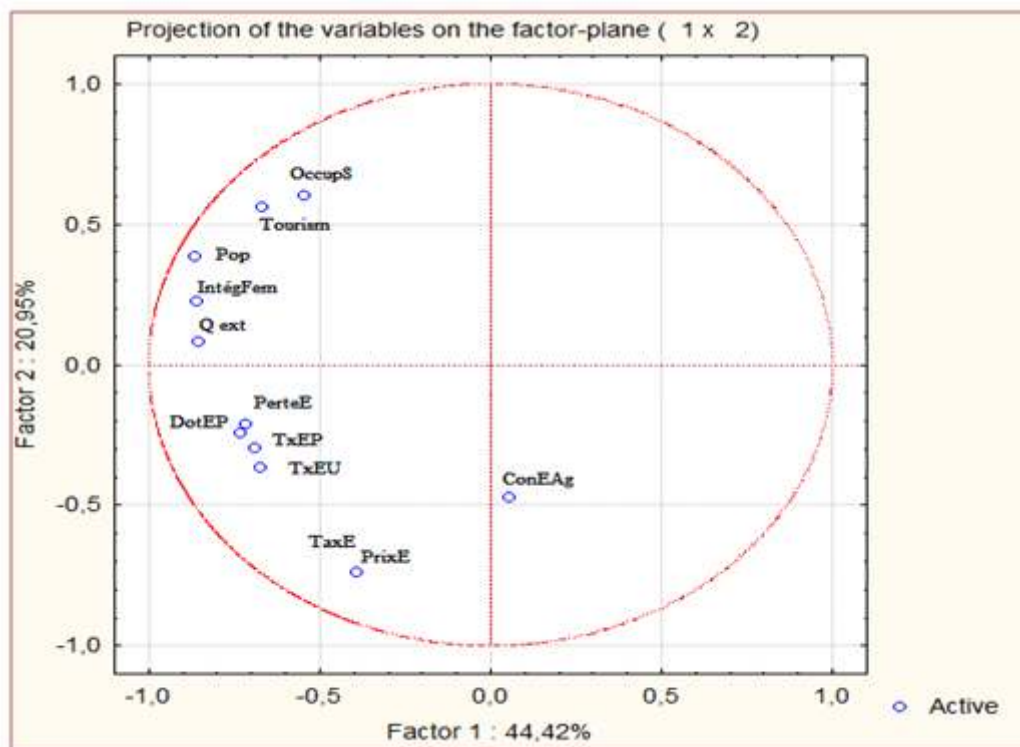


Fig.42. Analyse en Composantes Principales : variable socio-économie

La projection graphique des individus de la catégorie des variables socio-économiques (figure 43), montre que les communes d'Annaba, d'El Bouni et celle de Guelma sont les communes qui représentent le nombre de population le plus élevé, le taux d'intégration de la femme et l'occupation du sol, celles de Sidi Ammar et El Hadjar dans lesquelles se localisent la majorité des unités industrielles dans la région et qui ont un prix d'eau et la taxe plus élevée que les autres communes représentent bien ces deux variables. La commune de

Bouchegouf, de A.B Beida, Djaballah K, O. Fragma et Belkheir sont des communes à vocation agricole de fiat quelle coïncident avec la consommation des eaux en agriculture.

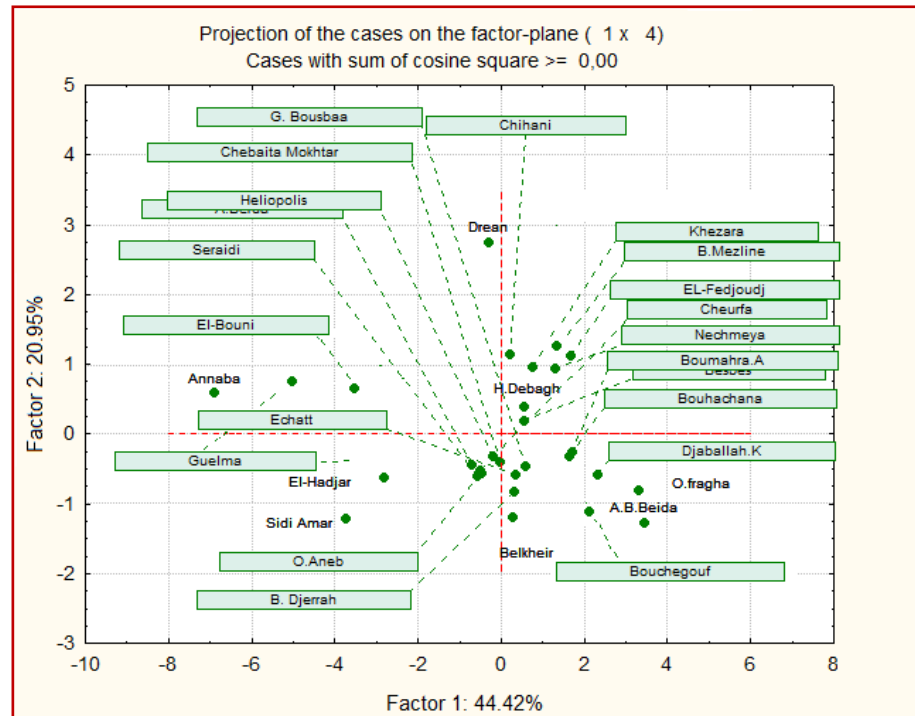
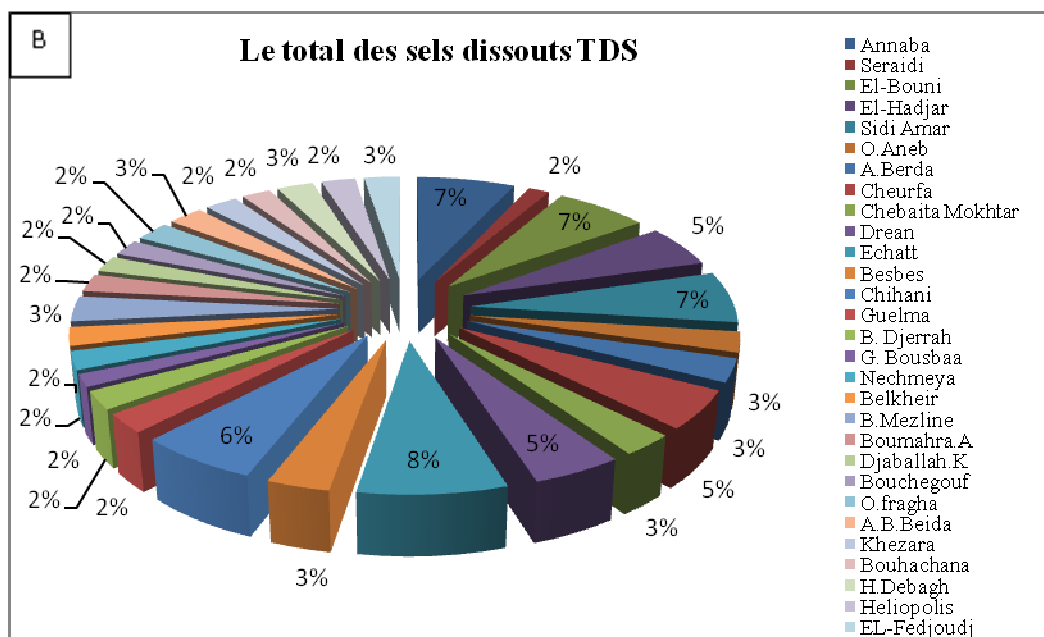
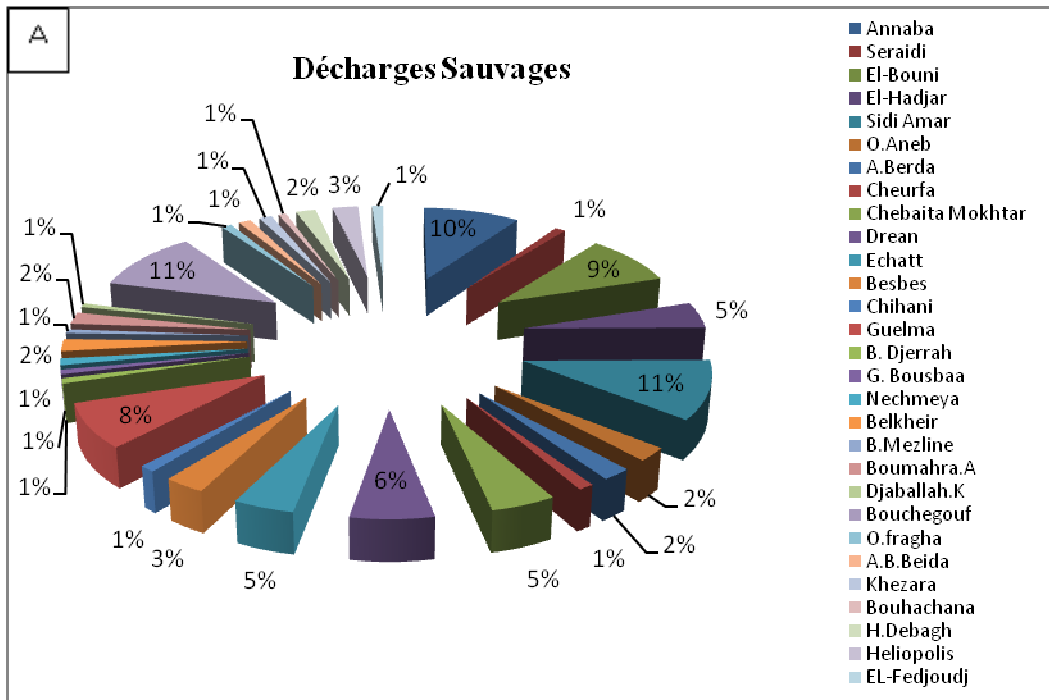


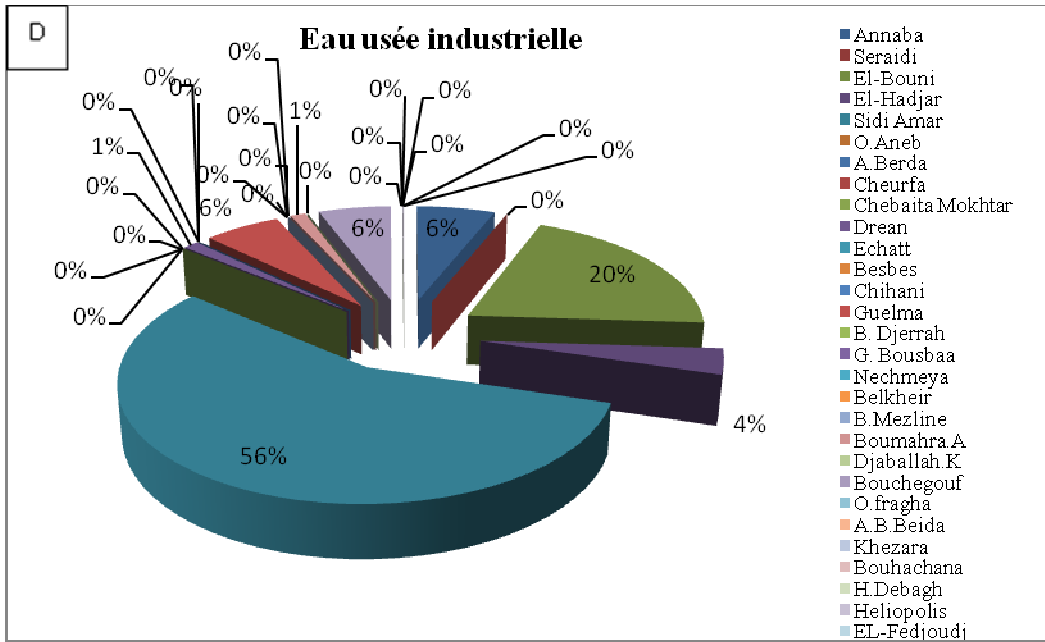
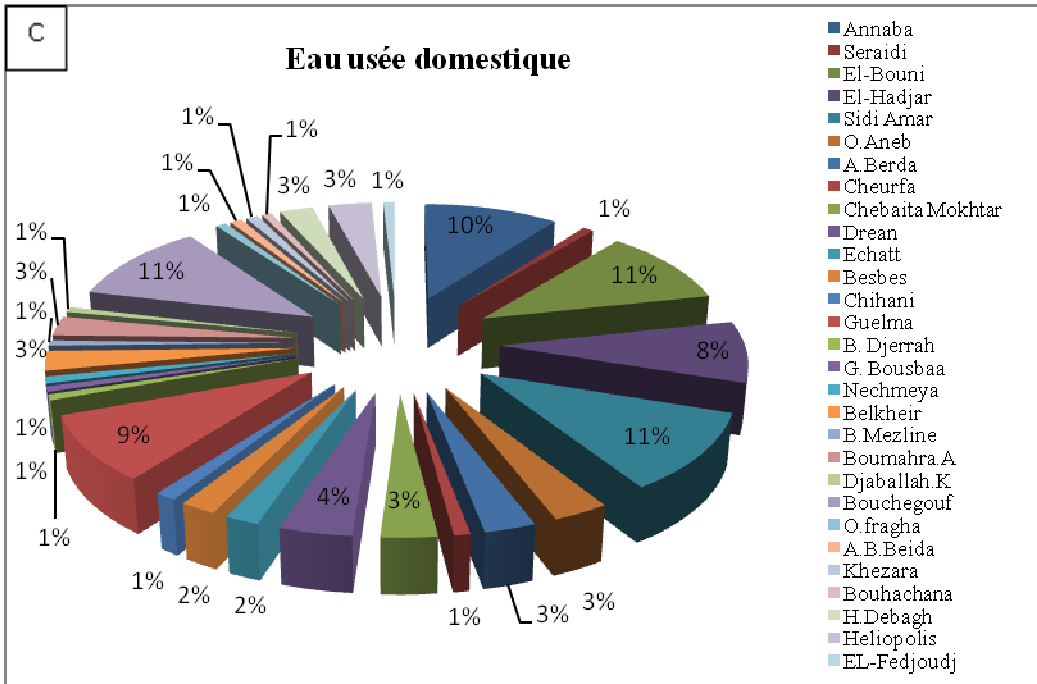
Fig.43. représentation graphiques des individus de la catégorie : variable socio-économie

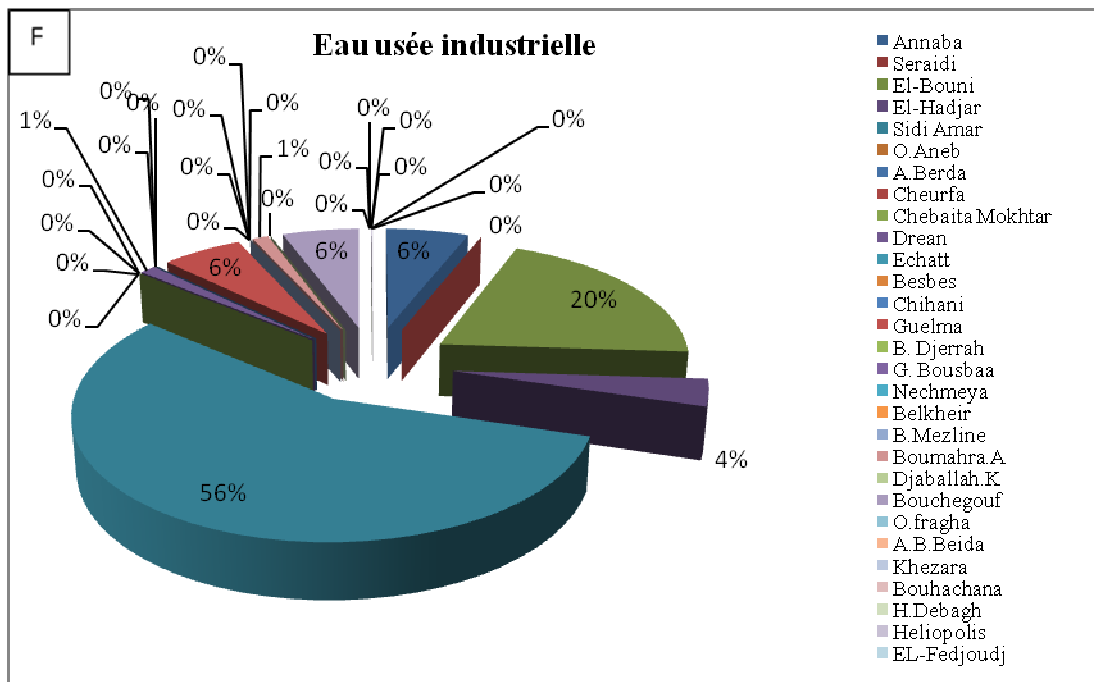
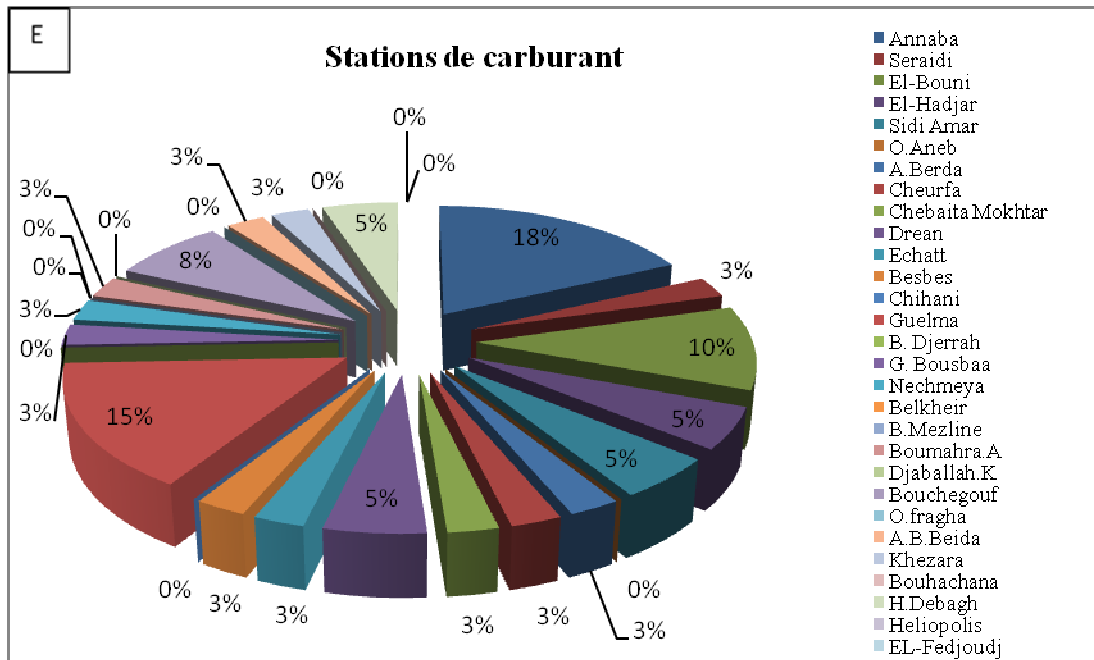
III.2. Impact Des Variables des Pression sur La Ressource En Eau

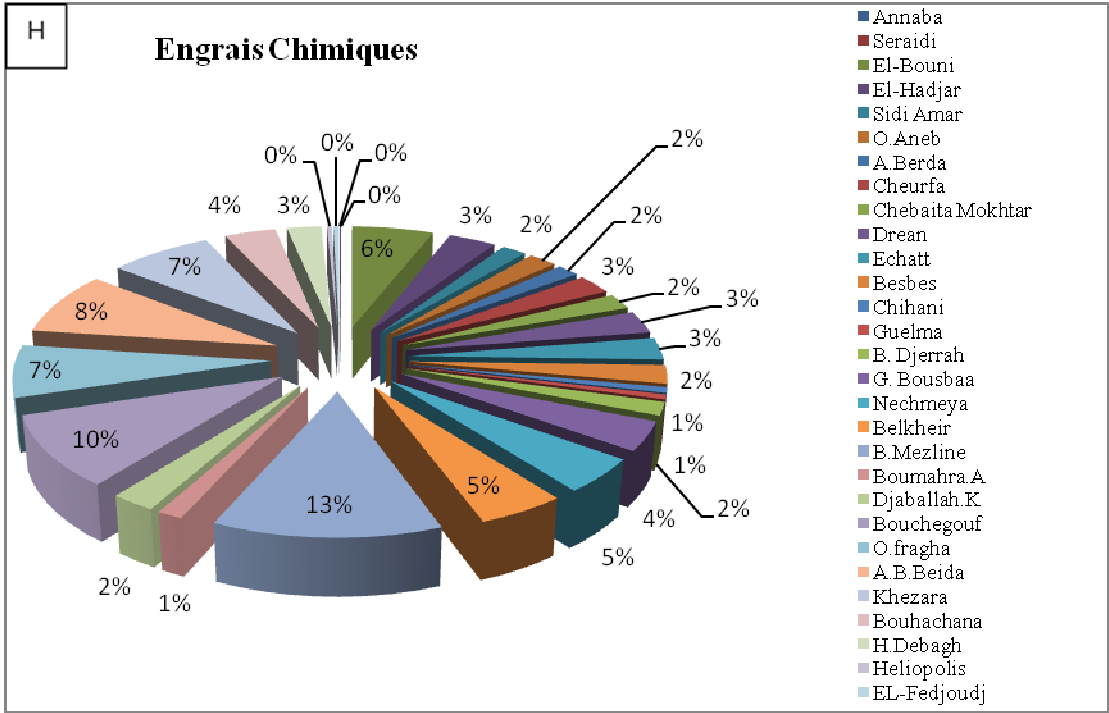
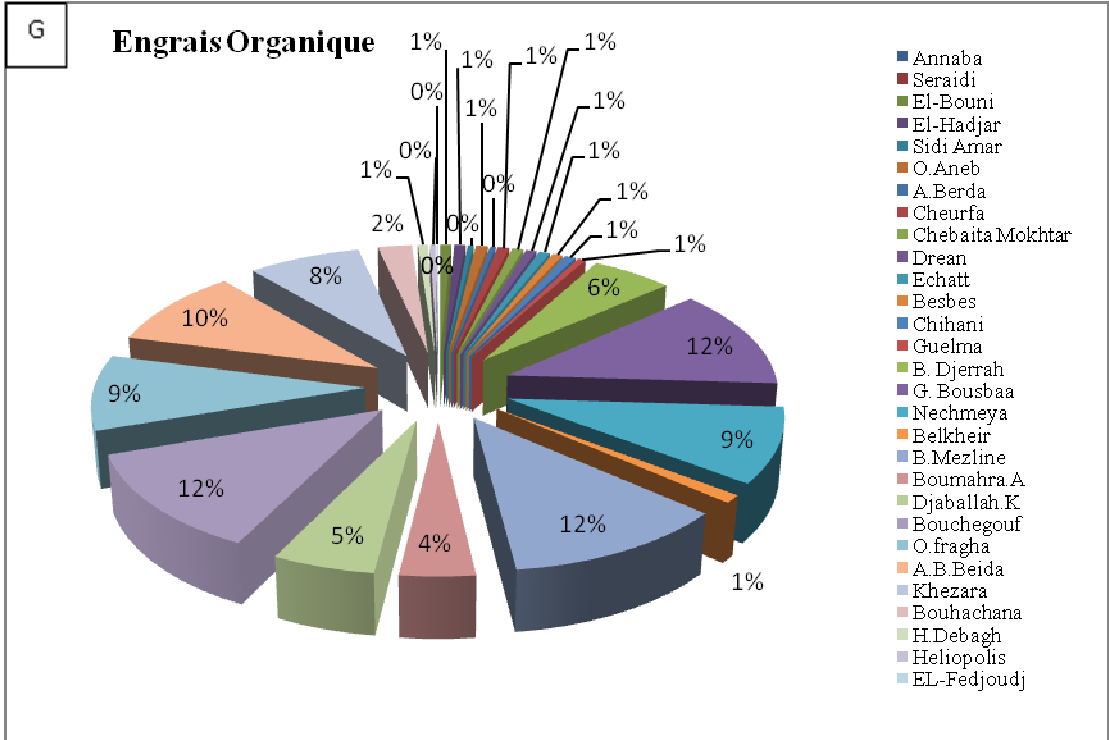
Dans cette catégorie qui exerce une pression sur la ressource en eau comme son nom l'indique, les variables de pollution ainsi que les sels dissous totaux (TDS) vont être analysés par les mêmes méthodes utilisées précédemment. Ces variables sont les suivantes : les déchets solides (Dech S), les eaux usées domestiques (E usée Dom), les pesticides (Pest), les engrais chimiques (Engr Chim), les engrais organiques (Engr Org), les stations-services (Stat Ess), les eaux usées industrielles (E usée Ind).

Les différentes données de cette catégorie sont représentées par les diagrammes en secteur dans la figure 44 (A,B,C,D,E,F,G,H et I).









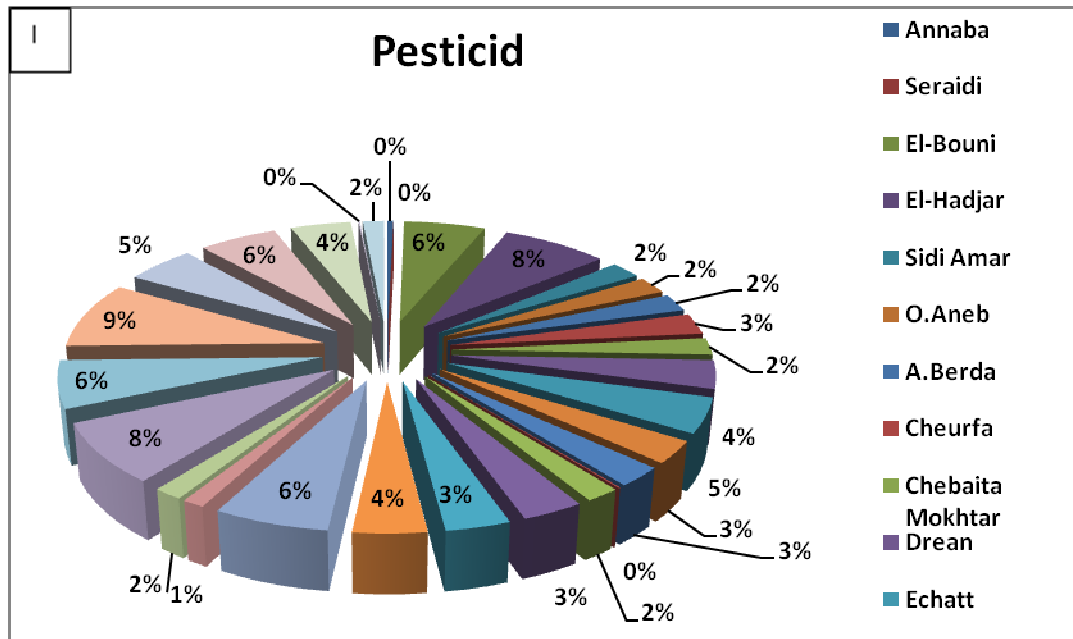


Fig.44. Diagrammes en secteurs des variables de pollution et de pression

III.2.1. Le réseau de neurone RNA

Traduisant la source de pollution de la ressource en eau, Les variables de pression, sont également introduites dans le logiciel pour faire sortir un modèle qui va nous aider a comprendre la relation qui semble exister entre le total des sels dissous (TDS) qui forme la sortie (Output) ainsi que les variables (Input) et qui sont : les décharges sauvages(Déch Sauv), l'eau use domestique (EU Dom), pesticide (Pesticid), engrais chimiques (Eng ch), engrais organiques (Eng Org), stations de carburant (St Carb) ainsi que les eaux uses industrielles (EU Ind).

Les résultats des statistiques descriptives des variables de cette catégorie sont mentionnés dans le tableau 18. Les valeurs ont une asymétrie positive avec des coefficients faibles pour la globalité des variables traduisant ainsi l'ajustement des ces derniers à la loi normale. Cependant, les variables des Engrais organiques (EngrOrg) ainsi que celles des stations de carburons (StCrab) présentent des valeurs importantes de l'asymytrie et montrent ainsi ler non ajustemen à la loi de Gauss.

Tab.16. Statistiques des variables de la catégorie pollution

	Moy	Min	Max	Ec type	Coef.Var.	Assym
TDS	887,96	387,93	1992,58	467,5	52,65	1,19
DécSauv	24,58	5,1	78,6	23,6	96,02	1,28
EUDom	3,54	0,74	11,4	3,68	104,13	1,32
Pesticid	1,9	0,01	4,8	1,32	69,43	0,54
EngrCh	139,62	1,5	506,5	123,38	88,37	1,36
EngrOrg	904,76	0	3252	1127,33	124,6	1,12
StCarb	1,34	0	7	1,74	129,22	2,06
EUInd	0,23	0	3,81	0,74	317,1	4,45

- Le réseau neuronal MLP de cette analyse sera représenté par l'équation suivante :

$$[TDS] = ANN[DechS, EUDom, Pest, Engrorg, Engrch, StCarb, EUInd,]$$

Ainsi, Le modèle optimal pour ces variables est le MLP (7-6-1) à trois couches avec six nœuds cachés (fig.45) qui présente un taux d'erreur SOSE de 0.008 et un de détermination R^2 de 81%.

Les coefficients de corrélation 0.801928 pour l'apprentissage, 0.967175 pour le teste et 0.906655 pour la validation.

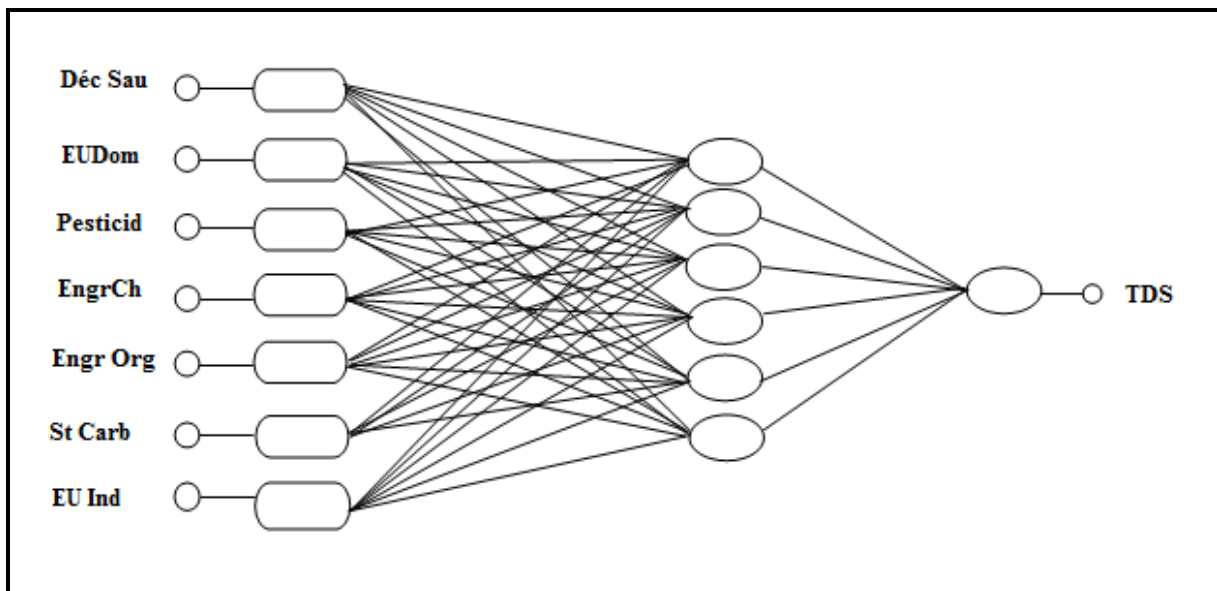


Fig.45. Réseau MLP à trois couches des variables sources de pollution

Légende:

- TDS Le total des sels dissous (ppm)
- Dech Sauv Les décharges sauvages en (i,j-1)

E usée Dom	Les eaux usées domestiques exprimées (hm3.an-1)
E usée Ind	Les eaux usées industrielles exprimées en (hm3.an-1)
Pesticid	Les pesticides
St Carb	Les stations de carburant en nombre

La figure 46 qui représente le graphique de régression du TDS simulée par le MLP (7-6-1), et celui mesuré dans la catégorie de pollution montre que l'ensemble des points simulés pour les trois phases d'analyse sont alignés selon une droite ($y = 0.696x + 198.4$), ce qui reflète une bonne concordance expliquée par un coefficient de corrélation élevé pour la phase d'apprentissage, la phase de test et la phase de validation.

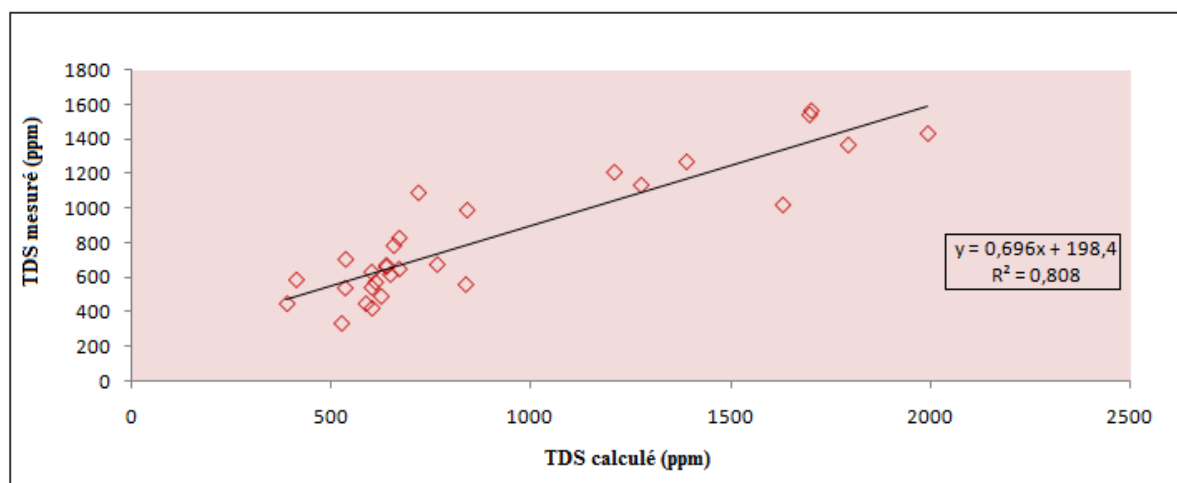


Fig.46. TDS mesurés et TDS calculés par le modèle RNA

L'analyse de sensibilité des variables de pression lors de l'apprentissage et de vérification, montre que les décharges sauvages ont le plus d'influence sur le (TDS), suivies ensuite par les engrais chimiques, les eaux usées domestiques, les pesticides, les eaux usées industrielles, et enfin les engrais organiques puis les stations de carburant

Tab.17. Analyse de sensibilité pour le TDS des variables de pression

	DécSauv	EUDom	Pesticid	EngrCh	EngrOrg	StCarb	EUInd
1.MLP 7-2-1	1,830235	1,857628	2,016892	1,172604	2,533274	1,094641	1,06917
2.MLP 7-3-1	2,434621	3,630007	2,07541	1,126991	2,000804	1,232202	1,146451
3.MLP 7-1-1	1,937077	1,957414	1,562403	1,138289	1,787044	1,166011	1,178533
4.MLP 7-6-1	5,385535	2,991529	2,938539	3,112136	1,483446	1,067423	2,431674
5.MLP 7-1-1	1,889607	1,378831	1,940855	1,257564	2,689745	1,068063	1,068019

III.2.2. La matrice de corrélation

Le tableau 20 montre que le TDS est moyennement et positivement corrélé avec les décharges sauvages ainsi que les eaux usées domestiques et industrielles et il présente une corrélation négativement avec les engrais organiques à cause probablement de leur contribution faible dans le TDS des eaux. quelques corrélations semblent être significatives entre par exemple les décharges sauvages et les eaux usées domestiques et entre les engrais chimiques, organiques et les pesticides. On note également une bonne corrélation entre les stations de carburant et décharges sauvages ainsi que les eaux usées domestiques.

Tab.18. Matrice de corrélation pour les variables de pression

	TDS	DécSauv	EUDom	Pesticid	EngrCh	EngrOrg	StCarb	EUInd
TDS	1	0,515009	0,461158	0,059836	-0,149737	-0,426044	0,388059	0,454948
DécSauv	0,515009	1	0,949389	0,03086	-0,031757	-0,213272	0,776634	0,634835
EUDom	0,461158	0,949389	1	0,062389	-0,034591	-0,216836	0,784831	0,630409
Pesticid	0,059836	0,03086	0,062389	1	0,813836	0,515465	-0,103543	-0,029886
EngrCh	-0,149737	-0,031757	-0,034591	0,813836	1	0,761615	-0,130695	-0,054193
EngrOrg	-0,426044	-0,213272	-0,216836	0,515465	0,761615	1	-0,189097	-0,172602
StCarb	0,388059	0,776634	0,784831	-0,103543	-0,130695	-0,189097	1	0,307604
EUInd	0,454948	0,634835	0,630409	-0,029886	-0,054193	-0,172602	0,307604	1

III.2.3. L'analyse en composante principale ACP

L'ACP des variables de pollution montre que le premier facteur F1 présente le plus grand pourcentage d'inertie 44.42 % et que le second facteur F2 représente 20.92 % de l'information donnée par cette méthode tableau 17.

Tab.19. Poids factoriels des variables de pression

	Factor 1	Factor 2
TDS	-0,68	-0,03
DécSauv	-0,91	-0,29
EUDom	-0,9	-0,3
Pesticid	0,19	-0,86
EngrCh	0,32	-0,91
EngrOrg	0,5	-0,71
StCarb	-0,79	-0,15
EUInd	-0,7	-0,18

Le cercle des variables de pollution (fig.47), montre l'existence de deux groupes, le premier est négativement corrélé avec le facteur 2 qui représente 44.97% de l'information totale, ce groupe représente les variable d'origine agricole. Le second groupe de variables : la pollution urbaine, industrielle, les stations de carburant et significativement lié au TDS est lui aussi corrélé négativement a deuxième facteur F1 (28.80 %).

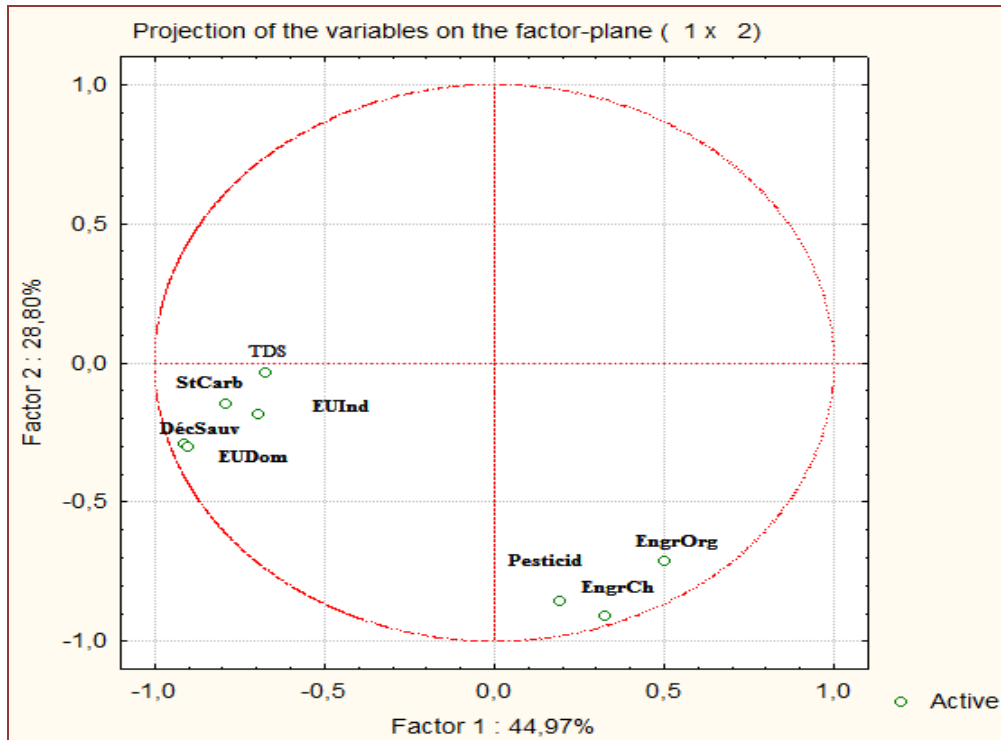


Fig.47. Analyse en Composantes Principales : variable de pollution

La projection graphique des individus de cette catégorie (fig.48), montre que les communes d'Annaba, Sidi Ammar, El HAdjar et El Bouni représentent le groupe de pollution urbaine et industrielle. La commune d'Annaba représente également avec Guelma le facteur TDS.

Les communes de Bouchegouf, Oued fragha, Beni Mezline et Ain Ben Beida reflètent par leur position dans ce graphe par rapport a cercle de l'ACP leur caractère à vocation agricole. Les autres communes sont mal représenté par cette projection du fait de leur postions centrale dans ce graphique.

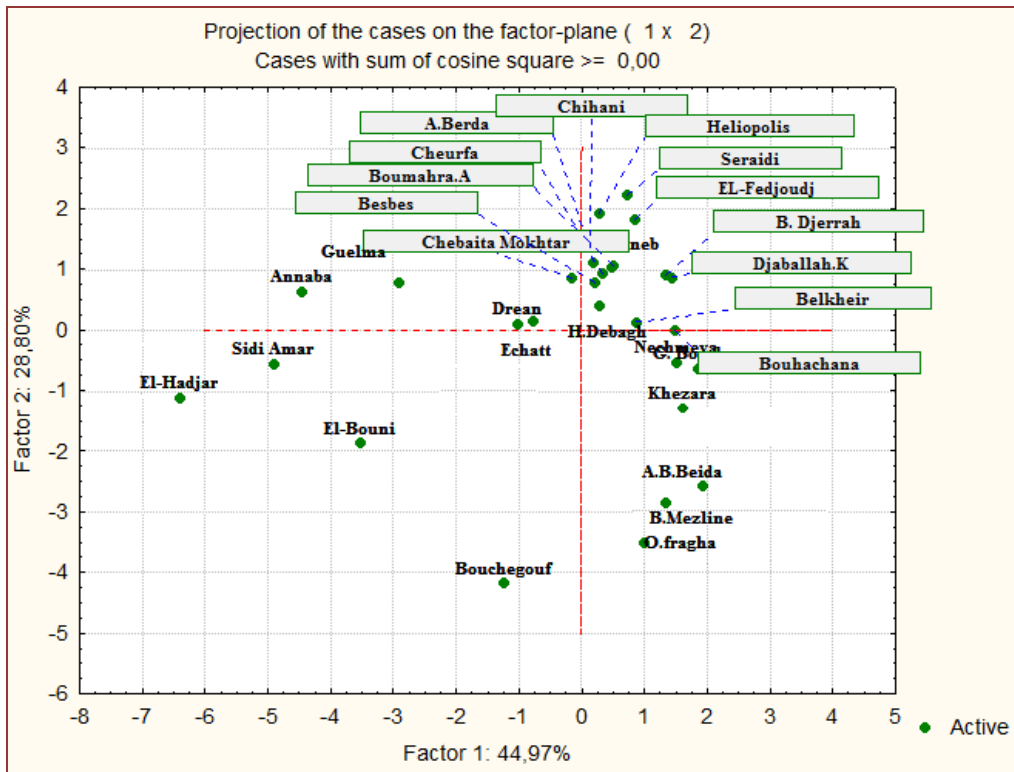
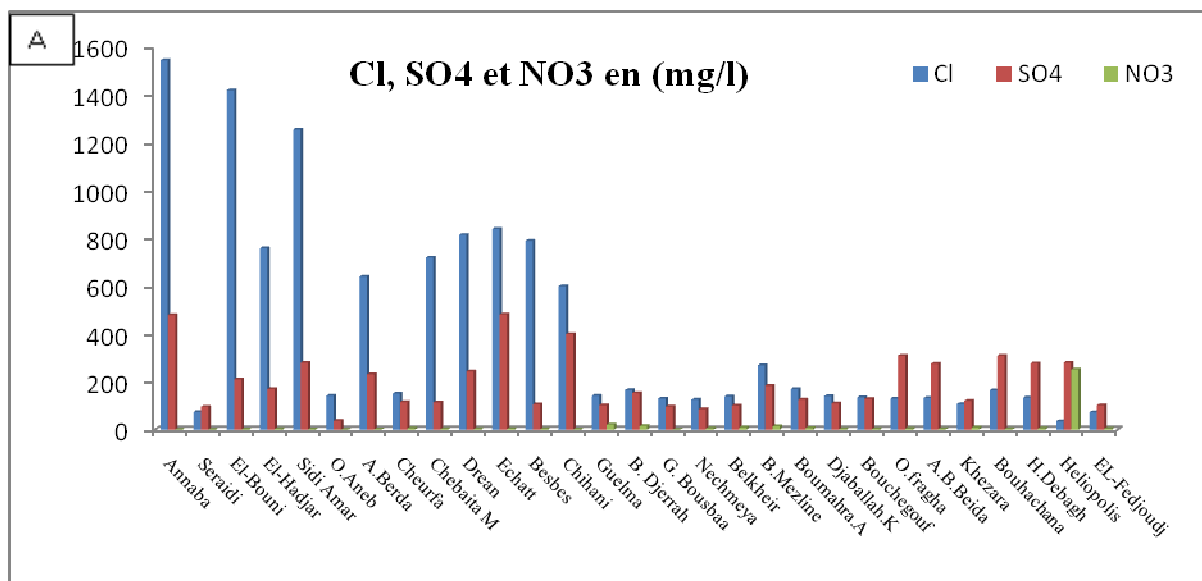


Fig.48. représentation graphiques des individus de la catégorie : variable de pollution

III.3. Impact Des Variables D'état Sur La Ressource En Eau

Les variables d'état représentent les éléments physico-chimiques qui caractérisent les eaux souterraines de la région d'étude. Les histogrammes dans la figure 49 A et B, montrent leur répartition par commune.



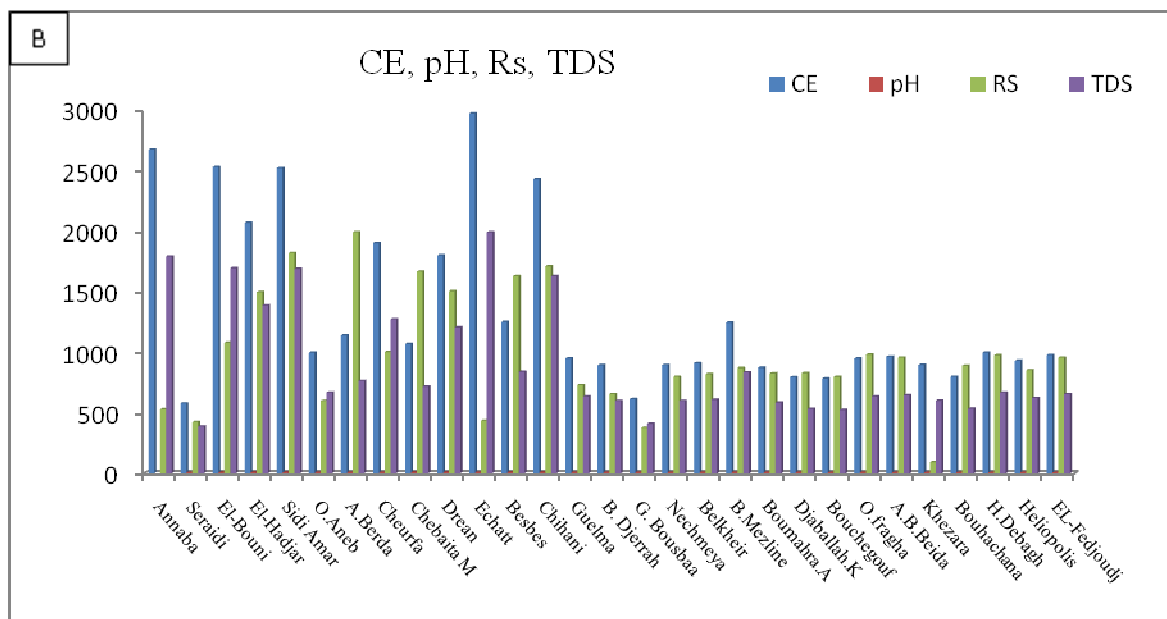


Fig.49. histogrammes des paramètres physico-chimiques des eaux

III.3.1. Le réseau de neurone RNA

Les données relatives à la qualité des eaux souterraines qui sont considérées comme de variables d'état pour notre modèle, ont été étudiées pour montrer leur influence sur la ressource en eau. Les différentes variables d'état et qui représentent les variables « input » pour le modèle sont : le calcium (Ca), le magnésium (Mg), le sodium (Na), le potassium (K), les chlorures (Cl), les sulfates (SO₄), les bicarbonates (HCO₃), les nitrate (NO₃), le potentiel d'hydrogène (pH), la conductivité électrique (Ce) et le résidu sec (Rs). La variable considérée comme sortie du modèle « Output » c'est le débit extrait (Q ext).

- la formule qui représente le modèle de réseau de neurone artificiel MLP, sera donc donnée comme suit :

$$[Q_{ext}] = ANN[Ca, Mg, Na, K, Cl, SO_4, HCO_3, NO_3, pH, Ce, RS, TDS]$$

Le tableau 21 montre que toutes les variables d'état ont des Coefficients d'asymétrie faibles et positifs (Asymétrie à droite) à l'exception du calcium, potassium et des nitrates qui ont des valeurs qui dépassent 2 et ne sont donc pas distribuées normalement.

Tab.20. statistiques des variables de la catégorie Etat de l'eau

	Moy	Min	Max	Ec- Type	Coef.Var.	Assym
Qext	15,84	3,26	51,86	13,09	82,62	1,81
Ca	146,03	52,9	385	69,44	47,55	2,02
Mg	44,44	13	125	30,2	67,97	1,48
Na	217,67	40,2	593	185,18	85,08	0,89
K	33,37	1,9	301	77,65	232,73	2,61
Cl	412,11	35	1545	435,09	105,58	1,36
SO4	197,65	38	482	118,17	59,79	1,04
HCO3	219,5	79	380	87,53	39,88	0,02
NO3	13,5	0,41	252	46,15	341,74	5,28
CE	1325,31	579	2974	697,76	52,65	1,19
pH	7,64	7,01	8,6	0,41	5,33	0,46
RS	976,46	93	1994	469,33	48,06	0,56
TDS	887,96	387,93	1992,58	467,5	52,65	1,19

Après avoir lancé l'analyse, le meilleur RNA obtenu pour cette catégorie de variables est le MLP à trois couches et à trois nœuds cachés (12-3-1) et un minimum de SOSE (Sum Of Square Error) de 0,005481 par rapport aux autres types d'ANN indiquant ainsi que les données des variables de cette catégorie appartiennent à la même population. Le coefficient de détermination pour les trois phases est égale à 82 % ce qui traduit une bonne corrélation entre la Q ext mesuré et calculé par le modèle. (Fig.50).

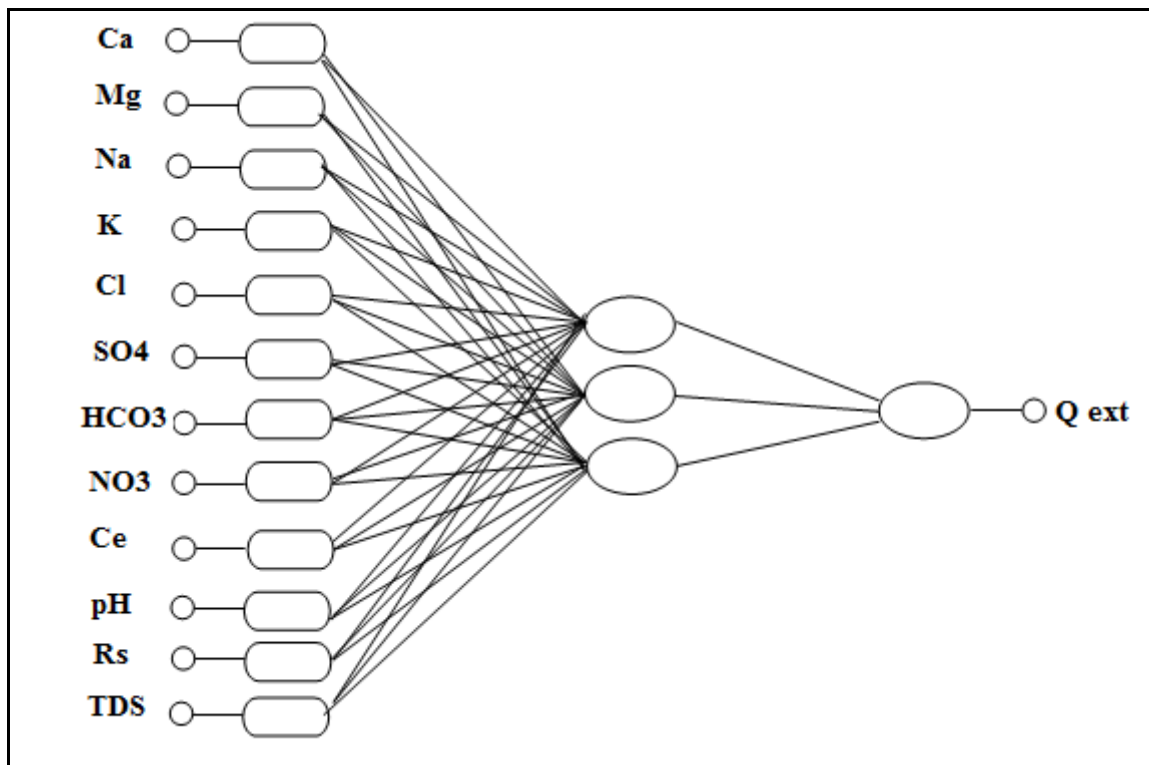


Fig.50. Le réseau MLP à trois couches des variables d'état

Les coefficients de corrélation des trois phases : apprentissage, vérification et validation pour ce MLP sont respectivement de. 0.849675, 0.942673, 0.932561, et cela indique un excellent accord entre la mobilisation de l'eau (Q_{ext}) calculée et mesurée.

La figure 51 représente le diagramme de données de variables de l'état de l'eau simulées pour les trois phases de modélisation (l'apprentissage, le test et la validation) et à partir duquel nous pouvons constater que la globalité des points se répartit selon une droite ($y = 0.773 x + 3.774$) traduisant ainsi une bonne corrélation marquée par des coefficients de corrélation élevés pour les trois phases d'analyse.

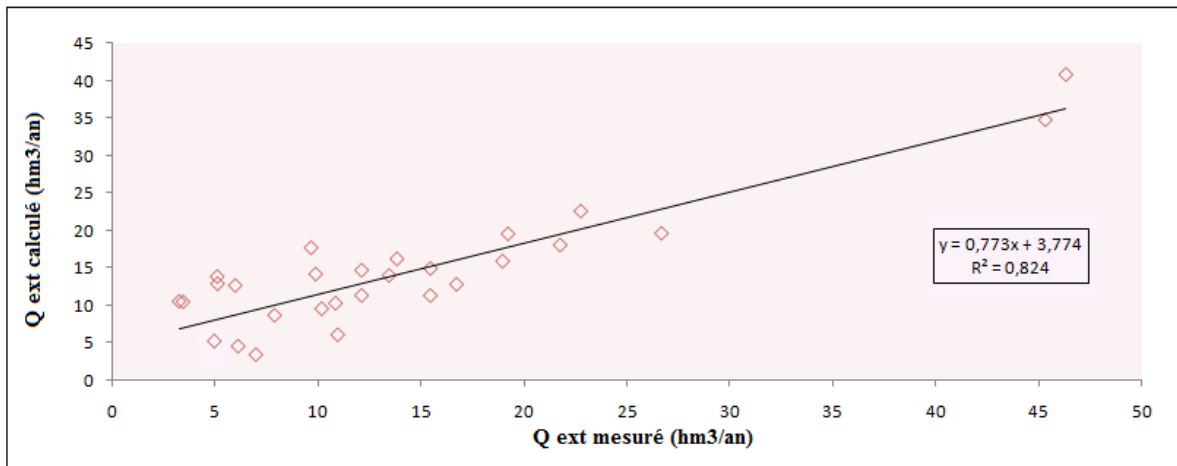


Fig.51. Débits mesurés et débits calculés par le modèle RNA pour mes variables D'état de l'eau

L'analyse de sensibilité du modèle RNA aux variables d'état au cours de l'apprentissage et de vérification, par rapport au débit mobilisé (Tab. 21), indique que le Magnésium est le plus influençant le Qext suivi par les Nitrates, le pH, le Calcium et enfin les Bicarbonates.

Tab.21. Analyse de sensibilité pour le Q ext des variables d'état de l'eau

	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO4	HCO3	NO3	CE	pH	RS	TDS
1.MLP 12-6-1	0,98	1	0,99	1,12	1	1,4	1	1,25	1,03	1,57	1,1	1,03
2.MLP 12-9-1	1	1,01	0,98	1,01	1	1,28	1	1,18	1,02	1,28	1,01	1,02
3.MLP 12-3-1	0,54	3,27	1	0,22	0,27	0,15	1,28	1,67	1,33	1,57	1,06	0,32
4.MLP 12-6-1	0,95	0,96	1,01	1,11	1	1,42	1	1,16	1,04	1,56	1,1	1,04
5.MLP 12-5-1	0,98	1	0,99	1,02	1	1,23	1	1,15	1,04	1,31	1,04	1,03

III.3.3. La matrice de corrélation

Les valeurs de la corrélation dans le tableau 22, traduisent une faible concordance entre le débit d'eau mobilisé Qext et les différents éléments qui caractérisent les eaux. Cependant, nous pouvons constater que ces variables sont bien corrélées deux à deux, tel que les chlorures qui sont positivement et significativement corrélés avec le sodium, la conductivité électrique et avec le TDS, et moyennement avec le pH et Rs. Les sulfates sont moyennement corrélés avec le calcium, la conductivité électrique et le TDS. Concernant le sodium, on note également qu'il est corrélé positivement avec le pH, la conductivité électrique, le résidu sec et le TDS.

Tab.22. Matrice de corrélation pour les variables socioéconomiques

	Qext	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO4	HCO3	NO3	CE	pH	RS	TDS
Qext	1	-0,19	0,06	0,28	-0,1	0,3	-0,16	-0,22	0,11	0,25	0,05	0	0,25
Ca	-0,19	1	0,12	0,21	0,15	0,37	0,59	0,43	-0,19	0,43	0,11	0,39	0,43
Mg	0,06	0,12	1	0,31	-0,09	0,31	0,25	-0,33	0,55	0,26	0,49	0,39	0,26
Na	0,28	0,21	0,31	1	0,05	0,91	0,24	-0,4	-0,17	0,83	0,71	0,58	0,83
K	-0,1	0,15	-0,09	0,05	1	-0,05	-0,02	0,36	-0,07	0,11	-0,16	-0,23	0,11
Cl	0,3	0,37	0,31	0,91	-0,05	1	0,35	-0,52	-0,21	0,8	0,66	0,62	0,8
SO4	-0,16	0,59	0,25	0,24	-0,02	0,35	1	-0,37	0,15	0,58	0,32	0,25	0,58
HCO3	-0,22	0,13	-0,23	-0,4	0,36	-0,52	-0,37	1	-0,04	-0,38	-0,4	-0,34	0,55
NO3	0,11	-0,19	0,55	-0,17	-0,07	-0,21	0,15	-0,04	1	-0,13	0,08	-0,09	-0,13
CE	0,25	0,43	0,26	0,83	0,11	0,8	0,58	-0,38	-0,13	1	0,56	0,41	1
pH	0,05	0,11	0,49	0,71	-0,16	0,66	0,32	-0,4	0,08	0,56	1	0,56	0,56
RS	0	0,39	0,39	0,58	-0,23	0,62	0,25	-0,34	-0,09	0,41	0,56	1	0,41
TDS	0,25	0,43	0,26	0,83	0,11	0,8	0,58	0,55	-0,13	1	0,56	0,41	1

III.3.4. L'analyse en composante principale ACP

L'ACP des variables qui représentent l'état de l'eau montre que le premier facteur F1 présente le plus grand pourcentage d'inertie 45.55 % et que le second facteur F2 représente 15.18 % de l'information donnée par cette méthode tableau 24.

Tab.23. Poids factoriels des variables de l'état de l'eau

	Factor 1	Factor 2
Qext	-0,13	-0,14
Ca	-0,44	0,6
Mg	-0,45	-0,51
Na	-0,89	0,02
K	0,06	0,56
Cl	-0,92	0,03
SO4	-0,57	0,19
HCO3	0,54	0,44
NO3	0,06	-0,63
CE	-0,91	0,22
pH	-0,75	-0,27
RS	-0,67	-0,1
TDS	-0,91	0,22

Figure 52 qui de l'état des eaux minéralisation corrélé (44.55%) ce groupe est

représente le cercle des variables montre l'existence d'un groupe de négativement avec le facteur F1 formé par le TDS, Ce, Cl, Na, Rs,

pH, SO4 et d'un degré moins les HCO3. La forte corrélation entre le Cl et le Na semble confirmer l'intrusion marine et ce qui va être également confirmé par la projection des

individus. Nous constatons une opposition entre le K et NO₃ par rapport à l'axe F2 (15.18%) le premier est lui y corrélé positivement et le second négativement cette opposition peut être expliquée par l'origine différente de chacun des deux. Le Qext n'est pas bien corrélé à la globalité des éléments se qui traduit sa faible sensibilité envers cette variables, mais notons quand même sa corrélation avec le NO₃ et le Mg.

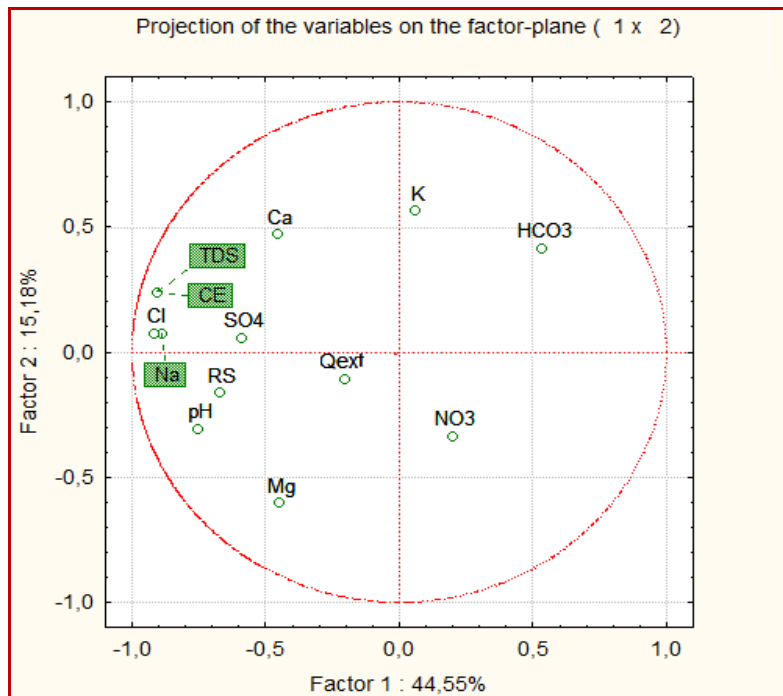


Fig.52. Analyse en Composantes Principales : variable d'état

La projection graphique des individus de cette catégorie (fig.53), montre que les communes d'Annaba, d'El Bouni, de Sidi Ammar, Echatt, Chihani et El Hadjar coïncident avec le groupe du minéralisation dans le cercle d'ACP, notons que la position de la commune d'Annaba sur ce graphique coïncide également avec les deux éléments les chlorures et le sodium se qi semble confirmer l'hypothèse de l'intrusion marine dans cette région.

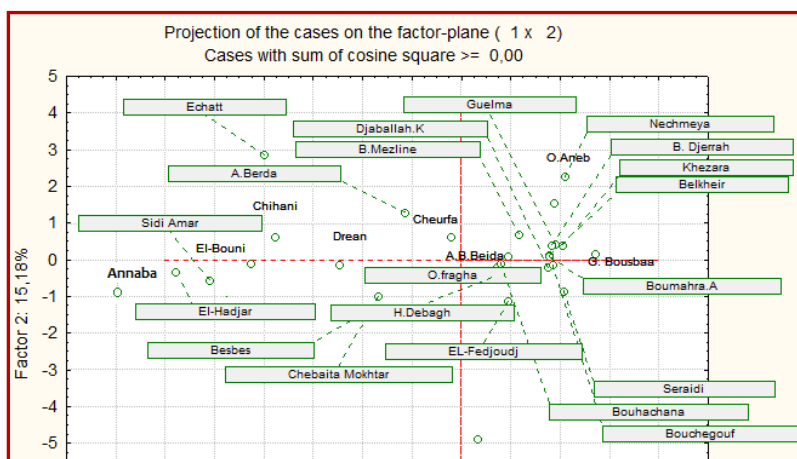


Fig.53. projection des individus de la catégorie des variables d'état

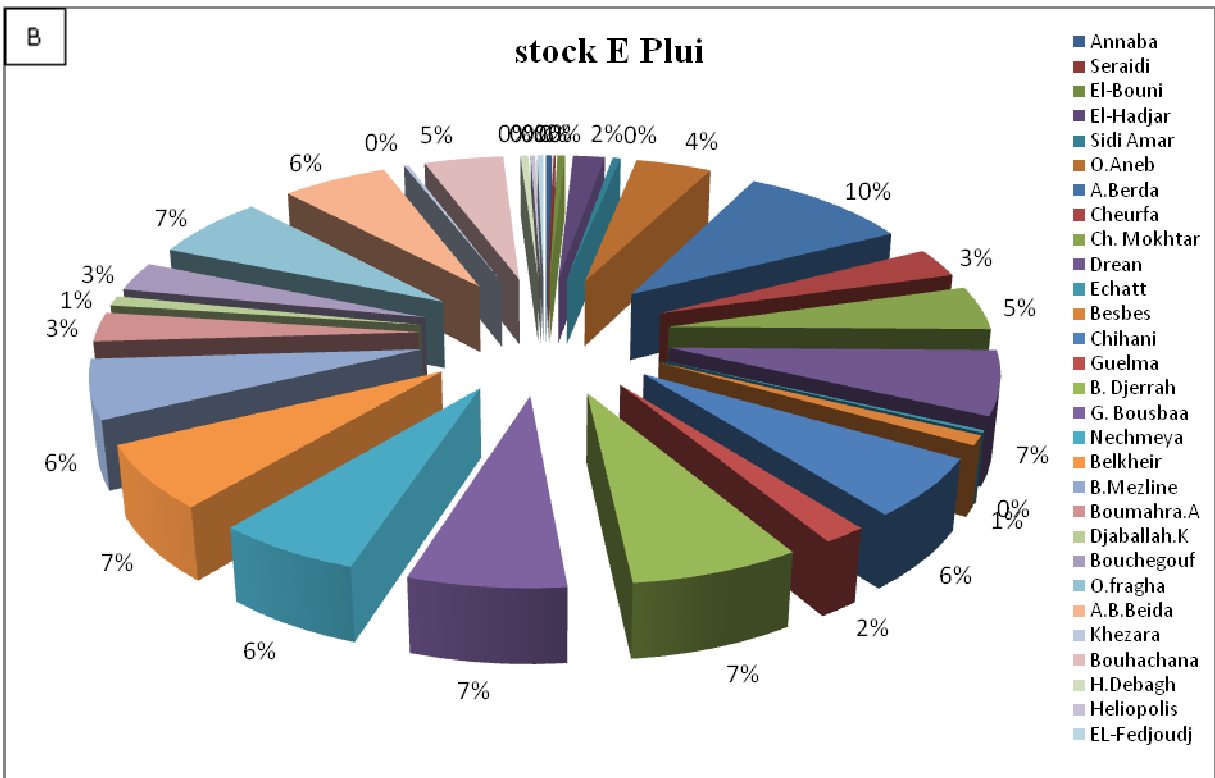
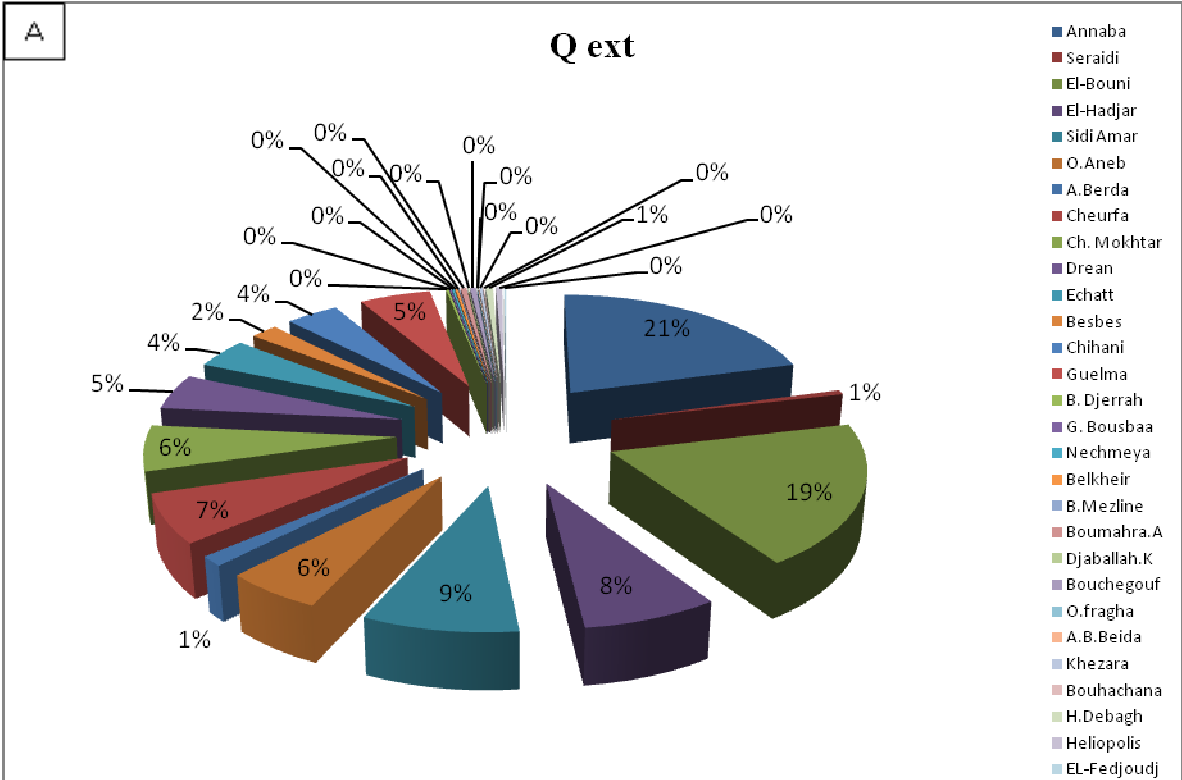
III.4. La catégorie des variables D'impact sur l'environnement et la santé publique

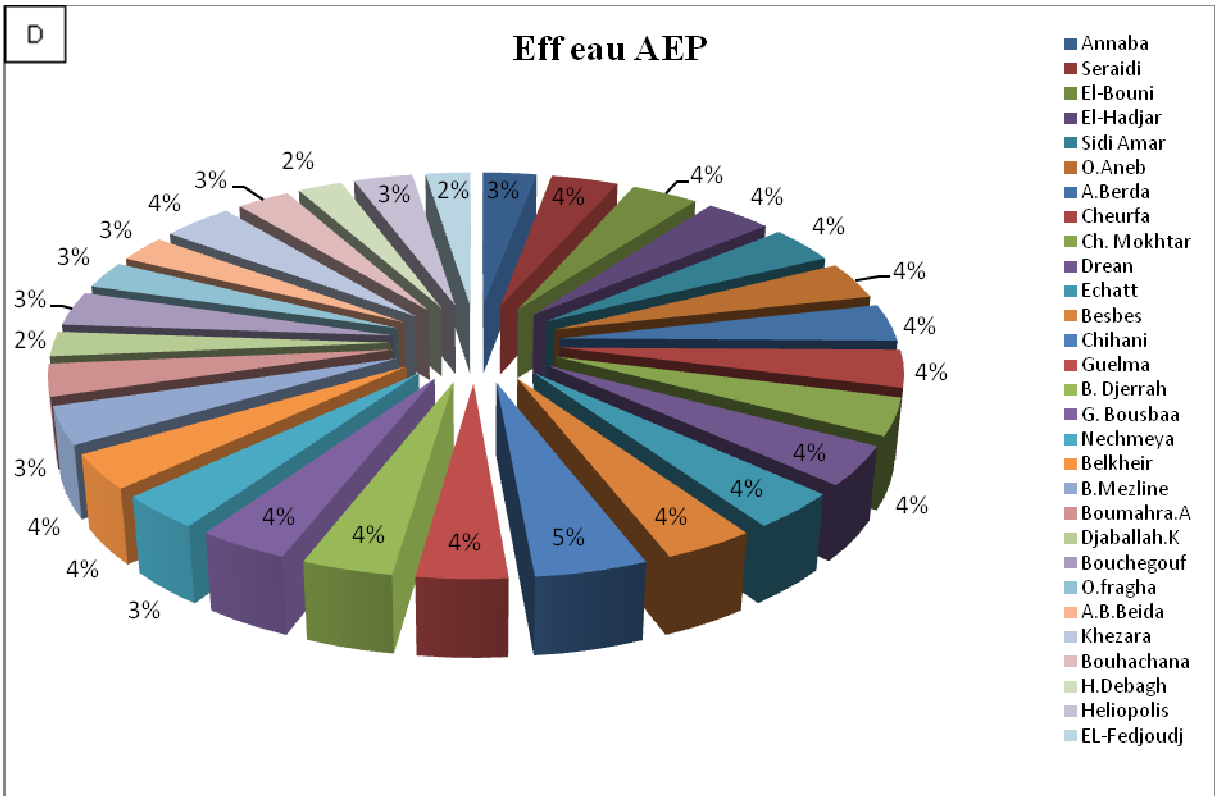
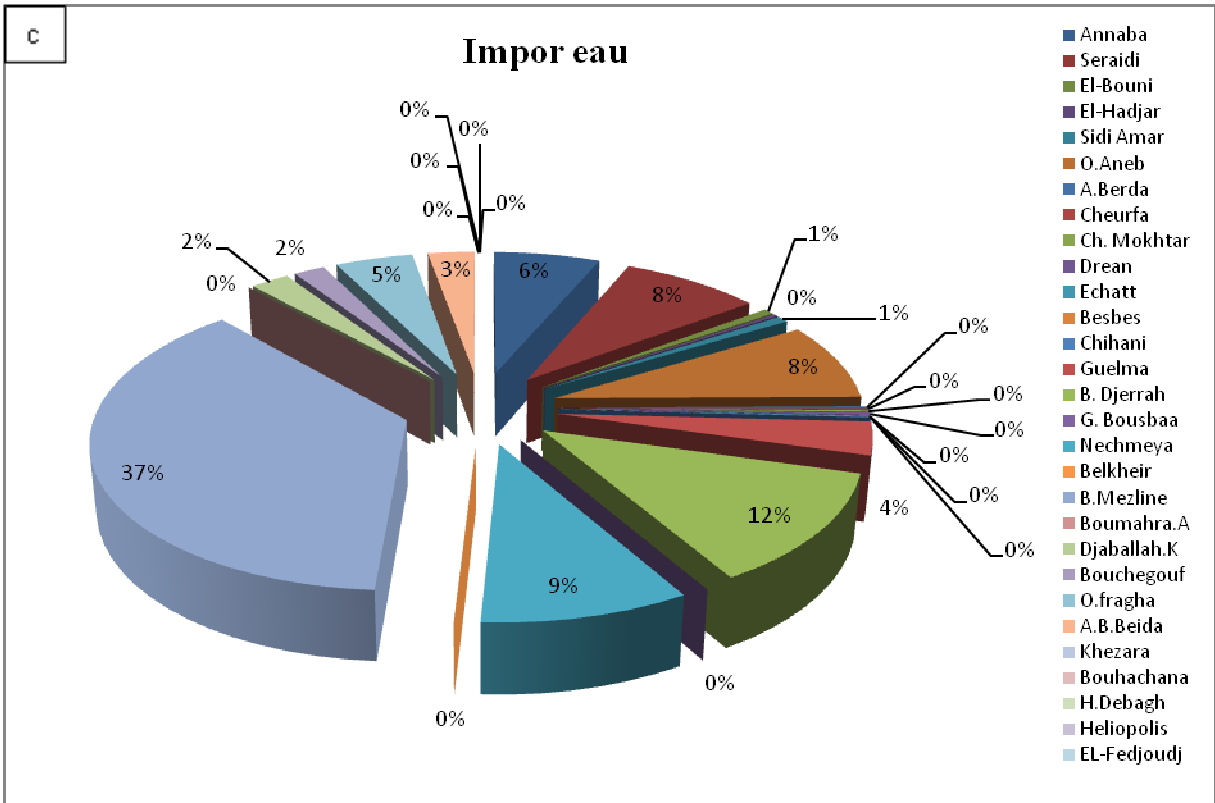
Puisque nous ne disposons pas de suffisamment de données des variables de cette catégorie, il ne nous était pas possible de faire un modèle de cette catégorie.

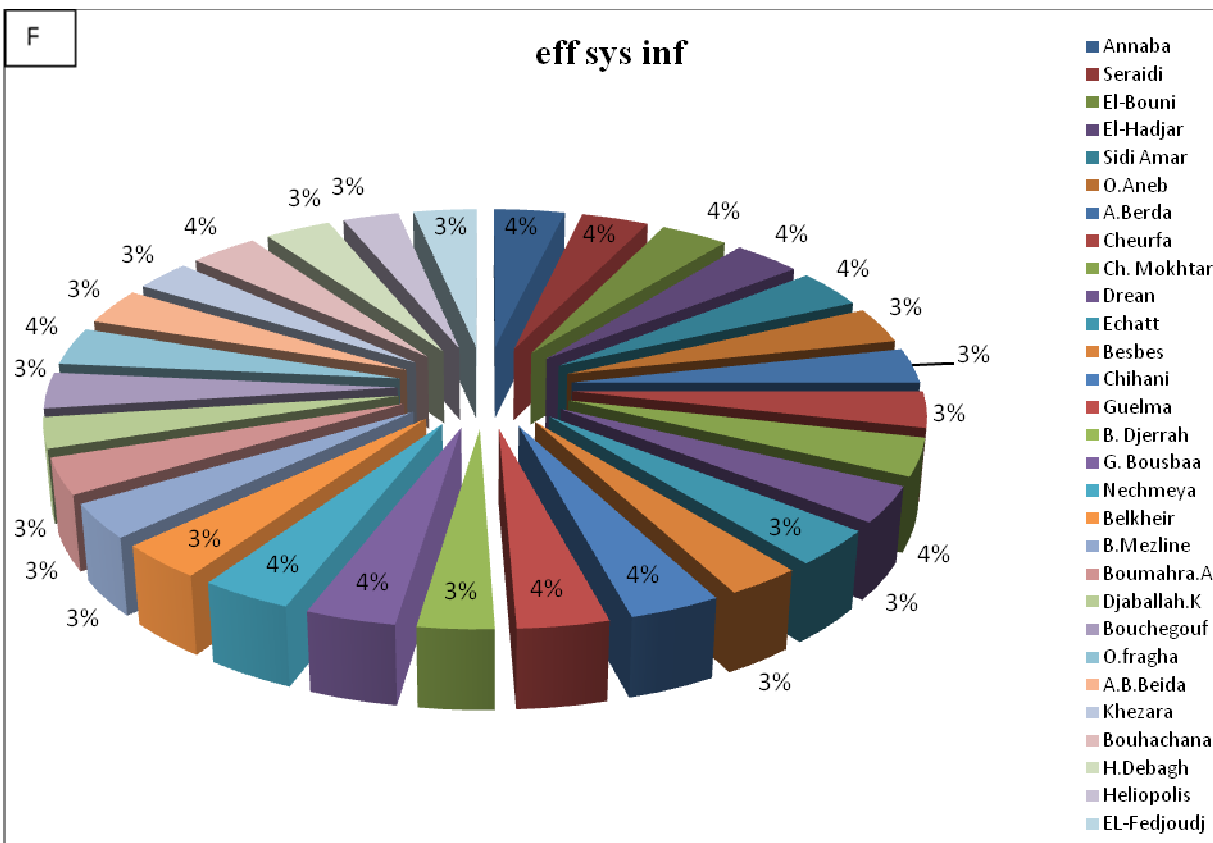
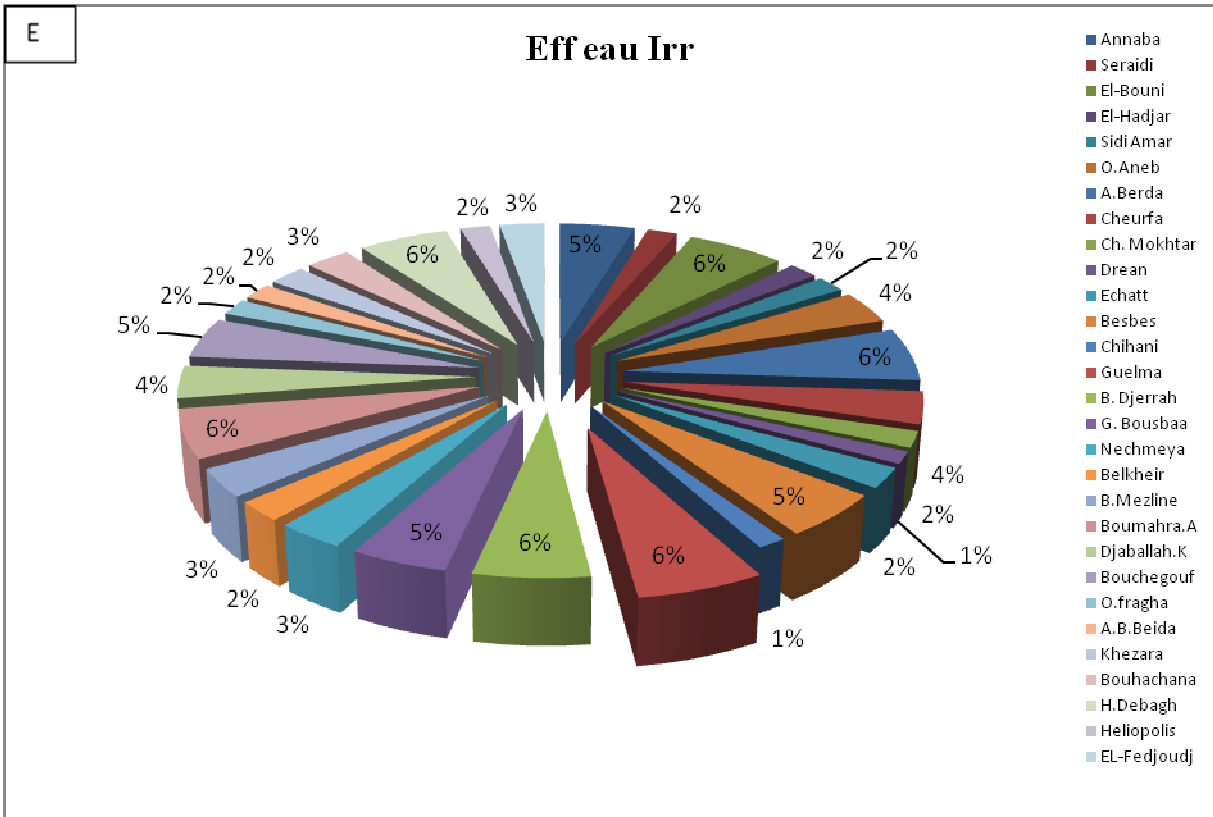
III.5. La catégorie des variables de réponses des gestionnaires

Les variables de cette catégorie comportent les données liées à la mobilisation des eaux (Qext) qui sont relatives aux décisions des gestionnaires et leurs réponses et intervention pour préserver cette ressource. Ces variables sont : le stockage des eaux pluviales (StockEPlui), l'importation de l'eau (Impor eau), l'efficacité de l'alimentation en eau potable (EffAIEP), l'efficacité dans l'eau d'irrigation (Eff eau Irr), l'efficacité des systèmes d'information (Eff Sy Inf) et la sensibilisation sur l'eau (Sensib E).

Dans la figure 54 (A,B ,C ,D ,E ,F et G) sont représentées les différentes données de cette catégorie à travers les communes de la zone d'étude sous forme de diagrammes en secteurs.







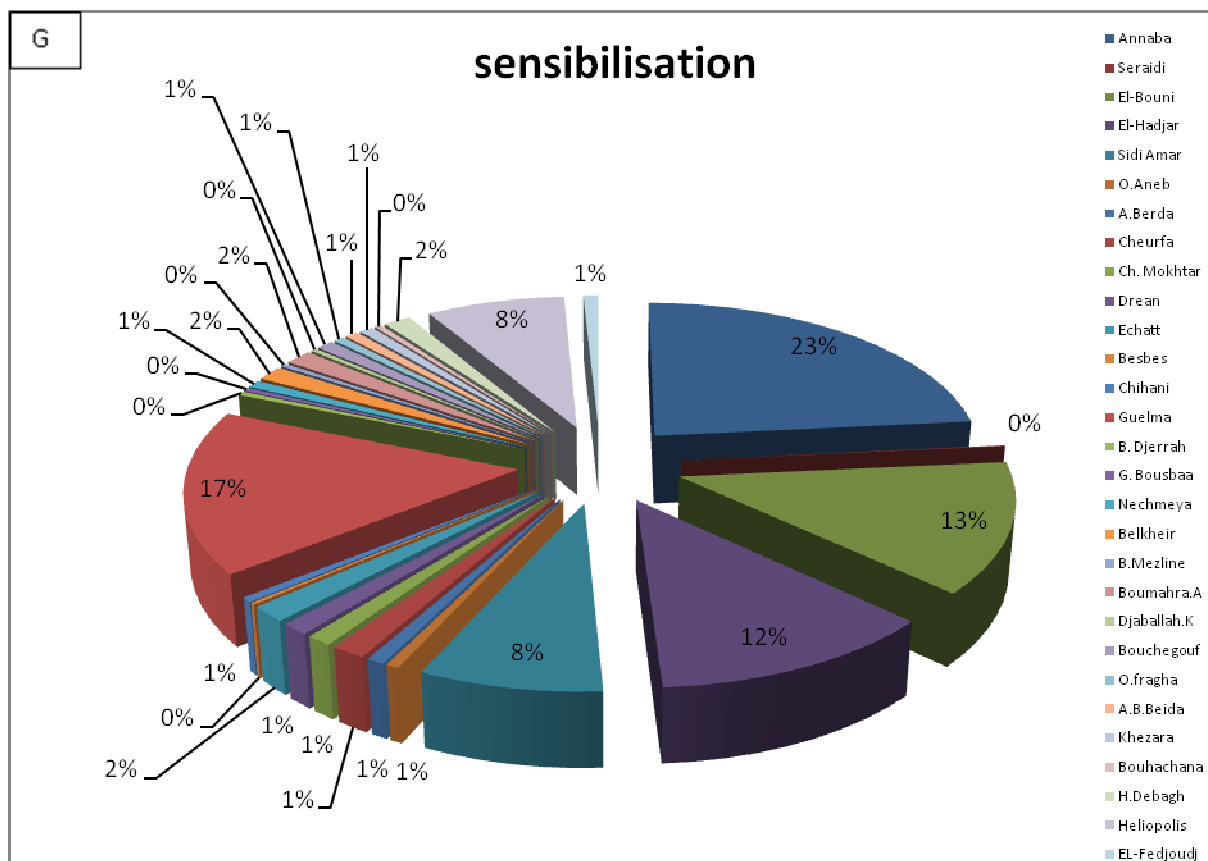


Fig.54. Diagrammes en secteur des variables de réponse des gestionnaires

III.5.1. Le réseau de neurone RNA

Pour faire un modèle RNA, Les variables de cette catégorie ont été introduites de telle façon que le Qext forme la variable de sortie (Output) et que les variables d'entrée (Input) soient formées par : le stockage des eaux pluviales (StockEPlui), l'importation de l'eau (Impor eau), l'efficacité de l'alimentation en eau potable (Eff eau AEP), l'efficacité dans l'eau d'irrigation (Eff eau Irr), l'efficacité des systèmes d'information (Eff Sy Inf) et la sensibilisation sur l'eau (Sensib E).

En effet, le modèle RNA sera représenté par la formle suivante :

$$[Qext] = ANN [StockEPlui, Impor eau, Eff eauAEP, Eff eau Irr, Eff Sy Inf, Sensib E]$$

Le tableau 24 qui représente quelques paramètres de statistiques descriptives montre que plus que la moitié des variables ont une asymétrie faible donc elles sont distribuées normalement. Toute fois, les variables reflétant la mobilisation Qext, l'importation de l'eau et la sensibilisation ont des Coefficients d'asymétrie importants et positifs (Asymétrie à droite).

Tab.24. statistiques des variables de réponses des gestionnaires

	Valid N	Moy	Min	Max	Variance	Ec-Type	Asym
Q ext	29	8,64	0,10	51,86	177,82	13,33	2,25
stock E Plui	29	0,67	0,02	1,93	0,32	0,56	0,36
Impor eau	29	0,04	0,00	0,40	0,01	0,08	3,78
Eff eau Irr	29	37,07	15,00	65,00	297,35	17,24	0,39
Eff eau AEP	29	69,76	50,00	93,00	106,90	10,34	-0,55
eff sys inf	29	84,85	73,00	92,50	33,87	5,82	-1,21
sensibilisation	29	2054,65	50,00	13963,81	12088526,09	3476,86	2,25

Après le lancement du modèle, le meilleur RNA obtenu pour cette catégorie de variables est le MLP à trois couches et à quatre nœuds cachés (6-4-1) (fig.55) à qui correspond une valeur minimale de SOSE (Sum Of Square Error) de 0,003999 par rapport aux autres types d'ANN ce qui traduit en effet, une appartenance à la même population des données de ces variables. Le coefficient de détermination pour les trois phases est égale à 80 % ce qui traduit une bonne corrélation entre la Q ext mesuré et calculé par le modèle. (Fig. 55).

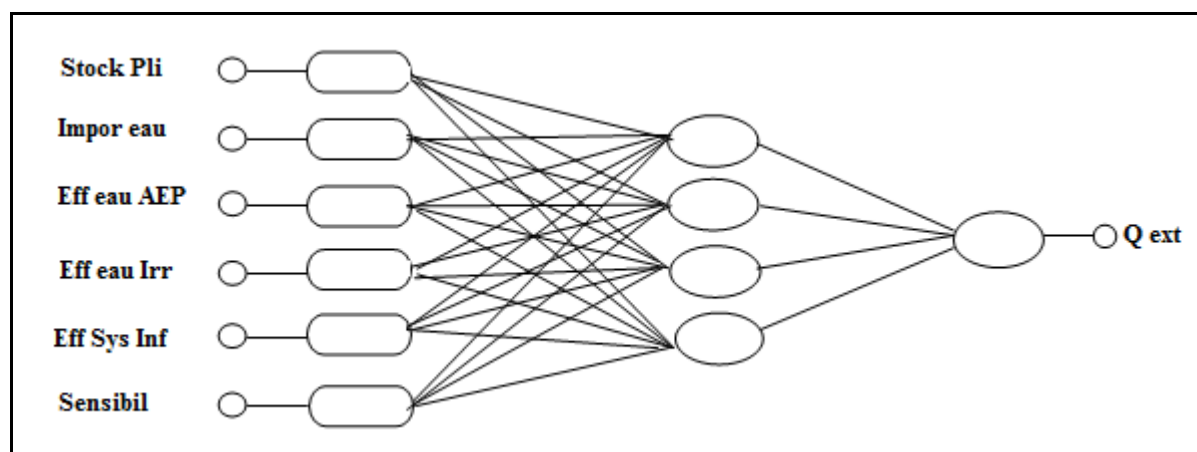


Fig.55. Le réseau MLP à trois couches des variables de réponse

Les coefficients de corrélation des trois phases : apprentissage, vérification et validation pour ce MLP sont respectivement de. 0.963003, 0.991721, 0.995500, et cela indique un excellent accord entre la mobilisation de l'eau (Qext) calculée et mesurée.

Le diagramme de la variable de mobilisation de l'eau Qext mesurée et simulées pour les trois phases de modélisation (l'apprentissage, le test et la validation) (fig.56) montre un rectilignement de l'ensemble des points selon une droite ($Y = 0.718 X + 1.586$) qui traduit une bonne corrélation des trois phases du modèle comme cité précédemment des.

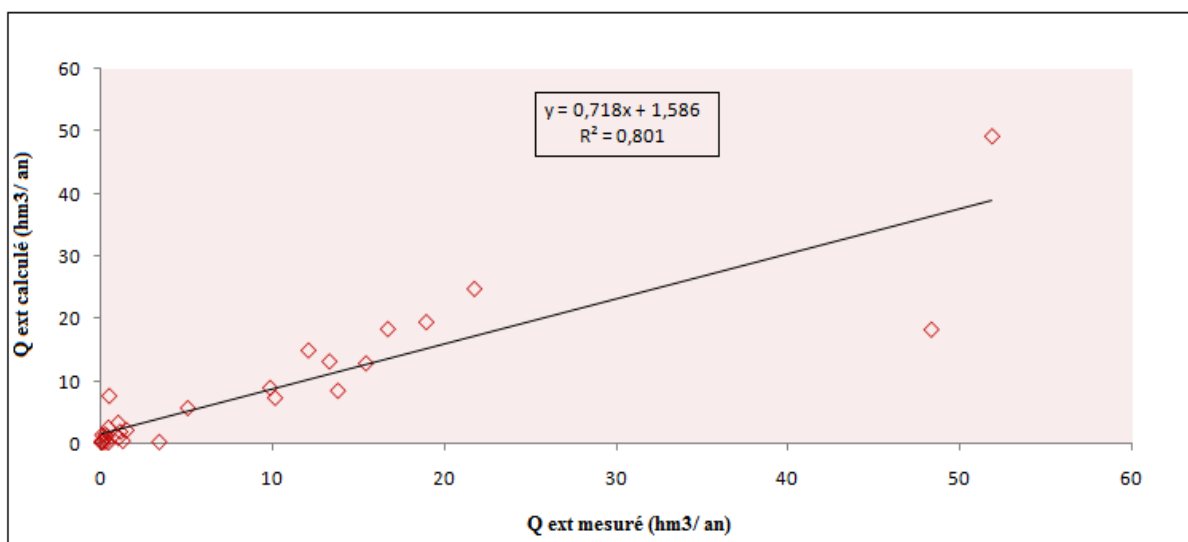


Fig.56. Débits mesurés et débits calculés par le modèle MLP pour les variables de réponses des gestionnaires

L'analyse de sensibilité du modèle RNA aux variables de réponses des gestionnaires au cours de l'apprentissage et de vérification, par rapport au débit mobilisé (Tab. 25), indique que l'efficacité des systèmes de l'information est la variable la plus influençant le Qext suivit l'importation de l'eau, ensuite le stockage des eaux pluviales, la sensibilisation à propos de cette ressource et enfin l'efficacité de l'eau d'irrigation et l'efficacité de l'approvisionnement en eau potabl.

Tab. 25. Analyse de sensibilité pour le Qext des variables de réponses des gestionnaires

	Stock E Plui	Impor eau	Eff eau Irr	Eff eau AEP	Eff sys inf	Sensibilisation
1.MLP 6-5-1	1,04	1,02	0,95	1,09	1,15	1,92
2.MLP 6-4-1	2,59	2,85	2,16	1,91	4,33	2,44
3.MLP 6-1-1	1,00	1,00	1,00	1,10	1,09	1,60
4.MLP 6-5-1	1,03	1,02	0,95	1,09	1,14	1,88
5.MLP 6-2-1	1,12	0,99	1,02	1,10	1,12	1,59

III.5.2. La matrice de corrélation

Le tableau 26 montre globalement une faible corrélation entre les différentes variables de cette catégorie à l'exception pour le débit extrait Qext qui présente une corrélation significative et positive avec la sensibilisation en premier lieu et ensuite l'efficacité du système de l'information. Notons également une faible corrélation négative entre le stock des eaux pluviale et le Qext d'une part et avec la sensibilisation de l'autre part

Tab.26. Matrice de corrélation pour les variables des réponses des gestionnaires

	stock E Plui	Impor eau	Eff eau Irr	Eff eau AEP	eff sys inf	sensib	Q ext
stock E Plui	1	0,23	-0,01	0,22	0,16	-0,42	-0,34
Impor eau	0,23	1	0,04	0,09	-0,03	-0,06	-0,1
Eff eau Irr	-0,01	0,04	1	-0,1	-0,11	0,23	0,17
Eff eau AEP	0,22	0,09	-0,1	1	0,08	-0,01	0,18
eff sys inf	0,16	-0,03	-0,11	0,08	1	0,32	0,56
sensib	-0,42	-0,06	0,23	-0,01	0,32	1	0,79
Q ext	-0,34	-0,1	0,17	0,18	0,56	0,79	1

III.5.3. L'analyse en composante principale ACP

L'analyse en composantes principale ACP des variables de cette catégorie montre que le premier facteur F1 présente un pourcentage d'information 29.24% et que le second facteur F2 représente 22.75 % de l'information donnée par cette méthode tableau 28.

Tab.27. Poids factoriels des variables des décisions des gestionnaires

	Factor 1	Factor 2
stock E Plui	-0,027	-0,705
Impor eau	0,694	0,372
Eff eau Irr	-0,047	-0,803
Eff eau AEP	-0,609	0,143
eff sys inf	0,568	-0,211
sensibilisation	0,786	-0,138
Q ext	0,683	-0,201

Selon l'axe F1 (29.94), le cercle des variables de réponses (Fig.57) montre une forte corrélation positives avec de la quantité d'eau mobilisée avec l'importation de l'eau, la sensibilisation et l'efficacité des de système d'information ce groupe est négativement corrélié avec l'efficacité de l'alimentation en eau potable.

A l'axe F2 (22.75%), une corrélation significative mais aussi négative avec les deux variables le stockage des eaux pluviales et l'efficacité de l'alimentation en eau d'irrigation

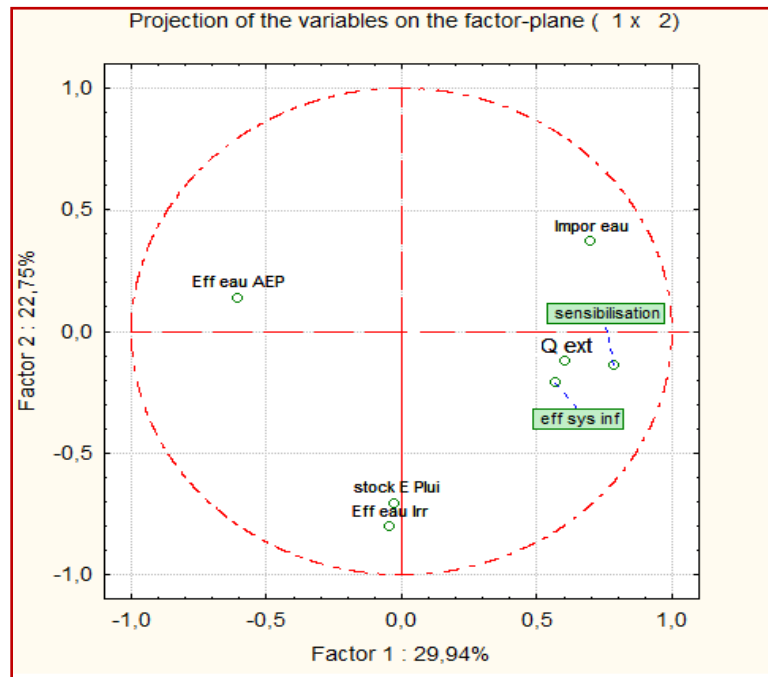


Fig.57. Analyse en Composantes Principales : variable de décision des gestionnaires

La projection graphique sur les municipalités de cette catégorie (fig.58), montre que les communes d'Annaba, Sidi Amar et El Hadjar présentent le même constat en termes de mobilisation de la ressource en eau, l'importation de l'eau, la sensibilisation sur l'eau ainsi que l'efficacité des systèmes d'information. les communes d'El Fedjoudj , Belkheir, Besbes, Djaballah Khemissi, Echatt et H.Debagh sont caractérisées par l'efficacité de l'alimentation en eau potable . d'une autre part les municipalités d'El Bouni, Bouchegouf, Nechmaia, O.Fragha et A.B Beida sont distinguées par l'efficacité de l'eau destinée à l'irrigation et au stockage des eaux pluviales.

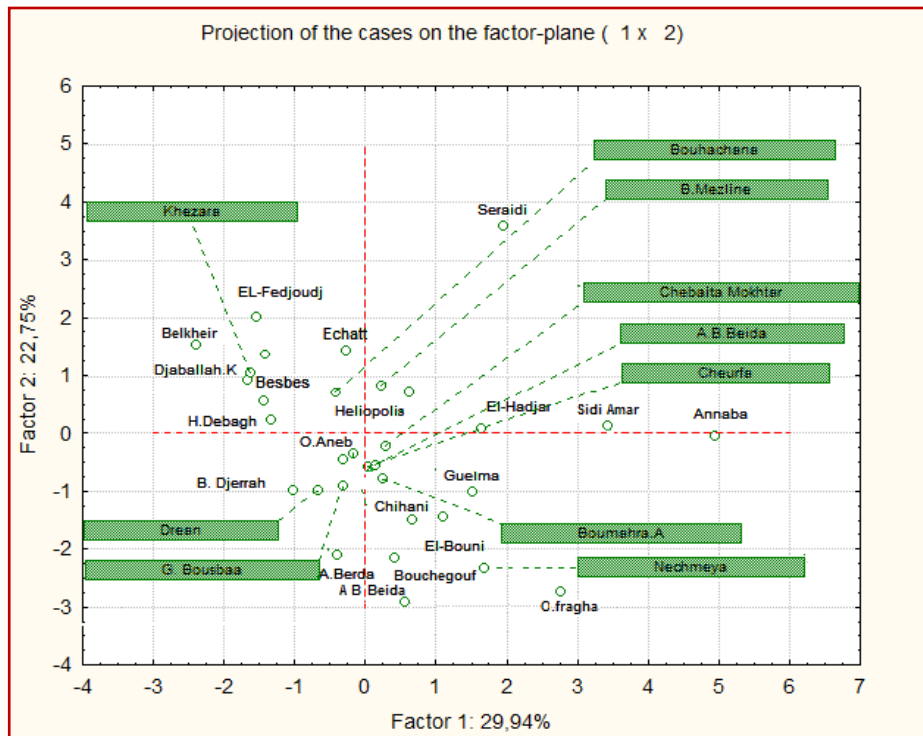


Fig.58. projection des individus de la catégorie des réponses des gestionnaires

VIII. Conclusion

A travers les méthodes d'analyse des données des différentes catégories utilisées dans ce chapitre , nous pouvons tirer les remarques et les conclusions suivantes :

- 1- Par l'analyse en composantes principales ACP nous avons eu plus de détails sur les vocations et les priorités d'allocation de l'eau dans chaque commune. En effet, les communes des d'Annaba, Sidi Amar et El Hadjar présentent les même caractéristiques en terme de mobilisation l'importation de l'eau et le degré de sensibilisation. Les communes d'El Bouni, Boucheougouf, Nechmaia, O.Fragha et A.B Beida sont distinguées par l'efficacité de l'eau destinée à l'irrigation et au stockage des eaux pluviales. D'une autre part, l'ACP des variables d'état ont soutenu l'hypothèse de l'intrusion marine en coïncidant la commune d'Annaba avec le pôle de minéralisation et notamment avec les deux éléments Cl et Na.
- 2- Les résultats obtenus dans l'analyse RNA indiquent que le Perceptron Multicouche MLP semble être la meilleure structure pour simuler la relation entre les deux variables de sortie (output) la mobilisation de la ressource en eau et le taux des sels

dissouts avec les indicateurs indépendants des catégories de variables socio-économiques, de pression et celle des réponses des gestionnaires pour le Qext et les variables d'état pour le TDS.

D'une autre part, la matrice de corrélation ainsi que l'analyse de sensibilité données par le RNA nous a permis de déceler le degré de sensibilité du Qext et du TDS aux différentes variables des catégories correspondantes.

En effet,

- Le Q ext s'avère être sensible beaucoup plus au nombre de population puis au rôle de la femme et ensuite à la dotation journalière dans la catégorie de force motrice, par le Magnésium ensuite les Nitrates, le pH, et le Calcium et enfin les Bicarbonates pour les variables d'état et enfin pour les réponses des gestionnaires il semble être plus influencé par l'efficacité des systèmes de l'information, suivit par l'importation de l'eau, ensuite le stockage des eaux pluviales, à un degré moindre par la sensibilisation (à propos de cette ressource) et enfin l'efficacité de l'eau d'irrigation et l'efficacité de l'approvisionnement en eau potable.
- Quand au TDS, d'après le modèle il est sensible aux décharges sauvages, puis aux engrais chimiques, les eaux usées domestiques, les pesticides, les eaux usées industrielles, et à un degré moindre semble être influencé par les engrais organiques puis les stations de carburant.

La modélisation par le RNA s'avère un outil d'aide à la décision qui permet aux gestionnaires de savoir quel variable influence le plus sur ses deux paramètres et orienter ainsi leur action ou intervention vers ces facteurs.

Conclusion générale

La région d'étude fait partie du bassin versant de l'Oued Seybouse. Elle est située au Nord-Est algérien où règne un climat méditerranéen caractérisé par deux périodes l'une pluvieuse froide en hiver et l'autre sèche et chaude en été. elle reçoit une moyenne annuelle de pluie qui varie de 666 mm dans la basse Seybouse à 597mm dans la moyenne Seybouse sous une température moyenne de l'ordre de 17.8 °C Annaba et à Guelma.

La basse Seybouse fait partie de l'ensemble géologique du Tell Algérien Nord Oriental (massif de L'Edough), présente des affleurements de terrains métamorphiques en bordures (gneiss, schistes, micaschistes, cipolins, calcaires métamorphique.) et sédimentaires dans les plaines. L'effondrement causé par les évènements tectonique durant le Miocène supérieur faisant enfoncer les grès numidiens et par la suite le remplissage Plio-Quaternaire par des matériaux détritiques ont permis de lui attribuer un caractère hydrogéologique à potentiel hydrique assez important

La géologie de la moyenne Seybouse est caractérisée par des formations allant du Trias jusqu'au Quaternaire, présentant ainsi une lithologie très variée qui comprend essentiellement: les alluvions (sable, gravier, cailloutis,...), les grès, les marnes, les argiles, les flyschs et les calcaires. Qui ont permis de distinguer les réservoirs de la nappe superficielle et des hautes terrasses de la plaine de Guelma.

Plusieurs méthodes hydro-chimiques nous ont permis la mise en évidence du phénomène de l'invasion marine dans les eaux de la nappe des graviers suite à un pompage intensif et irrégulier des puits de la partie nord de la plaine. Ainsi à partir du diagramme de piper nous avons constaté la dominance du faciès chloruré sodique presque dans la plupart des échantillons. Le diagramme de Stiff, divise les eaux de la nappe en trois groupes, dont celui qui représente les eaux côtières (groupe 1) présente une forme qui se rapproche aux eaux de la mer. Ceci a été confirmé également par les diagrammes croisés des concentrations qui montrent la relation entre le Cl et les autres éléments majeurs par rapport à la droite du mélange eau de pluie et eau de mer ainsi que les rapports Mg^{2+}/Ca^{2+} et SO_4^{2-}/Cl^- qui semblent confirmer les résultats du diagramme de Stiff. En outre, ces diagrammes croisés nous ont expliqué le phénomène d'échange ionique entre la roche et l'eau et qui se traduit par l'appauvrissement des eaux de la nappe en Na et un enrichissement en Ca et en Mg, ainsi que l'origine de l'augmentation de NO_3 dans les eaux des groupes I et II qui reflète le retour des eaux d'irrigation dans cette zone.

L'évolution temporelle de la minéralisation des eaux de la nappe des graviers selon trois profils parallèles et perpendiculaires à la mer montre également une chute appréciable de la conductivité électrique et des concentrations du Na, Cl, Sr à mesure qu'on s'éloigne de la mer ce qui semble confirmer l'hypothèse de l'intrusion marine.

La modélisation ainsi que les différentes analyses d'exploration multi variée sont des outils d'aide à la décision pour la gestion intégrée en ressources en eau, ils permettent par l'analyse et la simulation qu'ils effectuent d'aider les gestionnaire et les acteurs de prise de décision d'avoir une vision globale et similaire aux différents problèmes qui menacent cette ressource. L'analyse en composantes principales (ACP) révèle que les communes qui présentent une activité socio-économique plus ou moins développée et ou le nombre de population est important comme les communes des d'Annaba, Sidi Amar, El Hadjar et Guelma exercent une pression sur la ressource en eau d'où la nécessité de mobilisation et de l'importation de l'eau pour satisfaire ces besoins. Les communes d'El Bouni, Bouchegouf, Nechmaia, O.Fragha et A.B Beida où l'agriculture est assez développée sont distinguées par l'efficacité de l'eau destinée à l'irrigation et au stockage des eaux pluviales. D'une autre part, l'ACP des variables d'état ont soutenu l'hypothèse de l'intrusion marine en coïncidant la commune d'Annaba avec le pôle de minéralisation et notamment avec les deux éléments Cl et Na.

Les résultats de l'analyse RNA montrent que le Perceptron Multicouche MLP semble être la meilleure structure pour simuler la relation entre les deux variables de la mobilisation de la ressource en eau Q_{ext} et le taux des sels dissouts TDS qui forment les sorties (output) du modèle avec les indicateurs indépendants des catégories de variables correspondantes pour chaque sortie.

La matrice de corrélation ainsi que l'analyse de sensibilité données par le RNA nous a permis de déceler le degré de sensibilité du Q_{ext} et du TDS aux différentes variables des catégories correspondantes.

Le Q_{ext} s'avère être sensible beaucoup plus au nombre de population puis au rôle de la femme et ensuite à la dotation journalière dans la catégorie de force motrice, par le Magnésium ensuite les Nitrates, le pH, et le Calcium et enfin les Bicarbonates pour les variables d'état et enfin pour les réponses des gestionnaires il semble être plus influencé par l'efficacité des systèmes de l'information, suivit par l'importation de l'eau, ensuite le stockage des eaux pluviales, à un degré moindre par la sensibilisation sur la ressource en eau et enfin l'efficacité de l'eau d'irrigation et l'efficacité de l'approvisionnement en eau potable.

Concernant le TDS, le modèle montre qu'il est bien influencé par les décharges sauvages, puis aux engrais chimiques, les eaux usées domestiques, les pesticides, les eaux usées industrielles, et à un degré moindre semble être influencé par les engrais organiques puis les stations de carburant.

La modélisation par le RNA s'avère un outil d'aide à la décision qui permet aux gestionnaires de savoir quel variable influence le plus sur ses deux paramètres et orienter ainsi leur action ou intervention vers ces facteurs.

Références Bibliographiques

Agence de Bassin Hydrographique Constantinois –Seybousse-Mellegue, (2009) : Pollution de l'oued Seybousse- Diagnostic et solutions-", journée de la pollution du bassin de la Seybousse, Guelma, le 2 Février 2009.

Aichouri I., (2016) : Modélisation de l'intrusion marine dans l'aquifère côtier d'Annaba. Apport des analyses salinométriques. Th. Doct, Univ. Annaba 114 p.

Aissa, D.E., Cheilletz, A., Gasquet, D., Marignac, Ch., (1995) : Alpine metamorphic core complexes and metallogenesis : The Edough case (NE Algeria). Mineral deposits: from their origin to their environmental impacts. Balkema, Rotterdam. p23-26.

Allen and Suchy., (2001) : Results of the Groundwater Geochemistry Study on Island, British Columbia. Rapport Final préparé pour : Island Trust Victoria, B.C. Earths Sciences Simon Fraser University. 119 p.

Aoun-Sebaiti B., (2003) : Processus de salinité et de modélisation du système aquifère d'Annaba. Mém. De magister. Univ. d'Annaba, 105 p.

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 Doct. Univ. Lille Sciences et Technologies, 211 p.

Attoui B., (2014) : Etat de 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. Th Dct, Université d' Annaba, 134 p.

Attoui B., (2010) : Etat de la vulnérabilité à la pollution des eaux des grands réservoirs d'eau souterraines de la région d'Annaba-El-Tarf et identification des sites d'enfouissement de déchets. Mémoire de magister .Université d'Annaba.P184.

Bear J., Zaslavsky D., and Irmay S., (1968): Physical principles of water percolation and seepage. UNESCO, Paris,

Bear J., Zhou Q., Bensabat J., (2001): Three-dimensional simulation of seawater intrusion in heterogeneous aquifer with application to the coastal aquifer of Israel, in : proc. 1st Int. Conf. On saltwater Intrusion and Coastal Aquifers: Monitoring Modeling, and Management, Essaouira, Maroc.

- 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 .Université d'Annaba.P104.
- Bishop C., (1995) :** Neural Networks for Pattern Recognition. Oxford: University Press.
- Bouderbala A., (2015) :** Groundwater salinization in semi-arid zonesan exemple from Nador Pline (Tipaza, Algeria) Environemental earth Sciences, 73(9), 5479-5496.
- Boumaiza L., (2003):** Contribution à létude des caractéristiques hydrogéologique et hydrochimiques des dépôts sableux d'ECHATT (Nord-Est Algérien).Mémoire d'ingénieur Université d'Annaba P71-72.
- Bowen RE., Riley C., (2003) :** Socio-economic indicators and integrated coastal management. Ocean& Coastal Management 56, 299-312.
- Brahmia N., (2016) :** Evaluation et gestion intégrée des ressources en eau dans le bassin versant de la moyenne Seybouse, Nord-Est, Algérien. Th. Doct, Univ. Annaba 115 p.
- Burton J., (2001) :** La gestion intégrée des ressources en eau. Manuel de formation. IEPF/AUF. Paris. 261 pages.
- Cardona A., Carrillo-Rivera J.J., Huizar-Alvarez R., Garniel- Castro E., (2004):** Salinisation in coastal aquifers of arid zones : an exemple from Santo Domingo, Beja California Sur, Mexico, Environ. Geol. 45 350-366.
- Chen H., Zhang Y., Wang X., Ren Z., and Li L., (1997) :** Salt-water intrusion in the lower reaches of the Weihe river, Shandong, province China. Hydrogeology Journal, v. 5, no. 3, 82-88.
- Custodio E., (2002):** Coastal aquifers as important natural hydrogeological structures.in Bocanegra, Martines, and Massone Eds. Groundwater and human Developement.
- Custodio, E., (2010) :** Coastal aquifers of Europe: an overview. Hydrogeology Journal, 18, 269-280.
- Debieche T.H., (2002) :** Evolution de la qualité des eaux (salinité, acidité et métaux lourds) sous l'effet de la pollution saline, agricole et industrielle : Application à la basse plaine de la Seybouse Nord-Est algérien. Thèse de Doct. Univ. de Franche-Comté, 200 p.
- De Montety V., (2008) :** Salinisation d'un aquifère captif côtier en contexte deltaïque cas de la camargue (Delta du Rhône, France). Thèse université d'Avignon, 281 p.
- Demirel, Z., (2004) :** **The history and evaluation** of salt- water intrusion into a coastal aquifer in Mersin, Turkey. Journal of Environmental Management, 70: 275-282.

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, 39-42.

Durand-Delga M., (1969) : Mise au point sur la structure du Nord- Est de la Bérberie. Bull. Serv. Carte Géol. Algérie, Vol 39, pp 89-131.

El Achheb A., Mania J., and Mudry J., (2003) : Mécanismes d'acquisition de la minéralisation des eaux souterraines dans le bassin Sahel Doukkala (maroc Occidental). Approche par des traceurs hydrogéochimiques. Madrid: IGME. 113– 123. ISBN. 8478404708.

Farber E., Vengosh A., Gavrieli I., Marie A., Bullen T.D., Mayer B., Holtzman R., Segal M., And Shavit U., (2004) : The origin and mechanisms of salinization of the Lower Jordan River. *Geochimica et Cosmochimica acta.* 68, 9: 1989-2006.

Gaud B., (1976) : Etude hydrogéologique du système aquifère Annaba - Bouteldja, système des reconnaissances et recherche des conditions de modélisation (rapport d'étude I.N.R.H d'Annaba) , 151 p.

Gemail K., Samir A., Oelsner C., Moussa S.E et Ibrahim S., (2004): Study of saltwater intrusion using 1D, 2D and 3D resistivity surveys in the coastal depressions at the eastern part of Matruh area, Egypt. *EAGE, Near Surface Geophysics*, 2 : 103-109.

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.

Grassi S., and Cortecchi G., (2004) : hydrogeology and geochemistry of the multilayered confined aquifer of the Pisa plain (Tuscany – central Italy). *Applied Geochemistry*, 20 : 41-54.

Hammor et Lancelot., (1998) : Métamorphisme miocène de granites panafricains dans le massif de l'Edough (Nord-Est de l'Algérie), *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series IIA - Earth and Planetary Science*, 327(6):391-396 · September 1998.

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'USTLanguedoc, Univ. de Montpellier II, pp. 205.

Hani A., (2003) : Analyse méthodologique de la structure et des processus anthropiques : application aux ressources en eau d'un bassin côtier méditerranéen, thèse de doctorat d'état, Es. Sciences, Université d'Annaba, 213 p.

- 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.
- Hudak P.F., (2000):** Sulfate and chloride concentration in texas aquifers. Journal of environnement international, 23: 55-61.
- 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, 881-884.
- Jalala S et Mania J., (2011) :** Characterizing the Socio-Economic Driving Forces of Groundwater Abstraction with Artificial Neural Networks and Multivariate Techniques. Water Resources Management (2011) 25:2147–2175. Doi: 10.1007/s11269-011-9800-7.
- Joleaud L., (1936) :** Etude géologique de la région de Bône et de la Calle. Bull . Serv. Carte Géol. de l'Algérie. 2e série, 12, 200p.
- Jonch-Clausen, T., (2004) :** Integrated water resources management (IWRM): why, what and how? TEC Background Paper No. 10. Stockholm: GWP.
- Kafri U., Arad A., (1979):** Current subsurface intrusion of Mediterranean seawater - a possible source of groundwater salinity in the Rift Valley system, Israel. Journal of Hydrology 44, 267-287.
- Khadri S., (2009) :** Qualité des eaux de la vallée de la Seybouse dans sa partie aval (impact des néo-facteurs de pollution). Mémoire de magister, Université d'Annaba. 134 p.
- 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)). Th. Doct. Es-Sciences, Univ. Annaba 170 p.
- Kouzana L., Ben Mammou A., Gaaloul N., (2007) :** Intrusion marine et salinisation des eaux d'une nappe phréatique côtière (Korba, Cap-Bon, Tunisie). Geo-Eco-Trop., 31 : 57-70.
- Lacour F., (2007) :** Les indicateurs De gestion intégrée des ressources en eau A l'échelle du bassin versant : Définition, construction et champs d'application. Synthèse Technique, Institut de recherche pour le développement. 21 p.
- Lallahem S., Mania J., (2003) :** 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.

Lahondère J.C., (1987) : Les séries ultra-telliennes d'Algérie Nord oriental et les formations environnantes dans le cadre structural. Th. Doct. Es-Sci. Univ. Paul Sabatier, Toulouse, France, 238 p.

Laouar R., Boyce A.J., Ahmad Said Y., Ouabadi A., (2002) : . Stable isotope study of the igneous, metamorphic and mineralized rocks of the Edough complex, Annaba, Northeast Algeria. *Journal of African Earth Sciences*. Vol. 35. (2), 271–283.

Lebbe L., Walraevens K., Van Burm P., De Breuk W., (1989): L'évolution de la distribution des eaux douces et salées dans la nappe libre de la plaine maritime aux environs de la frontière belgo-française. *Ann. Soc. Géol. Nord*, CIX 55-65.

Maier H.R., Dandy G.C., (1996b) : The use of artificial neural networks for the prediction of water quality parameters. *Water Resources Research* volume 32 (4), 1013–1022.

Martos FS., Pulido-Bosch A., Sanchez LM., Vallejos-Izquierdo A., (2001): Identification of the origin of salinization in groundwater using minor ions (Lower Andarax, Southeast Spain). *The Science of the total Environnement* 297, 43-58.

Mania J., Imerzoukene S., Braillon JM., (1985) : Pollution saline de la nappe côtière à l'est d'Alger, *J. Hydrol.*, n° 3, 213-226.

Marignac C et Zimmerman J. L., (1983): Ages K-Ar de l'événement hydrothermal et des intrusions associées dans le district minéralisé Miocène d'Ain-Barbar (Algérie (Est Constantinois, Algérie). *Mineralium Deposita*, 18: 457-467.

Marignac Ch., (1985) : La minéralisation filonienne d'Ain Barbar. Un exemple d'hydrothermalisme lié à l'activité géothermique alpine en Algérie du nord. Thèse de doctorat d'état 2 tomes. I. N. P, Loraine Nancy.

Monié P., Montigny R., Maluski H., (1992) : Ages $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ alpins de la tectonique ductile extensive dans le massif de l'Edough (Kabylies, Algérie). *Bulletin de la Société Géologique de France* 163, 571–584.

Mouchara Nabil., (2009) : Impacts des lâchées de barrage Hammam Debagh sur la qualité des eaux de la vallée de la Seybouse dans sa partie amont (Nord-Est Algérien). Mémoire de Magistère, Université d'Annaba.

Olobaniyi SB., Owoyemi FB., (2006): Characterization by factor analysis of the chemical facies of groundwater in the deltaic plain sands. Aquifer of Warri, Western Niger Delta, Nigeria. *African Journal of Science and Technology (AJST)*, Science and Engineering Series 7, 1, 73-81.

- Paine JG., (2003):** Determining salinization extent, identifying salinity sources, and estimating chloride mass using surface, borehole, and airborne electromagnetic induction methods. JG Paine. Water Resources Research 39 (3), 3-1 to 3-10.
- Petalas C. P., Diamantis, I. B., (1999) :** Origin and distribution of saline groundwaters in the upper Miocene aquifer system, coastal Rhodope area, northeastern Greece. Hydrogeol. J., 7(3):305–316.
- Pulido-Le Boeuf 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 seawater into coastal aquifers: the example of Castell de Ferro aquifer (SE Spain). C.R. Geosciences, 335: 1039-1048.
- Pulido-Leboeuf P., (2004):** Seawater intrusion and associated processes in a small coastal complex aquifer (Castell de Ferro, Spain), Applied Geochemistry 19, 1517-1527.
- Riad S., Mania J., Bouchaou L., Najjar Y., (1998) :** Rainfall-Runoff Model Using an Artificial Neural Network Approach. Mathematical and Computer Modelling, Elsevier, 40 (2004) 839-846.
- Riley C., Bowen R., (2003):** Socio-economic indicators and integrated coastal management. Ocean & Coastal Management, Elsevier, 46 (2003) 299–312.
- Sonatrach., (1969) :** Esquisse structurale de la plaine d'Annaba. Rapport A.N.R.H., inédit. Annaba, Algérie.
- Spechler RM., (1994):** Saltwater intrusion and quality of water in Floridian aquifer system, Northeastern Florida: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigation Report 92-4174, 76 p.
- Strojexport., (1975) :** Prospection géophysique de la plaine d'Annaba. Réinterprétation. Rapport A.N.R.H., inédit, Annaba, Algérie, 30 p.
- Tellam JH., (1995):** Hydrochemistry of the saline groundwater of the lower Mersey basin Permo- Triassic sandstone aquifer. UK, Journal of Hydrology 45-85.
- Todd K., (1980):** Groundwater hydrology. 2 ème Edition, John Wiley & Sons, New York, 510 p.
- 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. Paris, 337 : 515-24.
- Vengosh A., Rosenthal E., (1994):** Saline groundwater in Israel Saline groundwater in Israel: its bearing on the water crisis in the country. Journal of Hydrology 156(1-4), 389-430.
- Vila, J. M., (1970) :** Le Djebel Edough: un massif cristallin externe du N.E. de la Berbérie. Bulletin de la Société Géologique de France, 7, (XII), 805-812.

- Vila J.M., (1980) :** La chaîne alpine d'Algérie orientale et des confins algéro-tunisiens, Th. Doct. Es-scie. Nat. Univ. Pierre et Marie - Curie, Paris VI, pp. 282-296.
- Wilson S.R., Ingham M. & Mc Conchie J.A., (2006):** The applicability of earth resistivity methods for saline interface definition. Journal of hydrology, 316: 301-312.
- Younsi A., (1994) :** Etude des mécanismes des intrusions marines vers le système aquifère compris entre oued Oum-Er-Rbia et Bir Jdid (Province d'El Jadida – Maroc) : Hydrogéologie, hydrodynamique, hydrochimie et modélisation mathématique. Thèse de 3ème cycle de l'université Chouaib Doukkali El Jadida. 127 p.
- Younsi A., (2001) :** Méthodologie de mise en évidence des mécanismes de salure des eaux souterraines côtières en zone semi aride irriguée (Chaouia côtière, Maroc). Th. Doct d'Etat de l'Univ. Chouaib Doukhali El Jadida 175 p.
- Younsi A., Lhadi EK., Mania J., (1997):** Mise en évidence de l'intrusion marine vers la nappe de la province El Jadida. IAHS Publ. N°. 244, 115-122.
- 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 Magister 1999; Univ. Annaba, 148p.