

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA



FACULTE : Sciences de la Terre

DEPARTEMENT : Géologie

DOMAINE : Sciences de la Terre et de l'Univers

FILIERE : Géologie

SPECIALITE : Hydrogéologie

Laboratoire des Ressource en Eau et Développement Durable

THESE

Préparée en vue de l'obtention du diplôme de Doctorat LMD

**RAREFACTION ET SECURISATION DE L'EAU DANS
UN BASSIN MEDITERRANEEN SOUS CONTRAINTES
DE RECHAUFFEMENT CLIMATIQUE ET DE
CROISSANCE DEMOGRAPHIQUE**

Présentée par :

HANI Samir

Devant le jury composé de :

President :

Directeur de these :

Co-Directeur de Thèse :

Examineurs :

Pr Larbi DJABRI

Pr Nabil BOUGHERIRA

Pr Isam SHAHROUR

Pr Lassaad GHRIEB

Pr Tahar NOUAR

Pr Habiba MAJOUR

Université Badji Mokhtar Annaba

Université Badji Mokhtar Annaba

ULille (France)

Université 8 mai 1945 de Guelma

Université 8 mai 1945 de Guelma

Université Badji Mokhtar Annaba

Soutenue le 26/02/2024

RESUME

La recherche de solutions pour résoudre les problèmes de l'eau et de l'environnement dans la basse Seybouse répond à la nécessité d'intégration, depuis la localisation et l'évaluation des ressources, jusqu'à la protection de leur qualité, mais tout en évaluant les éventuels effets néfastes. Elle contribue ainsi à la mise en œuvre de la politique de développement durable mise en œuvre depuis quelques années.

L'application des codes MODFLOW et MT3DMS montre que les pompages d'eau souterraine ont provoqué une chute continue du niveau de l'eau et une hausse de la concentration en chlorures. De plus, l'interface eau douce-eau marine a progressé de 300 à 2500 m dans les terres. Ces résultats montrent la nécessité de prendre les mesures adéquates pour la protection de l'aquifère.

Le bassin de la basse Seybouse subit différentes pollutions : urbaine, industrielle et agricole. Ces pollutions ont pour origines les nombreuses agglomérations, usines et zones agricoles situées sur les deux rives de l'oued et de ses affluents. Des solutions ont été mises en place pour lutter contre les rejets directs dans les milieux récepteurs et pour répondre aux besoins en eau domestiques, agricoles et industrielles. Ces mesures doivent, cependant, être renforcées par des politiques innovantes destinées à renforcer la résilience au dérèglement climatique et à d'autres stress.

A cet effet, le modèle WEAP a permis d'envisager et d'évaluer des stratégies de gestion des ressources en eau dans le sous bassin de la basse Seybouse selon différents scénarios jusqu'en 2050. Ces scénarios révèlent que les besoins en eau ne peuvent être satisfaits totalement compte tenu des ressources disponibles. Les impacts du changement climatique et de la pression sur la ressource sont les facteurs les plus pertinents qui font augmenter les besoins en eau. Le scénario de la gestion de la demande et l'apport du dessalement de l'eau de mer sont les mesures à mettre en place pour limiter les besoins en eau dans un environnement où la ressource hydrique se raréfie.

Pour renforcer la résilience des aquifères aux changements climatiques, une étude des paramètres qui impactent la recharge des aquifères a été réalisée et des cartes des zones favorables à la recharge sont élaborées. Ces documents sont d'un grand intérêt car ils permettent d'envisager l'alimentation artificielle des aquifères de la région surtout en période pluvieuse.

Ces documents peuvent également aider les gestionnaires à prendre les bonnes décisions, particulièrement pour la gestion de la ressource hydrique et l'étude de la vulnérabilité des eaux souterraines. Les zones d'infiltration requièrent une attention particulière des gestionnaires et des décideurs locaux en instaurant des mesures de protection.

Mots clés : Aquifère côtier, Sismique réflexion, Intrusion d'eau marine, MODFLOW-MT3DMS, Raréfaction, vulnérabilité, Demande non satisfaite, Changement climatique, Modèle WEAP, Recharge, Sécurisation, SIG.

ABSTRACT

The search for solutions to water and environmental problems in the Lower Seybouse is a response to the need for integration, from locating and assessing resources to protecting their quality, while at the same time assessing possible adverse effects. It thus contributes to the implementation of the sustainable development policy that has been in place for several years.

Application of the MODFLOW and MT3DMS codes shows that groundwater pumping has led to a continuous fall in water level and an increase in chloride concentration. What's more, the freshwater-seawater interface could advance 300 to 2500 m inland. These results demonstrate the need to take appropriate measures to protect the aquifer.

The Lower Seybouse basin is subject to various forms of pollution: urban, industrial and agricultural. These pollutions originate from the numerous agglomerations, factories and agricultural areas located on both banks of the wadi and its tributaries. Solutions have been put in place to combat direct discharges into receiving environments and to meet domestic, agricultural and industrial water needs. These measures must, however, be reinforced by innovative policies designed to strengthen resilience to climate change and other stresses.

To this end, the WEAP model was used to consider and evaluate water resource management strategies in the lower Seybouse sub-basin according to different scenarios up to 2050. These scenarios reveal that water needs cannot be fully met given the resources available. The impacts of climate change and pressure on the resource are the most relevant factors driving up water demand. The demand management scenario and the contribution of seawater desalination are the measures to be implemented to limit water requirements in an environment where water resources are becoming increasingly scarce.

To strengthen the resilience of aquifers to climate change, a study of the parameters affecting aquifer recharge has been carried out, and maps of zones favorable to recharge have been drawn up. These documents are of great interest, as they make it possible to envisage artificial recharge of the region's aquifers, especially during rainy periods.

These documents can also be used as decision-making aids, particularly for water resource management and groundwater vulnerability studies. Preferential seepage zones require special attention from managers and local authorities, who should introduce protective measures.

Keywords: Coastal aquifer, Seismic reflection, Marine water intrusion, MODFLOW-MT3DMS, Scarcity, vulnerability, Unmet demand, Climate change, WEAP model, Recharge, Securing, GIS.

خلاصة

إن البحث عن حلول لمشاكل المياه والبيئة في منطقة سيبوس السفلى هو استجابة للحاجة إلى التكامل، من تحديد الموارد وتقييمها إلى حماية جودتها، مع تقييم الأثار الضارة المحتملة في نفس الوقت. ومن ثم فهو يساهم في تنفيذ سياسة التنمية المستدامة المعمول بها منذ عدة سنوات.

يوضح تطبيق كود MODFLOW و MT3DMS أن ضخ المياه الجوفية أدى إلى انخفاض مستمر في مستوى المياه وزيادة في تركيز الكلوريد. علاوة على ذلك، يمكن لواجهة المياه العذبة ومياه البحر أن تتقدم من 300 إلى 2500 متر في الداخل. توضح هذه النتائج الحاجة إلى اتخاذ التدابير المناسبة لحماية طبقة المياه الجوفية.

يتعرض حوض سيبوس السفلي لأشكال مختلفة من التلوث: حضري وصناعي وزراعي. تأتي هذه التلوثات من التكتلات والمصانع والمناطق الزراعية العديدة الواقعة على ضفتي الوادي وروافده. تم وضع حلول لمكافحة التصريف المباشر في البيئات المستقبلية وتلبية احتياجات المياه المنزلية والزراعية والصناعية. ومع ذلك، يجب تعزيز هذه التدابير بسياسات مبتكرة مصممة لتعزيز القدرة على التكيف مع تغير المناخ والضغط الأخرى.

تحقيقاً لهذه الغاية، تم استخدام نموذج WEAP لدراسة وتقييم استراتيجيات إدارة الموارد المائية في الحوض الفرعي السفلي Seybouse وفقاً لسيناريوهات مختلفة حتى عام 2050. تكشف هذه السيناريوهات أنه لا يمكن تلبية الاحتياجات المائية بالكامل نظراً للموارد المتاحة. تعد تأثيرات تغير المناخ والضغط على المورد من أكثر العوامل ذات الصلة التي تؤدي إلى زيادة الطلب على المياه. سيناريو إدارة الطلب ومساهمة تحلية مياه البحر هي الإجراءات التي يجب تنفيذها للحد من متطلبات المياه في بيئة تزداد فيها ندرة الموارد المائية.

لتعزيز قدرة طبقات المياه الجوفية على الصمود في مواجهة تغير المناخ، تم إجراء دراسة للمعايير التي تؤثر على تغذية الخزان الجوفي، وتم وضع خرائط للمناطق المؤاتية لإعادة التغذية. هذه الوثائق ذات أهمية كبيرة، لأنها تجعل من الممكن تصور التغذية الاصطناعية لطبقات المياه الجوفية في المنطقة، وخاصة خلال فترات الأمطار.

يمكن أيضاً استخدام هذه الوثائق كأدوات مساعدة في اتخاذ القرار، خاصة لإدارة موارد المياه ودراسات قابلية تأثر المياه الجوفية. تتطلب مناطق التسرب التفضيلية اهتماماً خاصاً من المديرين والسلطات المحلية، الذين يجب عليهم اتخاذ تدابير وقائية.

الكلمات المفتاحية: طبقة المياه الجوفية الساحلية، الانعكاس الزلزالي، تسرب المياه البحرية، MODFLOW-MT3DMS، الندرة، الضعف، الطلب غير المستوفى، تغير المناخ، نموذج WEAP، إعادة الشحن، التأمين، نظم المعلومات الجغرافية GIS.

Remerciements

Au terme de ce travail, je tiens à remercier tous les intervenants et toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à sa réalisation, en particulier :

Monsieur le Professeur Nabil BOUGHERIRA qui a accepté de diriger ce travail malgré ses lourdes responsabilités. Je ne saurai lui exprimer ma gratitude et ma reconnaissance à sa juste valeur.

Monsieur le Professeur Isam SHAHROUR de l'Université de Lille qui m'a accueilli à Lille pour un séjour scientifique. Ses remarques et conseils m'ont guidé pour affiner ce manuscrit.

Monsieur le Professeur Larbi DJABRI, pour la confiance dont il m'a gratifié en acceptant de présider le jury de cette thèse et en se préoccupant constamment de son avancement. Ses critiques et ses appuis pour améliorer ce travail ont été d'un grand soutien pour moi, je le remercie très sincèrement.

J'exprime mes vifs remerciements à Madame la Professeure Habiba MAJOUR qui m'a toujours réservé de son temps en me guidant à travers ses critiques et ses suggestions pour améliorer le contenu de cette recherche.

Mes remerciements vont aussi à Monsieur le Professeur Lassaad GHRIEB, de l'Université 8 mai 1945 de Guelma, qui a bien voulu me faire l'honneur de juger ce travail. Ses travaux m'ont toujours aidé pour mieux comprendre le comportement hydrodynamique et physico-chimique des eaux souterraines dans la région.

Monsieur le Professeur Tahar Nouar, de l'Université 8 mai 1945 de Guelma, me fait l'honneur de participer au jury, il m'a toujours fait bénéficier de ses connaissances particulièrement en géologie régionale et hydrochimie.

Mes sincères remerciements s'adressent également à mes amis du département de géologie pour leurs encouragements durant ces trois dernières années.

Il m'est agréable de remercier tous ceux que je côtoie chaque jour dans mon travail au laboratoire REDD.

Un grand merci à Fayçal TOUMI, enseignant au département de Géologie, sa sympathie et sa bonne humeur m'ont été d'un grand soutien moral.

Un salut amical à Monsieur Badreddine DRICI de l'AGIRE Annaba pour m'avoir permis d'accéder à leur documentation et aidé à élaborer les différents scénarios sur le logiciel WEAP.

Je n'oublie pas mes proches, particulièrement mon père Azzedine qui a toujours été présent tant d'un point de vue scientifique que moral. Je tiens à remercier tout particulièrement ma mère et mes sœurs Malak et Serine envers qui je suis redevable pour leur amour.

Enfin tous ceux qui m'ont soutenu tout au long de ce travail directement ou indirectement, par leur amitié et leur sympathie, trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude.

C'est à ma famille que je dédie ce travail.



وَنَبِّئُهُمْ أَنَّ الْمَاءَ قِسْمَةٌ بَيْنَهُمْ كُلُّ شِرْبٍ مُّخْتَصِرٌ

سورة القمر اية (٢٨)

TABLE DES MATIERES

Introduction générale	15
Chapitre I. Simulation numérique des écoulements souterrains et de transfert d'eau saline dans l'aquifère côtier de la basse Seybouse.	
I.1. Introduction	22
I.2. Matériels et méthodes	23
I.2.1. Zone d'étude	23
La nappe phréatique (AS)	25
La nappe profonde des graviers (AG)	26
I.2.2. Méthodologie	29
I.3. Résultats et discussion	35
I.3.1. Evolution du contenu physico-chimique des eaux souterraines selon des profils N-S	35
I.3.2. Modèles hydrodynamiques et de transfert des chlorures	36
I.4. Conclusions	40
Références	41
Chapitre II. Etat qualitatif des eaux dans le bassin	
II.1. Présentation du sous bassin	46
II.2. Les sources de pollution dans la basse Seybouse	47
II.2.1. Les eaux usées	47
II.2.2. Les eaux issues des unités industrielles	48
II.2.3. Pollution agricole	50
II.3. Les eaux superficielles	51
II.3.1. Les eaux de l'oued Seybouse	51
II.3.2. Les eaux des barrages de la Cheffia et de Mexa	
III.3.2.1. Les eaux du barrage Cheffia	53
II.3.2.2. Les eaux du barrage Mexa	55
II.4. Les eaux souterraines : évolution de la chimie des eaux le long de l'écoulement	57
II.5. La station de traitement de Chaiba	59
II.6. La STEP d'Allélick (Annaba)	60
II.6.1. Procédé d'épuration adopté à la STEP d'Allélick	60
II.6.2. Fonctionnement de la STEP d'Allélick	61
II.7 Station de dessalement d'eau de mer à Draouche	62
II.8. Conclusion	63
Références	63
Chapitre III. Gestion intégrée des ressources en eau : Application du modèle WEAP (2010 -2050)	
III.1. Introduction	66
III.2. Matériels et méthode	68
III.2.1. Cartographie	68
III.2.2. Phase schématique	69

III.2.3. Fonctionnement du logiciel	70
- Création de la zone d'étude	70
- Création des références et hypothèses clés	70
- Hypothèses clés	70
- Références	71
III.2.4. Proposition de scénarios	71
III.2.5. Rubrique données	72
III.2.6. Traitement des données	73
- Demande en eau domestique	73
- Demande en eau d'irrigation	73
- Demande en eau industrielle	75
III.2.7. Distribution des ressources	75
III.2.8. Ressources en eau de surface	76
- Débit des oueds	76
- Capacité des barrages	77
- Calibrage du modèle	78
III.2.9. Ressources en eau souterraine	79
III.2.10. Elaboration des scénarios futurs	80
- Paramètres généraux	80
- Scenario de référence (SR)	80
- Scenario changement climatique (SCC)	81
- Scenario pression sur la ressource (SPR)	81
- Scénario changement climatique et pression sur la ressource (SCCPR)	81
- Scénario gestion de la demande (SGD)	81
- Scénario nouvelle ressource (SNR)	81
- Scénario changement climatique, pression sur la ressource gestion de la demande, nouvelle ressource (SCCPRGDNR)	81
III.3. Résultats et discussion	82
III.3.1. Evolution des températures par scénario	82
III.3.2. Evolution des Précipitations par scénario	82
III.3.3. Demandes en eau	83
III.3.3.1. Evolution de nombre d'habitants :	83
- Scénarios tendanciels (SCC, SNR, SGD et SR)	83
- Scénarios forts accroissements (SCCPR, SPR et SCCPRGDNR)	84
III.3.3.2. Evolution des superficies agricoles	85
- Scénarios tendanciels (SCC, SNR, SGD, SR)	85
- Scénarios forts accroissements (SPR, SCCPR, SCCPRGDNR)	85
III.3.3.3. Evolution des besoins totaux en eau par scénario.	86
III.3.3.4. Evolution des besoins en eau potable, irrigation et industrielle par scénario	87
- Evolution des besoins en eau potable	87
- Variation des besoins en eau d'irrigation	87
- Evolution des besoins en eau industrielle	88
III.3.3.5. Evolution des demandes totales en eau par scénario	89

III.3.3.6. Evolution des demandes en eau potable, eau pour l'irrigation et pour l'industrie :	89
- Evolution des demandes en eau potable	89
- Evolution des demandes en eau d'irrigation	90
- Evolution des demandes en eau industrielle :	91
III.3.3.7. Eau distribuée totale	91
III.3.3.8. Eau distribuée destinée à l'AEP, à l'irrigation et à l'industrie	92
III.3.3.9. Evolution du stockage en eau par scénario	94
- Les barrages	94
- Eaux souterraines	94
III.3.3.10. Demandes non satisfaites par scénario	96
III.3.3.11. Demande non satisfaite pour l'eau potable, irrigation et industrie	97
- Demande non satisfaite pour l'eau potable	97
- Demande non satisfaite pour l'irrigation	98
- Demande non satisfaite pour l'industrie	98
III.4. Conclusion	99
Références	100
Chapitre IV. Identification des zones potentielles de recharge des aquifères à l'aide du SIG	
IV.1. Introduction	103
IV.2. Matériel et méthodes	104
V.2.1. Matériel	104
V.2. Méthodes	107
IV.3. Résultats et discussion	109
IV.3.1. Cas du massif dunaire de Bouteldja	109
IV.3.1.1. Cartes thématiques	109
IV.3.1.1.1. Drainage (ID)	109
Id>2	109
1.5<Id<2	109
1<Id<1.5	109
Id<1	109
IV.3.1.1.2. Pentes	110
0< α <5%	110
5< α <15%	110
15< α <30%	110
α >30%	110
IV.3.1.1.3. Occupation du sol	111
IV.3.1.1.4. Lithologie	113
IV.3.1.1.5. Épaisseurs de la Zone Non Saturé (ZNS)	114
- une zone où la profondeur varie de 0 à 1,5 m	114
- une zone comprise ente 1,5 et 4,5 m	114
- unezone dont la profondeur oscille entre 4,5 et 9 m	114
- la zone dont la profondeur est comprise entre 9 et 15	114

- enfin, la zone comprise ente 15 et 23 m .	
IV.3.1.1.6. Perméabilité	115
IV.3.1.2. Evaluation des cotes	116
IV.3.1.3. Détermination des poids	118
a) Occupation du sol	118
b) Lithologie	118
c) Drainage	118
d) Pente	118
e) Epaisseur ZNS	118
f) Perméabilité	118
IV.3.1.4. Contribution de chaque facteur	118
IV.3.1.5. Carte de synthèse du massif dunaire	120
IV.3.2. Cas du bassin de la basse Seybouse	121
IV.3.2.1. Cartes thématiques	122
IV.3.2.2. Carte de synthèse de la basse Seybouse	123
IV.4. Conclusion	124
Références	125
Conclusions générales	129

Liste des figures

Figure I. 1. Esquisse structurale, géologique et limite du modèle dans le système aquifère d'Annaba-Bouteldja. A. Esquisse structurale d'après (Sonatrach, 1969, modifiée) ; B. Carte de localisation de la zone d'étude.	24
Figure I. 2. Coupe transversale S-N à travers le système aquifère de la plaine d'Annaba (le profil de la coupe transversale peut être déduit du point 5 de la Fig.1)	25
Figure I. 3. Carte des isopaches de la nappe phréatique (Hani, 2003)	26
Figure I. 4. Géométrie du système aquifère de la fosse Ben Ahmed	27
Figure I. 5. Carte d'équivalentes épaisseurs des couches de graviers et galets (Hani, 2003)	27
Figure I. 6. Carte des épaisseurs du semi-perméable (Hani, 2003)	28
Figure I. 7. Variation des niveaux piézométriques entre 1995 et 2009 (valeurs en m au-dessus du niveau moyen de la mer)	29
Figure I. 8. Etapes de la modélisation	30
Figure I. 9. Évolutions des Cl ⁻ , Na ⁺ , Strontium et CE le long des profils N-S, voir Figure III. 1B (Majour et al., 2018)	36
Figure I. 10. Conditions limites et superposition de la piézométrie mesurée et calibrée pour l'aquifère profond des graviers (conditions stables ; année de référence : 2003)	37
Figure I. 11. Comparaison entre les hauteurs piézométriques mesurées et simulées, octobre 2003 (valeurs en m au-dessus du niveau moyen de la mer)	37
Figure I. 12. Comparaison de la piézométrie de référence et de la piézométrie calibrée en conditions transitoires pour l'aquifère profond des graviers (année 2015)	38
Figure I. 13. Calibrage du modèle transitoire (résultats aux piézomètres sélectionnés)	38
Figure I. 14. Concentrations des chlorures : calculées vs mesurées	39
Figure I. 15. Simulations de l'intrusion marine dans le système aquifère de la basse Seybouse (concentration de Cl ⁻ en mg/l)	40
Figure I. 16. Coupe transversale représentative de la charge hydraulique (valeurs en m au-dessus du niveau moyen de la mer) et de la concentration en Cl ⁻ (valeurs en mg/l) probable dans l'aquifère en 2045	40
Figure II. 1. Les sites de prélèvements des eaux de l'oued de Seybouse	47
Figure II.2. Variation spatio-temporelle du contenu physico-chimique des eaux de l'oued Seybouse	52
Figure II. 3. Evolution de la chimie des eaux le long de l'écoulement	58
Figure III. 1. Carte du monde dans WEAP	69
Figure III. 2. Conceptualisation des sites de demande et des ressources en eau du BBS	70
Figure III. 3. Organigramme du Fonctionnement du logiciel WEAP21	72
Figure III. 4. Niveau d'activité annuelle des sites des demandes domestique.- Compte d'état actuel	73
Figure III. 5. Superficies agricoles actuelles dans le bassin de la basse Seybouse. Compte d'état actuel	74
Figure III. 6. Diagramme ombrothermique - Station des Salines	74
Figure III. 7. Diagramme ombrothermique -Station de Belkheir	74
Figure III. 8. Besoins actuels en eau pour les unités industrielles. Compte d'état actuel 2010	75
Figure III. 9. Modèle conceptuel et équations introduites dans le modèle d'humidité du sol	76

Figure III. 10. Capacité de stockage des barrages	77
Figure III. 11. Schéma conceptuel d'un barrage	77
Figure III. 12. Comparaison débit simulés et calculés. Station de Mirbeck Seybouse	79
Figure III. 13. Prélèvement maximal dans les forages	79
Figure III. 14. Paramètres généraux du modèle	80
Figure III. 15. Evolution des températures par scénario	82
Figure III. 16. Evolution des précipitations par scénario	83
Figure III. 17. Evolution du nombre d'habitants pour les scénarios SR, SCC, SNR et SGD	84
Figure III. 18. Evolution de nombre d'habitants pour les scénarios SCCPR, SPR, SCCPRGDNR	84
Figure III. 19. Croissance des superficies irriguées dans le sous bassin (SCC, SNR, SGD et SR)	85
Figure III. 20. Evolution des superficies agricoles (SPR, SCCPR et SCCPRGDNR)	86
Figure III. 21. Augmentation des besoins totaux en eau par scénario	86
Figure III. 22. Evolution des besoins en eau potable par scénario	87
Figure III. 23. Augmentation des besoins en eau d'irrigation par scénario	88
Figure III. 24. Evolution des besoins en eau industrielle par scénario	88
Figure III. 25. Evolution des demandes totales en eau par scénario	89
Figure III. 26. Evolution des demandes en eau potable par scénario	90
Figure III. 27. Augmentation des demandes en eau d'irrigation par scénario	91
Figure III. 28. Evolution des demandes en eau industrielle par scénario	91
Figure III. 29. Quantités d'eau distribués pour tous les usages par scénario	92
Figure III. 30. Volume en eau potable distribuée par scénario	93
Figure III. 31. Volume en eau distribuée pour irrigation par scénario	94
Figure III. 32. Volume en eau distribuée pour l'industrie par scénario	94
Figure III. 33. Evolution du volume d'eau stockée dans les barrages de la Cheffia et de Mexa par scénario	95
Figure III. 34. Volume d'eau souterraine	96
Figure III. 35. Demande en eau non satisfaite par scénario	97
Figure III. 36. Demande non satisfaite pour l'eau potable et par scénario	97
Figure III. 37. Demande non satisfaite pour l'irrigation par scénario	98
Figure III. 38. Demande non satisfaite pour l'industrie par scénario	99
Figure IV. 1. Situation géographique du massif dunaire de Bouteldja	105
Figure IV. 2. Situation géographique et géologie du bassin de la basse Seybouse (Ghrieb, 2021)	106
Figure IV. 3. Méthodologie d'identification des zones de recharge	108
Figure IV. 4. Carte de réseau hydrographique du massif dunaire de Bouteldja	110
Figure IV. 5. Carte des pentes du massif dunaire de Bouteldja	111
Figure IV. 6. Carte d'occupation du sol du massif dunaire de Bouteldja	112
Figure IV. 7. Carte géologique du massif dunaire de Bouteldja (d'après J.M. Vila, 1980, extrait modifié)	113
Figure IV. 8. Carte des épaisseurs de la ZNS	115
Figure IV. 9. Carte des perméabilités des sables dunaires de Bouteldja	116
Figure IV. 10. Cartes thématiques dans le bassin de la Seybouse. a : Pentes ; b : Occupation du sol ; c : Réseau hydrographique ; d : Perméabilité ; e : Géologie ; f : Drainage	122
Figure IV. 11. Carte synthèse de la recharge potentielle du massif dunaire de Bouteldja	123

Figure IV. 12. Carte synthèse de la recharge potentielle dans la basse Seybouse	124
---	-----

Liste des photos

Photo II.1. Barrage Cheffia	53
Photo II.2. Barrage Mexa	56
Photo II. 3. La Station d'épuration de l'Allélick	60
Photos II.4. Poste de dégrillage, Dessableur-desuileur, Bassin biologique et clarificateur	62
Photo II.5. Station de dessalement de Draouche	63

Liste des tableaux

Tableau II.1. Récepteurs des eaux usées au niveau de la basse vallée de la Seybouse (Source : Environnement d'Annaba 2015, in Bendjedou, 2019)	48
Tableau II.2. Liste des stations de lavage et de vidange à travers le BBS (Environnement Annaba 2015, in Bendjedou, 2019)	48
Tableau II.3. La répartition des stations de lavage et vidange à travers la zone d'étude (Environnement Annaba 2015, in Bendjedou, 2019)	50
Tableau II.4. Quantités d'engrais et produits phytosanitaires utilisés par les paysans de la région d'Annaba (d'après l'agriculture Annaba, 2008, in Bendjedou, 2019)	51
Tableau II.5. Les normes Algériennes	54
Tableau II.6. Evolution des caractéristiques physico-chimiques des eaux brutes du barrage et des eaux traitées (Haou, Bouamran, 2020)	54
Tableau II.7. Evolutions des caractéristiques physico-chimiques des eaux du barrage Mexa (2015) (d'après Guechi, Leulmi, 2016)	56
Tableau III. 1. Evolution Eau distribuée pour l'AEP, l'irrigation et l'industrie	93
Tableau IV. 1. Différents types d'occupation du sol – Intérêt hydrogéologique	112
Tableau IV. 2. Différentes classes lithologiques en fonction du pouvoir infiltrant	113
Tableau IV. 3. Classification hydrogéologique de l'épaisseur de la ZNS	115
Tableau IV. 4. Classification hydrogéologique des perméabilités	116
Tableau IV. 5. Catégorisation des facteurs influençant la recharge potentielle dans le massif dunaire de Bouteldja	117
Tableau IV. 6. Evaluation du taux de contribution des facteurs sur la recharge	119

Introduction générale

Introduction générale

Selon l'ONU, la consommation d'eau, à l'échelle planétaire est partagée à 70 % par le seul secteur agricole, 20 % par l'industrie et 10 % par les usages domestiques. Ces besoins en eau vont considérablement augmenter de +50 % à l'horizon 2030 tous secteurs confondus. Les causes d'une telle évolution des besoins sont liées principalement à une population qui ne cesse de croître, à un secteur agricole fortement consommateur d'eau et une demande en énergie qui explose.

La population de la planète devrait tourner autour de 8 milliards d'habitants en 2030, avec une concentration de plus en plus élevée dans les grandes villes, notamment dans les pays en développement. Ce qui provoque déjà nécessairement une forte augmentation des besoins en eau pour la consommation des ménages. L'augmentation des besoins en eau pour le secteur agricole devrait bondir de 70 à 90 % à l'horizon 2050. Le passage aux énergies renouvelables et aux bio-carburants, nécessite des besoins en eau très importants. 1 litre de bio-carburant consomme jusqu'à 4000 litres d'eau. L'AIE (Agence Internationale de l'Énergie) prévoit une augmentation considérable des besoins en énergie (+ 60 % entre 2012 et 2030).

La part d'énergie renouvelable étant en constante croissance, l'eau est devenue de la sorte une ressource de plus en plus utilisée dans ce secteur.

Les enjeux économiques et sociaux liés à cette explosion de la demande en eau sont de fait énormes. Cette situation prévaut à l'échelle planétaire, mais également au plan régional méditerranéen.

Cette recherche qui concerne un sous bassin méditerranéen confronté à de sérieux problèmes d'approvisionnement en eau. L'eau souterraine y est fortement sollicitée. Cette pression sur l'eau toujours plus forte est aggravée par l'impact indéniable du réchauffement du climat sur le cycle de l'eau.

Le réchauffement dû à l'effet de serre est évalué à près de 0,5°C. Il devrait atteindre 1,5 à 2°C à l'horizon 2100 (GIEC, 2018).

Ce dérèglement climatique participe à multiplication des événements climatiques extrêmes, tels que :

- fortes crues et inondations,
- sécheresses plus longues et plus intenses,
- périodes de canicules plus longues et plus fréquentes,
- ouragans, tornades, tempêtes
- pénuries d'eau et insécurité alimentaire
- ...

Ces phénomènes liés au dérèglement climatique concourent à rendre l'accès à l'eau plus difficile et impactent également la qualité de l'eau. La conjugaison du dérèglement climatique et des pressions de plus en plus fortes exercées sur l'eau évoquées plus haut aboutissent à une situation de raréfaction de l'eau caractérisée par une instabilité entre l'offre (quantité et/ou qualité de l'eau) et la demande. Selon l'OMS, un pays est en situation de rareté d'eau lorsque la disponibilité en eau est inférieure à 1700 m³ par an et par habitant. Les pays dans les zones arides à semi-arides sont dans cette situation. Les pays Maghrébins sont classés par le WRI (World Resources Institute) dans la catégorie '*pays en pénurie d'eau*'.

L'Algérie a connu une décennie difficile, entre 1980 et 1990, qui a beaucoup freiné les efforts des décideurs pour concilier l'offre et la demande en eau. Le ratio ressources en eau par habitant et par année qui était de 1500 m³ en 1962 atteint 720 m³ en 1990, de 630 m³ en 1998 et de moins de 500 m³ aujourd'hui, confirmant le manque de concordance avec la croissance démographique.

Cette situation de pénurie d'eau peut provoquer des effets néfastes sur les ressources en eau d'un point de vue quantitatif et qualitatif, sur l'environnement et sur l'économie en général :

- pertes d'exploitations agricoles (culture des céréales par exemple),
- dégradation de l'écosystème,
- surexploitation des nappes d'eau souterraines et des eaux superficielles,
- dégradation quantitatif et qualitatif des ressources en eau,
- intrusions d'eaux salines dans les aquifères côtiers,
- difficultés de gestion de la ressource en eau notamment pour tout ce qui concerne son approvisionnement et sa qualité,
- etc.

Le réchauffement climatique impacte toutes les formes de ressources en eau, mais la réaction de l'eau souterraine est plus lente et plus atténuée que celle des eaux de surface, du fait de l'inertie des aquifères. Ce qui procure à cette forme de ressource une plus grande durabilité du point de vue de la distribution dans le temps. Ainsi, l'eau souterraine représente une ressource vitale très fortement exploitée à l'échelle mondiale, subissant de fait les menaces évoquées ci-dessus. Selon les statistiques de l'UNESCO, plus de 50% de l'eau potable proviennent actuellement des aquifères. Pour certains pays, l'eau souterraine représente la principale, voire l'unique ressource. Son exploitation est en constante progression, revêtant parfois une évolution exponentielle (Inde, Chine).

Dans les pays méditerranéens, l'eau souterraine est devenue au cours des dernières décennies une ressource vitale dans tous les secteurs (social, économique, environnemental). Le bien-être humain, les moyens de subsistance, les écosystèmes, les industries, l'agriculture et le développement urbain dépendent de plus en plus de l'eau souterraine. En Algérie, les besoins en eau dans le bassin de la Seybouse sont assurés par les eaux prélevées dans la nappes mais surtout par les eaux de surface.

Cette région abrite plusieurs zones humides dont la plus connue est le lac Fetzara, d'une superficie de plus de 5.800 hectares, auxquelles il faut rajouter, en saison hivernale, les milliers d'hectares de terres inondables formant ainsi de larges prairies humides. Ce site constitue une zone humide représentative et rare de type de zone humide naturelle de la région méditerranéenne. Le lac Fetzara constitue le complément naturel des zones humides d'El Kala (situées à l'Est du bassin de la Seybouse). 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, un effectif record de 44.500 a été atteint en 1990. Le lac abrite, habituellement, 1% de la population mondiale du Canard siffleur et de l'Oie cendrée.

Outre l'intérêt qu'elle représente pour l'alimentation en eau des ménages, de l'agriculture et de l'industrie, cette région offre un lieu d'hivernage et de nidation pour beaucoup d'espèces d'oiseaux et pour le développement d'une flore d'une richesse reconnue sur le plan international. Elle subit actuellement les méfaits de l'action de l'homme qui devient préoccupante. Les prélèvements d'eau effectués dans les aquifères ont conduit à une détérioration de la qualité des eaux et provoqué un déséquilibre hydrodynamique des aquifères. Les forts volumes d'eau prélevés ont entraîné une chute des débits des sources et une avancée des eaux salines vers le continent ce qui représente une menace sur l'exploitation des nappes et la vie de la faune et de la flore au niveau des zones humides ([Hani et al., 2002](#) ; [Hani et al., 2003](#)).

Le bassin de la Seybouse connaît actuellement des problèmes récurrents de pénurie d'eau. Mettre en place une politique de gestion durable de l'eau est donc primordiale pour le futur des populations de la région, des écosystèmes et garantit la croissance économique et social.

Le bassin subit également une pollution urbaine, industrielle et agricole. 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 déversés dans l'oued, sur lesquels 3 millions de m³ sont des huiles usagées. La réhabilitation de la Seybouse peut constituer un bel exemple de gestion intégrée, puisqu'elle inclurait des volets de protection des ressources superficielles et souterraines, de rationalisation des usages domestiques, agricoles et industriels, trouver des solutions pour endiguer la pollution et de protéger l'environnement.

Seule une démarche intégrée offre la possibilité de gérer ces ressources dans le respect du milieu naturel, des intérêts des citoyens et de ceux des acteurs économiques. Les recherches envisagées répondent à cette nécessité d'intégration, depuis la localisation et l'évaluation des ressources souterraines,

jusqu'à la protection de leur qualité, mais tout en évaluant les éventuels effets néfastes. Elles contribuent ainsi à la mise en œuvre de la politique actuelle de développement durable, qui se déploie via un certain nombre de directives dont celle sur l'eau. Mais au-delà, elles s'inscrivent dans le plan adopté au sommet du développement durable de Johannesburg.

Dans cette recherche, on envisage d'élaborer un modèle hydrologique (WEAP) qui devrait permettre de représenter la variabilité climatique et les évolutions des usages de l'eau. WEAP permet, en effet, d'établir une relation entre les ressources en eau disponibles et leurs exploitations selon les différentes utilisations. Le modèle permet de prévoir l'impact et l'évolution des paramètres liés à l'eau comme la demande en eau, la demande non satisfaite, La mise en œuvre de ce modèle nécessite, bien entendu, une base de données riche avec une configuration du bassin étudié et ses cours d'eau, des séries de données météorologiques, des débits des oueds, etc....

Cette thèse comporte les quatre chapitres suivants :

Chapitre I. Simulation numérique des écoulements souterrains et de transfert d'eau saline dans l'aquifère côtier de la basse Seybouse. Le but est de faire le point sur le bilan des flux et d'appréhender les conséquences de l'exploitation intensive des ressources en milieu côtier très vulnérable à l'intrusion marine.

Chapitre II. Etat qualitatif des ressources hydriques dans le bassin de la basse Seybouse. Il s'agit de dresser l'état qualitatif des ressources hydriques du bassin et d'appréhender quelques mécanismes qui agissent sur l'acquisition du contenu physico-chimique de ces eaux. Ce travail est présenté ici à travers, notamment, une revue des travaux réalisés par plusieurs auteurs sur plusieurs sites du bassin.

Chapitre III. Gestion intégrée des ressources en eau : Application du modèle WEAP (2010-2050). C'est la confrontation de l'offre et de la demande en eau dans la basse Seybouse afin de réaliser une gestion intégrée et durable de ces ressources. L'objectif est d'identifier la situation présente et future des ressources hydriques et d'élaborer des *scenarii* de gestion par l'application d'un logiciel de planification des ressources en eau WEAP.

Chapitre IV. Identification des zones potentielles de recharge des aquifères à l'aide du SIG. La prise en compte de tous les paramètres qui influent sur la recharge permet de déterminer les zones de recharge des aquifères dunaire de Bouteldja et alluvial de la basse Seybouse. Cette approche permet aussi de caractériser les secteurs d'un aquifère qui sont potentiellement vulnérables à la pollution, d'estimer son potentiel d'exploitation et d'appréhender la durabilité de la ressource. La recharge artificielle des nappes peut être envisagé à la fois pour sécuriser l'approvisionnement en eau et pour atténuer les effets du changement climatique. Les résultats obtenus ici peuvent constituer une base pour tenter cette expérience dans la région.

**Chapitre I. Simulation numérique des écoulements
souterrains et de transfert d'eau saline dans l'aquifère
côtier de la basse Seybouse**

Simulation numérique des écoulements souterrains et de transfert d'eau saline dans l'aquifère côtier de la basse Seybouse

I. 1. Introduction

Les ressources en eau douce souterraine des nappes côtières sont, en général, fortement affectées par l'intrusion d'eau marine (Chang & Yeh, 2010 ; Mastrocicco, 2021). Le réchauffement climatique, l'élévation du niveau de la mer, la modification de l'utilisation des sols et le pompage excessif des eaux souterraines peuvent entraîner une grave intrusion d'eau de mer (Yang et al., 2013). Les zones côtières sont les régions les plus peuplées du monde (Werner et al., 2013). L'alimentation des populations, ainsi que l'approvisionnement en eau des activités agricoles et industrielles, conduisent à une surexploitation importante des nappes côtières (Datta et al., 2009) et, par conséquent, à une intrusion d'eau marine qui endommage les ressources en eaux souterraines côtières (Ilias & Pericles, 2016).

La prévision de l'avancée des eaux marines nécessite une approche pluridisciplinaire (Yang et al., 2013 ; Werner et al., 2013 ; Datta et al., 2009 ; Sappa et al., 2017 ; Sappa et al., 2019 ; Alfio et al., 2020 ; Sae-Ju et al., 2020).

Plusieurs auteurs (Oude Essink, 2001 ; Comte, 2008 ; Cimino et al., 2008) ont utilisé des méthodes analytiques, géophysiques et numériques pour localiser l'interface eau douce - eau marine. D'autres auteurs (Alfio et al., 2022 ; Acuña-Alonso et al., 2021 ; Sappa et al., 2019 ; Bouderbala, 2015) ont analysé les processus et réactions chimiques qui interviennent dans l'augmentation ou de l'appauvrissement des eaux en éléments dissous. Plusieurs approches ont été tentées pour étudier l'intrusion marine (Yang et al., 2013 ; Werner et al., 2013 ; Datta et al., 2009 ; Parisi et al. 2022) en s'appuyant sur :

- la pertinence et le rôle des facteurs hydrodynamiques ;
- l'analyse des sources et des origines de la salinisation ;
- la relation entre les concentrations en ions majeurs et la concentration en ions Cl⁻, qui est considéré comme un bon traceur de salinité ;

- le développement d'un modèle de simulation numérique de transfert de polluants.

Ce travail présente une analyse de l'avancée de l'eau marine à l'intérieur de la plaine côtière d'Annaba en utilisant le modèle MODFLOW (Harbaugh, 2005) couplé au modèle MT3DMS (Zheng et al., 2012).

MODFLOW a permis d'examiner les impacts de l'accroissement des prélèvements d'eau dans l'aquifère. La calibration du modèle en permanent permet de contrôler les hypothèses sur les conditions limites. Les simulations en transitoire permettent d'améliorer les connaissances sur la distribution des coefficients d'emmagasinement de l'aquifère et d'analyser l'évolution hydrodynamique de l'aquifère.

L'utilisation du modèle MT3DMS a permis la simulation du transfert des chlorures (Cl⁻) dans les eaux souterraines en régime permanent puis en transitoire sur une période de 12 années.

I.2. Matériels et méthodes

I.2.1. Zone d'étude

Les plaines d'Annaba-Bouteldja, présente des reliefs très peu marqués avec comme limites naturelles (fig. I.1A et B) : i) la Mer Méditerranée, sur sa frontière Nord, ii) les monts du Djebel Edough, à l'Ouest, aux roches cristallophylliennes paléozoïques, iii) des Djebels de la Cheffia et d'El-Kala, au Sud, plus orientaux dont les unités numidiennes, allochtones, d'argile et de grès recouvrent le socle. Dans la Plaine, ces ensembles sont masqués par des dépôts récents, comblement de deux bassins sédimentaires principaux, identifiées par la géophysique (sismique réflexion) (Sonatrach, 1966 ; Strojexport, 1975) avec un graben NS, la fosse Ben-Ahmed, sous la plaine de la Seybouse, et un graben SSW-NNE à WSW-ENE, la fosse Ben-M'hidi, sous celle de l'oued Kébir et le massif dunaire oriental. Ces deux fosses sont limitées par des failles à très forts pendages (60 à 80°) et séparées par un horst, subméridien, représenté par l'élévation de Daroussa à laquelle appartient, dans la partie méridionale, la butte de Daroussa. Le remplissage très hétérogène des deux grabens (Vila, 1980 ; Lamouroux and Hani, 2006), avec des alternances d'argile, de sable et de graviers, est caractérisé par de brusques changements de faciès aussi bien spatialement que temporellement.

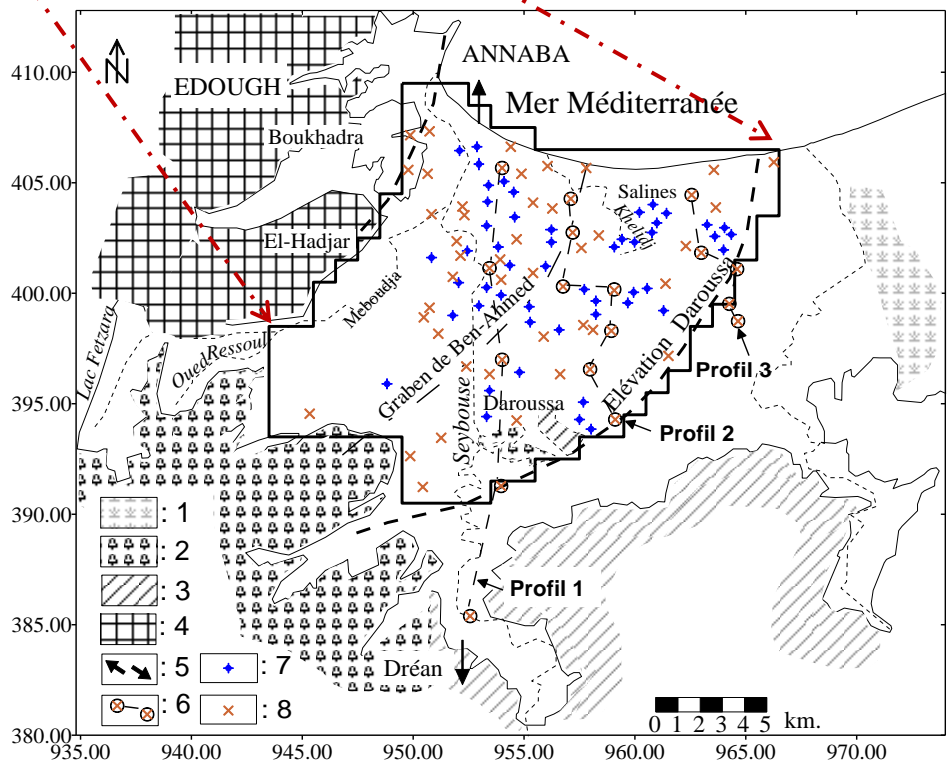
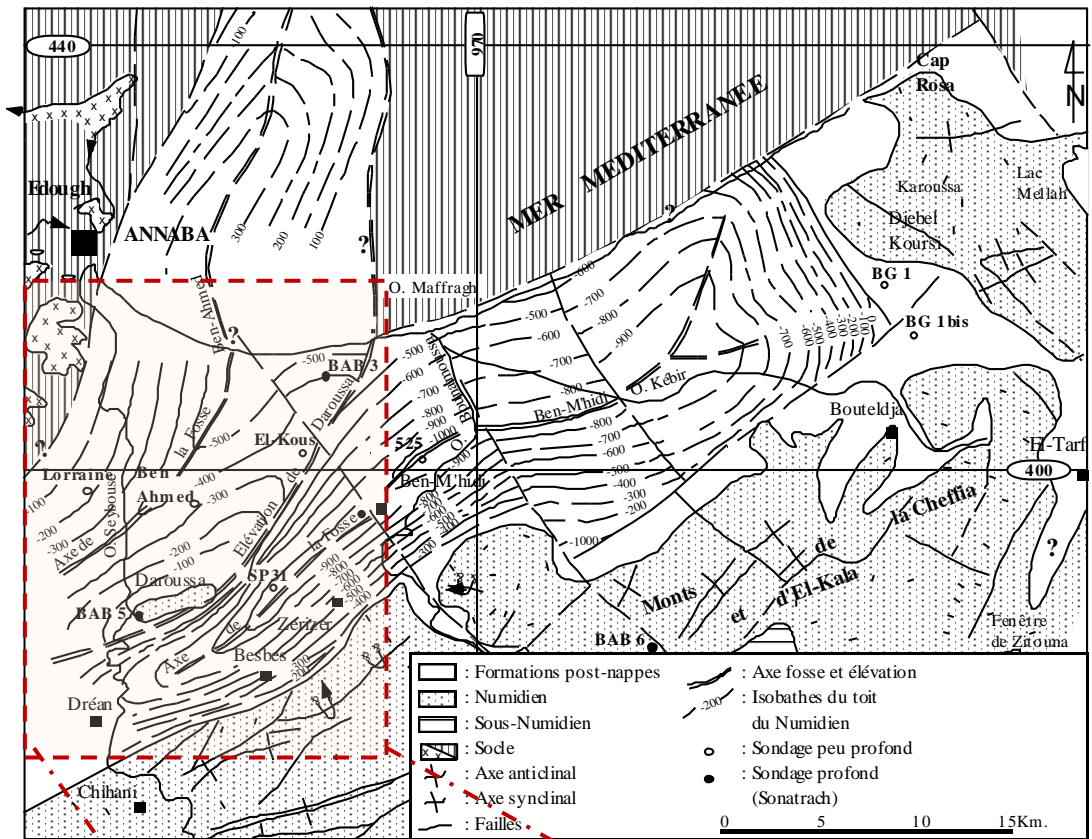


Figure 1. Esquisse structurale, géologique et limite du modèle mathématique dans le complexe aquifère d'Annaba-Bouteldja. A. Esquisse structurale d'après la prospection de la sismique réflexion (Sonatrach, 1969) ; B. Carte de situation de la zone d'étude. 1 : Marais, 2 : Alluvions anciennes, 3 : Grès (ou argile) numidiens, 4 : Métamorphique, 5 : Coupe transversale S-N, 6 : Profils physico-chimiques, 7 : Puits de pompage, 8 : Réseau de surveillance.

La plaine d'Annaba, objet de cette recherche, fait partie du grand complexe aquifère d'Annaba-Bouteldja, localisée au NE algérien (Figure I. 1A). Le site étudié se situe à l'ouest de cette vaste étendue constituée essentiellement de formations mio-plio-quadernaires. Il correspond à un bassin de subsidence qui se connecte aux reliefs limitrophes à l'W par des failles et à l'E par une surélévation subméridienne, représenté par le horst de Daroussa (Figure I. 1B).

Cette région renferme un système aquifère constitué de deux horizons aquifères : le premier correspond à la nappe phréatique constituée de sables argileux et le second concerne l'aquifère principal des graviers (Figure I. 2).

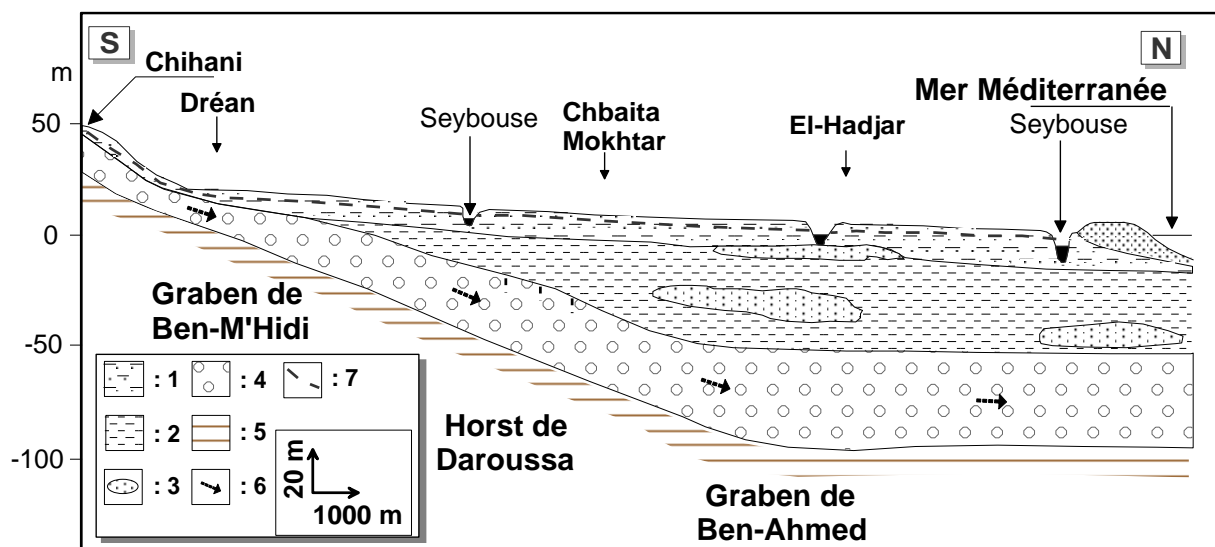


Figure I. 2. Coupe transversale S-N à travers le complexe aquifère de la plaine d'Annaba (le profil relatif à la coupe transversale peut être déduit du point 5 de la Fig.1). 1 : Formations sablo-argileuses comprenant des lentilles de sable (aquifère superficiel), 2 : Argile sableuse, limon, argile et sable (horizon semi-perméable), 3 : Sables, 4 : Alternance de couches de graviers et de galets et de couches argilo-sableuses (aquifère « profond » des graviers), 5 : Argiles du Numidien ou du Paléocène ; 6 : Niveau piézométrique de la nappe phréatique, 7 : Direction de l'écoulement dans l'aquifère profond. L'altitude est exprimée en m par rapport au niveau moyen de la mer.

L'aquifère superficiel (AS) : cette nappe se développe dans des formations sablo-argileuses comprenant des passées sableuses. Son substratum est composé d'argiles grises compactes. La répartition des lentilles de sables n'est pas régulière. Géographiquement, ces lentilles sont plus fréquentes au voisinage de l'oued Seybouse, et sur les bordures des affleurements des grès numidiens (Figure I. 3). La nappe superficielle est généralement libre, sauf localement où

elle passe en captivité sous des niveaux argileux. L'AS présente une épaisseur pouvant atteindre 18 m et une transmissivité oscillant entre 2.10^{-6} et 8.10^{-5} m²/s.

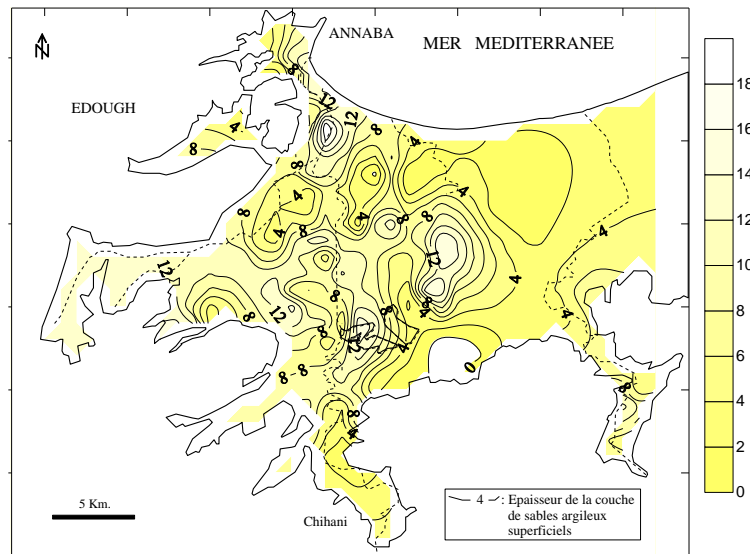


Figure I. 3. Carte des épaisseurs de la nappe phréatique (Hani, 2003).

L'aquifère « profond » des graviers (AG) : les logs de forage mettent en évidence la présence de plusieurs phases sédimentaires qui se matérialisent par l'alternance de couches grossières de graviers, de galets et d'argiles-sableuses. L'AG se caractérise par une transmissivité qui varie de 10^{-4} à 10^{-2} m²/s et un coefficient d'emménagement oscillant entre 10^{-4} et 10^{-3} .

Ce remplissage, très irrégulier, est dû au comblement hétérogène du graben Ben Ahmed. Des affleurements de graviers sont observés dans le secteur situé au Sud de Dréan et d'Asfour (Figure I. 4). Les niveaux de graviers, subaffleurant au Sud (8 à 14 m de profondeur), plongent carrément en allant vers le Nord pour atteindre une côte de près de 100 m en bordure de mer (Figure I. 1A). La carte de la figure I. 5 montre que l'épaisseur des formations graveleuses fluctue de quelques mètres à l'ouest, à environ 25 m le long de l'axe du graben Ben-Ahmed, puis passe sous les 10 m sur le horst de Daroussa (Figure I. 5). Elle augmente pour atteindre 80 à 90 m selon l'axe du graben Ben-M'Hidi orienté SW – NE. Un deuxième niveau constitué d'éléments grossiers épais d'environ 8 m a été recoupé par les forages d'eau à une profondeur de 35 à 40 m dans le secteur situé entre les monts de Boukhadra et El-Kous (Djabri et al., 2000).

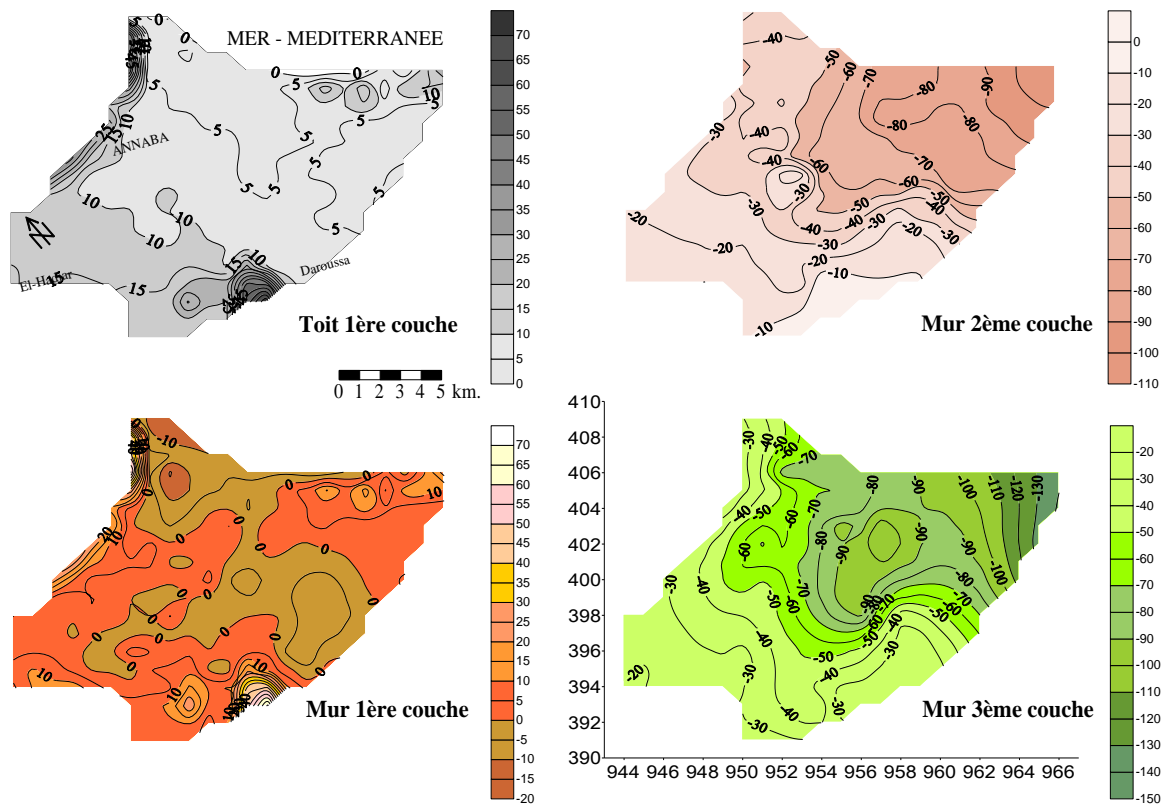


Figure I. 4. Géométrie du système aquifère de la fosse Ben Ahmed.

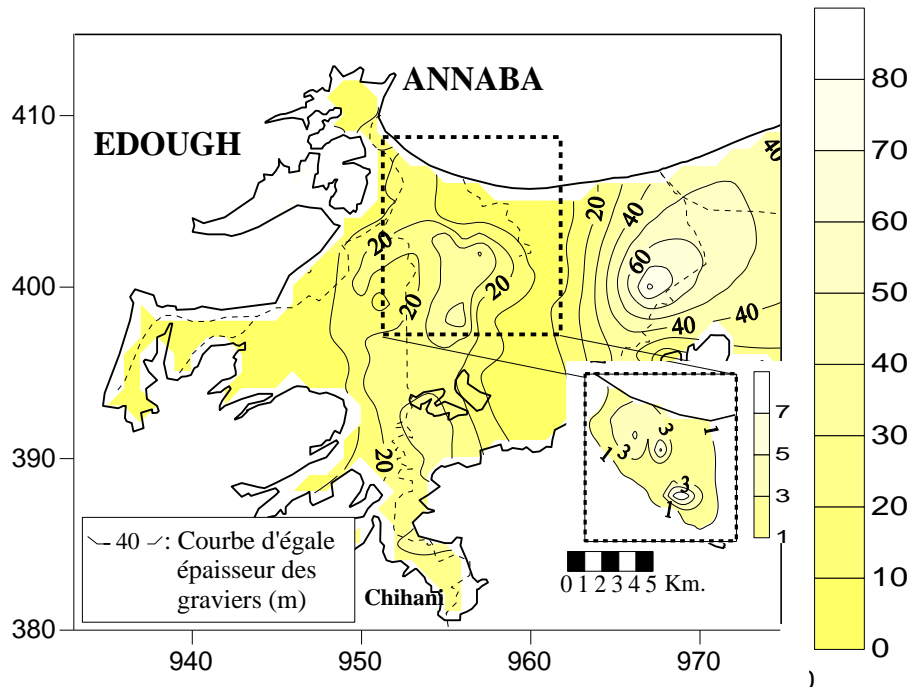


Figure I. 5. Carte d'égalité d'épaisseurs des couches de graviers et galets. La figure placée en bas à droite montre les épaisseurs du 2^{ème} horizon (Hani, 2003).

Ces deux aquifères sont, d'une manière générale, séparés par un horizon semi-perméable composée d'argile sableuse, de limon et de sable. L'épaisseur du semi-perméable oscille de 0 m (bordures Sud et Ouest) à près de 75 m en zone côtière (Figure I. 6). La perméabilité de l'éponte semi-perméable, déterminée à partir de l'interprétation des données de pompages d'essai, oscille entre 10^{-8} et 10^{-7} m/s (Hani, 2003).

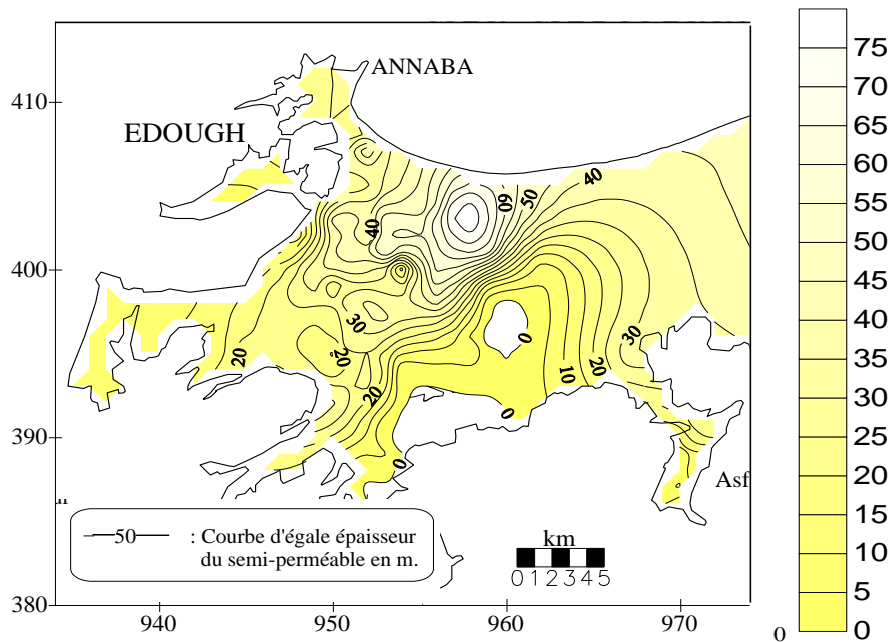


Figure I. 6. Carte des épaisseurs du semi-perméable (Hani, 2003).

La région est caractérisée par un climat du type méditerranéen avec une période humide et pluvieuse qui va de septembre ou octobre à mai, et une autre sèche s'étalant de juin à août. L'infiltration efficace est très irrégulière, elle serait de l'ordre de 200 mm.

Des études antérieures (Lamouroux & Hani, 2006 ; Majour et al., 2018), effectuées dans la plaine d'Annaba ont mis en évidence ce qui suit :

- une diminution des niveaux d'eau, mettant en cause les forts prélèvements d'eau près de la côte (Figure I. 7) ;
- le pendage des strates de graviers se fait principalement vers la mer : les caractéristiques géométriques (épaisseur et changements de pendage) de la couche de graviers montrent que les sédiments de l'aquifère profond affleurent à quelques kilomètres (environ 4-5 km) de la côte (Vila, 1980). La minéralisation

des eaux dans ce secteur de l'aquifère fait pensé à une poursuite de cette subsidence vers la mer.

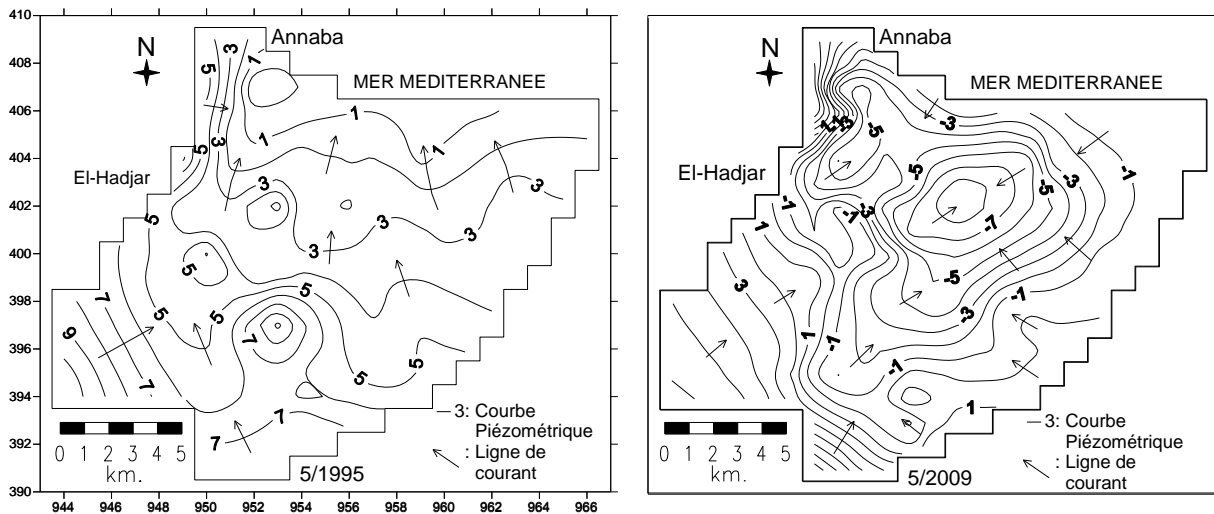


Figure I. 7. Variation des niveaux piézométriques dans l'AG entre 1995 et 2009 (valeurs en m au-dessus du niveau moyen de la mer).

De nombreuses mesures des niveaux piézométriques et d'analyses géochimiques ont été réalisées entre 2009-2012 sur un réseau de 45 points d'eau dans l'aquifère profond des graviers de la basse Seybouse.

La conductivité électrique (CE) a été déterminée en utilisant un multi paramètre WTW (Multiline P3 PH/LF SET). Les chlorures et le sodium ont été déterminées à l'aide de la méthode volumétrique (AFNOR, 1987). Les teneurs en strontium ont été mesurées par ICP-MS avec une précision de 5%. Les résultats sont commentés dans la section I.3.1.

Les données collectées ont permis d'élaborer le modèle des écoulements souterrains et de transfert de masse pour appréhender l'impact des pompages dans l'aquifère côtier de la basse Seybouse.

II.2.2. Méthodologie

Deux approches ont été appliquées pour analyser les pompages d'eau sur l'aquifère côtier de la basse Seybouse :

(1) l'analyse des mesures piézométriques et physico-chimiques de l'aquifère des graviers. Les informations nécessaires ont été acquises au niveau de l'Agence Nationale des Ressources en Eau (ANRH) sous forme de documents non publiés. Malheureusement, les mesures n'ont pas été effectuées régulièrement aux mêmes

points, en raison des problèmes d'accès aux ouvrages d'observation, de l'influence du pompage autour des piézomètres, etc.;

(2) modélisation hydrodynamique et hydrodispersive selon la procédure indiquée dans le schéma de la [figure I. 8](#).

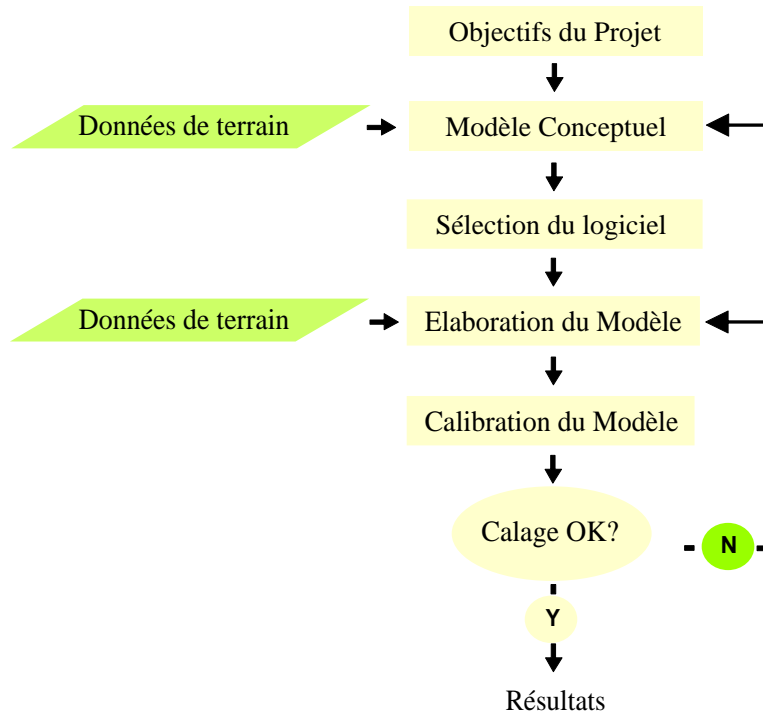


Figure I. 8. Etapes de la modélisation.

La charge hydraulique (h) est obtenue à partir de la résolution d'une équation tridimensionnelle d'écoulement des eaux souterraines (Bear, 1972) :

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[K_{ii} \frac{\partial h}{\partial x_i} \right] + q_s = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

où :

- t est le temps (T) ;
- X_i est la distance le long de l'axe des coordonnées cartésiennes (L) ;
- K est la conductivité hydraulique du matériau poreux (L/T) ;
- S_s est le stockage spécifique du matériau poreux (L-1) ;
- q_s est le terme source/puits (T-1).

L'équation de transport est liée à l'équation d'écoulement par le terme de vitesse de l'eau souterraine donné par :

$$v_i = \frac{K_{ii}}{\theta} \frac{\partial h}{\partial \chi_i} \quad (2)$$

où :

- K_{ii} est la composante principale du tenseur de conductivité hydraulique (L/T) ;
- θ est la porosité du milieu poreux.

L'équation aux dérivées partielles décrivant le transport tridimensionnel des contaminants dans les eaux souterraines (Javandel le Pape et al., 1984) peut s'écrire comme suit :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial \chi_i} \left[D_{ij} \frac{\partial C}{\partial \chi_j} \right] - \frac{\partial}{\partial \chi_i} (v_i C) + \frac{q_s}{\theta} C_s + \sum_{k=1}^N R_k \quad (3)$$

où :

- C est la concentration de contaminants dissous dans les eaux souterraines (M/L³) ;
- t est le temps (T) ;
- χ_i est la distance le long de l'axe des coordonnées cartésiennes (L) ;
- D_{ij} est le coefficient de dispersion hydrodynamique (L²/T) ;
- v_i est la vitesse d'infiltration ou la vitesse linéaire de l'eau interstitielle (L/T) ;
- q_s est le flux volumétrique d'eau par unité de volume de l'aquifère représentant les sources (positives) ou les puits (négatifs) (1/T) ;
- C_s est la concentration des sources ou des puits (M/L³) ;
- θ est la porosité du milieu poreux ;
- R_k est le terme de réaction chimique [M/(L³T)].

En supposant que seules la sorption linéaire ou non linéaire contrôlée par l'équilibre et les réactions de vitesse irréversibles du premier ordre sont impliquées dans les réactions chimiques. Le terme de réaction chimique peut être exprimé comme suit (Grove & Stollenwerk, 1984) :

$$\sum_{k=1}^N R_k = -\frac{\rho_b}{\theta} \frac{\partial \bar{C}}{\partial t} - \lambda \left[C + \frac{\rho}{\theta} \bar{C} \right] \quad (4)$$

où :

- \bar{C} est la concentration de contaminants sorbés sur le milieu poreux ;

- λ est la vitesse de réaction du premier ordre (1/T) ;
- ρ_b est la densité apparente du milieu poreux (M/L³).

En réécrivant le premier terme du côté droit de l'équation (4) comme suit :

$$\frac{\rho_b}{\theta} \frac{\partial \bar{C}}{\partial t} = \frac{\rho_b}{\theta} \frac{\partial C}{\partial t} \frac{\partial \bar{C}}{\partial C} \quad (5)$$

L'équation (3) peut être réécrite en substituant les équations (4) et (5) comme suit :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial \chi_i} \left[D_{ij} \frac{\partial C}{\partial \chi_j} \right] - \frac{\partial}{\partial \chi_i} (v_i C) + \frac{q_s}{\theta} C_s - \frac{\rho_b}{\theta} \frac{\partial C}{\partial t} \frac{\partial \bar{C}}{\partial C} - \lambda \left(C + \frac{\rho_b}{\theta} \bar{C} \right) \quad (6)$$

En réarrangeant les termes, on obtient l'équation directrice du modèle de transport de masse :

$$R \frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial \chi_i} \left[D_{ij} \frac{\partial C}{\partial \chi_j} \right] - \frac{\partial}{\partial \chi_i} (v_i C) + \frac{q_s}{\theta} C_s - \lambda \left(C + \frac{\rho_b}{\theta} \bar{C} \right) \quad (7)$$

Où R est le facteur de retard, défini comme suit :

$$R = 1 + \frac{\rho_b}{\theta} \frac{\partial \bar{C}}{\partial C} \quad (8)$$

Dans ce travail, le logiciel MODFLOW (Harbaugh, 2005) a été utilisé pour analyser les effets des prélèvements sur le système aquifère côtier de la Seybouse. La zone modélisée s'étend sur 264 km². Elle a été maillée horizontalement en 1056 cellules de 500 m de côté et verticalement en quatre couches représentant l'aquifère superficiel, l'horizon semi-perméable, l'aquifère profond à graviers et le substratum argileux numidien. Les côtes de la surface du sol et des fonds de chaque horizon ont été estimées à l'aide du dépouillement des informations de forage disponibles.

Les perméabilités de chaque couche ont été estimées à l'aide des transmissivités déduites des pompages d'essai disponibles.

Les précipitations efficaces ont été calculées par la formule de Thornthwaite en utilisant les données de pluies et de températures mensuelles observées aux Salines sur une période de 32 ans (1985 à 2017).

Les oueds ont été représentés en utilisant la fonction « rivière » du code MODFLOW ([Harbaugh, 2005](#)), en utilisant les mesures effectuées par l'ANRH en amont de la plaine.

L'AS est limité au N, par le cordon dunaire, qui renferme un aquifère avec un niveau d'eau plus élevé, ce qui empêche les eaux souterraines de s'écouler vers la mer et de créer ainsi des marécages, tels que le marais de Boukhamira. La frontière W est formée par les monts de l'Edough (gneiss et micaschistes), dont les zones altérées renferment une nappe non exploitée en raison de sa faible perméabilité. Au SW, les isopièzes montrent une faible alimentation à partir du lac Fetzara. Au S et à l'E, au contact du horst de Daroussa, les isopièzes montrent une continuité des écoulements dans l'ensemble de l'aquifère, avec vraisemblablement des échanges permanents entre les différents secteurs des plaines d'Annaba-Bouteldja. L'AS est alimenté par la recharge pluviale et par le ruissellement à travers les oueds Seybouse et Meboudja. Les sorties d'eau de l'AS sont constituées par le drainage des eaux de surface et par l'évaporation.

Les limites de l'AG sont constituées par : i) la Méditerranée au N, qui constitue son principal exutoire ; ii) les cipolins et les alluvions des hautes terrasses situées à l'W, avec un faible apport d'eau ; iii) à l'Est, deux hypothèses peuvent être analysées : compte tenu de l'amincissement des couches graveleuses, dans cette région, les isopièzes montrent une continuité des écoulements dans toute la plaine. D'autre part, cette limite orientale peut être considérée comme étanche ne serait ce que pendant la période où la nappe est au plus bas de son niveau. Ces deux hypothèses ont été testées durant le calage du modèle ; iv) au sud, dans le secteur du Dréan, l'aquifère, dont la profondeur est inférieure à 10 m, reçoit des apports provenant de la recharge pluviale, de l'oued Seybouse et des apports souterrains provenant des alluvions des hautes terrasses.

Le code MODFLOW a été couplé au modèle MT3DMS ([Zheng & Wang, 1999](#)) selon le programme suivant : i) simulation de l'intrusion marine jusqu'en 2003, ii) simulation des teneurs en Cl⁻ de 2003 à 2015, en assignant les facteurs hydroclimatiques observés à la même période et iii) simulation de la prévision de la salinité sur 30 ans de 2015 à 2045.

Pour modéliser la salinité, une concentration en chlorure (Cl⁻) de 25 g/l a été imposée à la limite Nord, en se basant sur les données d'analyse de l'eau marine réalisées, parfois, au même moment que l'échantillonnage des eaux des forages. Certaines informations sont tirées de la littérature : la porosité est prise égale à 20%, la dispersion longitudinale à l'intérieur d'une fourchette de 10 à 20 m et la dispersion transversale de 0,1 et 0,2 m (INERIS, 2000).

La simulation de l'intrusion d'eau marine est affectée par des incertitudes liées à (Lucassou et al., 2019) :

- *au modèle conceptuel des écoulements souterrains* : les informations relatives aux écoulements des eaux douces auront une importance capitale pour la crédibilité des résultats en termes de salinité :

- *une mauvaise initialisation de la distribution de la salinité* : les données expérimentales de la salinité utilisées dans l'étape du calage du modèle doivent se rapporter à un régime permanent de l'aquifère accompagné par un équilibre eau douce-eau marine qui se maintient dans le temps (état pseudo-permanent). Il s'agit là, d'une source d'erreur très contraignante pour les nappes exploitée d'une manière intensive, parce que le retour à l'état d'équilibre hydrodynamique se traduit par un transfert significatif de l'interface eau douce-eau marine pouvant prendre beaucoup de temps (quelques années). Ce retour à l'équilibre risque de ne jamais se reproduire si les débits soutirés varient en fonction du temps :

- *dispersion numérique* : les effets de transfert et de mélange dans les processus de simulation génèrent des non-linéarités dans les formules de calcul de transport et des oscillations numériques qui peuvent conduire à des incertitudes dans le calcul et/ou à des contraintes de non-convergence du modèle.

Dans cette étude, l'approche TVD (total variation diminishing method), une méthode du troisième ordre est adoptée pour minimiser les dispersions et les oscillations numériques liées aux effets d'advection et de dispersion (Zouhri et al., 2009).

I.3. Résultats et discussion

I.3.1. Evolution du contenu physico-chimique des eaux selon des profils perpendiculaires à la mer

Afin de contrôler les effets de l'intrusion marine sur le contenu physico-chimique des eaux, un suivi a été réalisé selon trois profils plus au moins perpendiculaires à la mer ([Figure I. 9](#) : les profils sont représentés dans la [Figure I. 1B](#)). Ce suivi comporte les ions chlorures Cl^- , sodium Na^+ , strontium Sr et les valeurs de conductivité électrique (CE)

Profil 1 : du nord vers le sud, les teneurs en chlorures, sodium et la conductivité diminuent fortement sur les 15 premiers kilomètres. Dans le secteur Sud, une hausse significative des concentrations de ces mêmes ions est observée. La hausse concomitante du strontium traduit l'influence du lessivage des roches évaporitiques signalées par [Vila \(1980\)](#) et [Bougherira et al. \(2015\)](#) sur le contenu physico-chimique des eaux.

Profil 2 : une chute des concentrations en Cl^- , Na^+ et CE en allant vers le Sud... Aucune hausse n'est, par contre, observée au-delà des trois premiers kilomètres comme dans le cas précédent. Le profil 2 se trouve loin de l'influence de l'oued Seybouse et donc du lessivage des évaporites.

Profil 3 : l'évolution des valeurs est semblable à celles du profil 2.

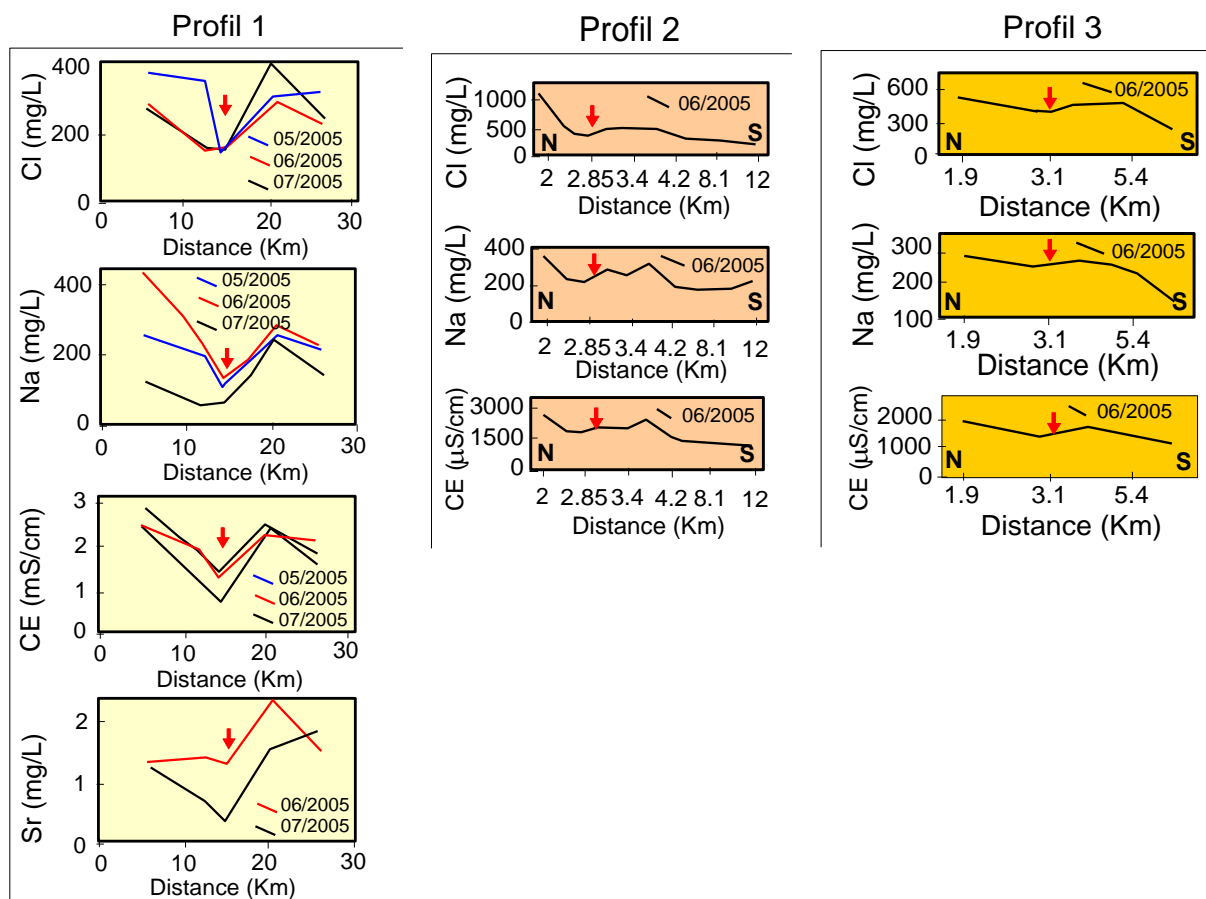


Figure I. 9. Évolutions des Cl^- , Na^+ , Strontium et CE le long des profils N-S, voir Figure I. 1B (Majour et al., 2018).

I.3.2. Modèles hydrodynamiques et de transfert des chlorures

Le modèle a été calibré en régime permanent à l'aide des données piézométriques recueillies au mois d'octobre 2003. Les résultats pour l'aquifère profond des graviers sont présentés dans la figure I. 10.

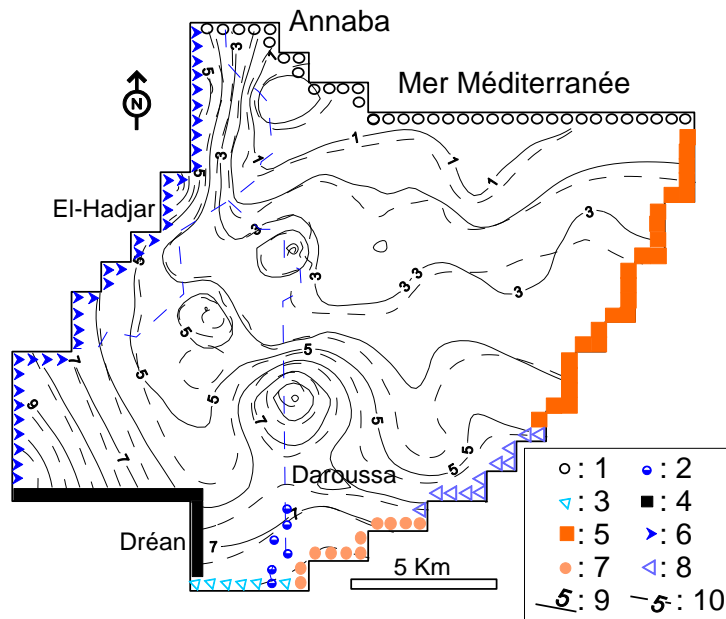


Figure I. 10. Conditions limites et superposition de la piézométrie mesurée et calibrée pour l'aquifère profond des graviers (conditions stables ; année de référence : 2003). Légende : Potentiel imposé : 1 : Mer, 2 : Seybouse ; Limite d'absence d'écoulement : 3 : Alluvions de haut niveau et argiles numidiennes, 4 : Formations imperméables, 5 : Limites du Gaben Ben-M'hidi; Limite à charge constaaante, 6 : Formations métamorphiques, 7 : Alluvions anciennes, 8 : Limites du Graben Ben-M'hidi; 9 : Courbe piézométrique mesurée en m par rapport au Nivellement Général d'Algérie (NGA) ; 10 : Courbe piézométrique simulée (en m par rapport au NGA).

La correspondance entre les charges calculées et mesurées est généralement acceptable (Figure I. 11).

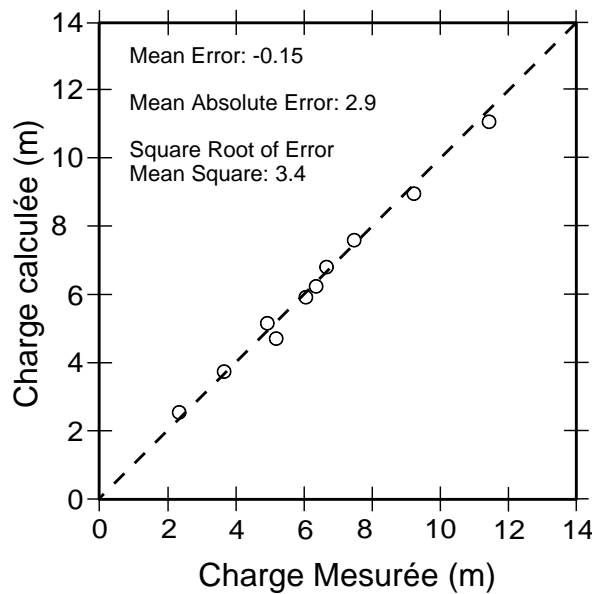


Figure I. 11. Comparaison entre les hauteurs piézométriques mesurées et simulées, octobre 2003 (en m par rapport au NGA).

Afin d'analyser les effets de l'augmentation des prélèvements sur l'aquifère, le modèle a été exécuté en conditions transitoires sur une période de 12 ans (2003-2015) (Figure I. 12 et Figure I. 13).

Le modèle d'écoulement des eaux souterraines montre une baisse significative des niveaux piézométriques due à l'augmentation des prélèvements d'eau près de la côte.

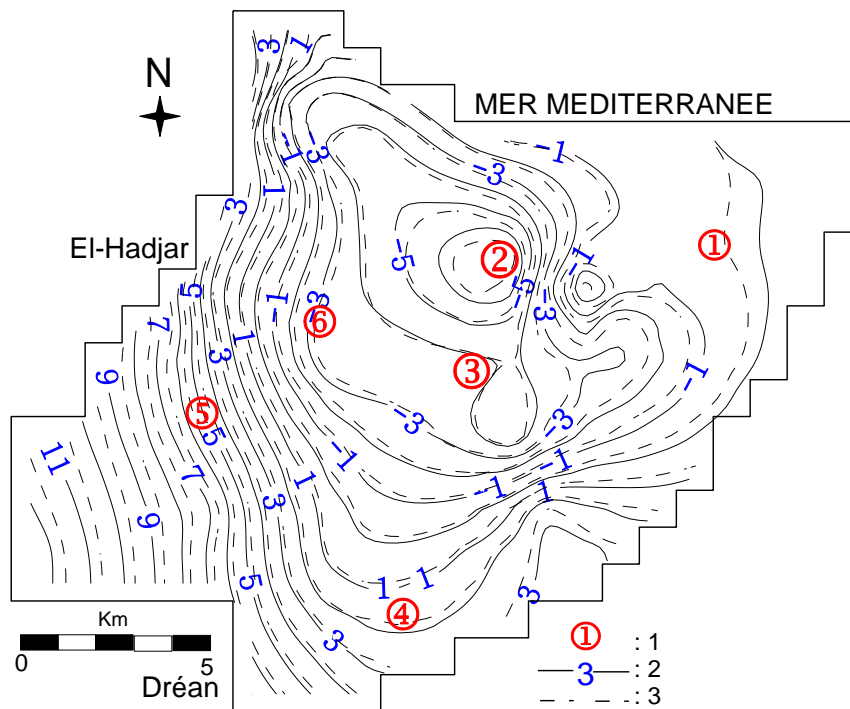


Figure I. 12. Comparaison de la piézométrie de référence et de la piézométrie calibrée en conditions transitoires pour l'aquifère profond des graviers (année 2015).
Légende : 1. Piézomètres de contrôle ; 2. Courbe piézométrique mesurée (valeurs en m par rapport au NGA) ; 3. Courbe piézométrique simulée (valeurs en m au-dessus du NGA).

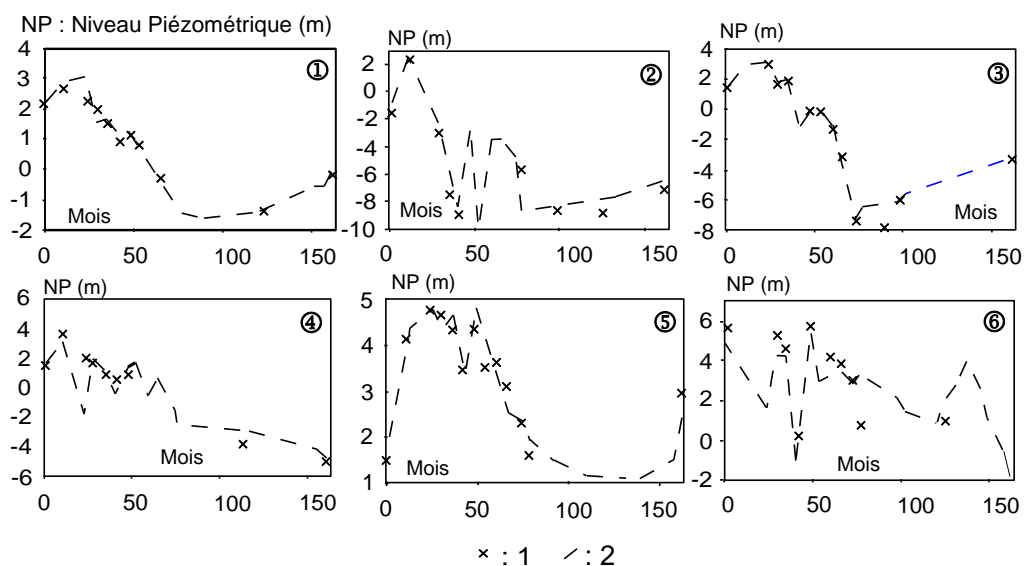


Figure I. 13. Calibrage du modèle transitoire (résultats aux piézomètres sélectionnés). Légende : 1 : hauteur de chute observée (valeurs en m au-dessus du NGA) ; 2 : hauteur de chute simulée (valeurs en m au-dessus du NGA).

Les données disponibles sur la salinité, collectées depuis 2003 ont d'abord été utilisées pour l'étalonnage du modèle de transport. La [figure I. 14](#) montre le bon ajustement du modèle hydrodispersif.

Des scénarios de salinité ont ensuite été simulés pour 1999, 2009, 2012, 2015 et 2045. Les simulations jusqu'en 2045 ont été réalisées en maintenant constants la recharge pluviale et les volumes d'eau prélevés.

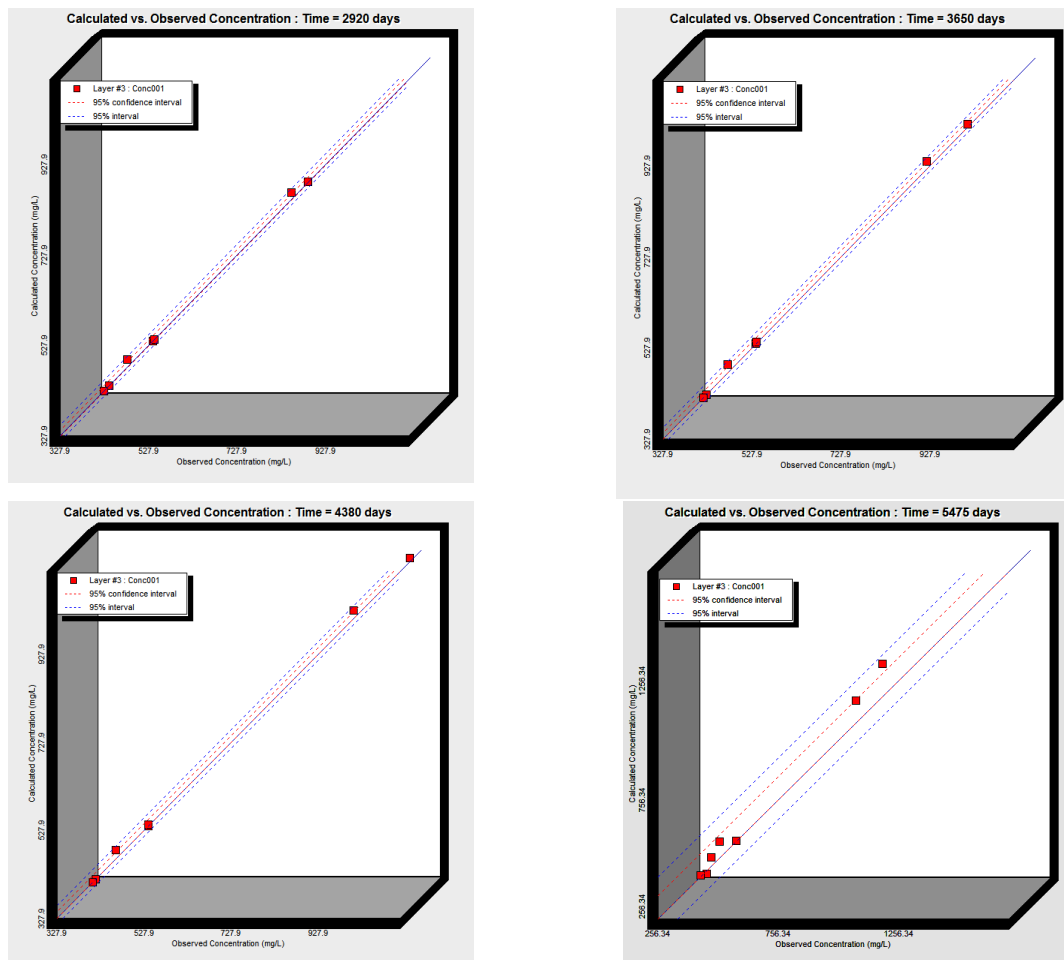


Figure I. 14. Concentrations des chlorures : calculées vs mesurées.

On peut observer que les forages situés non loin (2-3 km) de la Méditerranée provoquent une perturbation de l'interface eau douce-eau saumâtre, induisant une augmentation des valeurs de concentration de Cl^- de 300 - 600 mg/l en 2003 à 800 - 1100 mg/l en 2015 ([Figure I. 15](#)).

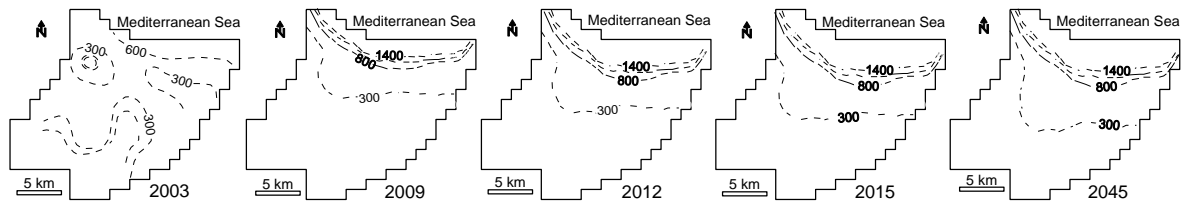


Figure I. 15. Simulations de l'évolution de l'avancée de l'eau marine dans l'aquifère côtier d'Annaba (concentration de Cl⁻ en mg/l).

La figure I. 16 visualise la charge hydraulique et la concentration en Cl⁻ prévues dans l'aquifère en 2045.

Les prélèvements dans l'aquifère induiraient une diminution des charges hydrauliques jusqu'à -6 m et des concentrations en Cl⁻ supérieures à 10 g/l jusqu'à environ 10 km de la côte.

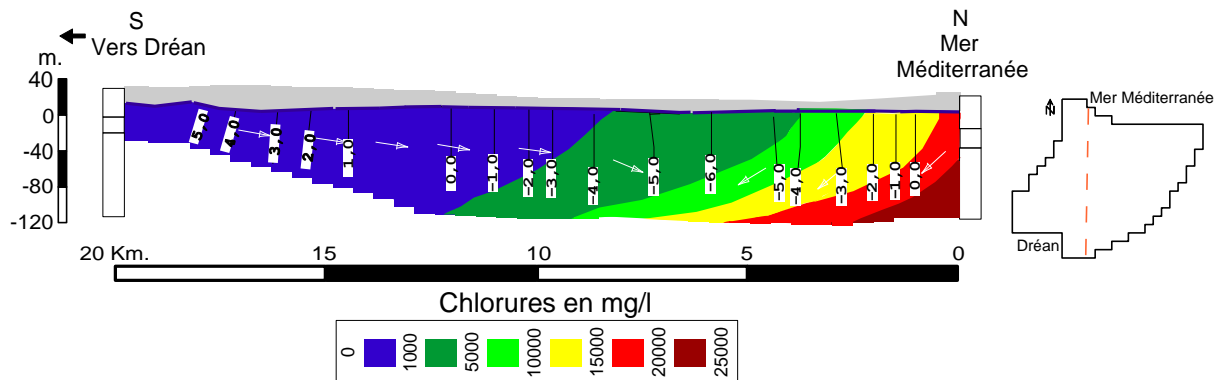


Figure I. 16. Coupe transversale représentative de la charge hydraulique (valeurs en m au-dessus du NGA) et de la concentration en Cl⁻ (valeurs en mg/l) probable dans l'aquifère en 2045.

I.4. Conclusion

Cette recherche présente une étude numérique du phénomène d'intrusion d'eau marine dans la nappe côtière d'Annaba, au nord-est algérien. L'analyse des caractéristiques physico-chimiques le long de trois profils perpendiculaires à la côte révèle que l'augmentation de la salinité des eaux souterraines résulte de deux processus principaux : l'avancée de l'eau marine dans l'aquifère dans la partie nord et la dissolution/précipitation potentielle des formations de gypse du réservoir dans la partie sud.

Les résultats numériques montrent une diminution importante des niveaux piézométriques à proximité de la côte, induite par l'accroissement des volumes d'eau prélevée et de l'avancée du coin salé à l'intérieur de l'aquifère côtier.

Les prévisions numériques pour 2045, en considérant une augmentation des prélèvements de 20%, montrent une diminution assez significative des niveaux piézométriques, jusqu'à -6 m par rapport au NGA, et une hausse des concentrations en Cl⁻ qui peut atteindre les 10 km. Ces résultats traduisent une grande fragilité du réservoir aquifère côtier qu'il s'agit de préserver en mettant en place une gestion rigoureuse des volumes prélevés en fonction de l'état de la nappe. A cet effet, il est possible de lier MODFLOW au modèle WEAP pour étudier comment les changements dans les niveaux des aquifères affectent les prélèvements dans le système aquifère.

La combinaison des résultats obtenus à l'aide des modèles MODFLOW-MT3DMS et des cartes de distribution géographique de la recharge élaborées, à l'aide des SIG, dans le chapitre IV permettra de mieux gérer les prélèvements dans les complexes aquifères. Ce couplage permet d'identifier les zones d'un aquifère qui sont vulnérables à la contamination, de déterminer son potentiel d'exploitation et d'évaluer la pérennité de la ressource.

Références

- Acuña-Alonso, C., Fernandes, A.C.P., Álvarez, X., Valero, E., Pacheco, F.A.L., Varandas, S.D.G.P., Terêncio, D.P.S., & Fernandes, L.F.S. (2021). Water security and watershed management assessed through the modelling of hydrology and ecological integrity: A study in the Galicia-Costa (NW Spain). Science of The Total Environment, 759, 143905. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143905>*
- AFNOR (French Association of Normalisation) (1987). Documentation: collection of french standards. 3rd ed. Bulletin of the libraries of France (BBF), 4, 386-388.*
- Alfio, M.R., Balacco, G., Parisi, A., Totaro, V., & Fidelibus, M.D. (2020). Drought Index as Indicator of Salinization of the Salento Aquifer (Southern Italy). Water, 12(7), 1927. <https://doi.org/10.3390/w12071927>*
- Bear, J. (1972). Dynamics of Fluids in Porous Media. New York, American Elsevier Publishing Company, 764 pp.*
- Bouderbala, A. (2015). Groundwater salinization in semi-arid zones: an example from Nador plain (Tipaza, Algeria). Environmental Earth Sciences, 73(9), 5479-5496. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3801-9>*

- Bougherira, N., Hani, A., Toumi, F., Haied, N., & Djabri, L. (2015).** *Impact of urban and industrial discharges on water quality in the Meboudja plain (Algeria).* *Hydrological Sciences Journal*, 62(8), 1290-1300. DOI : 10.1080/02626667.2015.1052451
- Chang, C.M., & Yeh, H.D. (2010).** *Spectral approach to seawater intrusion in heterogeneous coastal aquifers.* *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(5), 719-727. <https://doi.org/10.5194/hess-14-719-2010>
- Cimino, A., Cosentino, C., Oieni, A., & Tranchina, L. (2008).** *A geophysical and geochemical approach for seawater intrusion assessment in the Acquadolci coastal aquifer (Northern Sicily).* *Environmental Geology*, 55, 1473-1482. DOI: 10.1007/s00254-007-1097-8
- Comte, J.C. (2008).** *Contribution of electrical tomography to modeling density flows in coastal aquifers. Application to three contrasting climatic contexts (Canada, New Calédonia, Sénégal).* *Doctoral thesis, Aix-Marseille Academy, Avignon and Vaucluse countries University*, 198 p.
- Datta, B., Vennalakanti, H., & Dhar, A. (2009).** *Modeling and control of saltwater intrusion in a coastal aquifer of Andhra Pradesh, India.* *Journal of hydro-environment Research*, 3(3), 148-159. DOI: [10.1016/j.jher.2009.09.002](https://doi.org/10.1016/j.jher.2009.09.002).
- Grove, D.B., & Stollenwerk, K.G. (1984).** *Computer Model of One-Dimensional Equilibrium Controlled Sorption Processes.* U.S. Geol. Survey Resources Investigations Report, 84, 4059.
- Harbaugh, A.W. (2005).** *MODFLOW-2005, the U.S. Geological Survey Modular Ground Water Model the Ground-Water Flow Process.* Reston, VA, USA: US Department of the Interior, US Geological Survey. Volume 6.
- Ilias, S., & Pericles, L. (2016).** *Modeling seawater intrusion in overexploited aquifers in the absence of sufficient data: application to the aquifer of Nea Moudania, Northern Greece.* *Hydrogeology Journal*, 24, 2123-2141. DOI: 10.1007/s10040-016-1455-2
- INERIS. (2000).** *Underground Pollution: Parameters and parameterization of models in flow and transport of pollutants.* TRANSPORT Project, Program 2000.
- Javandel, I., Doughty, C. & Tsang, C.F. (1984).** *Groundwater Transport: Handbook of Mathematical Models.* American Geophysical Union, Water Resources Monograph, 10.
- Lamouroux, C., & Hani, A. (2006).** *Identification of groundwater flow paths in complex aquifer systems.* *Hydrological Processes: An International Journal*, 20(14), 2971-2987.

- Lucassou, F., Schroëtter, J.M., Baptiste, J. & Coppo, N. (2019).** *Sensitivity of bretons coastal aquifers to saline intrusions. Final Report. BRGM/RP-69012-FR, 227.*
- Majour, H., Hani, A., & Djabri, L. (2018).** *Salinity and modelling of the Annaba aquifer system, North-East of Algeria. Journal of Water and Land Development, 37 (IV-VI). 113-120.*
- Mastrocicco, M. (2021).** *Studies on water resources salinization along the Italian coast: 30 years of work. Acque Sotterranee - Italian Journal of Groundwater, 10(4), 7-13. DOI: 10.7343/as-2021-537*
- Oude Essink, G.H.P. (2001).** *Saltwater intrusion in a three-dimensional groundwater system in the Netherlands: A numerical study. Transport in Porous Media, 43, 137-158.*
- Parisi, A., Alfio, M.R., Balacco, G., Güler, C., & Fidelibus, M.D. (2022).** *Analyzing spatial and temporal evolution of groundwater salinization through Multivariate Statistical Analysis and Hydrogeochemical Facies Evolution-Diagram. Science of the Total Environment, 862, 160697. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160697>*
- Sae-Ju, J., Chotpantarat, S., & Thitimakorn, T. (2020).** *Hydrochemical, geophysical and multivariate statistical investigation of the seawater intrusion in the coastal aquifer at Phetchaburi Province, Thailand. Journal of Asian Earth Sciences, 191, 104165. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2019.104165>*
- Sappa, G., Ferranti, F., & De Filippi, F.M. (2017).** *Assessment of Vulnerability To Seawater Intrusion For The Coastal Aquifer Of Dar Es Salaam (Tanzania). International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM17 (12), 111-118.*
- Sappa, G., De Filippi, F.M., Ferranti, F., & Iacurto, S. (2019).** *Environmental issues and anthropic pressures in coastal aquifers: a case study in Southern Latium Region. Acque Sotterranee-Italian Journal of Groundwater, 8(1). <https://doi.org/10.7343/as-2019-373>*
- Vila, J.M. 1980.** *The Alpine chain of Eastern Algeria and Algerian–Tunisian borders. Doctoral thesis, Pierre and Marie-Curie University, Paris VI, France, 58-68.*
- Werner, A.D., Bakker, M., Post, V., Vandenbohede, A., Lu, C., Ataie-Ashtiani, B., Simmons, C., & Barry, D.A. (2013).** *Seawater intrusion processes, investigation and management: recent advances and future challenges. Advances in water resources, 51, 3-26. DOI: [10.1016/J.ADVWATRES.2012.03.004](https://doi.org/10.1016/J.ADVWATRES.2012.03.004)*

- Yang, J., Graf, T., Herold, M., & Ptak, T. (2013).** *Modelling the effects of tides and storm surges on coastal aquifers using a coupled surface-subsurface approach. Journal of contaminant hydrology, 149, 61-75. DOI: 10.1016/j.jconhyd.2013.03.002*
- Zheng, C., & Wang, P. (1999).** *MT3DMS: A Modular Three-dimensional Multispecies Transport Model for Simulation of Advection, Dispersion, and Chemical Reactions of Contaminants in Groundwater systems; documentation and user's guide. US Army engineer research and Development Center Contract reportSERDP-99-1, Vicksburg, Miss. <http://hdl.handle.net/11681/4734>*
- Zheng, C., Cao, G., Hill, M.C., & Ma, R. (2012).** *MT3DMS: Model use, calibration, and validation. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 55(4), 1549-1559. DOI: [10.13031/2013.42263](https://doi.org/10.13031/2013.42263)*
- Zouhri, L., Smaoui, H., Carlier, E., & Ouahsine, A. (2009).** *Modelling of hydrodispersive Processes in the fissured media by flux limiters schemes (Chalk aquifer, France). Mathematical and Computer Modelling, 50(3-4), 516-525. <http://doi.org/10.1016/j.mcm.2009.0>*

Chapitre II. Etat qualitatif des ressources en eau dans le bassin de la basse Seybouse

Etat qualitatif des ressources en eau dans le bassin de la basse Seybouse

II.1. Présentation du bassin de la Seybouse

Le bassin de la Seybouse est localisé dans la région NE de l'Algérie et couvre une superficie de 6471 km² et un lit de 240 km de long. Il s'étend sur 68 communes dans sept régions (wilayas) : Annaba, El Tarf, Skikda, Constantine, Oum El Bouaghi, Guelma et Souk Ahras. Les eaux du bassin constituent une source fondamentale de vie dans la région. Les eaux de la Seybouse, dans son ensemble, sont utilisées à des fins surtout industriels et agricoles. La région possède un potentiel hydrique assez intéressant contenu notamment dans les formations alluviales des plaines de Guelma, Bouchegouf et Annaba et dans les formations métamorphiques de l'Edough et calcaires de Guelma et Bouchegouf.

Un million trois cent mille (1.300.000) habitants selon le recensement de 2008, vivaient dans les soixante huit communes, et sept wilayas (départements). 33 communes sont situées entièrement à l'intérieur du bassin et 35 partiellement. L'agglomération d'Annaba compte dix huit pour cent (18%) de la population totale du bassin de la Seybouse.

L'industrie est située autour d'Annaba, particulièrement pour la valorisation des produits miniers (sidérurgie, engrais chimiques), du conditionnement de la tomate des activités annexes. Au total :

- près de 86 unités industrielles importantes,
- 8 seulement ont leur propre station d'épuration.

L'agriculture est caractérisée par une irrigation traditionnelle (gravitaire) dans le bassin du Haut Charef, et une irrigation moderne (par aspersion) dans la basse Seybouse. Céréales et cultures maraîchères 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).

Sur le bassin de la Seybouse, les pluies varient en moyenne de 450 mm au Sud, à 735 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 est de 1370 mm à Annaba de 1270 mm à Guelma.

Dans cette recherche, nous nous intéresserons au bassin de la basse Seybouse (BBS), ou Seybouse maritime, situé à l'aval du grand bassin et couvre une superficie de 1066 km². Dans ce chapitre, nous dresserons une liste non exhaustive des sources de pollution dans le sous bassin, puis nous essayerons de décrire, grossièrement, l'état de la qualité des eaux superficielles et souterraines à travers les résultats de recherches effectuées par plusieurs auteurs dans la région (Figure II.1).

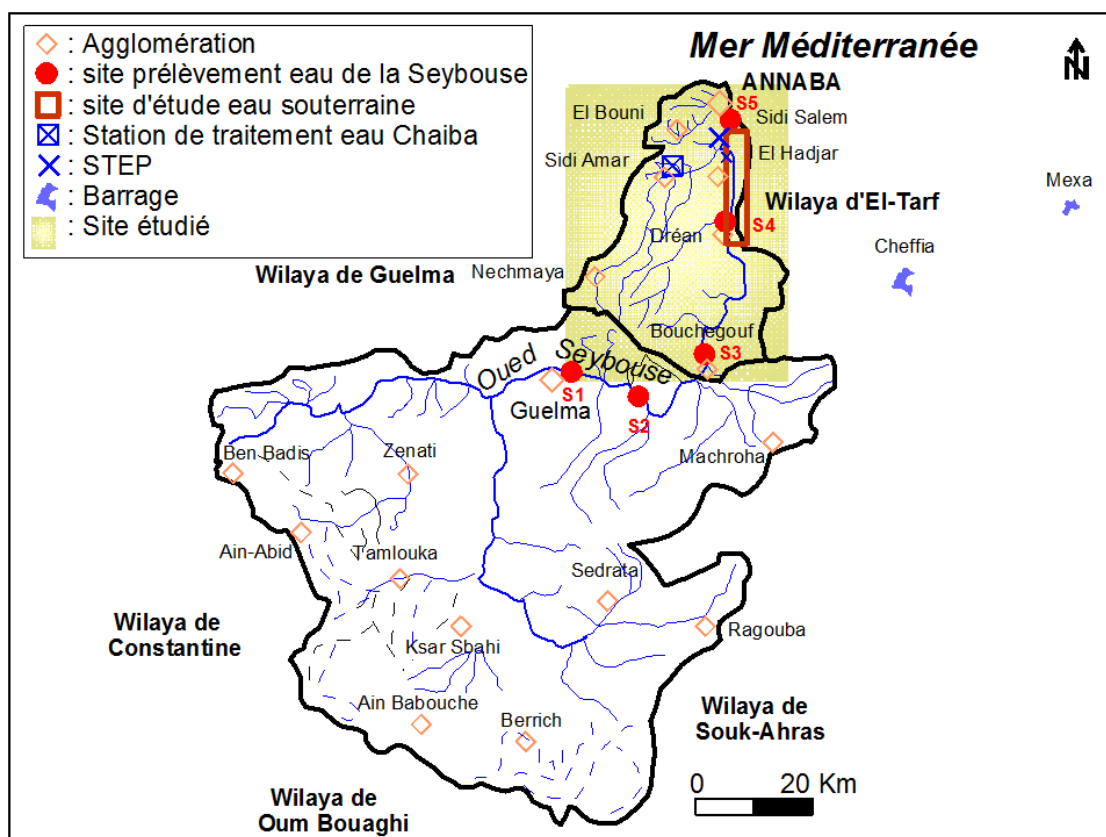


Figure II. 1. Les sites de prélèvements des eaux de l'oued de Seybouse.

II.2. Les sources de pollution dans la basse Seybouse

II.2.1. Les eaux usées :

Le tableau II.1 résume les principales agglomérations, situées de part et d'autre de la Seybouse et qui rejettent les eaux usées sans aucun traitement dans le milieu récepteur.

Tableau II.1. Milieux récepteurs des eaux usées au niveau du BBS (d'après Agence Environnement d'Annaba 2015, in Bendjedou, 2019).

Agglomération/Commune/Wilaya	Récepteur
Boucheougouf/ Boucheougouf/ 24	Oued Seybouse
O. Fragha/ O. Fragha/ 24	Oued Seybouse
Moumna/ O. Fragha/ 24	Oued Seybouse
Boukamouza/ O. Fragha/ 24	Oued Seybouse
Chihani/ Chihani/ 36	Oued Seybouse
Dréan/ Dréan/ 36	Oued Seybouse
Feddaoui Moussa/ Dréan/ 36	Oued Seybouse
Chebaita Mokhtar/ Chebaita Mokhtar / 36	Oued Seybouse
El Hadjar/ El Hadjar/ 23	Oued Meboudja
Sidi Amar/ Sidi Amar/ 23	Oued Meboudja
El Bouni/ El Bouni/ 23	Oued Seybouse
Sidi Salem/ Sidi Salem/ 23	La mer Méditerranée

II.2.2. Les eaux issues des unités industrielles :

Le site étudié héberge des unités industrielles particulièrement polluantes. Le [tableau II.2](#) récapitule les usines qui rejettent dans le cours d'eau de la Seybouse.

Tableau II.2. Liste des stations de lavage et vidange à travers le BBS (Environnement Annaba 2015, in Bendjedou, 2019).

Nom - Lieu	Nature	Type de polluant	Volume rejeté m ³ /s
Eriad - Boucheougouf	Semoules		4
Eriad dépôt - Boucheougouf	Dépôt de semoule		1
Unité de textile militaire (CHC) - Boucheougouf	Fabrication d'habillement militaire et chaussures	P,I	-
L'huilerie (privé) - Oued Fragha	Transformation d'olive	-	-
Saca (privé) - Dréan	transformation de tomate	-	28
Les Aures (privé) - Dréan	transformation de tomate	-	184
Sarl E.R.W.A.EST – ZI Pont Bouchet	Aciérie	Rejet non polluant	5
EPE-ENCC – ZI Pont Bouchet	Charpenterie Métallique chaudronnerie et usage	Eaux usées	NC
TRANS CANAL EST – ZI Pont Bouchet	Production tuyaux en béton armé	Eaux usées industrielles	1.5
CHO-CO-TEK (privé) – ZI Pont Bouchet	Chocolaterie et confiserie	Eaux usées	9
S.N.C. Belkheri (privé) – ZI Pont Bouchet	Confiserie		N.C
SAT.PAP ALIF (privé) – ZI Pont Bouchet	Transformation de papier	Eaux usées	9
M.T.A – ZI Pont Bouchet	Maintenance, Transport, transit et agréage	Eaux Huiles Usées et pluviales	4
ETS Boutra (privé) – ZI Pont Bouchet	Fabrication des Sachets en plastique		10
Sarl Rhumel Gum – ZI Pont Bouchet	Fabrication de Chewing-Gum	Eaux usées	1

Sarl EST (privé) – ZI Pont Bouchet	Transport Est	Eaux + huiles usées	2
SOFARM (privé) – ZI Pont Bouchet	Fabrication articles médicaux		2
T.M.P.K (privé) – ZI Pont Bouchet	Transformation du plastique	Eaux usées	2
SIDER G.C.L – ZI Pont Bouchet	Commercialisation des produits sidérurgiques	Eaux usées	1
E.N.G.L – ZI Pont Bouchet	Production et Distribution de gaz industriel	La chaux et eaux usées	600
TREFIL EST ex E.N.T.P.L – ZI Pont Bouchet	Transformation de Produits longs (acier)	PI	10
EN SIDER – ZI Sidi Amar	Sidérurgie		10429
SARL PROCOMAC (privé) – ZI Sidi Amar	Fabrication de Carrelage GRANITO		1
PLASTINATTE (privé) – ZI Sidi Amar	Transformation du plastique		1
Sarl Vitre Khezzane – ZI Sidi Amar	Fabrication de Pare-brise, vitres et miroirs		1
E.N.A.B. – ZI Sidi Amar	Bois et dérivés		1
HIPPONE NATTES (privé) – ZI Sidi Amar	Fabrication des nattes plastiques		5
S.N.C. C.E.C.C.O (privé) – ZI Sidi Amar	Transformation du papier		1
Sarl S.T.C.M. (privé) – ZI Sidi Amar	Torréfaction de café		1
G.I.P.C. CELPAP ENEPAC – ZI Sidi Amar	Récupération et Compactage des déchets papier et carton		1
PROCIM ex (PROSIDER) – ZI Sidi Amar	Construction et galvanisation		
G.T.H ex (ETHAN) – ZI Sidi Amar	Travaux hydrauliques	Eau chargée NH3, huile Usagé, boue de chrome, Poussière métallique	5
S.N.V.I/URD 801 - Z.I. Allelick	URD 801 Unité de Rénovation et de distribution		99
FERROVIAL - Z.I. Allelick	Allélick FERROVIAL Construction de matériels et		102
ORELAIT - Z.I. Allelick	Allelick ORELAIT Production et Commercialisation		666

	du lait et des		
Ex. EBAN ETCA - Z.I. Allelick	Bâtiments et TP		9
GRAVIEST - Z.I. Allelick	Production et Commercialisation des produits avicoles		80
G.A.E.-U.A.B. Annaba Gharbi Aissa	Production et Commercialisation des aliments de bétail		4
SNC Zemouli Frères – ZI Sidi Salem	Boissons gazeuses		1
Coop. El Ekhoua (privé)	Fabrication de parpaings		2
ASMIDAL - ZI Sidi Salem	Production des engrais phosphatés et azotés		2800

Les stations service, notamment, celles qui assurent le lavage, la vidange et le graissage des véhicules sont des sources potentielles de pollution. Le [tableau II.3](#) récapitule les principales stations installées dans le BBS.

Tableau II.3. Répartition des stations de lavage et vidange à travers la zone d'étude (Environnement Annaba 2015, in [Bendjedou, 2019](#)).

Région	Station lavage vidange graissage	Région	Station lavage Vidange graissage
Bouchegouf	3	Sidi Amar	6
Drean	4	El Bouni	3
Chbaita. M	2	Sidi Salem	2
El Hadjar	3		

II.2.3. Pollution agricole

Les activités agricoles sont réputées pour être une source de pollution avérée, surtout dans le cas où l'utilisation des engrais n'est pas raisonnée. Le [tableau II.4](#) donne une estimation des quantités d'engrais et de produits phytosanitaires utilisés par les paysans de la région d'Annaba.

Tableau II.4. Quantités d'engrais et de produits phytosanitaires utilisés par les paysans de la région d'Annaba (d'après l'agriculture Annaba, 2008, in Bendjedou, 2019).

Type de produits	Unité 1	Quantité livrée aux producteurs
Engrais NPK ×10	Quintal	1928
NPK 3× 15 SP	Quintal	24500
PK 0 20 25	Quintal	200
TSP Super Phosphatés	Quintal	9048
UAN	Quintal	541
NPK 3×15 KCL	Quintal	4512
UREE 46%	Quintal	14178
Sulfate d'ammonium 21%	Quintal	90
SSP (Super simple PH)	Quintal	5512
Produits phytosanitaires		
1. Solides		
Insecticides	Kg	1721
Fongicides	Kg	6055
Herbicide	Kg	1678
2. Liquides		
Insecticides	Litre	15714
Fongicides	Litre	6056
Herbicide	Litre	30874

II.3. Les eaux superficielles :

II.3.1. Les eaux de l'oued Seybouse :

Pour appréhender la qualité des eaux de l'oued Seybouse, un suivi a été réalisé par Reggam et al., 2015 sur un cycle annuel durant l'année 2012. Les paramètres mesurés sont la Température, le pH, la conductivité électrique, la dureté totale, les sulfates, les ortho-phosphates, les chlorures, l'oxygène dissous, les matières en suspension, les matières organiques et les composés azotés.

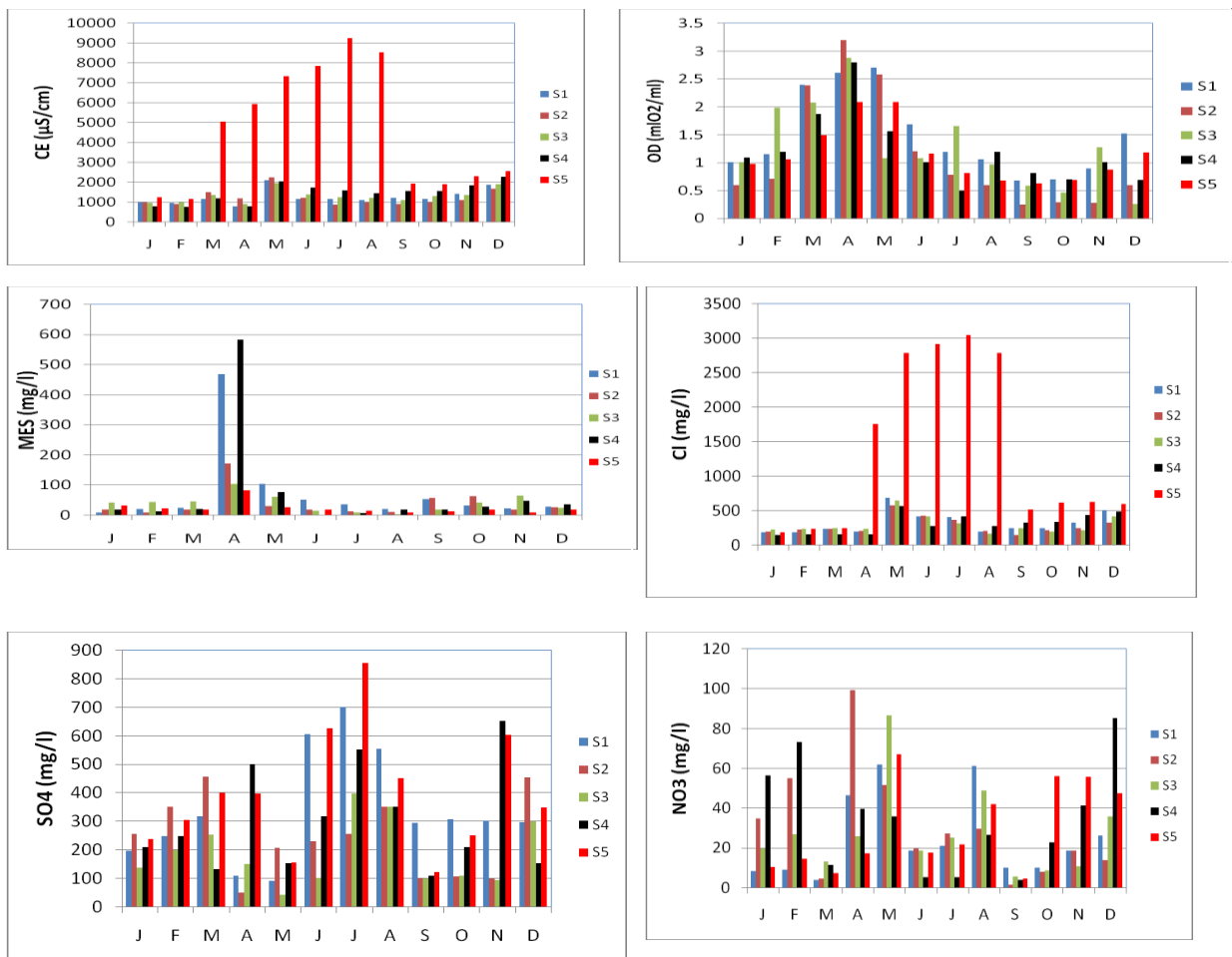
Les graphiques des figures II.2 visualise l'évolution spatio-temporelle des caractéristiques physico-chimiques observées dans cinq stations réparties de l'amont vers l'amont : S1 au niveau de Guelma, S2 à l'amont de Bouchegouf, S3 au niveau de Bouchegouf, S4 à Dréan et enfin S5 à l'embouchure avec la mer (figure II.1).

Les concentrations élevées en chlorures (1359 mg/l), sulfates (290 mg/l), matières organiques (6 mg/l) et les concentrations relativement réduites d'oxygène dissous sont observées dans les cinq points de prélèvement.

Le dernier site S5 situé est le plus pollué. Les valeurs des sulfates, des ortho-phosphates, des chlorures, des matières en suspension et des composés azotés

sont les plus élevées. Cette situation est la résultante d'une grande partie des rejets sauvages solides et liquides effectués directement dans la rivière. Ces rejets se traduisent par une importante charge minérale et organique à l'aval de l'oued.

Il apparait, d'après les résultats de la recherche effectuée par [Reggam et al., 2015](#) que les eaux de la Seybouse ne peuvent être utilisées pour l'irrigation comme c'est le cas actuellement. Ces eaux ne peuvent, en aucun cas, être utilisées dans l'agriculture ou même comme rejet dans le milieu récepteur comme c'est le cas aujourd'hui sans un traitement préalable.



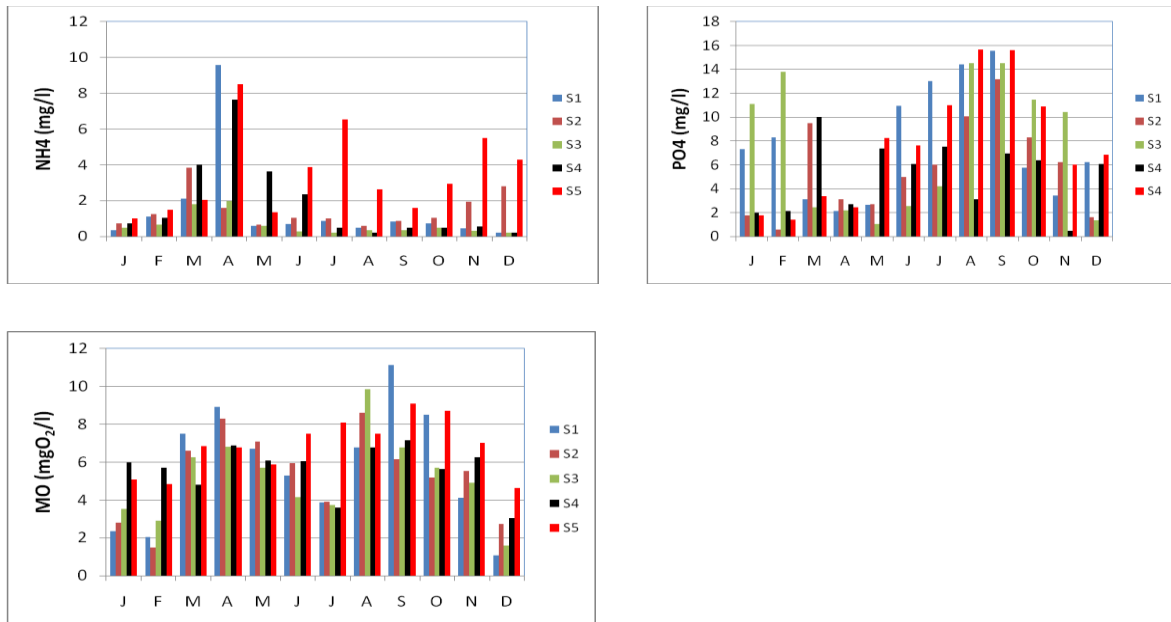


Figure II.2. Variation spatio-temporelle du contenu physico-chimique des eaux de l'oued Seybouse.

II.3.2. Les eaux des barrages de la Cheffia et de Mexa :

II.3.2.1. Les eaux du barrage Cheffia (Photo II.1) :



Photo II.1. Barrage Cheffia.

Tableau II.5. Les normes Algériennes.

Paramètre		Unité	Norme Algérienne
PH		*	6.5-9
Température		C°	25
Conductivité		µs/cm	3125
Turbidité		NTU	5
Salinité		g/l	1
TAC		mg/l CaCO3	*

Dureté Totale		mg/l	500
Ammonium		mg/l	0.5
Calcium		mg/l	200
Magnésium		mg/l	150
Nitrite		mg/l	0.1
Nitrate		mg/l	50
Phosphore		mg/l	5
Indice fer total		mg/l	0.3
Indice permanganate		mg/l	3

L'évolution des caractéristiques physico-chimiques des eaux brutes et traitées sont données dans le [tableau II.6](#).

Tableau II.6. Evolution des caractéristiques physico-chimiques des eaux brutes du barrage et des eaux traitées (Haou, Bouamran, 2020).

	Années	2015	2016	2017	2018	2019
pH	Eau brute	7.74	7.7	7.36	7.38	7.14
	Eau traitée	7.36	7.56	7.2	7.23	7.04
T°C	Eau brute	19.19	19.5	20.72	20.99	18.58
	Eau traitée	20.26	19.35	19.9	20.45	19.3
CE	Eau brute	337.56	397.5	440.33	409.09	372.33
	Eau traitée	351.13	403.45	433.98	444.5	426.33
TDS	Eau brute	168.07	201.6	220.12	198.5	185.36
	Eau traitée	174.6	200.45	211.38	222.3	213.13
Turbidité	Eau brute	54 .36	24.2	57.82	30.47	69.63
	Eau traitée	9.93	3.75	4.52	5.29	6.58
Salinité	Eau brute	0.2	0.2	0.21	0.2	0.2
	Eau traitée	0.2	0.2	0.22	0.23	0.18
Couleur	Eau brute	146.67	40.0	148.75	72.22	176.11
	Eau traitée	26.67	12.86	27	13	18.5
TAC	Eau brute	79.98	99.9	106.93	97.68	91.44
	Eau traitée	73.61	96.25	98 .41	105 .20	78.92
Dureté total	Eau brute	140.44	144.7	193	165.8	176
	Eau traitée	147.5	150.67	200	174	184
Ammonium	Eau brute	0.1	0.06	0.08	0.12	0.08
	Eau traitée	0.06	0.08	0.07	0.06	0.064
Calcium	Eau brute	42.16	47.1	54.06	48.90	44.35
	Eau traitée	41.14	47.14	54.11	51.11	46.81
Magnésium	Eau brute	10 .18	7.4	18.96	10 .87	11.9

	Eau traitée	11.16	8.73	22.37	12.5	12.84
Nitrate	Eau brute	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1
	Eau traitée	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1
Nitrites	Eau brute	0.04	0.02	0.03	0.07	0.04
	Eau traitée	0.04	0.02	0.02	0.02	0.02
Phosphore	Eau brute	0.025	0.025	0.057	0.025	0.025
	Eau traitée	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025
Indice permanganate	Eau brute	3.4	4.3	5.19	4.45	4.74
	Eau traitée	0.76	1.72	2.68	2.30	1.16
Indice Fer total	Eau brute	0.29	0.2	0.5	0.14	0.42
	Eau traitée	0.19	0.01	0.2	0.02	0.21
Bicarbonates	Eau brute	95.36	112.82	130.27	121.18	111.39
	Eau traitée	89.68	113.27	136.87	127.32	95.40

A travers ces résultats, les paramètres relatifs aux eaux du barrage de la Cheffia, ont montré que la conductivité enregistrée est extrêmement faible. Le barrage est situé dans une zone fortement boisée où se trouve une végétation très dense ce qui explique l'augmentation des valeurs de turbidité.

Les paramètres étudiés sont donc dans les normes, sauf la turbidité et la couleur à cause de relation directe avec les matières en suspension dans les eaux (MES). Les MES sont supérieures aux normes. Les fortes teneurs observées proviendraient des rejets d'eaux usées domestiques riches en MES.

Les valeurs enregistrées montrent des teneurs faibles en chlorure. Concernent les nitrates, les eaux du barrage de la Cheffia enregistrent une augmentation soudaine des niveaux à des périodes bien définies, qui coïncident généralement avec les périodes d'épandage d'engrais au niveau des terres agricoles.

En cas de précipitation, les ions NO_3 , qui ne sont pas absorbés par les plantes, sont transférés vers le barrage. L'apport des nitrates aux eaux du barrage fait augmenter la végétation de surface. Sa présence en forte quantité peut également conduire à un problème de santé publique.

II.3.2.2. Les eaux du barrage Mexa (Photo II.2.) :



Photo II.2. Barrage Mexa.

Les données des analyses d'eau de surface présentées ci-dessous sont collectées au niveau de l'algérienne des eaux (ADE) et de l'agence nationale des ressources hydriques (ANRH) qui effectue des contrôles réguliers mensuels.

Tableau II.7. Evolutions des caractéristiques physico-chimiques dans les eaux du barrage Mexa (2015) (d'après Guechi, Leulmi, 2016).

Eléments	Unités	Min	Moy	Max	Norme OMS
pH	-	7,26	7,59	7,92	6,5 à 8,5
Température	°C	19	35	40	25
Conductivité	µm/cm	272	391,13	501	1500
Oxygène dissous	%	82,4	345,46	2891	80
Résidu sec	mg/l	204	288,75	361	200
Calcium	mg/l	32,06	44,83	56,11	200
Magnésium	m/l	1,9	11,8	25,52	150
Chlorure	mg/l	27,63	38,25	43,92	250
Fer Fe	mg/l	0,01	0,23	0,61	0,2
Ammonium NH ₄ ⁺	mg/l	0,11	0,2	0,38	0,5
Nitrates NO ₃ ⁻	mg/l	0,08	5,3	2,34	3
Nitrites NO ₂ ⁻	mg/l	0,01	0,06	0,13	50
Coliformes fécaux	-	0	108,25	1100	-
Turbidité	NTU	272	391,125	501	5
Matière En Suspension	mg/l	16	26	36	30
Sulfates SO ₄ ⁻	mg/l	20	29,2	38,4	250
DBO5	mg/l	1	2,41	4,5	3
DCO	mg/l	21	29,83	44	20
Bicarbonates HCO ₃ ²⁻	mg/l	62,7	98,86	123,15	-
Potassium K ⁺	mg/l	3	4	60,7	12
Sodium Na ⁺	mg/l	24,6	47,2	7,6	200

La température moyenne des eaux du barrage Mexa dépasse les normes de potabilité qui est de l'ordre de 25°C (Tableau II.7). Les conductivités varient entre 272 µS/cm (aout) et 463 µS/cm (décembre), elles fluctuent en fonction des précipitations. Les faibles valeurs sont enregistrées durant la saison de pluie (dilution) et les plus fortes en été, à cause de la reconcentration des minéraux dans les eaux. Ces valeurs sont inférieures aux normes de l'OMS.

Les valeurs du pH sont inférieures aux standards de potabilité ($6,50 < \text{PH} < 8,50$).

La valeur la plus faible de l'oxygène dissous est de 82,4 mg/l et la plus forte est de 2891 mg/l. Ces valeurs sont au-dessus des normes de potabilité (20 mg/l).

Le résidu sec fluctue entre 204 mg/l et 361 mg/l.

La variation des teneurs en calcium est très limitée, elle fluctue entre 32 et 56 mg/l. Les concentrations sont toujours inférieures aux normes. Les concentrations en magnésium sont inférieures à 30 mg/l et donc inférieures aux normes. Les teneurs en potassium sont très faibles, elles oscillent entre 3 mg/l (Aout) et 7,6 mg/l (Octobre). Le sodium oscille entre 24 mg/l (hautes eaux) et 61mg/l (basses eaux). Les bicarbonates fluctuent entre 67.6 et 123,15 mg/l, les mois d'avril, mai, aout et septembre sont caractérisées par les teneurs les plus élevées. Les concentrations des chlorures enregistrées dans les eaux barrage indiquent des valeurs inférieures aux normes de potabilité de 250 mg/l. En revanche, les teneurs en fer se situent au-dessus de la norme de 0,2 mg/l.

Les eaux du barrage contiennent des teneurs en Ammonium très variable, fluctuant entre 0,12 et 0,3 mg/l. L'intervalle de fluctuation des nitrites est de 0,01 à 0,61 mg/l. Généralement, les eaux de tous les mois, sauf celles de janvier et mars, ont des teneurs en dessous des standards de potabilité (3 mg/l). Les teneurs en nitrate sont compris entre 0,08 et 5,3mg/l.

La DBO varie de 4,5 mg/l (avril) à 1 mg/l (aout). Selon la norme de l'OMS, ces eaux sont classées dans la catégorie d'eau de bonne qualité.

Quant à la DCO, les eaux du barrage peuvent être classées de qualité passable à médiocre.

II.4. Les eaux souterraines :

Évolution physico-chimique des eaux le long de l'écoulement.

La plaine d'Annaba renferme un aquifère d'une grande importance contenue dans des formations grossières constituées de graviers et de galets. Ce réservoir est sous l'influence, par sa situation géographique, de la mer, des formations géologiques limitrophes et des actions anthropiques. Nous avons cité, au chapitre I, précédent, le cas de l'influence de l'intensification des prélèvements dans les forages sur l'équilibre hydrodynamique de la nappe des graviers. Nous donnons, dans ce qui suit, celui de l'influence de la mise en captivité de la nappe sur le contenu physico-chimique des eaux. Ce thème a été évoqué pour la première fois par [Debièche \(2002\)](#) et par [Aoun-Sebaiti \(2010\)](#) à travers un échantillonnage d'eau selon un profil S-N.

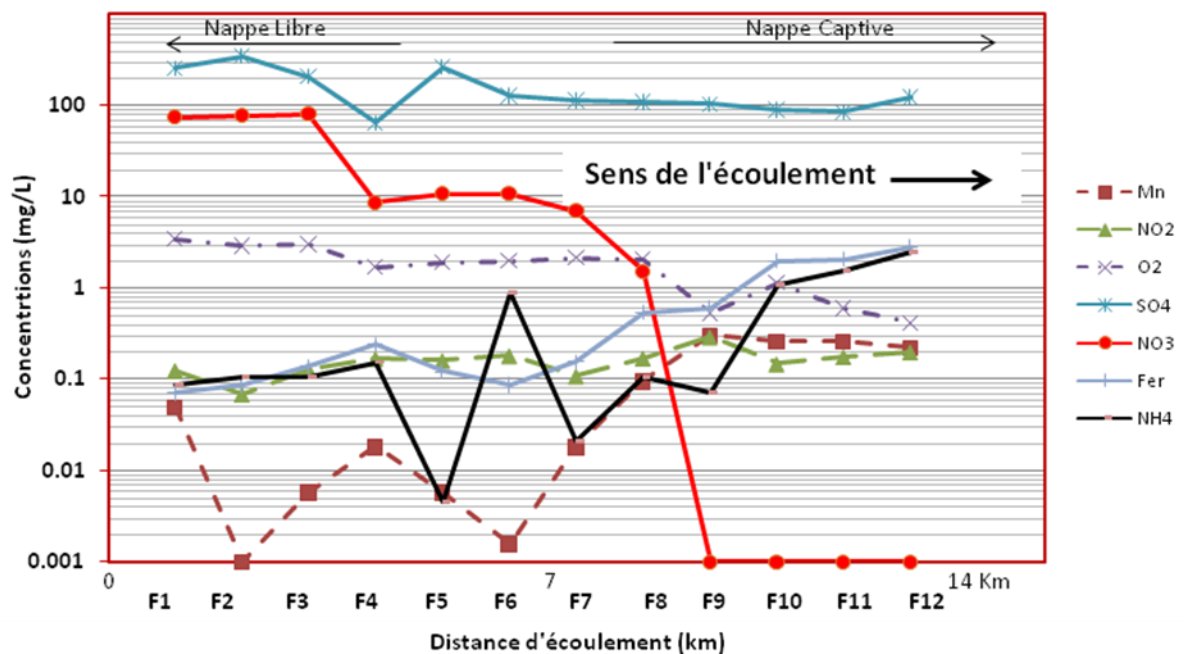


Figure II. 3. Evolution de quelques éléments chimiques des eaux le long de l'écoulement. Dans la présente recherche, un suivi chimique a été effectué en mai 2021 sur douze forages selon un profil parallèle à la Seybouse dans le sens de l'écoulement souterrain, c'est-à-dire de la partie libre de la nappe des graviers au Sud vers la partie captive au Nord. Les teneurs mettent en évidence une évolution très nette dans les premiers kilomètres qui suivent le passage en captivité de l'aquifère graveleux ([Figure II. 3](#)). La diminution des nitrates de près de 79 mg/l commence à partir du forage F3 pour disparaître totalement (0 mg/l) à partir du F9. Comme pour les nitrates mais d'une manière plus modérée, les concentrations de l'oxygène dissous, montrent une baisse de 3,5 mg/l à 1 mg/l.

Le manganèse, le fer et l'ammonium montrent, au contraire, une augmentation des teneurs liées au passage de nappe libre à nappe captive. Les teneurs passent en effet de 0 à 0,2 mg/l pour le manganèse, de 1 à 3 mg/l pour le fer et de 0 de 2,5 mg/l pour l'ammonium. La hausse des teneurs de l'ion NH_4^+ est liée au fait que les conditions réductrices régnant dans la partie captive sont compatibles avec sa stabilité.

C'est vraisemblablement le phénomène de dénitrification des nitrates et des nitrites vers l'ammonium, suivie d'une diminution de l'OD et d'une augmentation du fer et du manganèse. [Debièche \(2002\)](#) signalait déjà la présence de l'odeur d' H_2S au niveau du F12.

Ce phénomène rend les échanges gazeux avec l'air atmosphérique beaucoup plus lent que dans les conditions libre (voir dans certaines conditions quasiment inexistantes). L'oxygène dissous apporté par l'eau de la nappe libre qui alimente la partie captive par drainance, est alors consommé par l'activité biologique, d'où la teneur très faible détectée dans la partie aval de la nappe, au Nord. L'aquifère acquiert alors un caractère réducteur qui explique la décroissance du potentiel redox qui passe de près de 450 mV (F1) à 350 mV (F11 et F12).

II.5. La station de traitement de Chaïba

Les eaux traitées de Chaïba sont destinées à l'alimentation en eau potable (AEP) de la ville d'Annaba et de sa région. La station traite l'eau brute du barrage de Cheffia, situé dans la wilaya d'El Tarf. L'usine de potabilisation de Chaïba est alimentée par l'eau brute venant du barrage de Cheffia. La station traite 3600 m^3/h , et subit les différentes phases de traitement. C'est une station de traitement et de production d'eau potable, se trouvant à Chaïba à une hauteur de 77 m.

La pré-oxydation, élimine les bactéries, les virus et les algues. La coagulation et la floculation ont pour but de déstabiliser et d'agglomérer les particules en suspension en floes 80% des matières en suspension se décantent dans un décanteur pulsator et 20% sera éliminé par un filtre à sable.

Enfin, la désinfection se fait par le biais du chlore dont une quantité est laissée dans les canalisations.

II.6. La STEP d'Allélick (Annaba)

La STEP d'Allélick est mise en service en septembre 2009. Cette usine est capable de traiter 580 m³ par jour, devrait recycler les eaux usées des communes d'Annaba, d'El-Bouni, de Sidi Amar et d'El Hadjar (photo II. 3). L'idée est d'endiguer les dégradations provoquées par la contamination des surfaces agricoles du BBS, jusqu'à un passé récent irriguées par des eaux polluées par les nombreux rejets des oueds Seybouse, Meboudja et autres affluents.



Photo II. 3. La Station d'épuration de l'Allélick.

La STEP de l'Allélick se trouve à 5 kilomètres au sud d'Annaba et à juste à quelques dizaines de mètres de l'oued Seybouse.

La station a une superficie de 15 ha, une capacité de 580.700 équivalent/habitant et 674.000 équivalent/habitant d'ici 2025 – 2035. Elle reçoit les eaux usées d'Annaba, El Bouni, Boukhadra, Sidi Salem, Boucedra, Bouzaroura et du couloir Kherraza, Oued Ennil en première phase. En deuxième phase elle devrait recevoir celles d'El Hadjar et de Sidi Ammar. Le débit actuel entrant est de 2,45 m³/s et un débit nominal de traitement de 83.620 m³/jour. Le volume moyen des eaux usées traitées annuellement est de 2.000.000 m³/an. Ce dernier est appelé à augmenter avec le raccordement prochain des agglomérations d'El-Hadjar et de Sidi Amar.

II.6.1. Procédé d'épuration adopté à la STEP d'Allélick :

La station d'épurations d'Annaba qui fonctionne depuis 2010 est en cours d'exploitation avec un procédé d'épuration boue activée moyenne charge. Le

procède d'épuration par boues activées à moyenne charge comprend 2 filières l'une pour les eaux et l'autre pour les boues dont le processus est le suivant :

- mise en contact de l'eau brute avec une masse bactérienne en présence d'oxygène (aération), suivie par une phase de séparation et décantation des floccs bactériens (clarification).
- épaissement des boues biologiques et primaires, digestion et déshydratation.
- traitement tertiaire de l'eau épurée, désodorisation du prétraitement et de la déshydratation.

Cette station a pour vocations :

- *à l'horizon 2025* : le traitement des effluents d'Annaba, El Bouni et du couloir de khareza,
- *à l'horizon 2035* : le traitement des effluents de Sidi Amar et d'El Hadjar.
- permettre le recyclage des eaux usées épurées soit au profit de l'agriculture (périmètre irrigué de Bounamoussa) soit au profit de l'industrie (exemple : sidérurgie d'El Hadjar).

II.6.2. Fonctionnement de la STEP d'Allélick :

Grossièrement, les traitements suivants sont appliqués :

Traitement de l'eau :

- a) Prétraitement :
- b) Traitement primaire
- c) Traitement biologique
- d) Traitement tertiaire
- e) Traitement des boues

Les cinq grandes étapes à retenir au niveau du fonctionnement de la station d'épuration sont ([Photo II.4](#)) :

- a) le dégrillage
- b) le dessablage et le déshuilage
- c) le traitement biologique
- d) la clarification
- e) le traitement des boues



Poste de dégrillage



Dessableur-desuileur



Bassin biologique



clarificateur

Photos II.4. Poste de dégrillage, Dessableur-desuileur, Bassin biologique et clarificateur.

En somme, l'usine d'épuration garantit un traitement global des eaux usées pour assurer la pérennité de l'écosystème dans son ensemble.

II.7. Station de dessalement d'eau de mer à Draouche (Photo II.5):

Pour renforcer les capacités hydriques de la région, le dessalement de l'eau de mer est l'option choisie à travers la construction d'une station au niveau de la localité de Draouche (wilaya d'El-Tarf). C'est une usine destinée à traiter 300.000 m³/jour, dont 80% de l'eau potable obtenue seront utilisés pour répondre aux besoins des ménages de la wilaya d'Annaba. Un projet pour la réalisation d'un canal d'un diamètre de 1,5m sur une distance de 46 km pour alimenter les réservoirs des wilayas d'El-Tarf et Annaba est en cours de réalisation. Par ailleurs, deux réservoirs d'une capacité de 200.000m³ chacun seront réalisés au niveau de la station de traitement, ce qui correspond à la consommation journalière de la wilaya d'Annaba.



Photo II.5. Station de dessalement de Draouche

Cette station a surtout pour objectif d'alimenter en eau potable une grande partie des ménages et à fournir de l'eau potable aux populations des nouvelles agglomérations nouvellement créées (nouvelle ville BenMostefa Benaouda et Kalitoussa).

II.8. Conclusion

En conclusion, la basse Seybouse est soumise à plusieurs types de pollution. Cette dernière 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 déversés par an dans l'oued, sur lesquels 3 millions de m³ sont des huiles usagées, selon les ingénieurs de l'environnement d'Annaba.

Outre la construction de plusieurs barrages, plusieurs mesures sont prises aussi bien pour protéger l'environnement que pour sauvegarder la ressource. Ces mesures ont consisté en :

- la construction d'une station d'épuration, STEP d'Allélick, de plus de 600 000 équivalent/habitant appelée à traiter les eaux usées de toutes les grandes agglomérations de la région et approvisionner l'agriculture et l'industrie,
- la construction d'une station de traitement des eaux à Chaïba, pour la potabilisation des eaux à raison de 3600 m³/h,
- d'une usine de dessalement pour sécuriser durablement l'approvisionnement en eau des populations. Cette station traite 300.000 m³/jour, dont 80% des eaux produites sont destinées à la région d'Annaba.

Références

Aoun-Sebaiti B., 2010. Modélisation quantitative et qualitative pour une gestion intégrée des ressources en eau. Application à la plaine d'Annaba. Thèse de Doctorat Univ. Badji Mokhtar Annaba, 140 pages.

- Ben Djeddou A., 2019.** *Caractérisation de l'interaction eaux surface- eaux souterraines dans le sous bassin versant de la Seybouse maritime (Nord-Est Algérien).* Université Ziane Achour –Djelfa. 99 pages
- Debieche T.H., 2002.** *Évolution de la qualité des eaux (salinite, azote et Métaux lourds) sous l'effet de la pollution saline, Agricole et industrielle Application à la basse plaine de la seybouse - nord-est algérien.* Doctorat de l'Université de Franche-Comte. 199 pages.
- Guechi H., Leulmi A., 2016.** *Les eaux superficielles caractérisation physico chimique et aptitude (lac reservoir du barrage Mexa nord est algerien).* Master université Badji Mokhtar Annaba, 84 pages.
- Haou S., Bouamran E R., 2020.** *Etude qualitative des eaux du barrage Cheffia (NE algérien.* Master Université Badji Mokhtar Annaba, 84 pages.
- Reggam A., Bouchelaghem H., Houhamdi M., 2015.** *Qualité Physico-Chimique des Eaux de l'Oued Seybouse (Nord-Est de l'Algérie): Caractérisation et Analyse en Composantes Principales (Physico-chemical quality of the waters of the Oued Seybouse (Northeastern Algeria): Characterization and Principal Component Analysis).* J. Mater. Environ. Sci. 6 (5) (2015) 1417-1425.
- Talhi A., 2018.** *Étude de l'aptitude à l'irrigation des eaux Épurées de la station d'épuration de l'Allélick wilaya de Annaba.* Mémoire de master Université Badji Mokhtar- Annaba. 83 pages.

**Chapitre III. Gestion intégrée des ressources en eau :
Application du modèle WEAP (2010 -2050)**

Gestion intégrée des ressources en eau : Application du modèle WEAP (2010-2050)

III.1. Introduction

La gestion intégrée des ressources en eau (GIRE) est une notion toujours d'actualité qui tient compte de l'ensemble des aspects de la gestion. La GIRE concerne tous ceux qui utilisent les ressources en eau (populations, unités industrielles, agriculteurs...). Ce nouveau concept a été introduit lors des conférences traitant des questions de l'eau et de l'environnement qui se déroulées à Dublin (Irlande) et à Rio de Janeiro (Brésil) en 1992. Depuis, la GIRE, a attiré l'attention des chercheurs et des gestionnaires des ressources hydriques.

En Algérie, de nombreux chercheurs ont utilisé l'outil GIRE, pour apporter des solutions aux problèmes récurrents de la gestion des ressources hydriques. Nous pouvons citer l'exemple des travaux sur la plaine d'Annaba effectués par [Aoun Sebaiti et al. 2013](#), ceux de [Sakaa et al. 2013](#), se rapportant à la région de Skikda. De [Bouznad et al. \(2016\)](#) qui continuent leurs recherches sur les ressources hydriques dans la vallée de l'Oued Righ (Sahara septentrional algérien) et de [Daifallah et al. \(2018\)](#) qui ont effectué des recherches très poussées sur de nombreux scénarios d'exploitation des ressources en eau dans le bassin de l'Oued Kébir Ouest. Les travaux de [Hamlat et al. \(2012\)](#) qui ont porté sur l'utilisation d'un système informatisé pour la gestion de l'eau dans les bassins versants de l'ouest algérien.

Dans le cadre de ce travail de thèse, nous avons tenté d'appliquer les concepts de la GIRE au bassin de la basse Seybouse (BBS). Ce dernier subit actuellement un stress hydrique aigu. Le BBS se caractérise également par les nombreux conflits d'usage entre agriculteurs, industriels et services chargés de l'approvisionnement en eau potable. Le recours à l'utilisation du WEAP, pour gérer d'une manière rationnelle l'eau, est justifié par la simplicité et la facilité de la démarche. Il est

surtout motivé par l'utilisation de scénarios pour comprendre les effets des différents choix de développement pour, enfin, mettre en place les politiques les plus efficaces.

Partout où il a été appliqué, le logiciel WEAP s'est avéré un puissant moyen utilisé par les chercheurs et les gestionnaires pour résoudre des problèmes complexes relatifs à l'hydrologie, au changement climatique, à l'irrigation, l'hydro électrique, ...etc.).

[Gajanan et al. \(2014\)](#), ont utilisé ce modèle pour appréhender les impacts du dérèglement climatique sur les possibilités de la ressource à satisfaire les besoins par ordre de priorité. [Choi et al. \(2012\)](#) ont mis au point un modèle pour estimer le bilan de l'eau et suggérer une stratégie de lutte contre le stress hydrique afin d'aider les planificateurs à préconiser des mesures de gestion efficace des ressources en eau à long terme. [Randall et al. \(2014\)](#) ont utilisé WEAP pour évaluer la vulnérabilité des centrales hydroélectriques ainsi que la demande en eau pour irriguer les terres dans le bassin du fleuve Zambèze en Afrique du Sud. [Ghaleb et al. \(2014\)](#) ont examiné les impacts des conflits et de la guerre sur l'environnement en Syrie en utilisant le WEAP. Le couplage du WEAP avec d'autres modèles est également possible. [Le Page et al \(2012\)](#) et [Haddad et al. \(2013\)](#) ont préconisé un outil d'aide à la décision (SAD) pour gérer les eaux souterraines en créant un lien entre le code MODFLOW et WEAP. WEAP a été appliqué à plusieurs bassins versants de l'ouest du pays, pour analyser l'état des lieux actuel et envisager des scénarii futurs de gestion des ressources en eau en prenant en compte les diverses stratégies qui peuvent influencer la demande jusqu'en 2030. Le logiciel WEAP a également permis de faire le point sur les bilans d'eau actuels et étudier les scénarios de gestion de l'eau dans la région d'Annaba ([Aoun-Sebaiti et al. 2013](#)). [Bouklia-Hassane et al. \(2014\)](#) ont proposé un modèle pour évaluer la gestion de l'eau en tenant compte de la variation de la demande dans divers sites et les mécanismes hydrologiques dans les bassins versants qui définissent le volume d'eau mobilisable.

Dans cette recherche, le WEAP est utilisé pour évaluer la ressource en eau disponible et la demande des différents utilisateurs dans un environnement

marqué par une forte augmentation de la population et de ses activités, par les impacts du dérèglement climatique et bien évidemment par la raréfaction de la ressource.

L'expérience montre que l'approche la plus efficace consiste à construire un outil simple et flexible pour aider l'utilisateur du modèle.

WEAP fait partie des logiciels de planification de l'eau qui utilise la puissante capacité des ordinateurs personnels d'aujourd'hui pour donner aux professionnels de l'eau partout l'accès à des outils appropriés.

Compte tenu des conditions climatiques actuelles caractérisées par l'indigence des pluies, les planificateurs des ressources sont de plus en plus confrontés à des défis de la gestion de l'eau. C'est pourquoi le partage de l'eau entre l'agriculture, les ménages et l'industrie, nécessite une intégration de l'offre de la pluie jusqu'à l'utilisateur en tenant bien évidemment compte des considérations écologiques. Le modèle WEAP, permet justement d'intégrer tous ces points dans un instrument très simple, flexible et puissant pour mieux gérer l'eau.

III.2. Matériels et méthodes

Pour réaliser ce travail de recherche, une licence nous a été attribuée gratuitement. Le logiciel peut être récupéré à partir du site web : <http://www.weap21.org>. Il suffit alors de saisir le nom d'utilisateur et le code d'enregistrement.

III.2.1. Cartographie : le logiciel WEAP propose une carte du monde où on peut créer la zone d'étude ([figure III. 1](#)), et ajouter une carte SIG (Système d'Information Géographique) à vecteur à notre zone d'étude. Cette carte constitue une précieuse aide pour la construction du système à étudier et de raffiner les limites du projet. Dans cette recherche, les limites du secteur étudié correspondent au bassin de la basse Seybouse, appelé aussi Seybouse maritime.

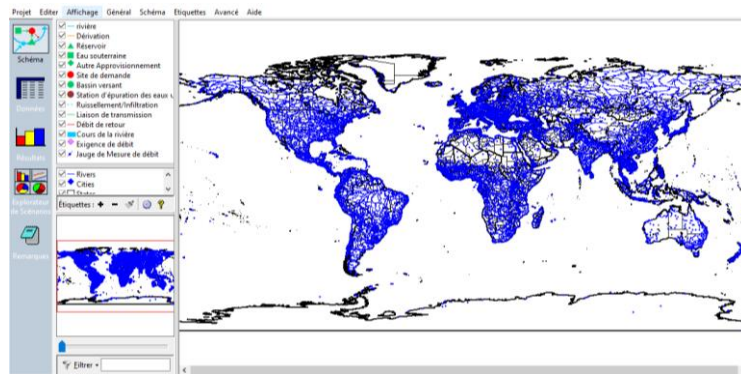


Figure III. 1. Carte du monde dans WEAP.

III.2.2. Phase schématique (Figure III. 2)

L'interface schématique du WEAP permet de tracer le réseau hydrographique et d'implanter les sites des Barrages de la Cheffia et de Mexa, les aquifères, l'importation de l'eau et les sites de demandes correspondant à (Figure III. 2) :

- toutes les agglomérations du sous bassin,
- les sites agricoles de chaque commune du sous bassin,
- les sites de demande des zones industrielles,
- les liaisons de transmission et de retour entre sites de demande et les sites renfermant des ressources en eau.

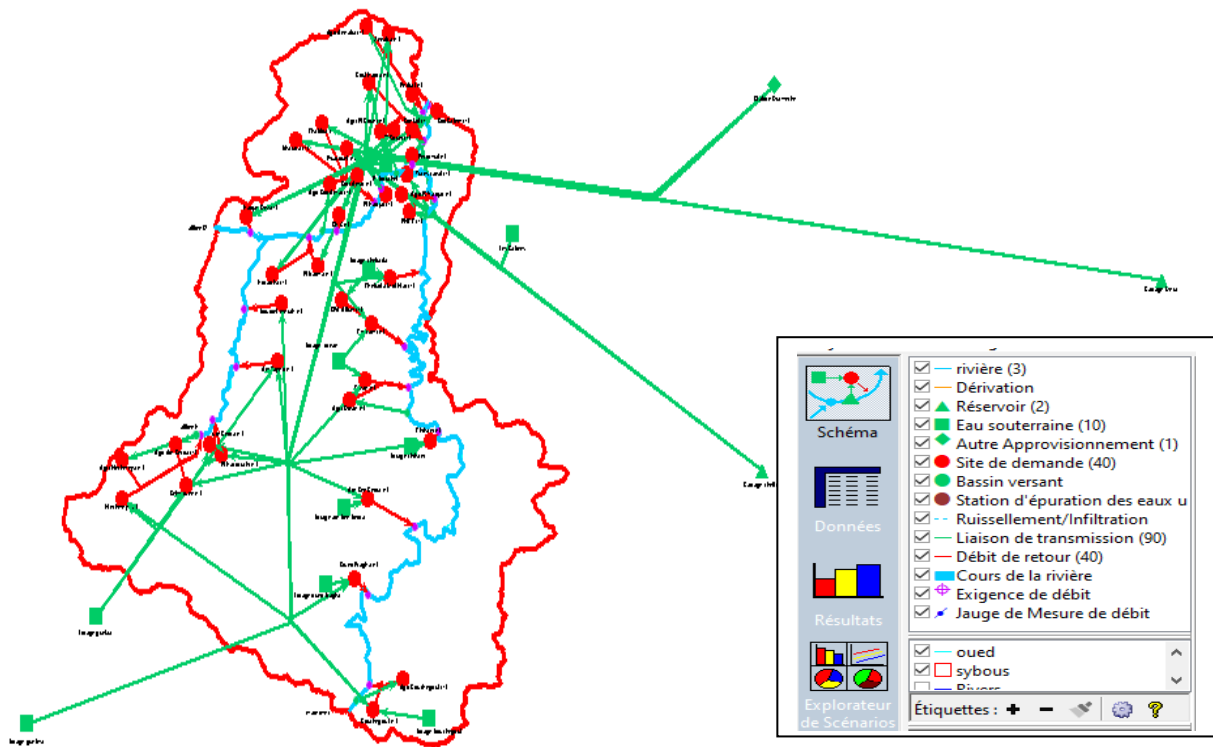


Figure IV. 2. Conceptualisation des sites de demande et des ressources en eau du BBS.

III.2.3. Fonctionnement du logiciel

L'utilisation du WEAP comporte les étapes suivantes :

- **Création de la zone d'étude** : il s'agit, dans un premier temps, de créer une carte de la zone étudiée. Des cartes élaborées à l'aide des logiciels de traitement cartographique (SIG) peuvent servir comme fond pour placer les agglomérations, les oueds, les réservoirs, les barrages et retenues d'eau, les unités industrielles, les sites agricoles etc... (figure III. 2).

- **Création des références et hypothèses clés**

Le logiciel WEAP peut être utilisé dans plusieurs applications comme par exemple l'évaluation de la demande et de l'approvisionnement en eau, le stockage, l'écoulement, l'infiltration, etc. Ce travail nécessite, par conséquent la création d'une base de données avec des hypothèses clés et différents *scenarii*.

- **Hypothèses clés**

Il s'agit de définir des variables pouvant servir comme clés principales pour effectuer l'étude. Dans la présente recherche, cinq hypothèses clés ont été définies

pour servir comme informations de base pour le modèle : i) utilisation d'eau domestique ; ii) besoins pour l'irriguer agricoles ; iii) consommation domestique ; iv) série temporelle mensuelle et v) le taux de croissance pour le scénario futur.

- **Références**

Disposer d'une année ou d'une période de référence pour être utilisée dans le calage du modèle. Dans le cas de cette étude, les informations introduites dans WEAP correspondent à l'année de référence 2010.

III.2.4. Proposition de scénarios

Le scénario typique dans WEAP comprend 3 phases :

- une **année de compte courant** servant comme année de référence et les données ou une période,
- un **scénario de référence** établi à partir du compte courant pour modéliser l'évolution probable du système sans interposition,
- **d'autres scénarios** pour appréhender les impacts des changements socio-économiques, du changement climatique probable pour l'année ou projet futur.

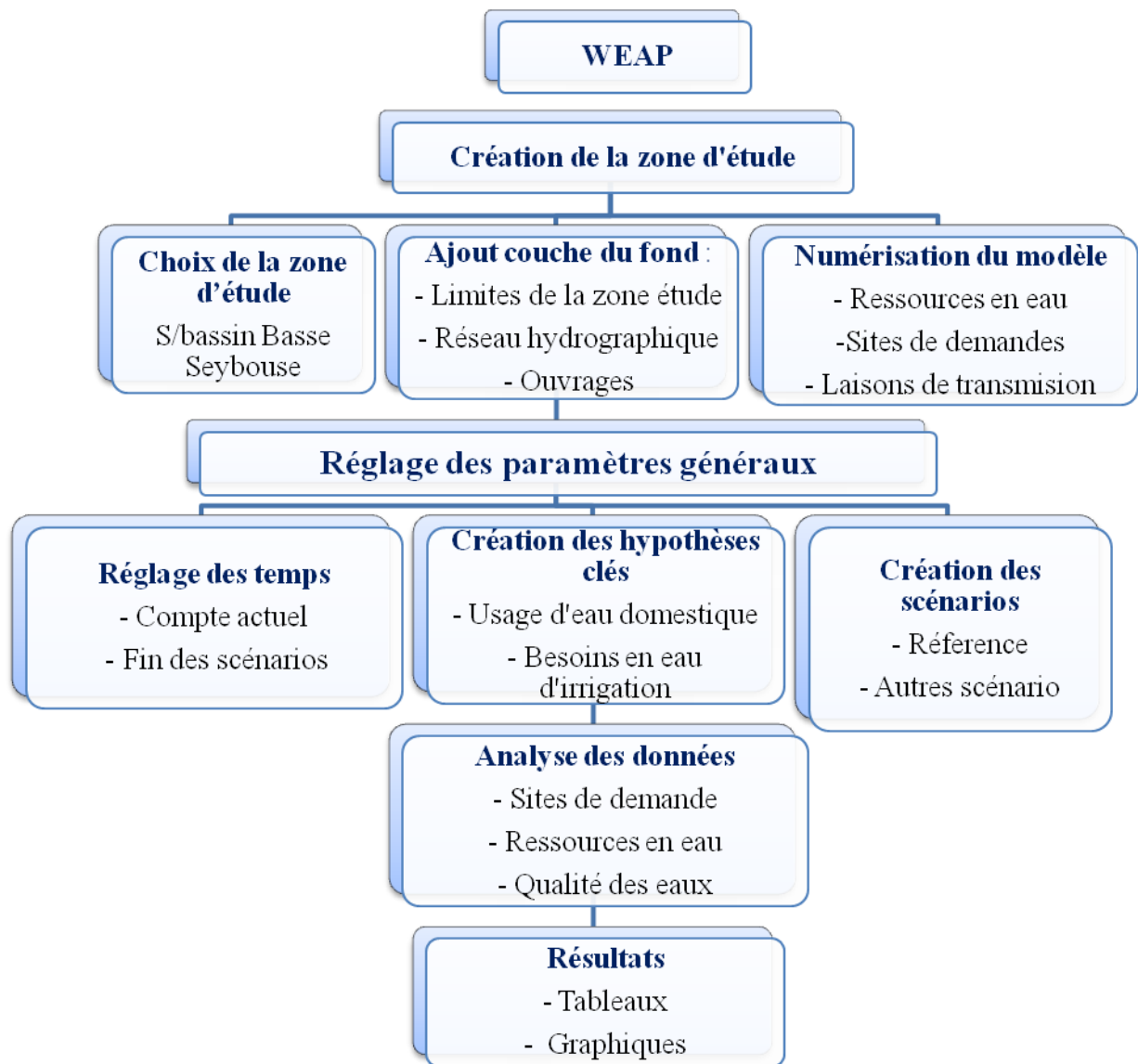


Figure III. 3. Organigramme du Fonctionnement du logiciel WEAP21.

Les résultats obtenus se déclinent sous la forme de graphes et de tableaux. On obtient les résultats de l'année de référence comparés à ceux du scénario proposé.

L'organigramme de la [figure III. 3](#) récapitule les différentes étapes de fonctionnement du logiciel.

III.2.5. Rubrique données

Les outils de modélisation permettent de créer les variables et les relations, d'envisager des hypothèses et des projections en utilisant des relations mathématiques, dynamiquement liées à Excel pour l'importation et l'exportation de données.

Compte actuel : 2010 est définie comme étant l'année du compte d'état actuel « Current Account », à partir duquel les *scenarii* sont élaborés. Les scénarios cherchent les changements possibles du système dans les années futures, après l'année de l'état actuel.

III.2.6. Traitement des données

La GIRE nécessite des connaissances sur :

- *Demande en eau domestique*

Les sites de demande au niveau du BBS, sont représentés par les nombres des habitants actuels, calculés à l'aide du WEAP et en utilisant le nombre d'habitant du recensement de 2008 et le taux d'accroissement donné par l'Office National de Statistiques, ONS, de 2008. Les résultats sont illustrés par la [figure III. 4](#) suivante :

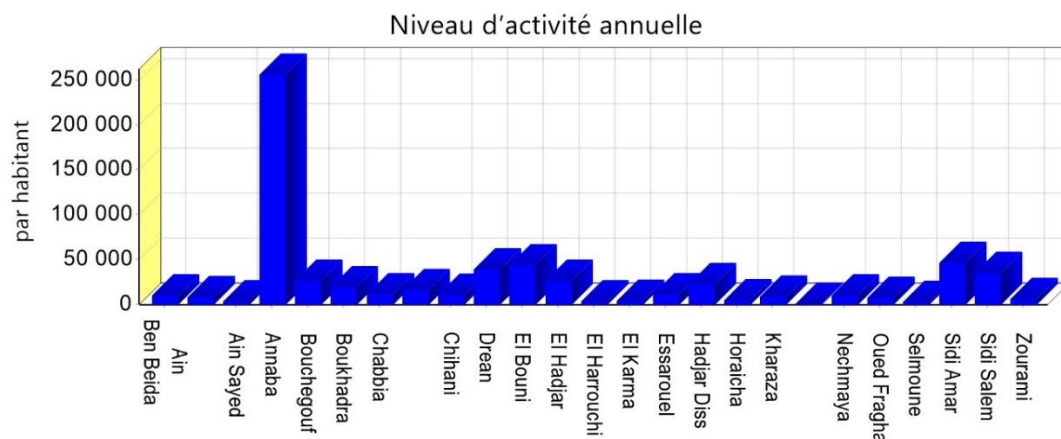


Figure III. 4. Niveau d'activité annuelle des sites de demandes domestiques. - Compte d'état actuel-.

Pour approcher la demande mensuelle en eau domestique, une dotation moyenne de 150 litres/jour/habitant a été adoptée.

- *Demande en eau d'irrigation*

Pour le niveau d'activité annuel, les surfaces des terres irriguées ([figure III. 5](#)), en hectares, pour chaque commune sont introduites dans le modèle.

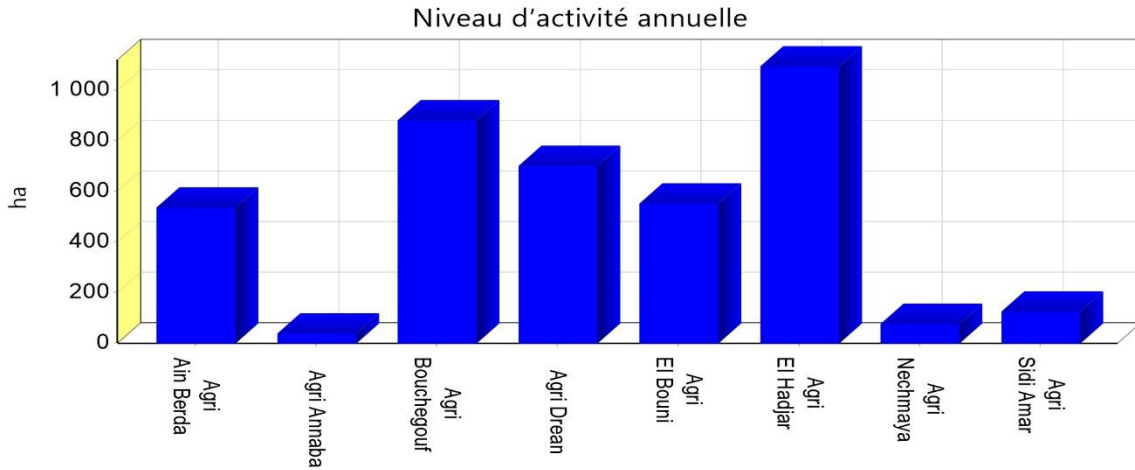


Figure III. 5. Superficies agricoles actuelles dans le BBS. Compte d'état actuel.

Pour simuler les demandes en eau assignée à l'irrigation, une dotation de 6000 m³ par hectare est adoptée avec une variation mensuelle choisie sur la base du déficit agricole. Le choix de la variation mensuelle de la dotation est effectué à partir du déficit agricole, évalué à partir du bilan hydrique de Thornthwaite. Pour rappel, le BBS est sous l'influence d'un climat de type méditerranéen avec une saison sèche en été qui commence à partir de mai jusqu'à septembre et une saison humide à partir d'octobre jusqu'à mai (figures III. 6 et III. 7). La région reçoit en moyenne près de 595 mm/an de pluie à la station de Belkheir (au Sud du BBS) et 654 mm/an aux Salines (au Nord). La température moyenne observée est de 18°C pour les deux stations (Belkheir et Salines).

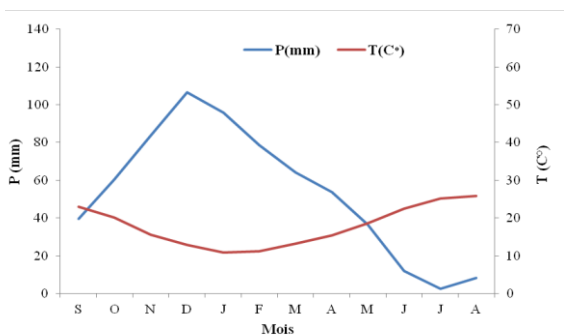


Figure III. 6. Diagramme ombrothermique - Station des Salines.

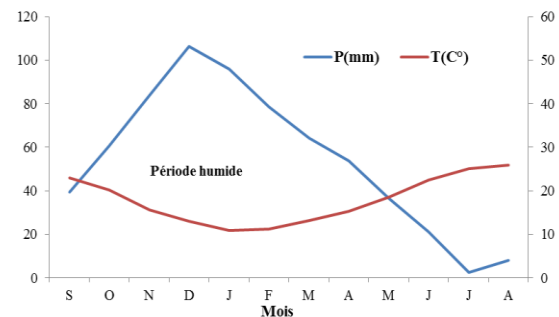


Figure III. 7. Diagramme ombrothermique - Station de Belkheir.

- ***Demande en eau pour l'industrie***

Les demandes en eau industrielle sont obtenues auprès des sites industriels activant dans la basse Seybouse. La [figure III. 8](#) récapitule les principaux résultats.

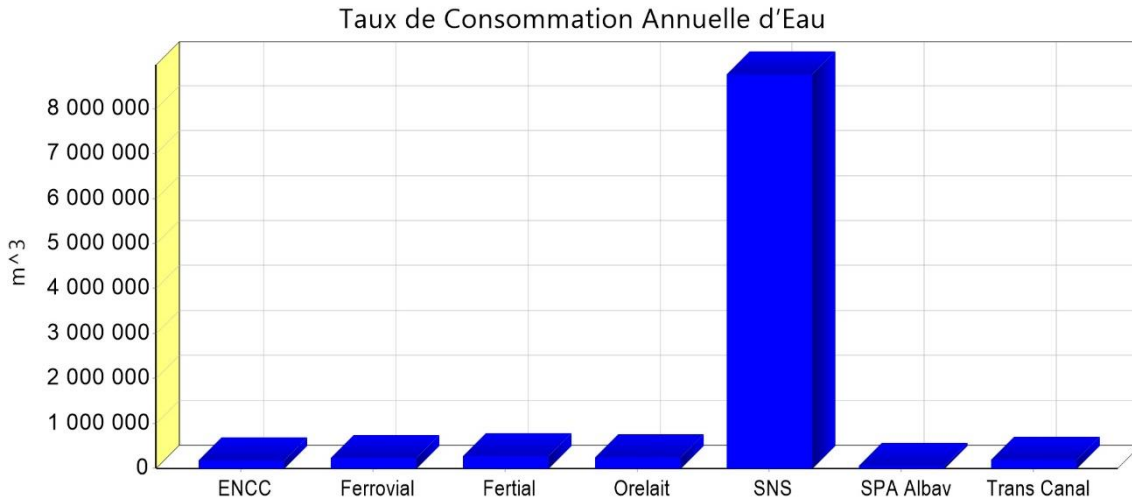


Figure III. 8. Besoins actuels en eau pour les unités industrielles. Compte d'état actuel 2010.

III.2.7. Distribution des ressources

Les ressources et les approvisionnements déterminent les quantités, la disponibilité et l'affectation des approvisionnements, simulent les flux mensuels des oueds, y compris les interactions entre eaux superficielles et les eaux souterraines, la production hydroélectrique et le stockage des réservoirs et des eaux souterraines.

- *Méthodes de simulation des ressources en eau* : pour modéliser les processus de captage (l'évapotranspiration, le ruissellement, l'infiltration et les demandes d'irrigation), WEAP permet de choisir l'une des quatre approches suivantes : i) le ruissellement des précipitations (the Rainfall Runoff), ii) le procédé par coefficient simplifié (Simplified Coefficient Approach), (iii) l'approche de l'humidité du sol (Soil Moisture Method) et (iv) la méthode MABIA (MABIA Method).

La troisième approche (méthode de l'humidité du sol) est préférée pour ce travail à cause de la disponibilité des informations relatives à :

- l'occupation du sol (surface drainée pour chaque oued, caractéristiques du sol et du sous sol),
- les pluies à un pas mensuel, la température et les vents ont été observés au niveau des deux stations météorologiques de Belkheir et des Salines.

WEAP simule ainsi l'infiltration, l'évapotranspiration et le ruissellement par la méthode d'humidité, les algorithmes adoptés sont décrits dans des tutoriels. Le diagramme de la [figure III. 9](#) représente les différentes relations mathématiques introduites dans le modèle d'humidité du sol.

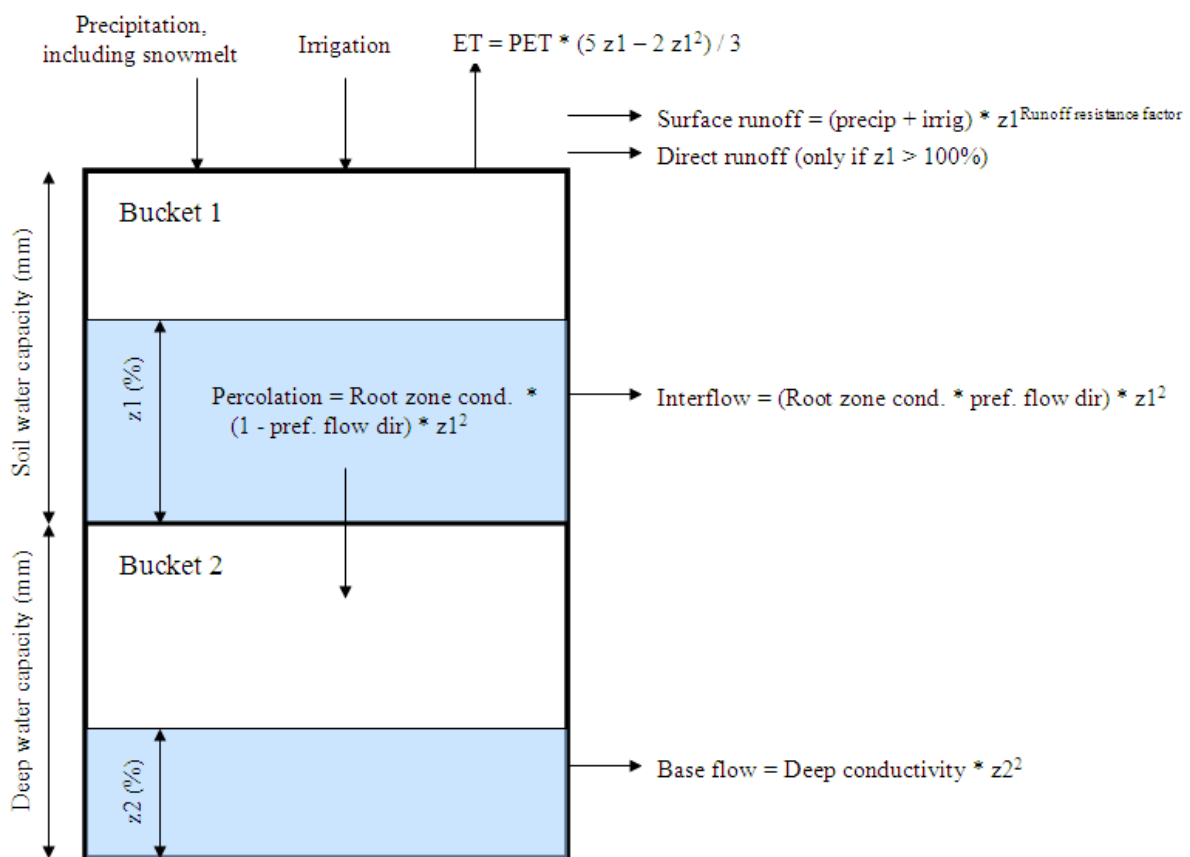


Figure III. 9. Modèle conceptuel et équations introduites dans le modèle d'humidité du sol.

III.2.8. Ressources en eau de surface

- **Débit des oueds** : les débits des oueds sont évalués par le logiciel, en se basant sur les données climatiques. La méthode de l'humidité du sol permet de simuler les quantités de ruissellement, d'humidité du sol et de débit de base (afflux d'eau souterraine).

Les débits moyens mensuels enregistrés à la station de Mirbeck, de 1984 à 1999, ont été introduites. Ces valeurs sont utilisées pour la calibration du modèle.

- **Capacité des barrages** : les capacités de stockage des deux barrages (Cheffia et Mexa) sont respectivement de 160 millions de m³ et 40 millions de m³ (Figure III. 10). D'autres informations sont également nécessaires.

Le remplissage des réservoirs, figure III. 11, est compartimenté en quatre zones, de haut en bas : 1) zone de contrôle des inondations, 2) zone de conservation, 3) zone tampon et 4) zone inactive. Les deux zones de conservation et de tampons forment le stockage actif du réservoir. Dans WEAP, le volume d'eau dans le réservoir doit rester sous le sommet du bassin de conservation.

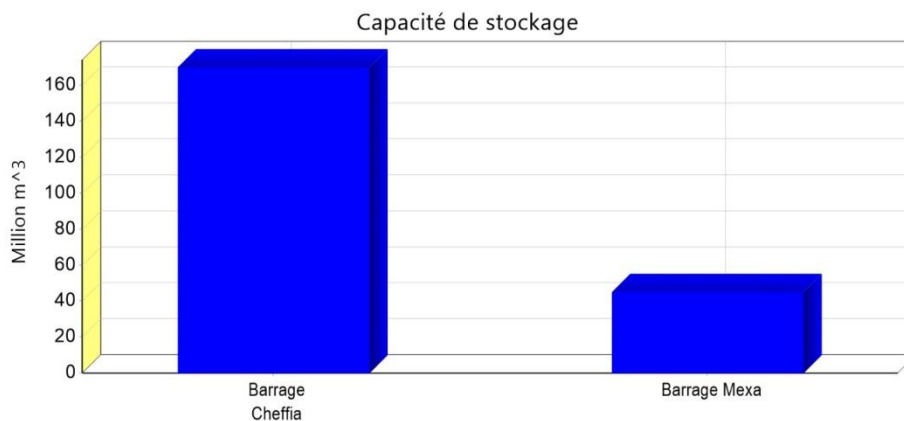


Figure III. 10. Capacité de stockage des barrages.

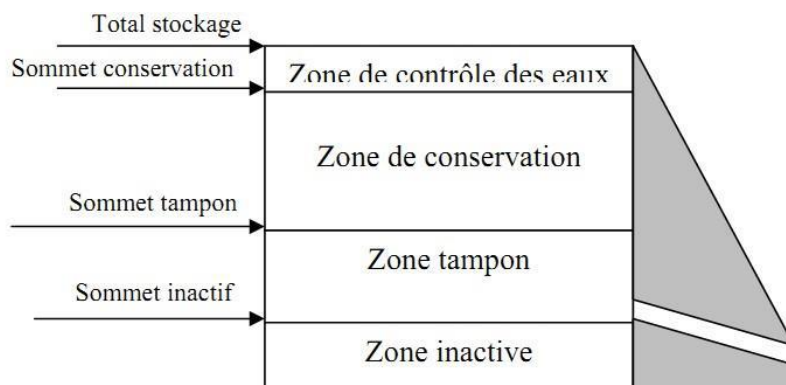


Figure III. 11. Schéma conceptuel d'un barrage.

- **Calibrage du modèle**

Le calibrage a été effectué en assignant, dans le modèle, les données de débits enregistrés à la station de Mirbeck pour la période 1984-1999.

Pour valider le modèle, les coefficients de Nash et de corrélation ont été appliqués.

Le coefficient de Nash-Sutcliffe (Nash & Sutcliffe, 1970) est donné par l'expression :

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_0^t - Q_m^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_0^t - \bar{Q}_0)^2}$$

avec Q_0^t : le débit mensuel mesuré, Q_m^t est le débit moyen mensuel simulé, \bar{Q}_0 est la moyenne des débits mesurés sur la période de suivi. Cette relation tend vers 1 quand le débit simulé tend vers le débit enregistré sur terrain.

Le coefficient de corrélation (R) : il est défini par :

$$R = \frac{\sum_{t=1}^n (q_{ci} - \bar{q}_c)(q_{oi} - \bar{q})}{\sqrt{\sum_{t=1}^n (q_{ci} - \bar{q}_c)^2 \sum_{i=1}^n (q_{oi} - \bar{q}_0)^2}}$$

où \bar{q}_c est la moyenne de q_{ci} sur n jours.

WEAP simule parfaitement la réponse hydrologique dans le bassin. La valeur NSE est de 0.86, ce qui sous-entend que la différence entre les débits simulés et les débits mesurés est faible. En fait, si l'écart baisse, le coefficient de Nash croit et tend vers 1. Le coefficient de corrélation est de 0.93. Les résultats obtenus montrent donc une bonne performance du modèle (Figure III. 12).

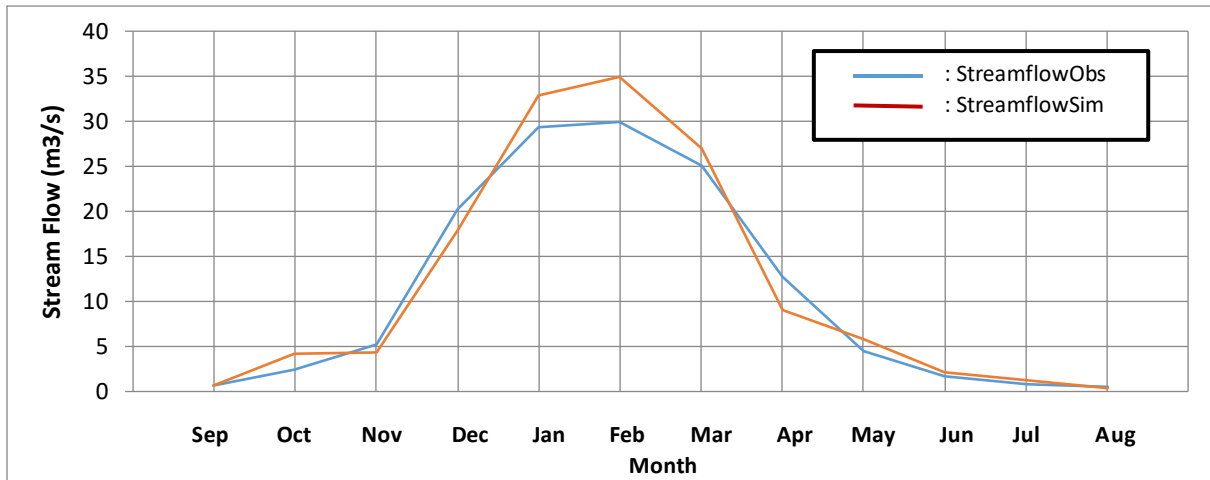


Figure III. 12. Comparaison débit simulés et calculés. Station de Mirbeck Seybouse.

III.2.9. Ressources en eau souterraine :

La capacité de stockage est définie comme étant la capacité maximum théoriquement accessible de l'aquifère, en revanche, le stockage initial correspond à la quantité d'eau initialement stockée en début du premier mois de l'année des comptes courants.

Dans le sous bassin de la basse Seybouse, plusieurs nappes sont concernées. Le débit de prélèvement maximum dans chaque batterie de forages est illustré dans la figure III. 13.

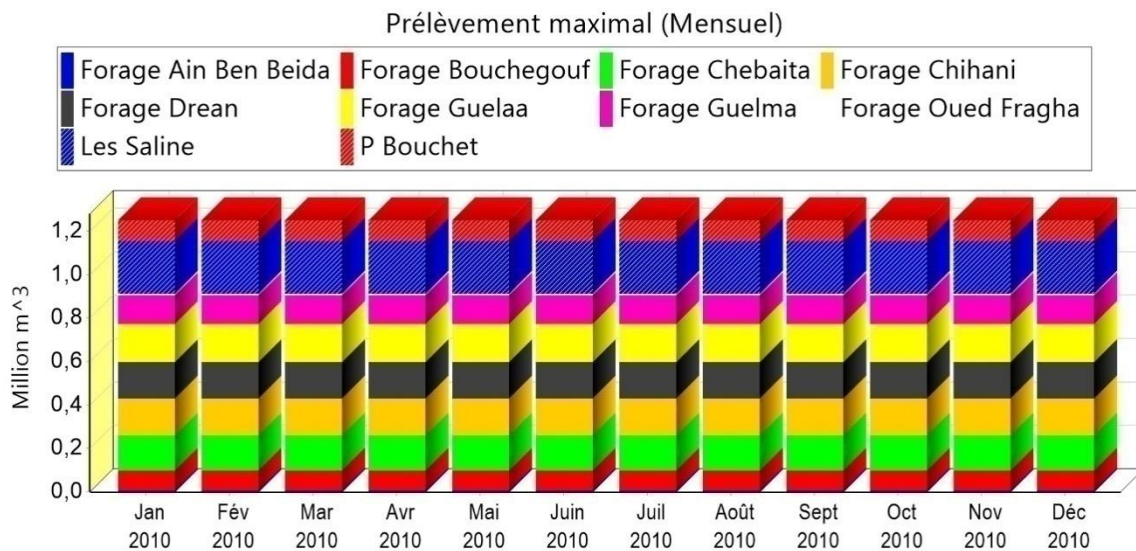


Figure III. 13. Prélèvement maximal dans les forages.

III.2.10. Elaboration des scénarios futurs

- Paramètres généraux

Les paramètres choisis pour l'élaboration des scénarios futurs sont visualisés dans la [figure III. 14](#).

#	Titre	Abrév.	Longueur	Débuts	Fins
1	Janvier	Jan	31	1 Jan	31 Jan
2	Février	Fév	29	1 Fév	29 Fév
3	Mars	Mar	31	1 Mar	31 Mar
4	Avril	Avr	30	1 Avr	30 Avr
5	Mai	Mai	31	1 Mai	31 Mai
6	Juin	Juin	30	1 Juin	30 Juin
7	Juillet	Juil	31	1 Juil	31 Juil
8	Août	Août	31	1 Août	31 Aoû
9	Septembre	Sept	30	1 Sept	30 Sept

Figure III. 14. Paramètres généraux du modèle.

- **Scenario de référence (SR)** : c'est le scénario par défaut ou « business-as-usual » qui utilise les données du compte actuel et aide à faire des comparaisons avec les autres scénarios qui ont subi des modifications. Dans le cas de cette recherche, le scénario de référence décrit l'état actuel (2010) et l'évolution tendancielle des ressources et de la demande en eau jusqu'en 2050. Aucune modification majeure n'est fixée pour ce scénario.

Dans le SR (2010-2050), la croissance démographique est estimée à partir des deux recensements réalisés par l'office national de statistiques (ONS) en 1998 et 2008. En revanche, l'accroissement des superficies des périmètres irrigués et des besoins en eau des unités industrielles ont été estimés à 1%.

-Scénario changement climatique (SCC) : le NE algérien est confronté aux effets du réchauffement climatique, avec une hausse des températures de 0,8 à 1,1 °C et une diminution des pluies de 6,75 à 6,50% avant 2020 (projet national ALG / 98 / G31. Elaboration de la stratégie nationale et du plan d'action pour le changement climatique, 2001). À l'horizon 2050, les précipitations diminueront en moyenne de 17% et les températures augmenteront d'environ 3%.

- Scénario pression sur la ressource (SPR) : le scénario pression sur la ressource (SPR) est matérialisé ici par un accroissement démographique de 3% et augmentation de 2% pour les superficies irriguées et les besoins des unités industrielles.

- Scénario changement climatique et pression sur la ressource (SCCPR) : c'est le croisement des deux scénarios changement climatique (SCC) et pression sur la ressource (SPR).

- Scénario gestion de la demande (SGD) : ce scénario a pour objet de réduire toutes les formes de gaspillage (physiques et/ou économiques) .

Cette hypothèse permet donc d'analyser le cas d'une amélioration de la gouvernance de l'eau et de l'emploi des techniques d'irrigation les plus économes d'eau. Ces techniques permettent en effet de réduire la demande en eau de 20 à 30%. Pour l'AEP, ce scénario envisage la réduction du taux de fuite de 30 à 40% en réhabilitant le réseau d'eau potable.

Dans cette recherche, une réduction progressive de la demande en eau de 25% pour les eaux des ménages et industrielles et de 30% pour l'eau d'irrigation à 2050 est envisagée.

- Scénario nouvelle ressource (SNR) : ce scénario envisage prend en considération l'apport du dessalement de l'eau marine de Draouche actuellement en phase de construction avec une capacité de production 300.000 m³/jour. Cette station alimentera les wilayas d'Annaba, Skikda, Guelma et El-Tarf. Le volume destiné à la wilaya d'Annaba serait de 160.000 m³/jour.

- Scénario changement climatique, pression sur la ressource, gestion de la demande, nouvelle ressource (SCCPRGDNR) : ce scénario correspond à la sommation des quatre scénarios précédents à savoir *SCC*, *SPR*, *SGD* et *SNR*.

III.3. Résultats et discussion

III.3.1. Evolution des températures par scénario

Les effets du changement climatique analysé par le WEAP, dans le cas des trois scénarios SCC, SCCPR et SCCPRGDNR est illustré par la [figure III. 15](#). Les maximums et minimums des températures passent de 25.16°C et 10.0°C (2010) à 29.52°C et 12.85°C (2050).

Quant aux scénarios SR, SPR, SNR et SGD, les températures demeurent constantes car aucune modification n'est prévue.

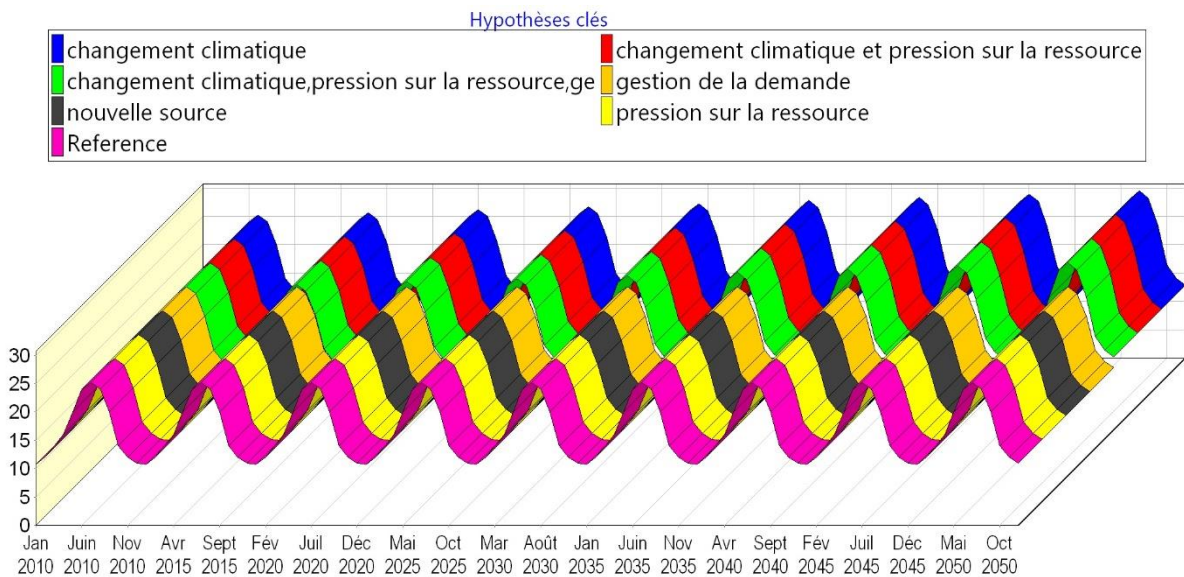


Figure III. 15. Evolution des températures par scénario.

III.3.2. Evolution des Précipitations par scénario ([Figure III. 16](#))

- *Scénarios sans effets du CC (SR, SPR, SNR et SGD) :* les pluies annuelles demeurent constantes tout au long de la période de calcul, ce qui conduit à un apport par an de 1125 millions de m³.

- *Scénarios avec les effets du changement climatique (SCC, SCCPR et SGD) :* une diminution progressive des apports pluviaux qui pourraient atteindre 922,5 million de m³ en 2050.

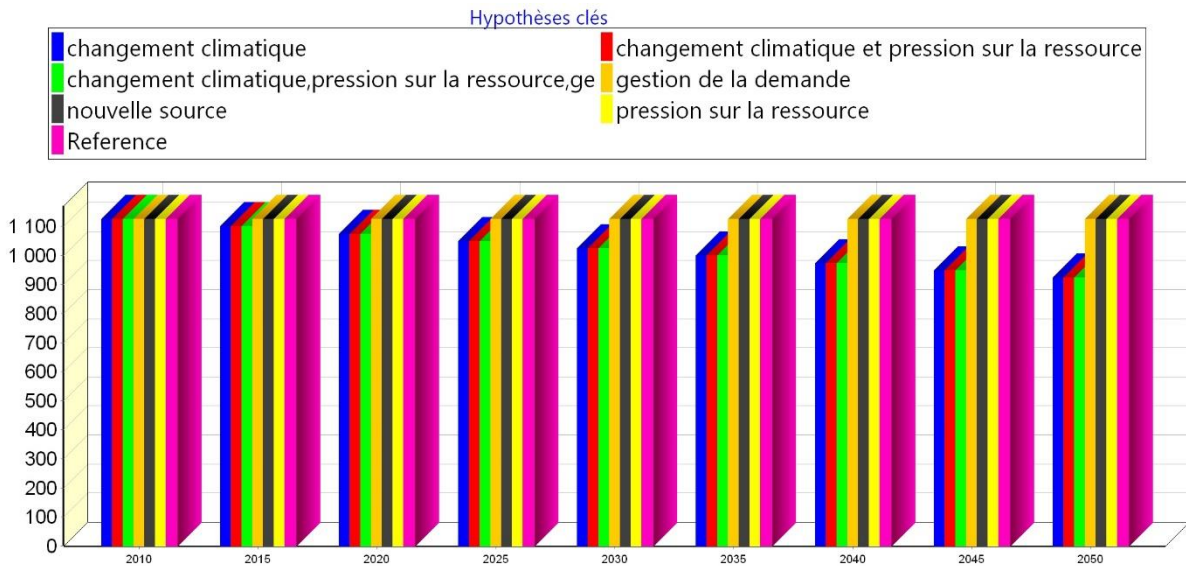


Figure III. 16. Evolution des précipitations par scénario.

III.3.3. Demandes en eau

La variation des demandes en eau dépend étroitement de l'évolution du nombre des usagers (désigné dans WEAP par le niveau d'activité annuelle).

III.3.3.1. Evolution de nombre d'habitants :

- Scénarios tendanciels (SCC, SNR, SGD et SR)

Pour les quatre *scenarii*, la population de toutes les agglomérations du BBS passe de 629 840 habitants pour atteindre 941 526 habitants à l'horizon 2050 (Figure III. 17).

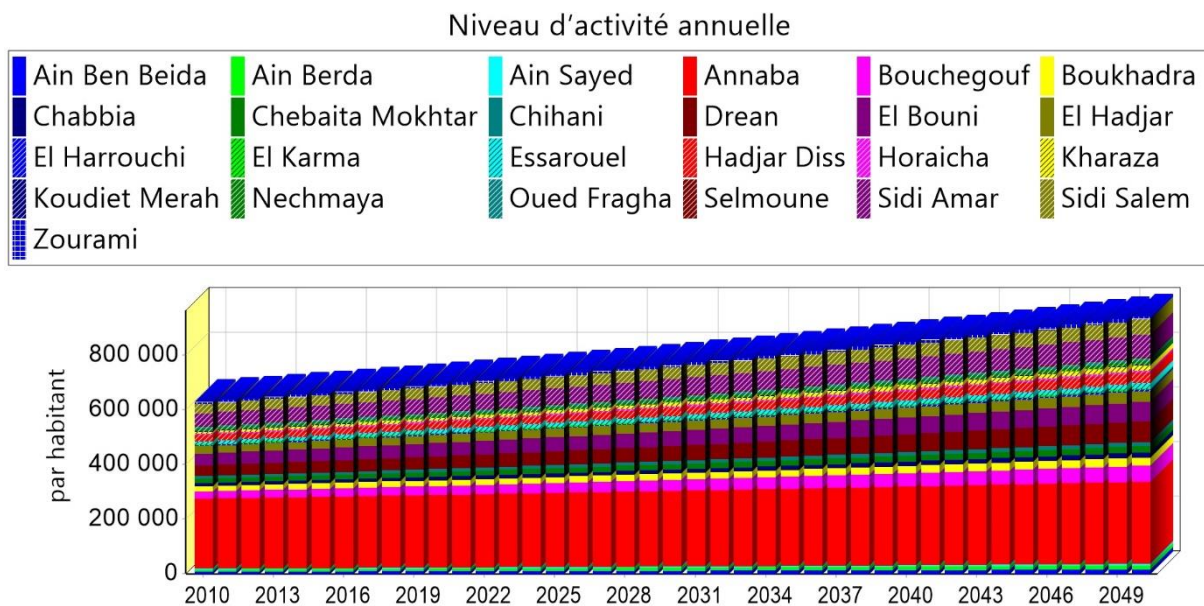


Figure III. 17. Variation du nombre d'habitants pour les scénarios SR, SCC, SNR et SGD.

- **Scénarios forts accroissements (SCCPR, SPR et SCCPRGDNR)** : si le taux d'accroissement de la population est augmenté de 3%, le nombre d'habitant croîtra de 629 840 à 2 054 561 habitants en 2050, pour les trois scénarios SCCPR, SPR et SCCPRGDNR (Figure III. 16).

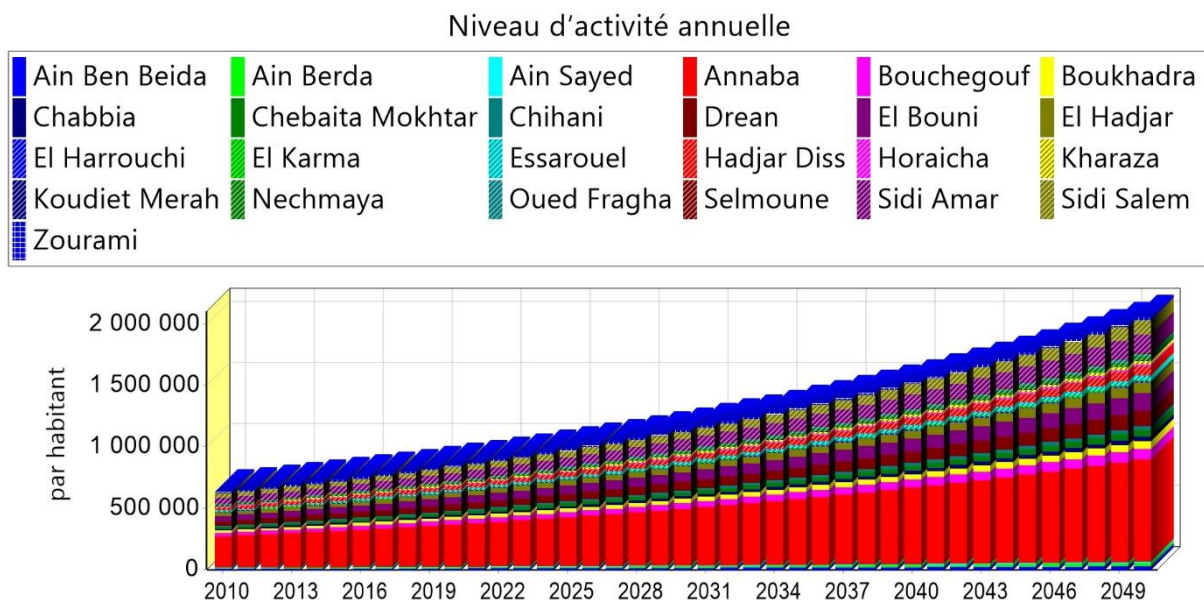


Figure III. 18. Evolution de nombre d'habitants pour les scénarios SCCPR, SPR, SCCPRGDNR.

III.3.3.2. Evolution des superficies agricoles

- *Scénarios tendanciels (SCC, SNR, SGD, SR)* : pour les scénarios tendanciels (SCC, SNR, SGD, SR), les superficies irriguées, estimées à 3 995 ha couvriront 5 948 ha en 2050 (Figure III. 19).

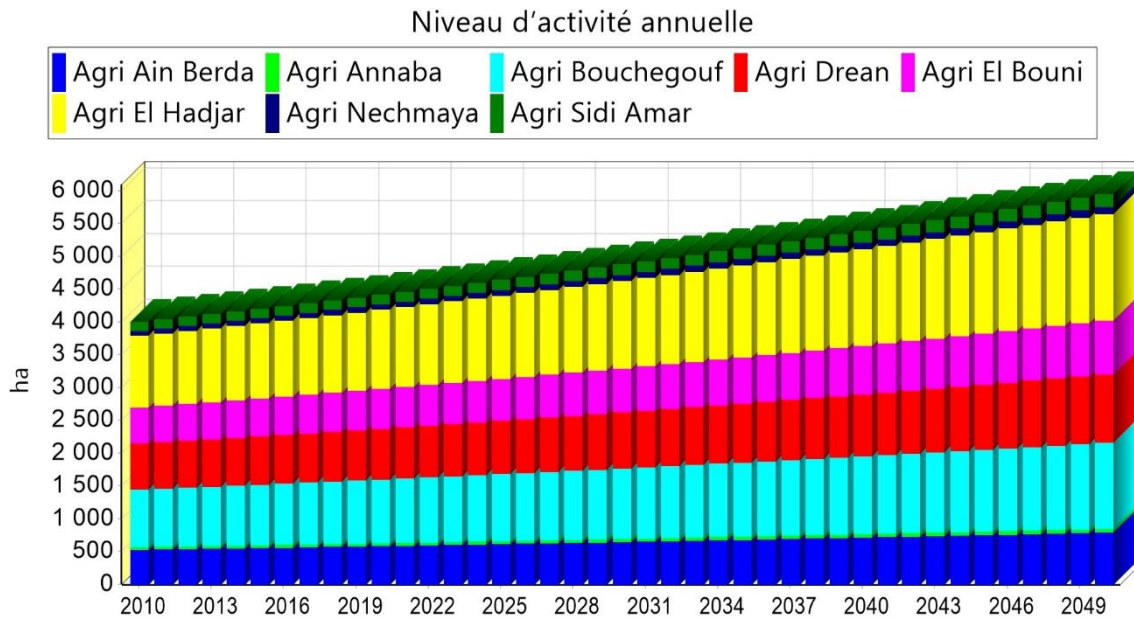


Figure III. 19. Croissance des superficies irriguées dans le sous bassin (SCC, SNR, SGD et SR).

- *Scénarios forts accroissements (SPR, SCCPR, SCCPRGDNR)* : dans le cas d'une augmentation de 2%, les superficies des terres agricoles estimées à 3995 ha atteindront 8 821 ha en 2050 (Figure III. 20).

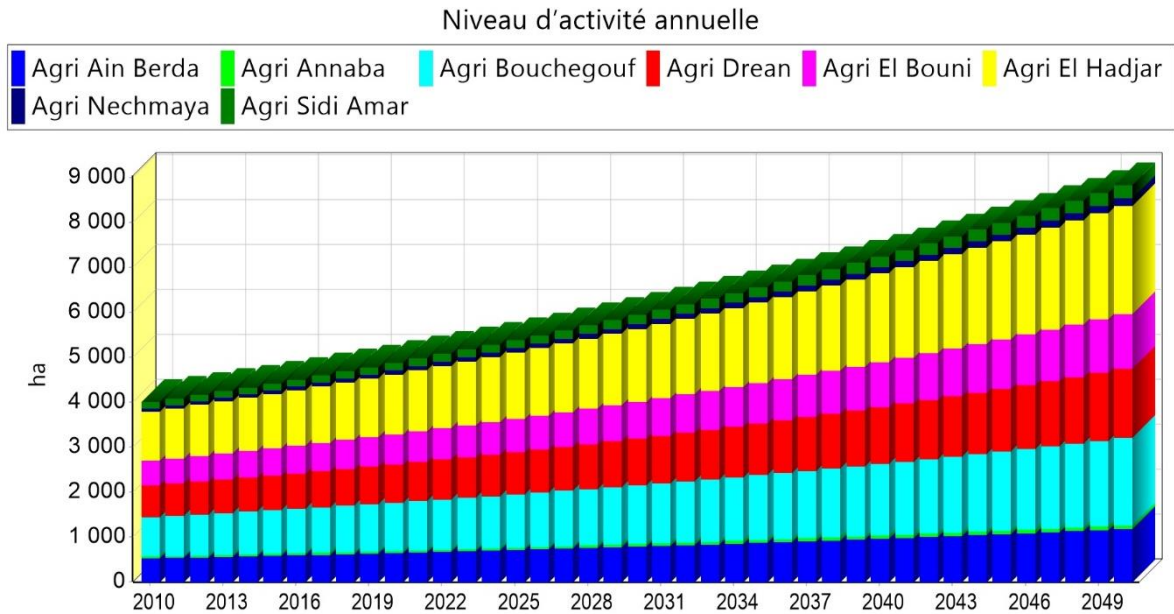


Figure III. 20. Evolution des superficies agricoles (SPR, SCCPR et SCCPRGDNR).

III.3.3.3. Variation des besoins totaux en eau pour chaque scénario.

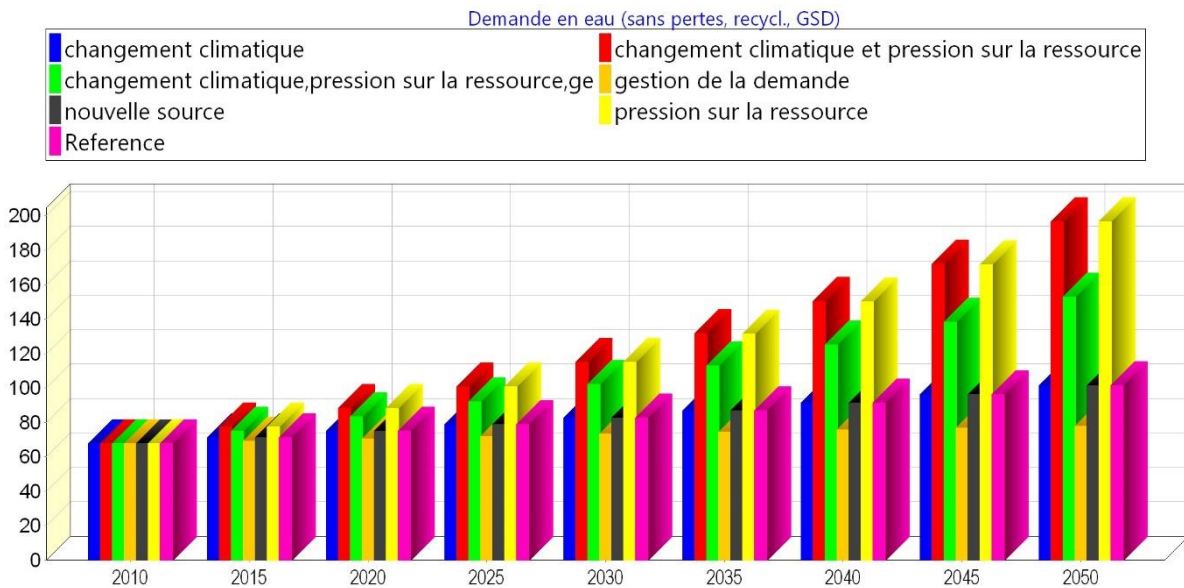


Figure III. 21. Augmentation des besoins totaux en eau par scénario.

L'évolution des besoins totaux en eau à partir de 2010 jusqu'en 2050 est illustrée par le graphique de la figure III. 21. Elle met en évidence un fort accroissement de 68 à 196 millions de m³ en 2050 sous l'influence conjuguée de la croissance démographique et des superficies irriguées (SPR).

Le changement climatique (SCC) fait croître les besoins en eau de 68 à 101 millions de m³ en 2050. La combinaison de tous les scénarios envisagés (SCCPRGDNR) entraîne des besoins qui passent de 68 à 153 millions de m³.

III.3.3.4. Evolution des besoins en eau potable, destinée à l'irrigation et à l'industrie par scénario

- Evolution des besoins en eau potable (figure III. 22) :

L'augmentation de la demande en eau potable jusqu'en 2050 est donnée par la figure III. 22. Elle met en évidence une hausse des besoins en eau domestique qui passe de 34 à 111 millions de m³ induit par une forte pression sur la ressource (croissance de la population et des superficies irriguées).

Pour les autres *scenarii*, les besoins en eau potable qui étaient d'environ 34 millions de m³ passeront à 51 (SCC), 51 (SNR), 38 (SGD) et 83 millions de m³ (SCCPRGDNR).

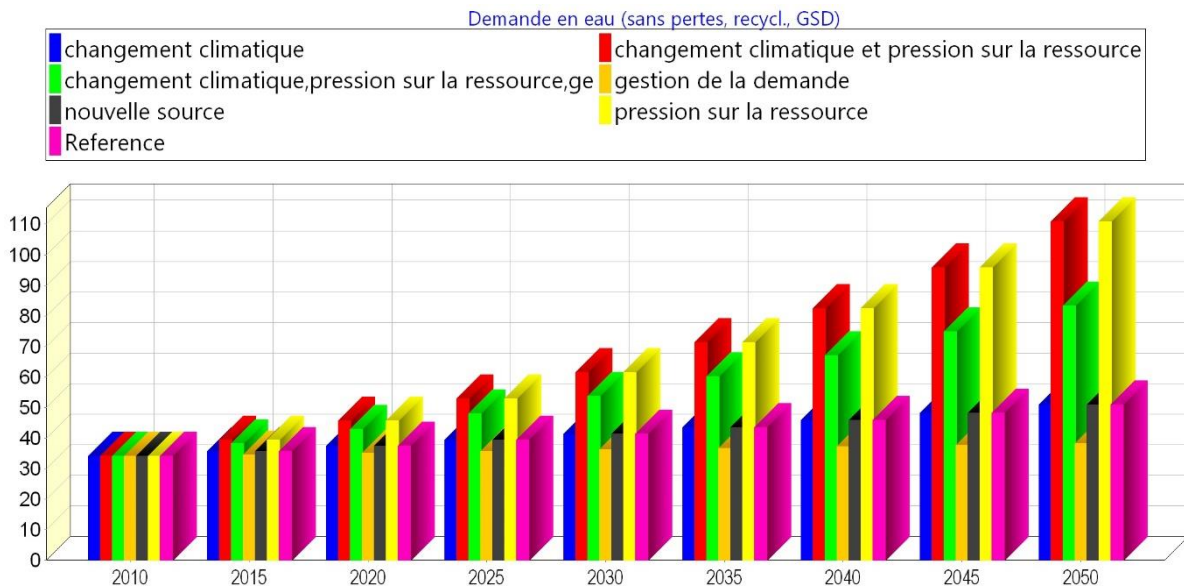


Figure III. 22. Les besoins en eau potable par scénario.

- Variation des besoins en eau d'irrigation (figure III. 23):

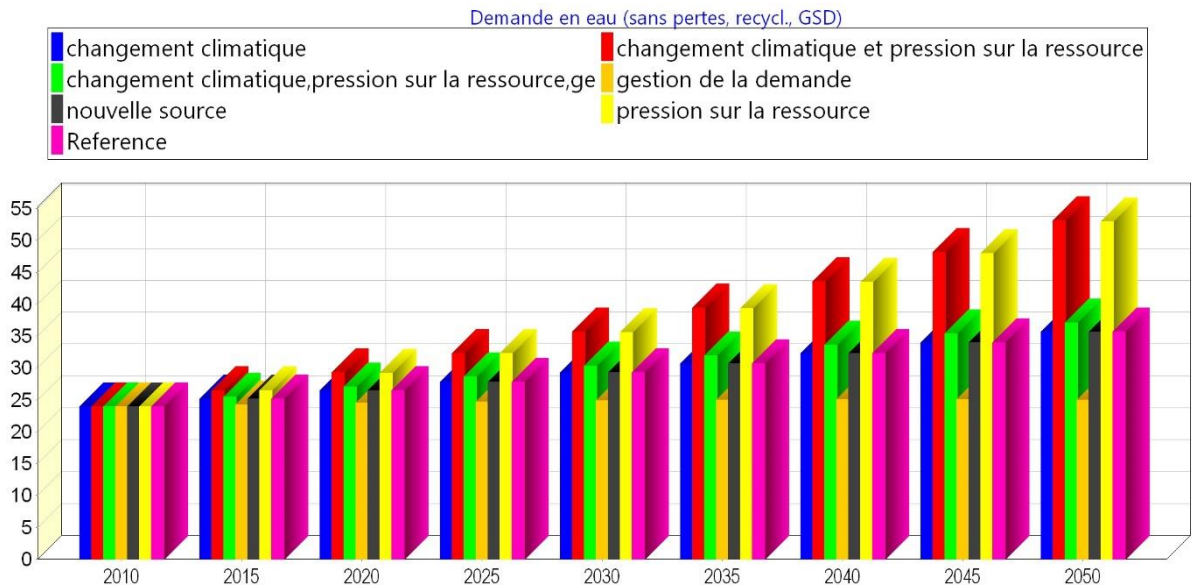


Figure IV. 23. Augmentation des besoins en eau pour l'irrigation par scénario.

L'évolution des besoins en eau pour répondre aux besoins des périmètres irrigués implantés dans le BBS met en évidence une forte augmentation des volumes qui passent de 24 en 2010 à 54 millions de m³ dans le cas de la pression sur la ressource (SPR), 36 millions de m³ pour le SCC, 25 millions de m³ pour SGD et 36 millions de m³ pour SNR.

- Evolution des besoins en eau industrielle (figure III. 24) :

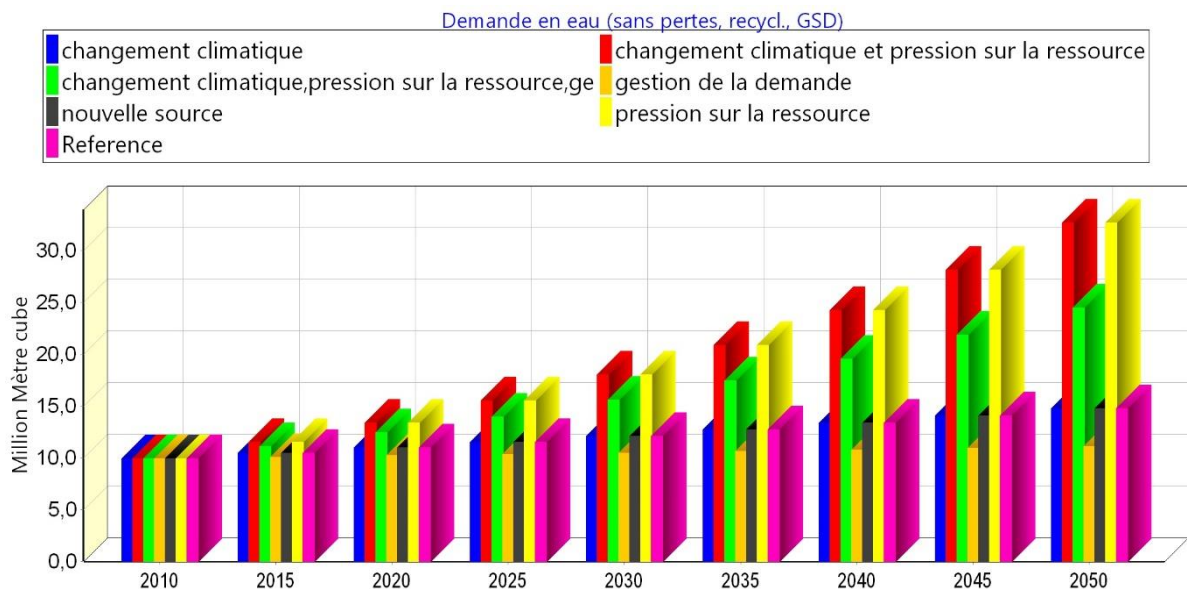


Figure III. 24. Evolution des besoins en eau industrielle par scénario.

Les besoins en eau pour l'industrie sont également en nette augmentation. On passe en effet de 10 millions de m³ à 33 millions de m³ sous l'effet de la croissance démographique et de ses activités (SPR). Dans le cas de la gestion de la demande (SGD), ces besoins passent de 10 à 15 millions de m³.

III.3.3.5. Evolution des demandes totales en eau par scénario (Figure III. 25) :

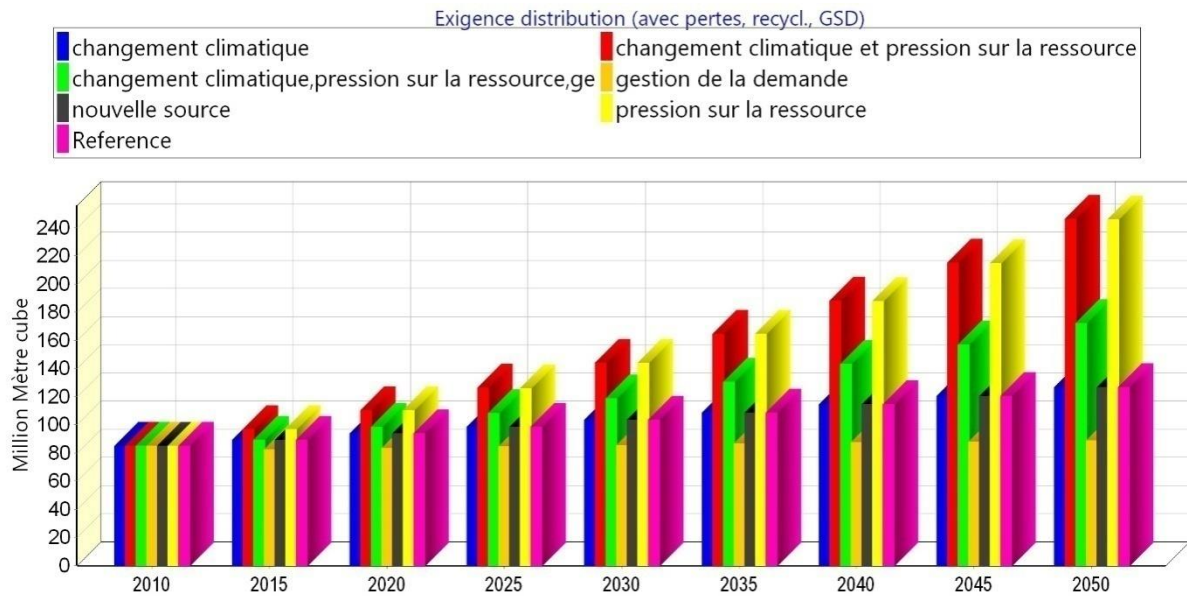


Figure III. 25. Variation des demandes totales en eau par scénario.

La figure III. 25 illustre les variations de la demande totale dans le BBS. Une hausse significative de cette demande pour les scénarii SCC et SPR, qui passe de 84 hm³ respectivement à 127 et 245 hm³ en 2050. Cette hausse est vraisemblablement liée à l'augmentation du nombre d'habitants et des activités socio-économiques. La mise en place d'une bonne gouvernance de l'eau à travers une politique de gestion de la demande permet de réduire la demande à 88 hectomètre cube à la fin de la simulation. Pour le SCCPRGDNR, on note une hausse de la demande qui atteint 172 hm³ en 2050. Enfin, la demande en eau croît légèrement de 84 à 126 hm³ en 2050 durant les scénarii SR, SNR, SCC.

III.3.3.6. Evolution des demandes en eau potable, eau agricole et industrielle :

- Evolution des demandes en eau potable (figure III. 26):

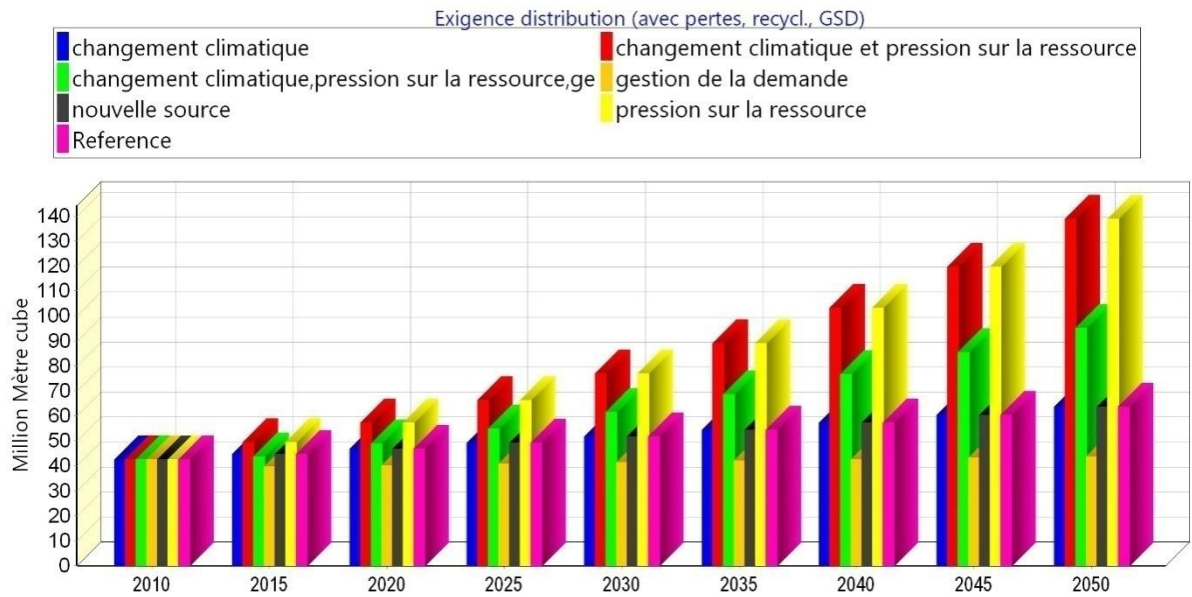


Figure III. 26. Evolution des demandes en eau potable par scénario.

La demande en eau des ménages évaluée à 43 hm³ (2010) s'envole pour atteindre 139 hm³ en 2050 sous la pression démographique et socio-économiques (figure III. 26). La gestion de la demande permet de faire passer ce chiffre à seulement 44 hm³.

- *Evolution des demandes en eau d'irrigation (figure III. 27) :*

La figure III. 27 illustre la demande en eau pour l'agriculture. Cette dernière, estimée en 2010 à près de 30 millions de m³, passe à 66 millions de m³ à l'horizon 2050 dans le cas d'une pression sur la ressource. La gestion de la demande réduirait ce volume de moitié (31 hm³).

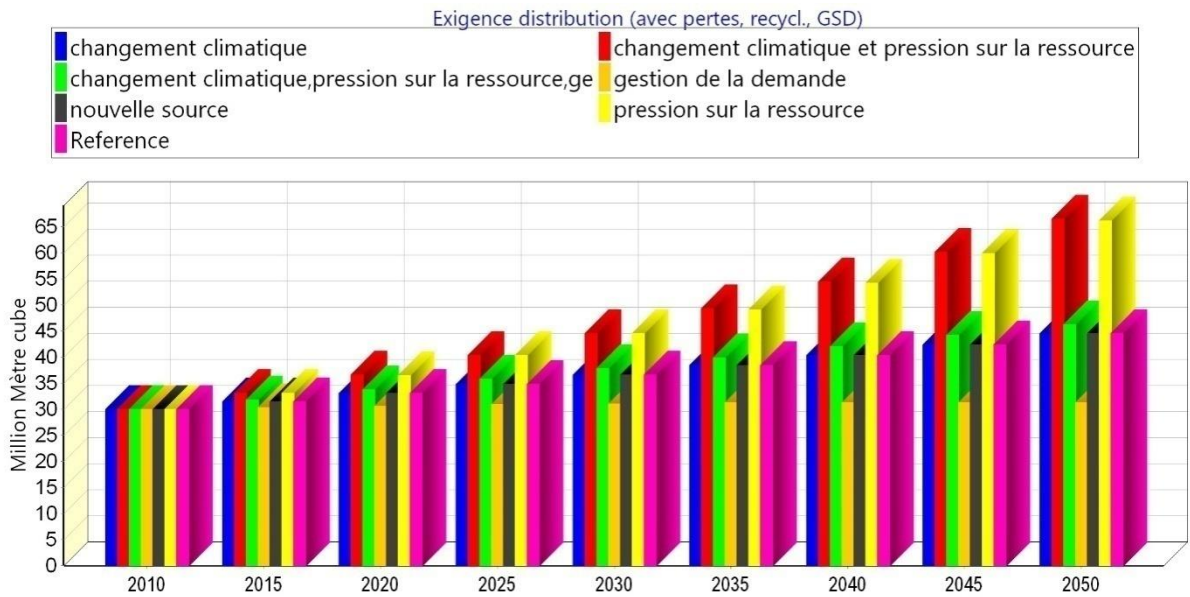


Figure III. 27. Augmentation des demandes en eau d'irrigation par scénario.

- **Evolution des demandes en eau industrielle :**

La demande en eau attribuée aux unités industrielles, estimée à 13 hm³ (2010) croît rapidement pour atteindre près de 19 hm³ en 2050 sous l'effet du changement climatique et à 41 hm³ sous le poids de la croissance démographique (figure III. 28). Une gestion de la demande réduirait ces chiffres à 14 hm³.

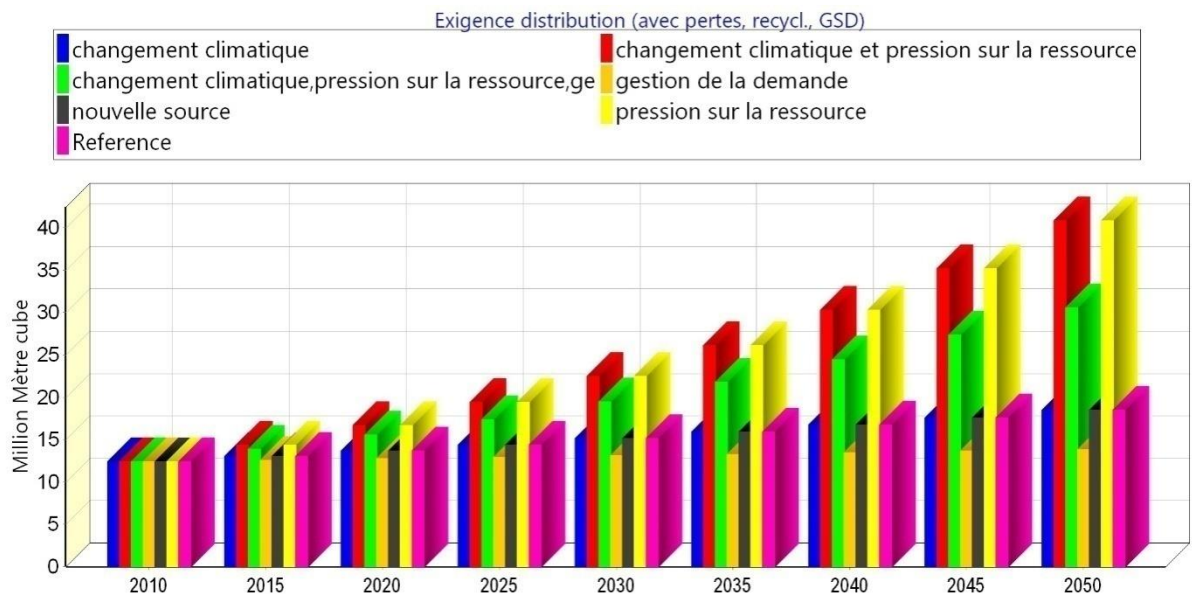


Figure III. 28. Evolution des demandes en eau industrielle par scénario.

III.3.3.7. Eau distribuée totale :

On note une forte hausse des volumes d'eau distribuée, dans le cas des scénarios SCCPRGDNR, qui passe d'un volume de 71 hm³ en début de simulation à 135 hm³ en 2050 (Figure III. 29). L'évolution de l'eau distribuée pour les scénarios SR, SNR et SPR est moins importante que dans le scénario précédent avec un volume qui passe de 71 hm³ en 2010 à 81 hm³ (SR), 102 hm³ (SNR) et 100 hm³ (SPR) en 2050. Pour les scénarios avec les effets du changement climatique, le volume d'eau distribuée diminue jusqu'à atteindre une valeur de près de 52 hm³ pour les scénarios SCC, SCCPR en 2050.

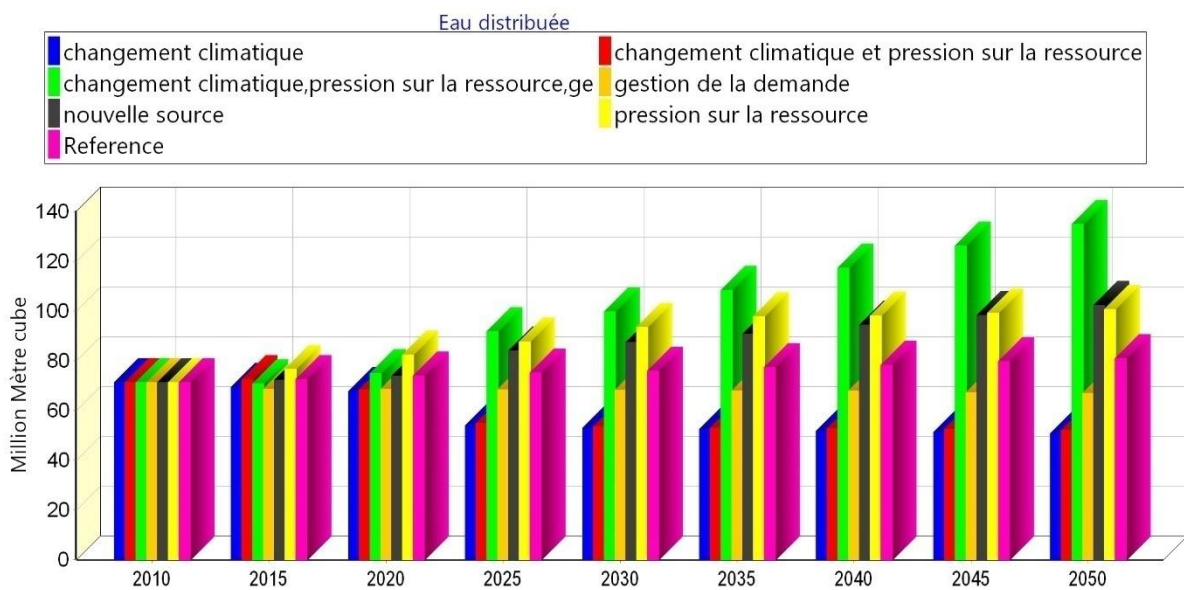


Figure III. 29. Quantités d'eau distribuées pour tous les usages et par scénario.

IV.3.3.8. Eau distribuée destinée à l'AEP, à l'irrigation et à l'industrie

Les histogrammes des figures 28, 29 et 30 montrent que les volumes d'eau distribuée respectivement pour les ménages, l'irrigation et les besoins de l'industrie. Nous remarquerons que les plus fortes quantités d'eau distribuée sont consacrées à l'AEP suivie par l'agriculture et enfin l'industrie (tableau III. 1). Les effets du dérèglement climatique et de la pression sur la ressource entraînent une baisse des volumes à cause de la diminution de l'eau disponibles. La politique de gestion de l'eau va également réduire les distributions d'eau.

Tableau III. 1. Evolution Eau distribuée pour l'AEP, l'agriculture et l'industrie.

	Eau potable	Irrigation	Eau industrielle

Années/scénarios	2010	2050	2010	2050	2010	2050
SCC	38.40	24.04	22.96	19.09	9.94	7.80
SCCPR	38.40	24.04	22.96	20.36	9.94	7.79
SCCPRGDNR	38.40	89.17	22.96	31.57	9.94	14.21
SGD	38.40	35.80	22.96	22.06	9.94	9.17
SNR	38.40	63.42	22.96	26.93	9.94	12.13
SPR	38.40	58.40	22.96	29.16	9.94	13.14
SR	38.40	44.93	22.96	24.87	9.94	11.20

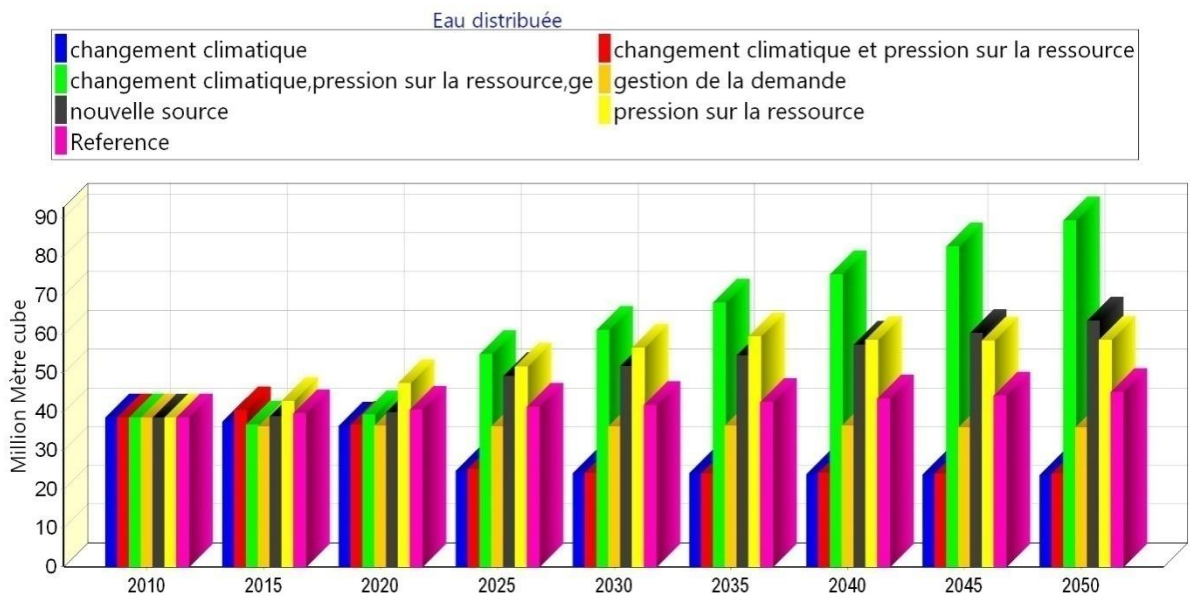


Figure III. 30. Volume en eau potable distribuée par scénario.

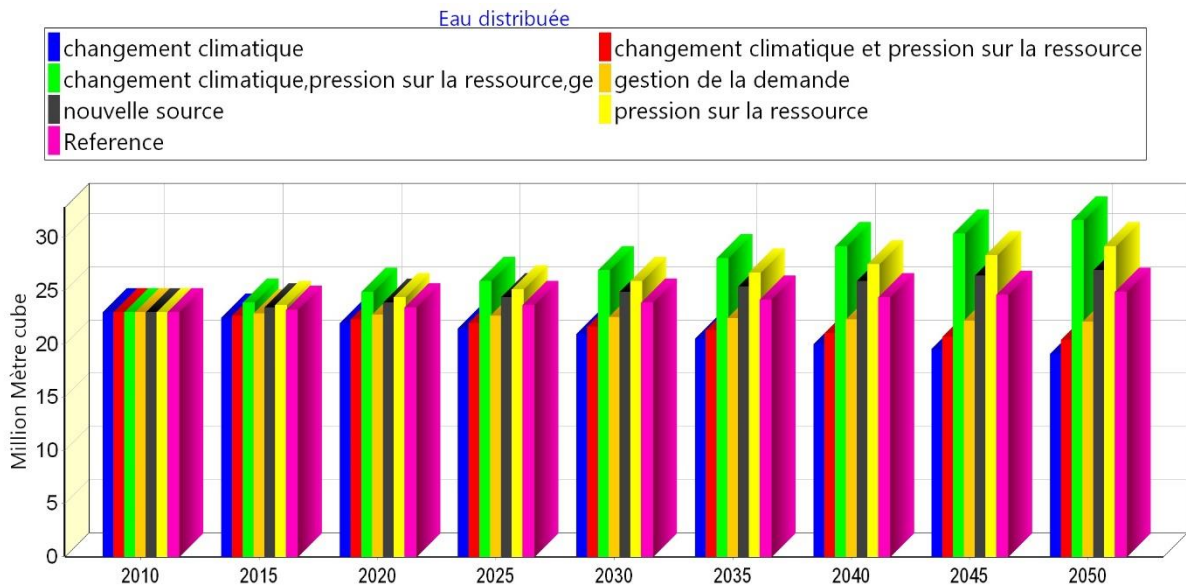


Figure III. 31. Volume en eau distribuée pour irrigation par scénario.

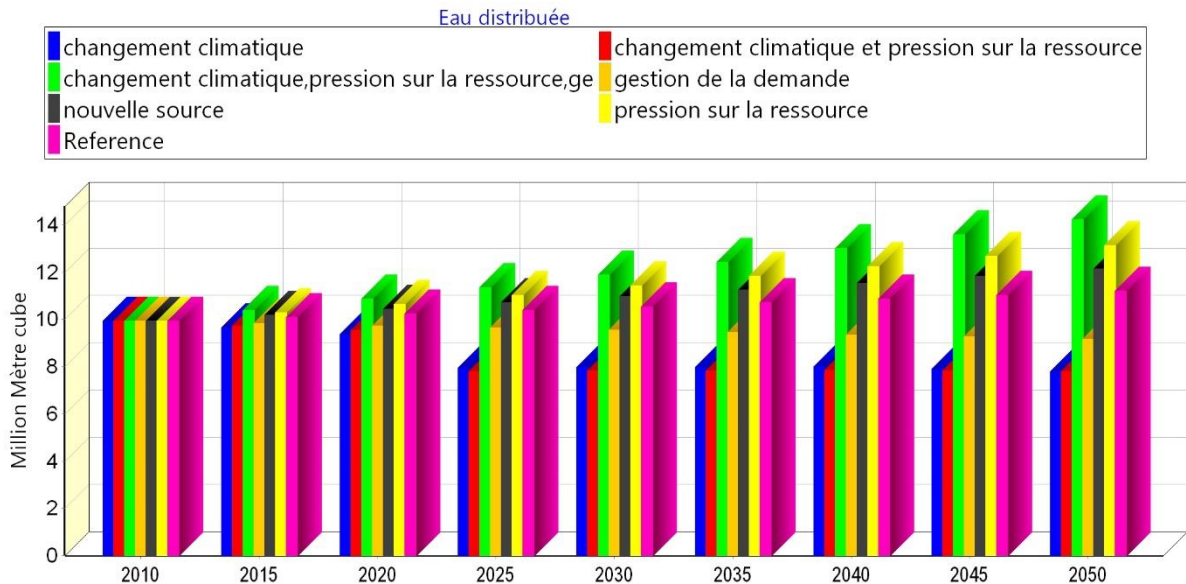


Figure III. 32. Volume en eau distribue pour l'industrie par scénario.

III.3.3.9. Variation du stockage en eau par scénario

- Les barrages :

La figure III. 33 illustre les quantités d'eau stockée dans les barrages annuellement pour les différents scénarios proposés. Les fluctuations annuelles du volume augmentent jusqu'à 215 hm³ en 2015 et reste stable pour les scénarii SR, SNR, SGD et SPR. Une forte baisse du stockage est observée pour les autres scénarios sous l'influence du réchauffement climatique et l'augmentation de la

population et des superficies irriguées. Cette pénurie touchera le BBS jusqu'à l'année 2025 et reste stable pour les scénarios SCCPR et SCC. Par contre, pour le scénario SCCPRGDNR, on note une hausse du stockage jusqu'à 2050.

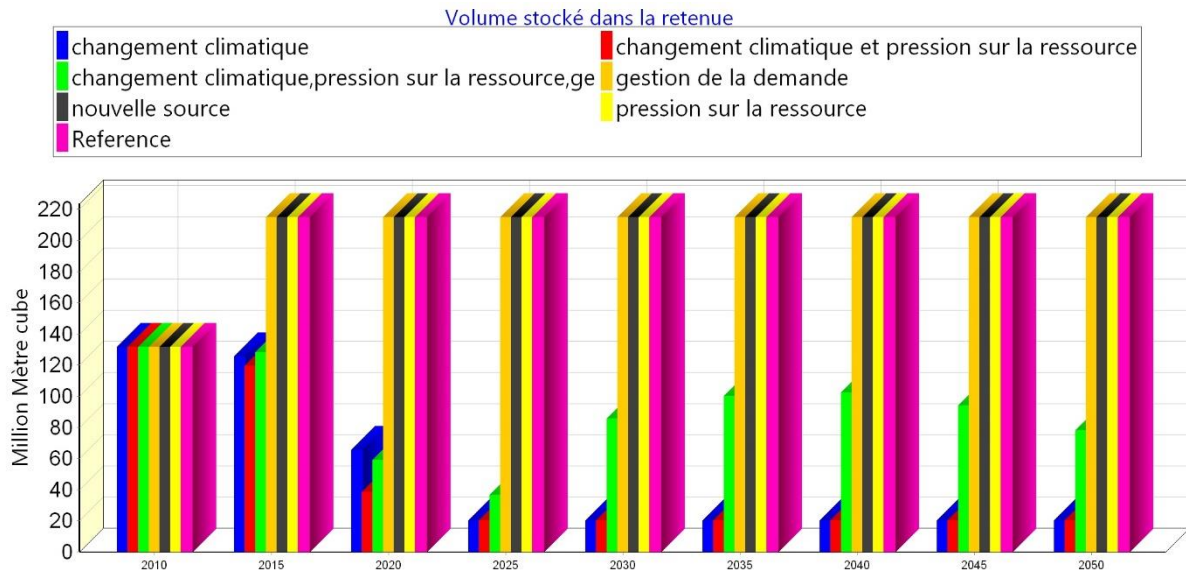


Figure III. 33. Evolution du volume stocké dans les barrages de la Cheffia et de Mexa par scénario.

- **Eaux souterraines** : le graphe de la [figure III. 34](#) met en évidence la variation des quantités d'eau souterraines disponibles ou l'évolution des stockages d'eau dans les aquifères. On constate que les volumes stockés les plus importants sont observés durant les scénarios SNR et SGD avec respectivement 56 et 48 Hm³. En revanche, ce sont les scénarii qui tiennent compte des effets du changement climatique qui montrent les volumes de stockage les plus faibles avec 12 Hm³ pour SCC et SCCPR et 13 Hm³ pour SCCPRGDNR.

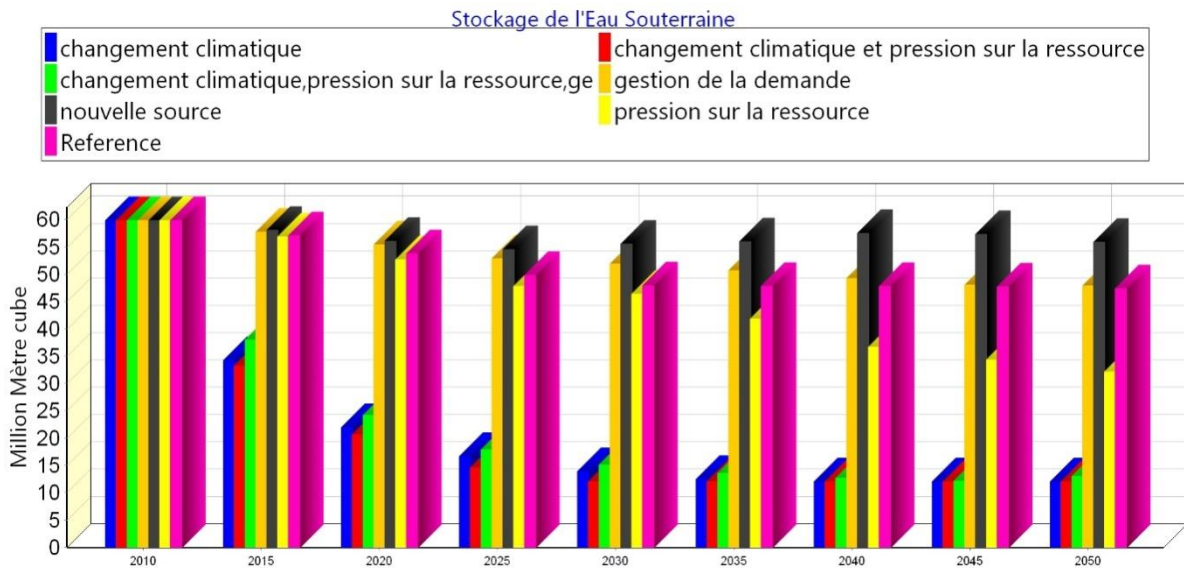


Figure III. 34. Volume d'eau souterraine.

IV.3.3.10. Demandes non satisfaites par scénario

Si nous considérons que la demande en eau non satisfaite (DNS) est égale à la différence entre la quantité d'eau demandée et la quantité distribuée, nous pouvons noter, [figure III. 35](#), que les *scenarii* qui enregistrent, les valeurs les plus fortes sont celles qui combinent l'impact du réchauffement climatique, croissance démographique et activités socio-économiques. Ce déficit qui était de 14 hm³ passe à 194 hm³ en 2050. Pour le scénario SPR la demande non satisfaite passe de 14 à 145 hm³ (2050). Les demandes non satisfaites pour les *scenarii* SCC, SR et SCCPRNRGD passeront de 14 hm³ à respectivement 76 hm³, 46 hm³ et 37 hm³ en 2050. En ce qui concerne les *scenarii* SNR, SGD, la demande non satisfaite augmente légèrement pour atteindre 24 hm³ (SNR) et 22 hm³ (SGD) en 2050.

En somme, le scénario le plus pessimiste et celui qui regroupe l'effet du dérèglement climatique, croissance démographique et activités socio-économiques. La mise en œuvre de stratégies de gestion de la demande (comme la réduction des fuites d'eau, la recherche des procédés d'irrigation économes d'eau, le recyclage des eaux industrielles, ...) serait un puissant moyen pour réduire la DNS à seulement 22 hm³ devant même l'apport du dessalement de l'eau de mer avec 24 hm³ de DNS.

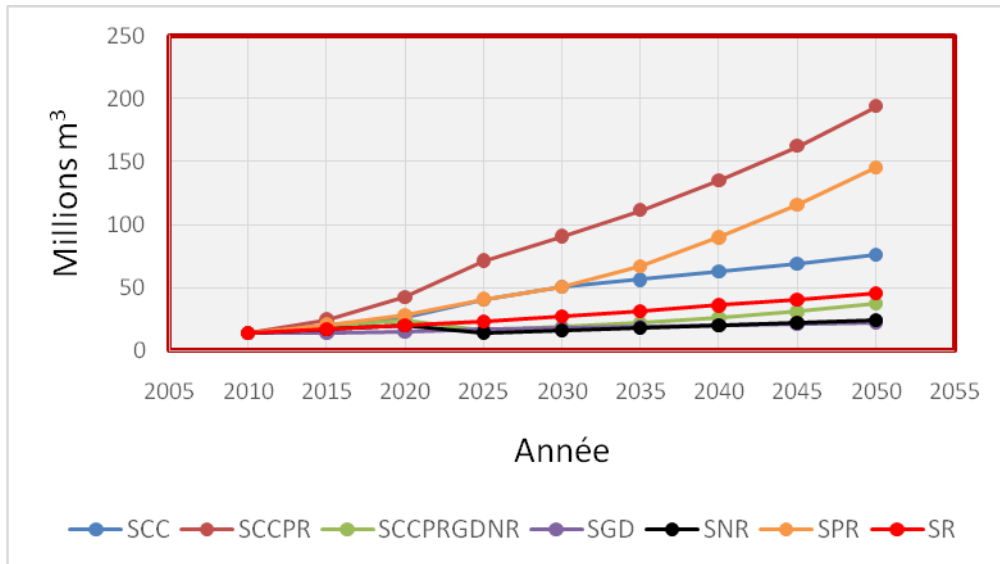


Figure III. 35. Demande en eau non satisfaite par scénario.

III.3.3.11. Demande non satisfaite pour l'eau potable, irrigation et industrie

- Demande non satisfaite pour l'eau potable :

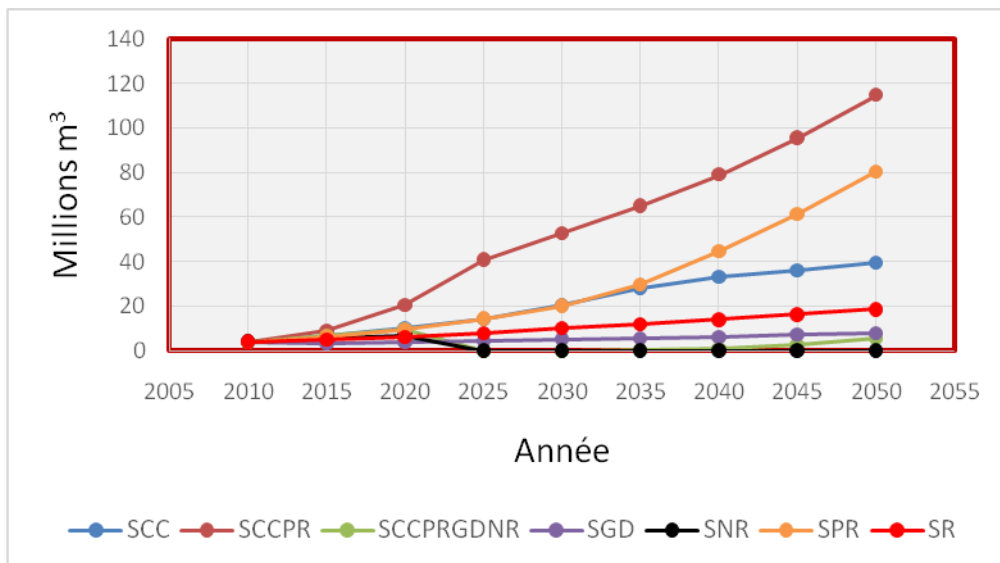


Figure III. 36. Demande non satisfaite pour l'eau potable et par scénario.

Quant à la DNS eau potable, le scénario pression sur la ressource (SPR) associé au changement climatique (SCC) enregistre le plus fort déficit avec 115 million de m³.

Si l'on examine l'évolution des volumes de la figure III. 36, nous remarquerons que dans le cas de la combinaison de tous les scénarii (SCCPRGDNR), les valeurs

de la DNS restent faibles, inférieures à 1 million de m³, mais recommencent à grimper progressivement à partir de 2040.

L'apport de la déminéralisation de l'eau marine est donc une excellente mesure puisqu'elle permet de faire baisser la DNS à moins de 1 million de m³. Cependant, la combinaison avec d'autres mesures telles que la gestion de la demande en eau (réduction des fuites, recyclage eau industrielle, systèmes d'irrigation économes d'eau, ...) pourrait atténuer les problèmes de stress devenus récurrents durant ces dernières années.

- *Demande non satisfaite pour l'irrigation (figure III. 37) :*

Quant à la DNS relative à l'eau d'irrigation, le plus grand déficit est enregistré pour le scénario pression sur la ressource (SPR) associé au changement climatique (SCC) avec un déficit à combler de 46 million de m³. L'apport de la station de dessalement destinée spécialement à produire de l'eau potable permet de rediriger de grandes quantités d'eau vers l'agriculture et l'industrie. La DNS, dans le cas de la combinaison des *scenarii* « SCCPRGDNR », reste cependant assez forte avec 15 millions de m³.

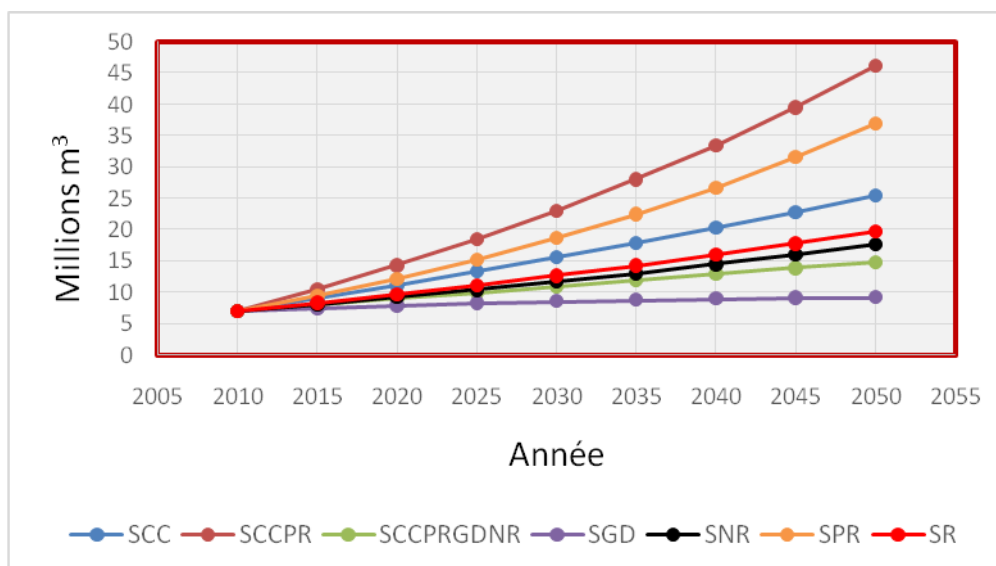


Figure III. 37. Demande non satisfaite pour l'irrigation par scénario.

- *Demande non satisfaite pour l'industrie :*

En ce qui concerne la DNS relative à l'eau destinée à l'industrie, le plus fort déficit est enregistré pour le scénario pression sur la ressource (SPR) associé au changement climatique (SCC) avec un déficit à combler à l'horizon 2050 de 33 millions de m³. La DNS, dans le cas de la combinaison de l'ensemble des *scenarii* envisagés « SCCPRGDNR », serait de 16 millions de m³.

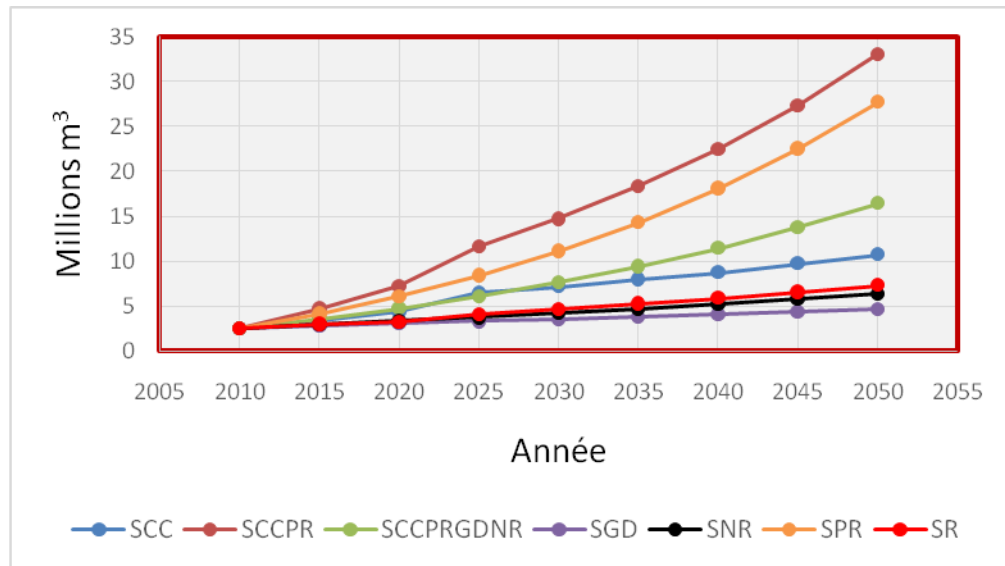


Figure III. 38. Demande non satisfaite pour l'industrie par scénario.

III.4. Conclusion

L'application du WEAP s'est avérée comme un moyen robuste pour évaluer l'état des ressources et des besoins et d'identifier les stratégies de gestion de l'eau dans le BBS selon différents scénarios jusqu'en 2050. Le calage du modèle indique une bonne reproduction des tendances du débit. Les sept scénarios élaborés dans cette recherche reflètent les tendances actuelles et jusqu'en 2050 de la gestion de la demande en eau en fonction de diverses stratégies d'exploitation et d'approcher les effets de la disponibilité des ressources par le changement climatique avéré dans le bassin.

Les scénarios envisagés indiquent que la demande en eau ne peut être satisfaite totalement compte tenu des ressources disponibles, de leur rareté et de leur qualité. Les impacts du réchauffement climatique et de la pression sur la ressource sont les principaux facteurs qui font augmenter les besoins en eau.

La gestion de la demande et le dessalement sont les stratégies les plus pertinentes pour atténuer les besoins en eau des différents utilisateurs.

En effet, le recours au dessalement de l'eau de mer constitue, pour le moment, une excellente mesure mais qui peut s'avérer insuffisante compte tenu de la hausse sans cesse croissante de la demande.

La gestion de la demande (SGD) avec toutes la panoplie de stratégies telles que la diminution des pertes d'eau, le recyclage des eaux, l'utilisation dans l'irrigation de techniques permettant d'économiser l'eau apparaît comme un puissant moyen pour lutter contre les problèmes d'eau dans le bassin.

Cependant, il est techniquement possible de réduire la demande non satisfaite en conservant une grande partie de l'eau perdue qui devrait coûter moins cher que le coût d'installation de nouveaux équipements. Les résultats obtenus indiquent que le simulateur WEAP permet de dégrossir la situation de l'eau en termes de ressources et de besoins. Les graphes obtenus peuvent constituer une bonne base pour aider les gestionnaires à proposer les bonnes solutions pour la gestion future des ressources dans un environnement où l'eau devient de plus en plus rare.

Références

- Aoun-Sebaiti B., Hani A., Djabri L., Chaffai H., Aichouri I., Boughrira N., 2013.** *Simulation of water supply and water demand in the valley of Seybouse (East Algeria). Desalination and Water Treatment, Volume 52, Issue 10-12, pages 2114-2119.*
- Bouklia-Hassane R., Djilali Y., El-Bari Tidjania A., 2014.** *Prospects for a larger integration of the water resources system using WEAP model: a case study of Oran province, Desalination and Water Treatment, Volume 57, Issue 13, March 2016, pages 5971-5980,*
- Bouznad I.E., Zouini D., Nouiri N & Khelfaoui F., 2016.** *Essai de Modélisation de la Gestion des ressources en eau dans la vallée d'Oued Righ (Sahara septentrional algérien) par l'Utilisation d'un outil d'aide à la décision WEAP. Rev. Sci. Technol., Synthèse 33: 56 - 71 (2016)*
- Choi S-J., Kim J-H., Lee D-R., 2012.** *Decision of the Water Shortage Mitigation Policy Using Multi-criteria Decision Analysis, KSCE Journal of Civil Engineering, Volume 16, Issue 2, pp 247-253,*
- Daifallah T., Hani A., 2018.** *Water Demand Management is Solution of Water Stress? A Case Study of the Kebir-West River Basin in Northern Algeria. Water and energy international. Pp. 62-69.*

- Gajanan Bhawe A., Mishra A., Singh Raghuwanshi., 2014.** *Evaluation of hydrological effect of stakeholder prioritized climate change adaptation options based on multi-model regional climate projections, Climatic Change, Volume 123, Issue 2, pp 225-239.*
- Ghaleb F., Abbas F., 2014.** *Water Environment in the Coastal Basins of Syria – Assessing the Impacts of the War. Environ. Process. Volume 1. Issue 4. pp. 533–552.*
- Hadded R., Nouiri I., Alshihabi O., Maßmann J., Huber M., Laghouane A., Yahiaoui H., Tarhouni J., 2013.** *A Decision Support System to Manage the Groundwater of the Zeuss Koutine Aquifer Using the WEAP-MODFLOW Framework. Water Resources Management. Volume 27. Issue 7, pp 1981-2000.*
- Hamlat A., Errih M., Guidoum A., 2012.** *Simulation of water resources management scenarios in western Algeria watersheds using WEAP model. Arabian Journal of Geosciences. Volume 6, Issue 7, pp 2225-2236.*
- Le Page M., Berjamy B., Fakir Y., Bourgin F., Jarlan L., Abourida A., Benrhanem M., Jacob G., Hube M., Sghrer F., SimonneauxV., Chehbouni G., 2012.** *An Integrated SAD for Groundwater Management Based on Remote Sensing. The Case of a Semi-Arid Aquifer in Morocco, Water Resources Management, Volume 26, Issue 11, pp 3209-3230,*
- Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V., 1970.** *River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. Journal of Hydrology, 282-290.*
- Randall S-F., Arthur C., Francis Y., Hartley W., Harald K., Bernard T., Imasiku N., Boaventura C., 2014.** *The vulnerability of hydropower production in the Zambezi River Basin to the impacts of climate change and irrigation development, Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change. Volume 21. Issue 5, pp 721-742.*
- Sakaa B., Chaffai H., Hani A., 2013.** *The use of Artificial Neural Networks in the modeling of socioeconomic category of Integrated Water Resources Management (Case study: Saf-Saf River Basin. North East of Algeria). Arabian Journal of Geosciences. Volume 6. Issue 10, pp 3969–3978.*

Chapitre IV. Identification des zones potentielles de recharge des aquifères à l'aide du SIG

Identification des zones potentielles de recharge des aquifères à l'aide du SIG

IV.1. Introduction

Les nappes côtières connaissent, ces dernières décennies, une forte exploitation pour répondre aux besoins sans cesse croissants des populations, de l'industrie et de l'irrigation. La hausse de la consommation en eau est très forte sur la rive sud de la Méditerranée à cause d'une croissance démographique très élevée. Un certain nombre de pays de cette région commencent à subir de graves pénuries d'eau comme ça été le cas, entre autres, de la région d'Annaba durant l'été 2017. Pour s'adapter à ces situations de stress hydrique, ces pays devront instaurer une réelle démarche de durabilité et de pérennité des ressources hydrique. Cette démarche nécessite l'identification et la quantification de 3 principaux paramètres dans un bassin : la *recharge*, les *écoulements* et la *décharge* (Cook et Robinson, 2002 ; Cook *et al.*, 2006 ; Sarah *et al.*, 2006 ; Gleeson, 2009). La recharge représente la quantité d'eau qui s'infiltré pour atteindre la nappe alors que la décharge, elle, traduit le volume d'eau souterraine qui s'écoule du milieu souterrain vers la surface où elle se décharge discrètement. Les lacs (appelés dans la région « Néchâa » et « Garâet »), les oueds et les zones humides sont les exemples de décharge les plus connus. La recharge correspond au paramètre le plus pertinent puisque les deux autres facteurs, en l'occurrence les écoulements souterrains et les décharges, sont intimement liés à ce paramètre (Sanford, 2002 ; Cook *et al.*, 2006). L'appréciation de la recharge est primordiale pour gérer durablement la ressource en eau, car elle contribue à appréhender les zones d'un aquifère qui sont vulnérables à la pollution, d'évaluer son potentiel d'exploitation et de déterminer la durabilité des ressources (Scanlon *et al.*, 2002).

Toutefois, la recharge est sans contexte le processus le plus compliqué à évaluer spatialement et temporellement à cause de sa variabilité (Lerner *et al.*, 1990). Pour rappel, il n'existe actuellement aucune approche universelle applicable pour évaluer la recharge des formations aquifères. En réalité, de nombreuses approches d'évaluation de la recharge existent dans la bibliographie

internationale. On peut citer comme exemples les approches hydrauliques, thermiques, isotopiques, numériques, etc. (Sharma *et al.*, 1980 ; Allison, 1988 ; Lerner *et al.*, 1990 ; Solomon *et al.*, 1993 ; Lerner, 1997 ; Simmers, 1997 ; 2002 ; Healy et Cook, 2002).

La diversité des paramètres régissant la recharge exige leur intégration pour permettre une analyse spatiale. De ce fait, les Systèmes d'Informations Géographiques sont le plus souvent utilisés pour l'intégration des cartes thématiques avec une bonne précision dans des délais très courts.

Le but de ce travail est d'élaborer une cartographie des zones potentielles de recharge de l'aquifère dunaire ainsi que celles du bassin de la basse Seybouse à l'aide des techniques spatiales surtout la télédétection et les systèmes d'informations géographiques. Cette approche permet de décrire, de classer et d'intégrer des paramètres pertinents qui régissent la recharge, à savoir l'occupation et le type de sol, la géologie, la perméabilité, les pentes et le réseau hydrographique.

IV.2. Matériel et Méthodes

IV.2.1. Matériel :

La première région étudiée est localisée à l'Est de la plaine d'Annaba (figure IV. 1). Elle fait partie du bassin de la mafragh qui englobe tout le versant Nord de la Medjerda et s'étend sur une superficie de 2660 km². De ce fait, elle est ceinturée surtout dans sa partie Sud et Est par les montagnes typiques du tell algérien. Le système aquifère est constitué pour l'essentiel d'un massif dunaire s'étendant sur près de 180 km². Les limites du domaine dunaire sont constituées au Nord par la Méditerranée, les massifs du djebel Koursi à l'Est, au Sud par la plaine alluviale du Kébir, et enfin à l'Ouest par la confluence des oueds Kébir et Bounamoussa, appelée oued Mafragh. L'alimentation de cet aquifère, de forme globalement triangulaire, est assurée principalement par les précipitations et par le ruissellement diffus sur les reliefs limitant les sables à l'Est. A la frontière Sud, les sables dunaires passent latéralement aux formations graveleuses de la plaine de Bouteldja. Compte tenu de la différence de charges piézométriques, ce passage

latéral entraîne l'apparition de nombreux marécages, connus dans la région sous les noms de Néchâa et Garâet, d'une superficie totale de près de 15 km²; qui semblent correspondre aux « fenêtres » de la nappe dunaire. Les néchâa et garâet présente un intérêt écologique dans le contexte méditerranéen car ils offrent un lieu d'hivernage, de passage et de nidation pour beaucoup d'espèces d'oiseaux et pour le développement d'une flore d'une richesse reconnue sur le plan international. Ce site, qui est vulnérable aussi bien à la pollution qu'à la dégradation de l'arrière-pays, est confronté actuellement à diverses actions anthropiques inquiétantes. Quant à l'utilisation de l'eau, durant ces dernières années, une certaine agriculture s'est développée ; de plus, il s'est produit un accroissement de la population des villages limitrophes. Ceci a entraîné une hausse de la demande en eau pour satisfaire les besoins des habitants et pour l'irrigation.



Figure IV. 1. Situation géographique du massif dunaire de Bouteldja.

Le choix de ce site comme exemple pour la détermination des zones de recharge est justifié par le fait que cette nappe constituait, jadis, un véritable « château d'eau » pour alimenter Annaba en eau potable. En effet, les eaux du massif dunaire, moins chargées que celles du bassin de la Seybouse, ont toujours suscité l'intérêt des responsables de l'hydraulique d'Annaba. Cette eau est en effet utilisée pour l'AEP des populations d'Annaba et de sa région mais aussi pour la

dilution des eaux superficielles des barrages et de la nappe des graviers beaucoup plus chargées.

Le second site analysé ici correspond au bassin de la basse Seybouse situé à l'ouest du premier, entre les latitudes 36°30' et 37° N et les longitudes 7°30' et 7°55' E. Ce bassin, couvrant près de 1066 km², est limité par la Mer au N, par l'extension orientale des chaînes numidiennes de la Cheffia et d'El Kala au Sud, à l'ouest par le complexe ancien de l'Edough et le lac de Fetzara, et enfin par le prolongement oriental de la plaine d'Annaba-Bouteldja et les Monts du Nador N'bail à l'Est.

Le site étudié occupe la majorité de la wilaya d'Annaba et la partie ouest de celle d'El Tarf, [figure IV. 2](#).

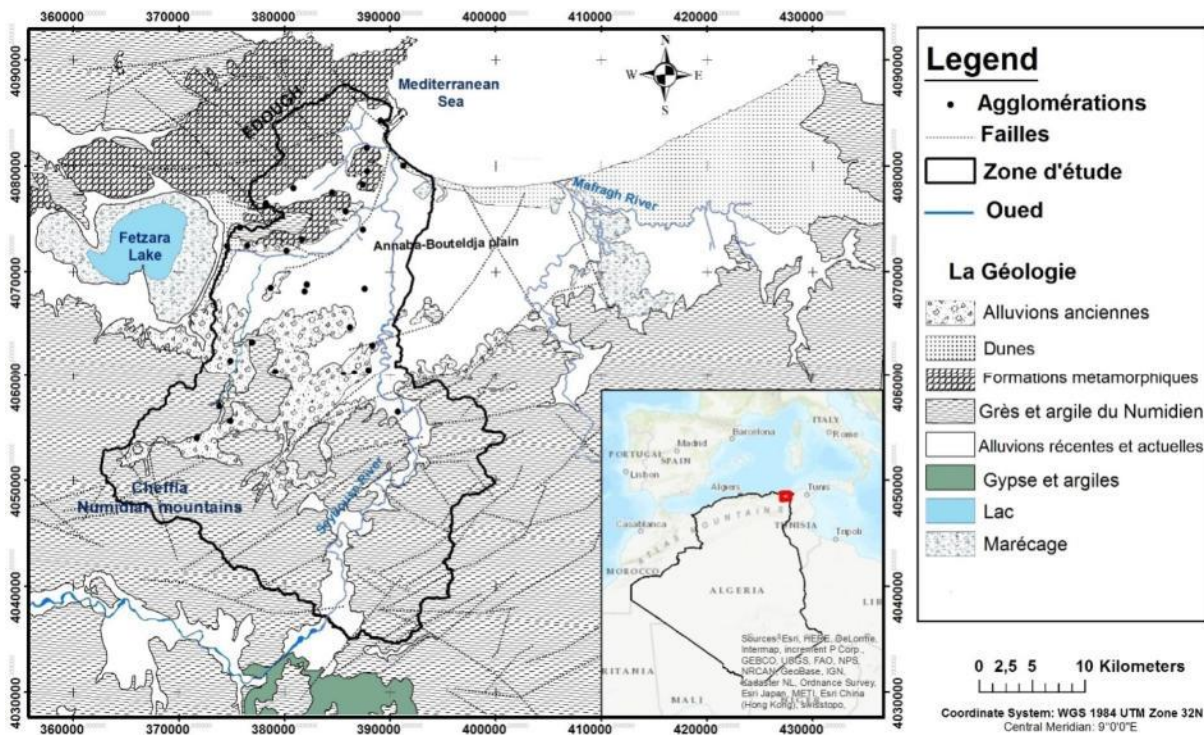


Figure IV. 2. Situation géographique et géologie du bassin de la basse Seybouse (Ghrieb, 2021).

Lithologiquement, le site est formé par des sédiments mio-plio quaternaire, constituées par des argiles, sables, graviers....

Il y'a trois principales nappes : 1) La nappe superficielle d'Annaba constitué par des sables et limons, 2) l'aquifère « profond » d'Annaba constituée par des graviers et galets et 3) la nappe de Bouchegouf au sud.

Les outils utilisés pour réaliser cette recherche sont constitué essentiellement du logiciel ArcMap 10.0 (Kim *et al.*, 2004). Les cartes du réseau hydrographique et d'occupation du sol sont élaborées à l'aide du logiciel ArcMap. Le dépouillement des données de forages a été réalisé à l'aide de Surfer Version 8.01 (2002). L'élaboration et l'habillage des cartes thématiques (carte géologique, etc.) sont effectués grâce à ArcMap 10.0. Ce dernier a aussi été utilisé pour extraire la carte des pentes à l'aide du MNT (Modèle Numérique de Terrain) et à l'intégration de toutes les cartes thématiques exploitées dans cette recherche.

IV.II.2. Méthodes :

L'identification des zones potentielles de recharge au niveau des deux sites est réalisée en prenant en compte les paramètres qui peuvent impacter le phénomène de recharge en milieu poreux, c'est-à-dire : les types et occupation du sol, les pentes et le réseau de drainage, la géologie, la perméabilité, l'épaisseur de la ZNS (Krishnamurthy *et al.*, 1996 ; 2000 ; Shaban, 2001 ; Shaban *et al.*, 2006 ; Sener *et al.*, 2005 ; Thakur et Raghuwanshi, 2008 ; Hsin-Fu *et al.*, 2009). Ces paramètres sont cartographiés en utilisant plusieurs sources d'informations essentiellement les cartes existantes. La description et la classification des cartes thématiques produites sont effectuées en tenant compte de l'aptitude de l'eau à s'infiltrer.

La méthode d'étude comporte deux étapes : i) d'abord, la caractérisation et la description des paramètres qui ont le plus d'influence sur la recharge des aquifères, ii) il s'agit, dans un deuxième temps d'acquérir, de classer et d'attribuer des poids à ces facteurs et de leur intégration (Figure IV. 3).

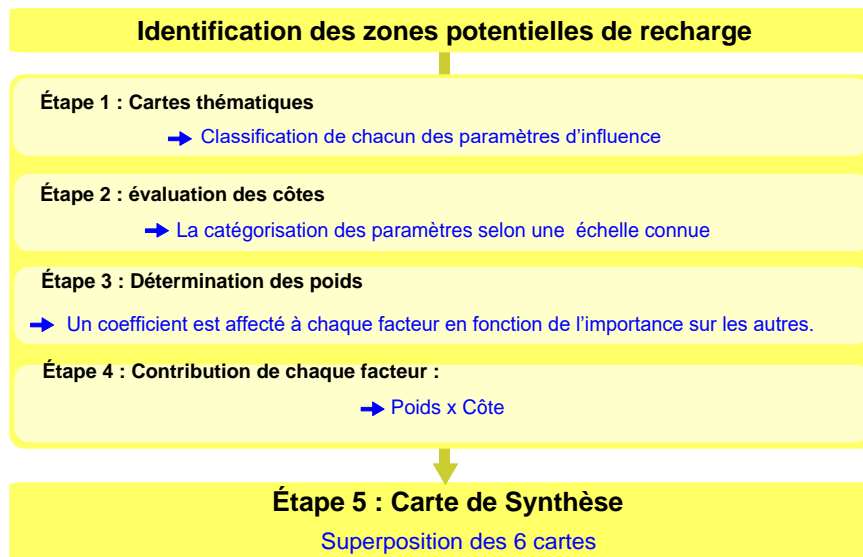


Figure IV. 3. Méthodologie de caractérisation des zones de recharge.

Paramètres influençant la recharge des aquifères : le couvert végétal favorise l'infiltration des eaux en freinant le ruissellement à la surface du sol (Musy et Soutter, 1991). Si le sol est suffisamment couvert par la végétation, l'évaporation directe est réduite. Par ailleurs, la répartition de la végétation est favorisée par l'existence de la recharge.

Les trajectoires suivies par l'eau de la surface vers la profondeur sont fonction des caractéristiques lithologiques et de la perméabilité (Kouadio *et al.*, 2008).

L'infiltration est gouvernée par les forces de succion résultants des forces de capillarité et d'adsorption qui sont elles-mêmes régis par les propriétés de la matrice du sol.

En général, on peut appréhender de l'importance du ruissellement ou de l'infiltration des eaux si l'on connaît la forme et la densité du réseau hydrographique. Ainsi, un chevelu hydrographique bien développé indique en général un fort ruissellement et une faible infiltration et vice versa. D'autre part, l'infiltration vers la nappe dépend de la perméabilité du sol et de la zone non saturée (nature et épaisseur). Il faut enfin rappeler que la pente joue un rôle non négligeable en favorisant les écoulements si elle est forte et en faveur de l'infiltration si elle est faible.

IV.3. Résultats et discussion

Les paramètres qui interviennent dans la recharge sont analysés chacun séparément puis intégrés et compilés selon la démarche adoptée pour générer une carte des zones de recharge potentielle.

Nous donnons ci-dessous, les calculs détaillés effectués dans le cadre de l'application de cette approche au massif dunaire de Bouteldja que nous avons traité lors d'un mémoire de Master en 2020 (Cissé et Hani, 2020). Quant au bassin de la Seybouse, nous nous contenterons de présenter les cartes thématiques et la carte de synthèse pour éviter ainsi toutes sortes de répétitions ou de redondances.

IV.3.1. Cas du massif dunaire de Bouteldja

IV.3.1.1. Cartes thématiques :

IV.3.1.1.1. Drainage (ID) :

L'élaboration de la carte thématique du réseau hydrographique s'appuie sur la digitalisation du chevelu hydrographique et leur classement par rapport à leur densité de drainage. Dans ce travail, 4 groupes se distinguent par leur densité de drainage Id (Figure IV. 4) :

$Id > 2$: dans ce cas, ce sont l'écoulement et le drainage qui sont très forts. Ce groupe correspond aux secteurs Sud du massif.

$1.5 < Id < 2$: le ruissellement et le drainage sont moyens. Ce groupe se localise dans la partie centrale du massif.

$1 < Id < 1.5$: les deux facteurs (écoulement et drainage) ainsi que la vitesse sont faibles. Ce groupe occupe le centre du massif dunaire.

$Id < 1$: l'écoulement et le drainage sont pratiquement négligeables. Ce groupe se situe dans les régions de basses altitudes (dépression). C'est dans ces régions que l'infiltration est prépondérante.

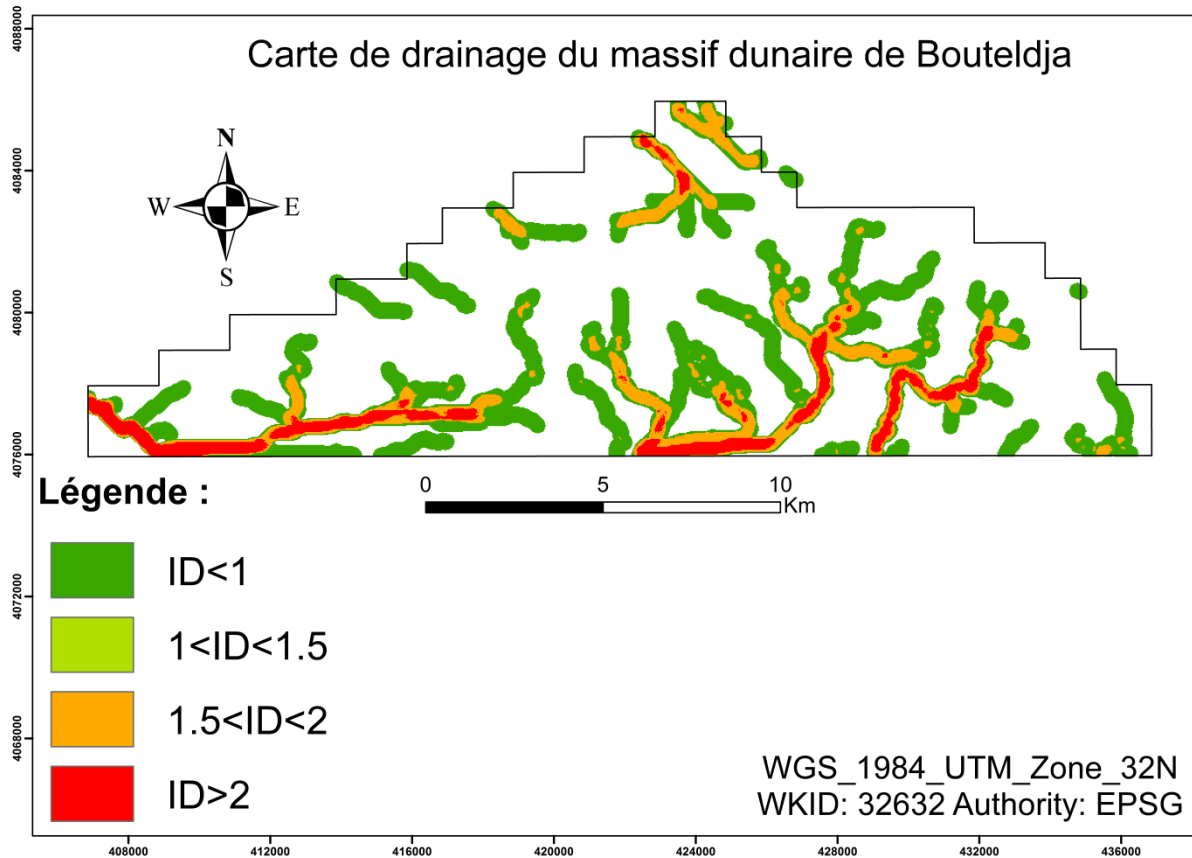


Figure IV. 4. Carte de réseau hydrographique du massif dunaire de Bouteldja.

IV.3.1.1.2. Pentés :

L'élaboration de cette carte thématique des pentes passe par l'élaboration d'un MNT. L'interprétation des données de pentes fournies par ce MNT permet d'appréhender quatre familles (Figure IV. 5) :

$0 < \alpha < 5\%$: il s'agit des secteurs à pentes faibles où l'infiltration est plus importante que le ruissèlement. Géographiquement, cette famille correspond à des plaines et des dépressions.

$5 < \alpha < 15\%$: cette classe correspond aux zones de piedmonts. L'infiltration devient importante alors que le ruissèlement est toujours minime.

$15 < \alpha < 30\%$: ce groupe caractérise les secteurs où le ruissèlement domine l'infiltration qui reste faible. Cette classe occupe les bordures des dunes.

$\alpha > 30\%$: ce dernier groupe est caractérisé par la prédominance du ruissellement. Ce sont les régions montagneuses de Djebel Koursi qui occupent la bordure orientale du massif dunaire.

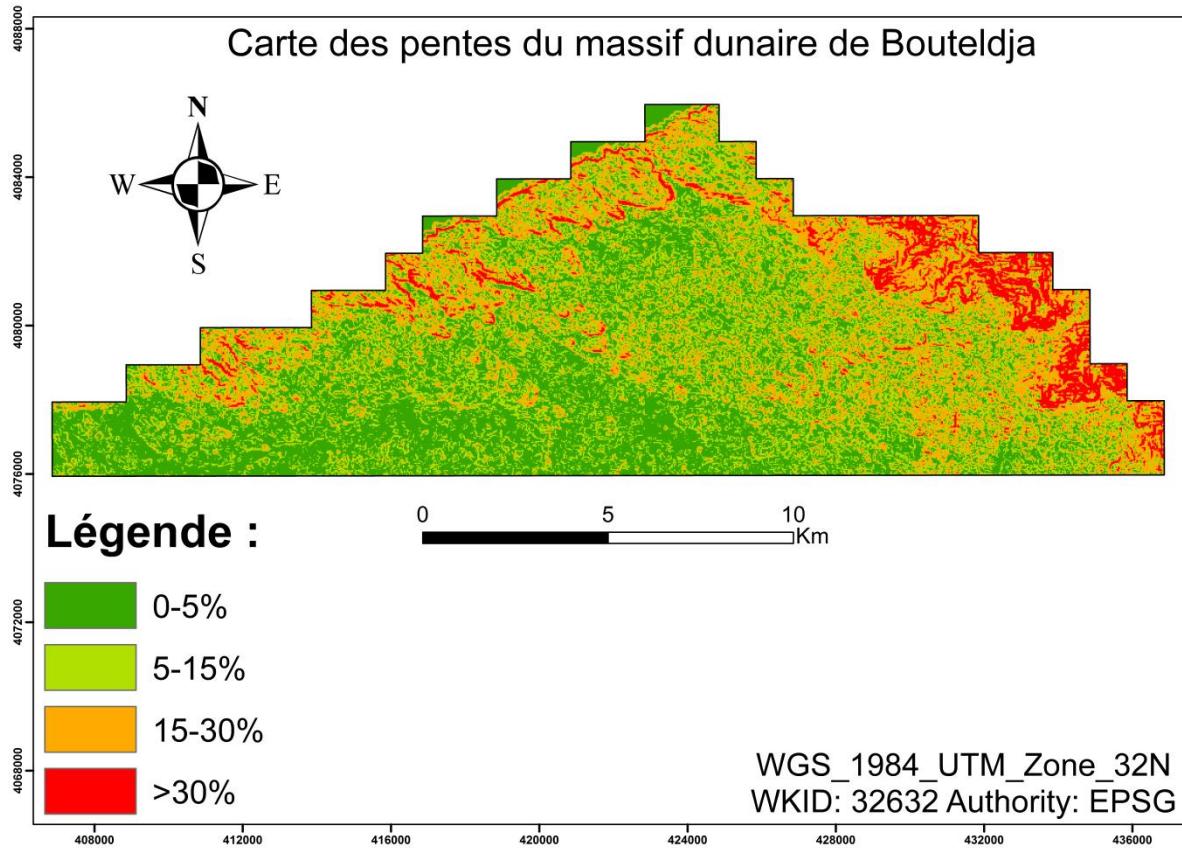


Figure IV. 5. Carte des pentes du massif dunaire de Bouteldja.

IV.3.1.1.3. Occupation du sol :

L'élaboration de la carte de l'occupation du sol est effectuée grâce à une image Google Earth. Six classes sont déterminées (Figure IV. 6). L'analyse de la carte permet de tirer les conclusions suivantes, tableau IV. 1 :

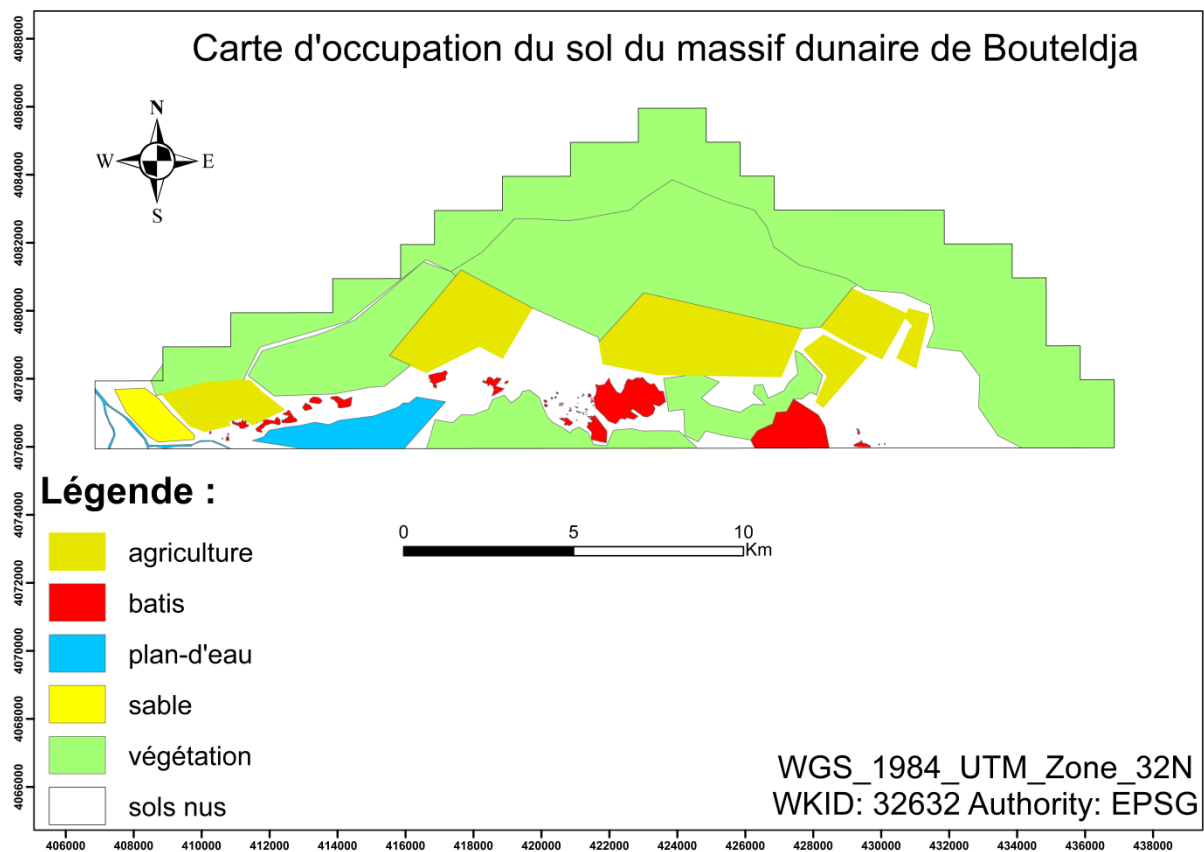


Figure IV. 6. Carte d'occupation du sol du massif dunaire de Bouteldja.

Tableau IV. 1. Différents types d'occupation du sol – Intérêt hydrogéologique.

Unités	Description	Propriété hydrogéologique
Agriculture	La dispersion des cultures dans le massif dunaire de Bouteldja favorise la recharge en limitant les pertes par évapotranspiration.	Très bonne
Bâtis	L'imperméabilisation des surfaces (habitats, zones industrielles, etc.) favorise le ruissellement et ralentie l'infiltration..	Mauvaise
Plan d'eau	Les cours d'eau pérennes (oueds, lacs, Nachâats...). peuvent alimenter les nappes.	Excellente
Sable et végétation claire	La prédominance de formations sableuses et la dispersion du couvert végétal sont en faveur de la recharge que de l'écoulement.	Très bonne
Végétation	Ce facteur peut être favorable à l'infiltration en raison du confinement de l'eau dans la zone végétale. Néanmoins, une part importante de cette eau peut s'évaporer. La végétation n'intervient que faiblement dans l'infiltration vers la nappe.	Bonne

IV.3.1.1.4. Lithologie :

L'élaboration de la carte lithologique du massif dunaire, passe par le regroupement des différentes lithologies données par la carte géologique en catégories ayant les mêmes propriétés hydrogéologiques, en s'appuyant sur les valeurs approximatives de l'infiltration finale données par Musgrave en 1955 (ASCE, 1996). Ainsi, 4 types de lithologie sont distingués (Figure IV. 7) :

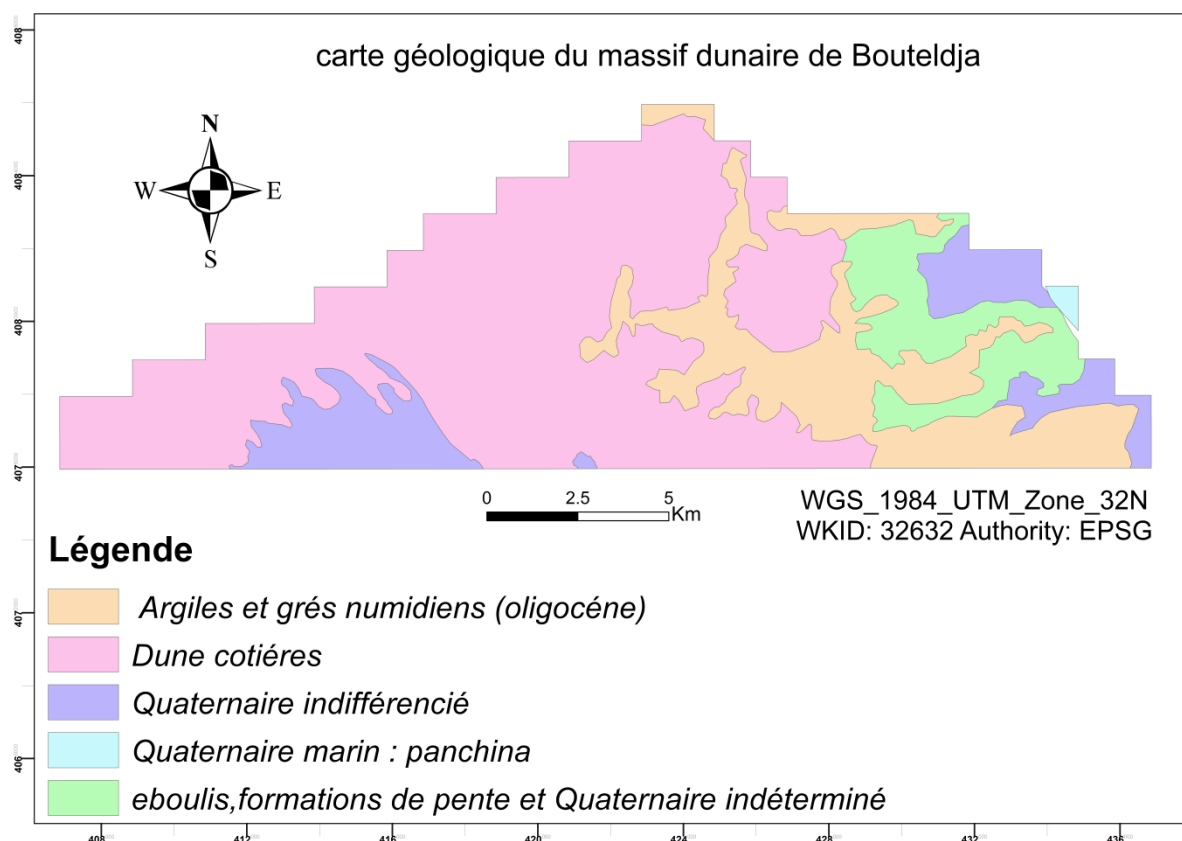


Figure IV. 7. Carte géologique du massif dunaire de Bouteldja (d'après J.M. Vila, 1980, extrait modifié).

Tableau IV. 2. Différentes classes lithologiques en fonction du pouvoir infiltrant.

Classes	Lithologie	Propriété hydrogéologique (aptitude à l'infiltration)
Très faible	Argiles et grès numidiens : se localisent sur la bordure Est du massif dunaire.	Imperméable
Faible	Eboulis : Ce sont des graviers et cailloutis à matrice argileuse qui se développent sur les bordures des dunes au contact des	Peu perméable

	formations numidiennes à l'Est. Leurs potentialités aquifères sont réduites.	
Moyenne à bonne	Quaternaire indifférencié et marin : ce sont des formations sablo-argileuses incluant des lentilles de sables. Ces lentilles sont plus fréquentes à la périphérie des affleurements des grès numidiens.	Perméable
Très bonne	Dunes côtières : elles contiennent une nappe libre, appelé « <i>nappe du cordon dunaire</i> ». C'est une nappe, contenue dans les dunes, qui occupe toute la bordure de la Méditerranée.	Très perméable

IV.3.1.1.5. Épaisseurs de la Zone Non Saturé (ZNS) (Figure IV. 8):

L'infiltration des eaux est fonction de la perméabilité du sol et de la nature et épaisseur de la ZNS.

L'examen de la carte des profondeurs de la nappe observée en juillet 1994, après un arrêt des prélèvements suite aux incendies qui ont ravagé le massif dunaire, mettent en évidence les zones:

- où la profondeur varie de 0 à 1,5 m : c'est une zone de faible extension, située au niveau du village d'El Mouaïssia,
- est comprise entre 1,5 et 4,5 m : située dans la bordure Sud,
- oscille entre 4,5 et 9 m : elle occupe la majeure partie de la carte, on la retrouve au Nord, au Sud-Ouest ainsi qu'à l'Est.
- est comprise entre 9 et 15 m, se retrouve autour de la source espagnole et la source italienne.
- enfin, la zone comprise entre 15 et 23 m, est localisée dans le secteur des sources espagnole et italienne situées au contact de la Méditerranée.

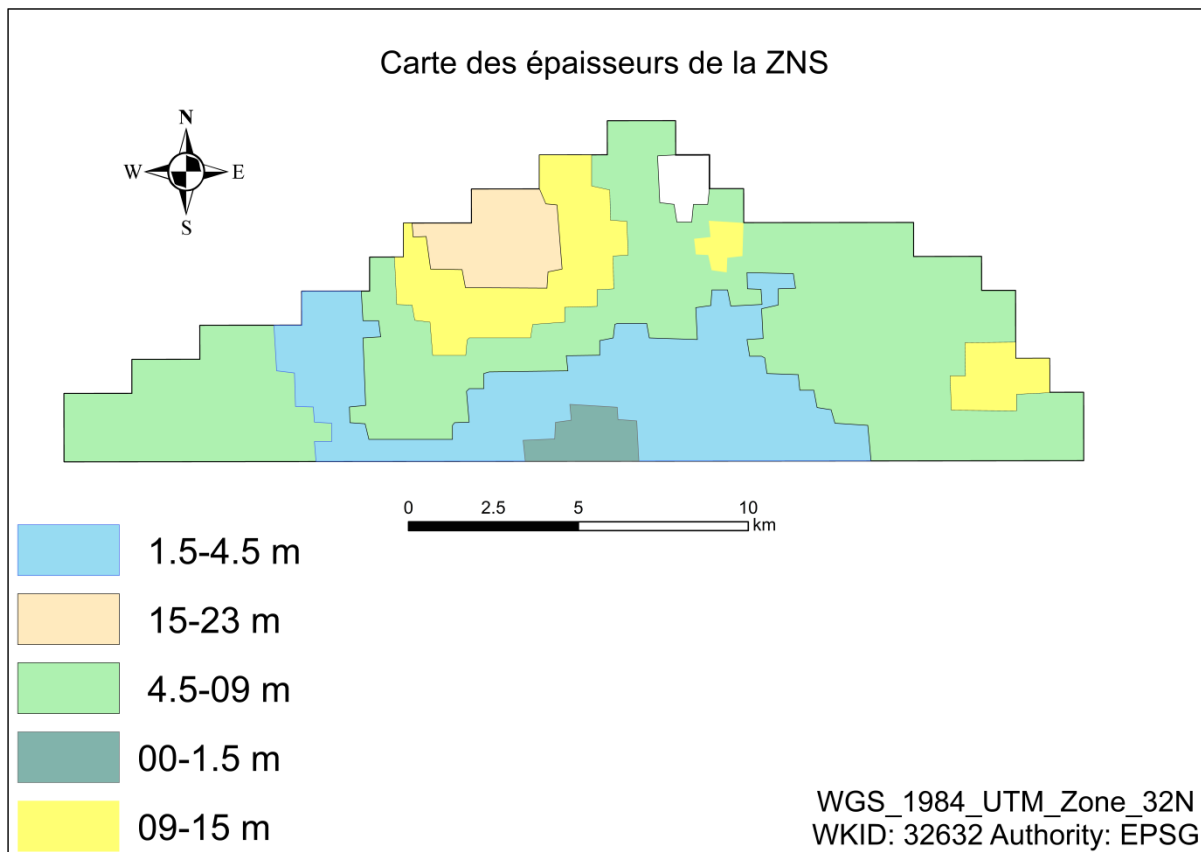


Figure IV. 8. Carte des épaisseurs de la ZNS.

L'interprétation hydrogéologique de cette carte permet de dégager les 5 classes du [tableau IV. 3](#) :

Tableau IV. 3. Classification hydrogéologique de l'épaisseur de la ZNS.

Domaine	Profondeur ZNS	Propriétés hydrogéologiques
1	0 à 1,5 m	Très bonne
2	1,5 et 4,5 m	Bonne
3	4,5 et 9 m	Moyenne
4	9 et 15 m	faible
5	15 et 23 m	Très faible

V.1.1.6. Perméabilité :

Les perméabilités de la [figure IV. 9](#) sont obtenues en faisant le rapport entre la transmissivité à l'épaisseur mouillée de la nappe libre des sables du massif dunaire de Bouteldja.

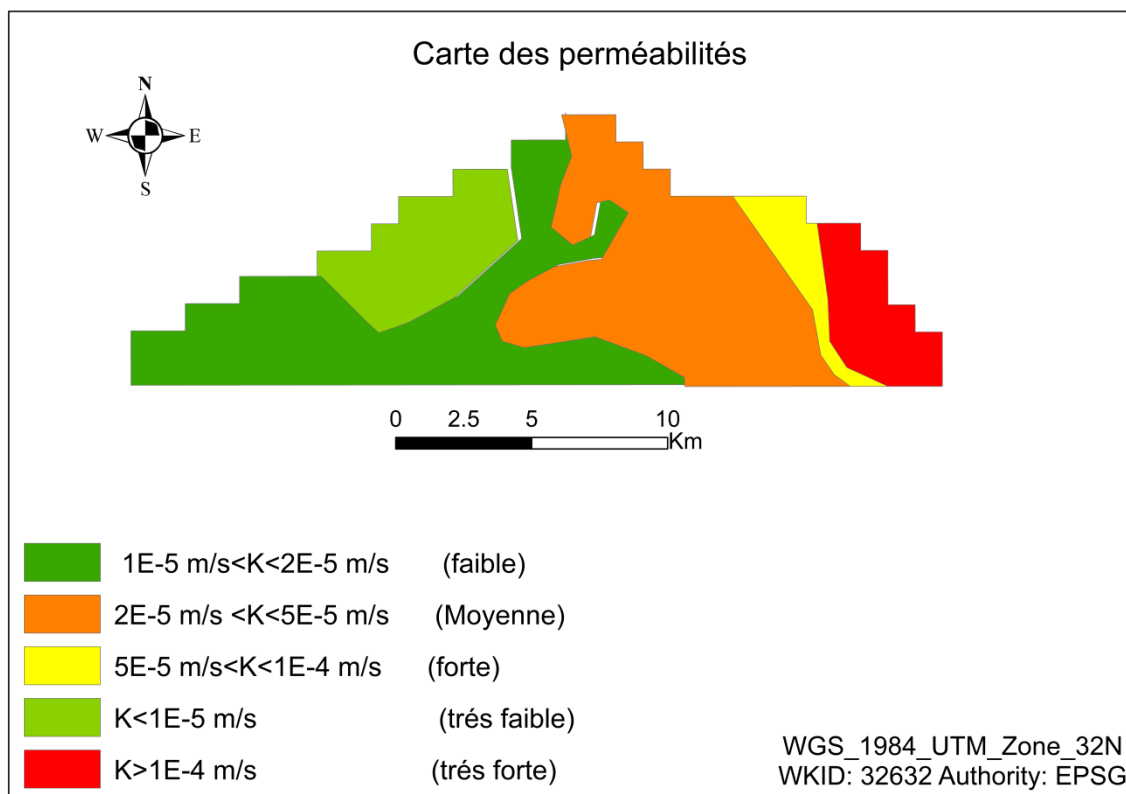


Figure IV. 9. Carte des perméabilités des sables dunaires de Bouteldja.

Le [tableau IV. 4](#) indique 5 familles de perméabilité.

Tableau IV. 4. Classification hydrogéologique des perméabilités.

Zones	Fourchette perméabilité	Propriété hydrogéologique
1	$K < 1.10^{-5} \text{ m/s}$	Très faible
2	$1.10^{-5} \text{ m/s} < K < 2.10^{-5} \text{ m/s}$	faible
3	$2.10^{-5} \text{ m/s} < K < 5.10^{-5} \text{ m/s}$	Moyenne
4	$5.10^{-5} \text{ m/s} < K < 1.10^{-4} \text{ m/s}$	Forte
5	$K > 1.10^{-4} \text{ m/s}$	Très forte

IV.3.1.2. Evaluation des cotes :

Pour évaluer les cotes des différents facteurs de façon homogène, l'échelle des cotes ci-dessous est conçue en tenant compte des fourchettes de variation des facteurs :

Classe	Très forte	Forte	Forte à moyenne	Moyenne	Moyenne à faible	Faible	Très faible
Cote	10	8	6.5	5	3.5	2	1

La catégorisation des facteurs donne les cotes de chaque groupe pour tous les facteurs séparément. Le [tableau IV. 5](#) récapitule les résultats obtenues pour tous les facteurs :

Tableau IV. 5. Catégorisation des facteurs influençant la recharge potentielle dans le massif dunaire de Bouteldja.

Paramètre	Description de la classe	Domaine de l'effet	Côte de l'effet
Couvert végétal et Occupation des sols	Excellente	Plan d'eau	10
	Très bonne	Sable et végétation claire	8
	Très bonne	Agriculture	8
	Bonne	Végétation	6.5
	Mauvaise	Bâtis	2
Lithologie	Très faible	Argiles et grès numidiens	1
	Faible	Eboulis	2
	Moyenne à bonne	Quaternaire indifférencié et marin	6.5
	Très bonne	Dunes côtières	10
Réseau hydrographique	Très fort	$Id > 2$	1
	Fort à moyen	$1.5 < Id < 2$	2
	Moyen	$1 < Id < 1.5$	3.5
	Moyen à faible	$Id < 1$	5
Pente	Très faible	$0 < \alpha < 5\%$	5
	Moyen	$5 < \alpha < 15\%$	3.5
	Fort à moyen	$15 < \alpha < 30\%$	2
	Très fort	$\alpha > 30\%$	1
Epaisseur ZNS	Très forte	0 à 1,5 m	10
	Forte	1,5 et 4,5 m	8
	Moyenne	4,5 et 9 m	5
	faible	9 et 15 m	2
	Très faible	15 et 23 m	1
Perméabilité	Très faible	$K < 1.10^{-5} \text{ m/s}$	1
	Faible	$1.10^{-5} \text{ m/s} < K < 2.10^{-5} \text{ m/s}$	2
	Moyenne	$2.10^{-5} \text{ m/s} < K < 5.10^{-5} \text{ m/s}$	5
	Forte	$5.10^{-5} \text{ m/s} < K < 1.10^{-4} \text{ m/s}$	8
	Très forte	$K > 1.10^{-4} \text{ m/s}$	10

IV.3.1.3. Détermination des poids :

La deuxième étape de cette recherche est l'affectation d'un coefficient à chaque paramètre en tenant compte de son importance par rapport aux autres. Il est bien clair que les facteurs analysés n'ont pas tous la même pertinence et les mêmes effets sur la recharge.

Il existe des paramètres qui influencent la recharge beaucoup plus que d'autres. Les recherches effectuées par [Shaban \(2001\)](#) et [Hsin-Fu et al. \(2009\)](#) mettent en évidence deux familles de relation : **majeures** et **mineures**. Si la liaison entre le 1^{er} et le 2^{ème} paramètre est de type **majeur**, on attribue au 1^{er} facteur un coefficient de 1, dans le cas contraire c'est-à-dire lorsque la relation est de type **mineur**, un coefficient de 0,5 lui est attribué. Par conséquent, le coefficient total affecté à chaque paramètre se décline de la façon suivante :

- a) **Occupation du sol** : une liaison majeure (1×1) et trois liaisons mineures (3×0,5), ce qui donne 2,5.
- b) **Lithologie** : trois relations majeures (3×1) et une relation mineur (1×0,5), ce qui donne 3,5.
- c) **Drainage** : une relation majeure (1×1) et deux relations mineures (2×0,5), ce qui donne 2.
- d) **Pente** : une relation majeure (1×1) et une relation mineure (1×0,5), ce qui donne 1,5.
- e) **Epaisseur ZNS** : deux relations majeurs (2×1), ce qui donne 2.
- f) **Perméabilité** : une relation majeure (1×1) et trois relations mineures (3×0,5), ce qui donne 2,5.

IV.3.1.4. Contribution de chaque facteur :

Pour identifier l'apport de chacun des paramètres dans la recharge potentielle, son poids et sa côte ont été pris en compte comme indiqué dans le [tableau IV. 6](#).

Ainsi, le classement des facteurs retenus en fonction de leur importance dans la recharge de la nappe de Bouteldja est le suivant : CVOS>Lit >K >EpZNS >RH >P. Le couple couvert végétal – occupation, la lithologie du sol et la perméabilité sont donc les paramètres qui conditionnent et impacte le plus la recharge dans le massif dunaire.

Le **Tableau IV. 6** récapitule les principaux résultats obtenus. Aussi, les paramètres qui présentent une grande aptitude d'infiltration se démarquent par de forts poids totaux.

Tableau IV. 6. Evaluation du taux de contribution des facteurs sur la recharge.

Facteur	Description des classes	côte	poids	Poids x Côte	Indice d'infiltration	Taux de contribution
Couvert végétal et Occupation des sols (CVOS)	Excellente	10	2,5	25	86.25	28%
	Très bonne	8		20		
	Très bonne	8		20		
	Bonne	6.5		16.25		
	Mauvaise	2		5		
Lithologie (Lit)	Très faible	1	3,5	3.5	68.25	22%
	Faible	2		7		
	Moyenne à bonne	6.5		22.75		
	Très bonne	10		35		
Réseau hydrographique (RH)	Très fort	1	2	2	23	7%
	Fort à moyen	2		4		
	Moyen	3.5		7		
	Moyen à faible	5		10		
Pente (P)	Très faible	5	1,5	7.5	17.25	6%
	Moyen	3.5		5.25		
	Fort à moyen	2		3		
	Très fort	1		1.5		
Epaisseur ZNS (EpZNS)	Très forte	10	2	20	52	17%
	Forte	8		16		
	Moyenne	5		10		
	faible	2		4		
Perméabilité (K)	Très faible	1	2,5	2.5	65	21%
	faible	2		5		
	Moyenne	5		12.5		
	Forte	8		20		
	Très forte	10		25		
				Total	311.75	

IV.3.1.5. Carte de synthèse du massif dunaire

L'élaboration de la carte de recharge potentielle de la [figure IV. 10](#), a été réalisée grâce à *l'agrégation* de toutes les cartes tracées et sauvegardées sous forme de couches dessin et données dans le SIG utilisé.

Le procédé adopté dans les SIG pour la superposition des cartes est l'approche opérationnelle du critère unique de synthèse de Roy ([Garouni et Merzouk, 2006](#)). Dans ce procédé, les couches sont additionnées selon leur contribution. *La probabilité que la recharge dans un secteur donné soit forte sera donc liée aux valeurs des classes des facteurs qui se croisent suivant l'équation donnée ci-dessous*. En fait, l'indice de recharge (I_r) calculé dans le SIG est donné par l'expression suivante :

$$I_r = 0,28.[CVOS] + 0,22.[Lit] + 0,21.[K] + 0,17.[EpZNS].0,07.[RH] + 0,06.[P]$$

Ainsi, au niveau du massif dunaire de Bouteldja, les zones de recharge potentielles sont classées selon leur importance. L'indice de recharge varie de **26,28 à 65,21**.

Les zones potentielles de recharge *élevée à très élevée* (valeurs tendant vers 65,21) sont visibles surtout au nord et au centre du massif dunaire avec cependant quelques secteurs à l'est du massif ([Figure IV. 10](#)). Elles représentent également les secteurs où le transfert des polluants de la surface vers la nappe est rapide. Par conséquent, ce sont des zones à protéger dans le cadre de la gestion durable des ressources en eau dans le massif dunaire de Bouteldja.

Les zones à *faible recharge* occupent tout le secteur Est du massif. La recharge dans ces secteurs devrait être moyenne.

Les zones potentielles de recharge *très faible* se situent essentiellement au S-W du massif dunaire et apparaissent d'une manière sporadique au centre du massif en allant du S au N.

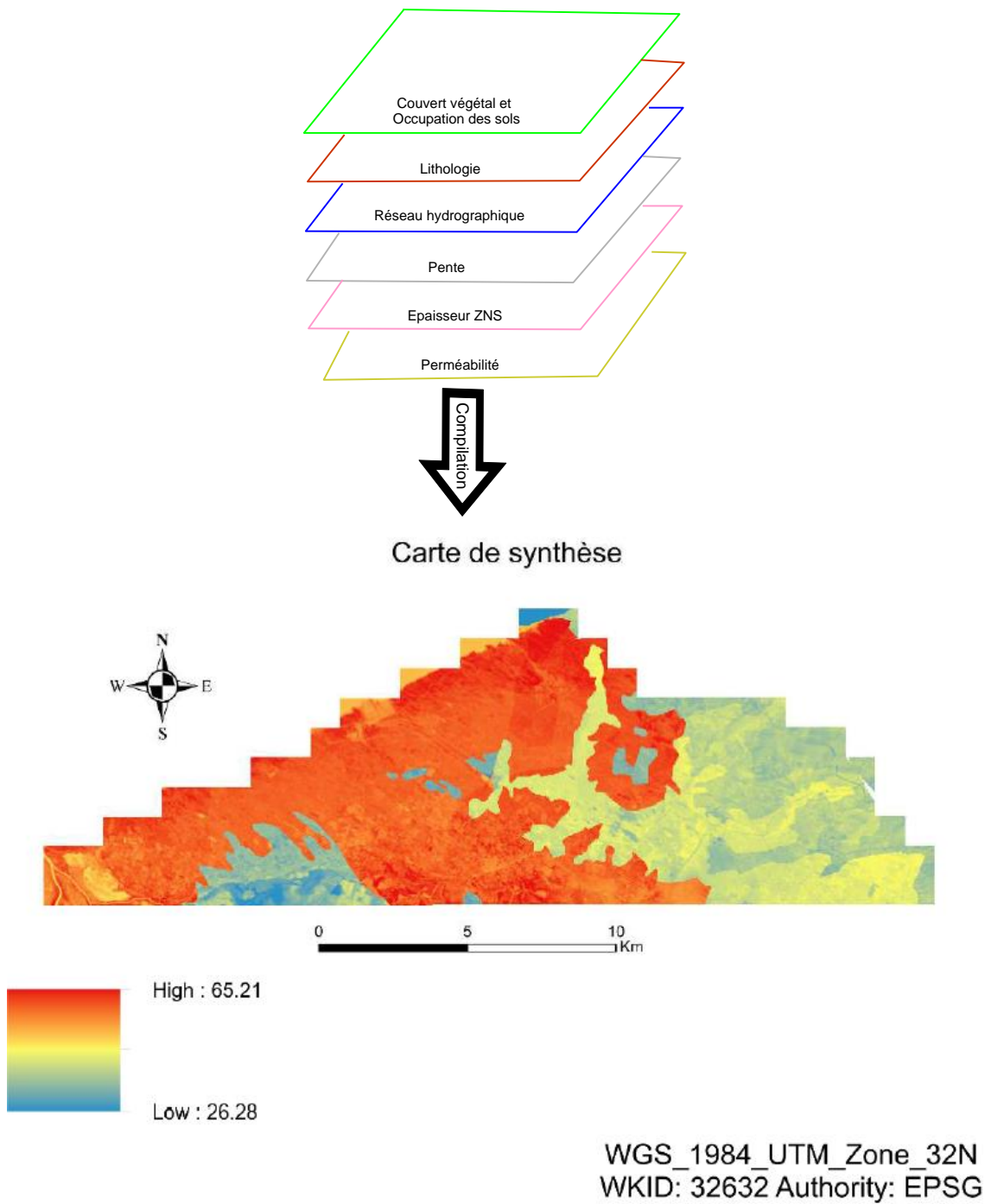
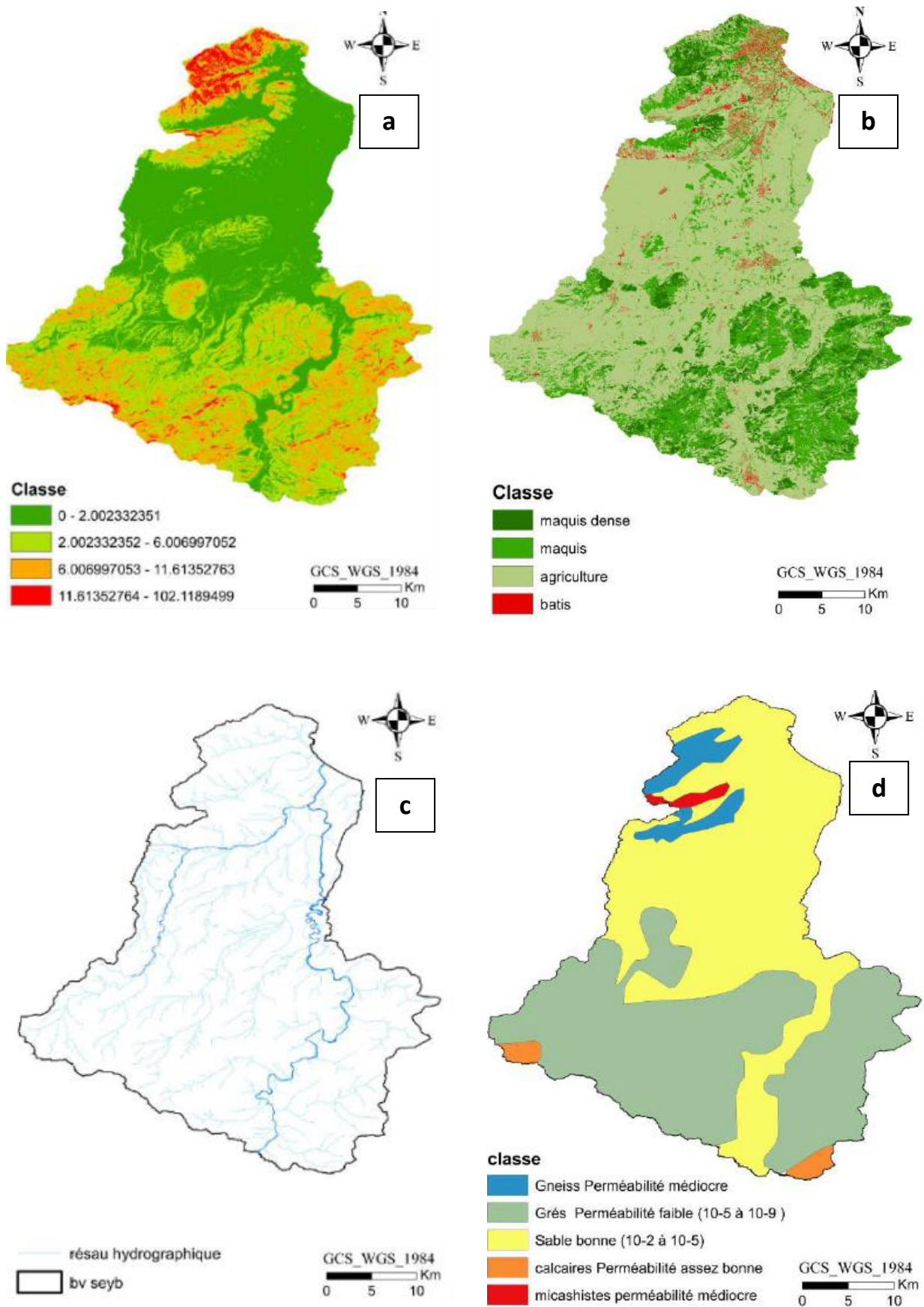


Figure IV. 10. Carte synthèse de la recharge potentielle du massif dunaire de Bouteldja.

IV.3.2. Cas du bassin de la basse Seybouse

La démarche adoptée est la même que pour le massif dunaire. Par conséquent, et pour éviter toutes répétition, nous conterons de ne présenter que les principaux résultats.

IV.3.2.1. Cartes thématiques (Figure IV. 11) :



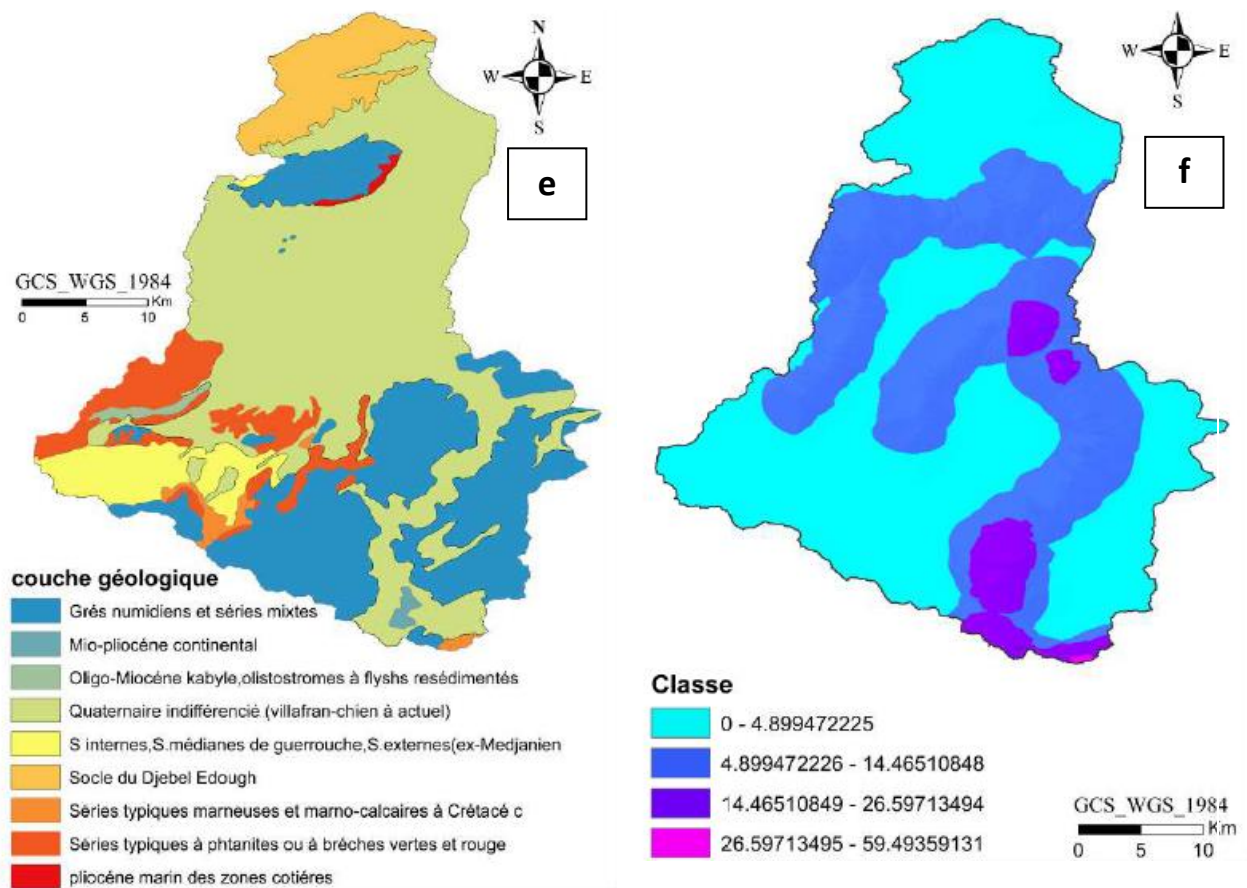


Figure IV. 11. Cartes thématiques dans le bassin de la Seybouse. a : Pentes ; b : Occupation du sol ; c : Réseau hydrographique ; d : Perméabilité ; e : Géologie ; f : Drainage.

IV.3.2.2. Carte de synthèse de la basse Seybouse :

La superposition de l'ensemble des cartes paramétriques est possible grâce au SIG. On obtient ainsi la carte de la [figure IV. 12](#) qui indique un indice de recharge varie de 0,7 à 6.

Les zones à recharge *élevée* à *très élevée* se manifestent principalement autour de l'oued Seybouse, de ses ramifications et dans les zones de basses altitudes de la vallée de la Seybouse.

Les zones à *faible recharge* occupent le reste du territoire du bassin, les zones montagneuses comprises. Enfin, les zones à *très faible* recharge sont situées surtout au Sud du bassin et au niveau des reliefs.

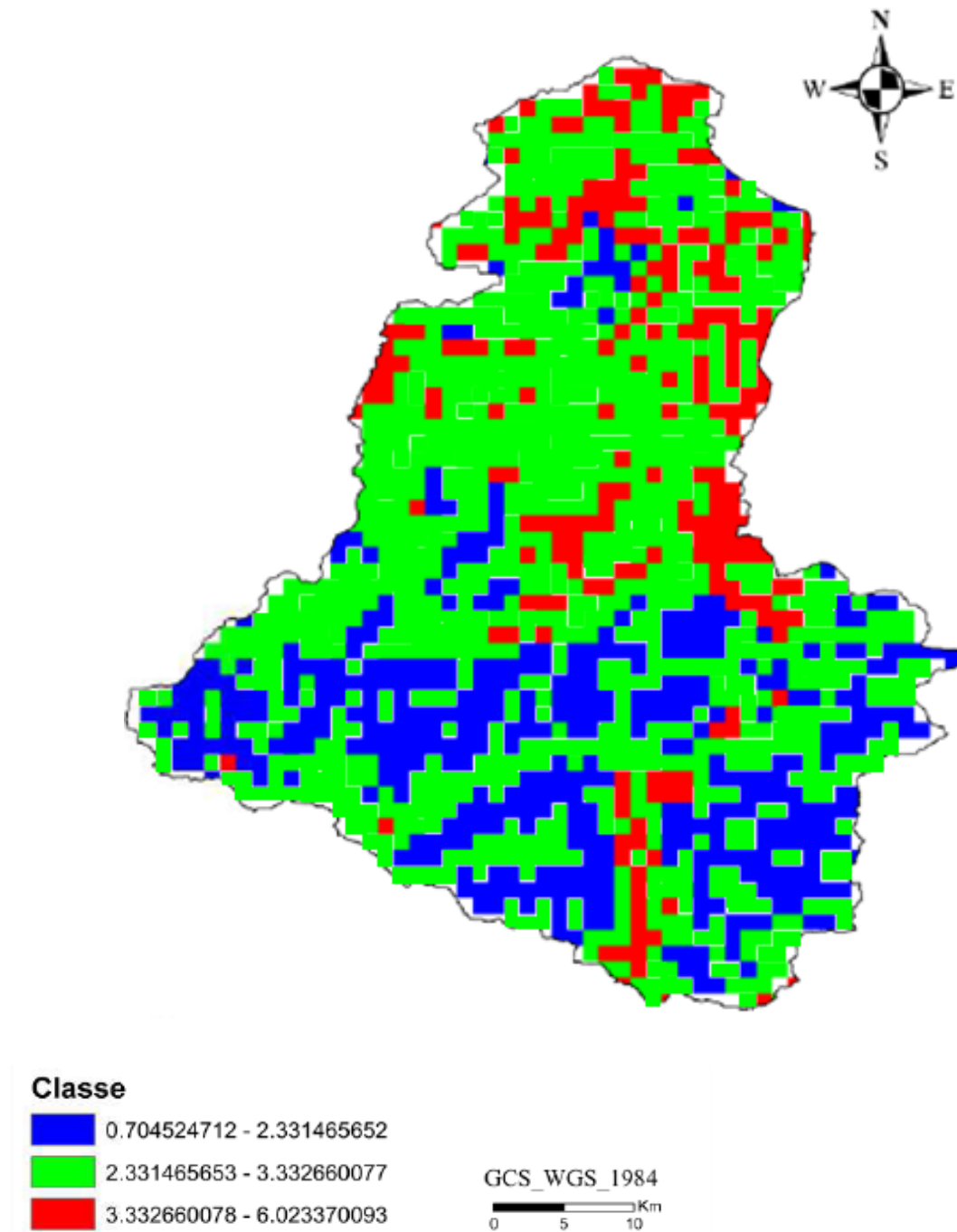


Figure IV. 12. Carte synthèse de la recharge potentielle dans la basse Seybouse.

IV.4. Conclusion

Cette recherche a permis d'élaborer plusieurs documents cartographiques essentiels pour la caractérisation des secteurs de recharge des nappes d'eau. La diversité des données traitées exige une intégration à l'aide d'un SIG. Ce dernier s'est avéré comme un puissant outil pour l'estimation des potentialités de

recharge des aquifères dunaires de Bouteldja et alluvionnaires du bassin de la basse Seybouse.

Cette démarche présente l'avantage d'être moins onéreuse pour des études couvrant de vastes surfaces pouvant aller de plusieurs centaines de km² à quelques milliers de km², comparativement aux approches expérimentales beaucoup plus chères pour des superficies réduites (ex : méthodes isotopiques, hydrochimiques, hydrauliques, etc.).

Les cartes de distribution géographique de l'infiltration peuvent être considérées comme d'excellents supports d'aide à la décision, particulièrement pour la gestion et la planification de la ressource en eau et l'analyse de la vulnérabilité des eaux souterraines. Les zones de recharge préférentielle nécessitent, en effet, toute l'attention des gestionnaires en mettant en place les mesures adéquates pour la protection de la ressource.

Il faut rappeler, à cet égard, qu'à cause des problèmes de pollution des eaux de l'aquifère d'Annaba (pollution marine) et de problèmes techniques liés aux modes de captages des eaux du massif dunaire de Bouteldja, d'énormes quantités d'eau ne sont pas actuellement utilisées.

Il est évident que ces résultats peuvent être extrapolés à d'autres régions une fois améliorés en injectant de nouvelles informations acquises sur le terrain et en cherchant à valider les cartes de la recharge obtenues. L'utilisation de méthodes expérimentales telles que l'isotopie ou l'hydrochimie ou encore la modélisation numérique permettra de valider les résultats obtenus au cours de cette recherche.

Références

- Allison, G. B. (1988). A review of some of the physical, chemical and isotopic techniques available for estimating groundwater recharge, in Estimation of natural groundwater recharge, edited by I. Simmers, pp. 49-72, D. Reidel Publishing, Dordrecht, Netherlands.*
- American Society of Civil Engineers ASCE (1996). Hydrology Handbook, Second edition. ASCE manuals and reports on engineering practice 28.*

- Cissé B. et Hani S. (2020).** Simulation numérique des écoulements souterrains et cartographie des zones potentielles de recharge de l'aquifère dunaire de Bouteldja. Mémoire de Master Univ. Badji Mokhtar Annaba, 58 pages.
- Cook P. G. et N. I. Robinson (2002).** Estimating groundwater recharge in fractured rock from ^{10}H and ^{36}Cl , Clare Valley, South Australia. *Water Resources Research*, 38, doi:10.1029/2001WR000772
- Cook, P. G., S. Lamontague, D. Berhane, et J. F. Clark (2006).** Quantifying groundwater discharge to Cockburn River, Southeastern Australia, using dissolved gas tracers ^{222}Rn and $^{12}\text{SF}_6$. *Water Resources Research*, 42, doi:10.1029/2006WR004921
- Garouni E.A. et A. Merzouk (2006).** Délimitation des zones de protection autour de la retenue du barrage Hachef (Maroc) par télédétection et SIG. *Rev. Sci. Eau*, 19, 1-10.
- Ghrieb A. 2021.** La gestion intégrée des ressources en eaux dans la région d'Annaba. Doctorat LMD Université de Tébessa. 143 pages.
- Gleeson T. (2009).** Groundwater recharge, flow and discharge in large crystalline watershed. PhD Thesis, Civil Engineering Department, Queen's University, Kingston, Ontario, Canada 23. pp. 9-45
- Hani A., Djabri L., Mania J. et Mudry J. (2002).** Impacts de la surexploitation de l'eau souterraine sur l'aquifère dunaire de Bouteldja, Algérie. *Revue VECTEUR environnement*, volume 35, numéro 6, novembre 2002. 66-71.
- Hani A., Mania J., Djabri L. et Mudry J. (2003).** Identification des apports latéraux et de drainance partir des réponses chimiques et isotopiques : cas du système aquifère Annaba-Bouteldja. *Africa Géosciences Review* vol. 10, no 3, pp. 267-280.
- Hani A., Lallahem S., Mania J., Djabri L. (2006).** On the use of finite-difference and Neural network models to evaluate the impact of underground water overexploitation. *Hydrol. Process.* 20, 4381-4390. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/hyp.6173/>
- Healy R., and P. Cook (2002).** Using groundwater levels to estimate recharge, *Hydrogeology Journal*, 10, 91-109.
- Kherici N., (1985).** Aquifère sableux de bords de mer. Hydrodynamique et hydrochimie. Exemple de la nappe de Bouteldja (Nord Est algérien). Thèse de Docteur 3^{ème} cycle USTL, Montpellier. 202p.
- Kouadio E.K. & al. (2008).** Hydrogeology Prospecting in Crystalline and Metamorphic Area by Spatial Analysis of Productivity Potential. *European Journal of Scientific Research*, ISSN 1450-216X Vol.22 No.3 (2008), pp.373-390.
- Krishnamurthy J, Venkatesa Kumar N, Jayaraman V, Manivel M (1996).** An approach to demarcate groundwater potential zones through remote sensing and a geographical information system. *Int J Remote Sensing* 7:1867-1884
- Krishnamurthy J, Arul Mani, Jayaraman V, and M Manive (2000).** Groundwater resources development in hard rock terrain - an approach using remote sensing and GIS techniques. 38. *JAG Volume 2 - Issue 3/4*
- Lerner DN, Issar AS, Simmers I (1990).** Groundwater recharge. A guide to understanding and estimating natural recharge. *IAH Int Contrib Hydrogeol* 8. Heinz Heise, Hannover, 345 pp
- Lerner D. N. (1997).** Groundwater recharge, in *Geochemical processes, weathering and groundwater recharge in catchments*, edited by O. M. Saether and P. de Caritat, pp. 109-150, Balkema, Rotterdam.
- Musy A. ; Soutter, M. (1991).** Physique du sol. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, Suisse, 335 p.
- Ramdani A., (1996).** Hydrogéologie et modélisation de la nappe dunaire de Bouteldja. Mém. Magistère de l'Univ. de Annaba (Algérie), 138p.
- Sanford W. (2002).** Recharge and groundwater models: an overview, *Hydrogeology Journal*. 64. 10 (1), pp. 110-120

- Scanlon, B., R. Healy, and P. Cook (2002).** *Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge, Hydrogeology Journal, 10, 18-39.*
- Shaban A, Khawlie M, Abdallah C (2006).** *Use of remote sensing and GIS to determine recharge potential zone: the case of occidental Lebanon. Hydrogeology Journal 14: 433-443*
- Sener E, Davraz A, Ozcelik M (2005).** *An integration of GIS and remote sensing in groundwater investigations: a case study in Burdur, Turkey. Hydrogeology Journal 13:826*
- Sharma M. L., G. A. Gander, and C. G. Hunt (1980).** *Spatial variability of infiltration in a watershed, Journal of Hydrology, 45, 101-122.*
- Simmers I. (1997).** *Recharge of phreatic aquifers in (semi-) arid areas. IAH Int Contrib Hydrogeol 19, AA Balkema, Rotterdam, 277 p*
- Simmers I. et Jacobus J. de Vries (2002).** *Groundwater recharge: an overview of processes and challenges. Hydrogeol J, 10, pp. 5–17.*
- Solomon D. K., Schiff S. L. Poreda J. and Clarke W. B. (1993).** *A validation of the $^3\text{H}/^3\text{He}$ method for determining groundwater recharge, Water Resources Research, 29, 2951-78. 2962.*
- Strojexport (1975).** *Prospection géophysique de la plaine de Annaba. Réinterprétation. Rapport A.N.R.H., inédit, Annaba, Algérie, 30 p*
- Thakur G. S. et Raghuwanshi R.S. (2008).** *Perspect and Assessment of Groundwater Resources using Remote Sensing Techniques in and around Choral River Basin, Indore and Khargone Districts, M.P. J. Indian Soc. Remote Sens. 36:217-225*
- Toubal A.C., (1998).** *Approche géophysique des problèmes d'hydrodynamique et d'invasion marine en milieu souterrain. Exemple des plaines d'Annaba, de la Mitidja et de la baie d'Alger. Thèse doctorat d'état, USTHB, Alger, 226p.*
- Vila J.M., (1980).** *La chaîne alpine d'Algérie orientale et des confins algéro – tunisiens. Thèse Docteur es sciences. Université de Pierre et Marie- Curie. Paris VI, France, pp.58-68.*

Conclusions générales

Conclusions générales

Le bassin de la basse Seybouse, couvrant une superficie de 1066 km², est une région à vocation agricole et industrielle. Actuellement, le bassin est alimenté en eau, surtout sous forme de transferts, par les wilayas limitrophes notamment d'El Tarf à travers les barrages de Cheffia et de Mexa et par moment par les forages des dunes de Bouteldja. La région renferme pourtant beaucoup de potentialités hydriques représentées par l'oued Seybouse, le complexe aquifère de la plaine d'Annaba et de Bouchegouf. Elle est aussi considérée comme une région relativement bien arrosée d'Algérie.

Malgré ses potentialités, la région a connu ces dernières années de nombreux épisodes de sécheresse. L'accroissement démographique et le développement des activités économiques ont eu, en effet, pour conséquences une augmentation des besoins en eau et une dégradation de sa qualité.

Les infrastructures construites durant ces dernières décennies (construction de barrages, STEP, dessalement de l'eau de mer, ...) peuvent atténuer les besoins en eau des usagers mais elles sont insuffisantes sans la mise en place d'une véritable GIRE.

Cette recherche a permis de faire le point sur l'état quantitatif et qualitatif de la ressource, de quantifier les besoins des différents usagers et de comparer les deux en tenant compte des stratégies d'exploitation futures.

Les simulations des écoulements souterrains et de transfert de polluants montrent un déséquilibre hydrodynamique assez marqué due à l'intensification des prélèvements dans la nappe des graviers. Ce déséquilibre est matérialisé sur le terrain par une arrivée d'eau marine au nord de la plaine d'Annaba. Les prévisions numériques pour 2045, en considérant une augmentation des prélèvements de 20%, montrent une diminution assez significative des niveaux d'eau, jusqu'à -6 m par rapport au niveau moyen de la mer, et une augmentation des concentrations de Cl⁻ jusqu'à environ 10 km à l'intérieur des terres. Ces résultats montrent la nécessité de prendre des mesures adéquates pour protéger les ressources en eaux souterraines dans la région.

Compte tenu de sa situation géographique la plaine d'Annaba connaît actuellement une pression anthropique progressive qui devient alarmante. En effet, l'exploitation anarchique de plusieurs batteries de forages a provoqué une détérioration de la qualité des eaux et a influencé d'une manière négative le bilan des flux des aquifères.

Le bassin de la basse Seybouse est le siège d'une pollution urbaine, industrielle et agricole. Cette pollution provient des différentes agglomérations, usines et zones agricoles situées sur les deux rives de l'oued. Cette pression sur l'eau toujours plus forte est aggravée par l'impact indéniable du réchauffement climatique sur le cycle de l'eau.

Des solutions ont été mises en place avec la construction de la STEP d'Allélick pour traiter les eaux usées et de la station de Chaïba pour produire de l'eau potable. Cependant, ces mesures sont, pour le moment, insuffisantes, et doivent être renforcées.

La réhabilitation de la Seybouse peut constituer un bel exemple de gestion intégrée, puisqu'elle inclurait des volets de protection des ressources superficielles et souterraines, de rationalisation des usages domestiques, agricoles et industriels, mais aussi de lutte contre la pollution et de protection de l'environnement.

Le modèle WEAP a été utilisé pour faire le point sur le bilan hydrique actuel et évaluer les stratégies de gestion des ressources en eau dans le sous bassin de la basse Seybouse selon différents scénarios jusqu'en 2050. Ces derniers indiquent que, dans tout les cas de figure, la demande totale ne peut être satisfaite totalement compte tenu des ressources disponibles. Les impacts du réchauffement climatique et de la pression sur la ressource sont les principaux facteurs qui font augmenter les besoins en eau.

La gestion de la demande et la mise en marche de l'usine de dessalement de Draouche sont les mesures les plus pertinentes pour atténuer les besoins en eau des différents utilisateurs.

Malheureusement, l'apport de l'usine de dessalement de Draouche ne peut pas résoudre tous les problèmes de l'eau dans le bassin maritime de la Seybouse.

La réparation des fuites d'eau, le recyclage des eaux, l'utilisation de techniques d'irrigation permettant d'économiser l'eau apparaissent comme un complément primordial pour lutter contre les stress hydriques dans le bassin.

La cartographie réalisée en fin de ce manuscrit a permis d'obtenir divers documents thématiques qui sont indispensables à l'identification des zones de recharge à l'échelle d'un bassin versant. L'objectif de cette mission est de contribuer à la mise en œuvre des techniques de recharge artificielle afin de renforcer la résilience au changement climatique et à d'autres stress. En effet, la réhabilitation et la protection des eaux souterraines de la nappe des graviers et galets d'Annaba et dunaire de Bouteldja est vitale pour lutter contre les impacts avérés du réchauffement climatique.

Les principaux facteurs influençant la recharge ont permis de cartographier les secteurs de recharge des aquifères dunaire de Bouteldja et alluvial de la Seybouse en utilisant les SIG. Ces outils permettent aussi d'identifier les zones d'un aquifère qui sont vulnérables à la pollution, de déterminer son potentiel d'exploitation et d'évaluer la pérennité de la ressource.

Les travaux effectués montrent que l'équilibre hydrodynamique de ces aquifères, déterminé grâce au modèle numérique, est très fragile et dépend fortement de la recharge pluviale. Il est par conséquent naturel d'envisager l'éventualité d'une recharge artificielle en période de fortes pluies. C'est une solution qui est déjà pratiquée dans de nombreux pays afin de sécuriser la ressource. Cette recharge peut se faire dans les secteurs favorables qui ont été déterminés selon l'analyse multicritère pour la détermination des zones potentielles de recharge.

Au terme de ce travail, il apparaît clairement que la région est confrontée à des défis qu'il faut surmonter pour répondre aux besoins en eau actuels et surtout futurs en raison de l'augmentation de la population et de ses activités économiques.

Cependant, les résultats obtenus à l'aide du WEAP, montrent qu'il est toujours possible de limiter les impacts du manque d'eau en apportant des solutions concrètes telles que la déminéralisation de l'eau marine et une gestion rigoureuse

de la demande (réduction des fuites, recyclage des eaux industrielles, l'adoption de technologies d'irrigation économe en *eau*, ...).

Les résultats montrent, entre autres, que la seule politique de *gestion de la demande* ne suffit plus, il faut aussi mettre en place des stratégies pour augmenter l'*offre* à travers :

- la multiplication des projets de construction de petites retenues d'eau telles que le barrage dit « *barrage de retenue des eaux de pluie* » de Bouguentas, actuellement en finalisation. Ces ouvrages permettront d'éviter les inondations récurrentes qu'a connues la ville d'Annaba et sa région et d'atténuer son stress hydrique, notamment en se procurant des volumes d'eau importants pour l'irrigation agricole et les besoins importants de l'industrie locale,
- la déminéralisation des eaux chargées des forages captant notamment la nappe des graviers en installant par exemple des stations de type membranaire à l'osmose inverse,
- l'utilisation raisonnée des eaux du massif dunaire de Bouteldja, qui étaient pourtant considérées comme le « château d'eau d'Annaba » en adoptant des schémas appropriés de captage et d'exploitation des forages.

En somme, une attention particulière doit être portée aux eaux souterraines car le réchauffement climatique bien qu'il impacte toutes les formes de ressources en eau, la réaction de l'eau souterraine est plus lente et plus atténuée que celle des eaux de surface, du fait de l'inertie des aquifères. Ce qui procure à cette forme de ressource une plus grande durabilité du point de vue de la distribution dans le temps.

- le respect des délais pour la mise en exploitation de plusieurs projets tels que le barrage Boukhroufa, situé dans la région de Bouteldja et qui peut contribuer à l'augmentation de l'offre.
- le renforcement des procédés d'épuration des eaux usées appliquées au niveau de la station de l'Allélick avec comme objectif l'utilisation de cette eau pour l'irrigation. Raccorder la station à toutes les grandes agglomérations de la région. Nous pensons que ces mesures, et bien d'autres, contribueront à sécuriser l'approvisionnement en eau et augmenter la résilience au changement climatique.