

الجزائرية الديمقراطية الشعبية الجمهورية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان
Université Abou bakr Belkaïd – Tlemcen –
Faculté de TECHNOLOGIE



THESE

Présentée pour l'obtention du **grade** de **DOCTEUR EN SCIENCES**

En : Hydraulique

Par : AZIEZ Ouahiba épouse LAKHDAR HAMINA

Thème

**Efficacité économique et environnementale des instruments de gestion de l'eau,
pour des eaux souterraines utilisées en irrigation dans la Mitidja ouest**

Soutenue publiquement, le 28 /03/2021, devant le jury composé de :

Mr. Bouchelkia Hamid	Professeur	Univ. Tlemcen	Président
Mr REMINI Boualem	Professeur	Univ. Blida	Directeur de Thèse
Mr HABI Mohammed	Professeur	Univ. Tlemcen	Co- Directeur de Thèse
Mr ELOUISSI Abdelkader	MCA	Univ. Mascara	Examineur 1
Mr MORSLI Boutkhil	MR	INRF/ Tlemcen	Examineur 2
Mr HAMOUDI Saaed A.	Professeur	Univ. Chlef	Examineur 3

Remerciements

Je remercie Dieu le tout puissant pour ses dons que j'en prends connaissance et pour ce que je ne soupçonne même pas l'existence.

Remercier toutes les personnes qui m'ont aidé à mener cette thèse à son terme, me prendra autant de temps que j'ai prit à achever ce travail.

Je voudrais tout d'abord remercier grandement mon directeur de thèse, Mr Rimini Boualem, Professeur à l'université de Saâd Dahleb de Blida. Je suis ravi d'avoir travaillé en sa compagnie car en plus de son sérieux et sa rigueur, il à été présent, gentil et patient en dépit de ses occupations et des difficultés rencontrée tout le long de la préparation de cette thèse.

Mes remerciements à mon Co-Encadreur, Mr Habi Mohammed, Professeur à l'université Aboubakr Belkaïd de Tlemcen. Heureuse de l'avoir eu comme un deuxième encadreur. Je ne le remerciai jamais assez pour son aide, son soutien et son calme contagieux.

Je remercie également le président et les membres de jurys qui m'ont fait l'honneur d'être rapporteurs de ma thèse et d'avoir accepté de participer à son l'analyse scientifique ainsi que le temps qu'ils ont consacré à ma recherche.

Je tiens à remercier tous les corps constituant l'école nationale supérieure de l'hydraulique (ENSH) de Blida, quel qu'il soit : enseignants, administration, bibliothèque.

Merci à tous les acteurs de l'eau, de l'Agence Nationale des Ressources Hydriques (Antenne de Blida et la direction d'Alger), Direction des Ressources en Eau de la Wilaya de Blida, qui m'ont aidé à acquérir des données et cela avec sympathie et gentillesse.

Un grand merci à mes amis (ies), à toute ma famille et à tous ceux qui je n'ai pas cité leurs noms et qu'ils savent ce que je leur dois.

J'adresse mes remerciements à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail de recherche. Ils sont bien nombreux et je sais que je n'aurai jamais tous les citer.

Un grand merci à tous.

ملخص

تعتبر أي دولة متطورة إذا كانت تستطيع توفير الراحة المائية لمختلف المستخدمين في مجتمعها. تعتمد هذه الراحة بشكل عام على إدارة المياه في هذه الحالات.

في الجزائر ، يرتبط مورد المياه ارتباطاً وثيقاً بالمناخ. تعد منطقة شمال البحر المتوسط منطقة شبه قاحلة ذات معدل هطول منخفض ونسبة حرارة مرتفعة إلى حد ما. يتزايد الطلب على المياه من قبل مختلف المستخدمين ، مما يعني أيضاً الإفراط في استغلال موارد المياه بالإضافة إلى كميات كبيرة من التصريف السيئ. هذه هي الأسباب الرئيسية لتدهور مصدر المياه الجوفية، إما عن طريق التسلل الكبير للعوامل الملوثة أو عن طريق الاقتحام البحري للمياه المالحة كما هو الحال في المياه الساحلية "المتيجة" Mitidja. حماية الاحتياطي لهذا المورد يتطلب العمل الذي يبدأ من بداية السلسلة. تشير المراقبة المستمرة لهذه المياه إلى رصد جودتها الفيزيائية والكيميائية وبالتالي الكشف عن أي تلوث قد يأتي من سطح التربة أو بواسطة تسرب المياه المالحة من البحر. تقع سهل "المتيجة" في الشمال الأوسط للجزائر فهو سهل شاسع مساحته 1450 كيلومتر مربع تهيئته زراعية وصناعية. المناخ متوسطي ، معتدل في الشتاء وحار وجاف في الصيف. يبلغ متوسط هطول الأمطار 607 ملم / سنة و تبخره 1250 ملم / سنة. أدت فترة الجفاف وقلة هطول الأمطار والذي تم اكتشافها منذ سبعينيات القرن الماضي إلى انخفاض معدل ملء طبقة المياه الجوفية. يظهر هذا الانخفاض بوضوح في الأشكال البيزوميترية ، حيث سجلنا انخفاضاً بمقدار 30 متراً في خليج الجزائر العاصمة ، وهذا حتى فترة عام 2010. وكان الاستقرار خلال هذا العام يرجع إلى انخفاض أكبر ضخ من بئر "برقي" ، وهو القرار الذي أبطأ ظاهرة الاختراق البحري للمياه الجوفية. كما لوحظ هذا النوع من الانخفاض المخروطي البيزوميترية على مستوى مستجمعات المياه في "مازافران او او" الأول والثاني. في النهاية ، لوحظ انخفاض عام في المستوى البيزوميترية لطبقة المياه الجوفية بأكملها من تفسير القراءات البيزوميترية وهذا في وقت مبكر من عام 1990.

الجودة الفويو- كيميائية لمياه طبقة الجوفية والتي تعتمد بشدة على الانتروبيا ، يظهر ثلاثة مجالات للتلوث. الجزء الأقوى يقع في الجزء الشرقي من للمتيجة Mitidja وحيث تكون النسبة المئوية للسكان هي الأعلى. أضف إلى ذلك وجود أقدم منطقة صناعية لمعالجة الصناعات الثقيلة. ومع ذلك ، فإن تملح المياه يأتي من التسلل البحري حيث تنتشر حدود المياه العذبة - الماء الملحية من "برج البحري" إلى "وادي الحراش". الجزء الغربي من السهل هو زراعي ويمكن أن يفسر التلوث في هذا المجال من خلال مدخلات الأسمدة والمبيدات الحشرية و الري التي يتم إجراؤها بواسطة مياه محطة معالجة مياه الصرف الصحي. تمتد المنطقة من "سيدي رشيد" ، و"أحمر العين" إلى "حجوط". تعرف المنطقة الثالثة بنوعية مياه جيدة و نجدها في الوسط الغربي. لهذه الدراسة تم استخدام نهج مؤشر جودة المياه WQI والنتائج مقارنة مع غيرها من الأعمال.

من أجل الإدارة الجيدة للمياه الجوفية، فإن إعادة شحن هذه المياه أمر حيوي سواء كان ذلك عن طريق إطلاق السدود أو عن طريق المياه المعالجة النقية مع المعالجة المتقدمة و عن طريق أحواض التسلل. أضف إلى ذلك ترشيحاً حكيماً في مشاركة هذه المياه. وفي النهاية تقديم إعلانات مستمرة عن أهمية حماية المصدر.

الكلمات المفتاحية:

التلوث والاقتحام البحري ، إدارة الموارد المائية ، سهل "المتيجة" ، تغير المناخ ، الجزائر.

Résumé

Un état est considéré comme développer s'il peut assurer un confort hydrique aux différents usagers de sa société. Ce confort est Généralement basé plus sur la gestion de l'eau de ces états.

En Algérie, la ressource d'eau est liée étroitement au climat. La zone du Nord de la Méditerranée est considérée comme zone semi – aride, à faible précipitation et à ETP assez élevée. La demande en eau par les différents usagers est de plus en plus grandissante impliquant, elle aussi, une surexploitation des ressources en eau ainsi que de grandes quantités de rejets mal contrôlés. Ces sont la cause principale de la dégradation de la source d'eau souterraine, que ce soit par une infiltration importante des agents polluants ou par une intrusion marine des eaux salées comme c'est le cas de la nappe côtière de la Mitidja. La sauvegarde de cette ressource nécessite un travail qui commence en amont de la chaîne. Un contrôle continu de la source à partir de ces points d'eau pour le suivi de sa qualité physicochimique et ainsi donc la détection de toute pollution pouvant provenir de la surface du sol ou du sous sol par intrusion d'eau salée. La nappe de la Mitidja est située sous une vaste plaine de 1450 km² de surface au Nord centre de l'Algérie à vocation agricole et industrielle. Le climat est de type méditerranéen, doux en hiver et chaud et sec en été. La pluviométrie moyenne est de l'ordre de 607 mm/an et une ETP de 1250 mm/an. La période de sécheresse et la rupture dans les pluviométries détectées à partir des années 70 ont fait chuter le taux de remplissage de la nappe. Cette chute apparaît clairement sur les figures piézométriques, où nous avons enregistré une baisse de 30 m au niveau de la baie d'Alger. et cela jusqu'à la période des années 2010. La stabilité durant cette année a été due plus la diminution du pompage du champ de captage de Beraki, une décision qui a fait ralentir le phénomène de l'intrusion marine. Ce type de cône de dépression piézométrique a été remarqué aussi au niveau du champ de captage de Mazafran I et II. En finalité, une diminution globale est constatée dans le niveau piézométrique de toute la nappe à partir de l'interprétation des relevés piézométriques et cela dès l'année 1990. La qualité chimique des eaux de la nappe et qui dépend fortement de l'entropie, fait apparaître trois zones de pollution. La plus forte est localisée dans la partie Est de la Mitidja et où le pourcentage de population est le plus élevé. Ajouter à cela la présence de la plus ancienne zone industrielle à transformation de l'industrie lourde. Néanmoins la salinisation des eaux provient de l'intrusion marine où le contact eau douce – eau salée s'étale de Bordj El Bahri jusqu'à Oued El Harrach. La partie Ouest de la plaine est à vocation agricole et qui peut expliquer la pollution dans cette zone par les apports des engrais, des pesticides et où l'irrigation est faite par la station de traitement des eaux usées. La zone s'étale de Sidi Rached, Ahmeur EL Ain jusqu'à Hadjout. Une troisième zone à bonne qualité d'eau se trouve au centre Ouest. Pour cette étude l'approche de l'indice de qualité d'eau WQI à été utilisé et les résultats comparés avec les autres travaux.

Pour une bonne prise en charge des eaux de la nappe, la recharge de cette dernière est vitale que ce soit par les lâchers de barrages où par des eaux épurées traitées à traitement avancé, par des bassins d'infiltration. Ajouter à cela une rationalisation judicieuse dans le partage de ces eaux, et en fin une continuelle information de l'importance de la protection de la source.

Mots clés :

Pollution et intrusion marine, gestion des ressources hydriques, plaine Mitidja, changements climatiques, Algérie.

Abstract

A state is considered to develop, if it can provide water comfort to the various users of its society. This comfort is generally based more on the water management of these states. In Algeria, the water resource is closely linked to climate. The northern Mediterranean area is considered a semi - arid zone with low precipitation and a fairly high ET₀. The demand for water by the various users is growing, also implying an over-exploitation of water resources as well as large quantities of poorly controlled discharges. These are the main cause of the deterioration of the groundwater source, either by a significant infiltration of polluting agents or by a marine intrusion of salt water as is the case of the coastal water of the Mitidja. Backing up this resource requires work that starts upstream of the chain. Continuous monitoring of the source from these water points to monitor its physicochemical quality and thus the detection of any pollution that may come from the surface of the soil or subsoil by intrusion of salt water. The groundwater of Mitidja is located under a vast plain of 1450 km² of surface in the north center of Algeria with agricultural and industrial vocation. The climate is Mediterranean, mild in winter and hot and dry in summer. The average rainfall is of the order of 607 mm / year and a ET₀ of 1250 mm / year. The period of drought and the break in the rainfall detected since the 1970s have reduced the filling rate of the aquifer. This drop is clearly visible in the piezometric figures, where we recorded a 30 m drop in the Bay of Algiers, and this until the period of the years 2010. The stability during this year was more the decrease pumping out of the Beraki wellfield, a decision that has slowed down the phenomenon of marine intrusion. This type of piezometric depression cone has also been observed at the level of the Mazafran I and II catchment field. In the end, an overall decrease is observed in the piezometric level of the entire aquifer from the interpretation of the piezometric readings and this as early as the year 1990. The chemical quality of the waters of the aquifer and which strongly depends on the entropy, shows three areas of pollution. The strongest is located in the eastern part of Mitidja and where the percentage of population is highest. Add to this, the presence of the oldest industrial area to processing heavy industry. Nevertheless the salinization of the waters comes from the marine intrusion where the contact fresh water - salt water spreads from Bordj El Bahri to Oued El Harrach. The western part of the plain is agricultural and can explain the pollution in this area by the inputs of fertilizers, pesticides and where the irrigation is made by the wastewater treatment plant. The area stretches from Sidi Rached, Ahmeur EL Ain to Hadjout. A third area with good water quality is in the center west. For this study the WQI water quality index approach was used and the results compared with other works.

For a good management of the waters of the groundwater, the recharge of the latter is vital whether it is by the release of dams or by purified treated water with advanced treatment, by basins of infiltration. Add to this a judicious rationalization in the sharing of these waters, and in the end continual information of the importance of the protection of the source.

Keywords:

Pollution and marine intrusion, management of water resources, Mitidja plain, climate change, Algeria.

Tables des matières

Remerciements	ii
ملخص	iii
Résumé	iv
Abstract	v
Introduction générale	18
Chapitre 1 : Présentation de la zone d'étude	23
I.1 Introduction	23
I.2 Situation géographique	23
I.3 Aperçu géomorphologique	24
I.4 Réseau hydrographique	26
I.5 Les eaux souterraines	27
I.6 L'Agriculture	27
I.7 L'industrie	28
I.8 L'Élevage :	28
I.9 Démographie et urbanisme	28
I.10 Risque sismique	29
I.11 Conclusion	29
Chapitre 2 : Hydroclimatologie	32
II.1 Introduction	32
II.2. Choix des stations	32
II.3 Contrôle et critique des données	34
II.4 Caractéristiques des pluies annuelles	42
II.5 Évaluation de la lame d'eau moyenne précipitée sur la plaine	43
II.6 Précipitation moyenne mensuelle	44
II.7 Température	46
II.8 L'évapotranspiration	47
II.9 Essai de bilan hydrologique :	49
Chapitre 3 : Bassin versant et réseau hydrographique	52

III Introduction	52
III.1 Bassins versants et réseau hydrographique	52
III.2 Ressources superficielles	54
III.3 Ressources en eau souterraine	55
III.4 Les prélèvement.....	55
Chapitre 4 : Géologie	60
IV.1 Introduction.....	60
IV.2 Stratigraphie et lithostratigraphique	60
IV.3 Contexte tectonique	65
IV.4 Conclusion	67
Chapitre 5 : Étude Géophysique	69
V.1 Introduction	69
V.2 Interprétation des sondages électriques.....	69
V.3 Interprétation des cartes géoélectriques	71
V.4 Interprétation des coupes géoélectriques	73
V.5 Conclusion :.....	75
Chapitre 6 : Hydrogéologie	77
VI.1 Introduction.....	77
VI.2 Récapitulatif de l'hydrogéologie de la zone	77
VI.4 Piézométrie.....	80
VI.5 conclusion	84
Chapitre 7 : Hydrochimie de la zone	86
VII.1 Introduction.....	86
VII.2 Les eaux des oueds ou eaux de surface	86
VII.3 Caractéristiques chimique des eaux souterraines	88
VII.4 Cartographie et analyse des paramètres physicochimique	91
VII.5 Les éléments Majeurs et normes de l'OMS	97
VII.6 Quelques éléments de métaux lourds	99

VII.7 L'analyse en composante principales	105
VII.8 L'analyse en composante principales globale	110
VII.9 Conclusion	113
Quelques travaux bibliographiques	115
Chapitre 8 : Aptitude des eaux à l'irrigation	115
VIII.1 Introduction	118
VIII.2 Matériel et Méthodes utilisés dans le calcul du WQI.....	118
VIII.3 Détermination de l'indice de qualité d'eau	122
VIII.4 Méthodes d'interpolation	123
VIII.5 Comparaison entre les différentes méthodes d'interpolation	125
VIII.6 Méthodes d'interpolation et contamination des eaux souterraines	126
VIII.7 Résultats	127
VIII.8 Discussion.....	131
VIII.9 Conclusion	132
Chapitre 9 : Modélisation mathématique de la nappes côtière de la Mitidja sous ModFlow	
Étude quantitative	115
IX. Introduction.....	134
IX.1 Le choix du modèle	134
IX.2 Approche mathématique de la méthode des différences fines :	135
IX.3 Élaboration du modèle	136
IX.4. Calage et Simulation en régime permanent	143
IX.5 Conclusion	164
Chapitre 10 : Modélisation mathématique de la nappes côtière de la Mitidja sous ModFlow	
Mise en évidence du stade de l'intrusion marine	115
X. Introduction	167
X.1 Composantes du modèle de salinité.....	167
X.2 Condition aux limites	168
X.3 Résultats de la simulation.....	168

X.4 Premier scénario	169
X.5 Deuxième scénario.....	171
X.6 Troisième scénario	174
X.7 Quatrième scénario	175
X.8 Cinquième et sixième scénario	177
X.9 Septième scénario	179
X.10 Conclusion.....	181

Liste des Figures

Chapitre 1

Figure I.1 : Situation géographique de la plaine de la Mitidja (Source : Programme d'aménagement côtier (PAC), 2006)	23
Figure I.2 : Carte de la limite de la plaine de la Mitidja.....	24
Figure I.3 : Carte de situation des sous bassins versants de la plaine de la Mitidja. (ANRH, 2008).....	25
Figure I.4 : Carte des failles sismiques de la zone PAC (échelle originale : 1 :500.000) (PAC, 2004).....	29

Chapitre 2

Figure II.1 : Position des stations pluviométriques	33
Figure II.2 : La méthode du double cumul (Fouka Marine) avec la station du de Meured barrage comme station de référence (a) : avant correction des données ; (b) : après correction des données.	35
Figure II.3 : La méthode du double cumul (Pont CW 7 Hadjout) avec la station du de Meured barrage comme station de référence (a) : avant correction des données ; (b) : après correction des données.	35
Figure II.4 : La méthode du double cumul (Blida) avec la station du de Meured barrage comme station de référence (a) : avant correction des données ; (b) : après correction des données.	36
Figure II.5 : La méthode du double cumul (Beni Mered) avec la station du de Meured barrage comme station de référence (a) : avant correction des données ; (b) : après correction des données.	36
Figure II.6 : Ajustement à une loi normale pour cinq stations de la zone d'étude. (a) Meured Barrage, (b) Hamiz Barrage, (c) Régaia, (d) Ahmeur El Ain, (e) Larbaa.	39
Figure II.7 : Courbe informative des valeurs propres.....	40
Figure II.8 : Cartographie de la première composante principale	41
Figure II.9 : Cartographie de la deuxième composante principale	41
Figure II.10 : Cartographie de la troisième composante principale	42
Figure II.11. : Précipitations moyennes mensuelles de la plaine de la Mitidja par station (1980-2011).....	45
Figure II.12 : précipitations moyennes mensuelles des stations par mois (1980/2011).....	45
Figure II.13 : Répartition saisonnière des précipitations	46
Figure II.14 : Variation des températures moyennes mensuelles des stations de Dar El Beida (1982-2007) et Soumaa (1994-2009)	47
Figure II.15 : Diagramme Ombrothermique de la station de Dar El Beida.....	48

Chapitre 3

Figure III.1 : Présentation du réseau hydrographique des Bassins versants	52
Figure III.2 : Chevelu hydrographique et principaux bassins versants (Source ANRH 2008).	53
Figure III.3 : zone de captage des eaux de la nappe de la Mitidja	55
Figure III.4 : carte d'occupation des sols de la Mitidja (INSID 2011).....	56
Figure III.5 : Répartition des débits prélevés sur les points d'eau recensés par l'ANRH (inventaire BIRH actualisé en 2002) (inventaire BIRH actualisé en 2002)	56
Figure III.6 : Répartition des forages de différents utilisateurs débits (inventaire BIRH (ANRH) actualisé en 2002)	57

Chapitre 4

Figure IV.1 : Carte géologique de la plaine de la Mitidja (Bennie and Partners, 1983)	61
Figure IV.2 : Coupes géologiques au niveau de la Mitidja (Bennie and partners, 1983).....	63
Figure IV.3 : Différents stades de l'évolution de la Mitidja pendant le Plio-Quaternaire (L.Glangeaud, 1932).....	65
Figure IV.4 : Situation de la plaine étudiée dans l'Orogène Alpin (M. Durand Delga, 1969).	66
Figure IV.5 : Carte sismotectonique du bassin de la Mitidja (Meghraoui et al ,2004)	67

Chapitre 5

Figure V.1 : Sondages électriques (P1) au niveau de Boufarik et (P1b et R5) région du Mazafran. (CGG, 1969)	70
Figure V.2: Sondages électriques (E5 :Dar El Baida) et (A7 :Ecalyptus-Rivet) (CGG, 1969)	70
Figure V.3 : Carte de la résistance transversale correspond aux horizons profonds (Astien + alluvions du quaternaire) (RT) Ohm.m2 (CGG, 1969)	71
Figure V.4 : Carte du Mur de l'Astien, l'allure du substratum (Mac Donald & Partners, 1992)	72
Figure V.5 : Carte du Mur de la nappe de la Mitidja (Mac Donald & Partners, 1992).....	73
Figure V.6 : Coupe géoélectrique dans la partie Ouest de la plaine de la Mitidja (CGG, 1969)	74
Figure V.7 : Coupe géoélectrique dans la partie Est de la plaine de la Mitidja (CGG, 1969)..	74

Chapitre 6

Figure VI.1 : Carte Krigée des Transmissivités de la nappe alluviale de la Mitidja (Toubal, 1998).....	79
Figure VI.2 : Carte piézométrique de la nappe alluviale de la Mitidja (a) hautes eaux 1998, (b) basses eaux 1998. (c) hautes eaux 2005, (d) basses eaux 2005.	81
Figure VI.3 : Carte piézométrique de la nappe alluviale de la Mitidja (e) hautes eaux 2010, (f) basses eaux 2010.	82
Figure VI.4 : Carte piézométrique de la nappe alluviale de la Mitidja (g) hautes eaux 2012, (h) hautes eaux 2015, (i) basses eaux 2015.	84
Figure VI.5 : Évolution de la profondeur de la nappe alluviale du secteur de Mazafran MZ1 et du champ de captage du Hamiz (période 1998 à 2010)	84

Chapitre 7

Figure VII.1 : Les résultats d'analyse de l'eau superficielle pour les trois années de 2010 à 2012 de la station rocher des pigeons (a) CE $\mu\text{S}/\text{cm}$, (b) SO_4^{-2} , HCO_3^{-} et Cl^{-} mg/l.....	88
Figure VII.2 : Diagramme de Piper pour eaux années de la nappe alluviale de la Mitidja ((a) 2005, (b) 2010).....	89
Figure VII.3 : Classification chimique des eaux selon piper (Juillet, 1992) in (Toubal, 1998)	89
Figure VII.4 : Carte d'iso-indice d'échange de base de la nappe alluviale de la Mitidja, (a) des hautes eaux 2014, (b) des basses eaux 2014.	90
Figure VII.5 : Variation du PH de l'eau pour deux années (a) 2010 et (b) 2014	91
Figure VII.6 : carte des isovaleurs de la conductivité électrique CE des (a) hautes eaux, (b) basses eaux de l'année 2010.....	92
Figure VII.7 : carte des isovaleurs de la conductivité électrique CE des (c) hautes eaux (2015) et (d) basses eaux (2014).	93
Figure VII.8 : Variation de la Conductivité - Résidu Sec de la Mitidja (hautes eaux 2010 (a) et 2015 (b).....	94
Figure VII.9 : Classes de dureté ($^{\circ}$ F) de la nappe alluviale de la Mitidja (Avril, 2010)	95
Figure VII.10 : Carte d'iso-teneurs en azote dans les eaux souterraines de la plaine alluviale de la Mitidja ((a) hautes eaux 2005, (b) basse eau 2005, (c) haute eau 2014, (d) basse eau 2014, (e) haute eau 2015))	97
Figure VII.11 : Carte d'iso-teneurs des bicarbonates des eaux souterraines de la plaine alluviale de la Mitidja (a) hautes eaux 2005, (b) hautes eaux 2014.	98
Figure VII.12 : Diagramme de Riverside des eaux souterraines de la plaine alluviale de la Mitidja (a) hautes eaux 2010, (b) hautes eaux 2014.....	99
Figure VII.13 : Carte d'iso-indice de concentration limite de Fer de la nappe alluviale de la Mitidja, (a) hautes eaux 2008, (b) des basses eaux 2008.....	100
Figure VII.14 : Carte d'iso-indice de concentration limite de Fer de la nappe alluviale de la Mitidja, (c) hautes eaux 2009, (d) des basses eaux 2009.....	101
Figure VII.15 : Carte d'iso-indice de concentration limite du Manganèse de la nappe alluviale de la Mitidja, (a) hautes eaux 2008, (b) hautes eaux 2009	102
Figure VII.16 : Carte d'iso-indice de concentration limite du Plomb de la nappe alluviale de la Mitidja, (a) hautes eaux 2009.....	103
Figure VII.17 : Carte d'iso-indice de concentration limite de Cadmium de la nappe alluviale de la Mitidja, (a) hautes eaux 2008, (b) des basses eaux 2008, (c) hautes eaux 2009, (d) des basses eaux 2009.	104
Figure VII.18 : Carte d'iso-indice de concentration limite du Zinc dans la nappe alluviale de la Mitidja, basses eaux 2010.	105
Figure VII.19 : Cercle de corrélation (Hautes eaux (a), 2014)	107
Figure VII.20 : Cercle de corrélation (Basses eaux (b), 2014)	108
Figure VII.21 : Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) (hautes eaux 2014).....	109
Figure VII.22 : Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) (basses eaux 2014).....	110
Figure VII.23 : Cercle de corrélation pour une ACP complète ((a) Hautes eaux et (b) Basses eaux, 2014).....	112
Figure VII.24 : Analyse factorielle de corrélation complète ((a) Hautes eaux et (b) Basses	

eaux, 2014).....	113
------------------	-----

Chapitre 8

Figure VIII.1 Distribution spatiale des points d'analyse	120
Figure VIII.2 : Distribution spatiale de la pluviométrie	121
Figure VIII.3 : Carte d'utilisation des terre de la Mitidja (source : INSID 2011)	121
Figure VIII.4 : Les différentes méthodes d'interpolation et la prédiction spatiale de WQI ...	128
Figure VIII.5 : La différence entre surfaces, estimer par la technique d'estimation deux à deux	131
The difference of WQI area estimated by each two interpolation techniques	131

Chapitre 9

Figure IX.1 : Bilan des flux sur une maille C	135
Figure IX.2 : Maillage de la nappe côtière de la Mitidja.....	138
Figure IX.3 : vue en 3D des limites géologiques de la nappe de la Mitidja (agrandissement 30%) ; (a) le Mur de la zone, (b) le Toit de la zone (c) la superposition du Toit et du Mur délimitant ainsi l'épaisseur de la nappe de la Mitidja.	140
Figure IX.4 : Représentation des conditions aux limites de la nappe de la Mitidja.....	142
Figure IX.5 : Carte de la répartition spatiale des perméabilités (m/s), après le calage	144
Figure IX.6 : Carte piézométrique de la nappe côtière de la Mitidja simulée en régime permanent (Mai 2007)	145
Figure IX.7 : Calibration des points d'observation en régime permanent.....	146
Figure IX.8 : Bilan hydrique (m ³ /j) de la nappe de la Mitidja modélisée en régime permanent de Mai 2007	147
Figure IX.9 : Carte piézométrique de la nappe de la Mitidja modélisée en régime transitoire de Mai 2018	150
Figure IX.10 : Bilan hydrique (m ³ /j) de la nappe de la Mitidja modélisée en régime transitoire de Mai 2018	151
Figure IX.11 : Évolution de la Piézométrie en fonction du temps pour le régime transitoire (2007-2018).....	152
Figure IX.12 : Carte piézométrique de la nappe de la Mitidja résultant du premier scénario	152
Figure IX.14 : Piézométrie en fonction du temps dans le cas du premier scénario	153
Figure IX.15 : Carte piézométrique résultant du deuxième scénario	154
Figure IX.16 (a) : Bilan des nappes dans le cas du deuxième scénario.....	155
Figure IX.16 (b) : Piézométrie en fonction du temps dans le cas du deuxième scénario	155
Figure IX.17 : Carte piézométrique de la nappe de la Mitidja résultant du troisième scénario	156
Figure IX.18 : Bilan hydrique (m ³ /j) de la nappe de la Mitidja résultant du troisième scénario	157
Figure IX.19 : Piézométrie en fonction du temps dans le cas du troisième scénario	157
Figure IX.20 : Carte piézométrique de la nappe de la Mitidja résultant du quatrième scénario	158

Figure IX.21 : Bilan hydrique (m^3/j) de la nappe de la Mitidja résultant du quatrième scénario	159
Figure IX.22 : Piézométrie en fonction du temps dans le cas du quatrième scénario	159
Figure IX.23 : Carte piézométrique de la nappe résultant du cinquième scénario	160
Figure IX.24 : Bilan des nappes dans le cas du cinquième scénario	161
Figure IX.25 : Piézométrie en fonction du temps dans le cas du cinquième scénario	161
Figure IX.26 : Carte piézométrique résultant du sixième scénario	162
Figure IX.27 : Bilan des nappes dans le cas du sixième scénario	163
Figure IX.28 : Piézométrie en fonction du temps dans le cas du sixième scénario	163

Chapitre 10

Figure X.1: Carte de simulation du font salé résultant de la simulation en régime transitoire (2018).....	169
Figure X.2 : Carte de simulation du font salé résultant du premier scénario : (a) 2028, (b) 2038 et (c) 2048.	171
Figure X.3 : Carte de simulation du font salé résultant du deuxième scénario : (a) 2028, (b) 2038 et (c) 2048.....	173
Figure X.4 : Carte de simulation du font salé résultant du troisième scénario : (a) 2028, (b) 2038 et (c) 2048.....	175
Figure X.5 : Carte de simulation du font salé résultant du quatrième scénario : (a) 2028, (b) 2038 et (c) 2048.....	176
Figure X.7 : Carte de simulation du font salé résultant du sixième scénario (2048).	178
Fig. X.8 : Carte de simulation du font salé résultant du septième scénario : (a) 2028, (b) 2038 et (c) 2048.	180

Liste des tableaux

Chapitre 1

Tableau I.1 : Paramètres géomorphologiques des sous bassins versants de la Mitidja.....	26
Tableau I.2 : Écoulements des Principaux sous bassins versants de la Mitidja et leurs principaux oueds	27
Tableau I.3 : Bilan d'eau de la nappe alluviale	27
Tableau I.4 : Récapitulatif de la production animale	28

Chapitre 2

Tableau II.1 : liste retenues des stations du réseau météorologiques	33
Tableau II.2 : ACP des valeurs propres	40
Tableau II.3 : Caractéristiques des pluies annuelles des stations.....	42
Tableau II.4 : Récapitulatif des méthodes de détermination de la lame d'eau précipitée dans les sous bassins versant de la Mitidja	44
Le Tableau II.5 donne un récapitulatif des valeurs corrigées des ETP des deux stations de Soumaa et de celle de Dar Al Baida, par la méthode de Thornthwaite en fonction des températures des stations respectives.	47
Tableau II.5 : Présentation des valeurs moyennes mensuelles des ETP corrigées par la méthode de Thornthwaite ("a" Station de Soumaa et "b" Station de Dar El Beida $I=18,44$; $a=0,8$).....	48

Chapitre 3

Tableau III.1 : Paramètres géomorphologiques des sous bassins versants de la Mitidja	53
Tableau III.2 : Tableau récapitulatif des principaux Oueds des Bassins versants	54
Tableau III.3 : Bilan des écoulements des oueds	54
Tableau III.4 : Barrages de la Mitidja et leurs capacités	54
Tableau III.5 : Différentes estimations des prélèvements d'eau agricoles (SOGREAH, 2008).....	57

Chapitre 5

Tableau V.1 : Échelle des résistivités (CGG, 1969)	69
--	----

Chapitre 7

Tableau VII.1 : Moyenne des éléments physique et chimique de l'eau de la nappe de la Mitidja.....	86
Tableau VII.2 : La moyenne des pourcentages des faciès des années 2004- 2010.....	88
Tableau VII.3 : Norme de l'OMS	97
Tableau VII.4 : Norme de l'OMS des métaux lourd	99
Tableau VII.5 : Valeurs propres ((a) Hautes eaux 2014), ((b) Basses eaux 2014)	106
Tableau VII.6 : Matrice des corrélations de Pearson à $\alpha = 5\%$ ((a) Hautes eaux 2014), ((b) Basses eaux 2014).....	106
Tableau VII.7 : Valeur propre globale des (a) hautes eaux et (b) basses eaux 2014	110
Tableau VII.8 : Matrice des corrélations globale de Pearson à $\alpha = 5\%$ ((a) Hautes eaux 2014), (b)	

Basses eaux 2014).....	110
------------------------	-----

Chapitre 8

Tableau VIII.1	126
Statistique descriptive de la variabilité de la qualité des eaux souterraines dans la plaine de la Mitidja avec les WQI associés.....	126
Tableau VIII.2: La précision de prédiction des méthodes.....	129
Tableau VIII.3 :La moyenne et le coefficient de variance prédits en utilisant différentes méthodes ..	129

Chapitre 9

Tableau IX.1 : Bilan annuel de l'aquifère alluviale (géohydraulique. 1970, Bennie et Partners.1980)	141
Tableau IX.2 : Localisation des points d'observation dans les mailles.....	148
Tableau IX.3. Variation de la piézométrie entre 2007 et 2018.....	151

Chapitre 10

Tableau X.1 Classification des eaux selon Stuyfzand (1993) cité par Hachemi (2016)	168
Tableau X.2 : Bilans des entrées et sortie par la limite de la baie d'Alger.....	169
Tableau X.3 : Bilans des entrées et sortie pour le premier scénario	171
Tableau X.4 : Bilans des entrées et sortie pour le deuxième scénario	173
Tableau X.5 : Bilans des entrées et sortie pour le troisième scénario	175
Tableau X.6 : Bilans des entrées et sortie pour le quatrième scénario	177
Tableau X.7 : Bilans des entrées et sortie pour le Cinquième scénario	178
Tableau X.9 : débit de prélèvement des forages pour l'année 2018	179

Introduction générale et objectifs

Introduction générale

La planète bleue. Une appellation donnée à la terre pour son importante surface occupée par l'eau. Elle présente 75% de la surface totale du globe contre 25% pour les continents. Seuls 2.5 % sont de l'eau douce utilisée par les Hommes, soit 35.2 millions de Kilomètres cubes. Cette quantité d'eau est elle-même divisée en deux, une eau de surface et qui représente 70% du volume total (glaciers et la couverture neigeuse). Le reste qui est de 30% est des eaux souterraines. Vue tous les problèmes de guerres, de maladies et même de famines et d'accès à la nourriture liés surtout à l'eau, les questions à poser sont nombreuses : cette quantité est elle suffisante ; Qui a la priorité d'accéder à ce précieux don ; Est-ce qu'elle est propre à la consommation ; comment la protéger, dans le temps et dans l'espace, du moment qu'elle est la vie.

D'après un rapport publié en Juillet 2017 par l'UNICEF et OMS, 2.1 milliards de personnes soit 30 % n'ont pas accès à l'eau potable salubre dans le monde et plus du double ne disposent pas de service d'assainissement sûrs. Ce qui crée un impact négatif sur les êtres vivant et /ou l'environnement. Selon les estimations, en 2050 le nombre d'habitants augmentera de 33 % (2 milliards) par rapport à celui de 2011 (7 milliards) entraînant une demande en eau, en agriculture seulement, de 20 %. Le groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GEIC) dans son rapport prévoit des sécheresses plus importantes et plus fréquentes dans les zones déjà arides, réduisant ainsi les ressources en eau, où 2/3 des ces dernières ont baissé durant ces quarante dernières années en Afrique du Nord.

De ce fait, la ressource en eau en Algérie, fait l'objet d'une surveillance et d'un suivi drastique, vue la sécheresse pluviométrique qui règne sur la zone. Les potentialités en eau de surface sont de l'ordre de 11 milliards de m³, celle des eaux souterraines sont de 2.5 milliards de m³ et 5 milliards de m³ pour la zone Nord et le Sahara septentrional respectivement (Deramchi., 2014).

Ainsi, la région littorale du Nord, qui représente 7 % de la surface du territoire national (Benblidia Med et Gaëlle T, (2010), s'approprie 77 % du total des eaux entre superficielles et souterraines du pays. Utiliser pour le développement sociale et économique, elle est utilisée avec des quotas différents pour chaque usagé. Les ordres d'affectation de l'eau en Algérie ont été reformés maintes fois à cause des changements dans les orientations de la politique du développement socio-économique (Kherbach M & Khaladi N (2014) A l'indépendance le modèle appliqué était : *agriculture-industrie-population*. Puis avec le programme d'industrialisation, le développement agricole et l'accroissement démographique, le schéma devient : *industrie-agriculture-population*, suivie de : *population-industrie-agriculture*. Aujourd'hui, nous assistons à une nouvelle politique de l'eau notamment la loi n° 05-12 (article 2), consacrant la satisfaction des besoins *domestiques et l'abreuvement du cheptel* comme une priorité sur les autres utilisations, une satisfaction totale des besoins en AEP et une satisfaction de 60 % des besoins d'irrigation.

Les eaux souterraines restent les plus accessibles par l'homme néanmoins la menace qui pèse sur elles par la pollution est très grande. Un accroissement de population, des agglomérations de plus en plus granges et proches, une agriculture intensive et exigeante en produits chimiques et une industrie gourmande et polluante aggravent et accélère la dégradation de cette précieuse source. Selon les rapports du Programme des Nations Unies pour l'Environnement et celui du PNUE en 2002 dressent des tableaux inquiétants de la situation de cette ressource naturelle essentielle que ce soit par rapport à la pollution ou par rapport à l'affectation de la vitesse de réapprovisionnement des nappes phréatiques. Cette faible vitesse de réapprovisionnement et dû principalement à la surexploitation des nappes, provoquant ainsi

un phénomène très dangereux et pratiquement irréversible qui est l'intrusion marine et conduisant à la détérioration de la qualité de ces eaux en augmentant leur salinité. En outre, ce mélange eau douce – eau salée, qui au départ et en période de stabilité, avait une épaisseur constante, augmente considérablement à chaque augmentation du rapport pompage/recharge. Ce qui transforme les eaux de cette aquifère en eaux salées inutilisables par l'homme.

La nappe de la Mitidja (Nord- centre de l'Algérie) est un cas parmi d'autres en Algérie. Elle couvre une superficie de 1450 km² avec une longueur moyenne de 100 Km, une largeur variant de 10 à 18 Km et une altitude moyenne de 100 m. La plaine de la Mitidja s'étend sur quatre wilayas Alger, Blida, Tipaza et Boumerdes, orienté WSW-ENE. Selon l'étude de l'ENERGOPROJEKT (2011), la ressource en eau souterraine renouvelable est évaluée à une moyenne de 259,26 Mm³/an. C'est une nappe côtière dans son côté Est avec, en surface, une terre arable très fertile à l'agriculture d'une surface de 114 350 ha irrigable et où nous comptons une prolifération des zones industrielles avec une large variation d'activités industrielles (du léger jusqu'au lourd). Sans oublier une population de plus en plus élevée 0% selon l'ONS de 2008, la population de la Mitidja est passée à 5 384 175 habitants avec une densité de 1287.3 hab/Km². Tout pour faire d'elle une nappe surexploitée et polluée.

Une pérennité de l'utilisation de cette source d'eau doit impérativement passer par une protection draconienne. Et qui dit protection, dit automatiquement Gestion. En générale, le concept de gestion et d'après la définition de Roux et Soulié (1996) « c'est la science ou l'art d'allouer efficacement les ressources rares disponibles » in Hamlat A (2014). c'est la capacité de trouver un juste équilibre entre la demande en eau par les différents usages et le pouvoir de satisfaction de ces demandes en fonction de la disponibilité de cette dernière sans pour autant affecter l'un ou l'autre. Cet équilibre est fonction de la gestion de la ressource qui, elle-même, est fonction de l'environnement, les politiques et les différents autres acteurs (utilisateurs ou usagers).

Une bonne analyse des données récupérées sur le terrain permet de prendre des décisions efficaces et de mettre en place plusieurs outils d'aide à la gestion. La modélisation reste l'outil par excellence pour pouvoir prendre de décision à court et à long terme et d'anticiper tout changement probable dans le temps et dans l'espace. Elle peut prendre différentes mesures de réduction ou augmentation de cotas, réduction de pollution où au moins la limitation de son exposition.

Le développement rapide a entraîné une demande de plus en plus croissante en matière première et par conséquent une production de plus en plus grande de déchets et d'éléments polluants et cela dans tous les domaines industriels et agricoles. Le pompage effréné de la source d'eau, lui aussi a entraîné une baisse rapide des nappes favorisant ainsi leur salinisation. Un suivi périodique des éléments polluants dans la nappe et des niveaux piézométriques est devenu primordial pour la prise de décision par les différents niveaux de compétence.

Les objectifs sont donc de deux ordres majeurs : la modélisation de la pollution de la nappe de la Mitidja par l'amélioration de la cartographie des champs de concentration de la pollution en fonction des différents points de contrôle et par des méthodes de distribution temporaire et spatio-temporaire. Ajouter à cela la détermination des différents niveaux de pollution et le choix de la meilleure méthode en fonction de l'incertitude existante entre ces dernières pour une bonne prise de décision.

Cette étude prend en considération la possibilité d'utilisation de cette eau pour l'alimentation en eau potable ainsi que celle de l'irrigation avec la méthode de l'indice de la qualité d'eau WQI et celle de l'indice de la qualité d'eau d'irrigation WQIi. Une étude du niveau de l'intrusion marine du côté Est de la zone permet de voir la progression de ce phénomène dans la nappe. Sachant que la nappe de la Mitidja est la principale source d'eau que ce soit pour l'approvisionnement en eau potable, l'irrigation et même l'industrie.

Pour atteindre cet objectif, nous avons suivie une mesure à plusieurs chapitres :

Le premier chapitre présente les caractéristiques générales de la région du point de vue géographique et géomorphologique.

Le deuxième chapitre étudie la climatologie de la zone permettant ainsi de déterminer le climat de la région ainsi que l'existence ou l'absence de différentes zones climatiques de la zone d'étude.

Le troisième chapitre est consacré à la caractérisation hydrographique des différents bassins versants, la détermination le potentiel hydrique global des différentes ressources superficielles ou souterraines ainsi que les volumes prélevés.

Le quatrième et le cinquième chapitre traitent le contexte géologique et géophysiques de la région d'étude. Il se base sur des documents traitant de la géologie régionale et locale et sur des résultats de prospections géophysiques et de forages. Il permet l'identification de la géométrie des aquifères quaternaires.

Le sixième chapitre s'intéresse à l'évolution spatio-temporelle de la piézométrie de notre nappe côtière. L'évolution des niveaux d'eau souterraine, en comparant des cartes piézométriques établies à différentes périodes.

le septième chapitre est consacré a traité des procédés géostatistiques qui aboutissent à l'interpolation des valeurs des paramètres de l'hydrochimie. Il examine la répartition des concentrations ioniques dissoutes dans l'espace et leur évolution dans le temps, en relation soit avec la variation lithologie de l'aquifère soit sous l'influence d'éventuelles sources de pollutions.

Le huitième chapitre traite la partie "aptitude des eaux à l'irrigation l'approvisionnement en eau potable" avec la méthode de l'indice de qualité d'eau WQI afin d'élaborer des documents cartographiques dont la synthèse fait ressortir les zones les plus polluées.

Le neuvième et les dixièmes chapitres sont consacrés à l'élaboration de deux modèles mathématiques. Le premier, à l'évaluation d'un bilan hydrologique global de nappe et le second à la détermination du degré du phénomène de l'intrusion marine ainsi que la progression du fond salin.

Les simulations sont faites tous d'abord après stabilisation d'un régime permanent, puis par rapport à un régime variable constitué de plusieurs scénarios de long terme (30 ans).

En fin, une synthèse générale des différents résultats trouvés et des conclusions portant sur ce travail qui résume l'état générale présent et future ; avec différents scénarios ; de la ressource de la zone de la Mitidja. Des perspectives et des recommandations sont apportées pour pouvoir compléter ce travail par une ou plusieurs autre études.

**IDENTIFICATION HYDROGEOLOGIQUE ET
PRESENTATION DU SITE**

Chapitre I
Caractéristiques du site

Chapitre 1 : Présentation de la zone d'étude

I.1 Introduction

L'Algérie appartient à la zone climatique semi aride où la répartition de l'eau doit se faire d'une manière très judicieuse. Le climat étant un désavantage pour notre pays avec de faible précipitation et une forte évapotranspiration, cela n'a pas empêché le train de développement de la zone. La situation géographique et sa géomorphologie donnera un aperçu sur les potentialités des ressources en eau.

I.2 Situation géographique

La Mitidja a été pendant longtemps le grenier alimentaire de l'Algérie et même à l'échelle internationale. Son potentiel naturel infini dans les ressources en eau, par ses Oueds et sa nappe, sa forêt et son sol...etc a été une arme à double tranchant, entre production et surexploitation.

La plaine de la Mitidja (Figure I.1) est une plaine littorale étroite et longue d'une centaine de kilomètres, située au centre de l'Algérie.

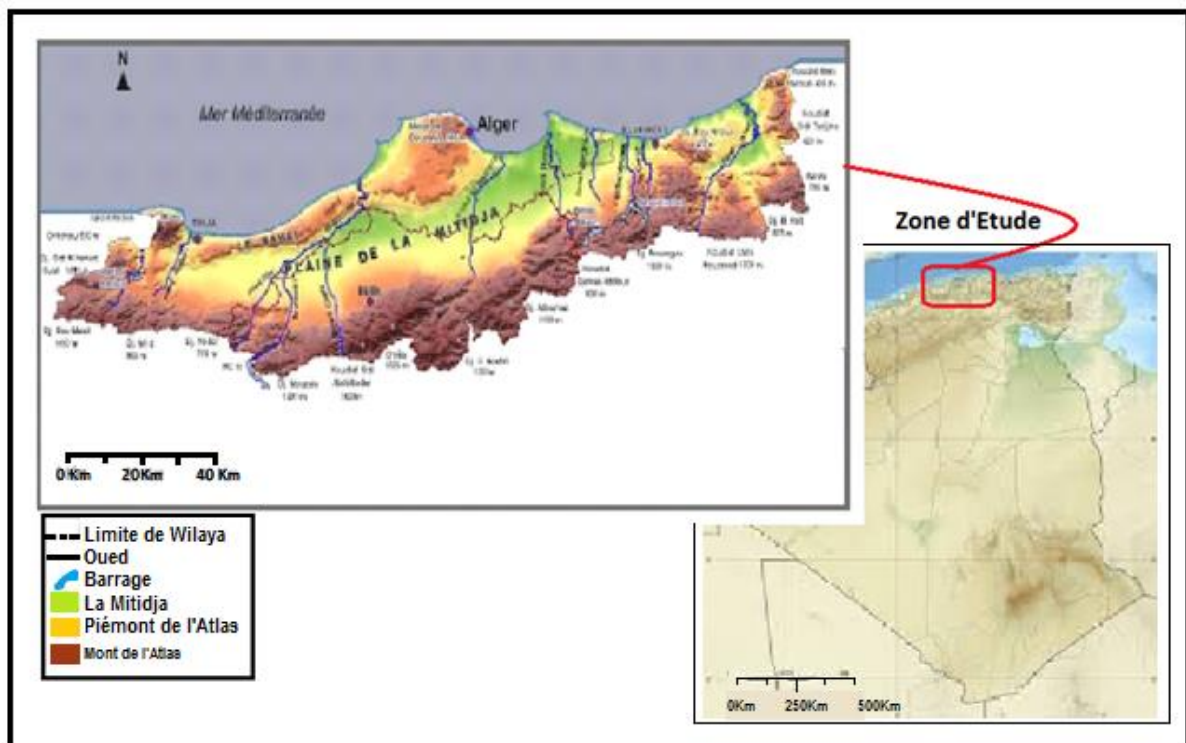


Figure I.1 : Situation géographique de la plaine de la Mitidja (Source : Programme d'aménagement côtier (PAC), 2006)

Elle s'étend sur les Wilayates d'Alger, Boumerdès, Tipaza et Blida. L'étendu de la plaine depuis la région de Hadjout à l'Ouest jusqu'à la région de Réghaiaa à l'Est a une superficie est de 1450 km² avec une orientation WSW – ENE, une longueur de 100 km et une largeur qui varie de 10 à 20 km. Elle est située entre les longitudes 2°32'00E et 3°19'00E et les latitudes 36°25'17''N et 36°47'40''N et a une altitude moyenne de 100 m (Figure I.2).

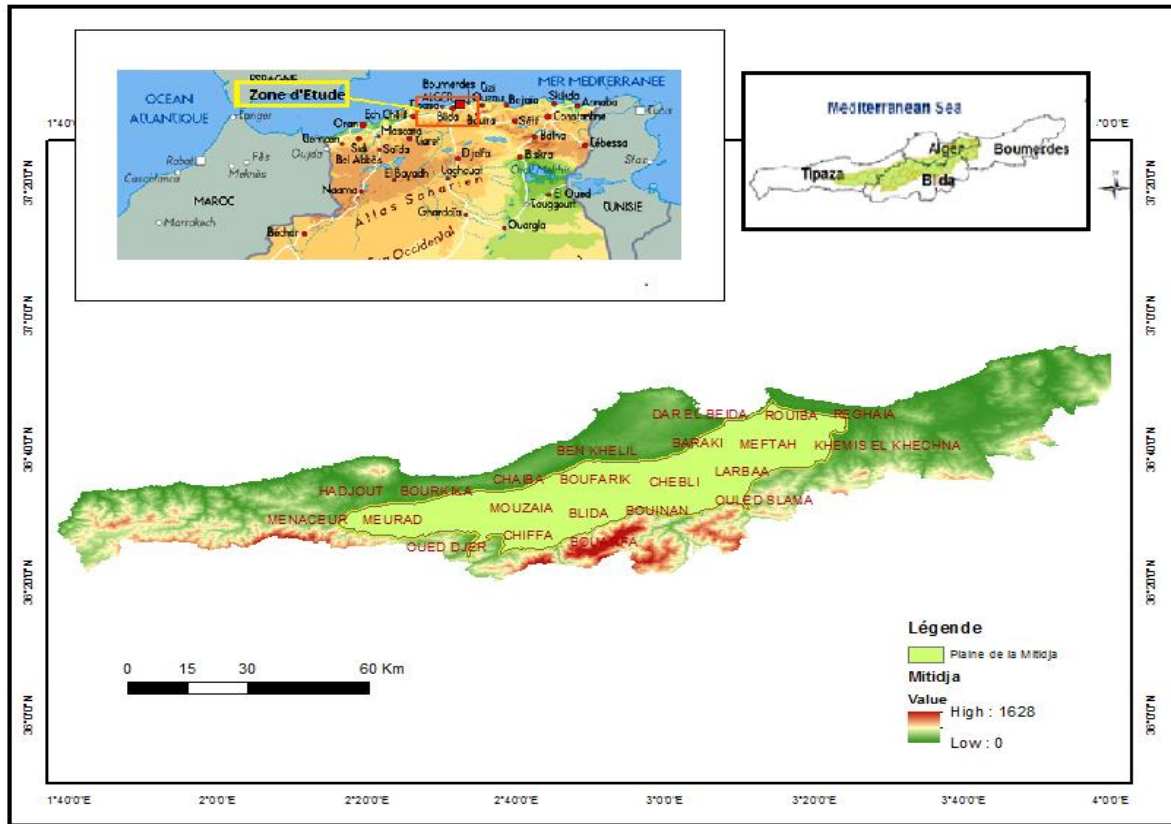


Figure I.2 : Carte de la limite de la plaine de la Mitidja

I.3 Aperçu géomorphologique

La topographie de la zone d'étude est variée, on observe les zones basses et plates de la plaine et les reliefs abrupts de l'Atlas, en passant par la zone intermédiaire (piémont de l'Atlas-Sahel) avec une pente douce modelée par des écoulements à lits encaissés. La morphologie de la région permet de distinguer : (Glangeaud, 1932).

I.3.1 La Plaine

Une zone subsidente à remplissage Mio-plio-quatemaire bordée par deux régions surélevées (Glangeaud, 1932). Elle a une altitude moyenne de 40 à 50 m qui augmente régulièrement vers le piémont de l'Atlas au Sud et vers le Sahel au Nord.

Elle est façonnée de la juxtaposition des sous bassins versants (Figure I.3). Ces derniers se regroupent en quatre ensembles, drainés du Sud au Nord par un réseau hydrographique. Les principaux bassins sont :

- Bassin occidental (O. Nador).

- Bassin du Mazafran.
- Bassin d'El Harrach.
- Bassin oriental (Oued Hamiz et Oued Réghaia).

Les trois sous bassins versants (bassins versants des Oueds Mazafran, El Harrach et El Hamiz) appartiennent en totalité au grand bassin versant des côtières algéroises (02). Par conséquent les exutoires des eaux superficielles qui traversent la plaine sont situés à l'aval de ces trois Oueds, en bordure de la mer méditerranéenne où les eaux se jettent.

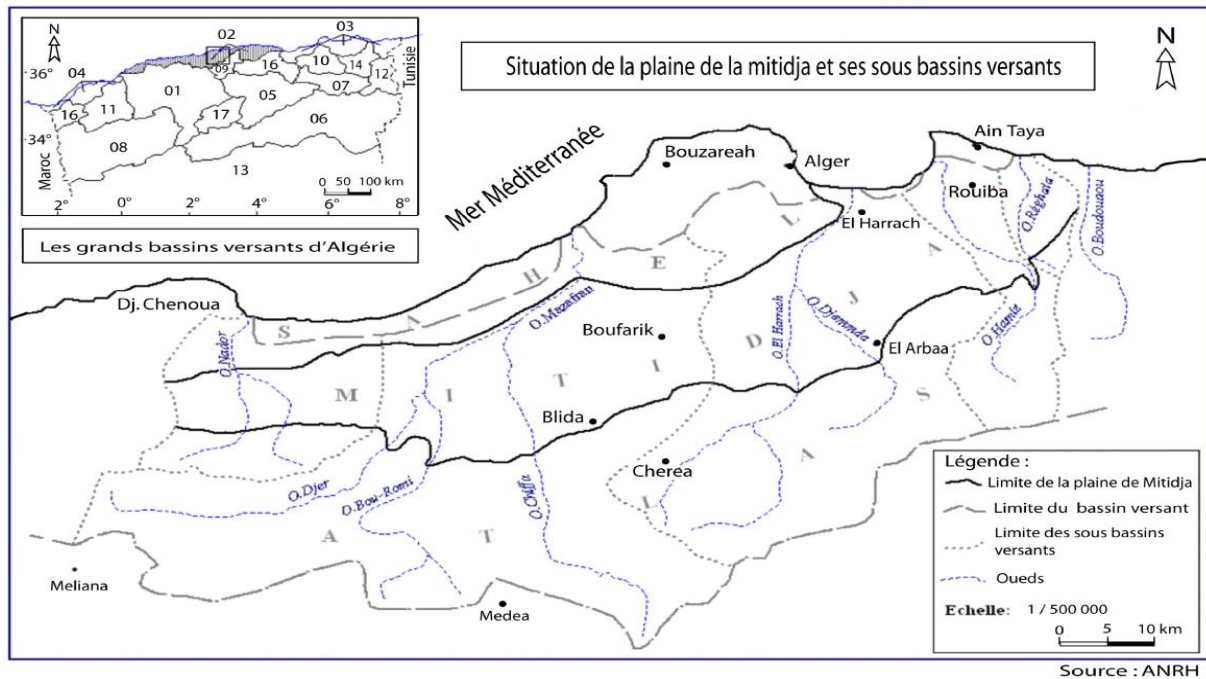


Figure I.3 : Carte de situation des sous bassins versants de la plaine de la Mitidja. (ANRH, 2008)

I.3.2 Le Sahel

C'est la ride sahélienne d'altitude de 200 à 250 m qui constitue une limite continue depuis El Harrach jusqu'à l'oued Nador, excepté une cluse au niveau de l'oued Mazafran. Le Sahel prend une forme anticlinale à pente faible et sépare la plaine de la mer (Glangeaud, 1932).

I.3.3 Le Piémont de l'Atlas :

Il correspond à une zone de déjection à écoulement profond, résultat de l'érosion dynamique du massif ancien. Son altitude moyenne varie de 100 à 150 m, avec un rôle de couverture qui cache le contact structural séparant la plaine de l'Atlas (Glangeaud, 1932).

I.3.4 L'Atlas Blidéen

La chaîne de l'Atlas forme sur 30 Km environ une barrière continue où l'altitude moyenne est de 1400 mètres, certains sommets peuvent atteindre 1600 mètres, les reliefs y sont escarpés et les Oueds très encaissés. La pente atteint par endroits 30 % ce qui favorise surtout

l'écoulement superficiel. Les sommets accusent une direction NE-SW. (Glangeaud, 1932).

L'étude faite par Ait Ouali (2007) a montré que les caractéristiques physiographiques et morphologiques jouent un rôle essentiel dans le comportement hydrologique d'un bassin versant.

D'après le Tableau I.1, tiré de l'étude des caractéristiques physiographiques et morphologiques faite par Ait Ouali (2007), a montré que l'indice de compacité de Gravellius (K_c) varie de 1,5 à 1,8. Cela traduisant une allure rectangulaire (bassins allongés) des bassins d'El Harrach, Hamiz, Réghaia et du Nador, et un bassin à forme ramassé de celui de Mazafran.

Le temps de concentration des eaux de ruissellement, estimé à partir des valeurs de pentes globales, est long ce qui indique une bonne infiltration au détriment du ruissèlement.

Tableau I.1 : Paramètres géomorphologiques des sous bassins versants de la Mitidja

Paramètres Sous Bassins versants	Paramètres géomorphologiques		Paramètres de forme			Paramètres de relief	
	Surface (Km ²)	Périmètre (Km)	Indice de compacité gravellius K_c	Longueur rectangle équivalent (Km)	Largeur rectangle équivalent (km)	Altitude moyenne (m)	Indice de pente globale (I_g) m/km
O. Réghaia	87.70	41.20	1.27	16.68	5.25	55	8.27
O. Hamiz	283.2	102	1,8	38.45	7.36	325.3	19,5
O. El Harrach	1236.3	188.2	1,5	78.30	15.80	430	13,8
O. Mazafran	1900	186	1,18	60.50	31.43	367	17.2
O. Nador	230	89	1,64	38.02	6.04	305	21.5

I.4 Réseau hydrographique

Le réseau hydrographique est constitué d'un ensemble de chevelu hydrographique plus ou moins touffu, et cela ont l'absence d'un grand fleuve malgré la structure synclinal de la plaine. L'ensemble des affluents de ces oueds prend naissance de l'Atlas avec un sens général d'écoulement (Sud -Nord).

L'Oued Mazafran est le résultat de la réunion de trois oueds : Oued Djer, Oued Bou Roumi et Oued Chiffa. Il est considéré comme le plus long Oued avec 65 Km de long, sillonnant une superficie de 1900 Km².

Les écoulements des oueds constituant l'oued principal permettent l'évaluation du débit à l'embouchure de chaque sous bassin versant. Les écoulements des principaux oueds ainsi que leurs principaux oueds sont représentés dans le Tableau I.1 et le Tableau I.2 (figure I.4)

Tableau I.2 : Écoulements des Principaux sous bassins versants de la Mitidja et leurs principaux oueds

Bassins Versants (BV)	Principaux Oueds	Apports (hm ³)	
		période 1913 à 1956	Binnie et Partners et Atkins "1969"
Nador (BV Occidental)	Oued (Nador, Bourkika, Meurad, Bouhardoun) Bouyéersen	28	36
Mazafran (premier sous BV central)	Oued (Djer, Bou Roumi, Chiffa)	289	304
El Harrach (deuxième sous BV central)	Oued (Djemaa, Semar)	370	310
Hamiz et Réghaia (Bassin oriental)	Oued (Hamiz, Réghaia)	50	50

D'après : "Inventaire des ressources en eau de surface - 1969", et le groupement des bureaux d'études Binnie et Partners et Atkins dans le cadre du "Schéma d'aménagement des ressources en eau Alger Sebaou - 1984".

I.5 Les eaux souterraines

Selon une récente étude portant sur la carte des ressources en eaux souterraines du Nord de l'Algérie (ENERGOPROJEKT, 2011), la ressource en eau souterraine renouvelable est évaluée à une moyenne de 259,26 Mm³/an avec 100,02 Mm³/an pour l'année sèche et 555,1 Mm³/an pour l'année humide (période 1929-2004) (Djoudar, 2014).

Bilan d'eau de la nappe est donné par le tableau ci après et qui donne les résultats obtenus dans les études Binn & Partners 1979-80 et Atkins International 1990 après modélisation de la nappe alluviale (tableau I.3).

Tableau I.3 : Bilan d'eau de la nappe alluviale

Bureau d'étude	Entrée hm ³ /an	Sortie hm ³ /an
Etude Binnie Atkins	328	335
Etude Atkins BNEDER	309	309

Source : Programme d'Aménagement Côtier (PAC, 2004)

Le bilan d'eau de la nappe de l'Astien ne peut être connu dans le détail dans la mesure où l'on ne peut déterminer la part du return-flow des eaux d'irrigations et les pertes des réseaux qui vont à cet aquifère.

I.6 L'Agriculture

L'agriculture dans la zone de la Mitidja est très variable et riche, cela est dû à des conditions climatiques très favorables et des sols assez riches, homogènes et hautement fertiles qui convient à une vaste gamme de cultures (Ecrement, 1971) (Dridi et Zemmouri, 2012). Elle représentait avec ses 217 936 ha, 2,6 % de la superficie agricole utile (SAU) du pays mais 45 % des vergers agrumicoles, 21 % du vignoble, 16,5 % de l'arboriculture à pépins et noyaux et 13 % des cultures maraîchères mais plus du quart de celles qui sont pratiquées sous serre, il est vrai peu importantes (MADR, 2003).

Les terres irriguées s'étendant sur 26,5 % de la SAU Les cultures maraîchères dominent plutôt à l'est de la plaine, sur les terres des wilayate de Boumerdès et d'Alger, et surtout à l'ouest, sur celles de la wilaya de Tipasa. (Semmoud et Ladhém, 2015)

Selon Hydrotechnic corporation (1976) on distingue 4 type de sols irrigables et ce en fonction de leurs qualités :

- meilleurs sols	43 730 ha
- sols de bonne qualité	55 555 ha
- sols de qualité moyenne	5 270 ha
- sols assez pauvres	9 795 ha
Soit un Total de :	114 350 ha

I.7 L'industrie

La majorité des activités industrielles sont regroupées au Centre et à l'Est de la plaine (l'Arbaa, Rouiba, Blida, El-Harrach, Boufarik,...) avec des pôles industriels de Rouiba et de Réghaia. Les industries rencontrées dans la plaine sont (MRE, 2002) :

- Mines et installation de traitement de minerais.
- Industrie de transformation de fer et autres matériaux.
- Industries chimiques des silicates d'alumines.
- Industries alimentaires.
- Industries transformatrices des résidus végétaux et animaux.
- Industrie de transformation de combustibles.
- Industrie de la cellulose et du papier...etc.

I.8 L'Élevage :

D'après le Bureau National des Études pour le Développement Rural (BNEDER 1979 in Mimouni, 2010), le nombre total du cheptel à cette date est représenté dans le tableau 3. Pour les ovins, on remarque que leur distribution est concentrée dans la partie centre est de la Mitidja (Tableau I.4).

Tableau I.4 : Récapitulatif de la production animale

Productions	Quantité
Bovins	18 576
Dont vaches laitières	9 088
Ovins	37 912
Aviculture chair (capacité instantanée)	2 942 700
Aviculture ponte (capacité)	457 920
Dindes (capacité instantanée)	178 000
Cuniculture (capacité instantanée)	230
Apiculture (Ruches)	56 583

I.9 Démographie et urbanisme

La population totale de la plaine estimée par Binnie & Partners, en 1985 était de 1 077 000 habitants avec une densité de 8.3 hab. /km² et un taux d'occupation moyenne par logement ou habitation égal à 7. Il est passé à 2 millions d'habitants en 1998 avec une densité de 60 hab. /km². D'après les données de l'ONS de 2008 la population de la Mitidja est passée

à 5 384 175 habitants avec une densité de 1287.3 hab/Km². Cette expansion c'est faite au détriment des terres agricoles de la zone.

Les principaux pôles de concentration sont : Alger, Blida, Chiffa, Soumaa, Boufarik, El Affroun, Hadjout, Dar-El-Beida et EL-Harrach. La population se trouve aussi concentrée autour de zones industrielles (Mimouni, 2010).

Le phénomène d'urbanisation progressive des terres agricoles pose un grave problème s'est énormément accentué ces toutes dernières années au sein de la plaine (PAC, 2004).

I.10 Risque sismique

La zone PAC est caractérisée par la présence du bassin quaternaire de la Mitidja qui s'étend depuis El Affroun jusqu'à Boumerdès. Les enregistrements sismologiques faits durant le séisme du 21 mai 2003 ont confirmé la possibilité d'amplification du signal sismique dans le bassin de la Mitidja (Laouami *et al.* 2003 in PAC, 2004). L'allure de la carte (Figure I.4), montre aussi clairement que l'intensité durant le choc principal épouse la forme du bassin de la Mitidja. Par ailleurs, ce bassin est bordé des failles actives majeures.

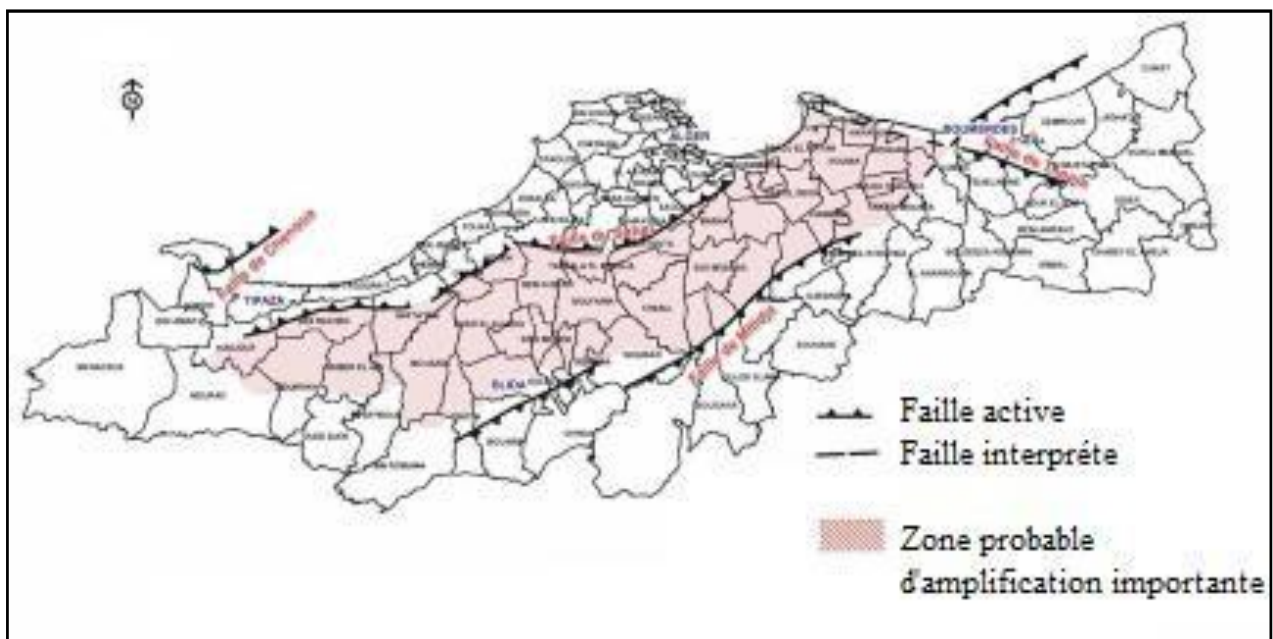


Figure I.4 : Carte des failles sismiques de la zone PAC (échelle originale : 1 : 500.000) (PAC, 2004).

I.11 Conclusion

La plaine de la Mitidja s'étant sur quatre wilayats, comportant ainsi quatre sous bassins versants, avec un réseau hydrographique très fourni. L'analyse morphométrique nous a permis la physiographie et la morphographie des bassins versants, l'indice de compacité montre que les trois sous bassins (B. d'El Harrach, Régaia et Nador) sont de forme allongée donc un temps de concentration des eaux de ruissellement, estimer à partir des valeurs de pentes globales, est long ce qui indique une bonne infiltration au détriment du ruissèlement. Par contre celui de Mazafran a une allure ramassé.

Les altitudes se comprises entre 0 et 1 600 m avec un couvert végétal forestier abondant en amont, et une zone agricole sur la plaine. Ajouter à cela une industrie très variée due

principalement à la richesse de la zone et une population assez dense de 5 384 175 habitants avec une densité de 1287.3 hab/Km².
Les enregistrements sismologiques faits durant le séisme du 21 mai 2003 ont confirmé que ce bassin est bordé des failles actives majeures.

Chapitre II

Hydroclimatologie

Chapitre 2 : Hydroclimatologie

II. Détermination des caractéristiques climatologiques du site

II.1 Introduction

Le climat d'une région donnée est établi à partir des mesures de valeurs statistiques, pour une période donnée (longue ou courte) et par rapport à des données atmosphériques voulues (température, précipitations, humidité, vitesse du vent).

La récurrence des données climatiques définit une classe de climat. On dit alors que cette zone appartient à une classe climatique. Une variation quand bien même est petite, provoque un changement énorme qui touchera tous les domaines, particulièrement l'hydrologie, qui elle-même influe sur le cours de la vie (quantité et qualité d'eau, sécheresse et inondation...etc.)

Les données pluviométriques sont fournies à partir des stations pluviométriques, et implantées dans des endroits spécifiques de la zone d'étude. L'ensemble de ces stations constitue un réseau qui fournit des données spatio-temporelles.

La représentativité des données climatiques dépend de la densité de ce réseau en premier lieu. Le revers de la quantité de données réside dans la précision et la qualité de ces dernières.

II .2. Choix des stations

Le choix des stations destinées pour faire le travail (Tableau II.1) c'est fait par rapport à la fiabilité des données. Chaque étude nécessite des séries de données nombreuses, longues et complètes, chose que nous ne disposant pas tout le temps. Ajouter à cela la probabilité d'existence de différents types d'erreur malgré le contrôle continu effectué au niveau des stations : les erreurs accidentelles et les erreurs systématiques (transcription, de lecture, calage et entretien de l'appareillage....).

Le manque de données est surtout remarqué pour la période de la décennie noire et celle de la période d'après l'indépendance (1962) surtout pour les stations météorologiques situées dans les zones montagneuses et éloignées des agglomérations.

Contrairement aux valeurs erronées, les données exceptionnelles devraient se répéter dans plusieurs stations. Donc, il est indispensable de comparer tous les relevés des stations faisant partie de la même micro-région pour s'assurer qu'ils ne présentent pas de discordance anormale (Meddi H., 2012). Biblio (LABORDE JP, 1993).

Dans notre étude, les séries climatiques provenaient de deux organismes responsables de la gestion de ces données, à savoir l'Agence Nationale des Ressources Hydrique (ANRH) et l'Office Nationale de la Météorologie (ONM).

Les stations prises dans ce travail doivent contenir la série la plus longue possible, ne doivent pas contenir plus de 5 années de lacunes consécutives et moins de 10 % de lacunes sur la série totale à l'échelle mensuelle.

Le déplacement de certaines stations, la fermeture de certaines autres et l'implantation de nouvelles stations a abouti à la création de séries climatiques à longueurs hétérogénéité et variable.

Tableau II.1 : liste retenues des stations du réseau météorologiques

Code station :	Nom station	X Lambert Km	Y Lambert Km	Altitude m	Période de fonctionnement
20306	MEURAD BARRAGE	473.8	349.9	300	1906-2011
20602	HAMIZ BARRAGE	558.55	367.4	130	1906-2011
20607	PEPINIERE ALGER	557.25	374.5	87	1951-2011
20611	Dar El Beida	547.4	379.6	24	1958-2010
21020	AMEUR EL AIN	488.1	352.75	120	1951-2011
21117	CHIFFA	503.8	351.35	110	1951-2011
21208	BENI MERED	514.5	358	140	1951-2011
21403	LARBAA	541.15	362.95	100	1951-2011
21209	BOUFARIK PEPINIERE	518.55	363.4	60	1951-2011
21210	OUED EL ALLEUG	508.5	361.75	55	1951-2011
21022	ATTATBA CAVE	495.45	363.15	60	1968-2011
21116	BLIDA	509.8	352.75	210	1968-2011
21201	FER A CHEVAL	509.95	373.2	10	1968-2011
20325	PONT CW 7 HADJOUT	475.85	358.85	59	1968-2011
21024	SIDI RACHED HELLOULA	486.3	362.3	57	1968-2011
20403	AIN TAGOURAIT	492.05	366.85	60	1980-2011
20405	FOUKA MARINE	504.1	374.4	25	1980-2011
20632	REGHAIA	557.8	382.25	20	1980-2011

La position des stations pluviométriques apparait clairement dans la Figure II.1 présentée ci dessus

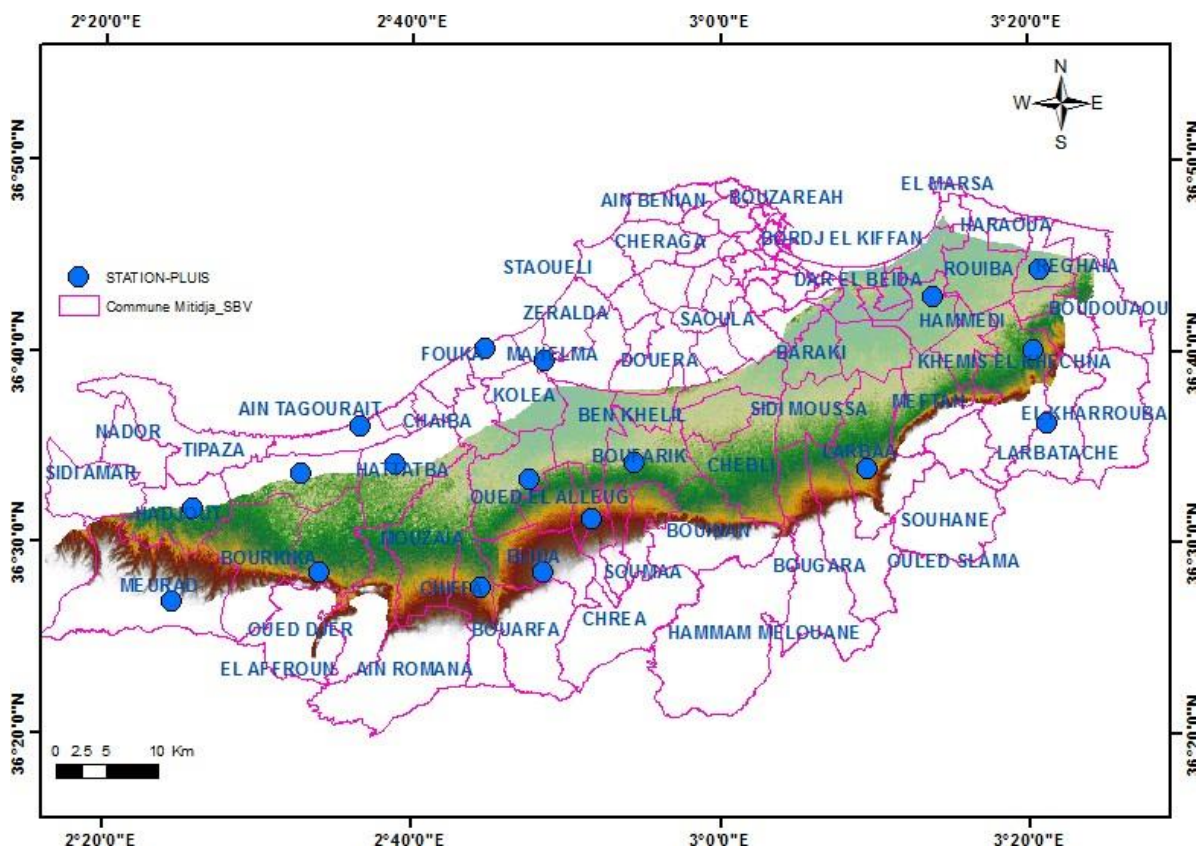


Figure II.1 : Position des stations pluviométriques

II.3 Contrôle et critique des données

Le contrôle des données avait pour but de détecter et éliminer les données contradictoires dans une série de données spatio-temporelle (entre stations voisines et durant la même période). Comblant les lacunes soit par la moyenne des stations voisines ou par la valeur du plus proche voisin. Cette critique a été faite sur toutes les stations du début jusqu'à sa fin de l'année hydrologique. Le remplacement des données manquantes se fait aussi par la méthode de régression, qui doit être linéaire avec un coefficient de corrélation élevé. La linéarité doit être vérifiée à l'aide d'un graphique (double cumul).

II.3.1 Homogénéisation des données

Un grand nombre de tests se trouve sous l'appellation de "tests d'homogénéité" que ce soit des tests paramétriques ou non-paramétriques.

II.3.1.1 Le Simple cumul

Cette méthode consiste à mettre les valeurs observées et cumulées sur l'axe des ordonnées et le temps sur l'axe des abscisses. Un nuage de points se formera et fluctuera autour d'une droite. Ce nuage formera ce qu'on appelle une tendance si la droite formée en fonction du temps contient une ou plusieurs changements de pente. La série est dite homogène si elle ne contient pas de cassure ou changement de pente. L'application de cette méthode est limitée du moment où on ne peut pas différencier entre une hétérogénéité des données et une tendance climatique ((Meddi H., 2012).

II.3.1.2 Le double cumul :

Dans ce cas, il en est de même que le test du simple cumul seulement, la droite des abscisses (du temps) est remplacée par une deuxième station à valeurs cumulées de la même région appelée station de référence. Cette dernière est considérée homogène dès le départ, comme celles des Barrages où les techniciens de l'ANRH confirment l'homogénéité de ces stations. Un alignement quasi parfait implique une similitude de fonctionnement des deux stations. Les barrages de Hamiz et de Meurad sont donc considérés comme homogènes.

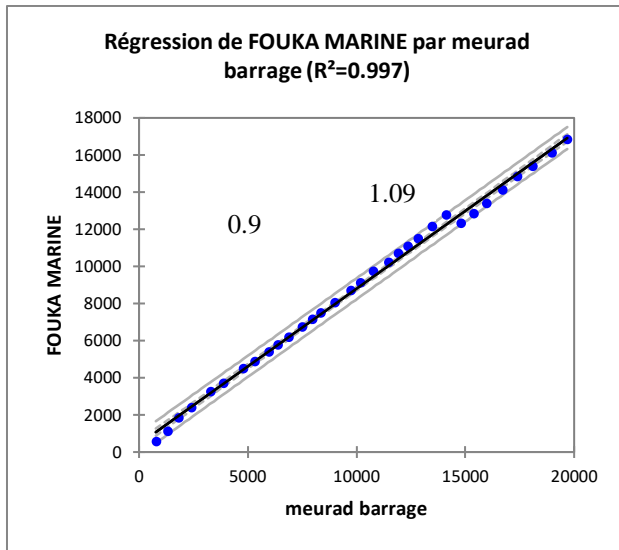
Le travail a été fait par l'application de la régression linéaire de XLstat dans l'Excel. De ce fait, nous avons corrigé les valeurs aberrantes mises en évidence par ce test. À partir de la régression du double cumul, nous avons apporté les corrections aux quatre stations qui ont présenté une hétérogénéité avec la station de Meured Barrage (Beni Mered, Blida, Pont CW7 Hadjout et Fouka Marine) (Figure II.2, 3, 4 et 5).

pendant l'homogénéisation de ces séries se fera en multipliant la série de valeur avant ou après cassure de la droite de régression (selon le cas) par la valeur du rapport correctif : m/m'

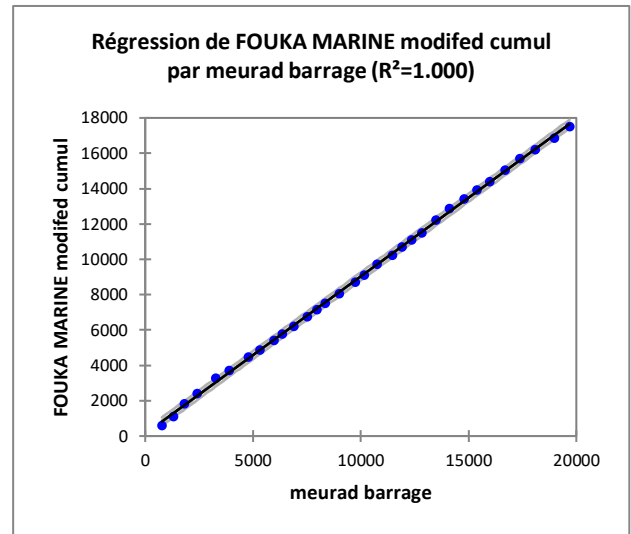
Ou m'/m aux totaux annuels considérés comme inexacts.

m = pente de la droite avant de cassure ou changement de direction brusque ;

m' = pente de la droite après cassure brusque.

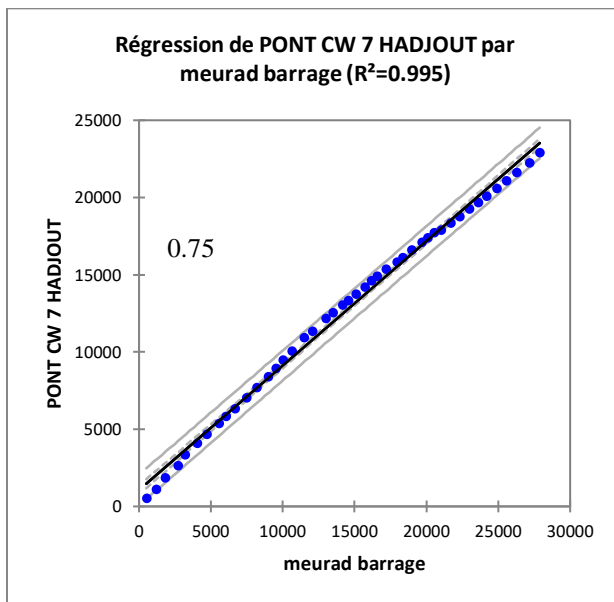


(a)

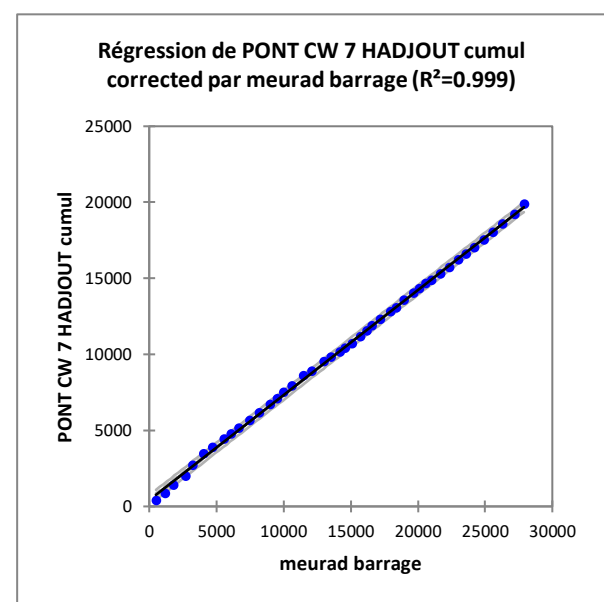


(b)

Figure II.2 : La méthode du double cumul (Fouka Marine) avec la station du de Meured barrage comme station de référence (a) : avant correction des données ; (b) : après correction des données.

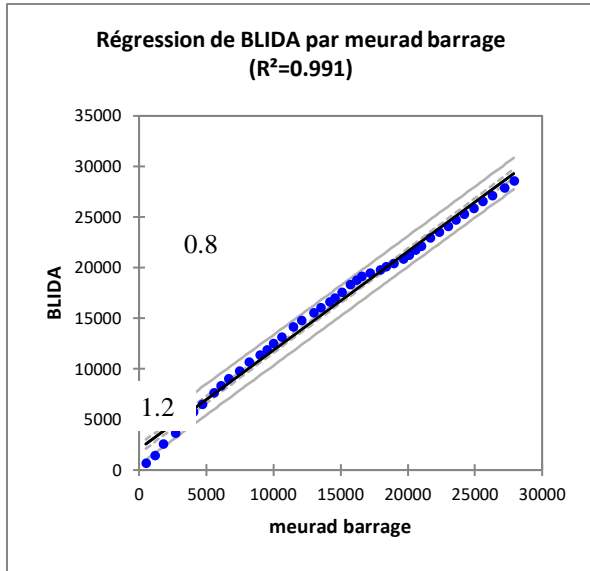


(a)

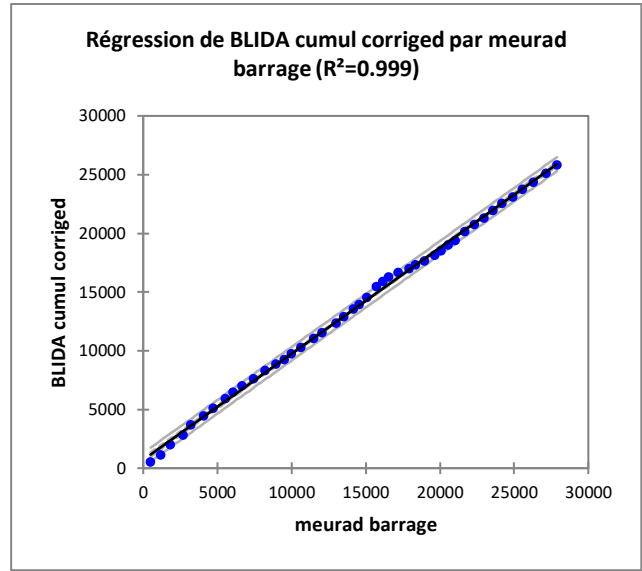


(b)

Figure II.3 : La méthode du double cumul (Pont CW 7 Hadjout) avec la station du de Meured barrage comme station de référence (a) : avant correction des données ; (b) : après correction des données.

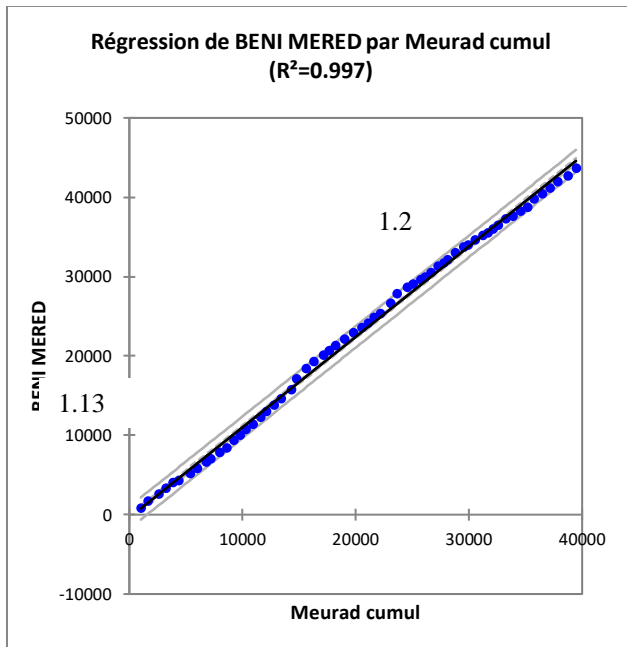


(a)

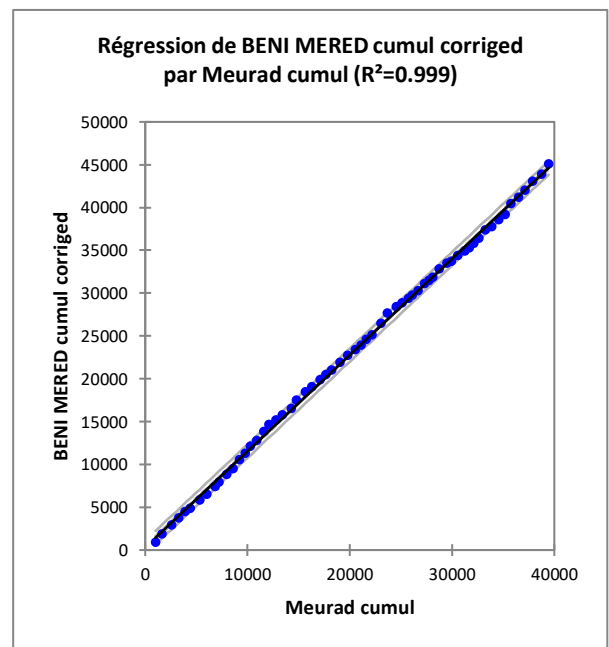


(b)

Figure II.4 : La méthode du double cumul (Blida) avec la station du de Meured barrage comme station de référence (a) : avant correction des données ; (b) : après correction des données.



(a)



(b)

Figure II.5 : La méthode du double cumul (Beni Mered) avec la station du de Meured barrage comme station de référence (a) : avant correction des données ; (b) : après correction des données.

Les stations Oued el Alleug, BouFarik, Chiffa, Ahmeur el Ain, Ain Tagoureit, Sidi Rached Helloula, Fer à Cheval, Attatba ont présenté une bonne homogénéité par la régression du double cumule avec la station de Meured Barrage (station de référence). La même crédibilité a été constatée entre Hamiz Barrage et Dar el Baida, Larbaa et la station de 'Alger pépinière'. Toute fois il faut signaler que le coefficients de détermination R^2 (soit le coefficient de corrélation linéaire) est un indicateur qui permet de juger la qualité d'une régression linéaire. Dans la plus part des cas de cette étude, il a affiché des valeurs de 0.998 (un bon résultat) pour tous les cas. Pour cela qu'il faut le prendre avec précaution.

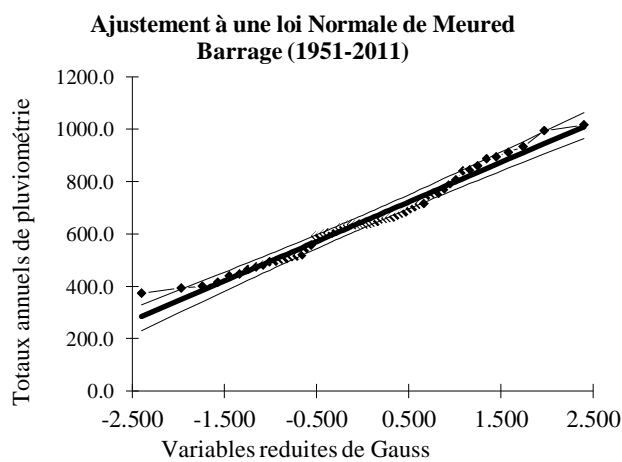
II.3.2 Test de normalité

L'ajustement d'une loi de distribution (normale dans notre cas) à un échantillon de données consiste à estimer les paramètres de la loi (moyenne, variance par exemple) de telle sorte que l'échantillon soit le plus vraisemblable.

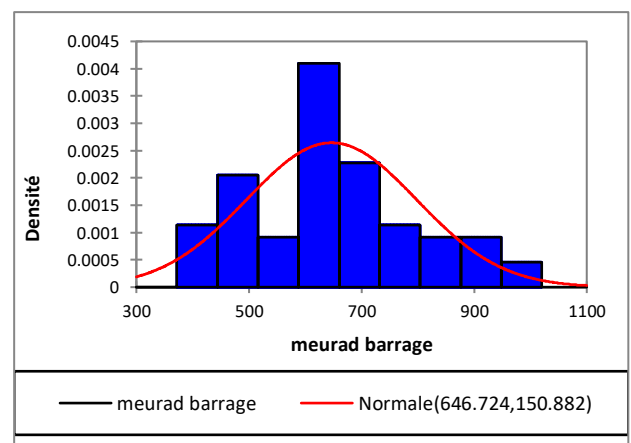
Le teste de la normalité permet de vérifier si les données réelles d'une station suivent une loi normale. Il est considéré comme un cas particuliers des tests d'ajustement. Le test peut être graphique : (1) les données réelles sont tracées sur un papier gausse, la densité par histogramme, (2) ou il peut être analytique, tel que le χ^2 , test de Kolmogorov-Smirnov, histogramme des résidus, boîte à moustaches, graphe QQ-plot, test des coefficients d'asymétrie et d'aplatissement, etc..

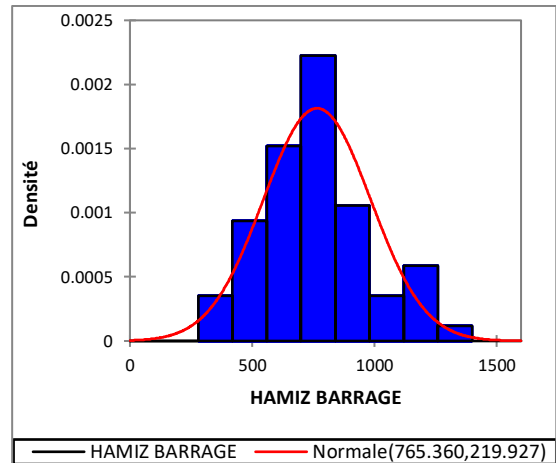
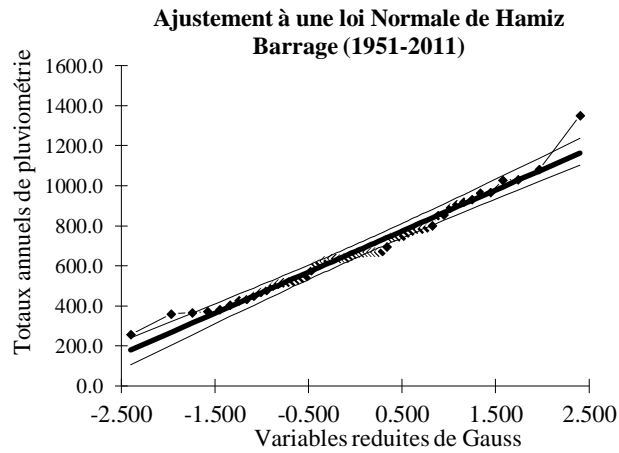
La loi normale est la loi statistique la plus utilisée pour les séries pluviométriques annuelles. Dans notre cas, nous avons appliqué le test graphique sur les stations considérées auparavant et ce en utilisant le logiciel Hydrolab (Laborde,1928) et l'hystogramme, χ^2 et Kolmogorov-Smirnov par la méthode d'estimation des moments par XLStat.

A partir de la figure II.6, on remarque que la loi normale ajuste bien les séries de notre région à un seuil de probabilité égale à 0.05. Les deux testes (χ^2 et Kolmogorov-Smirnov) et étant donné que la p-valeur calculée est supérieure au niveau de signification seuil $\alpha=0.05$, on ne peut pas rejeter l'hypothèse nulle H_0 qui stipule que L'échantillon suit une loi Normale. Cela est vrai pour toutes les stations

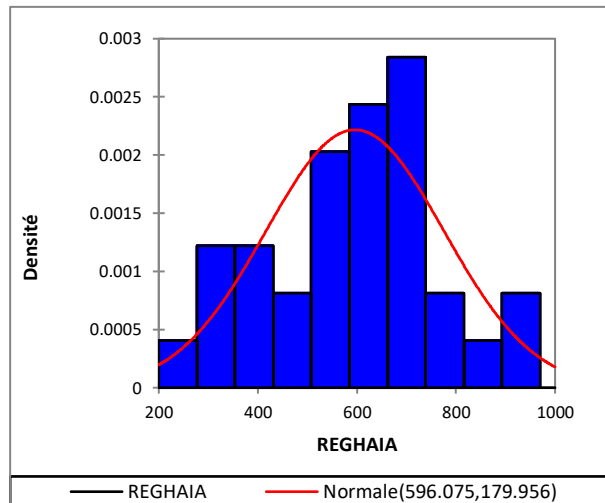
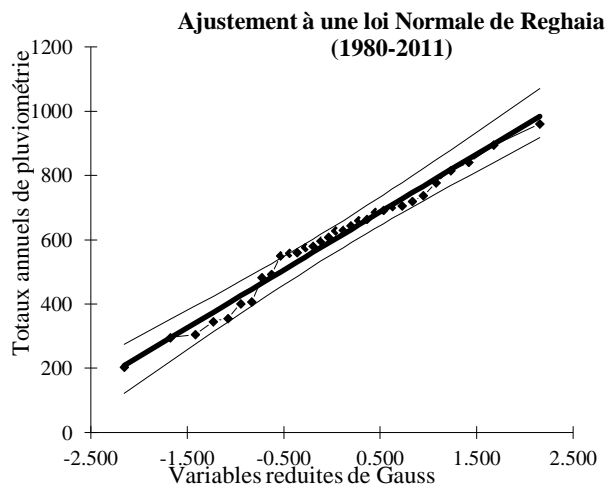


(a)

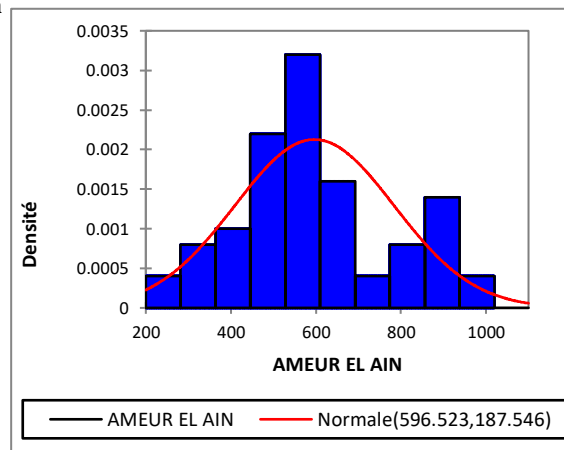
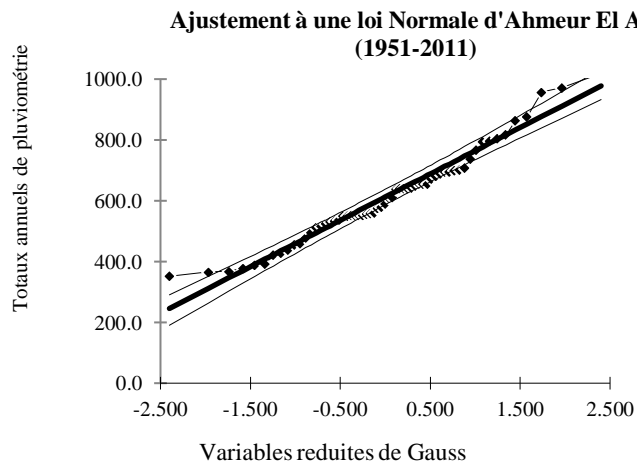




(b)



(c)



(d)

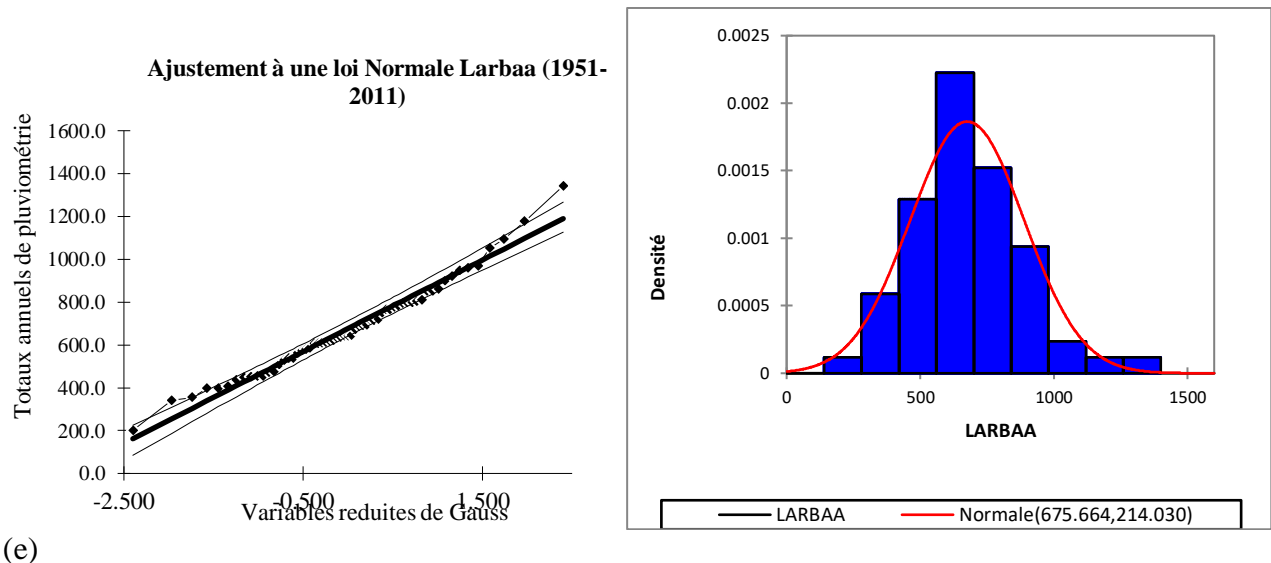


Figure II.6 : Ajustement à une loi normale pour cinq stations de la zone d'étude. (a) Meured Barrage, (b) Hamiz Barrage, (c) Régaïa, (d) Ahmeur El Ain, (e) Larbaa.

II.3.3 Traitement statistique des données :

Pour pouvoir exploiter ces données correctement, une analyse statistique supplémentaire de données s'impose.

II.3.3.1 L'analyse en composante principale (ACP)

L'A.C.P. permet d'explorer les liaisons entre variables et les ressemblances entre individus de n individus observés sur p variables quantitatives. Elle sert à mettre en évidence des similarités ou des oppositions entre variables et à repérer les variables les plus corrélées entre elles. Le but de l'ACP est d'obtenir la représentation la plus fidèle possible du nuage de point en le projetant sur un espace de faible dimension.

Soient p variables aléatoires X_i qui ont été observées n fois :

$$X = \{X_{ij}; i \in I; j \in J\} \quad (II.1)$$

L'analyse du tableau X fait surgir des effets dus aux moyennes. Pour réduire les effets d'hétérogénéité des variables par rapport à leurs moyennes et leurs dispersions, on considère des variables centrées réduites de manière à ce qu'elles soient toutes de moyenne nulle ($X_j = 0$) et de variance unité ($\sigma_j = 1$).

En ACP, les variables projetées sur chaque plan factoriel se trouvent à l'intérieur d'un cercle de rayon unité. Plus une variable est projetée vers le bord du cercle, mieux elle est représentée. Par ailleurs, deux variables bien représentées et proches l'une de l'autre sont corrélées positivement tandis que deux variables qui s'opposent sont corrélées négativement. Une orthogonalité entre deux variables traduit l'absence de corrélation linéaire.

En ACP, le nombre d'axes à retenir est soit en fonction :

- Des valeurs propres les plus grandes dont la somme représente un certain pourcentage de la variance totale ;
- Kaiser propose de ne retenir que les composantes principales dont les valeurs propres sont supérieures à 1.

Généralement, le maximum d'information se trouve dans la 1ère composante. Cette dernière

décrit l'effet de masse. La majorité des stations ont tendance à décrire un ensemble commun. Par contre les deux composantes, la 2ème et la 3ème ont tendance à différencier les stations les plus lointaines et elles sont moins informatives (Khaldi, 2005).

Pratiquer une ACP avec une rotation permet de faire une transformation linéaire des composantes principales.

II.3.3.2 Résultats d'analyse des données

Une analyse d'ACP a été appliquée aux totaux annuels à fin d'étudier la régionalisation des précipitations de notre zone d'étude, avec et sans rotation du type Varimax. Pour les dix-huit (18) stations, nous avons choisi de travailler sur trois (03) composantes celant les critères citer antérieurement. La contribution de ces dernières étaient respectivement de 65,85% ; 7,82 % et 5,51%.

Le tableau (II.2) et la figure (II.7) donnent la répartition des différentes valeurs propres, ce choix est en accord avec le deuxième critère cité antérieurement (valeurs propres > 1). Les trois premières composantes expliquent près de 80 % de la variance totale.

Tableau II.2 : ACP des valeurs propres

	F1	F2	F3
Valeur propre	11.854	1.408	0.992
Variabilité (%)	65.854	7.823	5.510
% cumulé	65.854	73.677	79.187

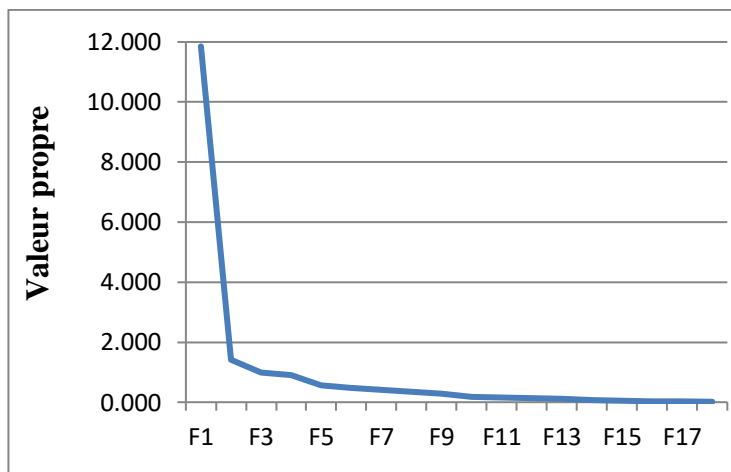


Figure II.7 : Courbe informative des valeurs propres

II.3.3.3 Explication des différents poids en figure

La variance la plus importante est expliquée par la première composante F1 (à 65.85 %). Elle fait apparaître une zone plus ou moins homogène, couvrant le Nord-Ouest de notre zone d'étude (Ain Tagoureit, Fouka Marine, Attatba, Hadjout, Mereud Barrage etvFer à Cheval) (Figure II.7).

La F2 explique 8.83 % de la variance et met en évidence une deuxième zone à l'Est de la Mitidja (Dar el Baida, Regaia, Pépinière Alger, Hamiz, Larbaa). La troisième composante F3 explique la variance par 5.51%. Il apparait dans la figure (II.7) que les stations de Chiffa et de

Blida ont le même comportement. La région est située au Sud-Est de la Mitidja. Ces résultats divisent notre région d'étude en trois zones (Figure 8, 9, 10). Toutefois, il faut rappeler que la variation est plus ou moins légère du fait que toute la zone d'étude appartient à un climat humide Méditerranéen. Nous avons remarqué que l'ACP avec rotation du type Variomax a donné les mêmes résultats que l'ACP sans rotation.

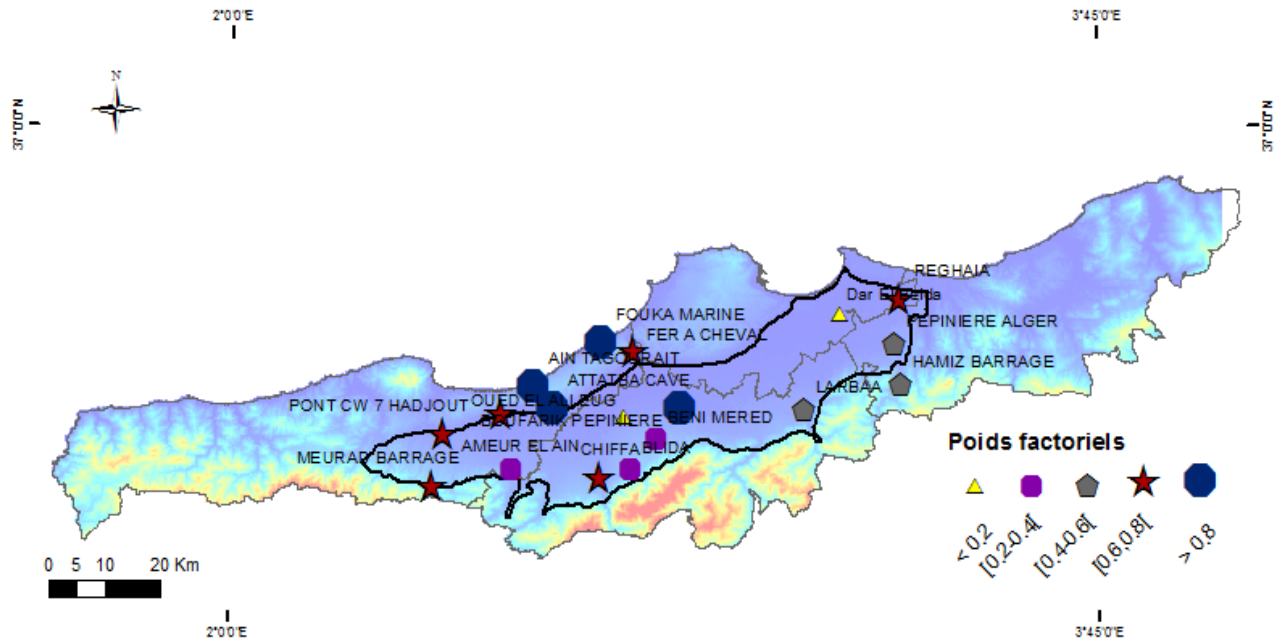


Figure II.8 : Cartographie de la première composante principale

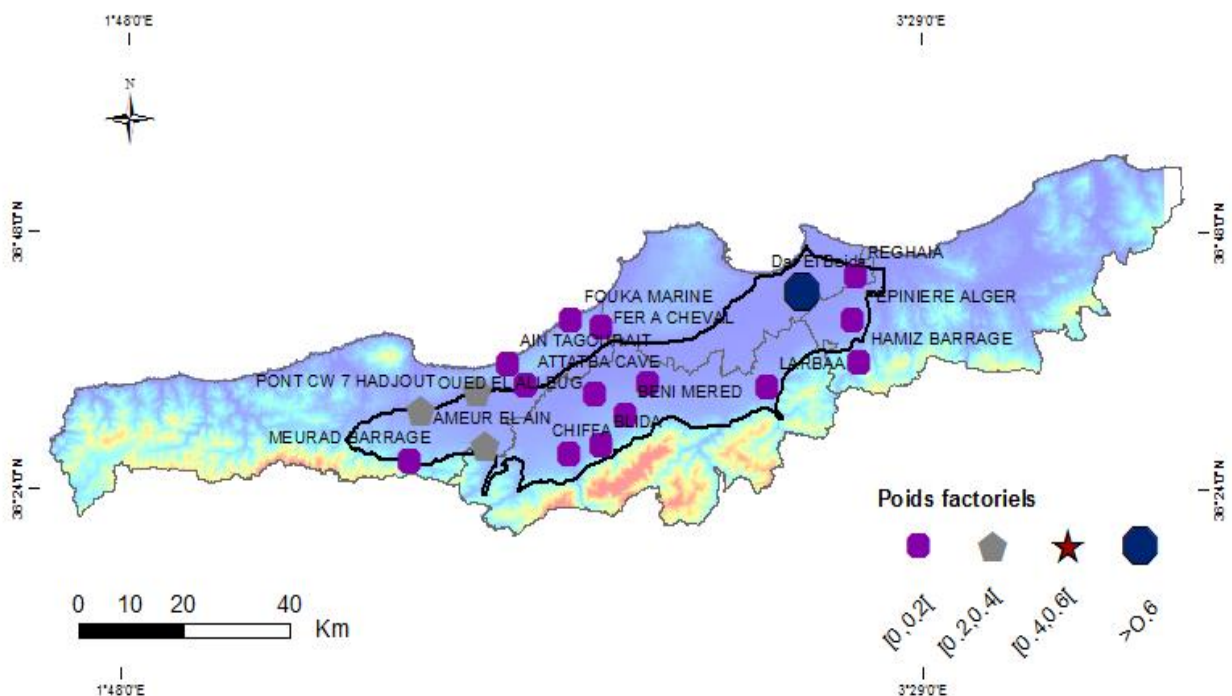


Figure II.9 : Cartographie de la deuxième composante principale

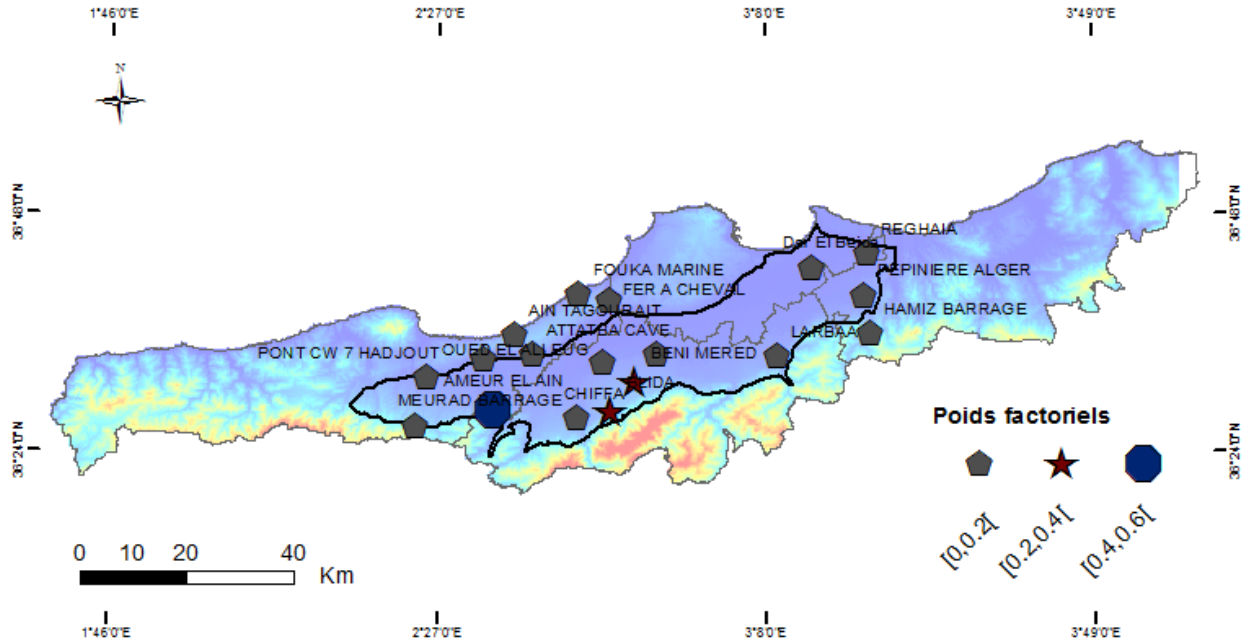


Figure II.10 : Cartographie de la troisième composante principale

II.4 Caractéristiques des pluies annuelles

Sur un cycle de trente ans (1980– 2011), nous allons examiner la variation des précipitations annuelles sur la région d'étude observées aux niveaux des stations. Pour évaluer cette dernière, nous avons défini les caractéristiques descriptives les plus utilisées, pour ainsi dire : la moyenne, l'écart type et le coefficient de variation de nos stations (Tableau II.3). L'étude des variations des précipitations en fonction du temps a montré que la précipitation annuelle la plus élevée est enregistrée pour les stations de Hamiz barrage et Meured Barrage. Toutefois l'orientation de la variation apparaît clairement d'Est en Ouest et la différence (max et min) entre la pluie annuelle est de 277.5 mm. Le coefficient de variation exprimé en pourcentage varie entre 22.67 % et 38.8 % pour les stations de Meurad Barrage et Beni Mered respectivement. Les valeurs enregistrées du coefficient de variation sont faibles et représentent une variabilité pluviométrique faible à modérée.

Tableau II.3 : Caractéristiques des pluies annuelles des stations

Code station	Nom station	X Lambert Km	Y Lambert Km	Altitude m	Moyenne m	Ecart type m	CV %
20306	MEURAD BARRAGE	473.8	349.9	300	615.16	139.47	22.67
20602	HAMIZ BARRAGE	558.55	367.4	130	699.18	181.78	26.00
20607	PEPINIERE ALGER	557.25	374.5	87	590.14	163.27	27.67
20611	Dar El Beida	547.4	379.6	24	638.41	175.20	27.44
21020	AMEUR EL AIN	488.1	352.75	120	576.88	195.55	33.90
21117	CHIFFA	503.8	351.35	110	575.27	136.98	23.81
21208	BENI MERED	514.5	358	140	647.02	251.13	38.81
21403	LARBAA	541.15	362.95	100	638.07	168.39	26.39
21209	BOUFARIK PEPINIERE	518.55	363.4	60	591.40	140.75	23.80
21210	OUED EL ALLEUG	508.5	361.75	55	566.05	190.49	33.65
21022	ATTATBA CAVE	495.45	363.15	60	565.04	135.02	23.90

21116	BLIDA	509.8	352.75	210	560.67	168.39	30.03
21201	FER A CHEVAL	509.95	373.2	10	522.90	143.95	27.53
20325	PONT CW 7 HADJOUT	475.85	358.85	59	475.15	150.99	31.78
21024	SIDI RACHED HELLOULA	486.3	362.3	57	496.94	141.13	28.40
20403	AIN TAGOURAIT	492.05	366.85	60	506.09	122.79	24.26
20405	FOUKA MARINE	504.1	374.4	25	559.65	137.87	24.63
20632	REGHAIA	557.8	382.25	20	596.08	179.96	30.19

II.5 Évaluation de la lame d'eau moyenne précipitée sur la plaine

Trois méthodes permettent de déterminer la lame d'eau précipitée en millimètres sur l'ensemble de la plaine : La méthode de moyenne arithmétique, la méthode de moyenne de Thiessen, et la méthode des isohyètes.

II.5.1 Moyenne arithmétique des stations

Cette méthode est la plus simple, elle consiste à calculer la moyenne arithmétique des précipitations moyennes annuelles P_i , données par une période déterminée de stations existantes. (Tableau II.3)

$$\bar{P} = \sum_{i=1}^x \frac{P_i}{N} \quad (\text{II.2})$$

Pour la période d'observation la moyenne annuelle de la lame d'eau tombée à l'échelle de la plaine est de l'ordre de **603.16** mm/an

Pour l'adéquation de ce modèle on calcule Er , le taux d'erreur en pourcentage si :

N représente le nombre de stations sur le bassin,

σ L'écart type sur les valeurs de précipitations,

\bar{P} : La moyenne des valeurs

C_v , le coefficient de variation : $C_v = 100 \sigma / \bar{P}$

Donc : $Er = C_v / N$,

On obtient pour la période d'observation une erreur de : 6.61 %

II.5.2 Méthode de Thiessen

C'est une méthode arithmétique basée sur le découpage géométrique du bassin versant sous forme de polygones. Pour chaque station on détermine, grâce au réseau de médiatrices, des segments joignant les postes deux à deux. Ainsi, une pluviométrie (P_i) et une zone d'influence (S_i) sont affectées à chaque poste. En fin et pour obtenir la lame d'eau tombée, La somme des volumes d'eau précipités au niveau de chaque polygone sera divisée par la surface totale du bassin versant (Tableau II.4).

$$P = \frac{\sum_{i=1}^x P_i S_i}{\sum_{i=1}^x S_i} = \frac{V_t}{S_t} \quad (\text{II.3})$$

V_t : Volume total tombé sur le bassin versant.

S_t : Surface totale du bassin versant.

p_i : Précipitation moyenne annuelle de la station à l'intérieur du polygone

s_i : Surface du polygone considéré.

Pour cette méthode la moyenne annuelle de la lame d'eau tombée à l'échelle de la plaine est de l'ordre de **600** mm/an.

II.5.3 Méthode des isohyètes

Consiste à tracer des isohyètes d'un bassin versant à partir des pluies ponctuelles. La surface comprise entre deux courbes successives est calculé, enfin on affecte la pluviométrie moyenne déterminée entre deux courbes successive à chaque surface. On obtient ainsi le volume partiel. Cette méthode tient compte d'une variation linéaire (horizontale) et verticale (suivant l'altitude) (Tableau II.4).

$$\bar{p} = \frac{\sum_{i=1}^x P_i S_i}{S_t} \quad (\text{II.4})$$

\bar{p} : Lame précipitée.

p_i : Précipitations inter isohyètes en mm.

s : surface inter isohyète en Km².

S_t : Superficie totale du BV en Km².

Tableau II.4 : Récapitulatif des méthodes de détermination de la lame d'eau précipitée dans les sous bassins versant de la Mitidja

SBV	THIESEN		Moy. Arithmétique	Isohyètes		Moyenne
	Si (km ²)	P(mm)	P(mm)	Si (km ²)	P(mm)	P(mm)
Hamiz	802,9	640,6	647,2	802,9	700,0	662,6
Harrach	1194,7	638,1	638,1	1194,7	599,2	625,1
Mazafran	1826,2	576,7	558,7	1826,0	586,6	574,0
Nador	260,3	576,1	568,6	260,3	555,9	566,9
Total	4084	600,0	603,2	4084	610,4	604,5

Le même ordre de grandeur est obtenu avec ces méthodes, cela confirme l'homogénéité du climat dans cette zone avec une précipitation moyenne de 604.5mm.

II.6 Précipitation moyenne mensuelle

La réalisation des valeurs moyennes mensuelles est faite durant la période 1980-2011 (Figure II.11), sur 18 stations, selon la disponibilité des données et l'homogénéité des séries de l'information disponible.

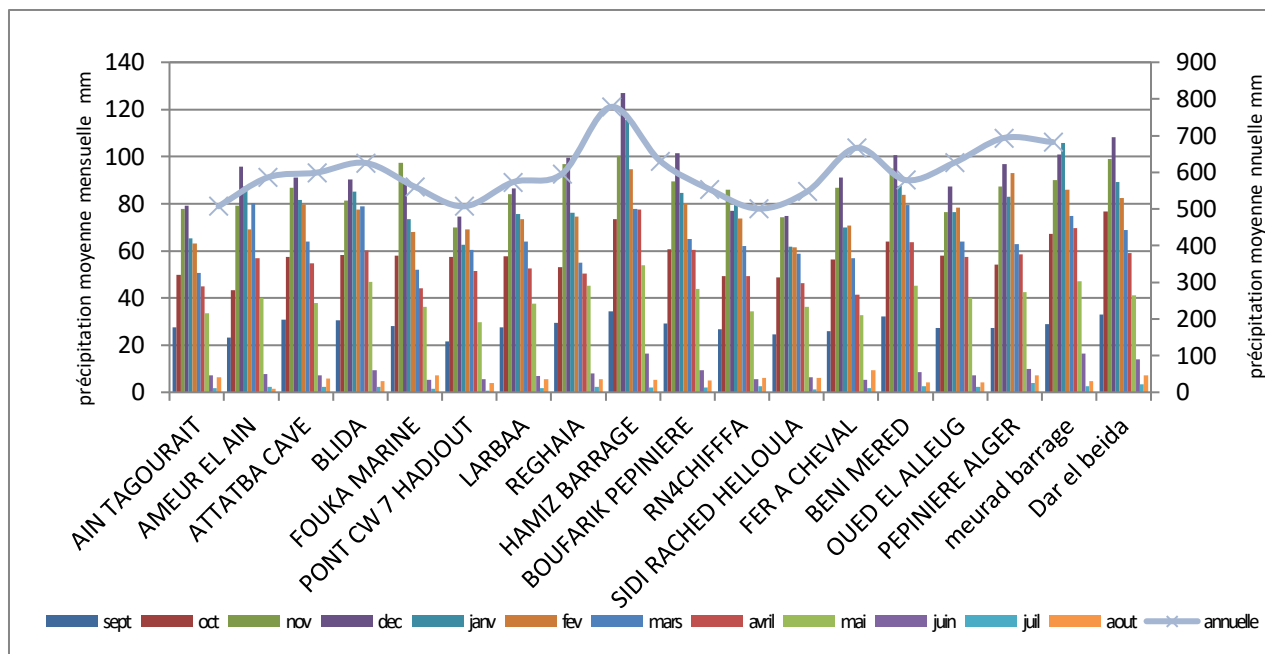


Figure II.11. : Précipitations moyennes mensuelles de la plaine de la Mitidja par station (1980-2011)

Un maximum de pluie est enregistré en décembre suivi de celui en janvier (127 mm, 115.5 mm) et le minimum en juillet (0.8 mm). Ajouter à cela, une diminution de la pluviométrie d'Est en Ouest. L'évolution de la précipitation mensuelle moyenne des 12 mois suit la moyenne annuelle des stations (Figure II.11)

II.6.1 Variation des moyennes mensuelles des précipitations

La réalisation du tableau des valeurs moyennes mensuelles est faite entre 1980 et 2011 (Figure II.12), sur 18 stations, selon la disponibilité des données et l'homogénéité des séries de l'information disponible.

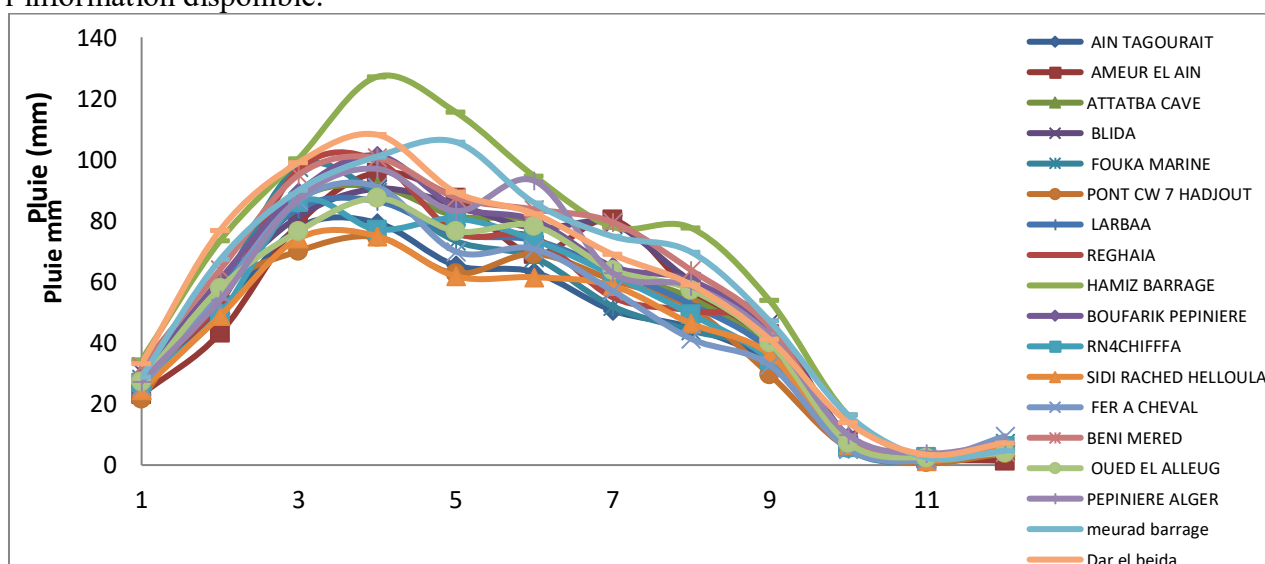


Figure II.12 : précipitations moyennes mensuelles des stations par mois (1980/2011)

On constate une faible dispersion des valeurs obtenues par les trois méthodes. Pour le bassin versant étudié, la lame moyenne précipitée est de 604,5mm.

II.6.2 Variation saisonnière des précipitations

Le calcul saisonnier des pluies à partir des précipitations moyennes mensuelles (figure II.13), nous indique la répartition saisonnière des précipitations de la plaine. Ainsi, les stations du Hamiz Barrage et Dar El Beida se démarquent par les valeurs les plus élevées et qui atteignent respectivement 300.7 mm et 283.9 mm en automne.

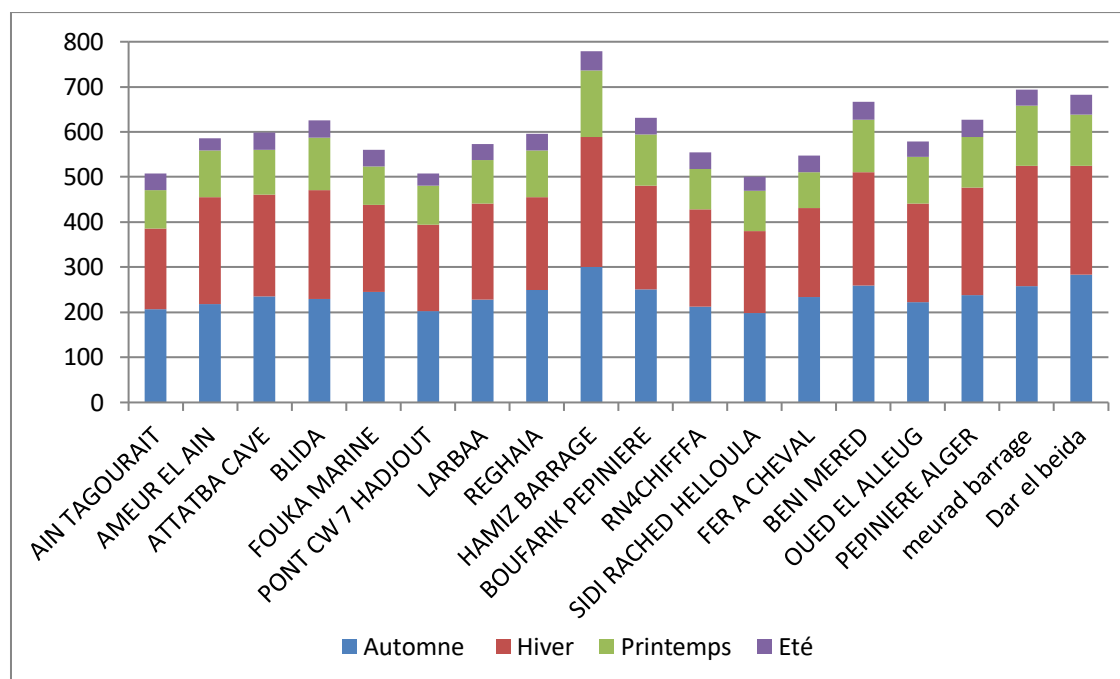


Figure II.13 : Répartition saisonnière des précipitations

II.7 Température

Le facteur thermique est important dans la détermination du caractère climatique et de son évolution dans une région donnée. Deux stations sont prises en considération où le nombre d'observation est supérieure à 30, celles de Dar El Beida (1982-2007) et de Soumaa (période 1994-2009). L'évolution de la température est représentée dans la Figure II.14. Les valeurs les plus élevées sont observées essentiellement pendant la période estivale (juin-septembre) avec des températures variant de 16 à 32,4°C. Les températures les plus basses sont observées pendant la période hivernale (décembre à mars) avec un minimum pendant le mois de Janvier de l'ordre de 5,6 °C.

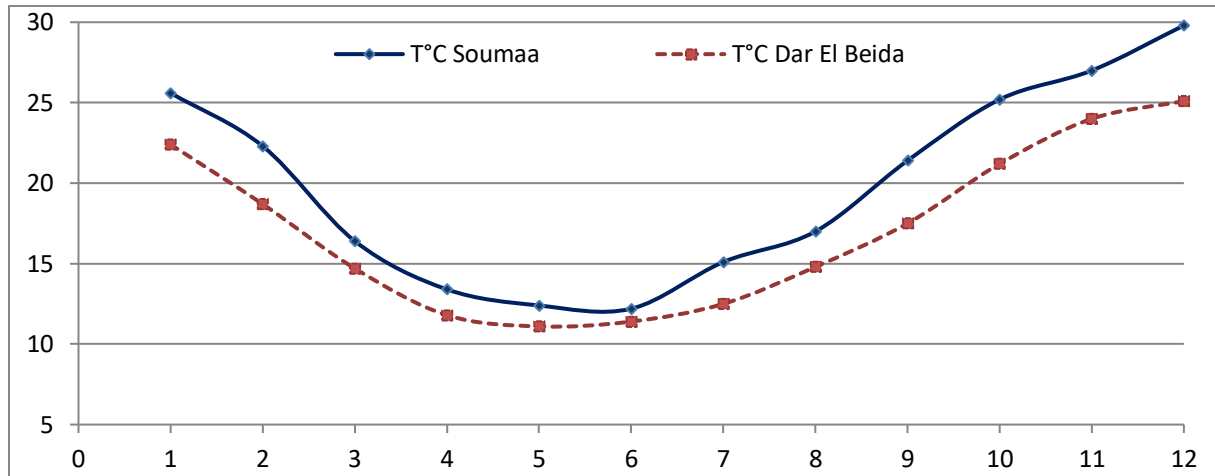


Figure II.14 : Variation des températures moyennes mensuelles des stations de Dar El Beida (1982-2007) et Soumaa (1994-2009)

II.8 L'évapotranspiration

L'évapotranspiration potentielle ETP est la quantité d'eau évaporée par un sol suffisamment approvisionné en eau et transpirée par des plantes couvrantes et non malades. Cette eau est donc rejetée dans l'atmosphère. Elle est exprimée en mm et réellement très difficile à évaluer par la complexité du phénomène et le nombre important de paramètre qui intervient dans son calcul tel que la T_c° , l'Humidité de l'air, le vent, le rayonnement, la vapeur saturante, etc. L'évapotranspiration réelle ETR est une fraction de l'ETP. Elle dépend du stock de l'eau dans le sol, du stade phénologique de la plante et des conditions climatiques.

II.8.1 Évapotranspiration potentielle mensuelle

II.8.1.1 Formule de THORNTHWAITE

La formule de THORNTHWAITE est très utilisée de part sa facilité d'utilisation car elle n'exige en dehors de la latitude de la station, que la température moyenne mensuelle.

$$ETP_c = 1.6 \left(\frac{10T}{I} \right)^a * K \quad (II.5)$$

ETP_c : l'évapotranspiration potentielle mensuelle corrigée en mm.

T : température moyenne mensuelle en °C

I : Indice thermique annuel, correspond à la somme des Indices de chaleur mensuels

K : coefficient d'ajustement mensuel voir (**annexen°www**).

$$a = 6,75 \cdot 10^{-7} \cdot I^3 - 7,71 \cdot 10^{-5} \cdot I^2 + 1,7921 \cdot 10^{-2} \cdot I + 0,49239$$

$$i = \left(\frac{T}{5} \right)^{1.514} \quad (II.6)$$

Le Tableau II.5 donne un récapitulatif des valeurs corrigées des ETP des deux stations de Soumaa et de celle de Dar Al Baida, par la méthode de Thornthwaite en fonction des températures des stations respectives.

Tableau II.5 : Présentation des valeurs moyennes mensuelles des ETP corrigées par la méthode de Thornthwaite ("a" Station de Soumaa et "b" Station de Dar El Beida I=18,44 ; a=0,8)

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Annuel
"a" T (°C)	25,65	22,20	16,63	13,1	12,32	13,28	15,17	17,14	21,36	25,27	26,96	29,92	19,94
"a" ETP (mm) corrigée	133,54	111,34	77,33	62,99	60,74	63,23	85,70	101,48	134,44	156,19	167,68	171,28	1326
"b" T (°C)	22,40	19,10	14,80	11,60	10,80	11,30	12,40	14,70	17,80	20,90	24,10	25,00	17,08
"b" ETP (mm) corrigée	120,00	98,05	70,08	55,72	54,33	55,15	72,28	89,13	115,24	133,06	152,54	147,18	1163

L'évapotranspiration potentielle annuelle corrigée de la station de Soumaa est de 1326 mm alors que celle de la station de Dar El Beida est de 1163 mm.

La Figure II.15 nous informe sur la période sèche qui commence du mi- mai jusqu'à la mi-septembre. C'est une période où l'ETP devient plus grande que l'eau dans le réservoir sol et la pluie précipitée. Le maximum de l'ETP sera enregistré ou l'amplitude entre la courbe de la T°C et celle de la pluie est la plus grande.

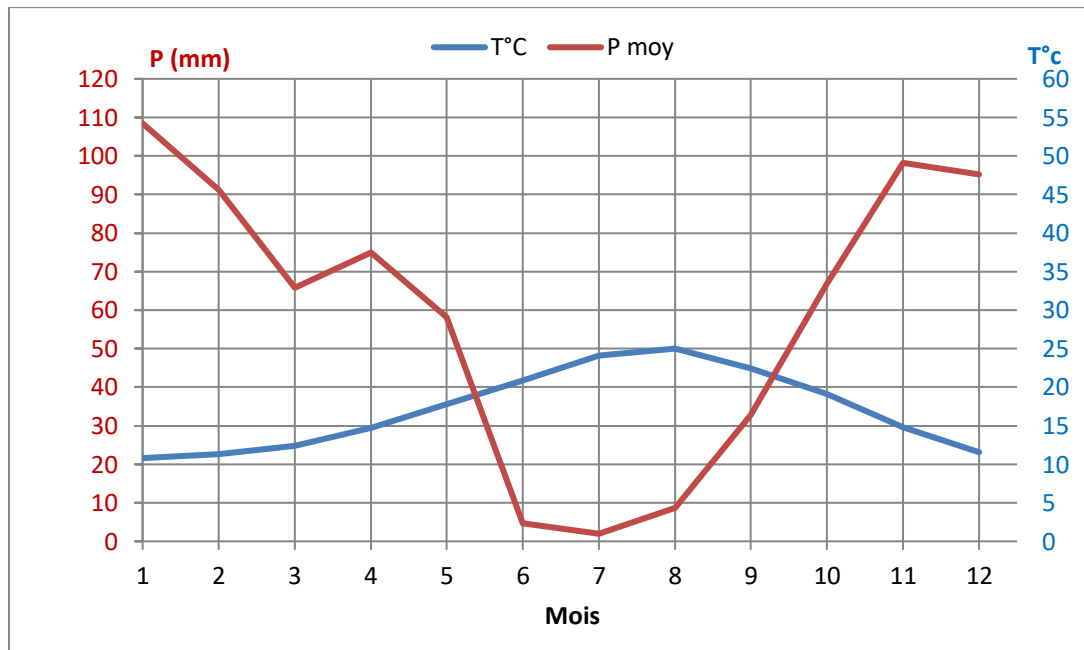


Figure II.15 : Diagramme Ombrothermique de la station de Dar El Beida

II.8.1.2 Formule de TURC

Deux formules de Turc existent, une pour le calcul de l'ETP et l'autre pour le calcul de l'ETR.

ETP TURC

$$ETP_{mm/mois} = 0.40 \frac{t}{t+15} (I_g + 50) \quad (II.7)$$

t : La température moyenne du mois ou de 10 jours.

I_g : L'ensoleillement moyen pour un mois ou 10 jours

Pour le mois de février, le coefficient 0.40 deviendra 0.37.

D'autre part, si l'humidité relative moyenne **hr** exprimée en % pendant le mois, est inférieure à 50%, on doit apporter une correction à la formule précédente.

$$ETP_{mm/mois} = 0.40 \frac{t}{t+15} (I_g + 50) + \left(1 + \frac{50-hr}{70}\right) \quad (II.8)$$

Pour la station de Dar El Baida zone d'étude, l'ETP calculée est de l'ordre de **1235,9** mm.

ETR TURC

Pour la formule de l'ETR, elle ne dépend que de la pluviométrie moyenne annuelle en mm (P), de la température moyenne annuelle (T°C) et d'un paramètre L qui, lui aussi, dépend de la température. Où

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

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}} \quad (II.9)$$

II.8.1.3 Méthode de Coutagne

$$ETR = P - ZT^2 \quad (II.10)$$

II.9 Essai de bilan hydrologique :

II.9.1 Estimation de la lame ruisselée :

Le ruissellement est estimé à partir des débits journaliers récupérés au niveau des stations hydrométriques, mais, la mauvaise qualité des données et l'arrêt complet de certaines stations hydrométriques nous obligent à utiliser la formule ci-dessous qui permet d'évaluer la lame ruisselée à partir de la lame précipitée P (mm) et l'ETP (Tixeront Berk aloff).

$$R = \frac{P^3}{3ETP^2} \quad (II.11)$$

R : Lame ruisselée (mm) **P** : Lame précipité (mm)

ETP : Évapotranspiration (mm)

II.9.2 Estimation de l'infiltration

L'infiltration est évaluée à partir de l'équation du bilan ci-dessous ;

Où

$$P = ETR + R + I + \Delta S \quad (II.12)$$

$$I = P - (ETR + R) - \Delta S \quad (II.13)$$

P : Lame précipitée en mm.

ETR : Évapotranspiration réelle en mm.

R : Lame ruisselée en mm.

I : Lame infiltrée en mm.

ΔS : Variation de la réserve en mm.

Cette dernière (ΔS) devient négligeable devant une période d'observation de longue durée (supérieur à 30 ans), avec une succession de périodes humides et sèches sur l'intervalle d'observation (Maurice Grisoni ; Jacques Decroux, 1972). (Annexe Tableau I.1, I.2).

CHAPITRE III

Bassin versant et réseau hydrographique

Chapitre 3 : Bassin versant et réseau hydrographique

III Introduction

La Mitidja appartient au grand bassin hydrographique côtier Algérois (02), et qui regroupe quatre bassins versants. Sa situation géographique lui procure une bonne précipitation l'aidant ainsi à constituer un potentiel hydrique global satisfaisant. Ces ressources en eau, que ce soit de surface ou souterraine, constituent un réservoir essentiel pour l'alimentation en eau potable, l'irrigation et l'industrie.

III.1 Bassins versants et réseau hydrographique

L'ensemble des cours d'eau et leurs affluents permanents ou temporaires d'une région d'étude constituent son réseau hydrographique, par lesquelles convergent toutes les eaux qui ruissellent vers un seul point de vidange du bassin versant appelé "exutoire".

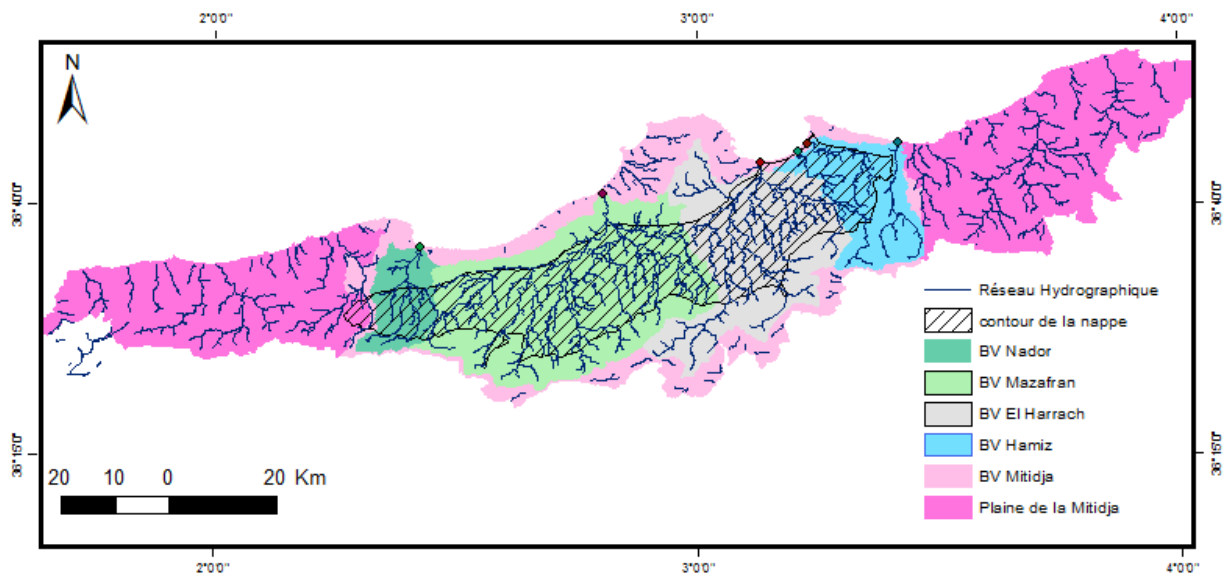


Figure III.1 : Présentation du réseau hydrographique des Bassins versants

La Mitidja est constituée de quatre (04) sous bassins, chacun est caractérisé par un ensemble de paramètres géomorphologique propre à lui.

Tableau III.1 : Paramètres géomorphologiques des sous bassins versants de la Mitidja

Paramètres	Paramètres géomorphologiques		Paramètres de formes			Paramètres de relief	
	Sous bassins versants	Surface (Km ²)	Périmètre (Km)	Indice de compacité gravellus Kc	Longueur du rectangle équivalent (Km)	Largeur du rectangle équivalent (Km)	Altitude moyenne (m)
O. Réghaia	87.7	41.2	1.27	16.68	5.25	55	8.27
O. Hamiz	283.2	102	1.8	38.45	7.36	325.3	19.5
O. El Harrach	1236.3	188.2	1.5	78.3	15.8	430	13.8
O. Mazafran	1900	186	1.18	60.50	31.43	367	17.2
O. Nador	230	89	1.64	38.02	6.04	305	21.5

D'après le tableau III.1, le bassin versant de Mazafran est le plus grand, avec une surface de 1900 Km², long et ramassé (Kc=1.18). le plus petit bassin est celui de Réghaia avec 87.7 Km². Tous les bassins, sauf celui de Mazafran, sont allongés.

L'ensemble des affluents et des oueds de la Mitidja, prend naissance de l'Atlas avec un sens général d'écoulement (Sud -Nord).



Figure III.2 : Chevelu hydrographique et principaux bassins versants (Source ANRH 2008)

D'après la carte du réseau hydrographique (figure III.2), on constate que le bassin versant occidental (Réghaia-Hamiz) à deux grands Oueds distincts qui sont respectivement Oued Reghaia et Oueds Hamiz. Le bassin versant d'El Harrach, d'où l'appellation de Oued El Harrach, résulte de la jonction des deux Oueds : Oued Smar et Oued Djemaa qui à une direction Sud-Nord. Comme le bassin versant du Mazafran est le plus large parmi les autres, il est le résultat de la confluence de plus ou moins grands Oueds : Oued Djer, Oued Bouroumi et Oued Chiffa. Par ailleurs, la jonction d'Oued Bourkika, Oued Meurad, Oued Bouardoun et Oued Bou-Yesen donnent naissance à Oued Nador, le bassin occidental de la plaine de la

Mitidja (Tableau III.2).

Tableau III.2 : Tableau récapitulatif des principaux Oueds des Bassins versants

Bassins versants (BV)	Oueds
Hamiz et Réghaia (Bassin Oriental)	Oued Hamiz, Réghaia.
El Harrach (1^{ème} sous BV Central)	Oued Djemaa, Smar.
Mazafran (2^{er} sous BV Central)	Oued Djer, Bouroumi, et Chiffa.
2^eNador (Bassin Occidental)	Oued Bourkika, Meurad, Bouardoun, Bou Yésen.

À la fin du siècle dernier, un canal a été construit pour détourner les eaux de l'oued Djer vers l'oued Bou Roumi.

- ✓ L'oued Chiffa et l'oued Bou Roumi confluent pour former l'oued Mazafran.
- ✓ L'oued Fatis, qui draine une partie importante de la partie centrale de la plaine, conflue avec l'oued Mazafran.
- ✓ L'oued Djemma conflue avec l'oued El Harrach.
- ✓ Plus à l'Est, l'oued Hamiz se jette dans la mer près de Bordj El Kiffan.
- ✓ L'oued Reghaïa, de moindre importance que les autres, rejoint la mer par une cluse se situant dans le Petit Sahel.

Le tableau III.3 montre clairement que le bassin versant du Mazafran est celui qui a plus d'affluents vu sa grande surface suivi par celui d'El Harrach

Le bilan des écoulements de ces oueds et qui parcourent la Mitidja entre la période 1913 à 1956 est le suivant (Ait Ouali, 2006) :

Tableau III.3 : Bilan des écoulements des oueds

Oued	Bilan d'écoulement million de m3
Mazafran	389
El Harrach	370
Hamiz	50
Nador	28

III.2 Ressources superficielles

On compte plusieurs barrages sur la plaine de la Mitidja où sont emmagasinées les eaux de surfaces. La capacité présentée dans le tableau III.4 représente la capacité initiale sans traitement du problème d'envasement qui, d'après les experts de l'ANBT n'est pas critique vu que la plupart majorité de ces derniers sont récents.

Tableau III.4 : Barrages de la Mitidja et leurs capacités

Barrage	Wilaya	Capacité Hm3
Keddara	Boumerdés	145.6
Hamiz	Boumerdés	14
Bouroumi	Blida	188
Meurad	Tipaza	1.2
Boukerdane	Tipaza	97

III.3 Ressources en eau souterraine

Les ressources de la zone de la Mitidja en eaux souterraines sont de l'ordre de 328 Hm³ et cela selon l'ABH (l'Agence des Bassins Hydrographiques, 2000). Les principaux champs captant sont : Mazafran I et II, Chebli, Baraki, Haouch Felit, et Hamiz (Figure III.3)

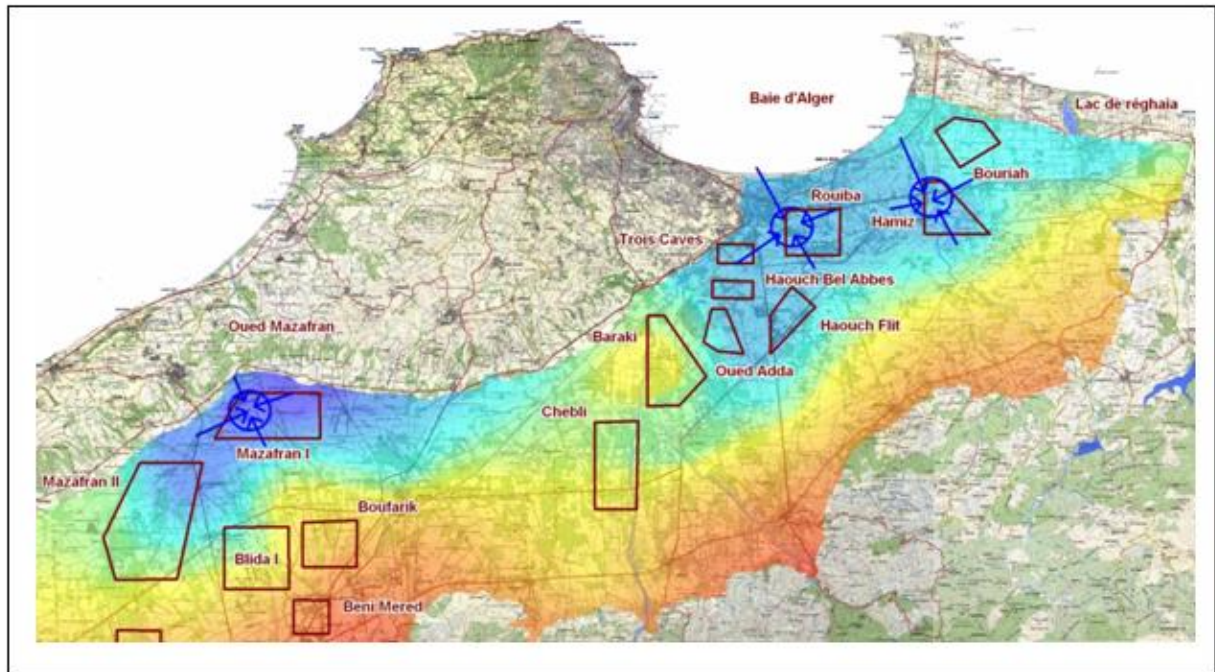


Figure III.3 : zone de captage des eaux de la nappe de la Mitidja

III.4 Les prélèvement

La Mitidja a plus une vocation agricole, mais cela n'empêche pas le développement d'un grand tissu urbain (Figure III.4) et une industrie de plus en plus grandissante.

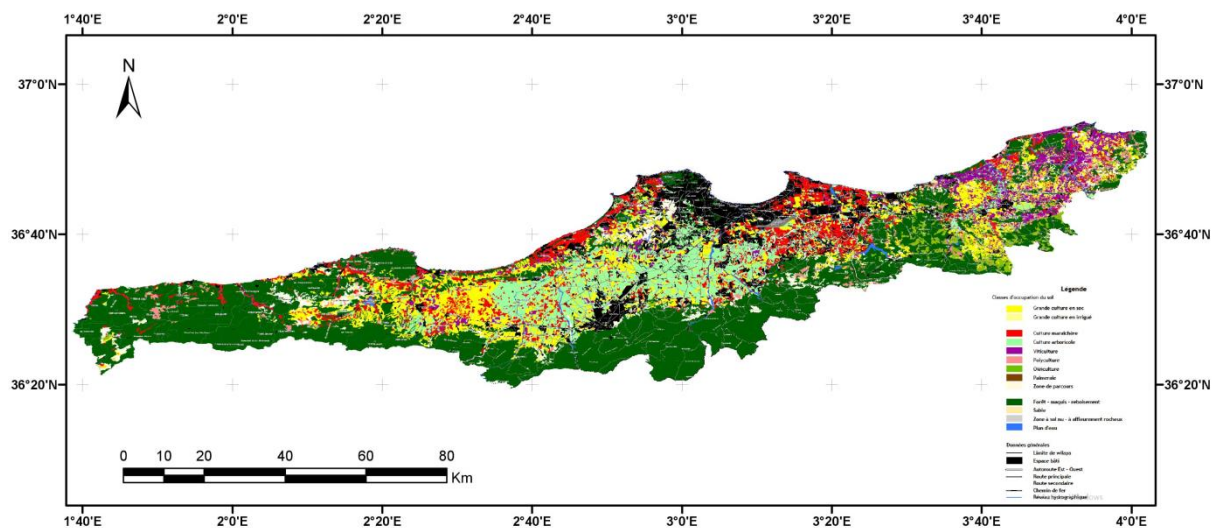


Figure III.4 : carte d'occupation des sols de la Mitidja (INSID 2011)

Les prélèvements sont destinés à l'AEP, l'irrigation et en fin à l'industrie. La consommation de ces trois acteurs est différente d'année à l'autre et d'un champ de captage à un autre, où nous remarquons que le champ de Mazafran représente un volume de 1 à 2 millions de m³/ an (point rouge) (Figure III.5).

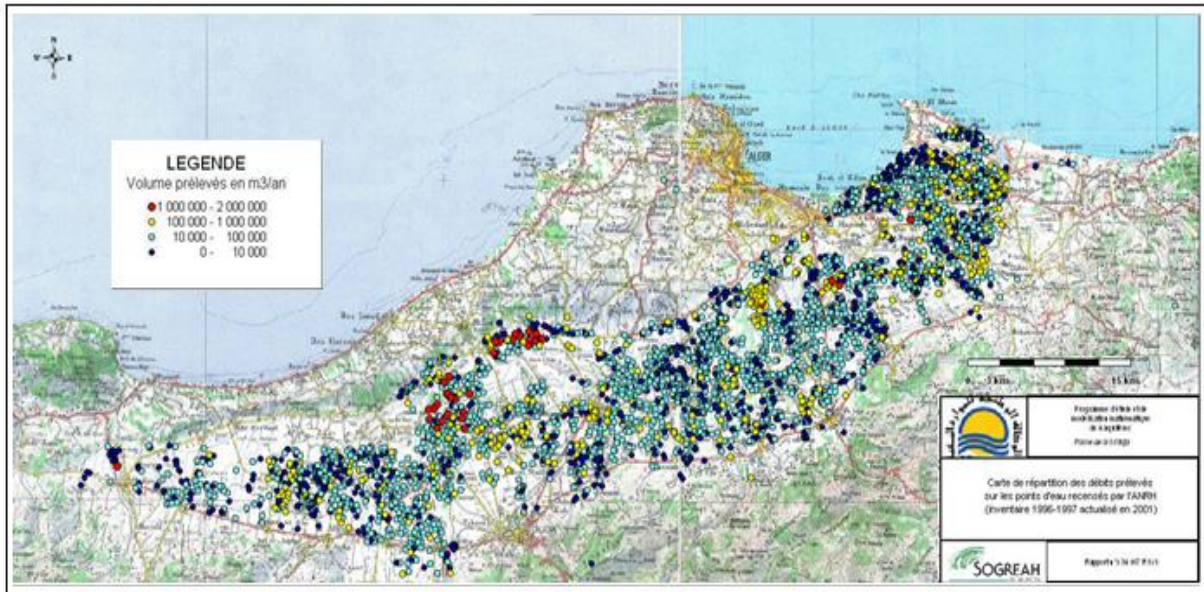


Figure III.5 : Répartition des débits prélevés sur les points d'eau recensés par l'ANRH (inventaire BIRH actualisé en 2002) (inventaire BIRH actualisé en 2002)

III.4.1 Prélèvements destinés à l'AEP

La SEAAL exploite environ 200 forages répartis sur la plaine de la Mitidja. Pour l'année 2007, le débit moyen d'exploitation par forage est de 66 m³/heure et en raison de ce débit unitaire limité, elle devait donc disposer d'un nombre important de forages pour alimenter la ville d'Alger.

McDonald estime le total des prélèvements par pompage dans la nappe, en 1989/1990 à 369 Mm³/an. Sur ce total 141 Mm³/an est destinée à l'AEP. Après 1995, les prélèvements ont augmenté suite à la mise en service de nouveaux champs captant (Birtouta) et à l'augmentation de la capacité de production des principaux champs captant. En 2005, la production journalière a atteint 260 700 m³/j (SOGREAH, 2008)

III.4.2 Prélèvements agricoles

Un inventaire réalisé entre 1996 et 2002 a permis de positionner les forages agricoles et de répartir les débits annuels prélevés.

De ce fait, 2700 forages agricoles répartis de façon homogène sur la zone modélisée ont été répertoriés par SOGREAH en 2008 (Tableau III.5)

Tableau III.5 : Différentes estimations des prélèvements d'eau agricoles (SOGREAH, 2008)

Prélèvements	Méthode	Année	Mm ³ /an
Géohydraulique, 1969	Inventaire des puits et estimation du volume prélevé par puits	1969	172.5
Bennie and Parterners et al. 1980	Estimation des surfaces irriguées et des volumes unitaires prélevés par culture	1980	125.8
Estimation des surfaces par photos satellites, Mac Donald et al. 1988	Estimation des surfaces irriguées et des volumes unitaires prélevés par culture	1988	188.0
Estimation des surfaces : Recensement agricole 2001 et volumes unitaires par dire d'expert SOGREAH, 2007	Estimation des surfaces irriguées et des volumes unitaires prélevés par culture	2001	92.0
Recensement agricole 2001 et volumes unitaires par CROPWAT, SOGREAH, 2007	Estimation des surfaces irriguées et des volumes unitaires prélevés par culture	2001	137.0
Recensement agricole 2001 et volumes unitaires par expertise SOGREAH de 1969	Estimation des surfaces irriguées et des volumes unitaires prélevés par culture	2001	214.0
Recensement BIRH, 1996 à 2002	Inventaire des puits et estimation du volume prélevé par puits	2002	127.0

La difficulté de connaître précisément les surfaces irriguées, les besoins ainsi que les volumes prélevés par les forages et puits (Figure III.6), fait que les méthodes d'estimation des prélèvements agricoles dans la nappe de la Mitidja montrent une très grande dispersion. Ces valeurs sont estimées par SOGREAH sur la base du recensement agricole de 2001.

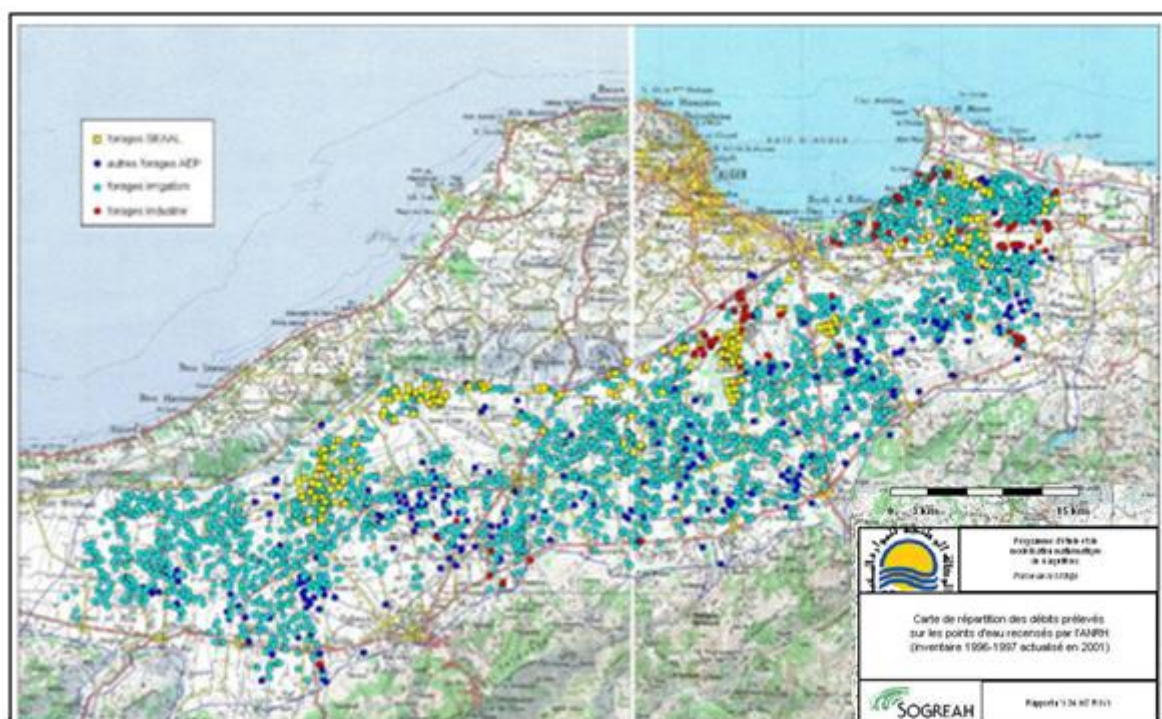


Figure III.6 : Répartition des forages de différents utilisateurs débits (inventaire BIRH (ANRH) actualisé en 2002)

III.4.3 Prélèvements industriels

McDonald a estimé, à partir des chiffres de Binnie de 1982 (20.8 Mm³/an) et de l'ANRH de 1985, une augmentation moyenne de consommation qui a été reproduite jusqu'en 1990. Des prélèvements de 40 Mm³/an sont alors obtenus. Le volume prélevé pour l'industrie était de 56 Mm³/an en 2002. Une valeur, même sous estimée, reste faible.

III.4.4 Conclusion

La Mitidja est constituée de quatre (04) sous bassins, chacun est caractérisé par un ensemble de paramètres géomorphologique propre à lui. Elle a plus une vocation agricole, mais cela n'empêche pas le développement d'un grand tissu urbain et une industrie de plus en plus grandissante. La consommation de ces trois acteurs est différente d'année à l'autre et d'un champ de captage à un autre, où nous remarquons que le champ de Mazafran représente le champ le plus sollicité.

Chapitre IV

Géologie

Chapitre 4 : Géologie

IV.1 Introduction

La Géologie de la Mitidja a fait l'objet de plusieurs études fondées sur les études géologiques majeurs, basées essentiellement sur les travaux de (Glangeaud, 1952), (Aymé, 1956), (Durand Delga, 1969), (Mutin, 1977) et (Bennie and Partner, 1983). La Mitidja était un bassin intramontagneux formé par effondrement rempli de dépôts d'âge plio-quadernaire. Elle est circonscrite par deux blocs positifs :

- Au Nord, l'anticlinal du Sahel de 270 m d'altitude moyenne, bande collinaire côtière. Il est constitué par des roches anciennes surmonté par des terrains tertiaires plissée ;
- Au Sud, l'Atlas Blidéen, vaste massif montagneux tranchant brusquement la plaine, est constitué d'épaisses séries d'âge Crétacé-paléocène (Figure IV.1).

Nous allons faire une synthèse globale sur la lithostratigraphie, préalable nécessaire pour définir le milieu récepteur, pour pouvoir faire un lien avec la situation des éléments susceptibles d'intervenir sur le chimisme des eaux souterraines. L'analyse structurale est abordée afin de préciser la disposition spatiale des réservoirs

IV.2 Stratigraphie et lithostratigraphique

IV.2.1 Le socle primaire

Il affleure principalement à Alger et au Chenoua. Il est constitué d'un socle gneissique fortement métamorphique (gneiss ocellé, gneiss fin), surmonté par une série de schistes satinés faiblement métamorphiques (séricitoschistes et chloritoschistes) (Figure IV.1).

IV.2.2 Le Mésozoïque

On distingue:

- Les calcaires de l'Oued Sidi El Kebir ; calcaire massif cristallin d'âge jurassique.
- Les calcaires et grès de la Chiffa d'âge néocomien et aptien.
- Les flyschs (marnes et calcaires) d'âge albien supérieur à sénonien.

IV.2.3 Le Tertiaire

(a) Le Miocène et roches plus anciennes :

Ils existent dans le bassin de la Mitidja et affleurent par endroits dans l'Atlas, particulièrement au Sud Est de Khémis El khechna et à Djbel Zeroula. Au Sud Est de Khémis El khechna, le Miocène est représenté par des marnes épaisses de 50 m du Vindobonien, comprenant des lentilles de calcaires à Mélobésiées au djebel Zeroual. Dans l'Atlas, ce sont les roches les plus dures du Crétacé et de l'Oligocène qui affleurent. Les terrains les plus communément rencontrés sont les roches argileuses parmi lesquelles des schistes argileux et des argiles (Glangeaud,1952).

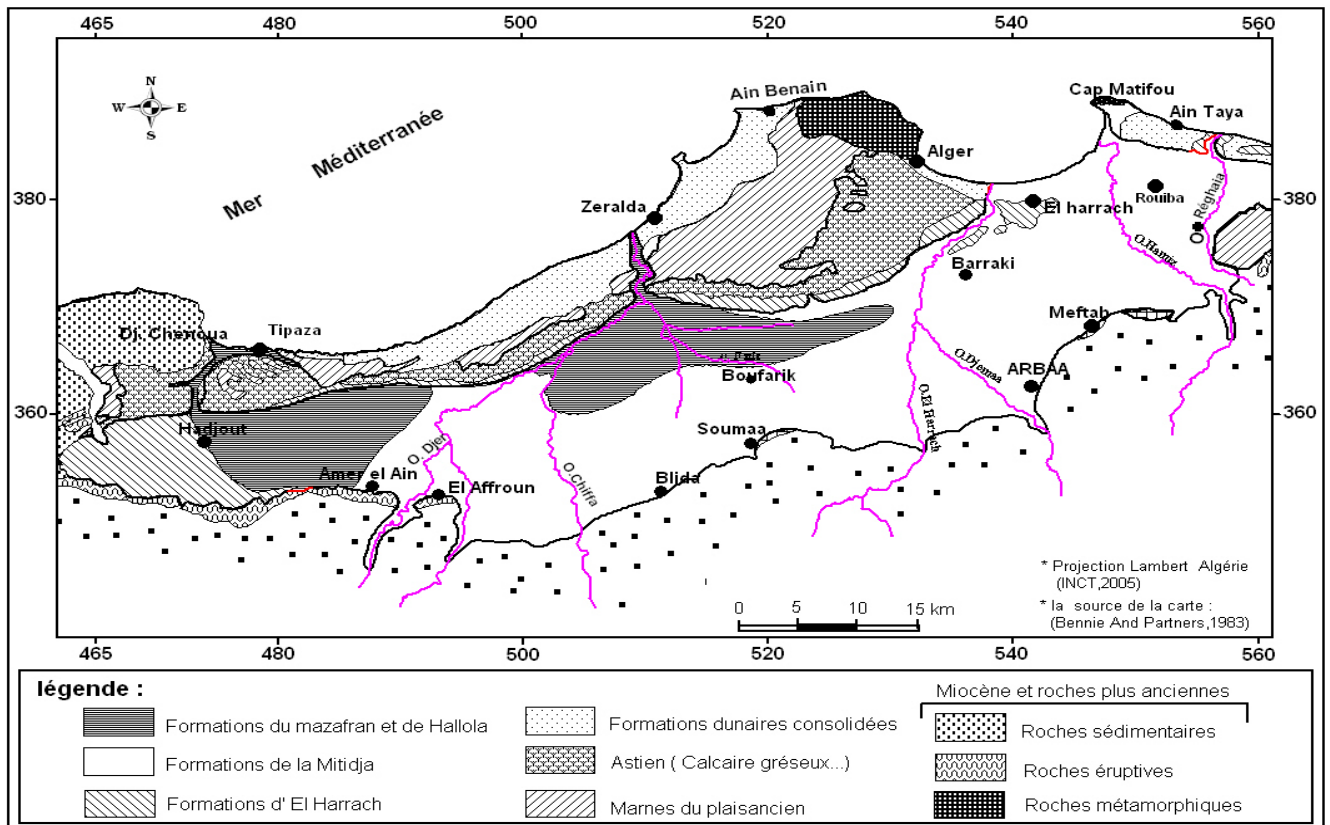


Figure IV.1 : Carte géologique de la plaine de la Mitidja (Bennie and Partners, 1983)

b) Les roches éruptives du Tertiaire

Ces dernières affleurent sur tout le porteur SW de la Mitidja, où elles se trouvent en contact avec les alluvions récentes du bassin de la Mitidja. Sur les bordures méridionales et occidentales du bassin, l'existence d'un volcanisme calco-alcalin daté de 11 à 16 Ma, atteste de l'ouverture par effondrement EW du bassin durant le Miocène (Bellon, 1975 ; Lepvier, 1975 et 1981 ; Ait Hammou, 1981). D'autres affleurements de roches volcaniques se rencontrent dans la région de Khemis El khechna et Thenia (Rhyolites – Andésites), (Figure IV.1).

c) Le Plaisancien

Il repose en discordance sur les formations du Miocène (Glangeaud, 1952). Il s'agit d'une formation constituée de niveau fossilifère glauconieux, de marnes jaunes et grises parfois sableuses. Cela pourrait correspondre aux sédiments de milieu profond qui se sont déposés sur une surface d'érosion avec une épaisseur moyenne de 200 m. Les affleurements du Plaisancien en surface se rencontrent uniquement dans les collines du Sahel, Au cœur d'un plissement anticlinal et dans la zone de Khémis El Khechna et Réghaia, ils constituent la fermeture Est du bassin (Rivoirard, 1952).

d) L'Astien

La formation de l'Astien comporte plusieurs faciès séparés par un niveau repère glauconieux de 4m à quelques centimètres d'épaisseur (Figure IV.2). Le faciès marno-sableux jaunâtre à blanchâtre est plus répandu avec un nombre important de fossiles, associés à une sédimentation marine de haut fond (Rivoirard, 1952). Les descriptions lithologiques les plus rencontrées de l'Astien se réfèrent aux séries rencontrées dans les forages du Sahel qui l'ont atteint, et qui sont : les calcaires ou calcaires sableux ; les grès ; les argiles calcaires jaunes ; les calcaires à faciès récifal.

L'Astien dont l'épaisseur moyenne varie entre 100 à 130 m (Bennie and partners ,1983) se situe généralement à des profondeurs allant de 250 à 300 m au -dessous de la surface du sol de la Mitidja (Figure IV.2).

Dans la région de Rouïba il se trouve à de faibles profondeurs car l'érosion a été très importante (Glangeaud et Aymé, 1935). Les affleurements de l'astien se rencontrent sur le côté Sud du Sahel et dans les faubourgs Sud d'Alger.

IV.2.4 Le Quaternaire

a) Formation d'El Harrach

Cette formation, connue sous le nom « formation de Maison Carrée », constitue une séquence relativement uniforme, d'argiles plastiques jaunâtres et grises à la base. On y rencontre de minces niveaux lenticulaires de graviers et de sable. En raison de la présence de gravier, cette formation a été confondue avec les formations alluviales sus-jacentes qui sont essentiellement caillouteuses. Elle affleure dans les régions suivantes : El Harrach, le long du versant sud du Sahel et à l'ouest de Hadjout.

La formation d'El Harrach atteint son épaisseur maximale de 200m dans la partie occidentale du bassin, tandis que l'érosion a fait disparaître cette dernière dans le secteur Est, région de Reghaia et de Rouiba entraînant un passage direct vers la formation de la Mitidja (Soltano-Tensiftien) au Pliocène supérieur (Figure IV.2/Coupe C).

b) Formation de la Mitidja

La formation de la Mitidja se compose principalement de matériaux alluviaux grossiers, principalement des graviers ; des galets ; des limons ou argiles en quantités variables.

Des éléments à grains fins sont présentés en quantité relativement importante dans la partie supérieure de la formation. On remarque des variations de granulométrie considérables qui se produisent dans le sens horizontal et dans le sens vertical qui sont liées aux sources de matériaux. En effet les principales sources de matériaux sont :

Les dépôts des oueds les plus importants.

Les cônes de déjections des piémonts de l'Atlas.

Cette formation est présentée sur toute l'étendue de la plaine à l'exception de la partie occidentale où ces matériaux passent en dessous des marnes et argile de la basse plaine du Mazafran. La formation perd de son épaisseur en traversant les piémonts en direction de son contact avec l'Atlas et vers le Nord, dans la baie d'Alger où elle se retrouve reliée à la mer en traversant les dépôts dunaires et marins (Figure IV.2).

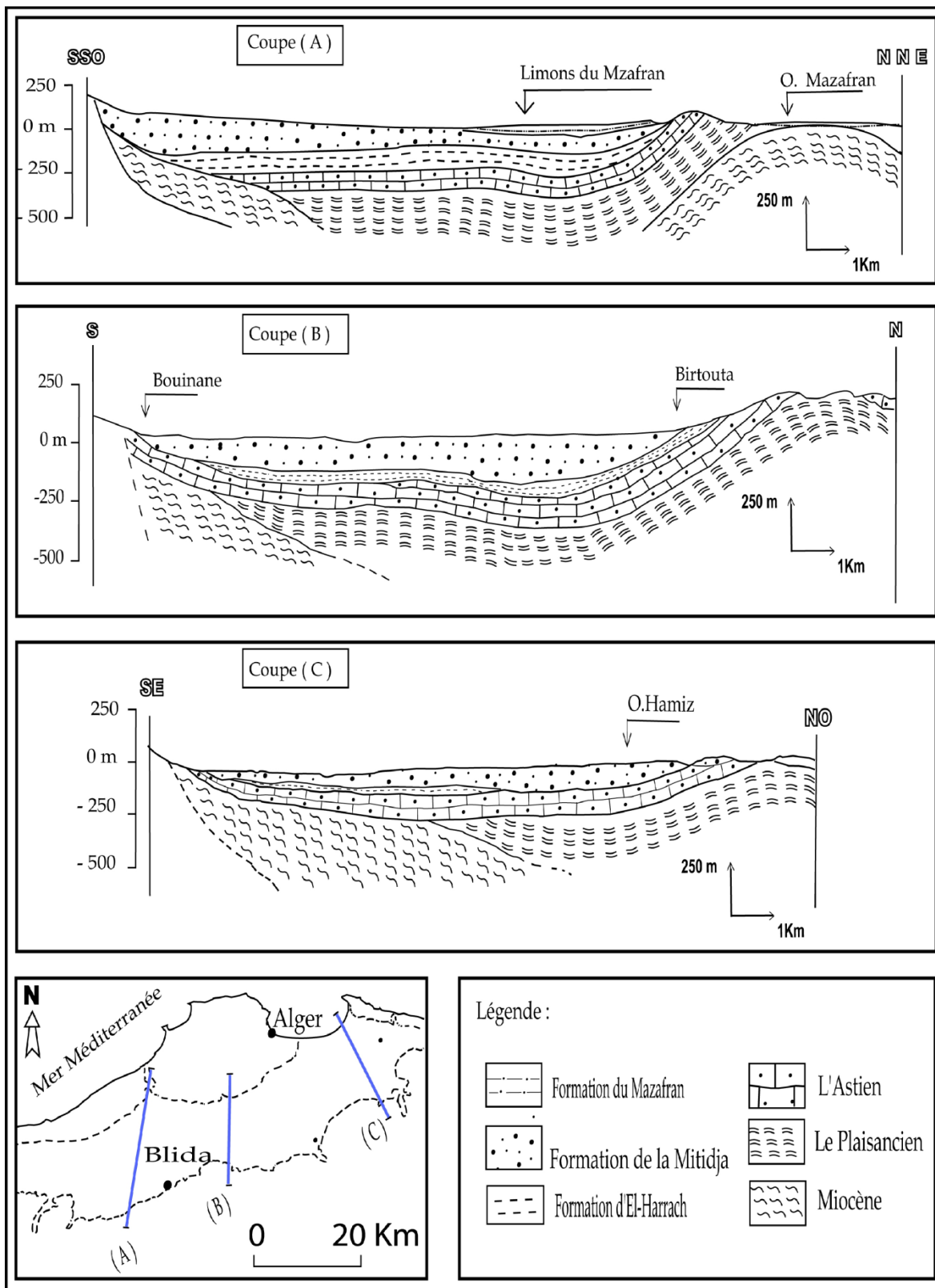


Figure IV.2 : Coupes géologiques au niveau de la Mitidja (Bennie and partners, 1983)

L'affaissement ayant été moins prononcé à l'Est autour de Rouiba, étant donné que la formation dans cette région est contrôlée par l'érosion, avec une réduction progressive de l'épaisseur des alluvions de 70 à 30 m. La formation de la Mitidja s'est constituée dans une

dépression fermée, complètement isolée de la mer durant le Pléistocène (Rivoirard, 1952). On remarque une accumulation de dépôts marins dans cette période sur la bordure Nord du Sahel. Ces derniers sont composés de sable dunaire et de fins conglomérats.

c) Formation du Mazafran et de Halloula

On la trouve sur une épaisseur moyenne de 10 m environ (Montoachet, M. 1952 ; Mutin, 1977). Elle est constituée de limons et d'argiles limoneuses de couleur généralement grise à jaunâtre et contenant parfois un peu de graviers. Les limons de la formation du Mazafran s'étendent le long de la cluse du Mazafran, ils atteignent leur épaisseur maximale à proximité de l'extrémité de la cluse, soit 60 m. La formation de Halloula se situe à l'ouest des oueds (Djer et Bou Roumi) où elle occupe la zone de l'ancien lac de Halloula (Figure IV.3).

d) Dépôts Récents

Ces derniers comprennent :

- Des dépôts de sable dunaire.
- Des dépôts de piémont de l'Atlas.
- Des sables et des graviers.

Leur mise en place constitue une partie relativement peu importante par rapport aux dépôts du Mazafran, Halloula et du remplissage de la Mitidja. Au niveau de la baie d'Alger et de la région de Réghaia, ils sont représentés par des sables dunaires. Au niveau du piémont de l'Atlas, on trouve de gros éléments anguleux dans une matrice de limons argileux provenant des cônes de déjections. Ils sont également localisés dans les lits d'oueds et se composent de sables fins gris et de graviers.

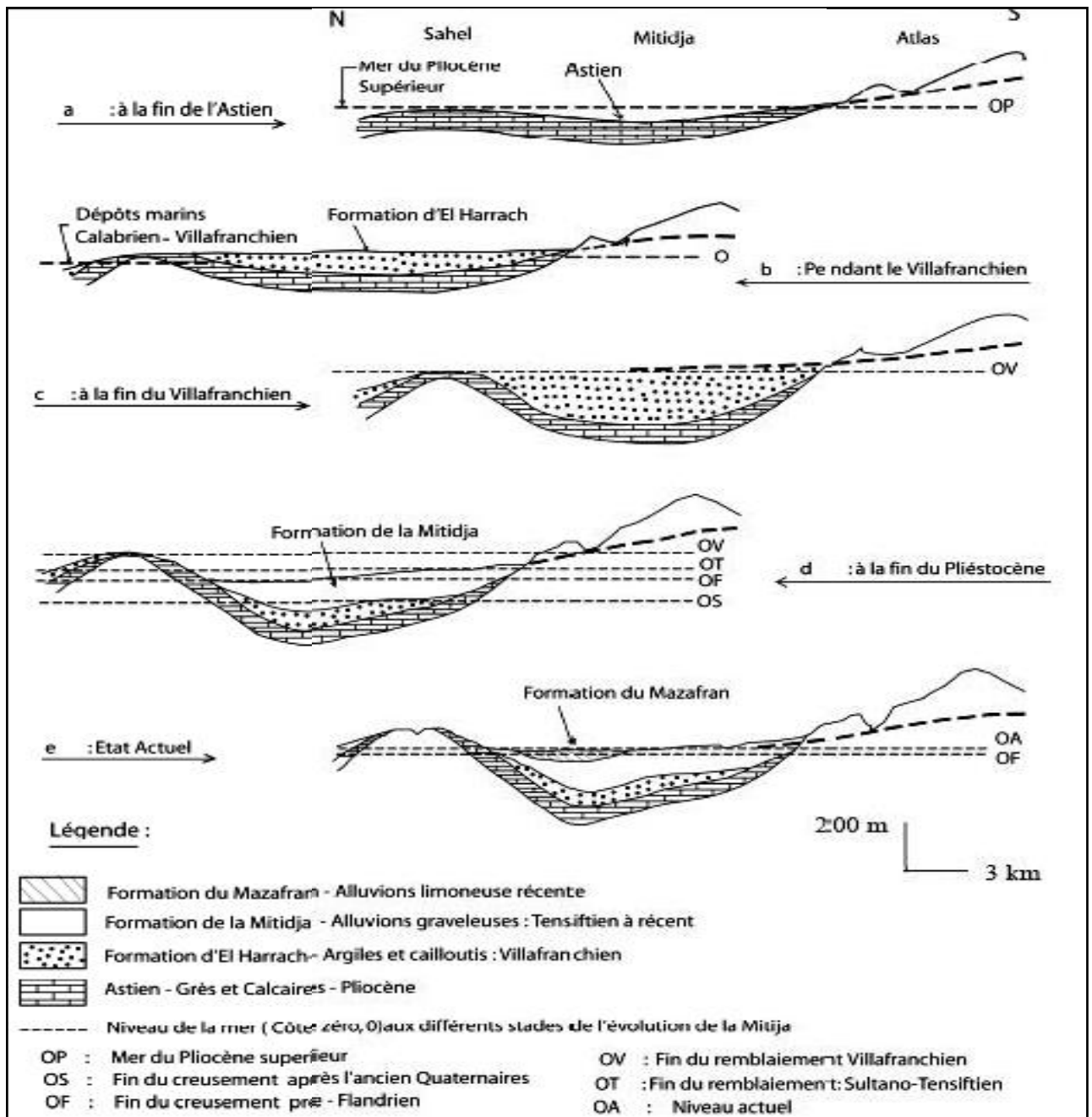


Figure IV.3 : Différents stades de l'évolution de la Mitidja pendant le Plio-Quaternaire (L.Glangeaud, 1932)

IV.3 Contexte tectonique

IV.3.1 Orogène Alpine

La région Ibéro maghrébine appartient à l'orogène Alpin périméditerranéen, au niveau de la zone occidentale. Ce dernier est représenté par des cordillères bétiques en Espagne et les Maghrébides qui forment la chaîne littorale allongée sur plus de 2000 km, allant du Rif au Maroc jusqu'au Tell (Algérie et Tunisie), (Figure IV.4). Il se poursuit à l'Est jusqu'aux Apennins, formant l'arc Calabro-Sicilien (Durand Delga, 1961, 1969).

IV.3.2 Tectonique post-nappes (Néotectonique)

Dans le Maghreb la néotectonique se définit comme l'étude des déformations tectoniques observées dans les niveaux du Néogène et du Quaternaire. La période de mise en place des nappes a été suivie d'une distension N-S généralisée dans l'ensemble de la région maghrébine (Guiraud, 1977). Elle s'est poursuivie jusqu'au Villafranchien supérieur. La fin du Villafranchien est marquée par un changement brusque de contraintes qui passe d'un régime distensif à un régime compressif. Cette phase de compression continue jusqu'à l'heure actuelle.

En Algérie, le Burdigalien supérieur – Langhien correspond à une distension généralisée N-S marquée par l'ouverture de plusieurs bassins d'effondrement (Mitidja, Cheliff, Hodna). Accompagnée par un volcanisme calco-alcalin ($15,1 \pm 0,6$ Ma) le long de la Bordure Sud et l'extrémité occidentale du bas sin de la Mitidja, ce volcanisme se poursuit jusqu'au Miocène supérieur (Tortonien), (Bellon, 1976).

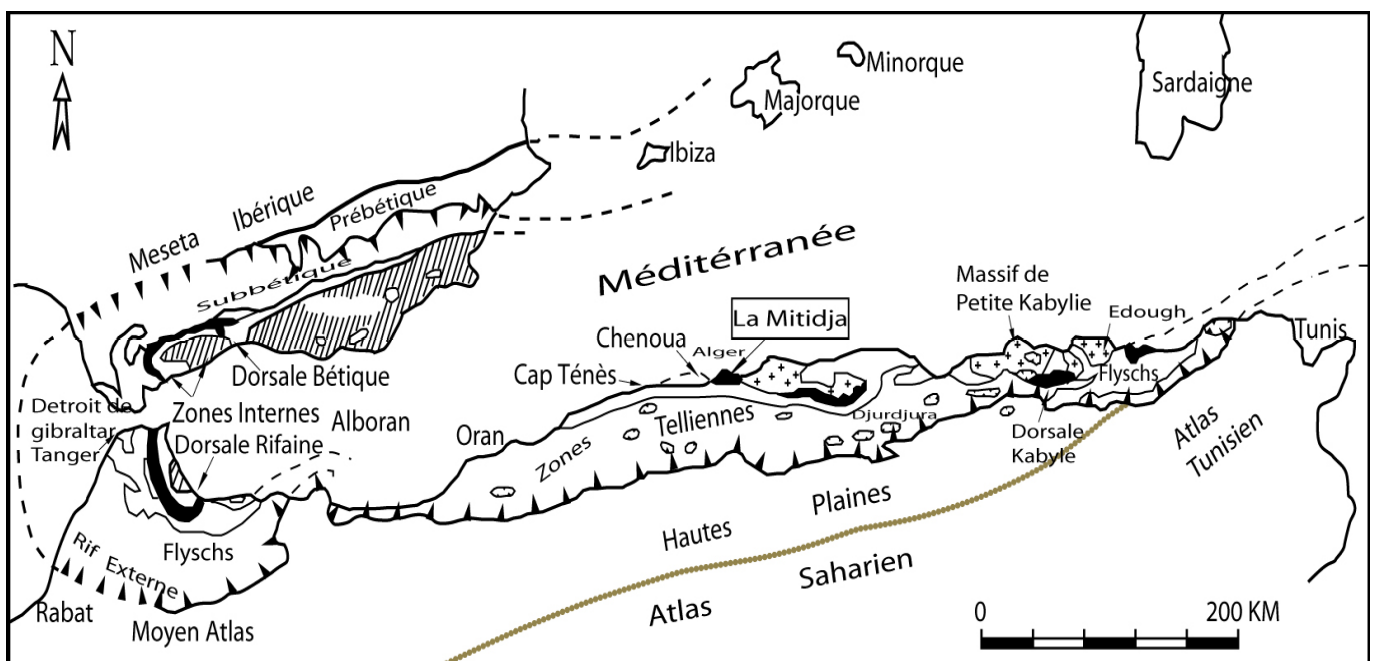


Figure IV.4 : Situation de la plaine étudiée dans l'Orogène Alpin (M. Durand Delga, 1969)

La fin du Villafranchien est marquée par une période de serrage N-S (Guiraud, 1977 ; Philip, 1983) évoluant en NW – SE durant le quaternaire puis NNW- SSE puis NNE-SSW à l'heure actuelle.

Ce serrage se traduit par une reprise en compression de toutes les structures géologiques formées durant la distension post-nappes. Cette période de compression contrairement à la période de distension, reflète le dépôt des séries sédimentaires très peu épaisses.

IV.3.3 Tectonique actuelle dans le contexte méditerranéen

L'activité tectonique est le résultat des mouvements de convergence des plaques africaine et eurasiennne (Meghraoui, 1988). Cette dernière s'est traduite par des plissements, des failles qui affectent notamment les niveaux du Miocène post-nappes, du Pliocène et du Quaternaire.

Ces déformations continuent jusqu'à l'heure actuelle comme en témoigne l'activité sismique (Figure IV.5)

Les déplacements peuvent s'exprimer par des déformations de couvertures sédimentaires, ils peuvent s'exprimer de façon lente et asismique. Mais il peut également se produire une résistance à la déformation et une accumulation d'énergie, cette dernière sera libérée brutalement, ce qui provoque de violents séismes (Boumerdes ,21/ 05/ 2003).

IV.3.4 Sismicité de la région d'Alger

L'Algérie du Nord a connu plusieurs séismes historiques, dont certains ont été désastreux (1716, 1825, 1856, 1954, 1980,2003), vers 1847 A. Perry publia la première note sur les séismes en Algérie (Chesneau, 1982).

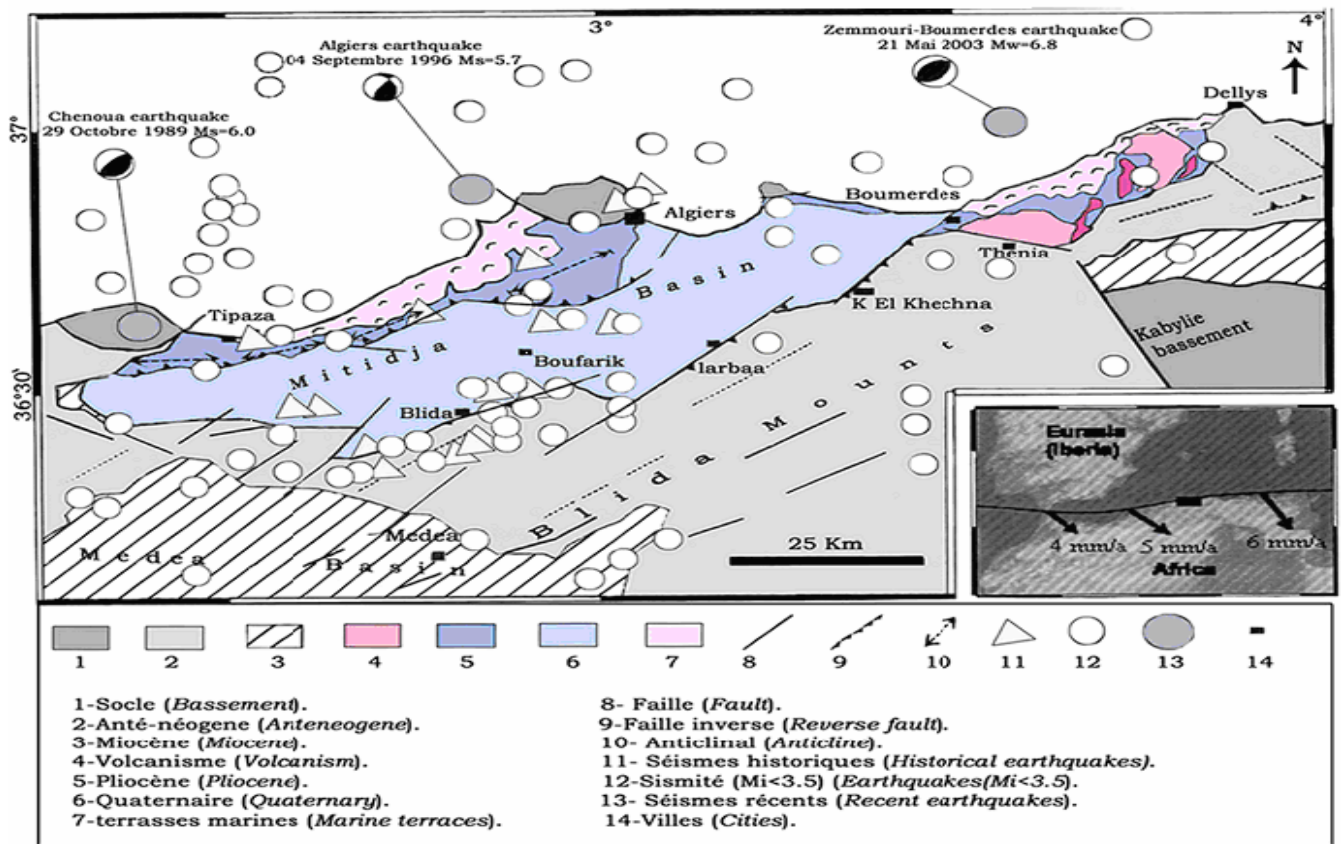


Figure IV.5 : Carte sismotectonique du bassin de la Mitidja (Meghraoui et al ,2004)

En 1988 les travaux documentaires d'Ambresgs et Vogt sur la période antérieure à 1756 ont permis de montrer des séismes antérieurs à celui d'Alger 1776. En effet, le plus ancien correspond à celui d'Alger en janvier 1365, aurait détruit la ville par un raz de marée.

IV.4 Conclusion

La plaine de la Mitidja est constituée de deux principaux aquifères : l'aquifère Astien et l'aquifère de la Mitidja le plus sollicité. Ces derniers étaient formés grâce à la zone de subsidence et a remplissage de dépôts d'âge pliocène jusqu'à l'actuel. Les deux nappes sont séparés par des argiles de formation villafranchienne (d'El Harrach).

Chapitre V
Étude Géophysique

Chapitre 5 : Étude Géophysique

V.1 Introduction

La géophysique est une discipline qui a pour objectif principal l'étude des caractéristiques physique de la terre ainsi que de déterminer la géométrie des aquifères. Les travaux réalisés par la CGG (1967,1968, 1969) et (Algéo, 1978) et (Toubal, 1998) étaient la base dans cette synthèse liée à notre zone d'étude.

V.2 Interprétation des sondages électriques

Pour l'étude de la zone, deux exemples de sondages électriques verticaux ont été pris comme exemple : le premier à l'Est au niveau de Boufarik, la deuxième porte sur deux sondages superposés au niveau du Mazafran à l'Ouest de la zone d'étude (Figure V.1). La totalité des sondages électriques illustrent une forme en cloche de type de trois terrains :

- Un terrain conducteur de surface.
- Un terrain résistant qui reflète la formation perméable (sable, gravier, galets..) qui correspond à la nappe alluviale de la Mitidja.
- Un terrain conducteur où la couche atteint les faibles résistivités présentant le substratum argileux.

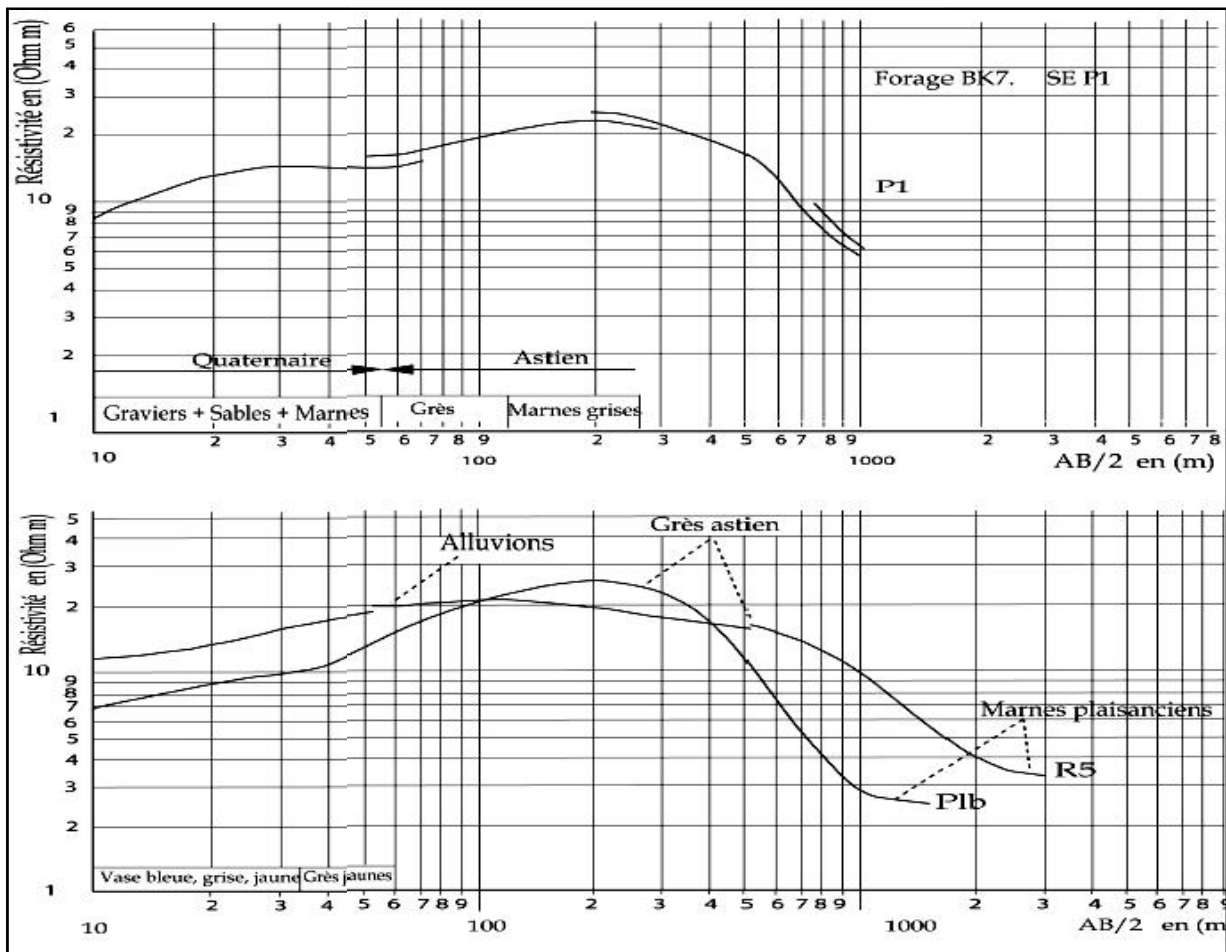
Tableau V.1 : Échelle des résistivités (CGG, 1969)

Étage	Nature Géologique	Résistivité (ohm m)
Quaternaire	Alluvions perméables	50 à 100
	Alluvions peu perméables	5 à 30
Pliocène	Calcaires gréseux	60 à 80
	Marnes	3 à 20
Miocène	Argiles quartzitiques	10 à 20
	Marnes	40 à 50

Les coupes géo-électriques (Figure V.1 et V.2), mettent en évidence :

- ✓ Dans la zone du Mazafran, Un banc de limons sablo-argileux d'épaisseur ne dépassant pas les 10 m et d'une résistivité variant entre 10 et 30 Ohm m.
- ✓ La Mitidja est constituée d'alluvions limono- sableuses avec des éléments grossiers (galets, graviers, sable). Sa résistivité est de 50 à 100 Ohm m.
- ✓ La résistivité de l'astien est de 70 Ohm m, couverte par la formation d'El Harrach qui à une résistivité de 10 à 30 Ohm m. elle représente le niveau conducteur.

l'Astien est bien développé sur le flanc Sud du Sahel, son épaisseur varie de 100 à 150m, il



repose sur un substratum conducteur composé d'argiles du plaisancien, qui devient marneux d'âge miocène dans la rive Sud de Khemis El Khechna et Meftah .

Figure V.1 : Sondages électriques (P1) au niveau de Boufarik et (P1b et R5) région du Mazafran. (CGG, 1969)

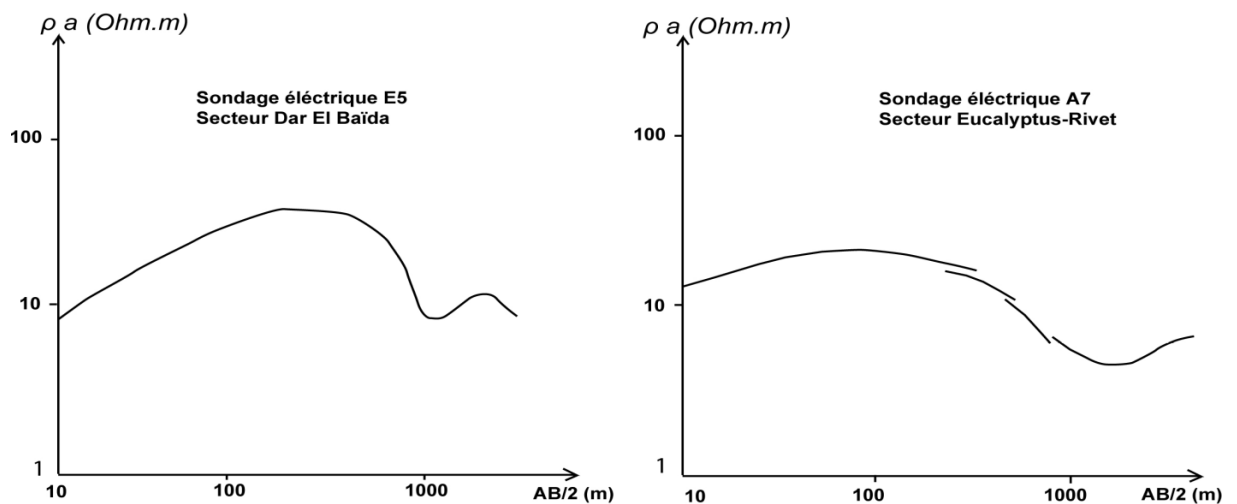


Figure V.2: Sondages électriques (E5 :Dar El Baida) et (A7 :Ecalyptus-Rivet) (CGG, 1969)

V.3 Interprétation des cartes géoélectriques

V.3.1 Carte des résistances transversales (RT)

La résistance transversale (RT) est le produit de l'épaisseur par la résistivité d'une formation. Les valeurs élevées représentent les zones de grandes épaisseurs ou un bon faciès du point de vue hydrodynamique (grès, calcaire, alluvions,...). Tandis que les faibles valeurs reflètent des faciès argileux, marneux,....

L'interprétation de la carte des (RT) réalisée par la (CGG, 1969) nous illustre, quatre zones de valeurs élevées, (Figure V.3)

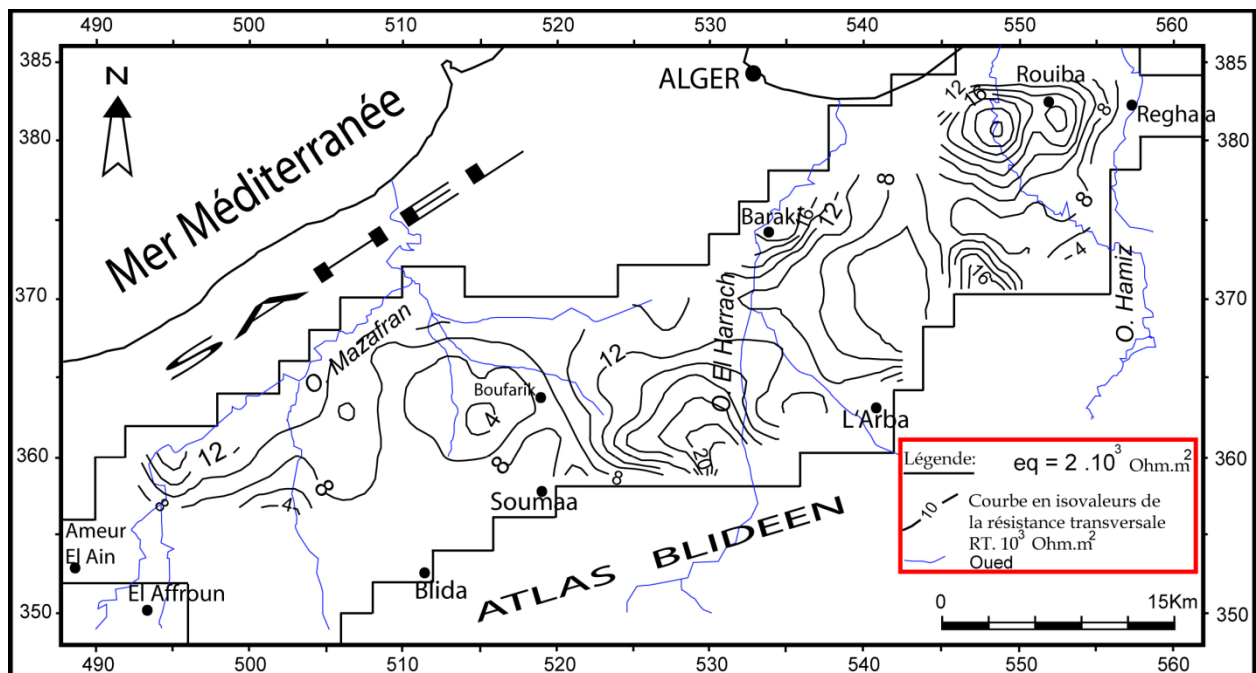


Figure V.3 : Carte de la résistance transversale correspond aux horizons profonds (Astien + alluvions du quaternaire) (RT) Ohm.m² (CGG, 1969)

Une plage de faibles valeurs de RT de 6000 à 10000 Ohm.m², située entre Meftah et Larbaa est liée à la remontée du substratum conducteur combiné soit à une diminution d'épaisseur de l'Astien, soit à une variation de faciès de celui-ci qui devient plus argileux vers le Sud (CGG, 1969).

Une plage de forte RT, elle varie de 4000 à 22000 Ohm.m². Elle se superpose à l'axe de l'Oued El Hamiz, ce qui indique l'importance de l'aquifère.

Au niveau du bassin d'El Harrach les valeurs de RT sont de l'ordre de 22000 Ohm.m². Preuve de l'existence d'horizons aquifères épais et résistants ce qui corroborent les hypothèses émises par (Toubal, 1998), Figure II.17 coupe (a).

Une plage conductrice, de faible RT qui varie entre 4000 à 8000 Ohm.m² due à la présence de matériaux pelitiques (limons du Mazafran et les intercalations d'argile) au niveau du centre de la Mitidja entre O. El Alleug et Boufarik.

Une sixième zone résistante dont RT est de l'ordre de 12000 à 20000 Ohm.m², du côté de

Attatba.

V.3.2 Carte du Mur de l'Astien

Cette dernière est représentée par des courbes de niveaux (cotes par rapport au niveau de la mer) du faciès gréseux de l'Astien (Figure V.4) On distingue :

Dans la partie Ouest :

Le bassin post plaisancien qui apparaît comme un synclinal en forme de U, légèrement bombé au centre, avec une dépression qui prend une allure de gouttière dans la partie du Mazafran à une cote de -400m.

Les forts gradients qui s'inscrivent dans les bordures Nord et Sud correspondant aux flexures Mitidjiennes bordant le synclinal (Boudiaf, 1996).

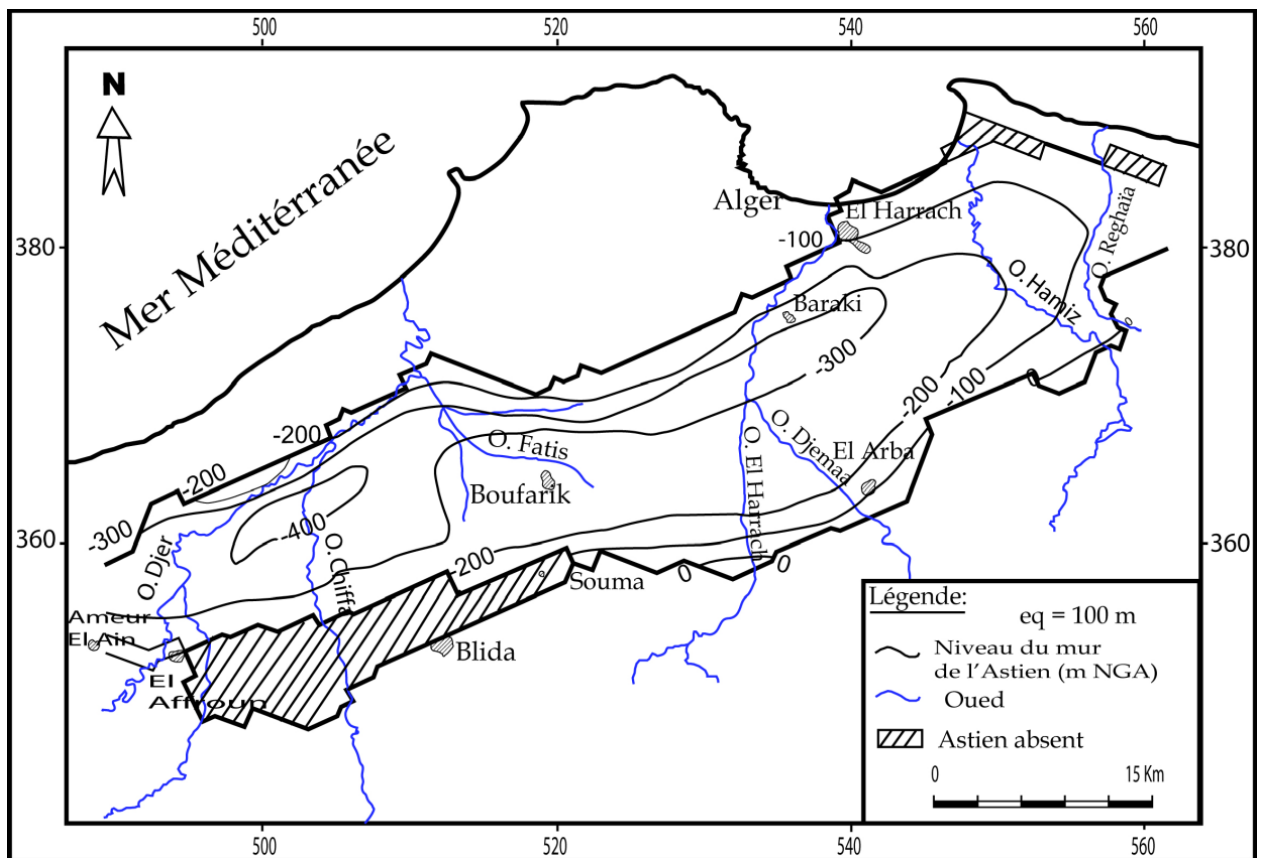


Figure V.4 : Carte du Mur de l'Astien, l'allure du substratum (Mac Donald & Partners, 1992)

En effet, la flexure Nord Mitidjienne suit pratiquement les contours visibles des affleurements des grès du Sahel. Elle est plus accentuée dans la partie Nord que dans la partie Sud.

Dans la partie Est :

Au niveau de Sidi Moussa, un mouvement anticlinal orienté ESE–WNW engendre une diminution de l'épaisseur de l'Astien dans cette partie.

Le substratum sur le quel repose l'Astien est très conducteur, alors qu'il est plus résistant, dans la zone de Meftah, Arbaa et Khmis El Khechna.

V.3.3 Carte du Mur de la Mitidja

Cette carte nous donne l'allure générale du remplissage quaternaire qui est dominé par les alluvions argileuses dans l'ensemble de la plaine de la Mitidja, sauf dans certaines parties où les dépôts grossiers anciens, cônes de déjections, viennent s'intercaler parfois sur de grandes épaisseurs (Figure V.5).

D'après la carte du Mur du réservoir de la Mitidja, on peut distinguer une zone de dépression sous forme d'une gouttière allongée au niveau du Mazafran avec une cote de -160 m.

On observe également une autre cuvette sous forme de lentille d'extension régionale de Rouïba à Boufarik d'une cote moyenne de -100 m. Au niveau des bordures Sud Est, on remarque un amincissement de cette formation, ce qui reflète l'allure générale en forme de cuvette allongée de direction WSW - ENE.

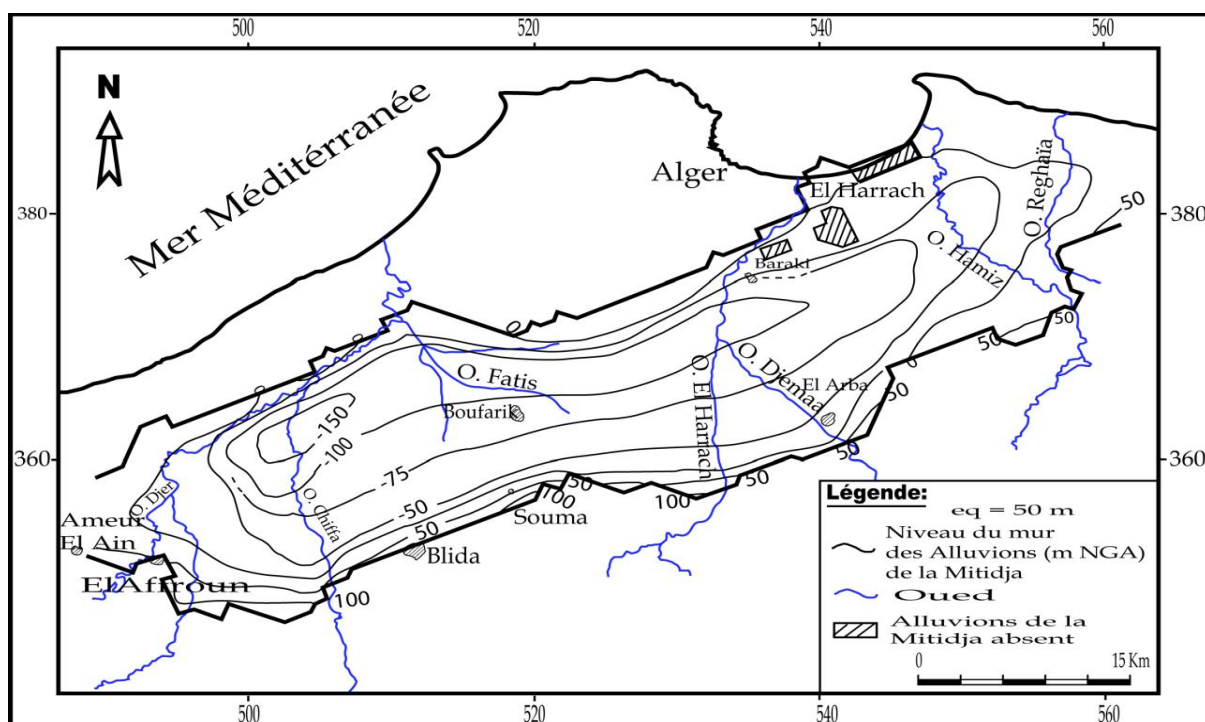


Figure V.5 : Carte du Mur de la nappe de la Mitidja (Mac Donald & Partners, 1992)

V.4 Interprétation des coupes géoélectriques

L'analyse des coupes géoélectriques permet les interprétations suivantes :

On a un banc de limons sablo-argileux, où l'épaisseur ne dépasse pas 10 m (dans le Mazafran) avec une résistivité de 10 à 30 Ohm m.

Un niveau des alluvions limono sableuse s avec des formations grossières (galets, graviers, sable) d'une résistivité de 50 à 100 Ohm m, qui constitue le remplissage alluvial de la Mitidja.

En effet la formation astienne admet comme couverture le niveau conducteur qui correspond à la formation d'El Harrach d'une résistivité de 10 à 30 Ohm m, comparé à l'Astien qui représente une résistivité de 70 Ohm m. Dans la partie Nord, le banc Astien repose sur un substratum conducteur composé d'argiles plaisanciennes, qui devient marneux d'âge miocène dans la rive Sud de Khmis El Khechna et Meftah ; (Figure V.6 et Figure V.7).

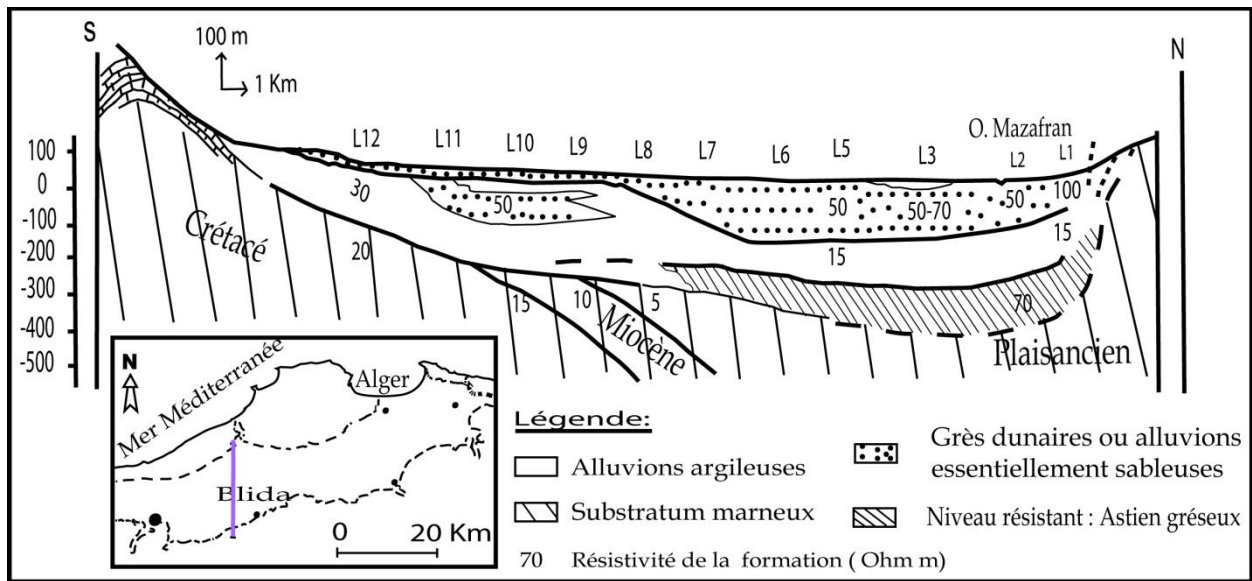


Figure V.6 : Coupe géoélectrique dans la partie Ouest de la plaine de la Mitidja (CGG, 1969)

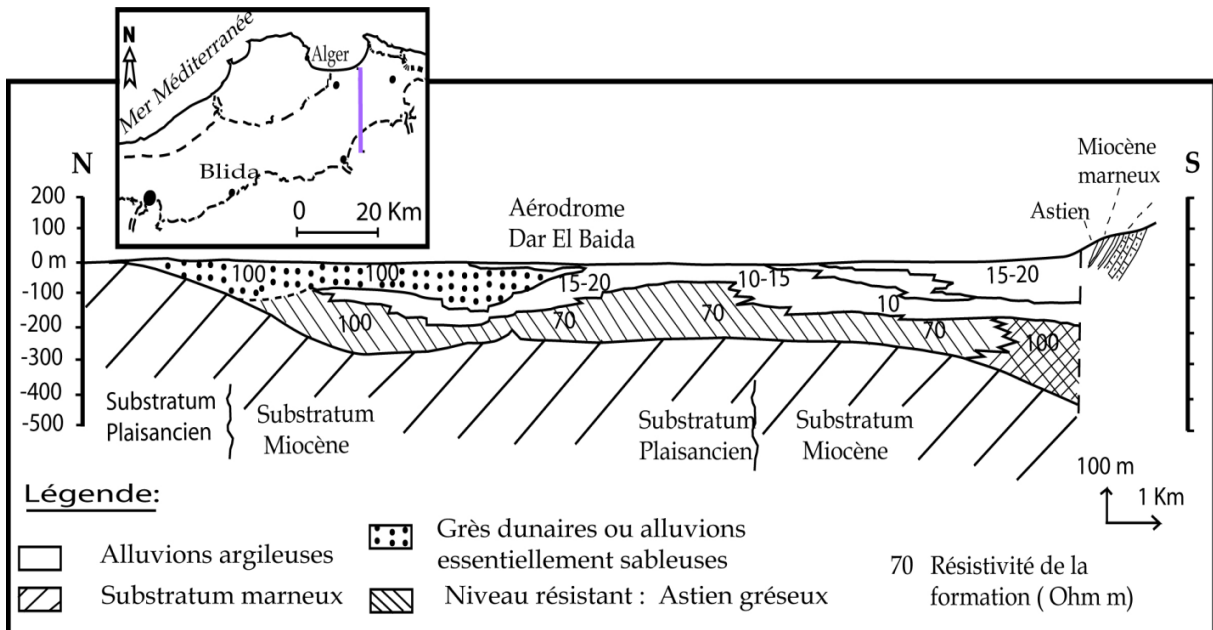


Figure V.7 : Coupe géoélectrique dans la partie Est de la plaine de la Mitidja (CGG, 1969)

V.5 Conclusion :

Les différents factices existant dans la zone de la Mitidja ont été révélés par la prospection géophysique. Il en est de même pour la géométrie des aquifères ainsi que ces différents niveaux.

Les coupes géoélectriques schématise l'extension verticale et horizontale des formations. Ainsi La carte des RT délimite les zones favorables à l'implantation de forage tel que celle d'El Harrach, Barraki, Mazafran etc.,... où les valeurs de RT enregistrées sont assez élevées ($22 \cdot 10^3 \text{ Ohm m}^2$).

La présence d'un banc résistant profond (Astien) avec un niveau résistant assez élevé (réservoir de la Mitidja), elle varie entre 50 et 100 Ohm m.

Chapitre VI

Hydrogéologie

Chapitre 6 : Hydrogéologie

VI.1 Introduction

Dans cette partie, nous déterminons des caractéristiques des deux aquifères qui représentent les réservoirs dans lesquels l'eau est stockée. Ces derniers sont caractérisés par leurs lithologies, leurs structures et leurs emplacements dans le sous sol.

VI.2 Récapitulatif de l'hydrogéologie de la zone

La plaine de la Mitidja comporte deux aquifères principaux : celui de l'Astien et celui de la Mitidja séparés par la formation d'El Harrach, sauf dans la partie Est où ils sont en contact direct.

VI.2.1 L'aquifère de l'Astien

(Calcaire-gréseux) se trouve en charge sous la formation d'El Harrach. Ses caractéristiques hydrodynamiques sont mal connues.

VI.2.2 L'aquifère de la Mitidja

Contient une nappe d'eau libre sauf dans le bas du Mazafran où elle est captive. Les transmissivités sont importantes surtout dans la partie Est. Elles sont globalement assez bonnes, mais parfois variables en raison de la diversité de la nature lithologique et de la géométrie de l'aquifère.

Le coefficient d'emmagasinement varie de 6 à 7%. Il a été déterminé par l'interprétation des essais de pompages réalisés en 1983 (Bennie & partners, 1983).

Le niveau piézométrique a enregistré une baisse très grande dans les niveaux piézométrique, après la sécheresse des années 70 (1970). Par conséquent, les débits sortant de l'aquifère sont devenus supérieurs aux apports, cela a fait que les niveaux piézométriques ont atteint 45 m dans la partie Ouest de la plaine.

VI.3 Hydrodynamisme

L'analyse du remplissage du bassin de la Mitidja permet de distinguer de bas en haut quatre ensembles lithologiques :

- Une série marneuse formant le substratum que l'on peut considérer comme imperméable.
- Un ensemble calcaire-sablo-gréseux correspondant à l'Astien.
- Un ensemble argileux contenant par endroit du sable et du gravier correspondant à la formation dite « formation d'El Harrach ».
- Un ensemble gravelo-sableux dit « Alluvions de la Mitidja ».

On distingue deux aquifères principaux contenus dans les calcaires et grès de l'Astien et dans les sables, graviers des Alluvions de la Mitidja.

VI.3.1 L'aquifère de l'Astien

- Positionnement : Dans la plaine sous les alluvions de la Mitidja et affleure sur les collines du Sahel et à des endroits peu nombreux le long du piémont de l'Atlas.

- Épaisseur est de 100 à 130 m.
- Le toit : Se trouve généralement à une profondeur de 250 à 300 m.
- Il est limité par deux formations bien distinctes : Les marnes bleues du Plaisancien.
- Les argiles jaunes du Villafranchien (formation d'El Harrach), sauf dans la partie Est de la plaine où il est en contact direct avec l'aquifère de la Mitidja.

a) Alimentation de l'aquifère

L'infiltration des pluies est principalement la seule source de recharge sur le Sahel et le piémont de l'Atlas où il affleure. Il est également alimenté par les nappes alluviales sus-jacentes, par drainance à travers la formation d'El Harrach (présence de passés de sable et de graviers) [l'Astien draine la nappe alluviale au niveau des piémonts de l'Harrach (-346) (Géohydraulique, 1968-1972)].

b) Exutoires de l'aquifère

Le flux de drainance ascendant vers la nappe alluviale, à travers les passées caillouteuses de la formation d'El Harrach, est le seul exutoire de l'aquifère.

c) Caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère

- En charge sous les argiles jaunes semi-perméables d'El Harrach, sauf dans la partie Est où il est en contact direct avec l'aquifère de la Mitidja.
- Les caractéristiques hydrodynamiques de l'Astien sont mal connues, cela est dû au manque de travaux et de données.
- Les estimations de la transmissivité variaient de 1.10^{-3} à $2.2. 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ d'après les études précédentes. (Géohydraulique 1968-1972, Bennie and Partners 1979-1983, Sir Mac Donald and Partners 1992, 1997 et WS Atkins International Limited, 1992).

VI.3.2 L'aquifère de la Mitidja

- Elle est libre et contient une zone captive dans le bas du Mazafran sous les limons récents de la formation du Mazafran.
- Remplissage très hétérogène de galets alternant avec des limons et des argiles.
- La surface du sol constitue la limite supérieure et la formation d'El Harrach la limite inférieure.
- L'épaisseur moyenne de la nappe est de l'ordre de 100 à 130 m.

a) Alimentation de l'aquifère

- L'infiltration des précipitations.
- L'infiltration à travers des cours d'eau.
- Les écoulements souterrains de l'Astien vers la nappe alluviale à travers la formation d'El Harrach le long du Sahel (dans la région de Beraki-El Harrach +450 l/s et dans celle de Mazafran +118 l/s) (Géohydraulique, 1972).

b) Exutoires de l'aquifère

- Le drainage des oueds dans leurs cours aval.
- Les fuites souterraines vers la mer (partie Est de la plaine).
- Le pompage dans les puits et forages de la plaine où la quasi totalité des prélèvements en eau souterraine destinés à l'alimentation en eau (potable, industrielle et l'irrigation de toute la région) provient de l'aquifère de la Mitidja où plus de 4000 puits et forages ont enregistrés.

c) Caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère

Avant tout, l'évaluation des caractéristiques hydrodynamiques de la plaine de la Mitidja est basée sur les résultats de Toubal, (1998), (SOGREAH, 2008, BRGM, 1973 in Berdous. F, 1997. D'après la carte Krigée des transmissivités (Touba l, 1998), on observe trois zones d'intérêt hydrogéologique avec des transmissivités élevées (Figure VI.1)

➤ Première zone : se localise au niveau du bassin du Hamiz avec des transmissivités qui varient entre $1,7.10^{-2}$ et $2,3.10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$.

➤ Deuxième zone : se situe au niveau du bassin d'El Harrach avec des transmissivités, de l'ordre de $0,4.10^{-2}$ à $3.10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$.

➤ Troisième zone : se trouve au niveau du Mazafran où l'intervalle des transmissivités varie de $1,5.10^{-2}$ à $2.10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$.

On a observé des transmissivités élevées dans les matériaux grossiers relativement résistants (CGG, 1967, 1968 et 1969) déposés par les grands oueds dans la partie Est. Il en est de même au niveau du contact entre l'Astien et la formation de la Mitidja.

Les faibles valeurs se répartissent dans les fonds peu perméables tels que :

- L'axe de Mouzaia Attatba.
- L'axe de Boufarik, oued ElAlleug.
- La region de Meftah.

Les faibles transmissivités s'observent également dans les piémonts de l'Atlas où les valeurs de T (m^2/s) varient de 10^{-3} à $5.10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$.

Enfin, le coefficient d'emmagasinement est de l'ordre de 3 % à l'Ouest et de 15 % à l'Est. La valeur moyenne est de 6 à 7 % sur l'ensemble de la plaine. (Bennie & Partners, 1983).

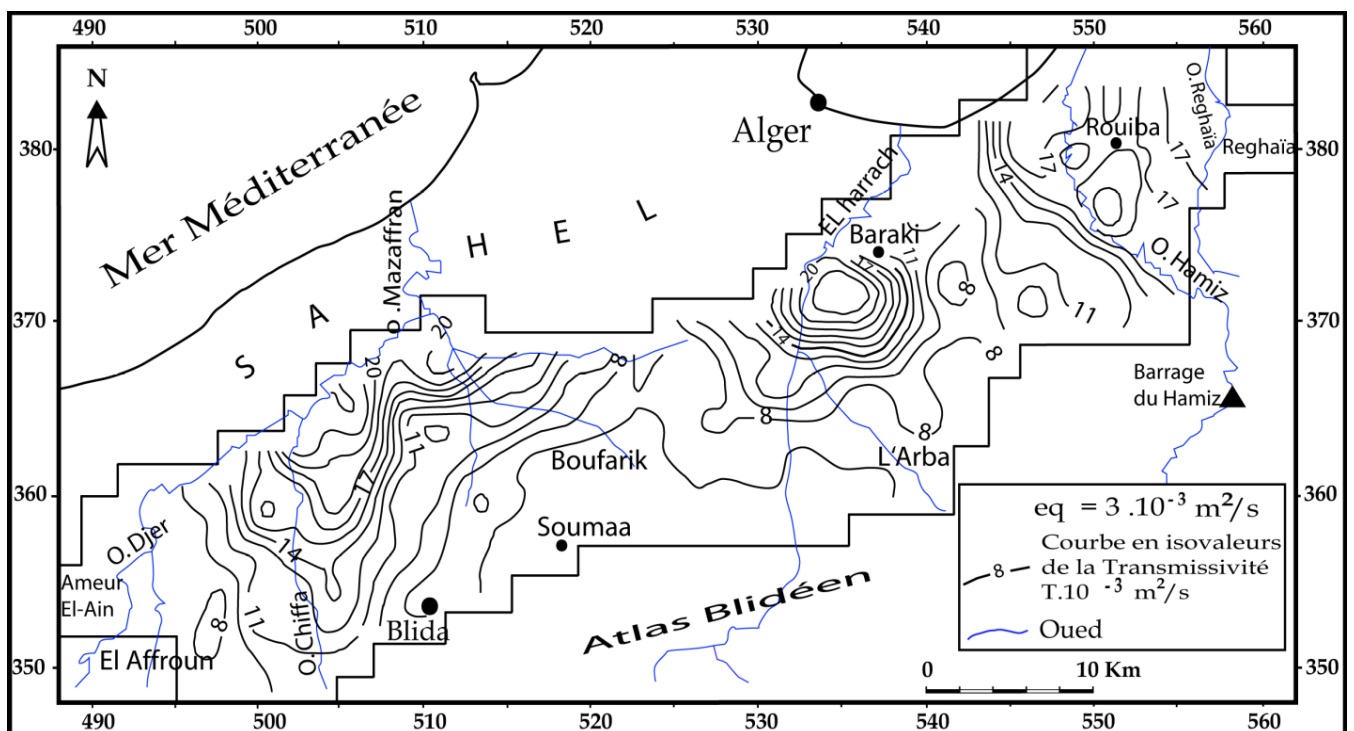
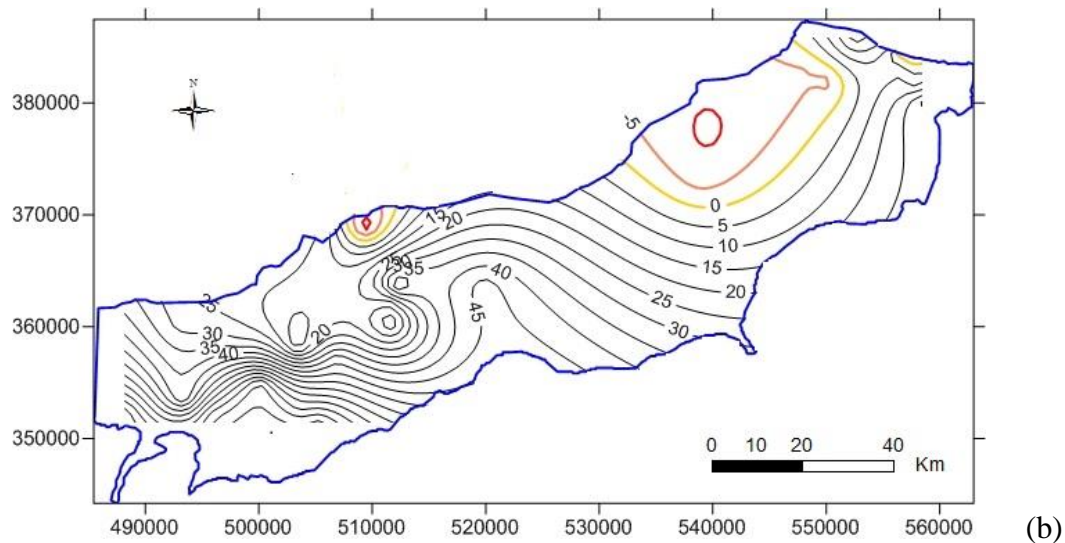
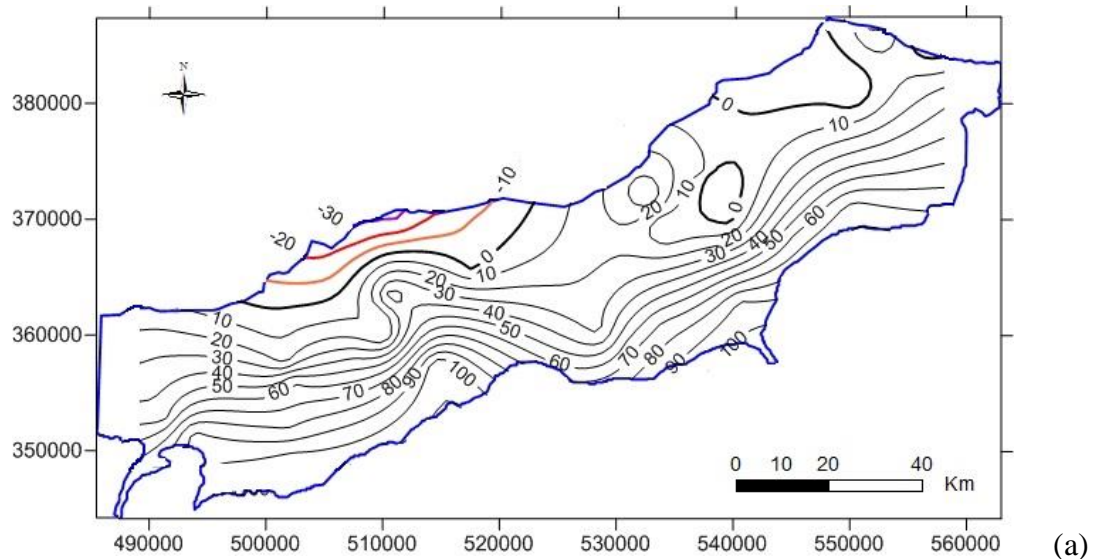


Figure VI.1 : Carte Krigée des Transmissivités de la nappe alluviale de la Mitidja (Toubal, 1998)

VI.4 Piézométrie

Les cartes piézométriques réalisées (Figure VI.2) d'après les campagnes des hautes eaux et des basses eaux 1998, 2005, 2010 et 2015 montrent que les eaux de l'aquifère alluvial s'écoulent du Sud vers le Nord.

- Les gradients hydrauliques diminuent en l'aval.
- On remarque, dans la partie Sud, que des isopièzes sont parallèles à l'Atlas. Ce qui suggère une zone de contact hydraulique (zone d'apport).
- Vers la partie Nord, ces isopièzes s'incurvent pour mettre en évidence la convergence des écoulements vers les principaux exutoires de l'aquifère : Bordj El Kiffan, champs de captage de Barraki et la cluse du Mazafran.
- A l'Est, on localise la présence des champs de captage qui influencent les écoulements souterrains (champs de captage de ; Barraki, Haouch Flit, Haouch bel Abbas) en 2005.
- Dans la région de Rouiba, El Hamiz et Dar El Baida, les courbes hydro-isopièzes sont très espacées, traduisant une zone de très bonne perméabilité confirmée par la lithologie locale et la géométrie de la formation. C'est dans cette région qu'il y a contact des deux aquifères (Astien et la Mitidja).



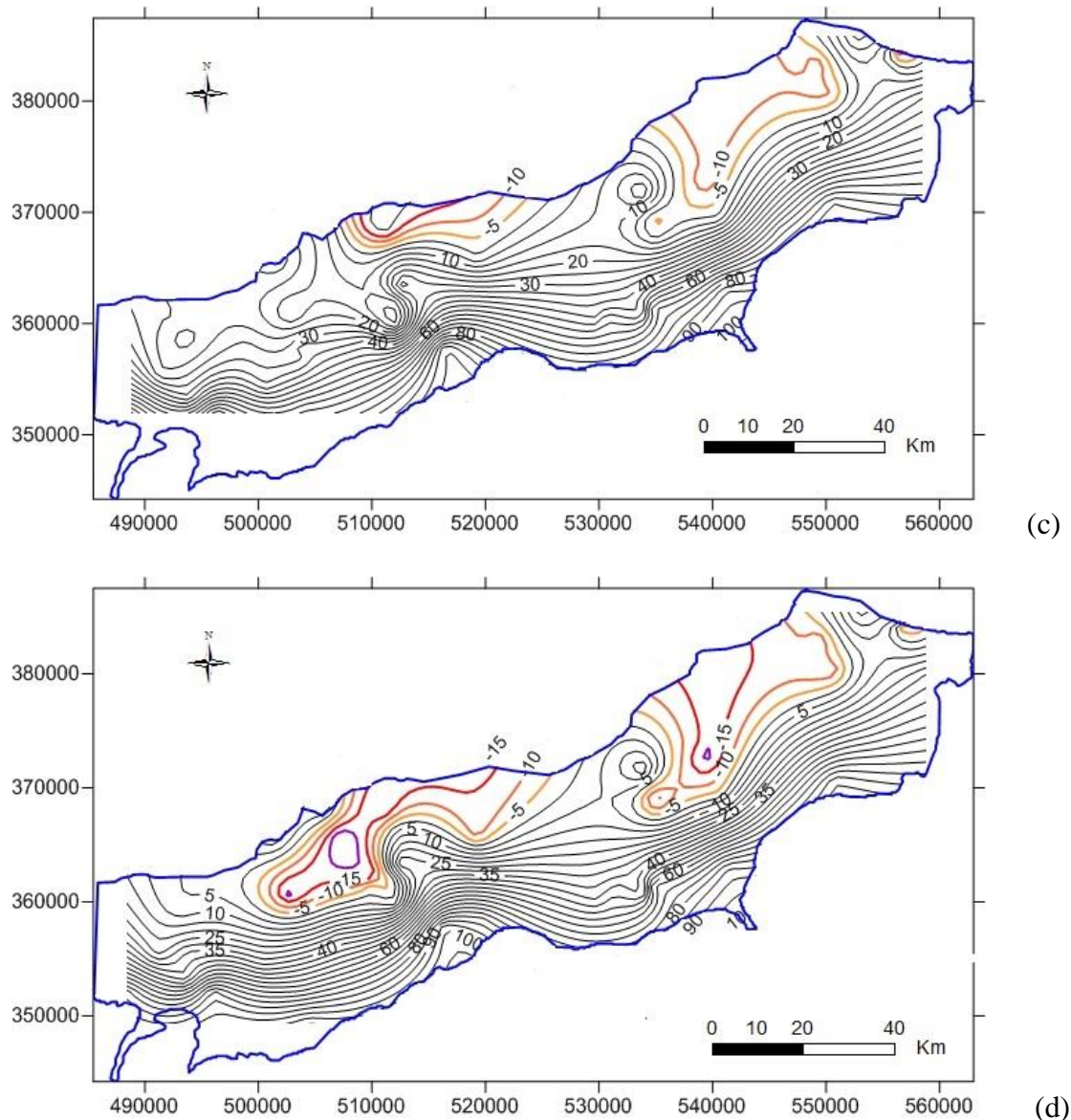


Figure VI.2 : Carte piézométrique de la nappe alluviale de la Mitidja (a) hautes eaux 1998, (b) basses eaux 1998. (c) hautes eaux 2005, (d) basses eaux 2005.

➤ A l'Ouest de la plaine, les courbes sont très influencées par les effets de pompage dans les stations (Mazafran I et II). La comparaison de la carte piézométrique de 1970 avec celles de 1981, 1992 et 2005, montre que le niveau piézométrique de la nappe alluviale a accusé une baisse très importante.

➤ Les niveaux ont baissé de 04 à 20 mètres autour des champs de captage. Cette baisse est liée à l'extension des champs de captage au cours de ces dernières décennies et à la sécheresse qu'a connue la région, entraînant une forte sollicitation des eaux souterraines (surexploitation).

➤ Le graphique (Figure VI.2) met en évidence l'évolution du niveau statique en fonction du temps de deux points d'eau représentatifs à l'Ouest et à l'Est de la plaine. Le rabattement de

➤ Comparer aux cartes piézométriques établies (Figure VI.2) d'après les campagnes de Février et Juillet 1998, le rabattement de la nappe était qu'à ses débuts. Où nous

remarquons une dépression de -5m de l'aquifère au niveau des champs de captage (Barraki et Mazafran).

➤ Les cartes faites à partir des données de 2010, ne font qu'appuyer l'hypothèse de rabattement continu, où le niveau de la nappe descend d'au moins -30 m, surtout du côté Ouest de l'aquifère (Figure VI.3).

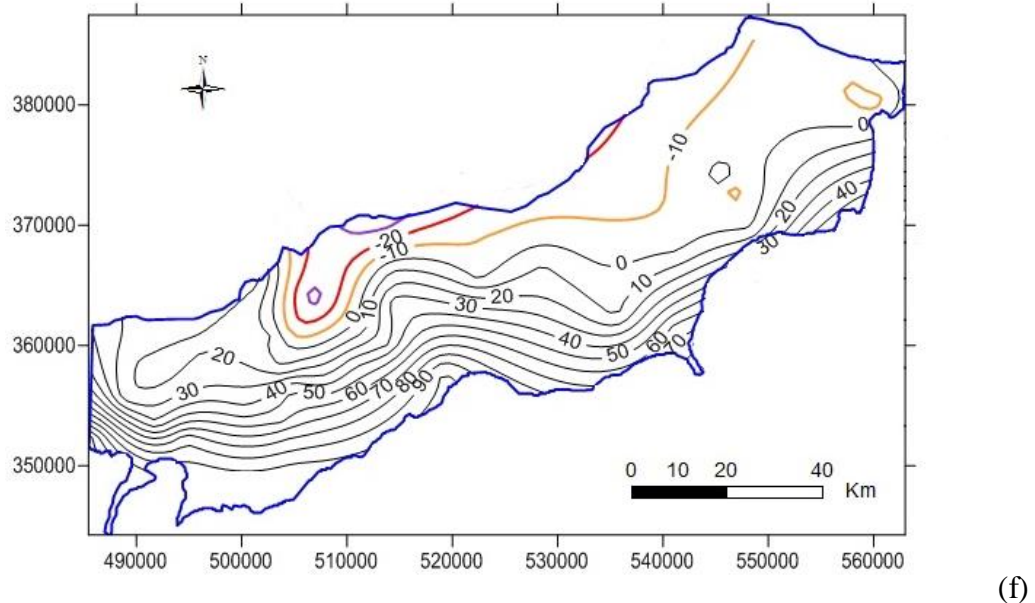
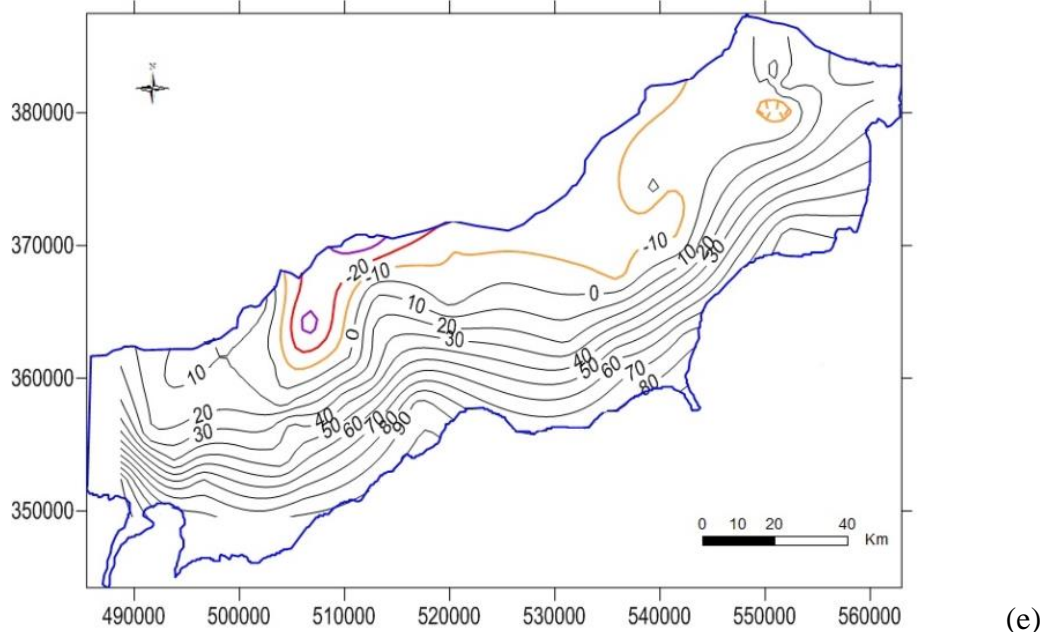
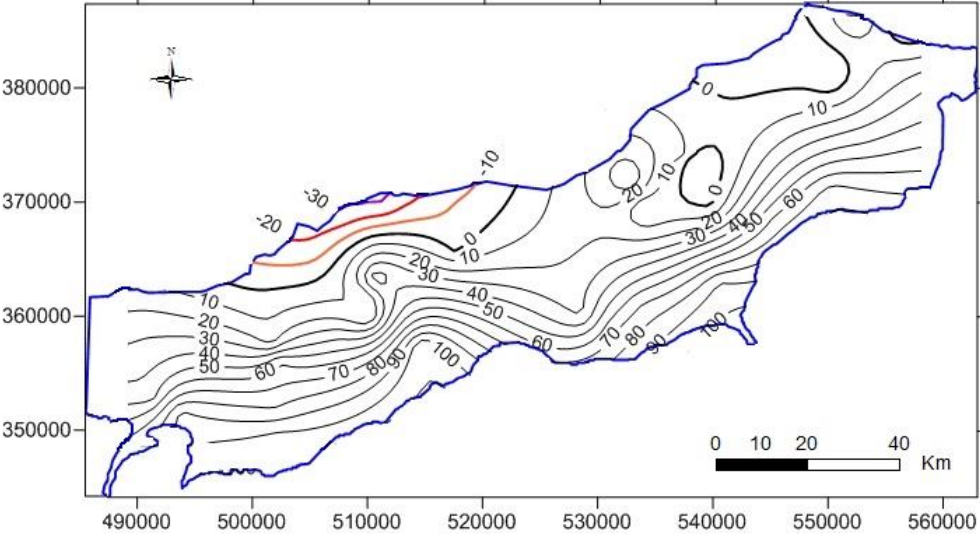


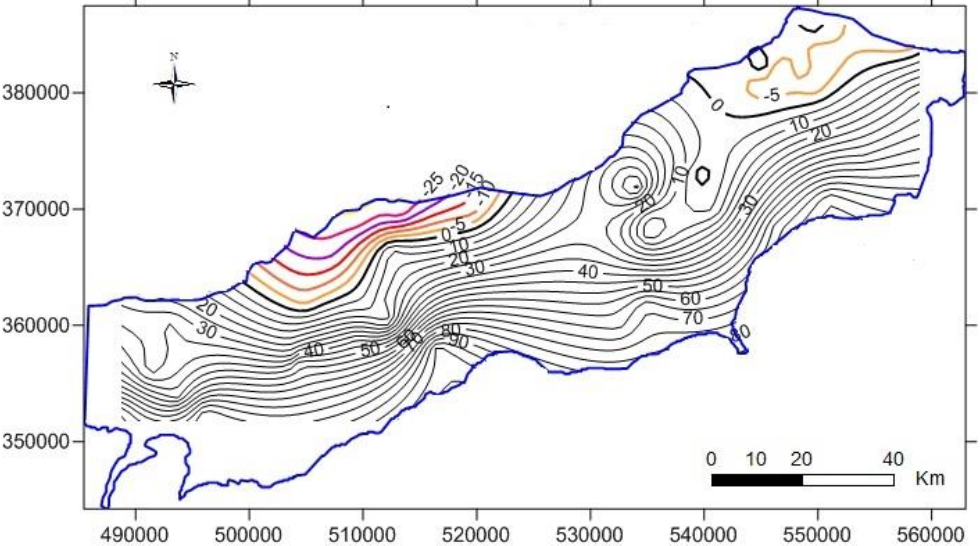
Figure VI.3 : Carte piézométrique de la nappe alluviale de la Mitidja (e) hautes eaux 2010, (f) basses eaux 2010.

➤ La décision qui a prévu l'arrêt progressif de certains forages AEP destinés à l'alimentation d'Alger (champs captant de Baraki et du Hamiz), au profit de la mise en route de Taksep, montre une grande réaction de la nappe à ces modifications de régimes de pompage. Cette décision a été prise après l'étude et les consignes faites par SOGREAH et l'ANRH en 2009 sur la modélisation des grands aquifères. En effet, les chroniques des piézomètres E007-09641 et E008-04594 montrent qu'à partir de 2010, le niveau de la nappe a

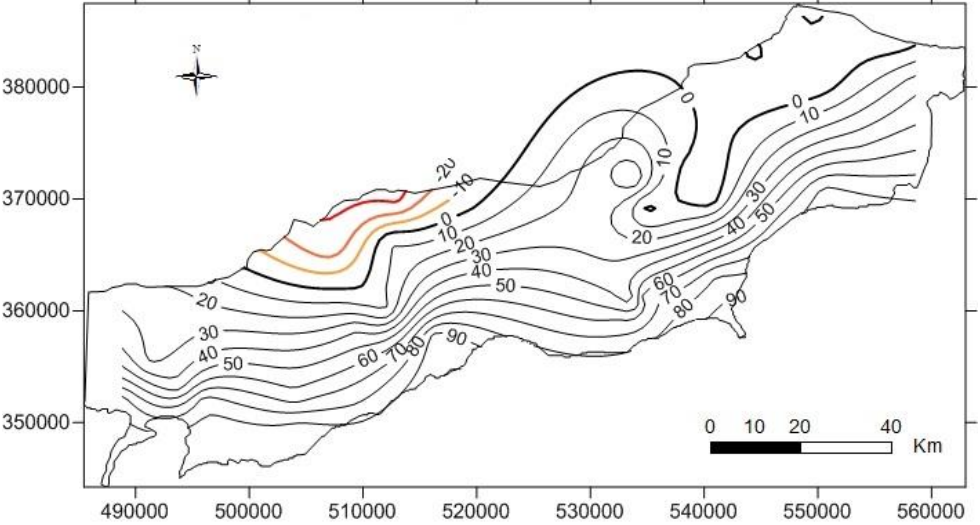
cessé de chuter et a remonté progressivement jusqu'à atteindre son niveau de 1998 dans l'Est de la nappe (-5m) en 2015. Par contre, dans les autres secteurs, le niveau de la nappe est sensiblement identique années précédentes (Figure VI.4).



(g)



(h)



(i)

Figure VI.4 : Carte piézométrique de la nappe alluviale de la Mitidja (g) hautes eaux 2012, (h) hautes eaux 2015, (i) basses eaux 2015.

➤ le suivi du niveau statique en fonction du temps pour deux cas représentatifs à l'Ouest (Mazafran) et à l'Est (Hamiz) de la plaine. La Figure VI.5 montre clairement la grandeur et la rapidité du niveau de rabattement de la nappe qui est de l'ordre de 26,20 m entre février 1998 et octobre 2010, dans le piézomètre MZ1 et de 13 m du piézomètre du champ de captage du Hamiz (PZ).

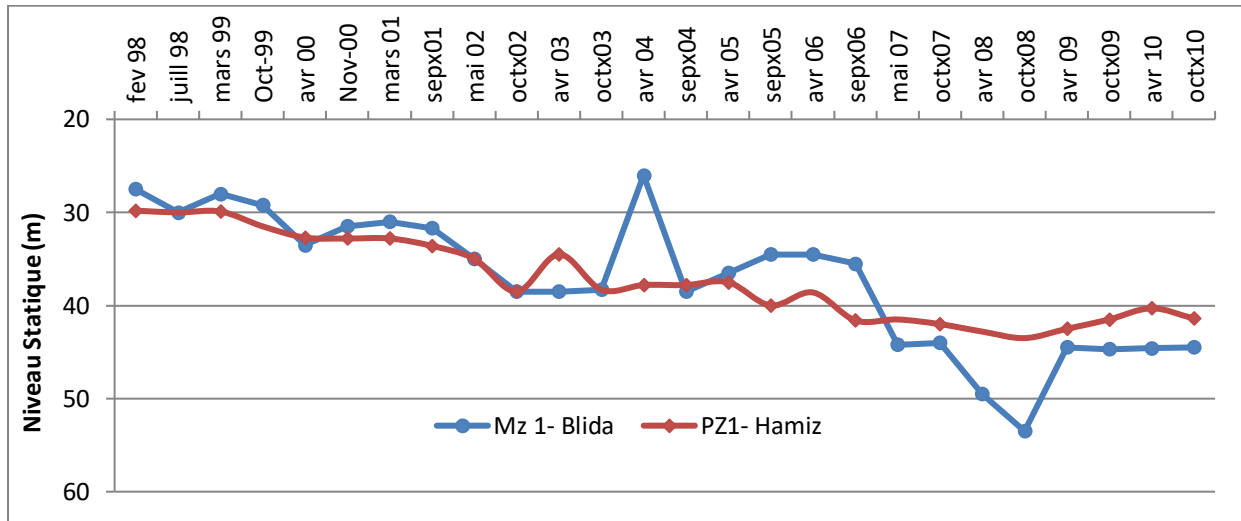


Figure VI.5 : Évolution de la profondeur de la nappe alluviale du secteur de Mazafran MZ1 et du champ de captage du Hamiz (période 1998 à 2010)

VI.5 conclusion

L'étude hydrogéologique nous a permis de faire sortir les caractéristiques des deux aquifères. L'Astien est situé sous la formation d'El Harrach, mais les caractéristiques hydrodynamiques sont mal connues. Son épaisseur est de 100 à 300 m. sa seule source de recharge est le piémont de l'Atlas et son exutoire est vers la nappe alluviale de la Mitidja.

L'aquifère de la Mitidja est considéré comme une nappe libre à transmisivités importantes surtout dans sa partie Est. Un coefficient d'emménagement qui varie de 6% à 7%. une épaisseur de 100 à 130 m. son alimentation se fait par les précipitations, l'infiltration à travers les oueds et l'écoulement souterrain de l'astien. Le drainage de la nappe à partir des oueds, les fuites souterraines vers la mer et le pompage par les différents points d'eau représentent l'exutoire de la nappe.

L'emplacement de l'aquifère de la Mitidja fait qu'il est le plus sollicité que celui de l'Astien. Les relevés piézométriques le montre si bien ou on à des rabattements de plus de 30 m. chose qui peut entrainer des conséquences irréversibles. Après 2010 une remontée de la piézométrie est constatée, due à une diminution de pompage.

Chapitre VII

Hydrochimie de la zone

Chapitre 7 : Hydrochimie de la zone

VII.1 Introduction

L'interaction qui existe entre la composition lithologique des couches traversées par les eaux et le temps de séjour de l'eau dans ces dernières, influe sur sa teneur en ces éléments majeurs (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- ). Les concentrations de ces éléments naturels sont conditionnées par divers facteurs tels que les paramètres climatiques, l'activité anthropique, les échanges entre aquifères et les eaux de surface (Gouaidia ; 2008). Ajouter à cela les activités anthropiques qui ont une grande partie d'influence que ce soit sur la quantité et/ou sur la qualité physicochimique de l'eau.

L'intérêt principal de ce chapitre est de mieux caractériser la qualité des eaux souterraines de la plaine de la Mitidja ainsi que les variations qui surviennent dans l'espace et dans le temps, afin d'essayer de cerner l'origine de la pollution et sa concentration.

Les prélèvements et les analyses de l'eau de la nappe ont été faits par l'Agence Nationale de la Ressource Hydrique. Les analyses sont portées sur tous les éléments chimiques tel que (Mg, Ca, SO_4 , Na, Cl, HCO_3 , NO_3 .. (tableau zzz) pour deux périodes par année : une période des hautes eaux qui vient après la saison printanière (Avril, Mai). Et une période des basses eaux qui vient à l'automne et après les premières pluies (Octobre, Novembre). Pour une année nous avons eu des données sur les métaux lourds tel que , le Zn, Pb, Fe, Cr...

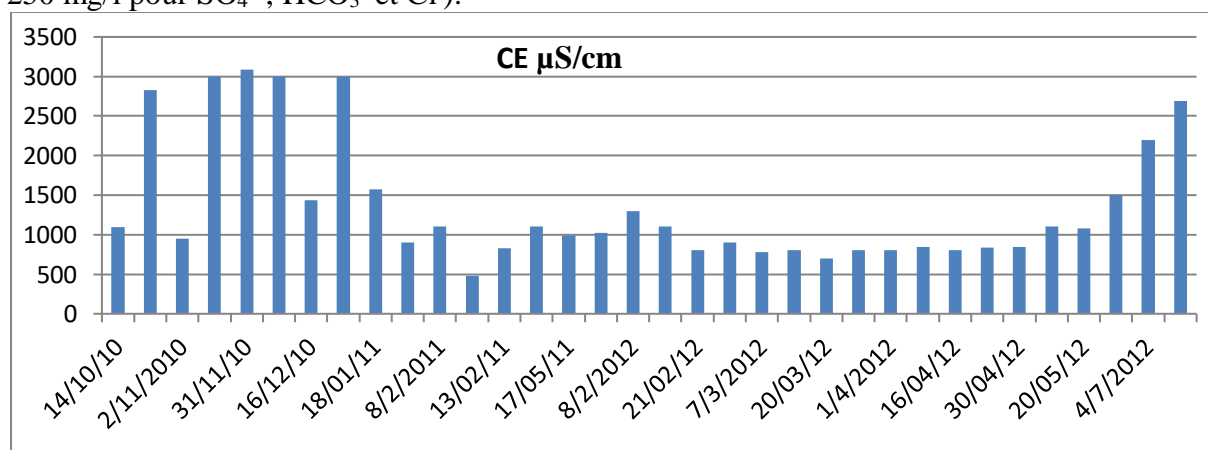
VII.2 Les eaux des oueds ou eaux de surface

Les données de qualité des eaux des oueds manquent beaucoup, cela est dû soit à l'effectif réduit qui collecte la donnée et face à l'immensité de la surface de la nappe ainsi que le nombre qui ne cesse d'accroître des points d'eau. Soit par manque de réactifs qui coûtent chers. Dans le rapport de Meddi et al., 2016 les données d'analyse des eaux superficielles de la station de rocher des pigeons entre 2010 et 2012 a montré qu'au moment de chaque crue la concentration de tous les éléments augmente même celle de conductivité électrique CE, et qui dépassent la concentration de la classe de la salinité très élevée ($\geq 2500 \mu\text{S}/\text{cm}$) (Tableau d'annexe VII.1) et (Figure VII.1).

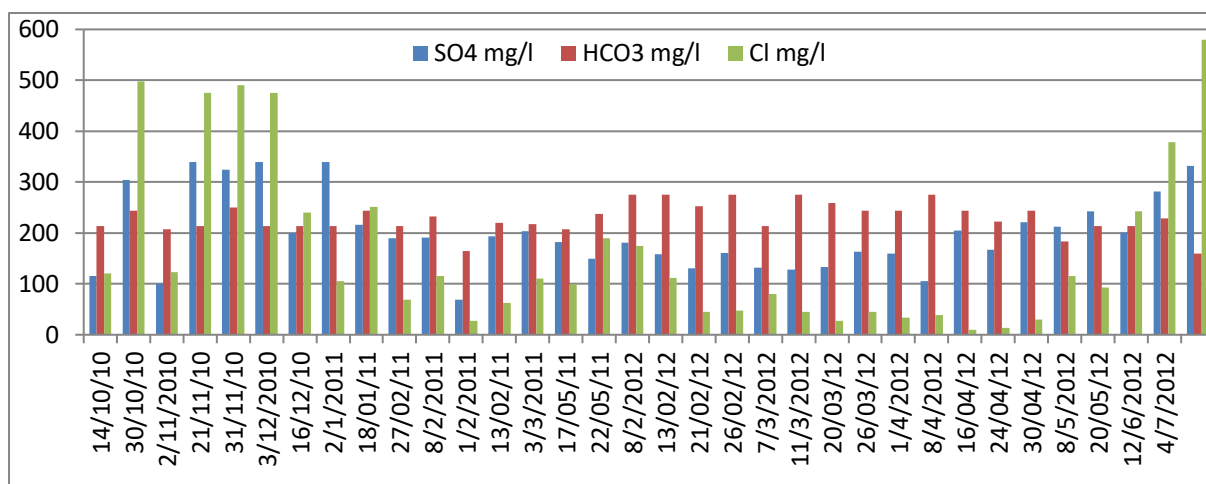
Tableau VII.1 : Moyenne des éléments physique et chimique de l'eau de la nappe de la Mitidja

Nbr de Point	Période	Année	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO4	CO3H	NO3	R.Sec	CE	pH	TH °F
			mg/l											
25 pts	HE	2005	186.66	47.48	116.04	0.40	297.04	211.08	276.79	74.98	1167.48	1799.1	7.28	66.45
46 pts	HE	2006	185.22	43.25	98.66	1.96	181.90	227.59	337.37	84.19	1172.25	1727.4	7.25	64.33
21 pts	HE	2007	171.49	50.01	75.00	0.23	161.66	226.30	356.17	62.52	1139.33	1621.4	7.43	63.71
41pts	HE	2008	144.73	44.27	66.02	0.81	150.88	182.74	327.46	34.36	933.93	1381.9	7.40	54.63
30 pts	HE	2009	144.06	46.94	110.19	2.47	204.56	207.47	292.93	55.99	1021.60	1503.1	7.03	55.57
34 pts	HE	2010	146.03	41.22	113.97	3.61	165.58	178.06	426.36	36.53	1070.31	1701.5	7.76	53.68
27 pts	HE	2011	110.41	42.25	107.86	3.18	136.04	192.09	298.03	39.32	851.18	1312.1	7.71	45.21
37 pts	HE	2012	115.09	62.06	66.24	2.62	143.82	176.36	332.29	38.62	921.53	1414.8	7.77	54.63
34 pts	HE	2014	151.23	38.46	59.74	3.29	135.86	172.89	351.88	51.54	899.51	1377.5	7.71	53.83
31pts	HE	2015	166.28	28.75	65.56	3.03	191.16	169.31	274.98	49.88	974.84	1571.6	8.18	53.55
64 pts	BE	2005	152.07	39.16	81.86	0.69	177.88	163.22	280.77	47.17	899.03	1339.2	7.41	54.34
28 pts	BE	2006	170.85	36.04	89.90	0.69	176.76	186.05	310.36	61.37	1038.20	1480.5	7.34	57.73
22 pts	BE	2007	141.61	42.72	43.22	0.33	96.22	197.11	334.42	35.29	819.56	1241.4	7.56	53.20
38pts	BE	2008	126.33	38.46	102.62	1.38	147.87	164.15	336.06	36.88	894.79	1373.8	7.35	47.61
28 pts	BE	2009	134.66	43.69	104.93	3.23	158.53	202.28	348.37	48.07	1217.50	1403.4	7.60	51.87
30 pts	BE	2010	131.79	44.80	73.97	2.05	133.97	163.53	339.63	35.27	917.37	1404.2	7.95	51.61
34 pts	BE	2011	121.24	62.86	66.74	2.76	133.40	200.56	315.46	37.69	895.43	1353.8	7.54	56.50
18 pts	BE	2012	124.16	85.12	80.84	2.21	175.42	230.58	344.33	61.98	1035.37	1624.9	7.73	66.51
26 pts	BE	2013	55.54	71.98	46.96	16.26	117.78	132.22	320.81	31.30	748.00	1149.4	7.95	43.88
35 pts	BE	2014	149.72	32.33	63.11	2.75	124.58	166.28	346.94	38.64	940.50	1500.4	7.66	50.90

Les autres éléments sont pratiquement en dessous du seuil de limite, ils ne les dépassent que lors ce qu'une crue est enregistrée, charriant avec elle ces éléments (2250μS/cm pour CE et 250 mg/l pour SO₄⁻², HCO₃⁻ et Cl⁻).



(a)



(b)

Figure VII.1 : Les résultats d'analyse de l'eau superficielle pour les trois années de 2010 à 2012 de la station rocher des pigeons (a) CE $\mu\text{S}/\text{cm}$, (b) SO_4^{2-} , HCO_3^- et Cl^- mg/l

VII.3 Caractéristiques chimique des eaux souterraines

VII.3.1 Faciès hydrochimique

A partir des calculs des quantités en réaction (conversion des concentrations en méq/l) et la classification des ions (formule ionique), nous avons déterminé les faciès qui se résument dans le tableau suivant : Les faciès seront représentés sur des graphiques semi -logarithmiques de Schoeller Berkloff avec des valeurs minimum et maximum (Tableau VII.2, Figure VII.2). Enfin, une carte des faciès chimiques a été établie pour donner une évolution globale du chimisme des eaux de la nappe de la Mitidja.

Tableau VII.2 : La moyenne des pourcentages des faciès des années 2004- 2010

Faciès	Bicarbonaté Calcique	Chloruré Calcique	Sulfaté Calcique	Chloruré Sodique	Bicarbonaté Sodique	Bicarbonaté Magnésien	Chloruré Magnésien
%	63.64 %	14.48 %	7.48 %.	6.15 %.	3.02 %	3.10 %	2.13 %

Le changement de faciès entre ces deux années n'exécède pas les 10%.

- Le faciès bicarbonaté Calcique provient des calcaires présents de la lithologie des la zone (Astien et quaternaire).
- Le Chloruré Calcique est généralement due à l'influence de l'intrusion marine et/ou à celle de la pollution industrielle, sans oublier la lithologie de la zone.
- Le faciès Sulfaté Calcique peut provenir de la formation de l'Astien et peut être du à une pollution agricole.
- Le faciès Bicarbonaté Magnésien et le Bicarbonaté Sodique peuvent être dus au lessivage des terrains.

Ajouter à cela le facteur de minéralisation qui est du en grande partie à la lithologie, l'hydrodynamisme de la nappe, l'intrusion marine et à l'entropie.

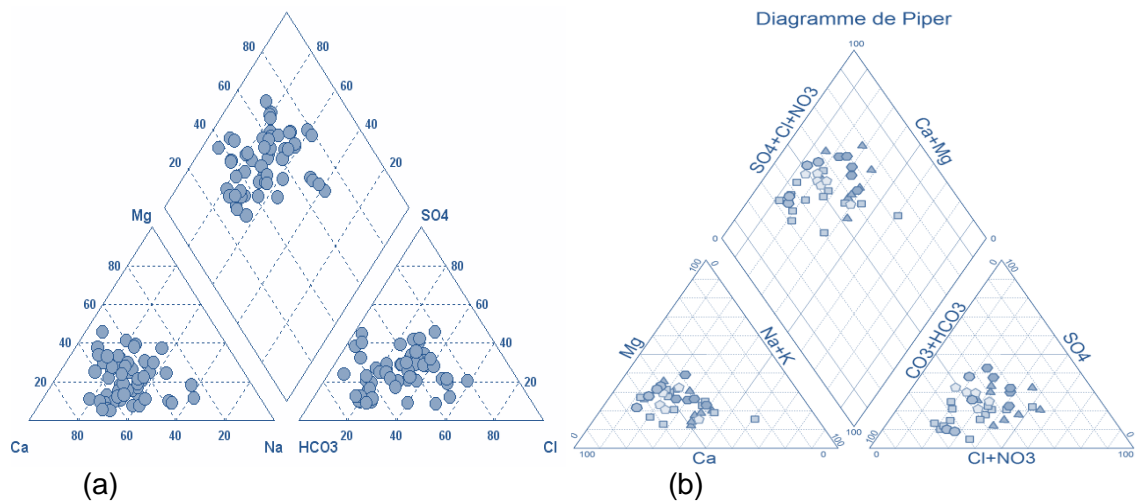


Figure VII.2 : Diagramme de Piper pour eaux années de la nappe alluviale de la Mitidja ((a) 2005, (b) 2010)

➤ Les travaux de Toubal de l'année 1992 ont montré sur toute la bande côtière une évolution chimique des eaux vers les pôles Sodiques et Sulfatés (Figure VII.3). Cela révèle la présence d'une contamination par les eaux marines.

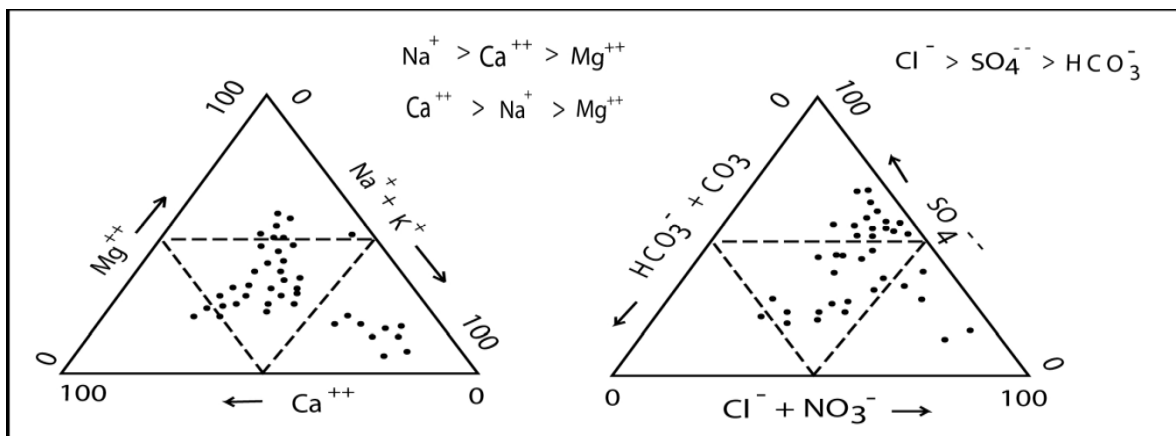


Figure VII.3 : Classification chimique des eaux selon piper (Juillet, 1992) in (Toubal, 1998)

Généralement, les eaux de la nappe alluviale sont caractérisées, d'une façon générale, par une potabilité bonne à passable.

➤ Établi par Schoeller en 1934, l'indice d'échange de base (i.e.b) ou indice d'équilibre chloruré alcalin mis en évidence les échanges ioniques entre les eaux et la lithologie du réservoir aquifère.

$$i.e.b = \frac{rCl^- - r(Na^+ + K^+)}{rCl^-}$$

où Cl^- , Na^+ , K^+ : en méq/l, où :

i.e.b > 0 - Le Na^+ de l'eau est échangé contre le Ca^{++} et Mg^{++} de la formation.

i.e.b < 0 - Le Ca⁺⁺ et Mg⁺⁺ sont échangés contre le Na⁺ du terrain.
i.e.b = 0 - Il n'y a pas d'échange ionique entre la roche et l'eau (état d'équilibre).
 ➤ Plus de 80 % des échantillons analysés dans la partie Est présentent un i.e.b > 0 cela correspond à un échange du Sodium de l'eau contre le Ca⁺⁺ et Mg⁺⁺ du réservoir, qui peut être expliqué par un échange de Na⁺ de l'eau de mer contre le Ca⁺⁺ de la nappe (zone de la baie d'Alger). Tandis que, dans la partie Ouest de la plaine 30% des échantillons ayant un i.e.b < 0 reflètent un échange entre le Ca⁺⁺ et Mg⁺⁺ de l'eau contre le Na⁺ de la formation (Figure VII.4).

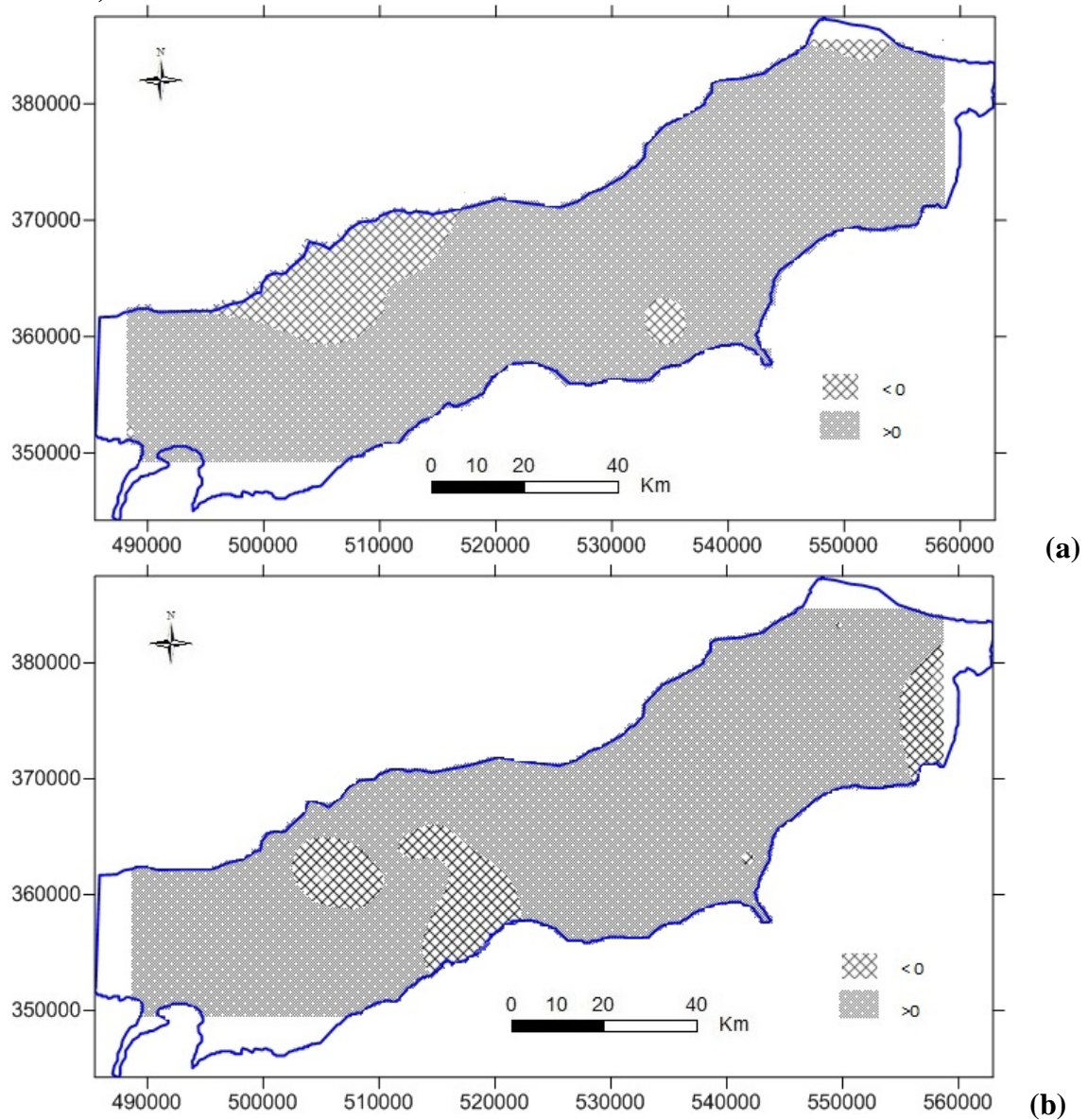


Figure VII.4 : Carte d'iso-indice d'échange de base de la nappe alluviale de la Mitidja, (a) des hautes eaux 2014, (b) des basses eaux 2014.

VII.4 Cartographie et analyse des paramètres physicochimique

VII.4.1 Le PH

Comprit entre 7.4 et 8.2 ce qui fait que notre eau est neutre à légèrement alcaline pour deux années 2010 et 2014 (Figure VII.5), la variation est pratiquement légère.

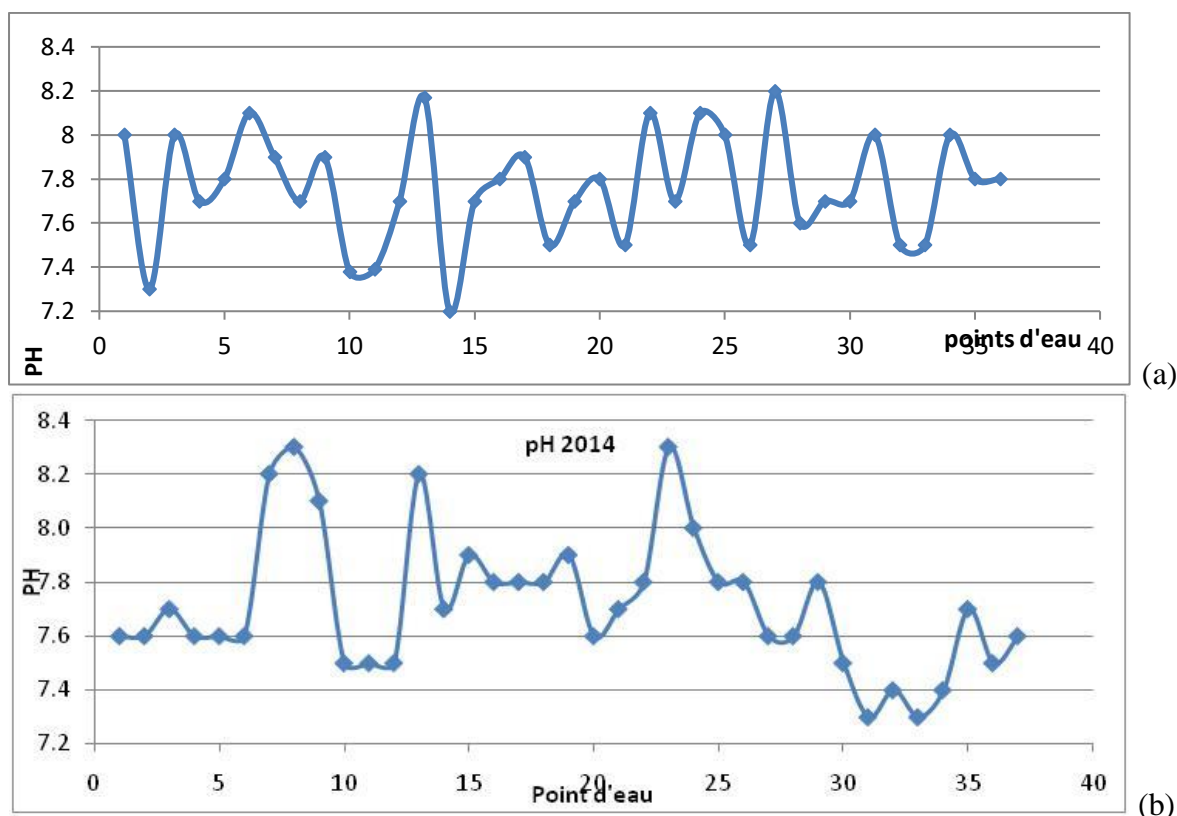


Figure VII.5 : Variation du PH de l'eau pour deux années (a) 2010 et (b) 2014

VII.4.2 La conductivité

Trois plages de fortes valeurs se distinguent au Sud Ouest du côté de Hameur El Ain, dans la partie centrale entre Chebli et Rovigo et à l'extrême Nord Est du côté de Reghaia Ces valeurs élevées sont dues à la dissolution des formations carbonatées de l'Atlas Blidéen vu les valeurs élevées des bicarbonates. Alors que dans le cas de la partie Nord Est, cette hausse des valeurs est due principalement à l'intrusion marine ainsi qu'à la pollution surtout du lac de Reghaia. Ajouter à cela que seulement une partie infime (7 000 m³/jour) des rejets des eaux de la ville de Réghaïa et de la ville de Heraoua est collectée et acheminée vers la STEP, le reste est directement rejeté dans l'oued. (Thibault et al, 2006). (Figure VII.6 (a) et (b)).

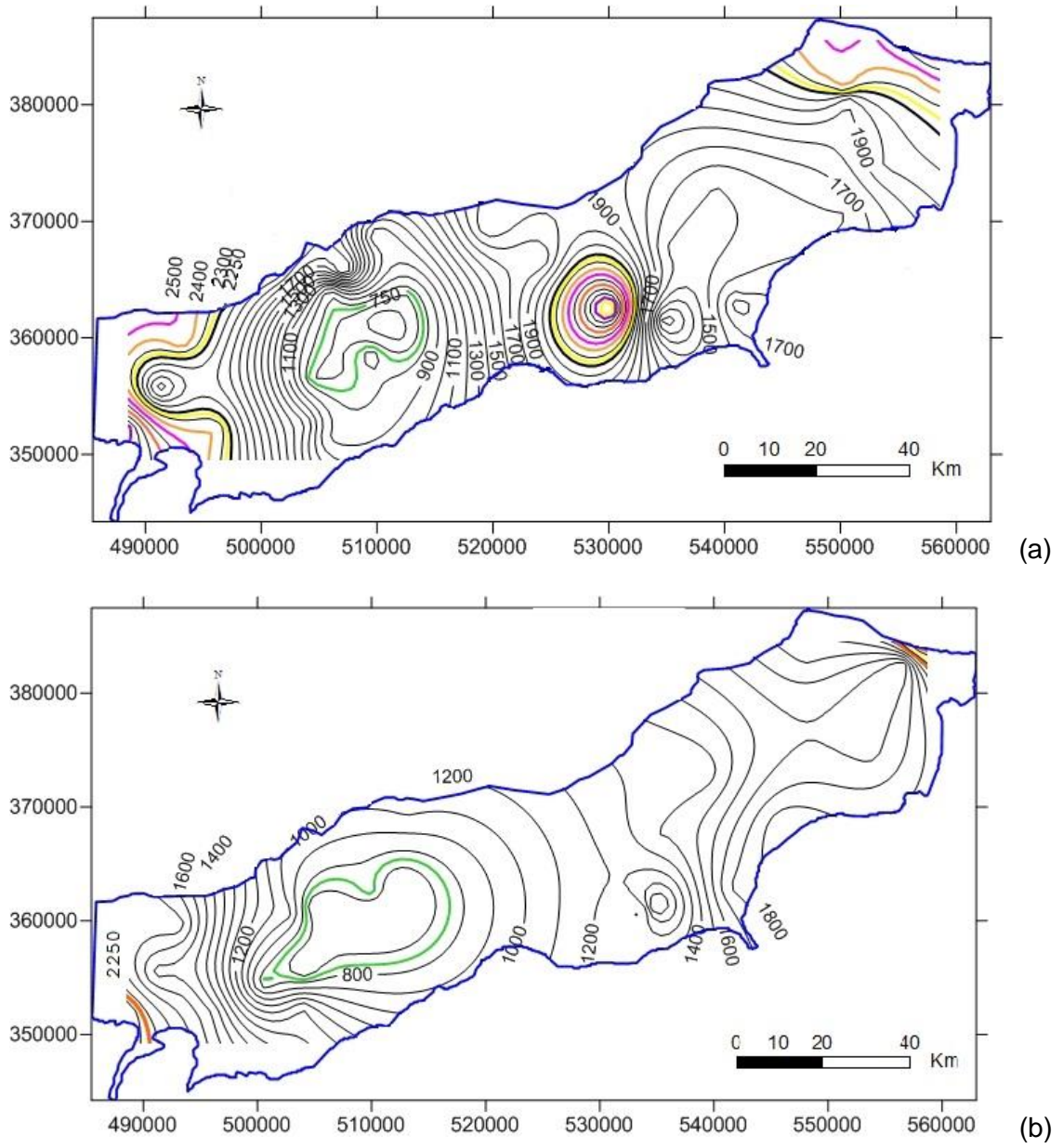


Figure VII.6 : carte des isovaleurs de la conductivité électrique CE des (a) hautes eaux, (b) basses eaux de l'année 2010.

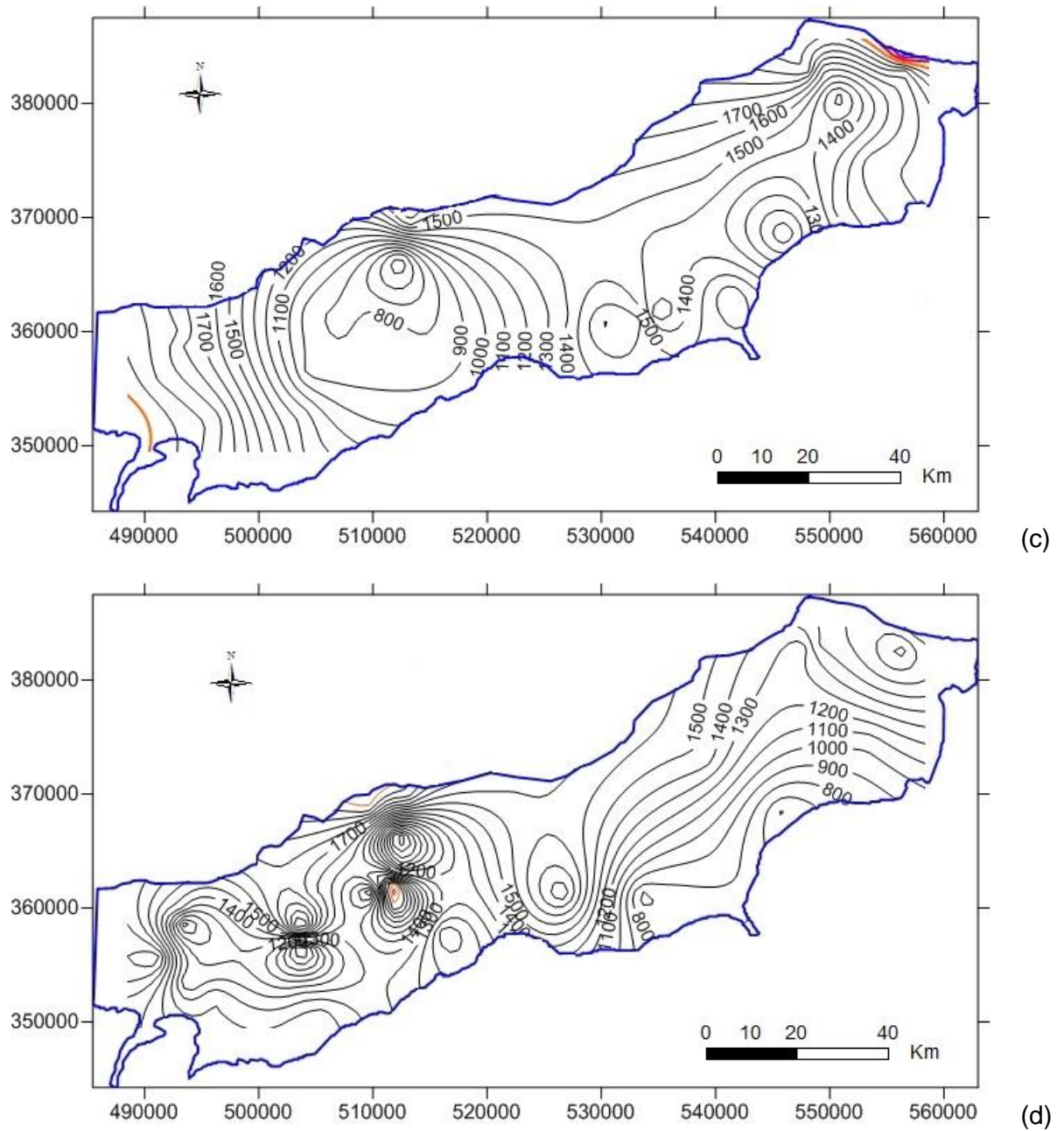
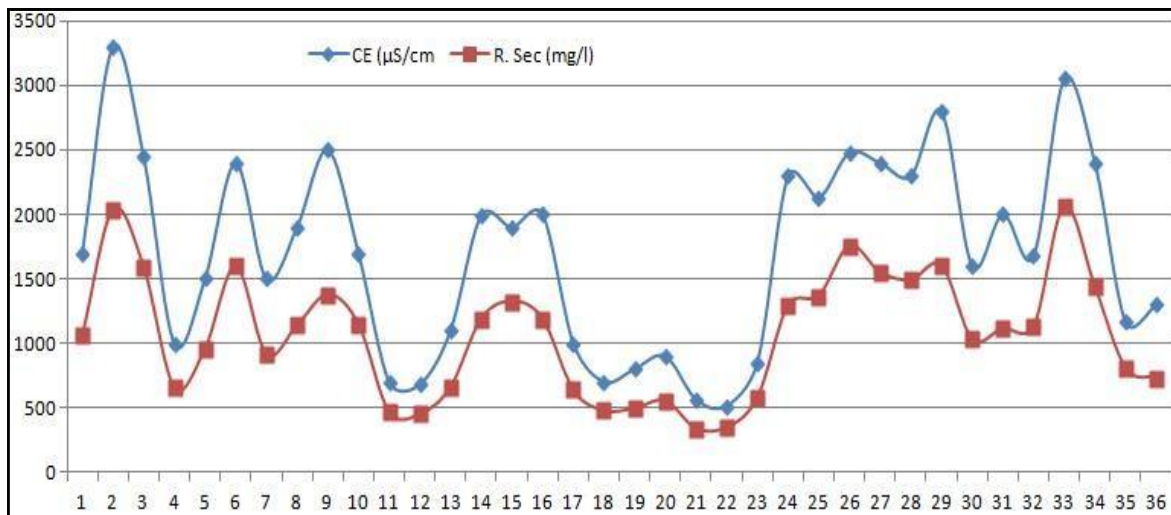


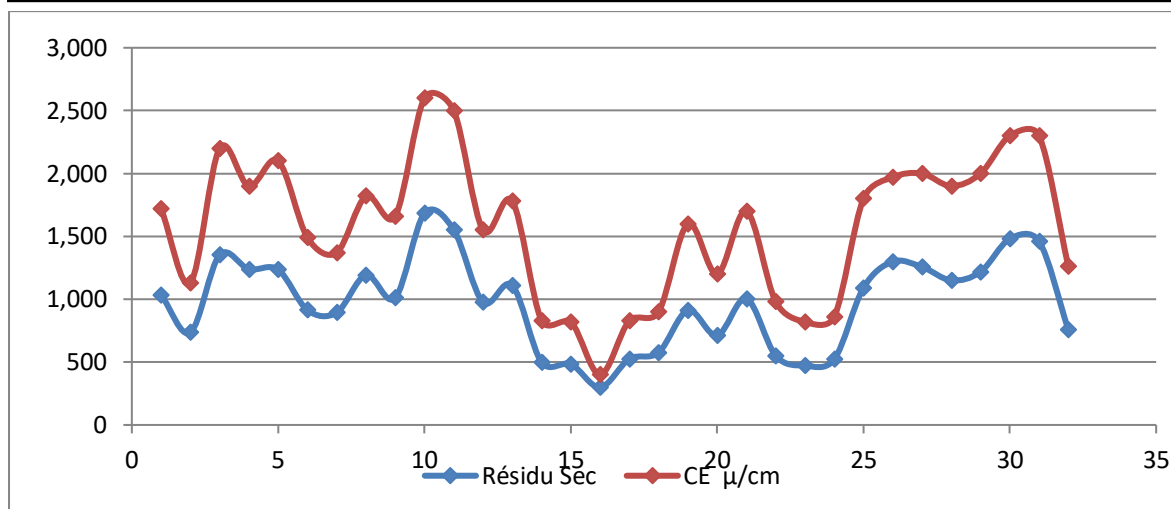
Figure VII.7 : carte des isovalues de la conductivité électrique CE des (c) hautes eaux (2015) et (d) basses eaux (2014).

VII.4.3 Le résidu sec

Il marche de paire avec la conductivité ou on remarque la même évolution (Figure VII.7, Figure VII.8).



(a)



(b)

Figure VII.8 : Variation de la Conductivité - Résidu Sec de la Mitidja (hautes eaux 2010 (a) et 2015 (b))

VII.4.4 La Dureté ou Degré Hydrométrique (°d h)

Les eaux de la plaine de la Mitidja présentent une dureté totale assez élevée, qui est due principalement à son faciès Bicarbonaté Calcique à plus de 64.6%. En considère qu'une eau est douce quand sa dureté est entre 0 et 7 °F, dure entre 32 à 54 °F et très dure à plus de 54 °F. les eaux très dures sont presque dans toute la plaine, les moins dure ou assez douce sont situées dans la zone centrale de la Mitidja (Figure VII.9).

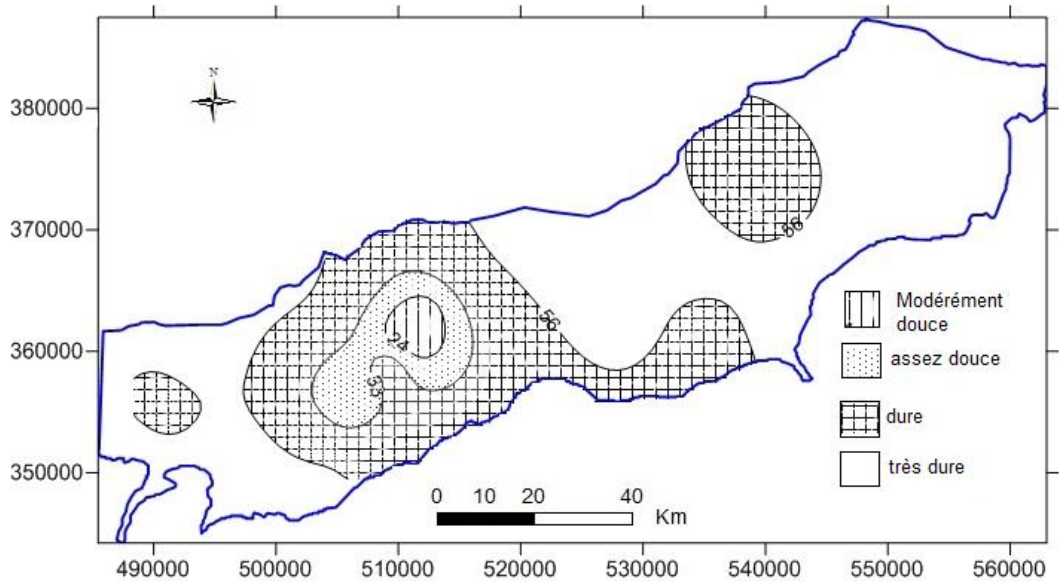
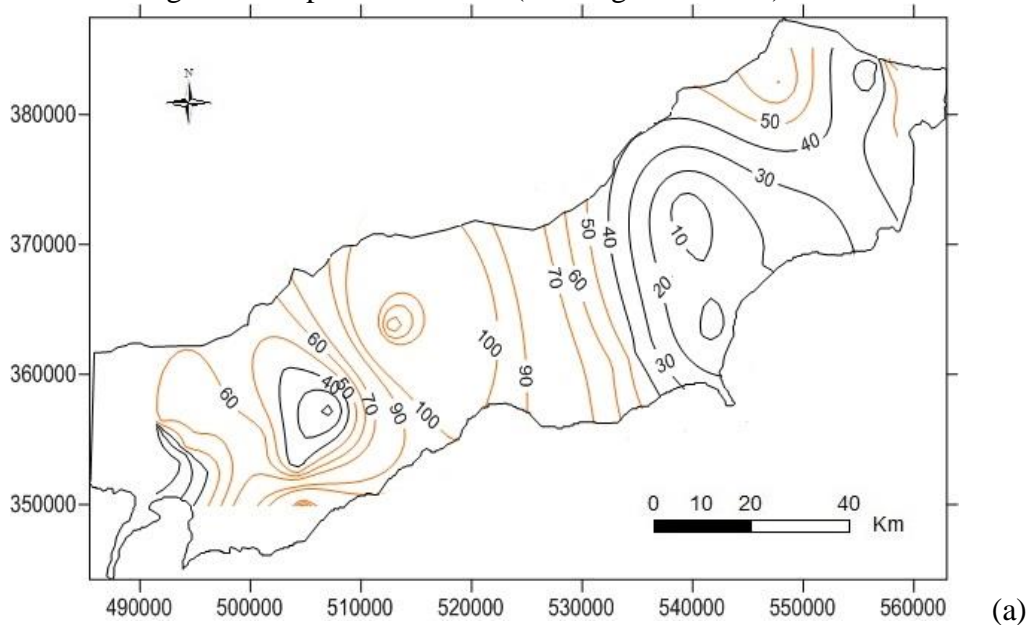
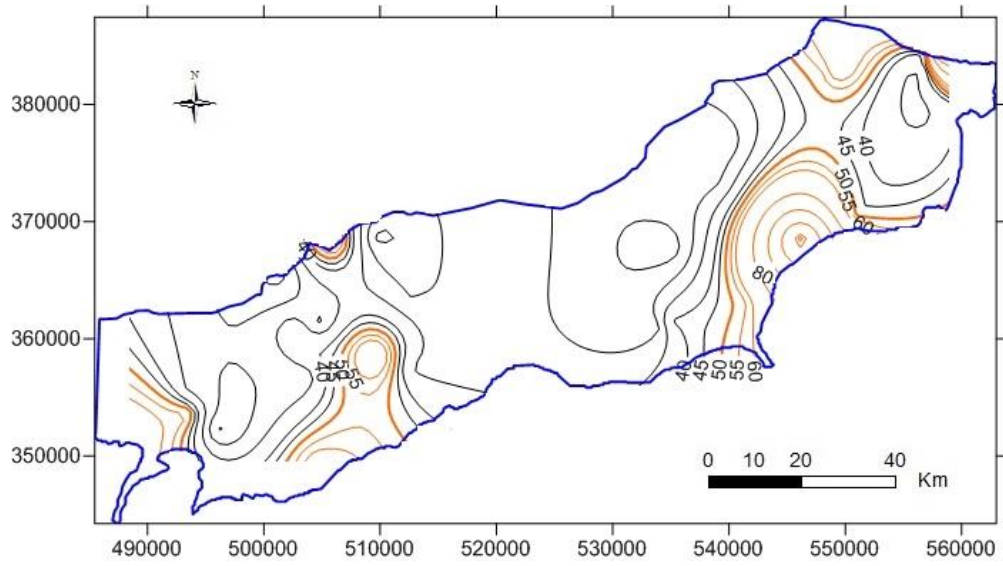


Figure VII.9 : Classes de dureté (° F) de la nappe alluviale de la Mitidja (Avril, 2010)

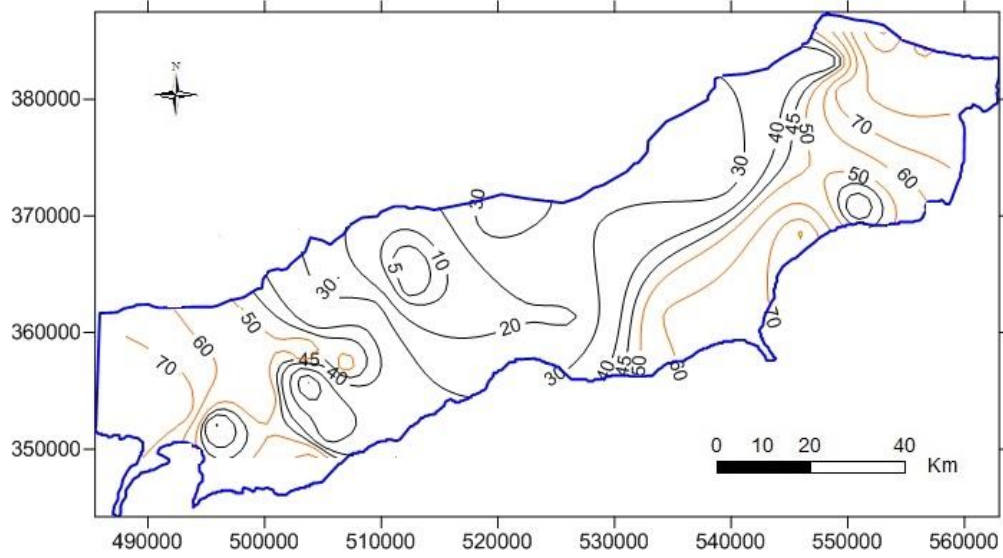
VII.4.5 Les Nitrates

La norme fixée par l'OMS est de 50 mg/l pour la potabilité d'une eau. Cette élément provient généralement de l'agriculture (amendement chimique) ou des rejets des eaux usées directement dans les Oueds. Notre zone d'étude présente une contamination des eaux par les nitrates dans la zone Est qui est touchée principalement par des rejets industriels (Rouiba, Réghaia), la zone Sud-Ouest touchée par l'agriculture (Zone de Sidi Rached) et en fin la zone centrale (Bougara) (Figure VII.10).une variation est constatée entre les basses et hautes eaux, ou le taux de nitrate augmente en période humide (lessivage des terres).

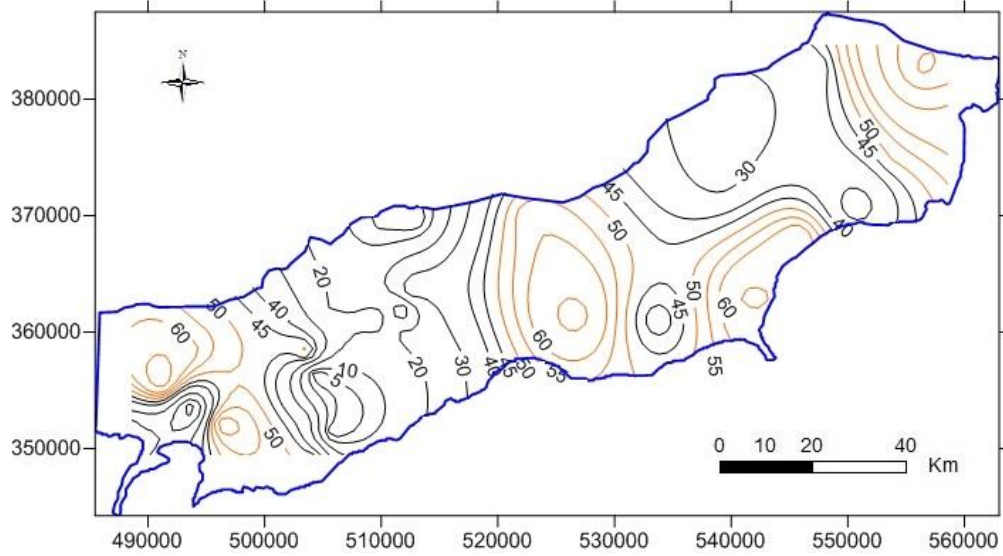




(b)



(c)



(d)

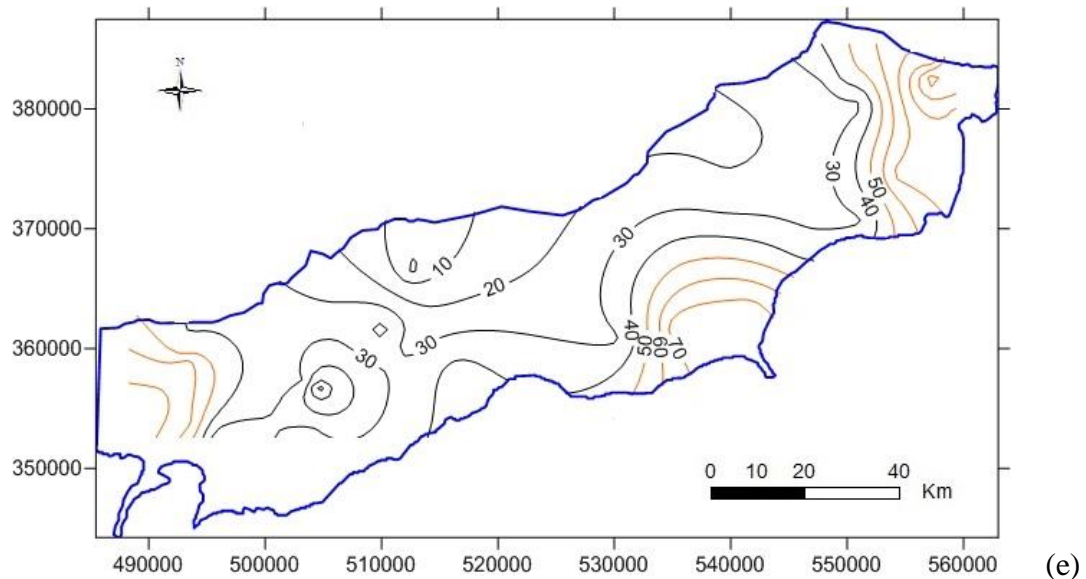


Figure VII.10 : Carte d'iso-teneurs en azote dans les eaux souterraines de la plaine alluviale de la Mitidja ((a) hautes eaux 2005, (b) basse eau 2005, (c) haute eau 2014, (d) basse eau 2014, (e) haute eau 2015))

VII.5 Les éléments Majeurs et normes de l'OMS

Tableau VII.3 : Norme de l'OMS

Unité	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	R.Sec	CE	pH
	mg/l									μS/cm	
Norme	100	50	150	12	250	250	250	50	1500	2500	9.5

➤ Le faciès chimique de la zone influence beaucoup le taux de **Ca⁺⁺** dans l'eau, ou on le trouve à plus des 3/4 des eaux des forages, avec une valeur qui dépasse largement la norme (250 mg/l) (Tableau VII.3)

➤ Bien que la provenance est la même que celui du **Ca⁺⁺**, le **Mg⁺⁺** présente des valeurs très faibles qui n'excèdent pas la norme (<50mg/l). il provient essentiellement du lessivage du Vilafranchien.

➤ Pour le sodium **Na⁺**, les valeurs les plus élevées sont rencontrées près de la zone de la baie d'Alger, où le phénomène d'intrusion marine est très accentué. Les autres points d'eau représentent une valeur modérée à faible.

➤ Le potassium **K⁺** et les sulfates **SO₄⁻** et le chlore **Cl⁻** ont plus de 98% des valeurs inférieurs ou égale aux normes de l'OMS.

➤ Les fortes teneurs de bicarbonates **HCO₃⁻** sont enregistrées pendant la période des hautes eaux pour la période des hautes eaux de 2014. Ceci s'explique par un plus important lessivage des formations carbonatées par les pluies hivernales. Nous constatons par contre que le centre de la plaine est occupé par des valeurs faibles en bicarbonate en Octobre 2005 (Figure VII.11).

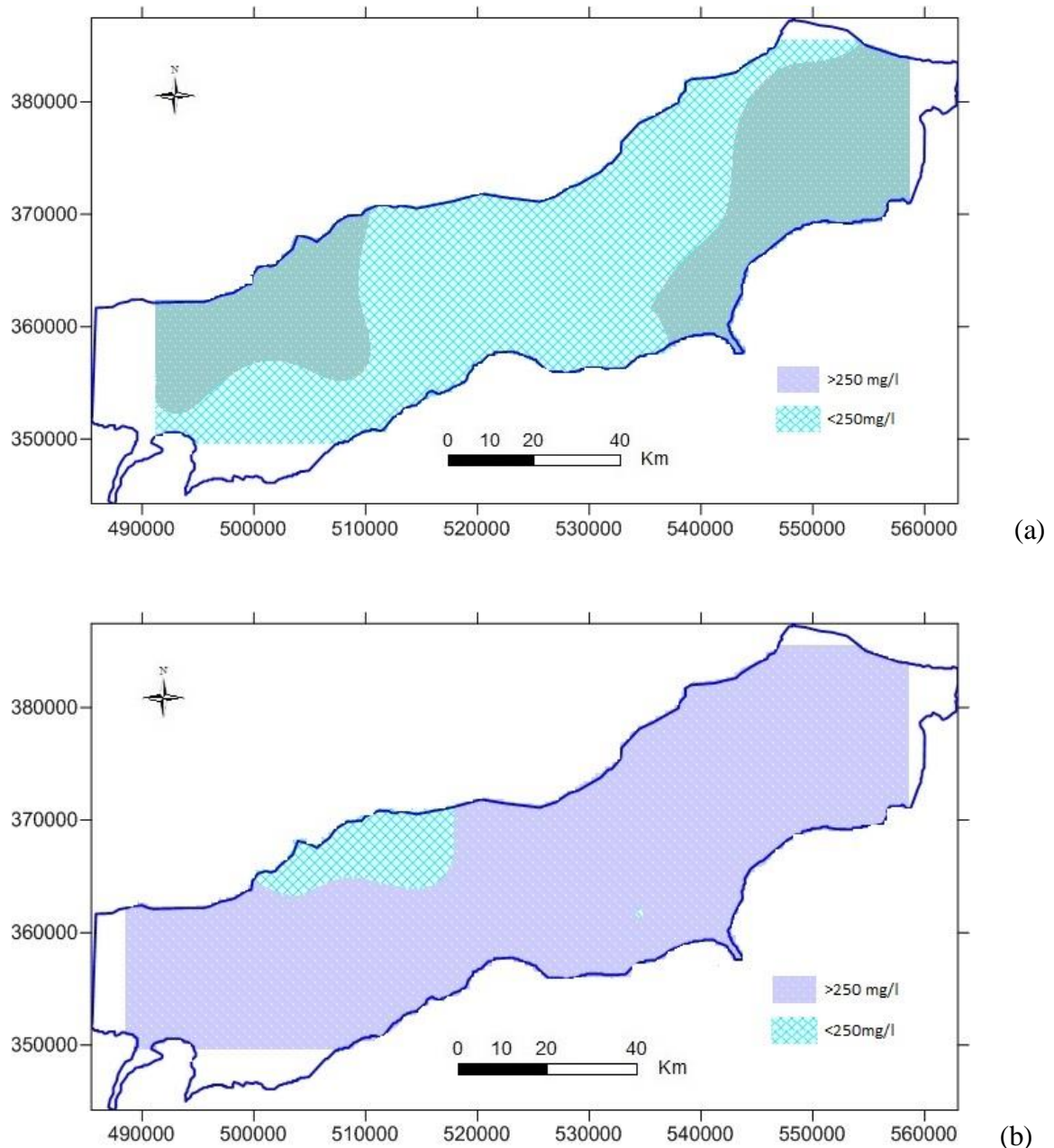


Figure VII.11 : Carte d'iso-teneurs des bicarbonates des eaux souterraines de la plaine alluviale de la Mitidja (a) hautes eaux 2005, (b) hautes eaux 2014.

Le paramètre limiteur d'utilisation de l'eau à l'irrigation c'est les concentrations élevées en sel et surtout SAR élevé, qui agit directement sur la destruction d'un sol. Pour l'estimation de la qualité d'eau d'irrigation, le diagramme de Riverside est un outil très clair. Pour ce faire, il a besoin de valeurs de la conductivité calculées en quatre (04) classes (C1,...C4), de la conductivité la plus faible vers la plus forte. De même pour le SAR, il est classé de la même manière que celui de la CE (S1,...S4). La position des points sur le diagramme nous donne la classe de l'eau. Les valeurs de Ca^{++} , Mg^{++} , Na^{+} doivent être en méq/l.

Les valeurs des deux années 2005 et 2014 des basses et hautes eaux ont des valeurs de SAR inférieures à 6 (<classe S1) qui ne doit pas poser de problème aux sols irrigués par cette eau (Figure VII.12)

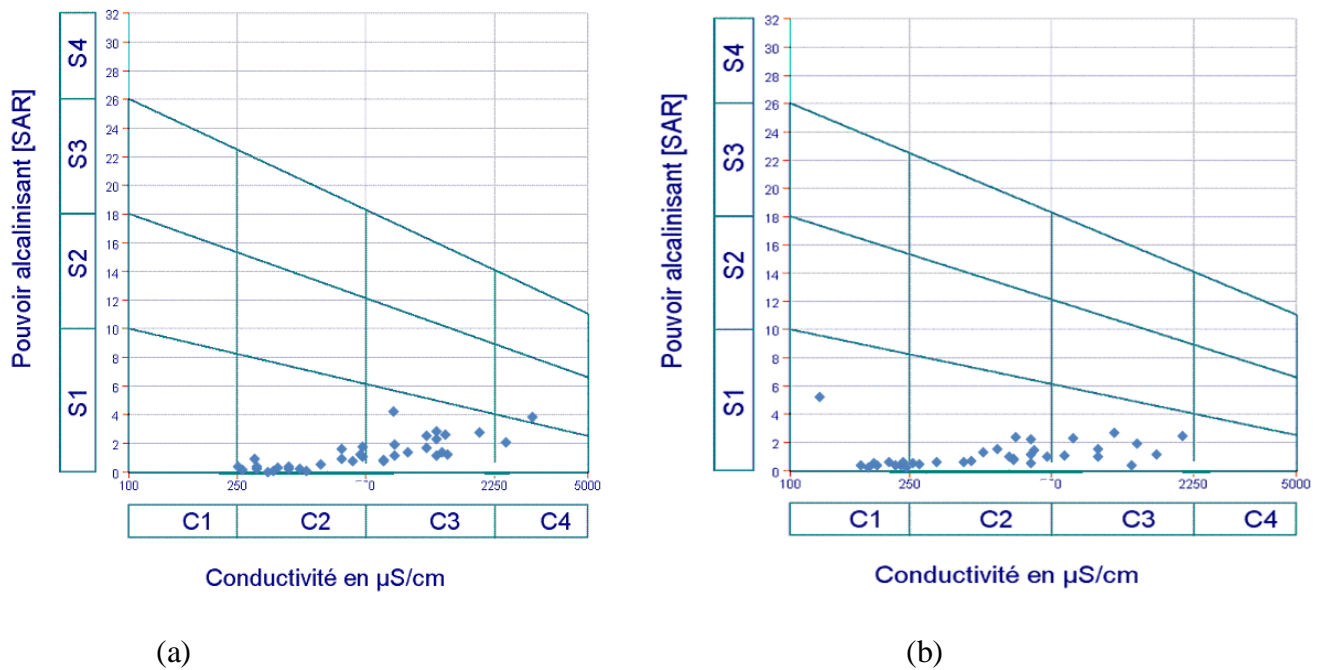


Figure VII.12 : Diagramme de Riverside des eaux souterraines de la plaine alluviale de la Mitidja (a) hautes eaux 2010, (b) hautes eaux 2014.

Toute l'eau de la nappe de la Mitidja appartient au maximum de sa concentration en sel et en Na^+ à la classe C3S1, qui lui confère l'aptitude à l'irrigation sans poser de problème.

VII.6 Quelques éléments de métaux lourds

L'ANRH a fait pour quelques points d'eau les analyses de métaux lourds tel que le fer Fe^{++} , le manganèse Mn, le cuivre Cu, le zinc Zn, le plomb Pb, le chrome Cr, l'arsenic As et le cadmium Cd et cela pour les années 2008, 2009 et 2010. La présence de ces éléments est due principalement à l'implantation des zones industrielles sur le périmètre de la plaine de la Mitidja. Les concentrations sont d'ordre générale faible, et leur présence dans les eaux de la nappe est due à la perméabilité très importante des couches de sol. Nous avons fait une étude générale sur la zone de contamination, puis une étude sur le degré de pollution de cette zone selon les normes OMS (Tableau VII.4).

Tableau VII.4 : Norme de l'OMS des métaux lourds

Paramètre	Fer	Manganèse	Cuivre	Chrome	Plomb	Zinc	Cadmium
	mg/l						
Norme OMS	0.1	0.4	2	0.05	0.01	3	0.003

VII.6.1 Le Fer Fe

Se trouve naturellement dans la couche aquifère, une concentration anormalement élevée ne peut provenir que des activités de l'Homme. C'est un élément indésirable et qui présente des inconvénients plus d'ordre organoleptique que toxique.

Le point d'eau de Boufarik, en période des hautes eaux 2010, a enregistré la seule valeur dépassant les normes. À l'Est de la plaine les points dont la contamination en fer est très forte (21.94 et 4.75 mg/l) se trouve à Oued Smar et Dar El Beida. La contamination des forages de Rouiba dépassaient de peu la norme (Hautes eaux 2009). Toutes ces zones présentent une implantation de zones industrielles ou d'aéroport. Il en est de même pour la période des basses eaux 2009, et point de contamination se trouvaient dans les communes de Rouiba, Réghaea, Ouled Moussa, El Harrach et Dar El Beida (Figure VII.13, Figure VII.14). L'année 2008 (hautes et basses eaux) tous l'Est de la nappe de la Mitidja qui a été contaminé, avec deux valeurs max 39.31 mg/l et 10.75 mg/l dans Sidi Moussa Bougara respectivement. En plus la période des hautes eaux présente la surface et la valeurs de contamination les plus grandes.

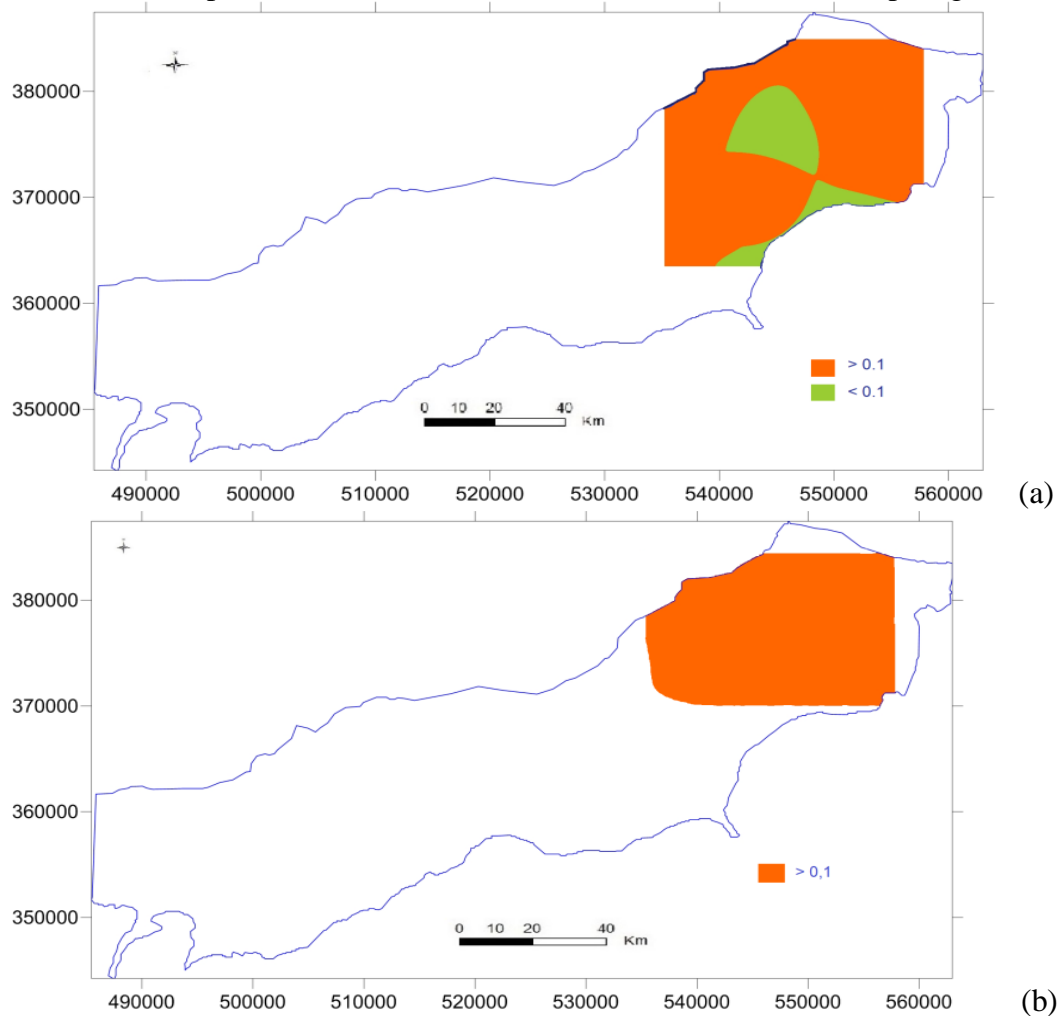


Figure VII.13 : Carte d'iso-indice de concentration limite de Fer de la nappe alluviale de la Mitidja, (a) hautes eaux 2008, (b) des basses eaux 2008.

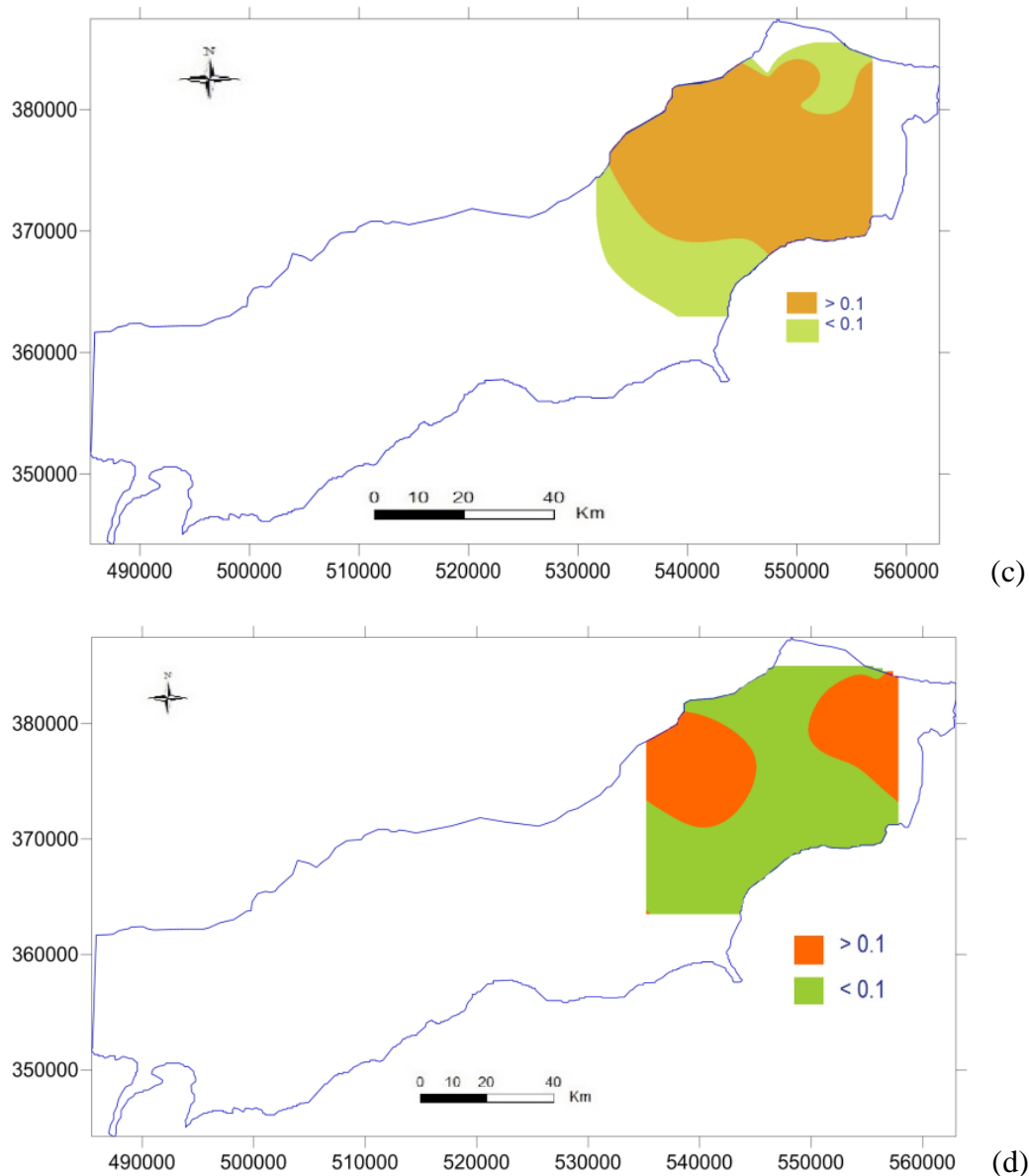


Figure VII.14 : Carte d'iso-indice de concentration limite de Fer de la nappe alluviale de la Mitidja, (c) hautes eaux 2009, (d) des basses eaux 2009.

VII.6.2 Le Manganèse Mn

Le manganèse (Mn) est un élément métallique présent dans de nombreux types de roche. Il est également fréquent dans l'eau et est indispensable, en petites quantités, à tous les organismes vivants. A grande concentration il apporte des modifications à l'eau d'ordre : goût, saveur, coloration. Pour notre zone, on remarque qu'il pollue le côté Est, où se trouve la zone industrielle de Rouiba Réghaia en (a) plus Dar El Beida en (b) (Figure VII.15)

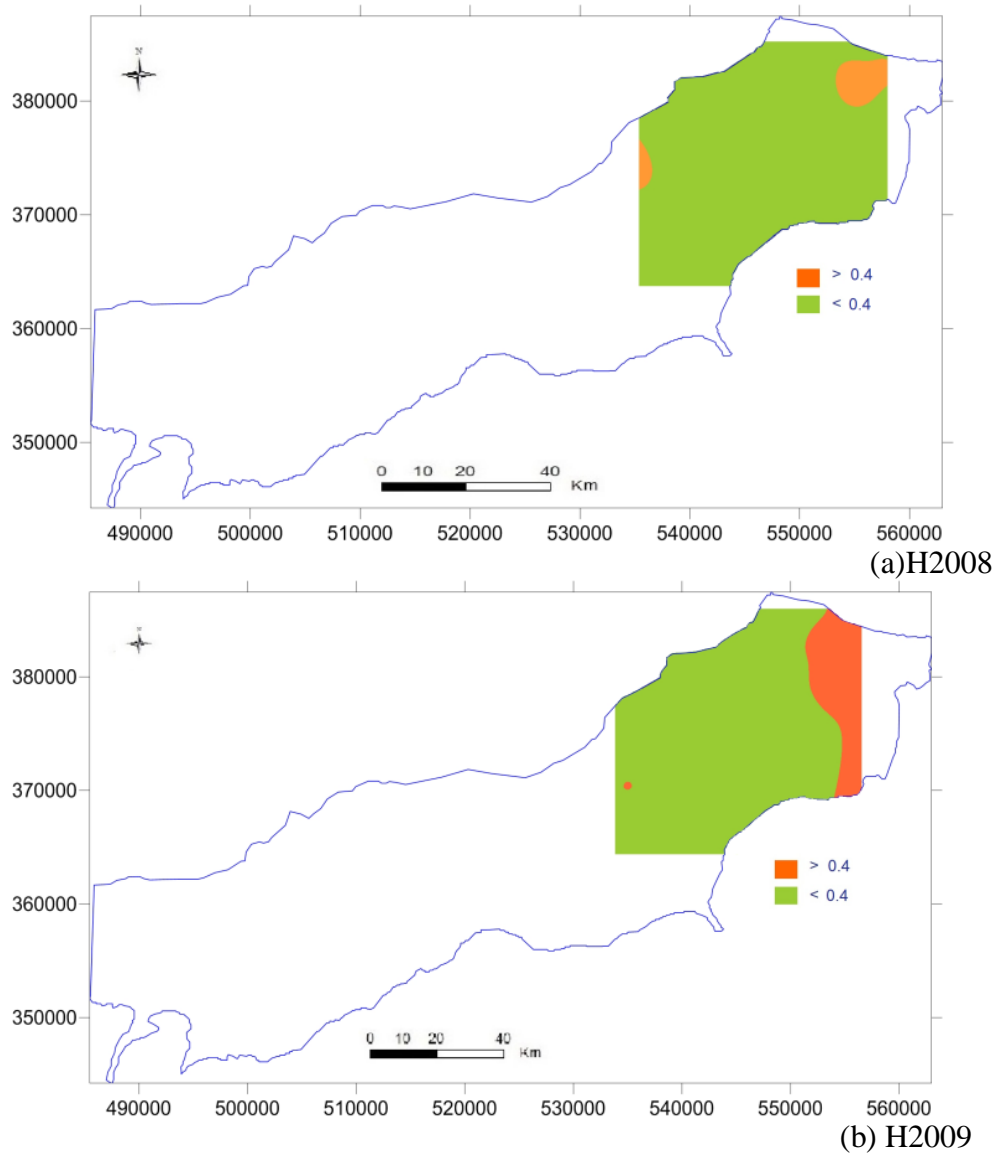


Figure VII.15 : Carte d'iso-indice de concentration limite du Manganèse de la nappe alluviale de la Mitidja, (a) hautes eaux 2008, (b) hautes eaux 2009

VII.6.3 Le Plomb Pb

La pollution engendrée dans les eaux souterraines est due généralement aux activités industrielles par rejets d'effluents et par lessivage de produits stockés sur un sol. Ajouter à cela, en quantité importante il peut être très toxique. On le retrouve sur toutes la zone Est de la plaine, la où l'aéroport et les unités industrielles sont installées. La valeur maximum est de 0.035 mg/l (Beraki, Larbaa) (Figure VII.16).

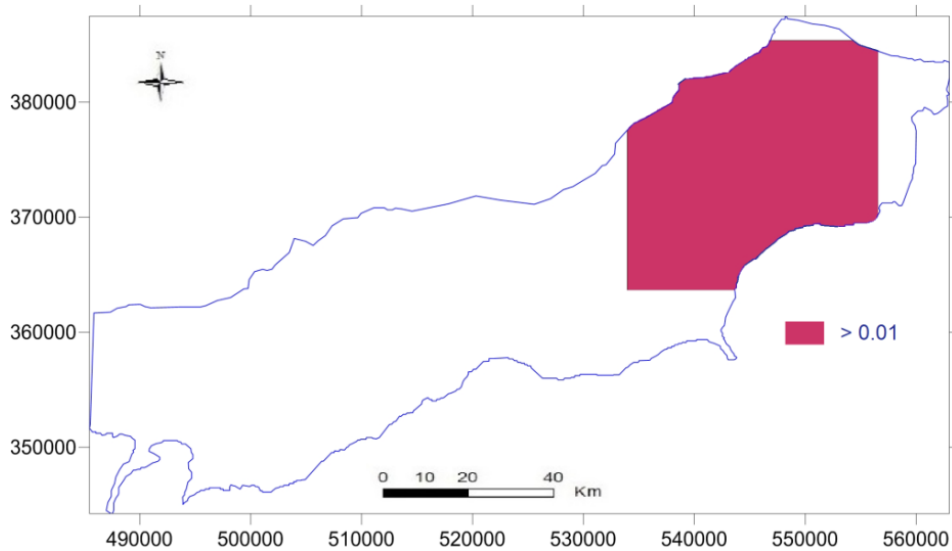
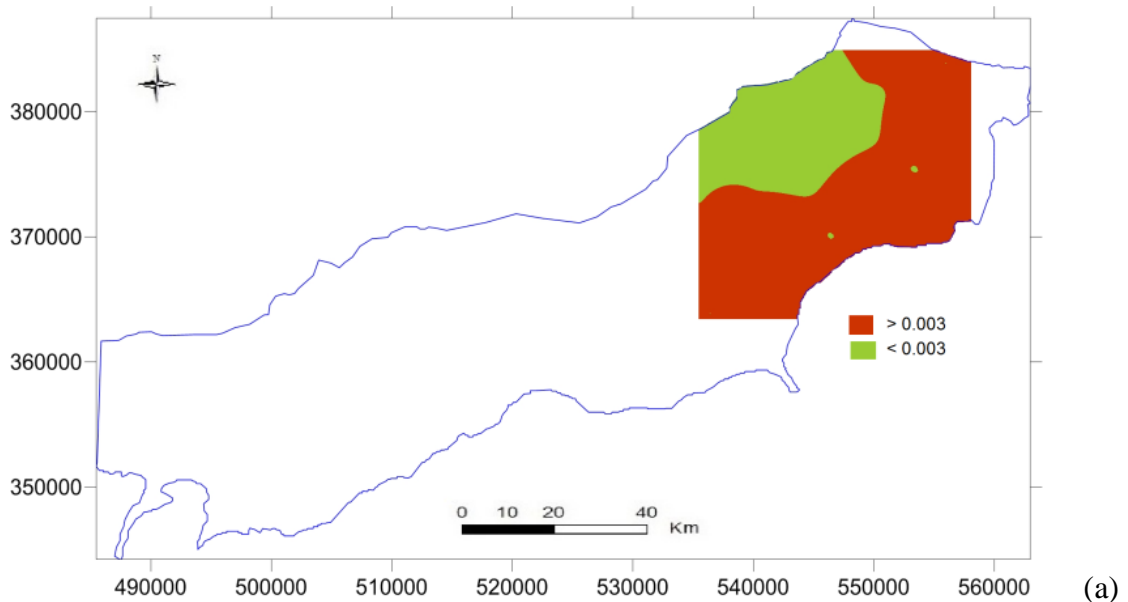


Figure VII.16 : Carte d'iso-indice de concentration limite du Plomb de la nappe alluviale de la Mitidja, (a) hautes eaux 2009

VII.6.4 Le Cadmium Cd

Lorsque le cadmium est rencontré dans les eaux des nappes phréatiques, son origine doit être recherchée dans des effluents industriels (galvanoplastie, en particulier). Il est entraîné aussi par les pluies à partir des fumées industrielles. De plus, il est présent, comme contaminant, dans les engrais et les boues de station d'épuration utilisées en agriculture. On remarque que les hautes eaux des deux années sont plus contaminées que celles des basses eaux, cela peut être expliqué par la pluie qui l'aide à se disperser et à s'infiltrer dans la nappe (Figure VII.17).



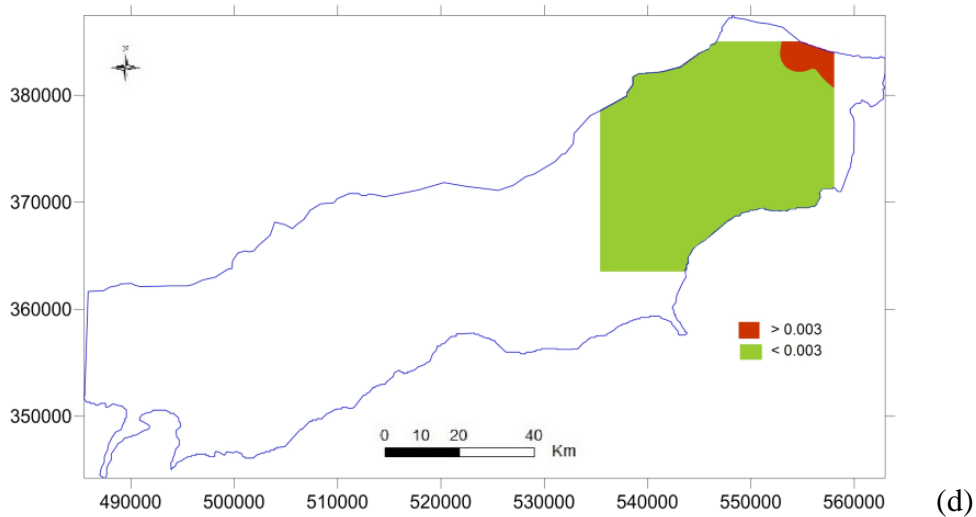
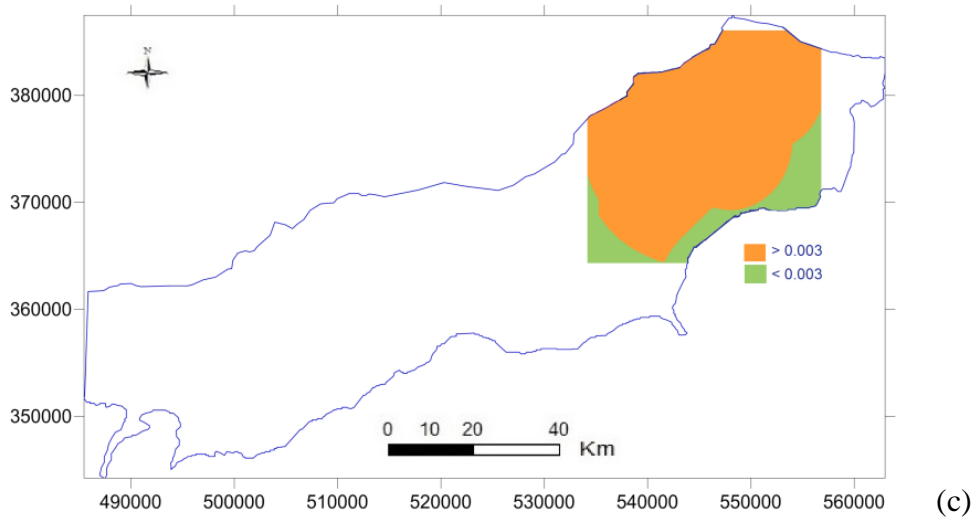
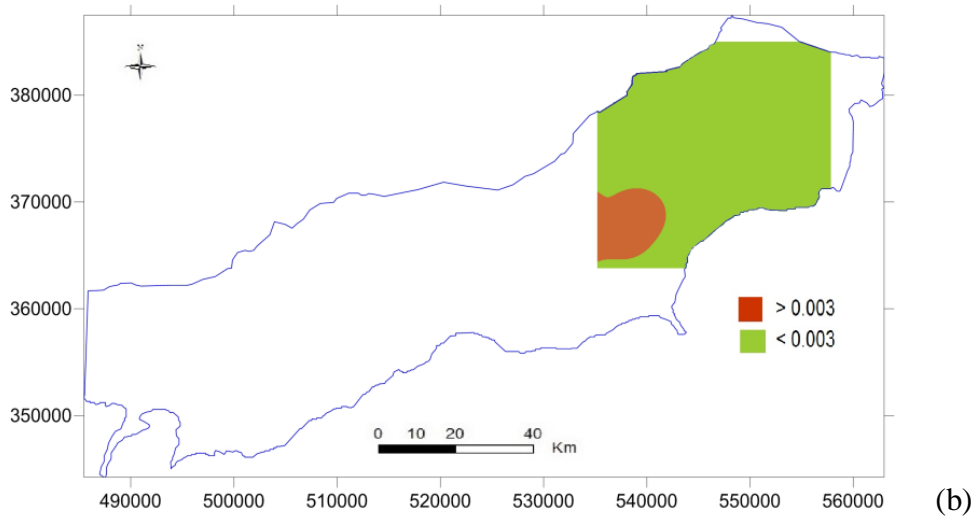


Figure VII.17 : Carte d'iso-indice de concentration limite de Cadmium de la nappe alluviale de la Mitidja, (a) hautes eaux 2008, (b) des basses eaux 2008, (c) hautes eaux 2009, (d) des basses eaux 2009.

VII.6.5 Le Zinc Zn

Dans l'environnement, Les apports anthropiques de zinc résultent de trois groupes d'activités : les sources minières et industrielles Traitement du minerai (raffinage, galvanisation du fer, construction de toitures, fabrication de gouttières, piles électriques, pigments, matières plastiques, caoutchouc etc...). De nombreuses activités urbaines et le trafic routier et usure des pneumatiques libèrent du zinc dans l'environnement. En fin, les épandages de pesticides en agriculture.

Il est présent à Oued Smar et El Harrach à l'Est où la pollution industrielle est la plus dominante. A Boufarik et Beni Mered au centre de la plaine c'est les deux types de pollution qui se croisent (industrielles et agricoles). En fin, à Sidi Rached à l'Ouest la dominance et à la pollution agricole (Figure VII.18).

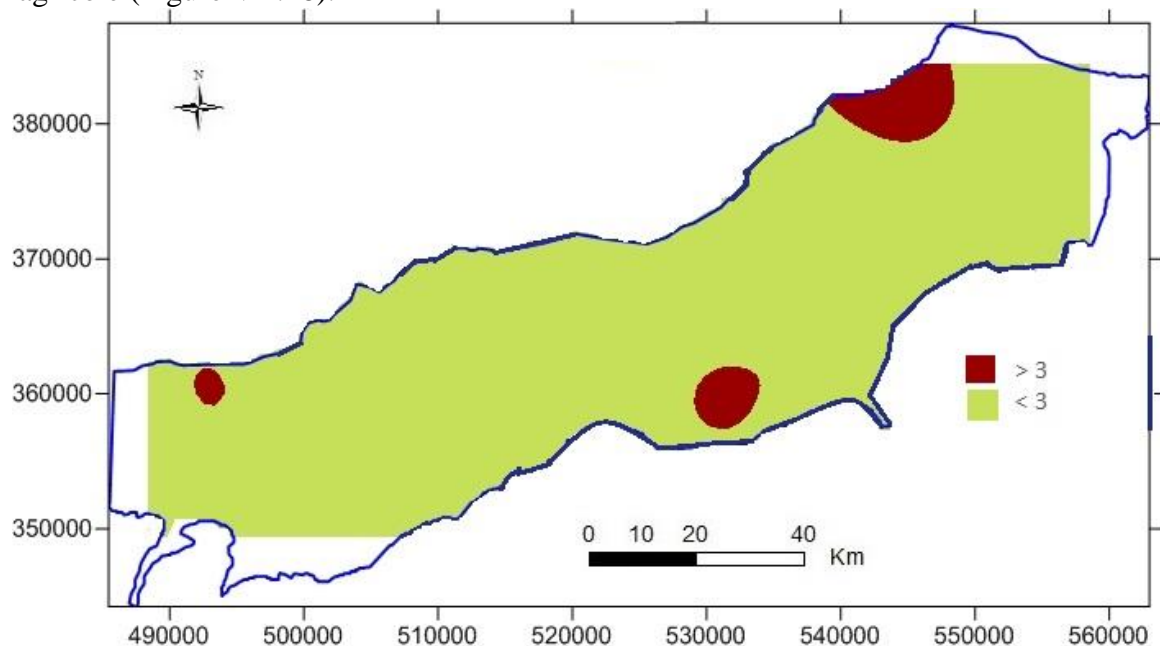


Figure VII.18 : Carte d'iso-indice de concentration limite du Zinc dans la nappe alluviale de la Mitidja, basses eaux 2010.

VII.7 L'analyse en composante principales

L'analyse est faite sur (35) échantillons d'eau prélevés par l'équipe de l'ANRH (Blida), (Campagne avril, 2014) et sur 36 échantillons d'eau de la campagne (Octobre 2014), concernant les huit (08) variables suivantes le (Ca^{++}), le (Mg^{++}), le (Na^+), le (K^+), les (Cl^-), les (SO_4^{--}), les (HCO_3^-), les (NO_3^{--}).

✓ Le but de cette analyse est de voir le comportement des différents éléments entre eux et ainsi donc de faire sortir la relation qui existe entre le contenant et le contenu (l'eau).

✓ Le principe de cette méthode est que tous les paramètres aient les mêmes unités de préférence et le choix des plans de projection se fera avec un minimum d'erreur.

✓ Le premier axe F1 détermine le maximum de variance (d'inertie) des nuages. Le second axe F2, perpendiculaire à F1, il exprime le maximum de variance non déterminé par F1. De même que pour le F3, F4, F5...

✓ En règle générale, les valeurs propres des axes à choisir, doivent être supérieures à 1, et/ou la projection des facteurs explique 90% des variances totales.

Tableau VII.5 : Valeurs propres ((a) Hautes eaux 2014), ((b) Basses eaux 2014)

(a)	F1	F2	F3	F4	(a) F1	F2	F3	F4
Valeur propre	7.513	1.391	1.024	0.669	7.350	1.293	1.120	0.712
Variabilité (%)	62.610	11.593	8.531	8.361	61.250	10.779	9.335	8.902
% cumulé	62.610	74.203	82.734	91.165	61.250	72.029	81.364	91.677

➤ La matrice des valeurs propres contient quatre axes pour arriver aux 91% d'information et cela pour les deux périodes (Tableau VII.5)

➤ Les éléments K⁺ et NO₃⁻ ne sont corrélés avec aucun élément en période des basses eaux, pour les hautes eaux moyenne corrélation existe entre le NO₃⁻ et (Ca⁺, Na⁺) et entre le K⁺ et le Na⁺ (Tableau corr).

Tableau VII.6 : Matrice des corrélations de Pearson à alpha = 5% ((a) Hautes eaux 2014), ((b) Basses eaux 2014)

(a)	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻
Ca ⁺⁺	1							
Mg ⁺⁺	0.709	1						
Na ⁺	0.632	0.520	1					
K ⁺	0.377	0.345	0.551	1				
Cl ⁻	0.803	0.654	0.835	0.486	1			
SO ₄ ⁻⁻	0.762	0.868	0.595	0.203	0.608	1		
HCO ₃ ⁻	0.589	0.419	0.215	0.454	0.230	0.345	1	
NO ₃ ⁻	0.538	0.329	0.556	0.126	0.458	0.443	0.197	1

(b)	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻
Ca ⁺⁺	1							
Mg ⁺⁺	0.654	1						
Na ⁺	0.676	0.655	1					
K ⁺	0.052	0.134	0.279	1				
Cl ⁻	0.713	0.697	0.945	0.302	1			
SO ₄ ⁻⁻	0.762	0.861	0.612	-0.003	0.647	1		
HCO ₃ ⁻	0.791	0.564	0.543	0.178	0.467	0.532	1	
NO ₃ ⁻	0.378	0.130	0.292	-0.085	0.256	0.138	0.125	1

➤ Les éléments à valeurs élevées de corrélation (> 0.7) font partir du faciès chimique de la plaine ainsi que des échanges effectués en hautes et basse eaux (roches évaporitiques et carbonatés) (Tableau VII.6).

➤ Le degré de corrélation change en fonction de la période et où les échanges se fassent.

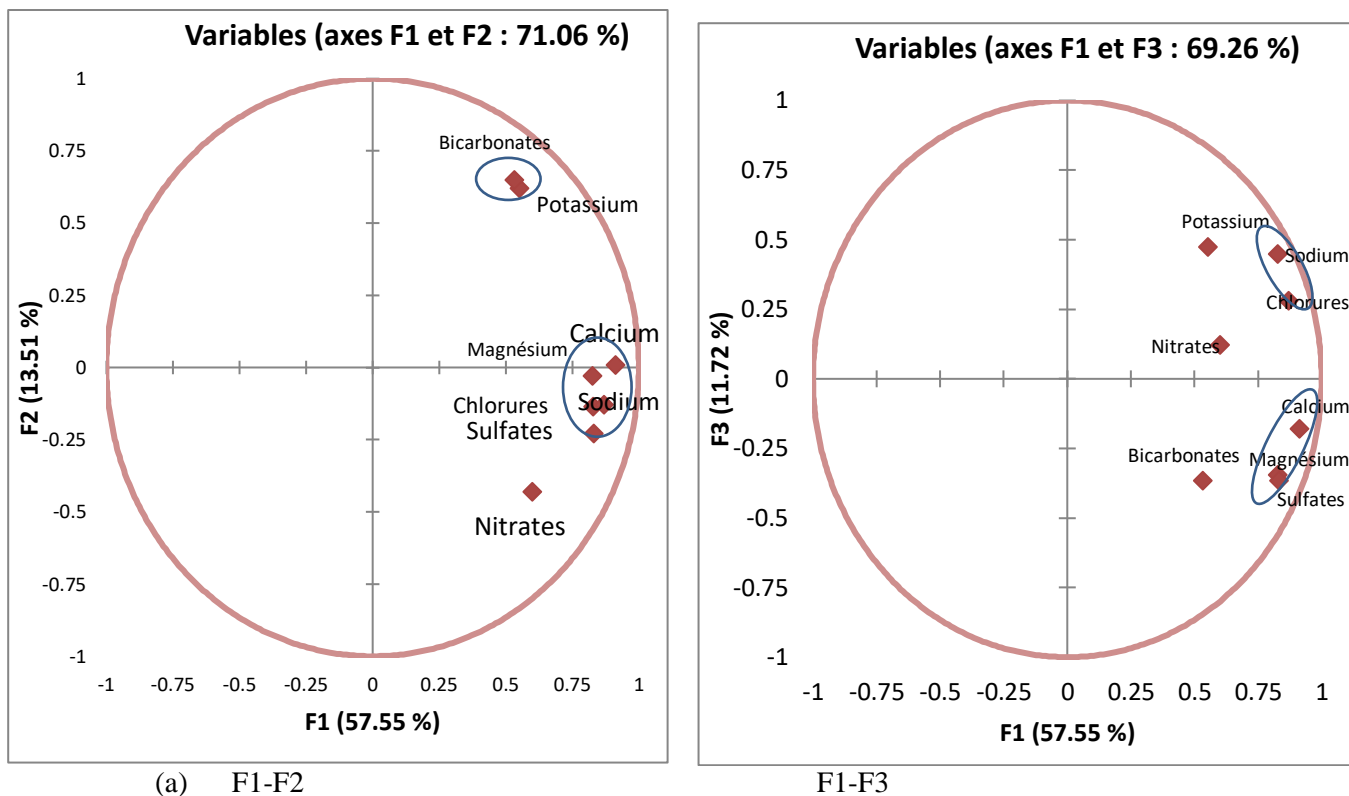


Figure VII.19 : Cercle de corrélation (Hautes eaux (a), 2014)

➤ Le facteur F1 horizontal exprime 57,55% des informations pour la période des hautes eaux 2014, où on trouve pratiquement tous les éléments qui se dispersent près de lui. Les eaux sont riches en Ca, Na, Cl, SO₄ et Mg. Les HCO₃ et le K ont une forte corrélation entre eux et ils sont expliqués plus par l'axe F2 (13.51%). La projection F1-F3 fait apparaître deux groupes très proches du cercle de corrélation, le premier est entre Na et Cl, le deuxième regroupe le Ca, Mg et le SO₄. Les NO₃ ne s'adhèrent à aucun groupe, ce qui met en évidence une origine exogène des nitrates (Figure VII.19).

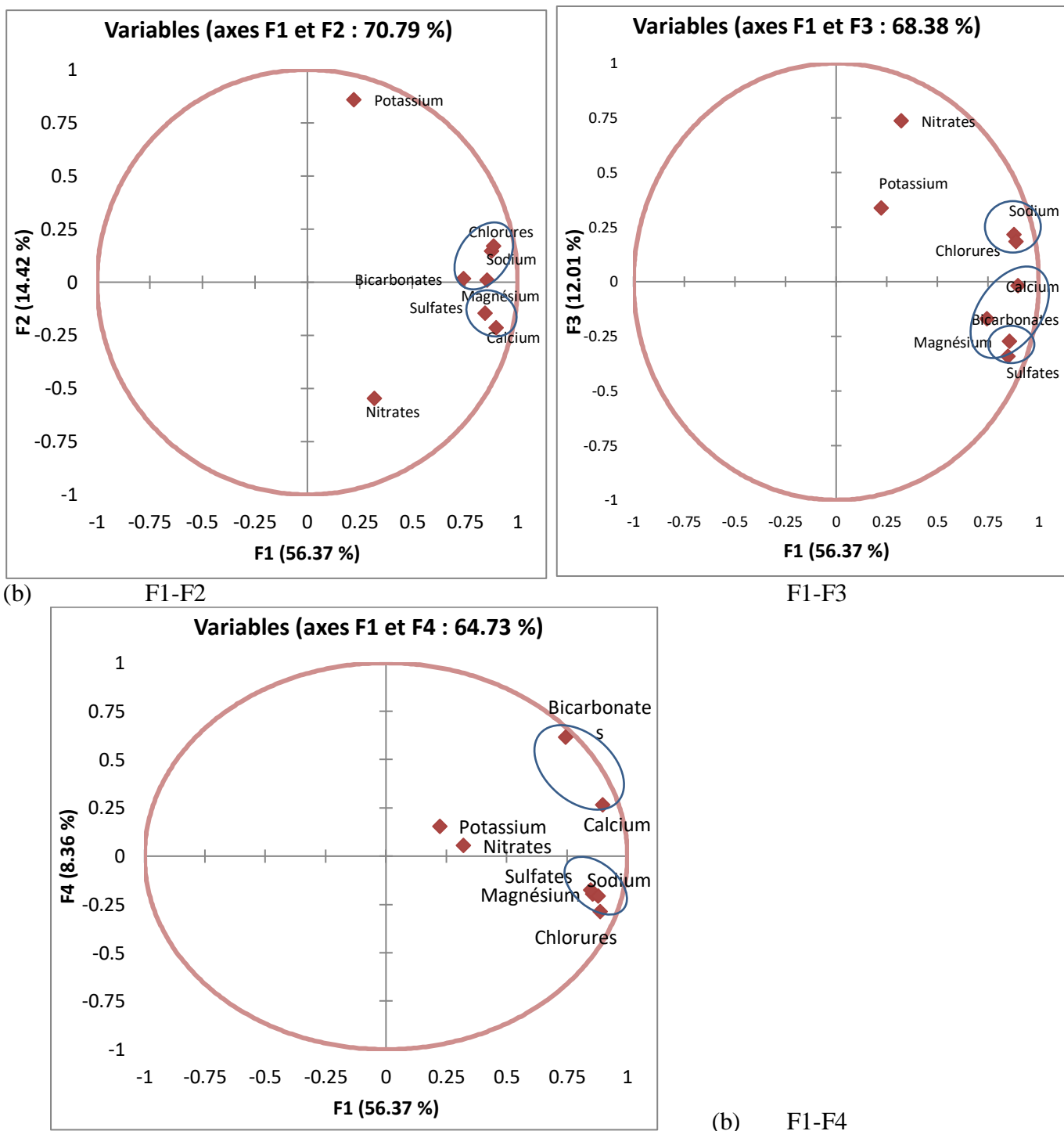


Figure VII.20 : Cercle de corrélation (Basses eaux (b), 2014)

➤ En ce qui concerne la période des basses eaux 2014, le facteur F1 horizontal exprime 56,37% des informations. Mis à part le NO_3 et le K, tous les autres éléments se placent sur l'axe F1, où le Cl^- , Na^+ , Mg^{++} et HCO_3^- forment un premier groupe d'éléments et le SO_4^- et Ca^{++} le second groupe avec F2 (14,42%) d'explication. l'axe F4 (8,36%) zoome plus sur la liaison HCO_3^- et Ca^{++} (Figure VII.20).

➤ Ces groupes formés expliquent bien les échanges entre les éléments qui constitue les roches de la nappe et les éléments de des eaux de lessivages ou des eaux d'intrusion marine.

➤ Le regroupement des ces éléments en un ensemble de points d'eau à caractères similaires, a formé trois groupes de points d'eau qui présente les plus ou moins les même caractéristiques C1, C2, C3 (Figure VII.21).

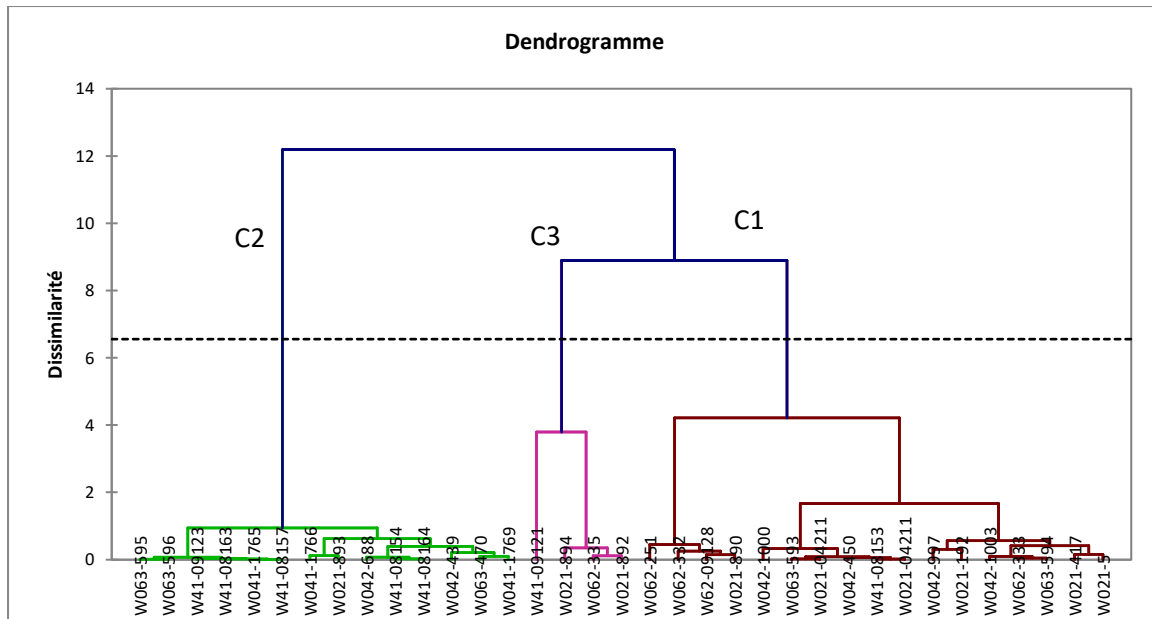


Figure VII.21 : Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) (hautes eaux 2014)

➤ Les points d'eau qui constitue le groupe C1 sont à 60% des points de la mitidja Est. Le groupe C2 est constitué de plus de 70% de points d'eau de la Mitidja Ouest et le groupe C3 et à 50%. Le groupe C1 et C3 sont plus proches dans la qualité d'eau que le groupe C2.

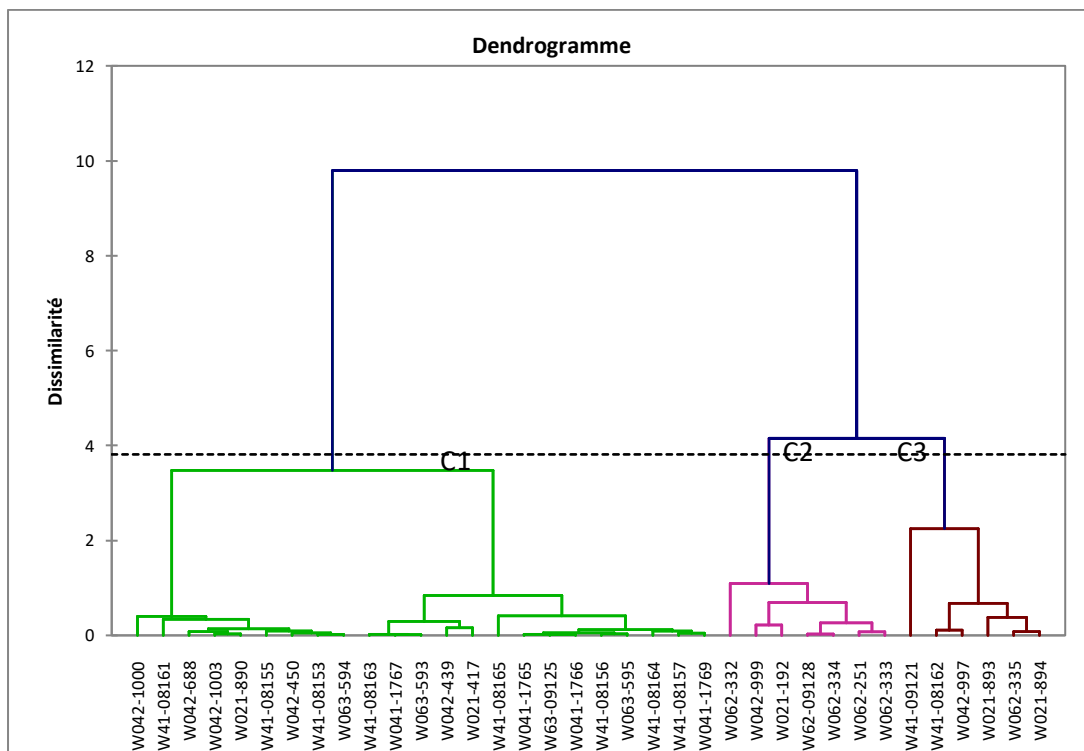


Figure VII.22 : Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) (basses eaux 2014)

➤ Il des basses eaux, où on remarque la formation de trois groupes, les deux groupe C2 et C3 sont plus ou moins similaire (Figure VII.22), et un groupe C1 qui regroupe pratiquement la majorité des points d'eau. le croupe C1 représente 60% de tous les points d'eau etudier en cette période, 70 se situent dans la Mitidja Ouest.

VII.8 L'analyse en composante principales globale

L'analyse en composantes principales globale à été réalisée avec douze (12) variables et 35 échantillons en période des basse eaux et 36 échantillons en basses eaux. Nous avons ajouté au calcul de l'ACP précédente la CE, les résidus sec, la dureté et le pH.

Tableau VII.7 : Valeur propre globale des (a) hautes eaux et (b) basses eaux 2014

	(a)					(b)				
	F1	F2	F3	F4	F5	F1	F2	F3	F4	F5
Valeur propre	7.350	1.293	1.120	0.803	0.637	7.513	1.391	1.024	0.782	0.575
Variabilité (%)	61.250	10.779	9.335	6.690	5.307	62.610	11.593	8.531	6.520	4.791
% cumulé	61.250	72.029	81.364	88.054	93.361	62.610	74.203	82.734	89.254	94.045

➤ La matrice des valeurs propres contient cinq (05) axes pour arriver à 93.36% et 94.05% respectivement, d'information et cela pour les deux périodes (Tableau VII.7). le facteur F1 horizontal exprime plus de 61 % des informations pour les deux périodes, le deuxième et le troisième facteur (F2, F3) expliquent les données à environ 11% et 9 % respectivement.

➤ La majorité des éléments sont hautement corrélés avec la CE, les résidus secs et la dureté et presque pas du tout corrélé avec le pH, le K et le NO3 ne sont pas corrélés (Tableau VII.8)

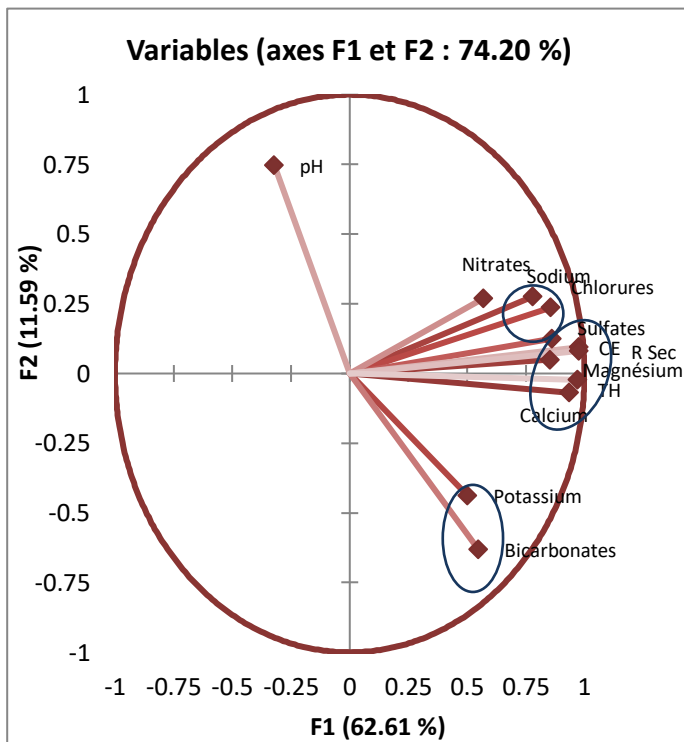
Tableau VII.8 : Matrice des corrélations globale de Pearson à alpha = 5% ((a) Hautes eaux 2014), (b) Basses eaux 2014)

(a)	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO4	HCO3	NO3	pH	CE	R Sec	TH
Ca	1											
Mg	0.709	1										
Na	0.632	0.520	1									
K	0.377	0.345	0.551	1								
Cl	0.803	0.654	0.835	0.486	1							
SO4	0.762	0.868	0.595	0.203	0.608	1						
HCO3	0.589	0.419	0.215	0.454	0.230	0.345	1					
NO3	0.538	0.329	0.556	0.126	0.458	0.443	0.197	1				
pH	-0.359	-0.187	-0.049	-0.352	-0.115	-0.261	-0.418	-0.124	1			
CE	0.924	0.850	0.747	0.376	0.831	0.891	0.517	0.525	-0.217	1		
R Sec	0.904	0.850	0.762	0.427	0.864	0.850	0.482	0.525	-0.252	0.962	1	
TH	0.952	0.891	0.633	0.392	0.802	0.868	0.562	0.490	-0.313	0.964	0.951	1

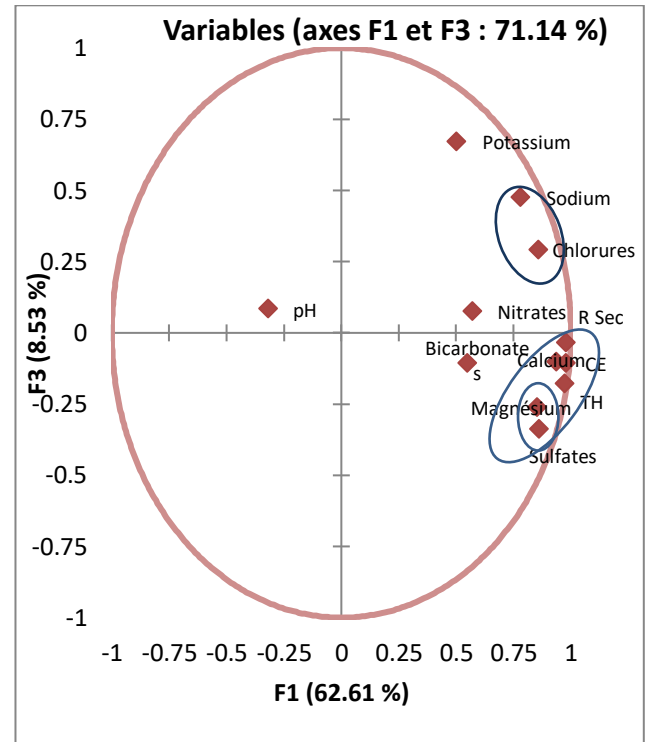
(b)	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO4	HCO3	NO3	pH	CE	R Sec	TH
Ca	1											

Mg	0.654	1												
Na	0.676	0.655	1											
K	0.052	0.134	0.279	1										
Cl	0.713	0.697	0.945	0.302	1									
SO4	0.762	0.861	0.612	-0.003	0.647	1								
HCO3	0.791	0.564	0.543	0.178	0.467	0.532	1							
NO3	0.378	0.130	0.292	-0.085	0.256	0.138	0.125	1						
pH	-0.217	0.021	-0.127	-0.008	-0.125	-0.035	-0.115	-0.244	1					
CE	0.897	0.802	0.894	0.170	0.908	0.804	0.692	0.365	-0.200	1				
R Sec	0.856	0.736	0.890	0.103	0.880	0.761	0.651	0.427	-0.237	0.964	1			
TH	0.946	0.864	0.730	0.092	0.774	0.876	0.768	0.307	-0.135	0.941	0.885	1		

➤ Dans le cercle de l'ACP de la projection F1-F2 des hautes eaux, trois groupes apparaissent, le groupe chloruro-sodique, le second contient le Ca, Mg, SO4, CE, TH et les résidus secs ce qui explique la forte corrélation qui existe entre eux. Un groupe de HCO3 et K, mais qui sont positionnés loin du cercle. La projection F1-F3 montre que le K se positionne tout seul proche de la projection F3, comme l'explique si bien les valeurs de la corrélation (Figure VII.23).



(a) F1-F2



F1-F3

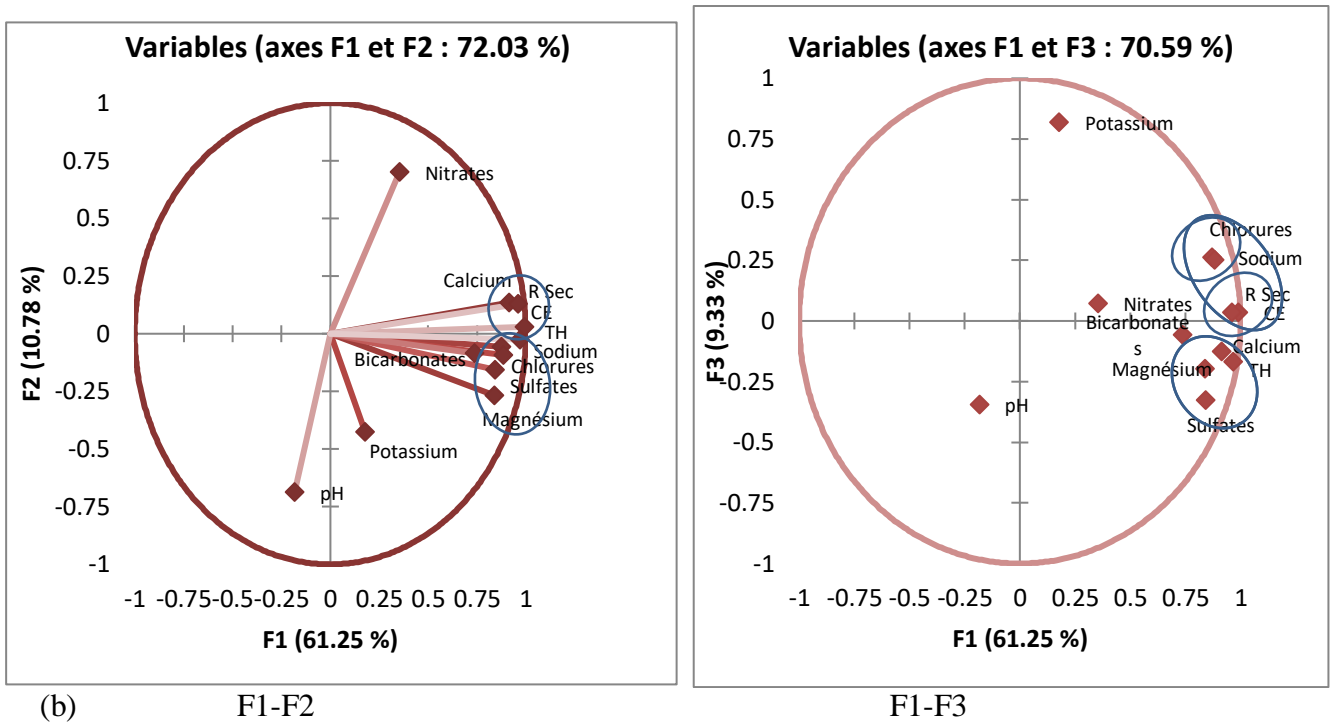
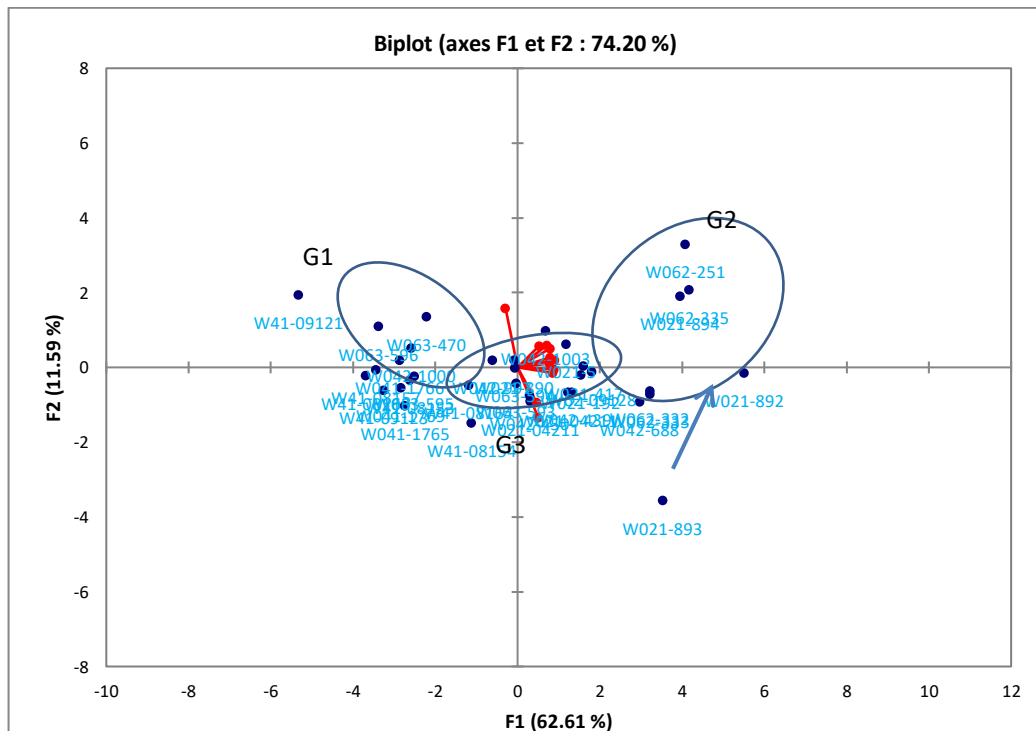


Figure VII.23 : Cercle de corrélation pour une ACP complète ((a) Hautes eaux et (b) Basses eaux, 2014)

➤ La période des basses eaux donne plus ou moins les mêmes groupes, le premier est constitué du résidu sec, CE, TH, Mg, Ca et SO₄, le second englobe le Na et Cl et en fin le k et HCO₃ sont proche entre eux mais loin du cercle de l'ACP. Il en est de même pour ce dernier groupe, une projection F1-F3 permet de voir que le K n'est dans aucun groupe ainsi que le pH cela explique les faibles valeurs de la corrélation du tableau de corrélation (Figure VII.24).

➤



**Aptitude à l'irrigation Eaux Souterrain de la Nappe Alluviale de la Mitidja
et Modélisation Mathématique des Écoulements,
État Quantitatif et Qualitatif de la Ressource en Eau**

Quelques travaux bibliographiques

La croissance démographique et une évolution du mode de consommation, nous nous sommes retrouvés face à une consommation effrénée des volumes implorants en eau et cela dans tous les domaines (AEP, AEI et AEA). Cet accroissement a engendré des risques de surexploitation et de pollution de la nappe alluviale de la Mitidja.

Selon Braham (2011), Haddouche (2012) Les eaux de la nappe de la Mitidja sont classées bonnes à passablement potables. Ils notent par ailleurs l'existence d'une pollution par les nitrates qui varie dans l'espace et dans le temps. Cette pollution irrégulière est la conséquence des activités anthropiques notamment l'utilisation des engrais azotés dans l'agriculture et la possibilité des pertes des eaux usées que ce soit par des veilles conduites ou des agglomérations non raccordées, sans oublier les rejets industriels.

Les régions où les eaux présentent plus de pollution et où les teneurs élevées en azote, se situent dans la zone de Rouiba, au nord de Réghaia et au sud d'El Harrach (Haddouche 2012) De même, l'application des méthodes d'évaluation des aquifères à la pollution (DRASTIC, DRIST et GOD) par Haddouche (2012), ont localisé les pollutions par les nitrates et par les métaux lourds dans les zones de Rouiba, Meftah, Sidi Moussa, Oued El Harrach dans sa partie aval et Birtouta.

Djoudar (2014) par l'application des deux méthodes DRASTIC et PRAST, a trouvé une concordance de la concentration par les nitrates de plus de 50% sur toute la surface de la nappe. Ces méthodes ont fait sortir cinq zones de qualité d'eau. Une zone de très bonne qualité qui débute de Beraki à l'Est jusqu'à l'Ouest (Attatba (au nord) et Blida (au sud)). Les autres zones se situent de part et d'autre de cette zone centrale allant de la bonne qualité jusqu'à la médiocre qui se trouve à Bordj El Bahri à l'Est et Ahmer el Ain Bourkika à l'Ouest. Zamiche et al. (2018) ont montré que plus de 60% des forages (sur toute la Mitidja) ont des teneurs dépassant la limite maximale admissible en azote par l'OMS. L'indice WQI montre que la partie centrale de la Mitidja s'avère plus vulnérable à la contamination par les nitrates. Concernant la partie hydrodynamique et sur la base de la carte piézométrique de 1981, Bennie & Atkins rapportent que l'examen des surfaces piézométriques indique des gradients d'orientation du Nord de l'Atlas vers la mer. Les niveaux piézométriques relevés en 1981 donnent les mêmes tendances que celles de 1970 qui varient du Sud au Nord de 110 à 5 m (annexe partie II Figure1).

La carte piézométrique élaborée par Toubal (1998) en 1983 montre un niveau piézométrique, proche de la baie d'Alger, qui varie entre 4 m et 1 m. par contre la carte piézométrique de l'année 1992 montre un changement de configuration des niveaux piézométriques, où nous remarquons une inversion dans le sens d'écoulement des eaux et cela particulièrement dans la zone de Stambouli, Bordj El Kifane et à l'embouchure de l'oued El Harrach. Il a enregistré une baisse de niveau piézométrique, par rapport à l'année 1983, de 5 m ç.a.d. un enregistrement d'une piézométrie de -7 m, ce qui prouve l'installation de l'invasion marine. (Annexe partie II Figure2 et 3).

Bouguechtouli (2011) a enregistré au niveau du champ captant de Hamiz, un niveau piézométrique de -11 m au-dessous du niveau de mer pour l'année 2000. Ces valeurs en dessous du 0 de la mer s'évaluaient sur 3 km à l'intérieur de la zone d'étude. (Annexe partie II Figure4). Cette même zone a enregistré une valeur de -15 m pendant l'année 2008. Cet abaissement est dû principalement à la forte exploitation de la nappe. Les données de l'ANRH et de Ait Ouali notent cependant une convergence vers les deux grands et anciens champs captants de Baraki, de Haouch Fellit et de Mazafran I en 2004 (Ait Ouali, 2007) et une baisse des niveaux piézométriques de 25 m en 30 ans autour de ces

champs captant (ANRH, 2010). Kaben en 2012 a pratiqué une modélisation hydrodynamique de l'aquifère de la Mitidja Est,

de l'année 1982 en régime permanent. Son étude a fait exprimer un équilibre entre les entrées et les sorties. Le débit total des échanges était de 427 652.2 m³/j. les prélèvements à travers les forages étaient de 381 231.8 m³/j et un débit sortant vers la mer de 14 094.35 m³/j. le débit entrant était nul cela appuie le résultat des autres travaux sur l'absence de l'intrusion marine en cette période.

Les mêmes résultats à été enregistré avec l'étude de Bouguechtouli (2011) de l'année 1982 ; où le débit total des entrées était de 347 124 m³/j, et un débit sortant à partir des forages de 321840 m³/j.

Concernant la modélisation du phénomène de l'intrusion marine dans la zone de Hamiz, Makhoulf (2012) et de l'ANRH-SOGREAH (2010) ont fait une simulation en régime permanent de l'année 1981 où ils ont trouvé une bande côtière de 500 m de large d'une valeur de 1000 mg/l (Panache de sel). Ils ont interprété cette intrusion marine par le fait de la pente du substratum dans le secteur qui se déverse vers les terrains.

Pour le régime transitoire (1981 à 2010) la piézométrie montre une valeur de -10 m au niveau du champ captant de Hamiz. Une simulation a été faite en fonction des débits de prélèvements du champ captant de Hamiz et projeter jusqu'à l'année 2020. Ils ont enregistré une dépression qui varie entre -10 m à -20 m dont les directions d'écoulements se font toujours vers le champ captant de Hamiz. Le front salé contamine fortement le Nord du champ captant (les forages situés au nord) avec une concentration très supérieur à 10 g/l.

Un autre scénario a été simulé avec -30% du débit des forages de prélèvement de Hamiz, et qui a enregistré un niveau piézométrique de -15 m mais une concentration de sel de plus de 9 g/l.

Pour le 3^{ème} scénario, une batterie de 10 forages d'injection à été implanté entre le champ captant de Hamiz et la zone côtière. Le débit d'injection, choisi était de 100 m³/h/forage soit 24000m³/j (8.76 Mm³/an) au total. La piézométrie est passée à -10 m au sud de la batterie, mais le sens d'écoulement est resté vers le champ. Les concentrations sont restées de l'ordre de 7 g/l à l'Ouest du champ.

Le travail de Morsli et al (2017) ont traité le phénomène de l'intrusion marine par une approche pluridisciplinaire, combinant la piézométrie, la chimie et la géophysique. Cette salinisation est due principalement aux pompages intensifs qui perturbent l'interface eau douce –eau salée où l'interface est faible pour les aquifères alluvions ce qui explique l'étroite relation entre la salinisation des eaux et l'abaissement piézométrique.

La mer engendre aussi, localement, des écoulements dans les sens mer- nappe, favorable à la contamination de la nappe tel que le cas de Bordj El Kifane (ex Fort de l'eau) où le niveau piézométrique est descendu jusqu'à -5 m et par conséquent une augmentation de la concentration en sel.

Benziada (2003) a travaillé sur la modélisation des écoulements souterrains de la nappe alluviale de la Mitidja, par le programme numérique ASM à différences finis. Cette modélisation est calée sur l'année 1990 et appliquée en phase prévisionnelle en 2001 pour simuler d'une part une sécheresse graduelle et d'autre part une alimentation artificielle localisée à partir des eaux de barrage de Keddara. Les hypothèses choisies : une alimentation par les pluies de 1.422 m³/s, un débit sortant de la nappe de 1.472 m³/s et un déstockage de 0.05 m³/s (négligeable) montre un aquifère proche de l'équilibre.

L'effet d'une sécheresse prolongée graduelle a montré une diminution appréciable du niveau piézométrique de 2.5 m dans la zone de champ captant de Hamiz. L'insuffisance des ressources peut être atténuée par une alimentation artificielle de la nappe éventuellement en utilisant les eaux du barrage de Kaddara.

Chapitre VIII
Aptitude des eaux à l'irrigation

Chapitre 8 : Aptitude des eaux à l'irrigation

VIII. Introduction

Lorsqu'une contamination des eaux de la nappe de notre zone d'étude a été détectée par des analyses ponctuelles, une nécessité de connaître l'étendue de cette pollution et sa répartition spatiale s'imposait. La méthode d'interpolation a apporté la solution à ce problème. Sa large utilisation et sa capacité de convertir les valeurs numériques en cartes potentielles ont permis le zonage des différents niveaux de contamination ce qui donne aux gestionnaires un outil d'aide à la décision. L'objectif de notre travail a été d'analyser les résultats de différentes méthodes d'interpolation des zones non échantillonnées, utilisées sur l'indice de la qualité d'eau potable (WQI), avec pondération de la distance inverse IDW, krigeage bayésien empirique EBK, krigeage ordinaire OK et le cokrigeage ordinaire OCK. La validation croisée ainsi que les différentes surfaces des zones contaminées ont permis de comparer entre ces méthodes. Les résultats ont montré une légère différence entre ces dernières, où le OCK suivi de près par le EBK ont eu les valeurs de RMSE les plus faibles. Le IDW a montré une relation étroite entre son pouvoir de pondération et le niveau de contamination de la nappe. Sans oublier les résultats des soustractions qui confirment la faible différence entre ces méthodes, où l'incertitude spatiale des zones contaminées apparaît clairement entre le passage d'un niveau de contamination à un autre.

Quelques travaux bibliographiques

L'os de l'être humain est constitué de 22,5% d'eau, le cerveau, lui est constitué de 65% d'eau. Ce pourcentage varie en fonction du tissu et de son type de fonctionnement. L'utilisation d'une eau de mauvaise qualité ou de qualité médiocre pour la consommation humaine implique automatiquement une absorption de ses constituants, en fonction de leurs teneurs dans l'eau, par les différents organes de l'être humain provoquant ainsi différents symptômes ou maladies. Pour minimiser les risques de contamination, tout un protocole de contrôle de la qualité des eaux, même les eaux souterraines, est mis en pratique. Un indice de qualité d'eau est mis en place à partir des normes de potabilité pour pouvoir classer cette dernière touchée par une pollution quelconque : chimique, physique, biologique, pharmaceutique et même due à l'intrusion marine. L'estimation de la répartition spatiale des eaux souterraines contaminées est très importante dans l'évaluation des risques pour la santé (Lee et al., 2007). La gestion de cette nappe souterraine nécessite la surveillance de la qualité d'eau de cette dernière à partir des points d'eau. La lecture de la qualité d'eau de la nappe est d'autant plus précise que le nombre de points de contrôle est important. Les réseaux de surveillance d'ordre général ne sont pas représentatifs, ajouter à cela la contrainte du coût élevé (Buchanan et Triantafyllis, 2009). Cependant, seule une faible proportion de données in situ peut être analysée dans le cadre d'un suivi de la qualité et la quantité des eaux de la nappe sur terrain (Mirzaei et Sakizadeh, 2015). Par conséquent, les données claires mesurées contiennent une incertitude considérable (Liu et al., 2004). La technique d'interpolation est généralement requise pour la variabilité spatiale du niveau de l'eau souterraine (Buchanan et Triantafyllis, 2009) et sont très puissantes pour prédire les valeurs de la surface (Gong et al., 2014). Il est possible de cartographier la variabilité spatiale des paramètres aquifères et d'améliorer la gestion qualitative et quantitative des ressources en eau (Egwu Otu Iduma et al., 2017). La géostatistique, initialement utilisée dans le secteur minier par Krige (1952), est utilisée aussi pour le suivi de la salinité des eaux des aquifères, pour la cartographie des zones contaminées par les métaux lourds, l'évolution des nitrates ainsi que la fluctuation du niveau de l'aquifère. à titre d'exemple (Liu et al., 2015 ; Buchanan et Triantafyllis, 2009 ; Arslan 2012 ; Nas et Berktaş, 2010 ; Mirzaei et

Sakizadeh, 2015 ; Kumar, 2007 ; Alizadeh et Mahjouri, 2017). Deux branches découlent de la régionalisation : Déterministe et Géostatistique. la première crée des surface à partir des point mesurés en fonction de l'étendu de la similarité (exemple la Distance Inverse Pondéré IDW) (Liu et al., 2015 ; Johnston et al., 2003) et la seconde qui est une technique de régionalisation géostatistique (par exemple le Krigeage ; CoKrigeage OCK et le Krigeage Bayésien Empirique EBK) se base sur les propriétés statistique des points mesurées. Nous ne pouvons pas dire qu'une méthode est meilleure que l'autre cela dépend des résultats des travaux. Certains d'entre eux ont constaté que la méthode de krigeage donne des meilleurs résultats (Khalili, 2014 ; Joseph 2013 ; Theodossiou & Latinopoulos, 2006 ; Triki et al., 2012 ; Ran, 2015). alors que d'autres auteurs ont montré que le IDW donne des meilleurs résultats (Gong et al., 2014 ; Keblouti et al., 2012). D'autre auteurs ont trouvé des bons résultats avec le Krigeage Bayésien Empirique (EBK) (Mirzaei et Sakizadeh 2015 ; [Bahrami Jovein](#), [Hosseini](#), 2017 ; Pouffe et al., 2015 ; Izadi et al., 2017). Les techniques d'interpolation ont tous un effet de lissage, ce qui sous estime les valeurs élevées locales et surestime les faible valeurs locales (Journel et al., 2000 ; Xie et al., 2011 ; Mirzaei et Sakizadeh 2015). cet effet de lissage conduit à un biais dans l'évaluation de la pollution et a un effet sur la prise de décision environnementale pertinente (Goovaerts, 2000 ; Xie et al., 2011 ; Mirzaei et Sakizadeh 2015). il est essentiel de minimiser ce biais dans une évaluation de la contamination des eaux souterraines introduite par l'erreur d'interpolation et les différences dans l'évaluation de la contamination entre divers méthodes d'interpolation (Xie et al., 2011 ; Mirzaei et Sakizadeh 2015). Étant donné qu'un risque de contamination plus ou moins grand des eaux souterraines est toujours présent, cette étude a pour objectifs de faire une comparaison spatio-temporaire entres quatre méthodes d'interpolation : le krigeage ordinaire (OK), le krigeage bayésien empérique (EBK) et la Distance Inverse Pondéré (IDW) ainsi qu'un Cokrigeage (OCK). Cette comparaison est faite entre l'indice de qualité d'eau (WQI) et le niveau piézométrique de la nappe, pour la détermination de la meilleure méthode d'estimation de la qualité d'eau souterraine de la plaine de la Mitidja.

Cependant on a jugé indispensable de faire une étude préliminaire sur l'hydrochimie et les possibles sources de contamination, où la qualité des eaux souterraines est principalement affectée par les formations géologiques que l'eau traverse dans son parcours et par les activités anthropiques (Siegel 2002; Stamatis 2010). Les activités agricoles et l'industrie sont également des facteurs importants qui peuvent devenir sources de contamination de cet aquifère. La composition chimique des eaux souterraines est contrôlée par de nombreux facteurs qui comprennent la composition des précipitations, la structure géologique et la minéralogie des aquifères (Gnanachandrasamy, 2015). Le taux d'épuisement des niveaux d'eau souterraine est lui aussi un des facteur de détérioration de la qualité des eaux souterraines (Dhindsa et al., 2004; Ramasubramanian et al., 2004). L'interaction de tous les facteurs conduit à divers faciès d'eau (Murray 1996; Rosen et Jones, 1998).

VIII.2 Matériel et Méthodes utilisés dans le calcul du WQI

VIII.2.1 Limites de la zone d'étude

Cette partie de l'étude à été faite sur toute la Mitidja, les points d'eau d'analyse, couvre plus ou moins toute la superficie (100 Km de long et entre 10 à 18 Km de large). Les prélèvements des échantillons ont été fait par l'Agence Nationale des Ressources Hydriques (ANRH) (Figure VIII.1).

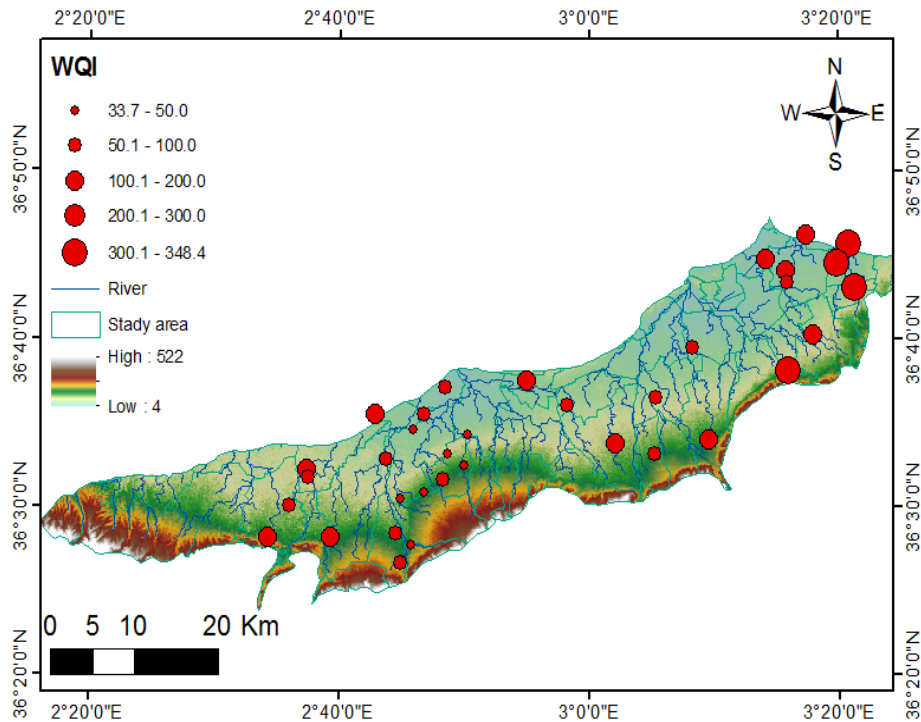


Figure VIII.1 Distribution spatiale des points d'analyse

Selon l'Agence des Bassins Hydrographiques de l'Algérois, la ressource en eau souterraine de la Mitidja est de 328Hm³, dont les principaux champs captant sont : Mazafran I et II, Chebli à l'Ouest, Baraki, Haouch Felit, et Hamiz à l'Est. L'alimentation de la nappe s'effectue par les oueds : d'El Harrach, Chiffra, Mazafran, Hamiz. Le coefficient d'infiltration dans les alluvions est de 10% pour les alluvions récentes et de 15% pour les alluvions anciennes et le coefficient d'emmagasinement est de l'ordre de 3% à l'Ouest et de 15% à l'Est.

VIII.2.2 Piézométrie

La carte piézométrique effectuée à partir de la moyenne des prélevés de deux périodes (basses eaux et hautes eaux) de 35 puits, avec le logiciel surfer 9, montre clairement une ligne de partage des eaux souterraines de direction SSE-NNW, les valeurs des courbes isopiézométriques diminuent du Sud vers le Nord montrant clairement un écoulement général Sud-Nord (chapitre VI, Figure VI. 3).

VIII.2.3 Pluviométrie

La représentation spatiale de la pluviométrie, de l'année 2010 faite sur 14 stations entourant la zone d'étude, produit un grand gradient pluviométrique allant de 950 mm dans la station centre-Ouest de la zone (Oued EL Alleug), à moins de 500 mm de part et d'autre de la zone (Ameur El Ain à l'Ouest et Alger à l'Est). Plus de 80% de ces épisodes pluvieuses se produisent en période humide (Figure. VIII.2). L'évapotranspiration moyenne enregistrée est de l'ordre de 1240 mm/an.

VIII.2.5 Approche hydrochimique

Le travail a été effectué sur 35 points d'eau s'étalant sur toute la surface de la zone d'étude et cela sur la moyenne de deux périodes : la période des basses eaux (période automnale) et la période des hautes eaux (période printanière) de l'année 2010. 14 variables ont fait l'objet de cette étude (Ca, Mg, Cl, SO₄, NO₃, CE, TDS, PH, TH, Fe, Mn, Cu, Pb Cd) qui ont été échantillonnées périodiquement par l'Agence Nationale des Ressources Hydrique de Blida et d'Alger. Les Minimums, maximums, moyennes et les écart-type de ces paramètres ont été données dans le Table VIII.1.

Pour la vérification de la fiabilité des résultats obtenus, le calcul de l'équilibre ionique de l'eau a été effectué, en prenant la relation entre les cations totaux et les anions totaux (Huh et al., 1998). Cela montre des pourcentages allant de - 5 à + 5%, ce qui correspond à une fiabilité acceptable pour l'unité des résultats chimiques. La concentration totale en cations a été calculée comme la somme du calcium, du magnésium, du sodium, et le potassium ; la concentration totale d'anions a été calculée comme la somme du chlorure, du carbonate, du bicarbonate et du sulfate. L'équation suivante est utilisée :

$$IBE = (\sum \text{Cations} - \sum \text{Anions}) / (\sum \text{Cations} + \sum \text{Anions}) \times 100 \quad (IV.1)$$

où, la concentration d'ions est exprimée en meq / L.

VIII.3 Détermination de l'indice de qualité d'eau

Pour le calcul de l'indice la qualité de l'eau WQI, la méthode a été proposée par Horton(1965) et suivie par de nombreux chercheurs Rupal et al.,(2012) ; Tiwari et al., (2014) ; Mirzaei et Sakizadeh (2015) ; Sakizadeh & Ahmadpour (2016). Trois étapes ont été suivi par Rupal et al.,(2012) et Tiwari et al., (2014).

Dans la première étape

un poids (w_i) a été attribué à chaque paramètres selon son importance relative dans la qualité globale de l'eau potable. Le poids maximal de 5, par exemple, a été assigné au paramètre nitrate en raison de sa nuisibilité sur la santé des consommateurs des eaux souterraine. Le magnésium qui est compte tenu du poids minimum de 1 en tant que magnésium en soi peut ne pas être nuisible. Dans la deuxième étape, le poids relatif (W_i) est calculé à partir de l'équation suivante :

$$W_i = w_i / \sum_{i=1}^n w_i \quad (IV.2)$$

Où, W_i est le poids relatif, w_i est le poids de chaque paramètre et n est le nombre de paramètres. Dans la troisième étape, une échelle de qualité (q_i) pour chaque paramètre est attribuée en divisant sa concentration dans chaque échantillon d'eau par sa norme respective selon les normes établies par OMS et le résultat multiplié par 100 :

$$q_i = C_i / S_i \times 100 \quad (IV.3)$$

Où, q_i est l'échelle de qualité, C_i est la concentration de chaque paramètre chimique dans chaque échantillon d'eau en mg / L, S_i est la norme OMS de l'eau potable pour chaque paramètre chimique en mg / L. le WQI est calculé par les formules suivantes :

$$SI_i = W_i \times q_i \quad (IV.4)$$

$$WQI = \sum S_i \quad (IV.5)$$

Où, S_i est le sous-index du i ème paramètre, q_i est basé sur la notation Sur la concentration du i ème paramètre, n est le nombre de paramètres. Les valeurs WQI calculées sont classées en cinq types, de "Excellente eau" à "l'eau, impropre à boire".

VIII.4 Méthodes d'interpolation

Dans cette étude, les méthodes d'interpolation utilisées, la Distance Inverse Pondéré (IDW), le krigeage ordinaire (OK), CoKrigeage (OCK) et le Krigeage Bayésien Empirique (EBK) ont été évalués.

VIII.4.1 Pondération inverse de la distance (Inverse distance weighting) IDW

La pondération inverse de la distance repose sur l'hypothèse que les prévisions sont une combinaison linéaire de données disponibles. Dans cette méthode, la fonction d'interpolation est la suivante :

$$Z(x) = \frac{\sum_{i=1}^n w_i z_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (IV.6)$$

dans lequel

$$w_i = d^{-u}$$

où $Z(x)$ est la valeur prédite en un point interpolé, tandis que Z_i est la quantité en un point connu. " n " est le nombre total de points connus utilisés en interpolation, " d_i " est la distance entre le point i et le point de prédiction, w_i est le poids attribué au point i . Des valeurs de pondération plus élevées sont attribuées aux points qui sont plus proches du point interpolé. Au fur et à mesure que la distance augmente, le poids diminue et u est la puissance de pondération qui impose la quantité de diminution de poids par rapport à l'augmentation de la distance (Xie et al., 2011), (Mirzaei et Sakizadeh, 2015).

VIII.4.2 Krigeage Ordinaire (Ordinary kriging) OK

Le krigeage Ordinaire est un estimateur linéaire, ce qui signifie que l'estimation de la valeur inconnue est une combinaison linéaire des valeurs de données connues (Xie et al.2011), (Mirzaei et Sakizadeh, 2015). Le but du krigeage est d'estimer la valeur d'une fonction aléatoire, z , en un ou plusieurs points non échantillonnés ou sur des blocs plus grands, à partir de données d'échantillon plus ou moins éparses sur un support donné, disons $z(x_1)$, $z(x_2)$, ... $Z(x_N)$, à x_1, x_2, \dots, x_N .

Cela peut être montré par

$$z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n w_i Z(x_j) \quad (IV.7)$$

où w_j sont les poids attribués à la valeur connue de $z(x_j)$ et $z^*(x_0)$ est la valeur estimée. Pour garantir que l'estimation est sans biais, les poids sont additionnés à 1 (Xie et al.2011).

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1 \quad (IV.8)$$

VIII.4.3 Krigeage bayésien empirique (Emperical Bayesian kriging) EBK

Le krigeage bayésien empirique (EBK) est une méthode d'interpolation géostatistique qui automatise les aspects les plus difficiles de la construction d'un modèle de krigeage valide. En

plus de tenir compte de l'incertitude dans les paramètres de semi-variogramme sous-jacents, l'autre principale caractéristique de rachat d'EBK est que, malgré l'analyste géostatistique commun appliqué dans ArcGIS10.2, les paramètres du nouvel EBK développé sont automatiquement optimisés grâce à un processus de sous-ensemble et de simulation qui est mis en œuvre en estimant un grand nombre de modèles de semi-variogramme au lieu d'un seul semi-variogramme (Mirzaei et Sakizadeh, 2015). La prédiction dans des emplacements inconnus dans les méthodes de krigeage courantes est effectuée par le calcul du semi-variogramme par rapport aux emplacements de données connus, ce qui entraîne la sous-estimation de l'erreur standard de la prédiction en raison de la négligence de l'incertitude du semi-variogramme. Au contraire, EBK utilise une fonction aléatoire intrinsèque comme modèle de krigeage malgré les autres méthodes de krigeage (Samsonova et al., 2017) L'autre différence principale d'EBK avec celle des autres modèles de krigeage est que EBK ne suppose pas une tendance vers un Moyenne globale; ainsi, il y a la même chance que les écarts importants deviennent plus grands ou plus petits. Le processus suivant est suivi dans EBK. (1) À partir des données disponibles, un modèle de semi-variogramme est estimé. (2) Compte tenu de ce semi-variogramme, une nouvelle valeur est simulée à chacun des emplacements des données d'entrée. (3) En ce qui concerne les données simulées, un nouveau modèle de semi-variogramme est estimé en conséquence. Le calcul d'un poids pour le dernier semi-variogramme selon la règle de Bayes est la prochaine étape dans ce domaine. Le semi-variogramme estimé à l'étape 1 permet de simuler un nouvel ensemble de valeurs à l'emplacement d'entrée lors de la répétition des étapes 2 et 3. Un nouveau modèle de semi-variogramme et son poids sont produits compte tenu des données simulées. Au cours de ce processus, les prédictions, et leurs erreurs standard respectives, sont produites aux emplacements non échantillonnés. Ce processus crée finalement un spectre de semi-variogrammes (Krivoruchko, 2012 a, b). Il existe deux distributions de base disponibles dans EBK par rapport au score normal de biais multiplicatif utilisé dans cette méthode : empirique et log empirique. Étant donné que le log empirique n'accepte que les valeurs de données positives et que leurs prédictions sont également positives, c'est donc une bonne option pour les indices de qualité de l'eau qui ne sont que des scores positifs. En raison de l'application de la transformation logarithmique sur nos indices de qualité de l'eau, un modèle exponentiel a été appliqué pour interpoler l'WQI dans cette étude.

VIII.4.4 Co-krigeage (Co-kriging)

Le co-krigeage est une extension du krigeage aux situations où deux (ou plus) variables sont spatialement intercorrélées. Par souci de simplicité, une seule co-variable est utilisée dans ce qui suit (pour une généralisation, voir par exemple Journel & Huijbregts 1978).

Le co-krigeage est une moyenne pondérée des valeurs observées de la variable primaire z_1 (la variable de 1 intérêt immédiat, par exemple WQI) et de la co-variable z_2 . La valeur estimée de la variable principale à l'emplacement x_0 est:

$$\hat{z}_1(x_0) = \sum_{i=1}^{N_1} \lambda_{1i} z_1(x_{1i}) + \sum_{j=1}^{N_2} \lambda_{2j} z_2(x_{2j}) \quad (IV.9)$$

où N_1 et N_2 sont le nombre de voisins de z_1 et z_2 ; λ_{1i} et λ_{2j} sont les poids associés à chaque point d'échantillonnage. Lorsque les variables $z_1 = z_2$, le système se convertit en krigeage. Les poids sont choisis pour minimiser la variance de co-krigeage en résolvant le système de co-krigeage (Heisel et al., 1999).

VIII.5 Comparaison entre les différentes méthodes d'interpolation

La validation croisée et la validation avec un ensemble de données indépendant sont les méthodes couramment utilisées pour comparer les méthodes d'interpolation. La taille de l'échantillon étant limitée, la validation croisée a été appliquée dans cette étude. La validation croisée implique la suppression consécutive d'un point de données, l'interpolation de la valeur des observations restantes et la comparaison de la valeur prédite avec la valeur mesurée. L'erreur moyenne (ME), l'erreur absolue moyenne (MAE), les erreurs relatives moyennes (MRE), l'erreur quadratique moyenne (MSE), les erreurs quadratiques moyennes (RMSE), l'efficacité Nash – Sutcliffe (NSE) et le biais en pourcentage (PBIAS) calculées à partir des valeurs mesurées et interpolées à chaque site d'échantillonnage ont été utilisées pour comparer l'exactitude des prédictions:

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^n Z^*(x_i) - Z(x_i)}{n} \quad (IV.10)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |Z^*(x_i) - Z(x_i)|}{n} \quad (IV.11)$$

$$MRE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{Z^*(x_i) - Z(x_i)}{Z(x_i)} \right| \quad (IV.12)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [(Z(x_i) - Z^*(x_i))]^2}{n}} \quad (IV.13)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n [(Z(x_i) - Z^*(x_i))]^2}{\sum_{i=1}^n [(Z(x_i) - O)]^2} \quad (IV.14)$$

$$PBIAS = 100 \cdot \frac{\sum_{i=1}^n Z(x_i) - Z^*(x_i)}{\sum_{i=1}^n Z(x_i)} \quad (IV.15)$$

où $z(x_i)$, $z^*(x_i)$ et O sont les valeurs mesurées, interpolées et moyennes des valeurs observées de l'indice de qualité de l'eau du ième puits, respectivement, tandis que n est la taille de l'échantillon (Xie et al.2011) . Les efficacités de Nash – Sutcliffe peuvent aller de $-\infty$ à 1. Une efficacité de 1 ($E = 1$) correspond à une correspondance parfaite du débit modélisé avec les données observées (Mirzaei et Sakizadeh, 2015). Une efficacité de 0 ($E = 0$) indique que les prédictions du modèle sont aussi précises que la moyenne des données observées, alors qu'une efficacité inférieure à zéro ($E < 0$) se produit lorsque la moyenne observée est un meilleur prédicteur que le modèle ou, en d'autres termes, lorsque la variance résiduelle (décrite par le numérateur dans l'expression ci-dessus) est plus grande que la variance des données (décrite par le dénominateur). Essentiellement, plus l'efficacité du modèle est proche de 1, plus le modèle est précis (Wagner et al. 2012).

Tableau VIII.1 Statistique descriptive de la variabilité de la qualité des eaux souterraines dans la plaine de la Mitidja avec les WQI associés

Groundwater quality variable	Mean (mg/l)	Min (mg/l)	Max (mg/l)	SD
pH	7.84	7.39	8.20	0.19
Ca	140.65	51.95	227.00	49.62
Mg	43.49	17.98	92.96	19.69
Cl	161.23	33.00	442.50	111.60
SO4	175.56	15.00	428.75	104.99
NO3	38.78	0.00	84.85	21.57
CE*	1610.29	575.00	3300.00	700.98
TDS	1078.90	385.25	2211.00	469.66
TH °F	53.28	20.48	86.08	18.41
Fer	0.097	0.000	0.903	0.214
Manganèse	0.080	0.000	1.965	0.326
Cuivre	0.019	0.000	0.052	0.014
Cadmium	0.004	0.000	0.057	0.013
plamb	0.004	0.000	0.016	0.005
WQI	105.15	37.60	348.36	77.84

* $\mu\text{S/cm}$

VIII.6 Méthodes d'interpolation et contamination des eaux souterraines

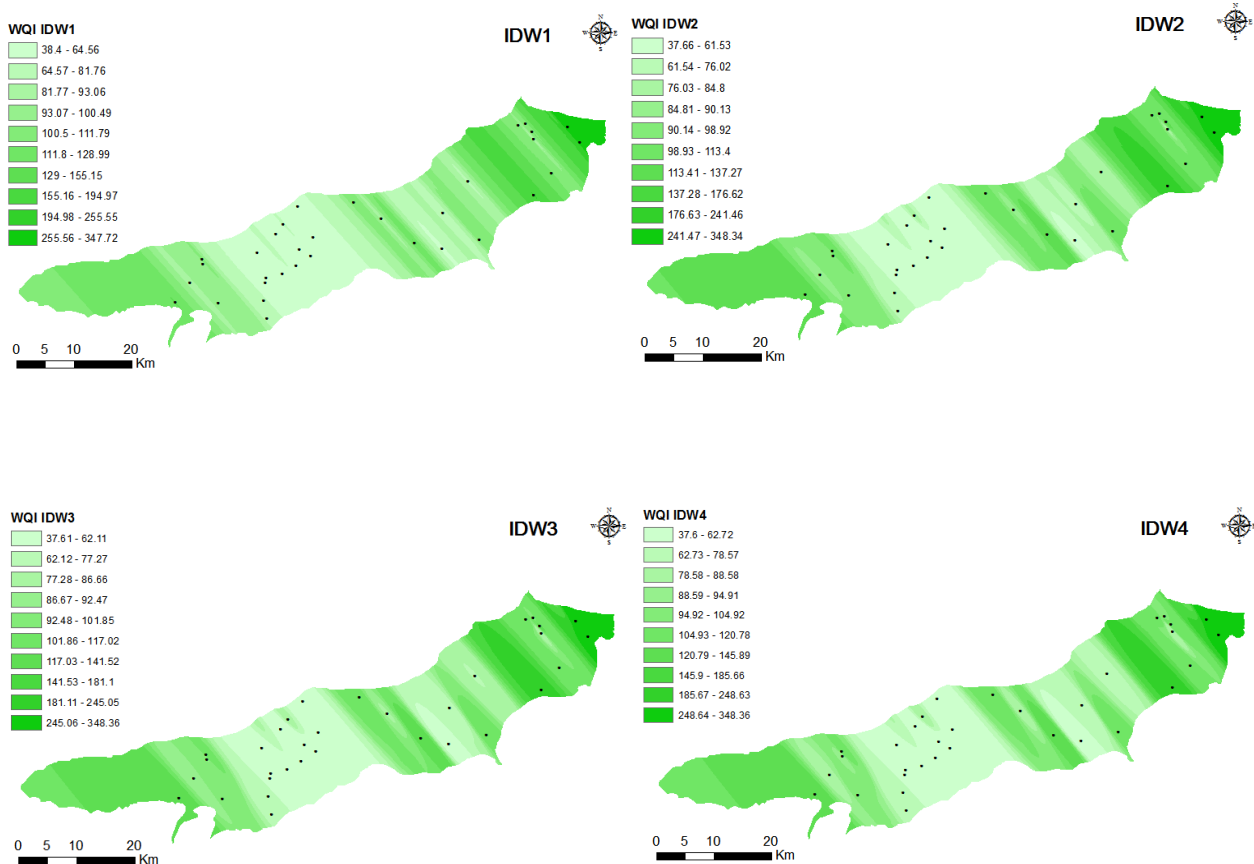
Pour l'analyse de l'effet du paramètre du model sur l'évaluation de la contamination, l'indice de pondération d'IDW en utilisant sept niveaux incluant 1-4 avec un pas de 0.5 a été appliqué. Pour OK, il fallait que la distribution des échantillons soit Normale ; sinon, une transformation appropriée devait être appliquée aux données d'échantillonnage. Le teste de Kolmogorov-Smirnov à été utilisé pour tester la normalité des distributions de l'indice de qualité de l'eau ($P < 0,05$) avec XLStat. La série de données du WQI ne suivait pas une distribution normale et donc, a nécessité une transformation Log. Le model du semivariogramme optimal a été préalablement ajusté à l'aide du logiciel **Isatis 7** et les paramètres correspondants ont été utilisés pour l'interpolation de krigeage dans ArcGIS 10.2. La série de donnée du niveau piézométrique de la nappe, qui suit une distribution normale, et la série de WQI ont été utilisées pour le Cokriging. La corrélation à était trouvée entre ces deux paramètres. Les cartes SIG produites par ArcGIS à partir des techniques choisies (IDW, OK, EBK, OCK) ont permit de comparer entre les différents niveaux de contamination. Le calcule de la taille de la zone contaminée a été fait à partir des échantillons des puits, soit par la proportion des sites contaminées ou par le calcul des surface de ces zones à partir des différentes cartes d'interpolation des WQI. Dans cette étude, l'indice de la qualité d'eau WQI a été classé en cinq niveaux ($WQI < 50$, 50-100, 100-200, 200-300 et $WQI > 300$) soit une qualité excellente, bonne, pauvre, très pauvre et inapte à boire ont été attribuées respectivement aux valeurs 1 à 5. Dans l'extension ArcGis spatial analyst (analyse spatiale), les surface interpolées de WQI ont été converties en image raster ensuite une soustraction a été réalisée sur deux évaluation de contamination par négligence, cellule par cellule pour

obtenir de nombreux résultats de soustraction (Xie et al. 2011). Afin de mettre en évidence la différence, plusieurs résultats représentatifs ont été sélectionnés pour évaluer la différence dans la zone de contamination parmi les différentes méthodes d'interpolation ; où IDW4 a été choisie pour indiquer des estimations de la zone à contamination élevée, alors que OK et IDW1 ont été sélectionnés pour indiquer les estimations de la zone peu contaminée. La sélection de IDW4 et IDW1 a été faite pour faire ressortir l'impact des paramètres de pondération sur les calculs des zones contaminées (Mirzaei et Sakizadeh, 2015).

VIII.7 Résultats

VIII.7.1 L'interpolation du WQI

Les valeurs données par les statistiques descriptives de l'indice de qualité d'eau WQI, dans Tableau VIII.1, ont montré une fluctuation de valeurs entre 37.6 et 348.36 avec une moyenne de 105.15. Les valeurs les plus grandes de l'indice de qualité de l'eau étaient plus élevées dans la partie Nord-Est de la pleine. Cela s'explique principalement par le taux élevé de population et l'installation de zones industrielles polluantes très tôt par rapport aux autres zones. D'autre part, La tendance est plus ou moins la même dans les différentes méthodes (Figure VIII.4). Le coefficient de Nugget (C_0/C_0+C) est utilisé pour classer la dépendance spatiale sous la méthode d'interpolation du krigeage ordinaire. Les ratios de $< 25\%$, $25-75\%$ et $>75\%$ suggèrent des autocorrélations intense, moyenne et faible, respectivement. Dans notre cas d'étude la valeur du coefficient de Nugget (C_0/C_0+C) de WQI était de $12,57\%$ ce qui représente des autocorrélations spatiales intenses.



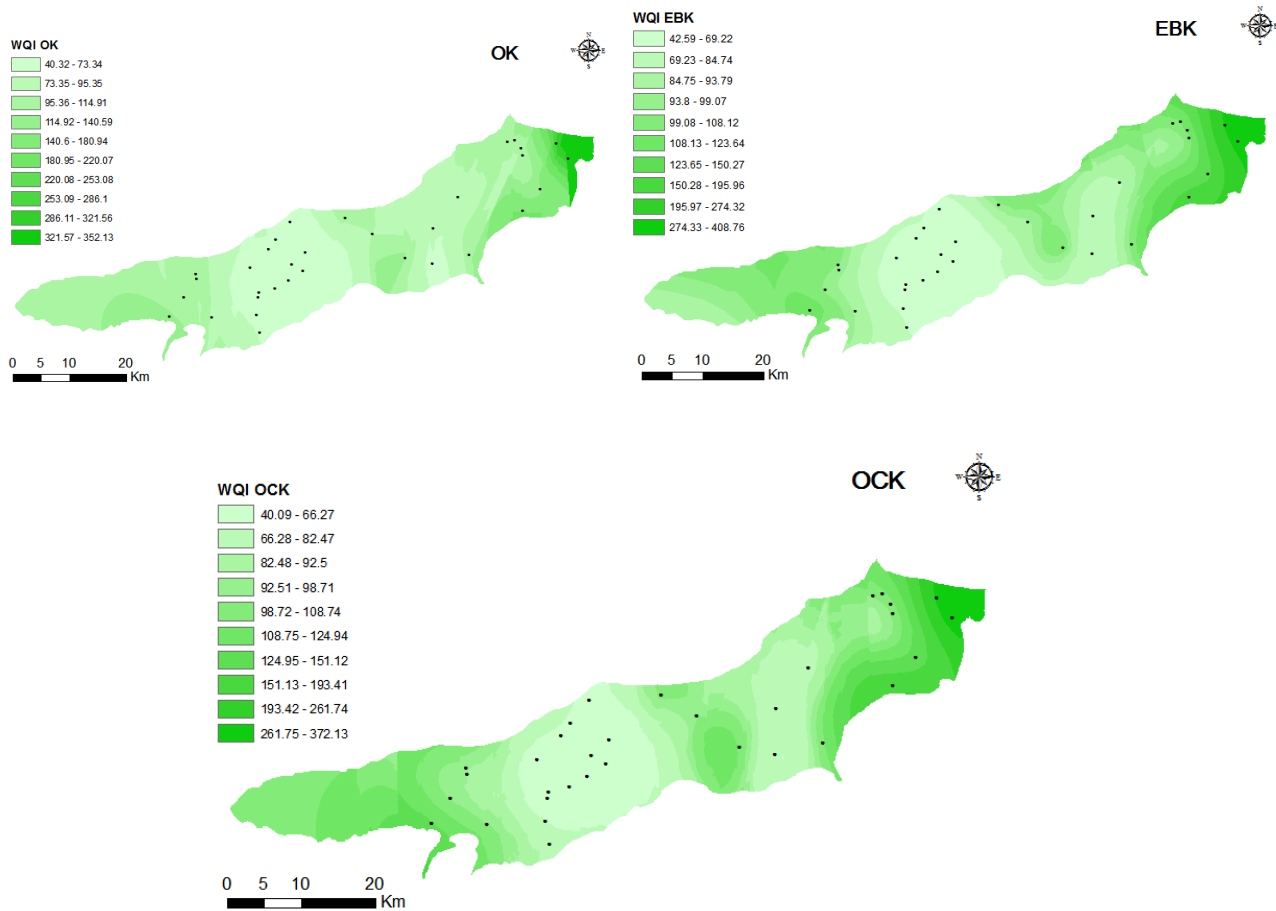


Figure VIII.4 : Les différentes méthodes d'interpolation et la prédiction spatiale de WQI

VIII.7.2 Précision des différentes méthodes d'interpolation

La précision des différentes méthodes d'interpolation apparaît clairement dans les indicateurs de la validation croisée de l'indice de la qualité d'eau. A partir de chaque méthode d'interpolation IDW, EBK OK et OCK the root mean square error RMSE et the mean absolute error MAE fournissent une mesure de précision de l'interpolation, avec les valeurs les plus basses possible (Xie et al. 2011), tandis que la ME mesure le biais. Dans le **Table 2** le RMSE varie entre 35.63 et 42.12 ou le OCK à la meilleure performance, le EBK vient en seconde position avec une légère différence entre les valeurs. Par contre le IDW4 bénéficie de la valeur de l'erreur la plus grande. Plus le pouvoir de pondération est grand plus the root mean square error RMSE est grande. Le biais représenté par ME est pratiquement égale à zéro pour toutes les méthodes d'interpolation. Les valeurs basses pour le MRE sont représentées par le OCK avec une valeur de 0.277, les autres méthodes d'interpolation ont pratiquement la même valeur de 0.3. Pour Nash–Sutcliffe efficiency (NSE), le OCK est plus performant avec une valeur de 0.84, le moins performant et le IDW4 avec la valeur de 0.776. De même, le EBK vient en deuxième position après le OCK. Le PBAIS tends vers le zéro.

Tableau VIII.2 : La précision de prédiction des méthodes.

Methods	ME	MAE	MRE	RMSE	NSE	PBAIS
OK	-4.8 E-05	30.47	0.321	40.57	0.792	4.58 E-05
Ock	6.1 E-04	26.98	0.277	35.63	0.840	-5.76 E-04
EBK	2.2 E-03	29.42	0.303	38.35	0.814	-2.12 E-03
IDW1	-1.6 E-05	27.82	0.296	40.37	0.794	1.52 E-05
IDW1.5	-7.0 E-05	28.10	0.295	41.49	0.782	6.66 E-05
IDW2	-1.6 E-05	28.08	0.295	41.60	0.781	1.52 E-05
IDW2.5	1.0 E-05	28.04	0.296	41.78	0.779	-9.56 E-06
IDW3	-1.8 E-05	27.97	0.296	41.94	0.778	1.74 E-05
IDW3.5	1.3 E-05	27.91	0.296	42.03	0.777	-1.22 E-05
IDW4	3.9 E-07	28.06	0.296	42.12	0.776	-3.74 E-07

VIII.7.3 Moyenne et coefficient de variation de la précision de l'interpolation

Toutes les méthodes d'interpolation de l'indice de la qualité de l'eau ont une prédiction similaire de la moyenne. Les valeurs moyennes sont de l'ordre de 105.15 (Tableau VIII.3). Par contre le coefficient de variation varie entre une valeur minimale de 62.46 % pour la méthode de OCK à une valeur maximale de 76.05 % pour la méthode de IDW4. Le coefficient de variation simule augmente progressivement à mesure que le pouvoir de pondération augmente pour la méthode d'interpolation de IDW. La valeur du pourcentage du coefficient de variation indique que la distribution est hétérogène, ce qui implique une distribution élevée autour de la moyenne. Cela peut être expliqué par l'étendue et la grande hétérogénéité du site d'échantillonnage, le nombre d'échantillon prélevé, ainsi que la contamination non uniforme des polluions par les métaux lourds (Xie et al. 2011).

Tableau VIII.3 : La moyenne et le coefficient de variance prédits en utilisant différentes méthodes

Methods	Predicted mean	Predicted coefficient of variation
OK	105.15	67.82
Ock	105.16	62.46
EBK	105.16	63.05
IDW1	105.15	68.38
IDW1.5	105.15	70.36
IDW2	105.15	71.89
IDW2.5	105.15	73.41
IDW3	105.15	74.52
IDW3.5	105.15	75.38
IDW4	105.15	76.05
Original value	105.15	74.02

VIII.7.4 Zone contaminée et distribution spatiale

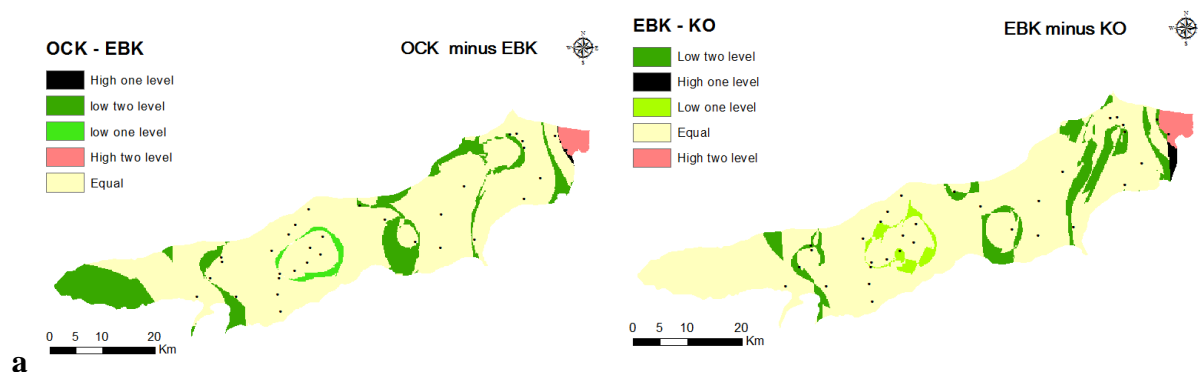
Les cartes de contamination de la zone d'étude, faites à partir des différentes méthodes d'interpolation, délimitent les différents niveaux de contamination. Le nombre de classes ont été fixées à cinq (5) classes (WQI<50, 50-100, 100-200, 200-300 et >300). L'extension « Spatial analyst » in ArcGis permet de convertir les cartes en images rasters, ce qui permet de calculer les surfaces de chaque niveau de pollution. En parallèle et concernant

l'échantillon sans interpolation, le ratio de l'échantillon a permis d'estimer les différentes surfaces des différents niveaux de contamination. Dans la Tableau VIII.4 les pourcentages des surfaces contaminées de chaque niveau varient d'une méthode d'interpolation à une autre. Le niveau 5 ou contamination très élevée varie de 1.56% pour le EBK à 3.96 pour le OK avec des valeurs de contamination de IDW très proche de EBK, ce qui fait une variation faible entre les différentes méthodes d'interpolation, par contre la valeur de l'échantillon est plus élevée 8.33%. EBK est la méthode qui estime la zone à forte contamination la plus faible possible. La variation de la surface de contamination dans IDW augmente avec l'augmentation du niveau de pondération.

Tableau VIII.4 : La zone de contamination de l'eau calculée par différentes méthodes

Methods	Groundwater contaminated area proportion (%)				
	Level 1	Level 2	Level 3	Level 4	Level 5
OK	2.06	41.41	47.28	5.28	3.96
Ock	6.52	50.83	38.94	2.00	1.71
EBK	1.63	40.68	52.30	3.83	1.56
IDW1	3.16	54.76	39.92	0.53	1.63
IDW1,5	5.41	54.30	37.69	0.87	1.72
IDW2	5.41	54.30	37.69	0.87	1.72
IDW2,5	6.49	52.00	38.96	0.76	1.79
IDW3	7.04	50.33	40.10	0.68	1.86
IDW3.5	7.33	48.90	41.24	0.62	1.91
IDW4	7.55	47.16	42.77	0.57	1.95
Simple ratio	16.67	47.22	27.78	0.00	8.33

La Figure VIII.5, montre clairement les résultats de la soustraction entre deux rasters de deux méthodes d'interpolation. Les résultats ont plus ou moins un niveau similaire de contamination avec de légères variations. OCK – EBK et EBK – IDW2 ont fait sortir les zones à contamination faible du niveau 2. La contamination du niveau 5 a été présente pratiquement dans toutes les soustractions mis à part celle entre IDW4 – IDW1 ce qui explique la faible variation des valeurs du Tableau VIII.4 de la pollution du niveau 5. La pollution du niveau 3 apparaît clairement avec les soustractions EBK – OK, OCK – OK, OK – IDW4.



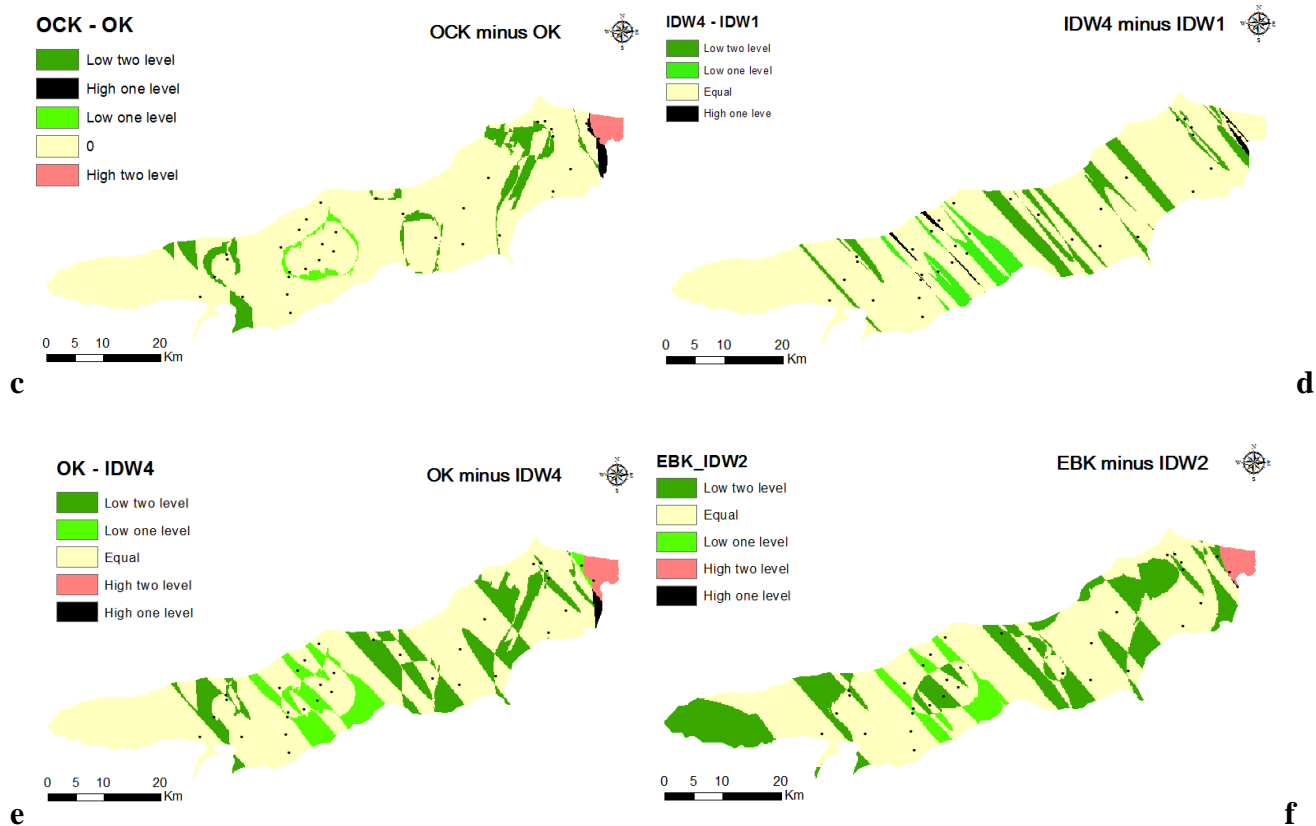


Figure VIII.5 : La différence entre surfaces, estimer par la technique d'estimation deux à deux

The difference of WQI area estimated by each two interpolation techniques

VIII.8 Discussion

La tendance d'estimation du WQI par des différentes méthodes d'interpolation a été plus ou moins la même avec une légère variation. Les cartes résultant des ces interpolations ont permis l'estimation de la contamination de la nappe de la plaine de la Mitidja. Cela a été possible grâce à l'influence de chaque méthode et à son incertitude. Li & Heap, 2014 ; Xie et al. 2011 ; Kravchenko, 2003 ; Liu et al., 2004 ont expliqué cette différence par l'étendue et l'hétérogénéité du site d'échantillonnage, le nombre d'échantillon prélevé ainsi que la contamination non uniforme par les métaux lourds surtout. Pour que la méthode soit plus précise, l'erreur calculée à partir de la validation croisée doit être la plus faible possible (Xie et al. 2011), (Mirzaei et Sakizadeh, 2016), (Falivene et al, 2010). Le biais de la cross validation dans cette étude était très faible pour toutes les méthodes d'interpolation, bien qu'une légère différence existait entre RMSE, MRS et NSE qui donnaient plus de poids à l'interpolation par OCK suivie par EBK (Tableau VIII.2). Le résultat du calcul de la surface contaminée (Tableau VIII.4) a montré que le EBK a estimé l'aire de la contamination du niveau 1 et 2 mieux que les autres méthodes, en outre la contamination du niveau 4 et 5 a été mieux représentée par la méthode OK que par la méthode IDW qui les a minimisés.

Afin de minimiser les erreurs de la moyenne globale, les techniques d'interpolations permettent de lisser les données d'origine (Xie et al. 2011), (Falivene et al, 2010) qui visent

a préserver autant que possible la variation graduelle des valeurs de WQI (Mirzaei et Sakizadeh, 2016). Le coefficient de variation présenté dans la Tableau VIII.3 et prévu pour différentes méthodes d'interpolation montre que IDW présente le coefficient de variation le plus élevé que OCK et que EBK. Lorsque le coefficient de variation est petit, les erreurs des différentes méthodes d'interpolation sont petites. Quand le coefficient de variation augmente les erreurs RMSE et MRE augmentent eux aussi (Xie et al. 2011). L'effet du pouvoir de pondération de IDW varie proportionnellement avec le CV (Tableau VIII.3) et (Tableau VIII.4). La surface de la pollution augmente aussi avec l'augmentation du niveau de pondération. Ce résultat a été constaté aussi par Xie et al. 2011 et Mirzaei et Sakizadeh, 2016. La soustraction entre les différentes méthodes d'interpolation faite deux à deux a montré que la partie Nord – Est est la zone qui contient le niveau de contamination le plus élevé (Niveau 5). Il convient de noter que le OCK a été fait entre l'indice de la qualité d'eau WQI et le niveau piézométrique de la même année, d'où une probabilité de résultats autres que celle-ci peut découler de cette méthodes d'interpolation si une variation piézométrique est constatée.

VIII.9 Conclusion

Dans cette étude, les quatre méthodes d'interpolation testées ont eu un résultat très proche pour la prédiction de la contamination des eaux de la nappe de la Mitidja. La RMSE du OCK est le plus petit suivi par la méthode de EBK qui vient en seconde position. Par contre le IDW4 bénéficie de la valeur de l'erreur la plus grande. Dans le même sens, plus le coefficient de variation est grand, plus le RMSE est grand. L'estimation de la zone polluée des niveaux 1 et 5 par la méthode classique, découlant d'une estimation du nombre de point de mesures sur WQI de la contamination, est supérieure à celle faites par les méthodes de l'interpolation. La méthode du OK a l'estimation la plus grande de la surface contaminée des niveaux 4 et 5. Plus le pouvoir de pondération est élevé pour le IDW, plus grande est l'estimation de la zone contaminée. L'incertitude apparait clairement dans la zone du passage entre deux niveaux et dans le même niveau dans le cas de changement des valeurs de WQI. La contamination du niveau 5 est située dans l'extrême Est, suivie de celle du niveau 4, la zone non polluée est située au centre de la plaine. Toutefois, les méthodes d'interpolation géostatistiques demandent plus de travaux et de perfection que les méthodes déterministes. Quelque soit la précision de la méthode, le nombre d'échantillon, la qualité des données et la compétence de l'analyste nourriront l'incertitude.

**Modélisation mathématique de la nappe côtière de la Mitidja Est
sous ModFlow
Étude quantitative**

Chapitre ; 9 Modélisation mathématique de la nappes côtière de la Mitidja sous ModFlow

Étude quantitative

IX. Introduction

Afin de pouvoir étudier la quantité et la qualité de l'eau de l'aquifère de la Mitidja, nous avons fait appelle à la modélisation hydrogéologique des milieux souterrains. Cette dernière simule l'écoulement des eaux souterraines à travers l'aquifères et ainsi résout son équation de l'écoulement.

Le but principal de cette modélisation reste en premier lieu la visualisation de l'état de notre nappe puis la simulation et la prévision de son comportement sous l'effet de l'entropie et l'action du climat.par la suite organiser la gestion la plus adéquate.

IX.1 Le choix du modèle

Pour une bonne gestion des eaux de la nappe est basée sur le choix du model utilisé. Il doit disposer d'outils de traitement de l'écoulement des eaux souterraines, de suivre dans l'espace et le temps la qualité d'eau et assimilant le système hydrologique à un système physique. Sans oublier sa flexibilité pour pouvoir intégrer toute nouvelle variation que ce soit dans l'input ou l'output des nouveaux débits, transport de pollution ou même chaleur. Il doit aussi simuler les écoulements avec un temps de réponse rapide et en étant le plus fiable et précis.

Trois approches de discrétisation du milieu naturel :

- **Différences finies**, qui permet la résolution de problèmes régionaux d'écoulement des nappes, en une ou deux dimensions, dans des systèmes multicouches ou en trois dimensions. Toutefois, elle peut représenter les hétérogénéités des propriétés du milieu.

- **Éléments finis**, plus compliquée à utiliser mais tout de même capable de traiter toutes les directions d'anisotropie. Elle est idéale pour résoudre les problèmes à limites mobiles, ceux ayant une surface libre et une interface abrupte entre eau douce et eau salée ou entre deux fluides immiscibles.

- **Des approches d'éléments aux limites** ou d'intégrales de limites ont été proposées dont l'avantage principal réside en leur précision du calcul qui ne dépend pas de la taille des éléments utilisés.

L'équation de diffusivité à trois dimensions dans un repère cartésien dont la fonction niveau piézométrique $h(x,y)$ est la solution de cette équation, peut être exprimée comme suit :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[T \cdot \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[T \cdot \frac{\partial h}{\partial y} \right] = \pm W \quad (\text{IV.1})$$

Avec :

$$T = K(x,y) \cdot d(x,y,t)$$

Où :

$K(x,y)$: perméabilité de l'aquifère (en : $L.T^{-1}$).

$d(x,y,t)$: épaisseur saturée de l'aquifère (L) au temps (t).

$h(x,y,t)$: charge hydraulique (L) au temps (t).

Dans le cas d'un aquifère libre, la fonction (W) peut être exprimée par :
 $W = R(x,y,t) - P(x,y,t) - S(x,y) (dh / dt)$ (IIV.2)

Avec :

$R(x,y,t)$: la recharge nette au temps t ($L^3 \cdot T^{-1}$) exprimée en m^3/s .

$P(x,y,t)$: pompage ou débit extrait de la nappe, exprimé en m^3/s .

$S(x,y)$: coefficient d'emmagasinement (sans dimensions).

W : terme d'entrée ou de sortie.

IX.2 Approche mathématique de la méthode des différences fines :

La résolution numérique de l'équation de diffusivité consiste en l'intégration de cette équation au domaine investigué. Pour ce faire, le domaine est discrétisé en "n" mailles. Pour chaque maille l'équation des différences finies en fonction des mailles adjacentes, s'écrit:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[T_x \cdot \frac{\partial H}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[T_y \cdot \frac{\partial H}{\partial y} \right] = \left[\frac{T_E(H_E - H_C) - T_W(H_W - H_C)}{x^2} \right] \left[\frac{T_N(H_N - H_C) - T_S(H_S - H_C)}{y^2} \right] \quad (IIV.3)$$

Isolons une maille donnée C du domaine avec ses quatre voisines (Figure IIV.1), que nous désignerons par les notations N (nord), E (est), S (sud), et W (ouest).

Le principe de continuité implique la conservation du débit d'eau entrant algébriquement par les quatre limites de la maille C, ce qui s'écrit:

$$Q_N + Q_E + Q_S + Q_W = Q_C + Q_{em}$$

Où : Q_{em} : désigne le débit emmagasiné dans la maille C.

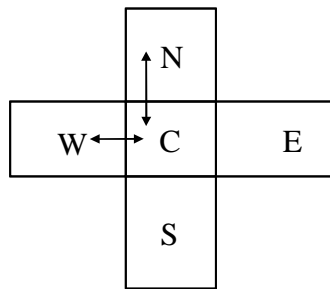


Figure IX.1 : Bilan des flux sur une maille C

Donc, par l'égalité de l'équation de diffusivité avec l'équation précédente, on obtient :

$$T_e (H_e - H_c) - T_w (H_w - H_c) + T_n (H_n - H_c) - T_s (H_s - H_c) = S_x^2 (\delta H_c / \delta t) + Q_c \quad (IIV.4)$$

où :

Q_c : Débit entrant ou sortant à travers C.

On remarque donc que les transferts de l'eau aux frontières de la maille sont régis par les paramètres T_n , T_w , T_s et T_e représentant la transmissivité de la nappe dans les quatre directions N, W, S et, E parfois désignées sous le nom de transmissivités de passage. Ce sont elles en particulier qu'il conviendra d'ajuster au cours du calage du modèle pour assurer l'adéquation entre les niveaux piézométriques calculés et observés.

On préfère en général, plutôt que d'introduire quatre paramètres par maille, engendrer les transmissivités de passage par le calcul à partir d'une transmissivité unique moyenne attribuée

à chaque maille.

Si on considère "n" le nombre des mailles, la charge hydraulique déterminée au niveau de chaque nœud par l'intégration de l'équation ci-dessus à un domaine de "n" mailles sera résolue par l'expression matricielle suivante :

$$[T][H] = X^2[S](\delta H / \delta t) + [Q] \quad (\text{IIV.5})$$

Soit :

$$[H] = \left[\frac{X^2[S](\partial h / \partial t) + [Q]}{[T]} \right] \quad (\text{IIV.6})$$

IX.3 Élaboration du modèle

IX.3.1 Outils

Un bon fonctionnement hydrodynamique d'un système aquifère est basé sur la quantification des débits naturels transitant dans la nappe. Ces derniers sont fonction de la distribution des perméabilités qui permettent la reconstitution de la piézométrie.

Visual MODFLOW (VMOD) est un logiciel développé par [Waterloo Hydrogeologic](#). Initialement publié en 1994. Il a été renommé **Visual MODFLOW Flex** en mai 2012. Ce logiciel est une version de l'interface *Visual MODFLOW* qui utilise le code de calcul Modflow 2000 développé en Fortran par l'USGS (McDonald et Harbaugh, 1988). Il prend en charge MODFLOW-2000, MODFLOW-2005, MODFLOW-NWT, MODFLOW-LGR, MODFLOW-SURFACT et SEAWAT, il combine également des extensions propriétaires, telles que MODFLOW-SURFACT, MT3DMS (multi-espèces 3D de transport de masse). Ce code de calcul permet de résoudre l'équation de diffusivité aux dérivées partielles des écoulements par une combinaison de l'équation de continuité et de la loi de Darcy par la méthode des différences finies.

Pour la simulation des écoulements souterrains de la nappe côtière de la Mitidja deux étapes étaient nécessaires. D'abord construire un modèle en régime permanent qui participera à la compréhension du fonctionnement du système aquifère. Ensuite en régime transitoire avec le suivi du plan de captage d'eau pour l'alimentation en eau potable de la population et l'irrigation, et ainsi donc le suivi de l'évolution du comportement piézométrique des nappes en fonction des débits de pompage

IX.3.2 Options de Maillage Flexible

Visual MODFLOW Flex, dispose de différents types de maillages grâce auxquels nous pouvons générer les meilleurs modèles numériques et les plus stables. Le choix parmi les différents types de maillages/grilles par la méthode des différences finies pour accepter une large gamme d'applications et de conditions géologiques (p.ex., biseaux stratigraphiques, discontinuités). Le Maillage Uniforme, Non Uniforme, Maillage d'Éléments Finis et les Maillages Enfants Localisés (MODFLOW-LGR) sont Les Types de Maillages Compatibles

IX.3.3 Travail à faire

Du fait que le modèle s'articule autour de deux hypothèses fondamentales : les gradients hydrauliques doivent être faibles et la continuité hydraulique de l'aquifère respectée, des conditions aux limites de la zone d'étude doivent être imposées et une discrétisation en mailles quadrangulaires choisit.

Le nombre et la taille des mailles dépendent de la précision attendue et de la nature des données sources (nombre, distribution, qualité). Ainsi, la piézométrie calculée au centre de chaque maille tient compte des paramètres hydrodynamiques (conductivité hydraulique, porosité, ...), des conditions aux limites (potentiel ou flux imposé, possible liaison avec un réseau hydrographique, ...) et des conditions de recharge (infiltration, évapotranspiration, éventuels pompages, ...).

IX.3.4 Discrétisation spatiale

Le maillage est la représentation du domaine étudié par l'assemblage des cellules (différences finies), d'éléments (éléments finis) ou de régions (éléments frontières et éléments analytiques) (Dassargues, 1995). Dans ce travail, nous avons adopté la méthode des différences finies, qui se limite à l'utilisation de cellules rectangulaires (2D) ou parallélépipédiques (3D). La discrétisation de l'espace en mailles carrées présente une grande facilité d'emploi.

En général, la taille des mailles dépend de plusieurs facteurs :

- de la précision souhaitée sur les calculs ;
- des contours plus ou moins sinueux des limites ;
- du nombre et de l'éloignement des singularités (puits) ;
- mais aussi de la capacité de l'ordinateur.

Il est évident que pour une même précision il y aura un plus grand nombre de mailles carrées égales que de mailles inégales, choisies plus petites dans les zones sensibles. Mais un modèle à mailles égales est beaucoup plus facile à utiliser.

Pour la discrétisation spatiale, la zone d'étude, de 517 Km² de surface, a ainsi été subdivisée en un ensemble de mailles carrées uniforme de 0,200 Km de côté. Au total, la nappe côtière de la Mitidja compte 12925 mailles actives (Figure IIV.2). En effet chaque maille est de 0,04 Km² de surface.

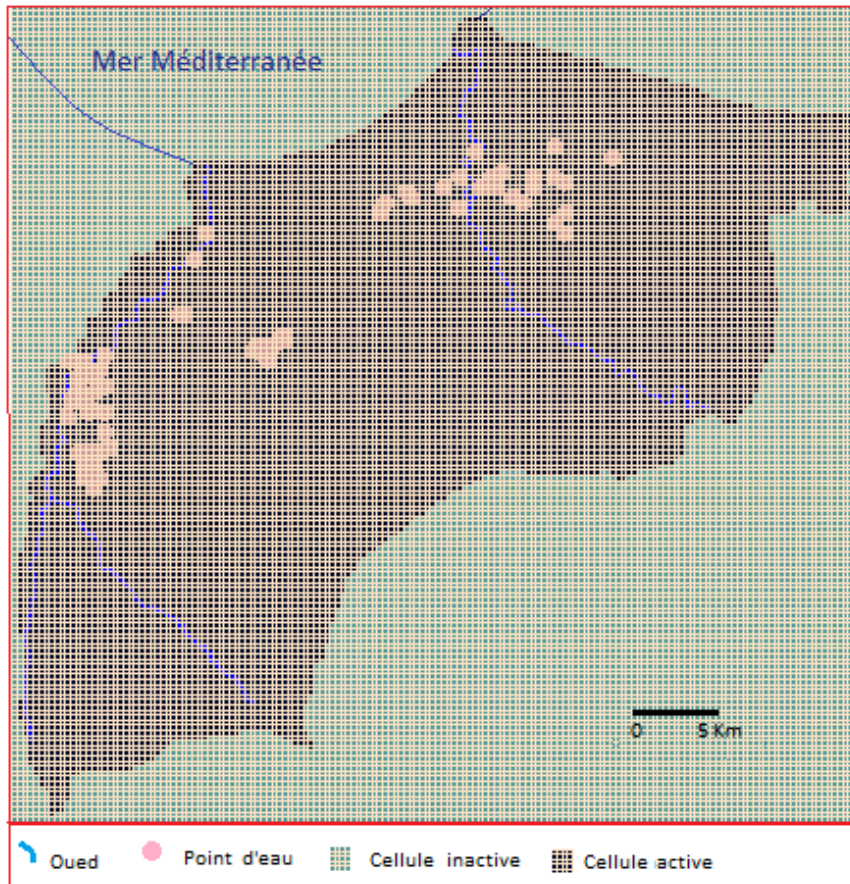


Figure IX.2 : Maillage de la nappe côtière de la Mitidja

IX.3.5 Conditions aux limites du modèle

Nous considérons les aquifères comme "monocouche" avec un écoulement à surface libre, bidimensionnel dans l'ensemble du domaine et à faible pente hydraulique.

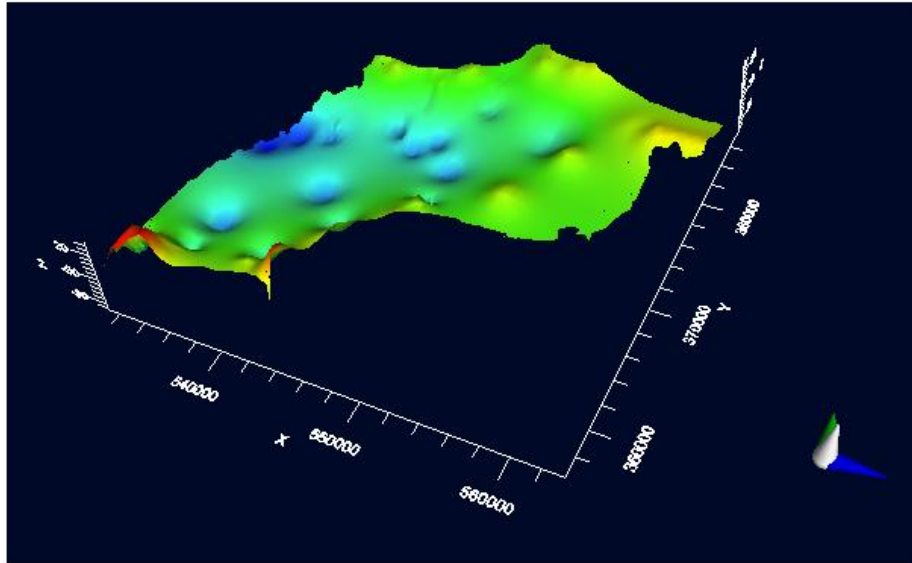
Les conditions aux limites sont définies comme toutes conditions hydrodynamiques, de flux ou de potentiels, permanents ou variables, imposées au sein d'un système aquifère. Leurs définitions nécessitent la description quantitative du système.

IX.3.5.1 Limites géologiques

Les caractéristiques et la position des limites des aquifères, ont été élaborées à partir des informations recueillies lors de la synthèse géologique traitée antérieurement.

a) Le mur

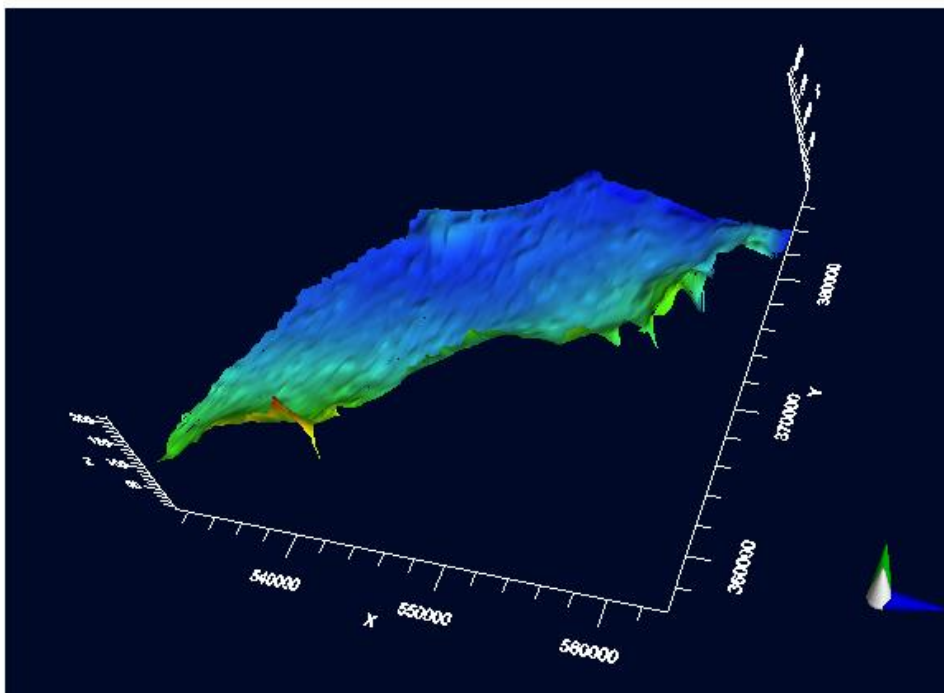
Le mur représente une limite à flux nul, sans échange par drainance avec un niveau aquifère plus profond. L'aquifère est par conséquent modélisé en système monocouche. La morphologie de cette surface a été interpolée afin d'obtenir une altitude pour chaque maille du modèle. (Figure IX.3.a)



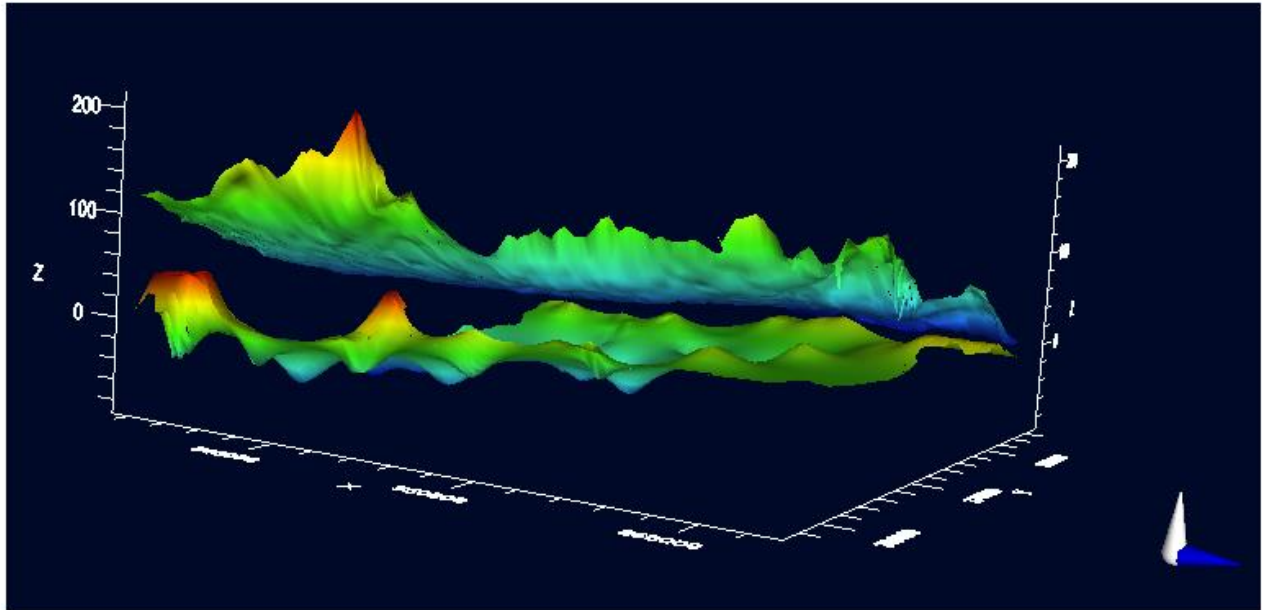
(a)

b) Le toit

La nappe côtière de la Mitidja est considérée comme libre. Par conséquent, la limite du toit correspond à la surface du sol. Nous avons obtenu les données de topographie à partir d'un modèle numérique de terrain (MNT) de résolution 30 m. Ainsi donc, nous avons attribué à chaque maille du modèle une hauteur de toit conforme à la réalité. (Figure IX.3.a)



(b)



(c)

Figure IX.3 : vue en 3D des limites géologiques de la nappe de la Mitidja (agrandissement 30%) ; (a) le Mur de la zone, (b) le Toit de la zone (c) la superposition du Toit et du Mur délimitant ainsi l'épaisseur de la nappe de la Mitidja.

IX.3.5.2 Conditions de flux et de potentiel internes (condition de Neuman)

Pour les conditions de Neuman, nous sommes appelés à déterminer les conditions de flux internes qui sont exprimés en :

- Une recharge directe par infiltration des précipitations et homogénéisée au niveau de chaque maille,
- Une recharge par l'infiltration à partir des oueds (El Harrach, Djemaa, Hamiz).
- Une limite à débit entrant sur les bordures Est et Sud de la plaine.

IX.3.5.3 Les limites étanches

Les limites latérales (Ouest et Est) marquées par des formations dunaires consolidées qui ont considérées comme étanches.

IX.3.5.4 Les limites de potentiels imposés (condition de Dirichlet)

Elles sont affectées sur l'ensemble des mailles bordant la Méditerranée à l'embouchure des oueds (Oued El Harrach, Oued Hamiz). Ce potentiel ne change pas quels que soient les paramètres utilisés et/ou les sollicitations imposées (pompage, infiltration, ...).

En même temps, il existe à l'embouchure des oueds un débit sortant, affecté du signe "-" (moins), estimé également par la loi de Darcy.

IX.3.5.5 Les prélèvements

Les prélèvements, de la zone d'étude, sont destinés à l'alimentation en eau potable, l'industrie et à l'irrigation. Ils sont évalués selon le recensement fait par la SEAAL d'Alger à 4917.4 m³/j/forage soit 181,28M m³/an, avec 101 forages (entre 2007 et 2018) (Figure IX.4).

Devant l'absence des données descriptive fiables surtout pour les prélèvements en industrie et en irrigation, nous nous sommes basés sur les données de l'inventaire de l'ANRH réalisé entre 1996 et 2002 sur le nombre de point d'eau et le volume d'eau prélevé.

Tableau IX.1 : Bilan annuel de l'aquifère alluviale (géohydraulique. 1970, Bennie et Partners.1980)

	Apports		Exhaures			
	hm ³	%	hm ³	%		
Estimation de Géohydrologie (1970)	Infiltration des précipitations	177	60	Pompage dans la nappe -Agriculture : 168 -Industrie : 15 -AEP : 65	248	83
	Infiltration des oueds et du ruissellement sur les piémonts	89	30			
	Apport latéral par l'Astien du Sahel	22	7.5	Drainage des cours d'eau	36	12
	Apport par drainage de l'Astien	7	2.5	Fuite vers la mer	14	5
	Total des apports	295		Total des exhaures	298	
Estimation de Bennie et partners (1980)	Infiltration des précipitations	77	23.4	Pompage dans la nappe -Agriculture : 126 -Industrie : 21 -AEP : 142 -autres : 5	294	87.9
	Infiltration des oueds et du ruissellement sur les piémonts	136	41.5			
	Apport latéral par l'Astien du Sahel	63	19.1	Drainage des cours d'eau	24	7.1
	Apport par les formations du Mazafran	5	1.7	Fuite vers la mer	17	5.0
	Fuites du réseau de distribution en eau potable	22	6.6			
	Retour des eaux d'irrigation	25	7.7			
	Total des apports	328		Total des exhaures	335	

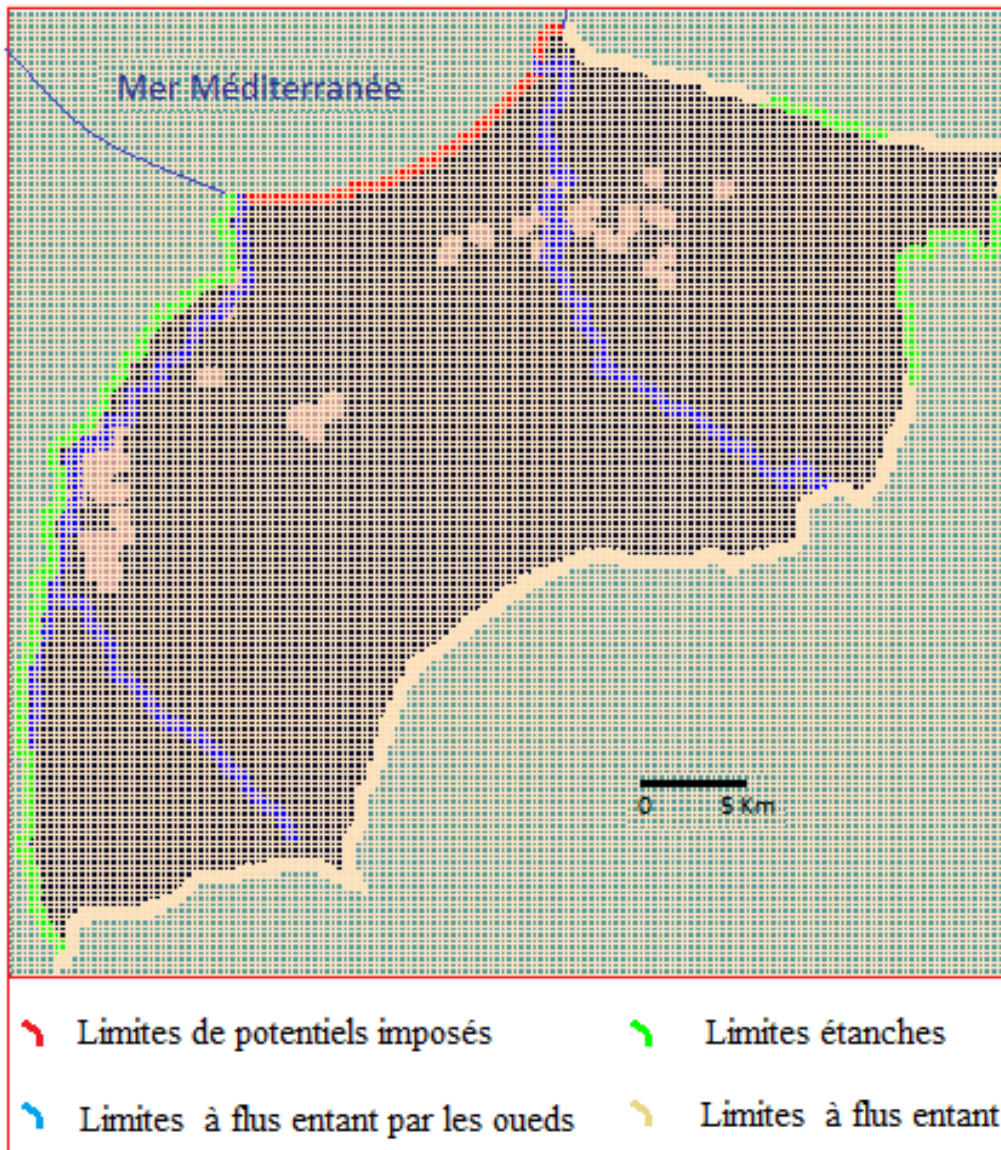


Figure IX.4 : Représentation des conditions aux limites de la nappe de la Mitidja

IX.3.5.6 La recharge

C'est les flux susceptibles d'être transférés vers les nappes aussi bien par l'intermédiaire des cours d'eaux (oueds El Harrach, Djemaa, Hamiz) ou même directement par la pluie (chapitre II).

IX.3.6 Les paramètres hydrodynamiques

L'hypothèse de départ considère la zone modélisée comme un milieu isotrope, au sein de chaque maille de calcul. Les paramètres hydrodynamiques représentés par la perméabilité et le coefficient d'emmagasinement, caractérisant l'état libre des alluvions quaternaires, sont identiques dans toutes les directions de l'espace ($K_x = K_y = K_z$).

Les données de la **perméabilité de l'aquifère (K)** sont obtenues à partir des essais de pompage ponctuels et des débits spécifiques disponibles. Pour le modèle, les perméabilités sont calculées pour chaque maille après l'interpolation de ces données par les méthodes géostatistiques en division la transmissivité par l'épaisseur de l'aquifère. Par la suite, ces

valeurs ont été ajustées durant les phases de calage en régime permanent. Les valeurs de perméabilité s'échelonnent entre 1×10^{-5} à 2×10^{-3} m/s.

Le coefficient d'emménagement (S): En régime permanent ce paramètre n'intervient pas, par conséquent sa valeur exacte importe peu (Sylvain, 2001). Le coefficient d'emménagement est déterminé soit par des pompages d'essais ou estimé à partir de la nature lithologique des formations de l'aquifère des alluvions. Nous avons pris la valeur de S répertorié dans l'étude de Bonnie (1983) et celle de Mac Donald (1992) et qui varie entre 10^{-3} et 0,15 sur l'ensemble de la zone modélisée.

IX.4. Calage et Simulation en régime permanent

Le calage en régime permanent est la base des résultats qui vont suivre, que ce soit le calage en régime transitoire où les résultats des différents scénarios proposés. Il est lié aussi à la modélisation du transfert des éléments dans la nappe (pollution ou chaleur)

Le calage du modèle en régime permanent simule les prélèvements des eaux souterraines, tout en minimisant la différence entre les valeurs piézométriques mesurées et celles du résultat. Le modèle doit reproduire les conditions du champ mesuré avec un niveau de précision acceptable par de multiples ajustements des données d'entrée (Dassargues, 1995).

Nous avons pris l'année 2007 comme année de calcul, ou pratiquement la majorité des travaux s'arrêtent. Les principaux paramètres qui ont intervenu pour le calage sont :

- La charge piézométrique initiale et les débits de pompages ;
- Les perméabilités (k) et le coefficient d'emménagement obtenues par des essais de pompages ;
- La recharge par les précipitations (infiltration efficace) et la décharge par l'évapotranspiration (pourcentage de la précipitation) attribuée à chaque maille ;
- Les conditions aux limites avec un signe "+" si les flux sont des flux entrants, et un signe "-" s'ils sont des flux sortants.

Le calage du modèle est basé sur le changement de valeur des paramètres hydrodynamiques. Les résultats de chaque modification ont été comparés à la piézométrie observée pour l'année prise comme année de régime permanent jusqu'à l'obtention de l'ajustement.

Remarquant que la perméabilité est le premier facteur à manipulé et qui subit plus de changement que les autres, puis le coefficient d'emménagement et en fin les conditions aux limites. Ceci jusqu'à obtenir l'erreur la plus faible possible et la plus acceptable entre l'état calculé à l'état réel.

Pour la piézométrie, des valeurs simulées à ± 0.2 et 1,98 m des niveaux initiaux ont été considérées acceptables vu qu'on n'a pas pu arriver à un résultat meilleur.

IX.4.1. Résultats du calage

a) Carte de la perméabilité

L'ajustement de la perméabilité de la zone d'étude pour avoir un calage acceptable a été fait sur la base de la carte krigée des données de terrain. La fourchette de manipulation est assez large (0.6×10^{-5} et 1.77×10^{-3} m/s), ce qui prend plus de temps et rapproche le modèle des valeurs de calage acceptable.

Après plusieurs ajustements, nous avons obtenu la carte de la répartition spatiale des perméabilités représentée par la figure (Figure IX.5).

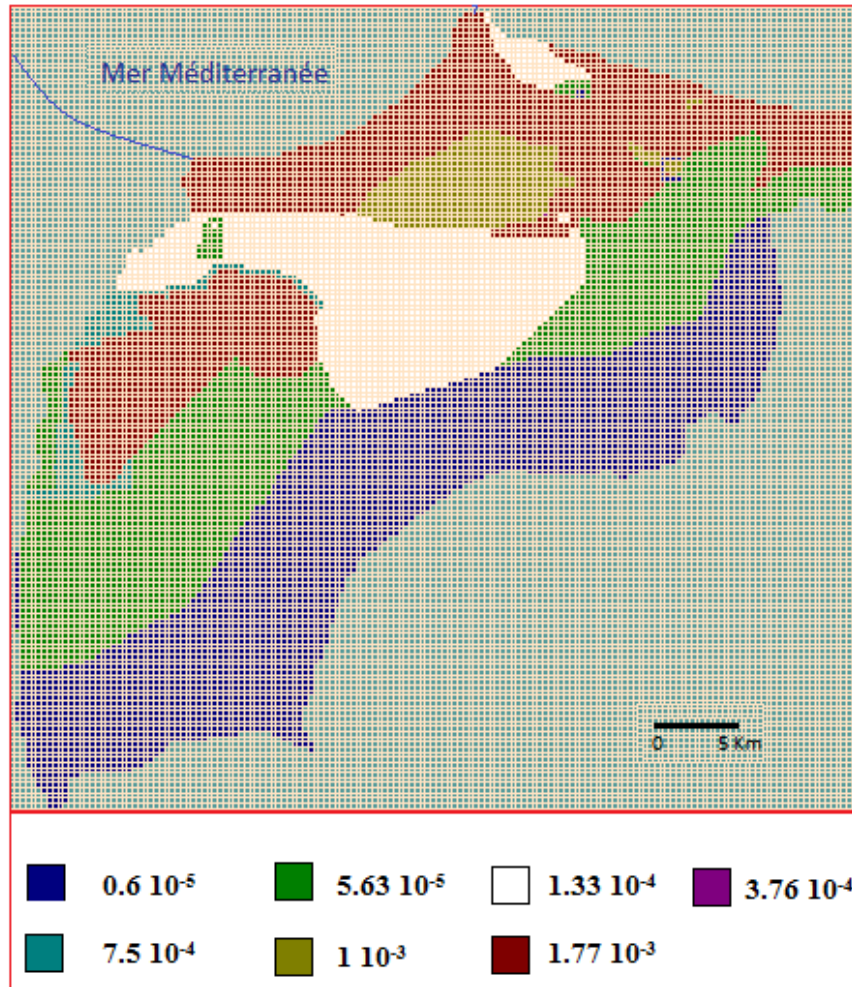


Figure IX.5 : Carte de la répartition spatiale des perméabilités (m/s), après le calage

b) Carte piézométrique

La carte de la piézométrie calée et présentée ci-dessous (Figure. IX.6), après plusieurs manipulations de la perméabilité hydraulique, les apports des oueds et les apports à travers l'Atlas, et assez proche de celle krigée à partir des données du suivi de la piézométrie sur le terrain (annexe II, Figure.II.1).

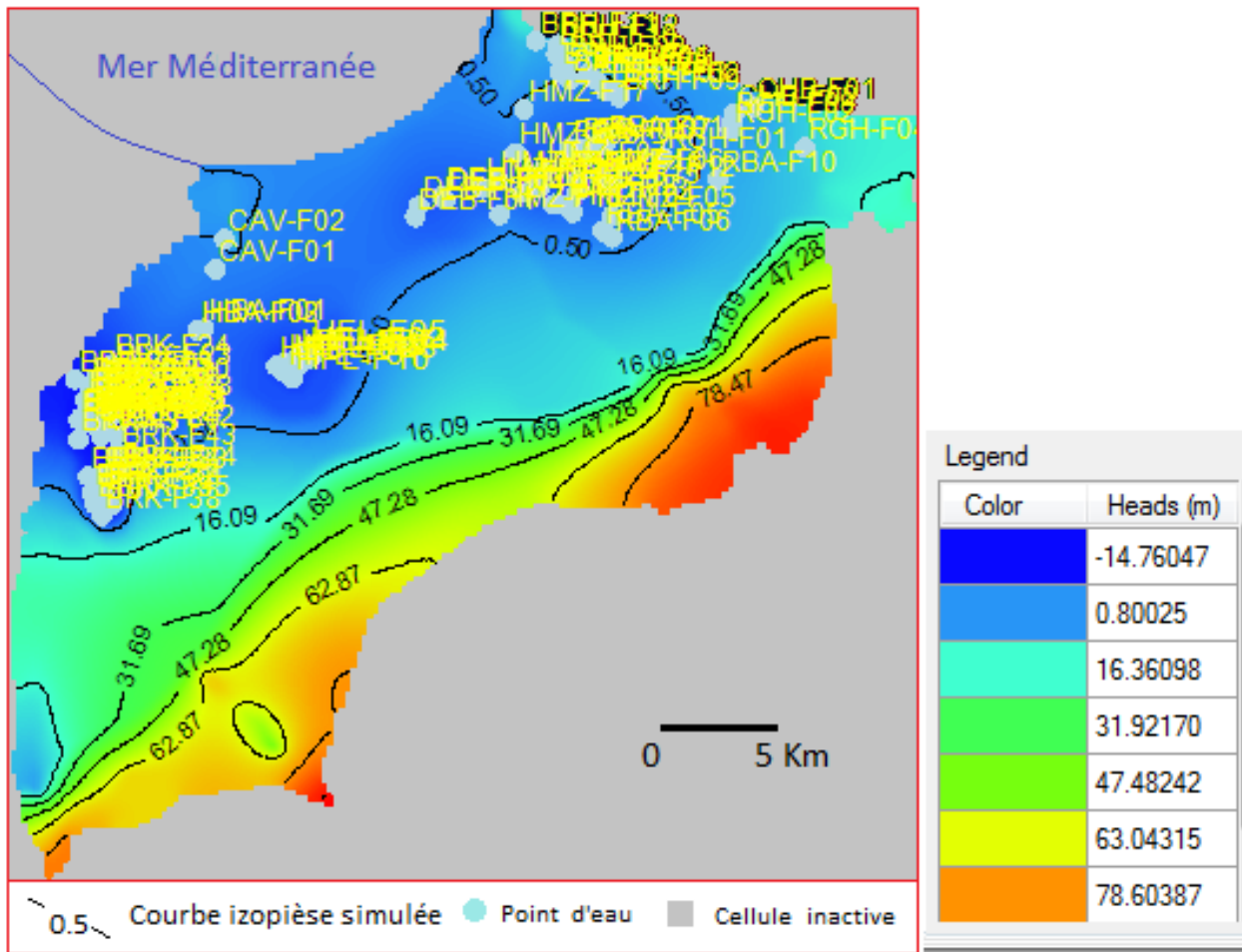


Figure IX.6 : Carte piézométrique de la nappe côtière de la Mitidja simulée en régime permanent (Mai 2007)

La droite de régression établie à partir du modèle de calage, qui a prit en charge la carte piézométrique calculée et celle mesurée de l'année 2007, montre bien la corrélation entre les points ($H_c = F(H_m)$). Les erreurs d'estimation sont comprises entre 0,2 et 1,98 m pour l'erreur standardisée et l'erreur quadratique moyenne respectivement et un coefficient de corrélation de 95%. (Figure IX.7). Nous remarquons que l'erreur minimale est de 0 m, est observée au niveau de la zone de captage de Beraki (BRK F11) et l'erreur maximale est de 10 m, enregistrée au niveau de Chebli (CHB F1 au Nord-Est de la carte). Les erreurs peuvent être Dues au cumule des différentes erreurs obtenues à travers les paramètres de calage (perméabilité, la recharge, les infiltrations spécifiques...) ainsi que le système qui travail comme un bloc unique dans la nature.

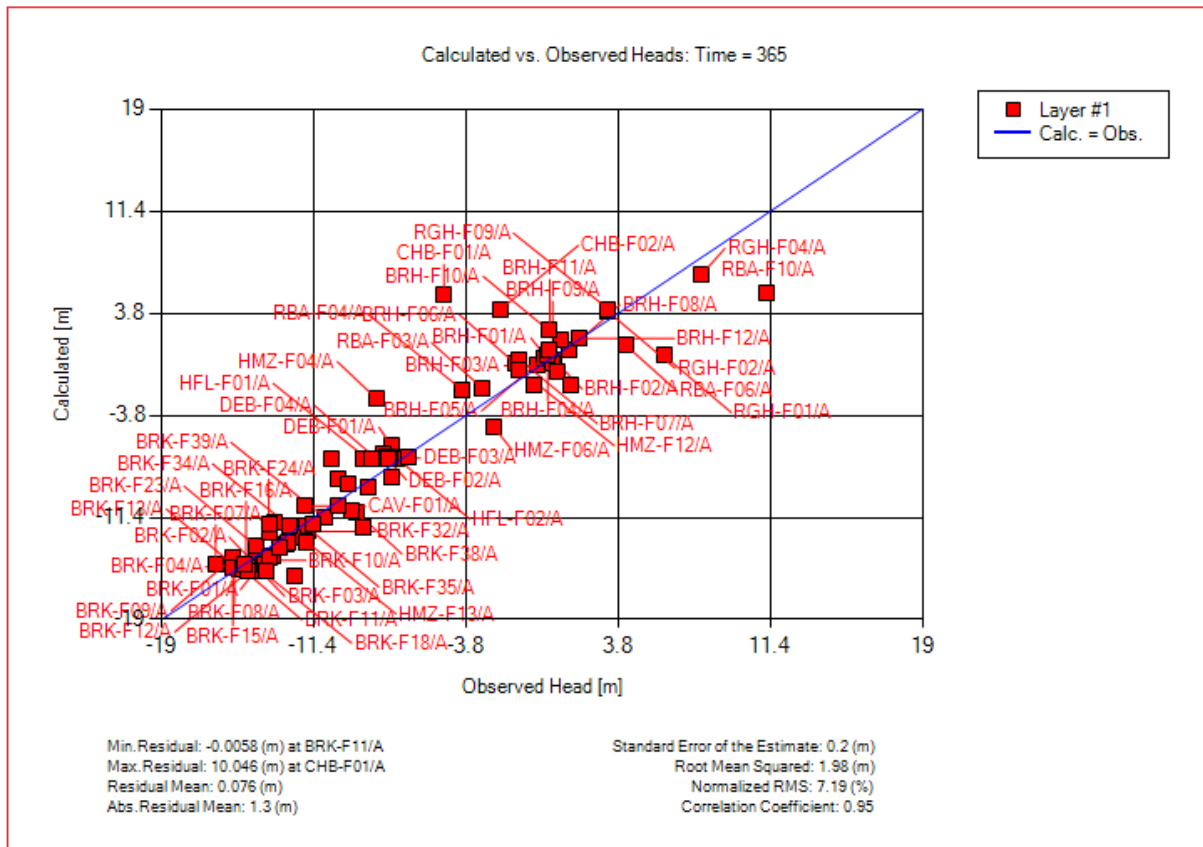


Figure IX.7 : Calibration des points d'observation en régime permanent

a) *Bilan hydrique issu du calage*

Le bilan de la nappe de la Mitidja pour les 365 jours de l'année 2007 est donc calculé après calage en régime permanent. Les input et les output sont représentés par les histogramme de la figure (Figure IX.8) où il apparait clairement que le bilan est en équilibre.

➤ Apports

- Infiltration des précipitations : 109 960.4 m³/j.
- Infiltration par les oueds : 290 356.4 m³/j.
- Infiltration par l'Atlas Blidéen : 2 727 m³/j.
- Infiltration par la Mer : 5 985.13 m³/j.

➤ Exhaures

- Prélèvement (forages et puits) : 361 652.4 m³/j.
- Évaporation : 5 035.66 m³/j.
- Débit sorti vers la mer : 24 187.68 m³/j.
- Drainage par les oueds : 18 153.2 m³/j.

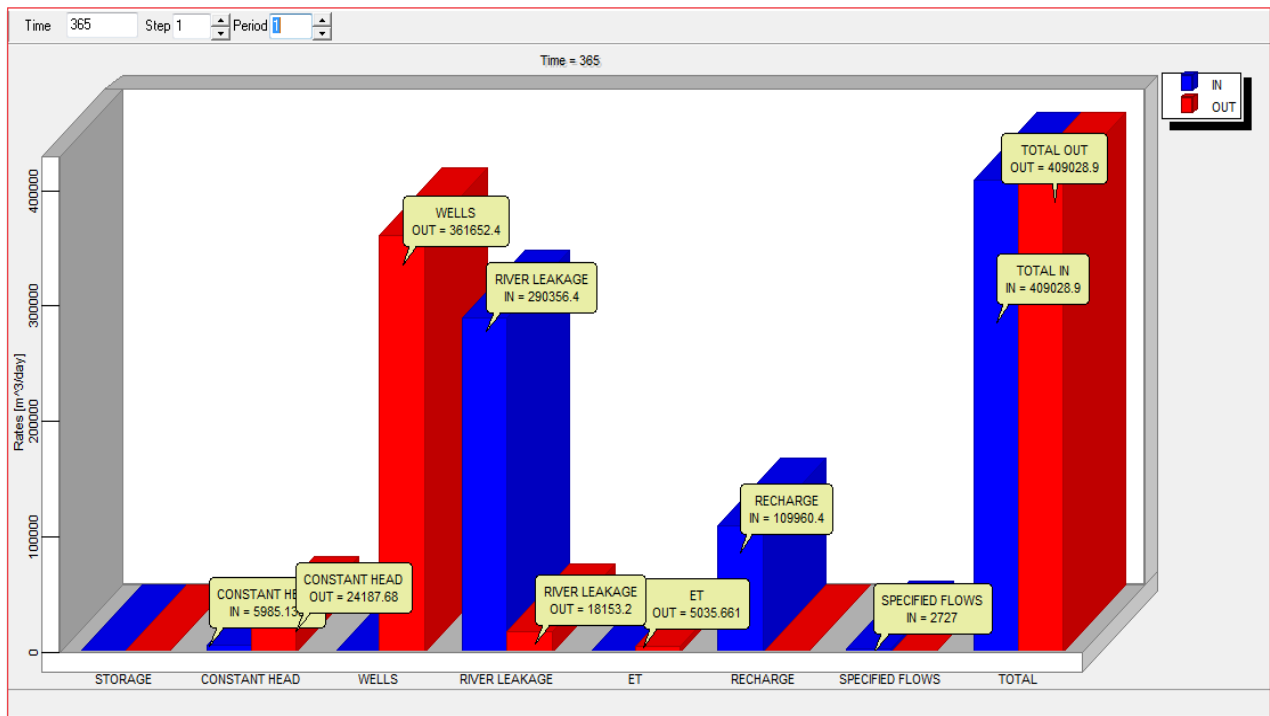


Figure IX.8 : Bilan hydrique (m^3/j) de la nappe de la Mitidja modélisée en régime permanent de Mai 2007

IX.4.2 Conclusion

Le résultat de la simulation hydrique de la nappe de la Mitidja aboutit à un total qui est le même en input et en output ce qui montre que notre nappe est à l'équilibre. Néanmoins nous pouvons d'ores et déjà remarquer que l'intrusion marine est bien apparente par un débit de 69.27 l/s. De ce fait, un déséquilibre apparaît clairement à moyen et long terme que ce soit sur l'approche quantitative et/ou l'approche qualitative si nous n'agissons pas.

IX.4.3 Simulation en régime transitoire à l'échéance 2018 et scénarios à long terme (2048)

IX.4.3.1 Introduction

Cette simulation a pour but d'évaluer le bilan de la nappe de la Mitidja en régime transitoire jusqu'à l'année 2018 (vu que les données récupérées s'arrêtent à cette date) puis l'impact des prélèvements (pompages en fonction de leurs débits) et la recharge de la nappe à l'échéance 2048.

Au départ, notre objectif est de déterminer l'état de la nappe en fonction des conditions actuelles d'exploitation par les gestionnaires locaux, vu que la demande en eau est de plus en plus élevée pour tous secteurs confondus (AEP, AEI, AEA).

Au delà de l'année 2018, nous allons simuler différents scénarios étroitement liés au climat et son changement ainsi qu'à la variation de la demande des différents secteurs. La gestion déjà mise en place a démontré une sur exploitation et une intrusion marine capable de s'aggraver si nous ajoutons à cela une baisse de précipitation et un accroissement de population.

Le choix des scénarios s'est fait de telles sortes d'une part va nous permettre de ressortir les

problèmes et les difficultés de la gestion de la nappe, et ainsi donc pouvoir suggérer des solutions plausibles.

Nous avons tenté de simuler six (06) cas de scénarios d'exploitation de la nappe de la côtières de la Mitidja sur une échéance de 30 ans avec trois (03) laps de temps de 10 ans.

IIV.4.3.2 Scénarios

Étape 1 : simulation en régime transitoire de la période 2007-2018 avec les conditions du milieu.

Étape 2 :

A. Variante 01 : Recharge constante par la pluie calculée sur la période hydrologique 2007-2018, avec :

- *Scénario 01* : Prélèvements constants sur 30 ans et égaux à ceux de l'année de référence (2018).

- *Scénario 02* : Prélèvements supplémentaires avec augmentation des débits d'exploitation des forages destinés à l'AEP, à l'irrigation et à l'industrie avec augmentation de taux d'exploitation à 20 %.

B. Variante 02 : Diminution de taux de la recharge par la pluie de -20 % dû aux changements climatiques (sécheresse) avec :

- *Scénario 03* : Prélèvements constants et égaux à ceux de l'année de référence (2018).

- *Scénario 04* : Prélèvements supplémentaires avec augmentation des débits d'exploitation des forages destinés à l'AEP, à l'irrigation et à l'industrie de la zone, avec augmentation de taux d'exploitation à 20 %.

C. Variante 03 :

- Prélèvements supplémentaires avec augmentation des débits d'exploitation des forages destinés à l'AEP, à l'irrigation et à l'industrie de la zone, avec augmentation de taux d'exploitation à 20 % ;

Et

- Ajustement de la recharge de la zone de Tabainet par les bassins d'infiltrations (oued El Harrach) calculée par l'ANRH

- *Scénario 05* : Recharge constante par la pluie calculée sur la période hydrologique 2007-2018

- *Scénario 06* Diminution de taux de la recharge par la pluie de -20 % dû aux changements climatiques (sécheresse).

IX.4.3.1 Exploitation du modèle

Le suivi du niveau piézométrique sera effectué à partir de 09 neuf forages. 06 six situés au plus près des zones de pompage intensifs où la variation est très sensible à chaque changement, (03) trois forage un petit éloignés des zones de pompages.

Le tableau ci-après (Tableau. IX.2) présente la localisation de chaque forage dans une maille de l'espace discrétisé.

Tableau IX.2 : Localisation des points d'observation dans les mailles

Point d'eau d'observation (forage)	Maille (x,y)	
Zone de Beraki	P 01	(84,18)
	P 02	(69,18)
	P 07	(94,21)
Zone de Hamiz	P 03	(36,82)
	P 08	(37,98)
	P 09	(35,83)
Zone de DEB	P 04	(39,71)
Zone de Cave	P 05	(45,37)
Zone de HBA	P 06	(61,33)

IX.4.3.2 Simulation en régime transitoire à l'échéance 2018

La deuxième étape est effectuée sur une période de 12 ans, de 2007 jusqu'à 2018, au cours de laquelle le suivi piézométrique a été effectué régulièrement par l'ANRH à un pas de temps semestriel. Au cours du calage en régime transitoire, l'année de calage du régime permanent a été prise comme l'année de référence. Cette partie de manipulation pour la reproduction de la piézométrie, nous a permis d'ajuster au mieux le coefficient d'emmagasinement utilisé dans le régime transitoire. Initialement ce paramètre a pris la valeur de 5% avec lequel la simulation n'aboutissait pas, et après plusieurs changements basés sur la bibliographie nous avons conservé la valeur de 0.1.

La comparaison entre les cartes piézométriques calculées par le modèle et celles krigées à partir des données prélevées sur le terrain ont montré une bonne similitude. Sauf pour les deux années (2017 et 2018) où nous n'avons pas pu récupérer les relevés piézométriques.

Nous pouvons remarquer une même allure de la carte piézométrique après calage en régime transitoire que celle faite en régime permanent (Figure IX.9). La variation est due principalement par le volume de pompage dû au fait que les autres paramètres sont inchangés.

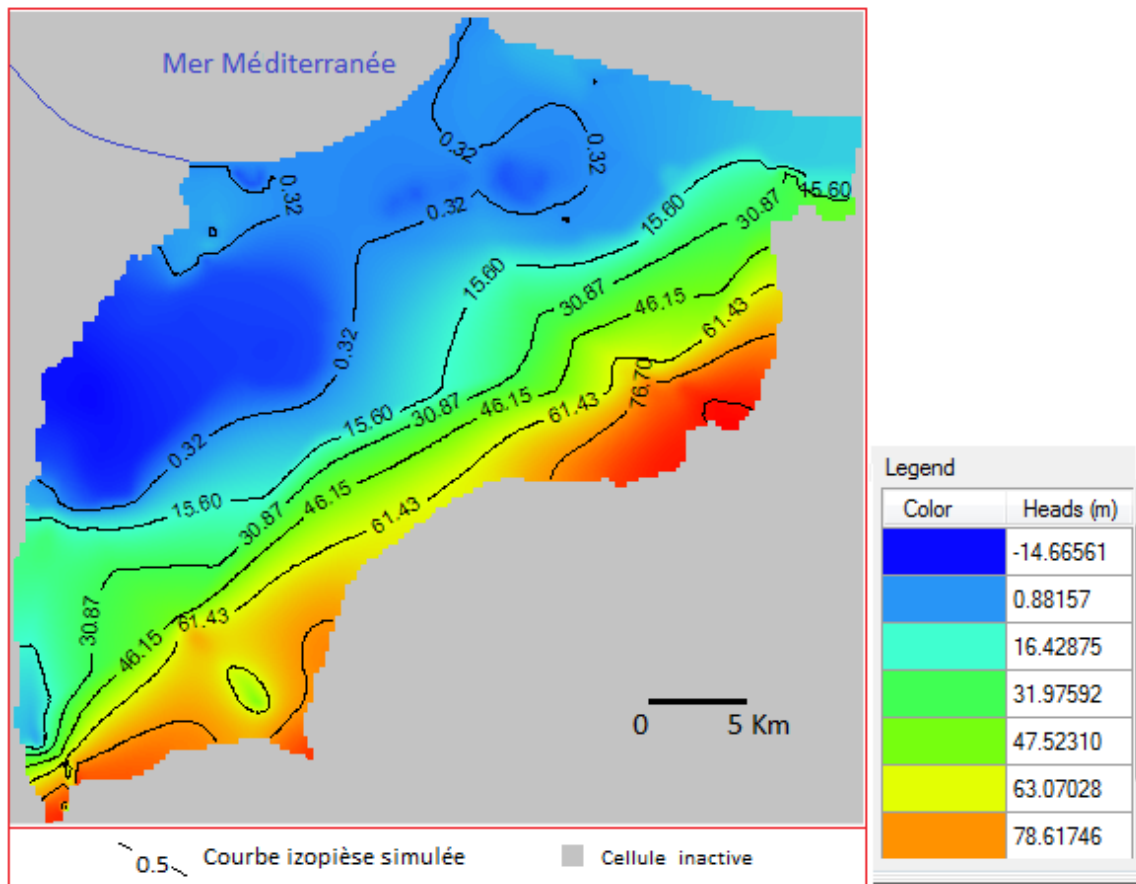


Figure IX.9 : Carte piézométrique de la nappe de la Mitidja modélisée en régime transitoire de Mai 2018

Le bilan du calage en régime transitoire et au bout de l'année 2018 de la nappe de la Mitidja est représenté par la figure (Figure IX.10). La différence entre le débit enregistré entre les input et les output est de $-0.6 \text{ m}^3/\text{j}$. Cette valeur est due à l'enregistrement d'un débit sortant supérieur au débit entrant d'environ 34 l/s. Même si cette valeur paraît faible, l'antécédent de notre nappe touchée déjà par l'intrusion marine, ne fera qu'aggraver le problème.

➤ Apports

- Infiltration des précipitations : $109\,960.4 \text{ m}^3/\text{j}$.
- Infiltration par les oueds : $290\,333 \text{ m}^3/\text{j}$.
- Infiltration par l'Atlas Blidéen : $2\,727 \text{ m}^3/\text{j}$.
- Infiltration par la Mer : $1\,236.48 \text{ m}^3/\text{j}$.

➤ Exhaures

- Prélèvement (forages et puits) : $346\,608.4 \text{ m}^3/\text{j}$.
- Evaporation: $5\,082.17 \text{ m}^3/\text{j}$.
- Débit sorti vers la mer : $31\,310.6 \text{ m}^3/\text{j}$.
- Drainage par les oueds : $18\,148.2 \text{ m}^3/\text{j}$.

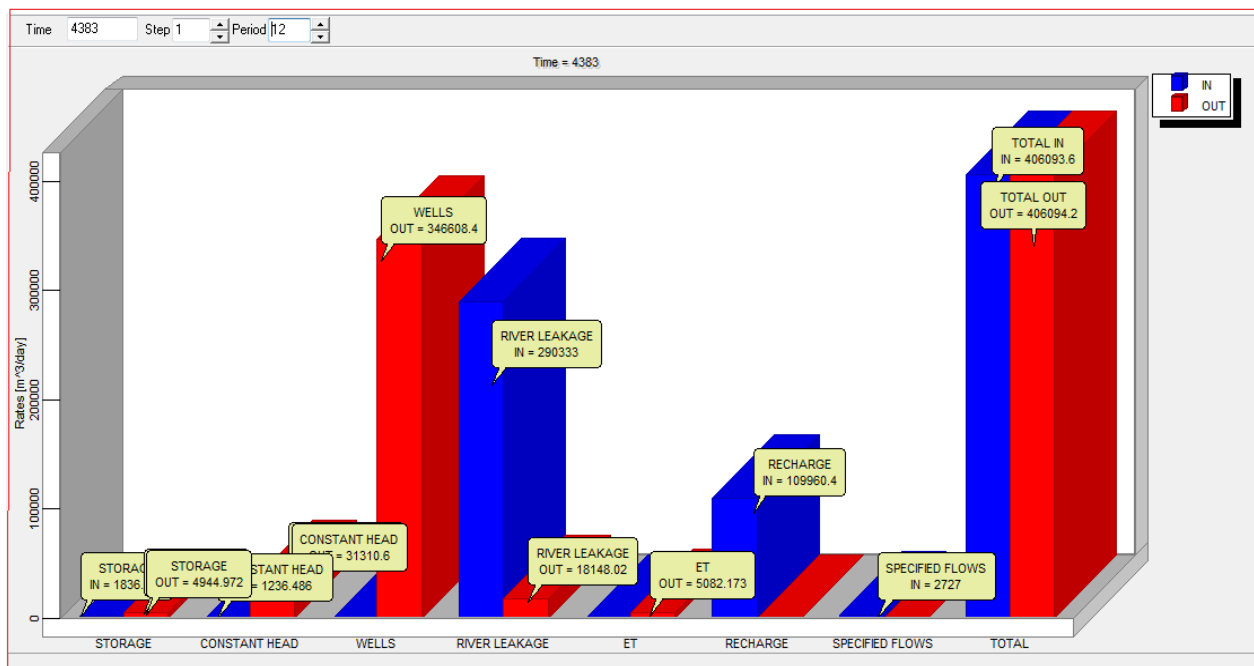


Figure IX.10 : Bilan hydrique (m³/j) de la nappe de la Mitidja modélisée en régime transitoire de Mai 2018

Le tableau ci-dessous (Tableau IX.3) montre la variation piézométrique enregistrée durant les douze (12) années pour les neuf points d'observations.

Tableau IX.3. Variation de la piézométrie entre 2007 et 2018

Point d'observation	P 01	P 02	P 03	P 04	P 05	P 06	P 07	P 08	P 09	
Maille (Row,Column)	(84,18)	(69,18)	(36,82)	(39,71)	(45,37)	(61,33)	(94,21)	(37,98)	(14,89)	
Piézométrie										
Temps (ans)	2007	-13.37	-12.28	-5.74	-7.45	-11.32	-9.56	-10.17	-8.36	-0.27
	2018	-13.25	-11.87	-2.89	-5	-6.5	-9.07	-10.1	-4.08	-0.27

L'évolution à la hausse de la piézométrie durant cette période. Selon la SEAAL, les prélèvements sur les champs captant de Hamiz et Beraki ont été diminués au maximum, voir arrêter, entre le 31 Octobre et le 1 Mai entre la période 2007 et 2015 en vue du transfert de l'eau du barrage de Taksep vers Alger (SOGREAH 2007).

Nous remarquons une augmentation assez importante des points de contrôles situés dans la zone centre et Est de la nappe de la Mitidja (CAV, DEB, HMZ), contrairement aux points situés à l'Ouest de la zone (BRK, HBA) (Figure IX.11).

Cette corrélation "cause-à-effet" est sous l'influence de plusieurs facteurs tel que le coefficient d'emmagasinement, géométrie, les limites et l'épaisseur de l'aquifère.

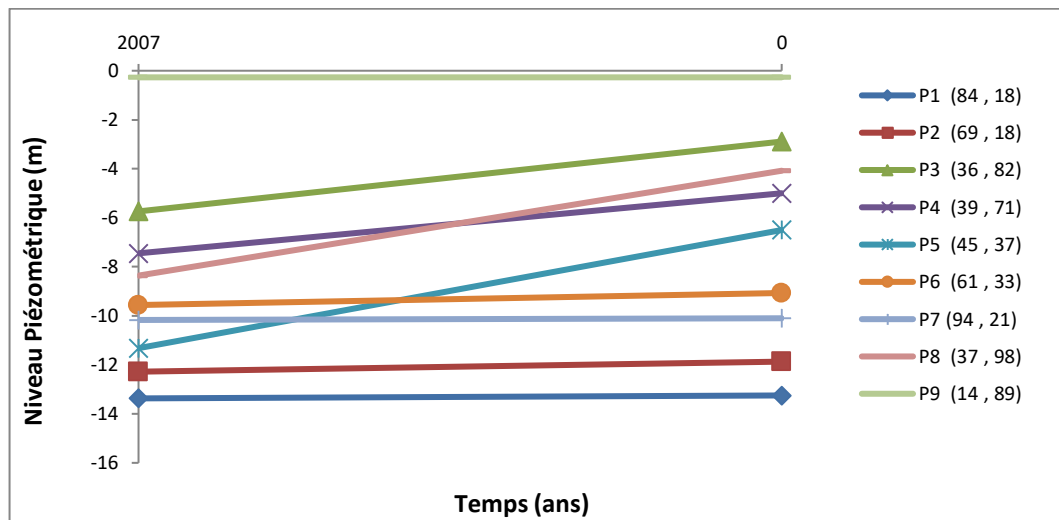


Figure IX.11 : Évolution de la Piézométrie en fonction du temps pour le régime transitoire (2007-2018)

IIV.4.3.3 Premier scénario

Pour cette étape nous avons gardé les mêmes conditions limites pour les trente (30) ans de simulation. Le débit de $346\,608.4\text{ m}^3/\text{j}$ (de l'année 2018) a été pris comme débit constant pour toute la période.

La piézométrie sur la carte de simulation du premier scénario montre la même allure que ces précédentes. Néanmoins, une baisse du niveau est bien palpable (Figure IX.12)

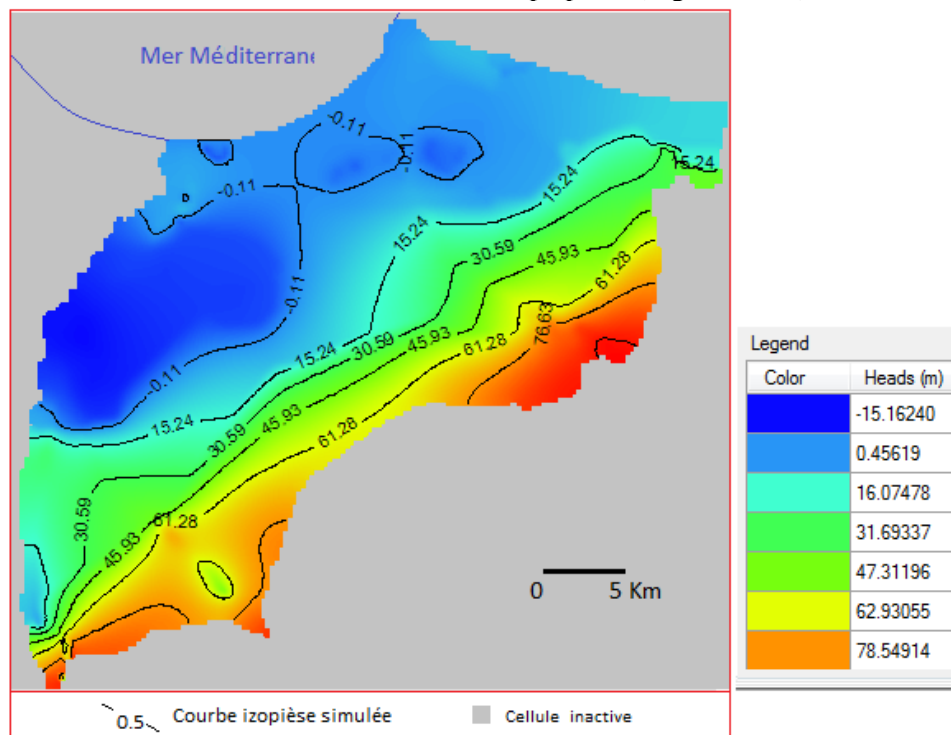


Figure IX.12 : Carte piézométrique de la nappe de la Mitidja résultant du premier scénario

Ce scénario n'a pas eu beaucoup d'effet négatif sur le bilan hydrique de la nappe sur trente ans (Figure IX.13). Le bilan total entre entrée et sortie est en équilibre. Il est à signaler par ailleurs que le phénomène d'intrusion est moins accentué que la simulation de la période de référence (2018). Les pertes vers la mer sont de 32956 m³/j.

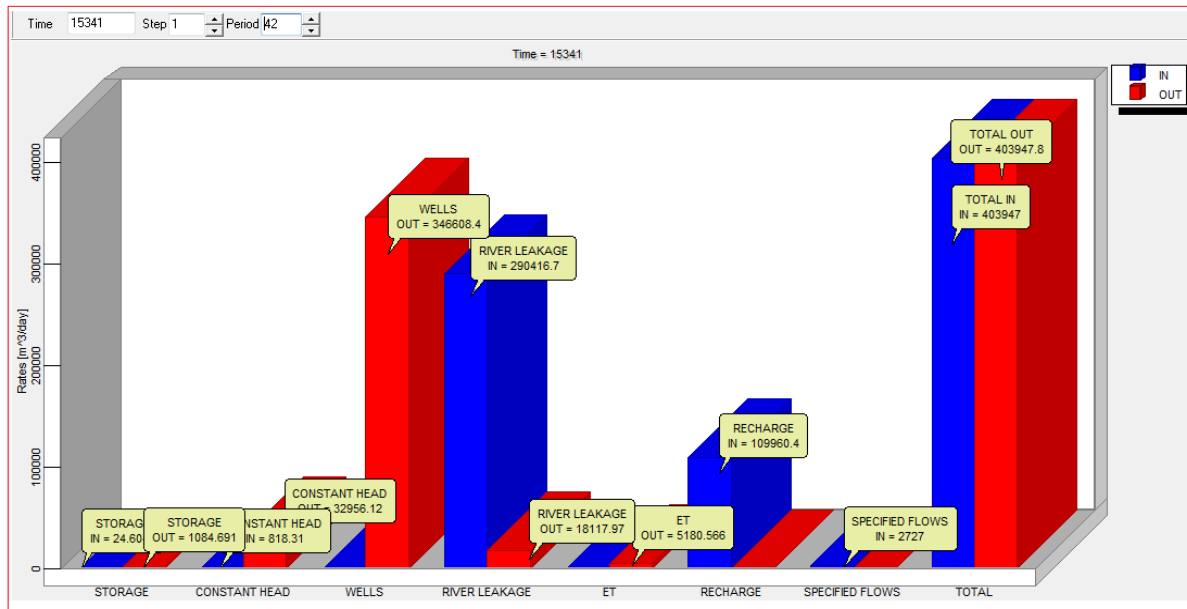


Figure IX.13 : Bilan hydrique (m³/j) de la nappe de la Mitidja résultant du premier scénario. Sur la base des valeurs piézométriques prélevées à partir des points d'observation, nous avons pu constituer le graphe ci-dessous (Figure IX.14). Nous pouvons remarquer une stabilité plus ou moins net des valeurs de la piézométrie calculées à partir d'un pas de temps de 10 ans. En revanche, le point (P9) situé en aval de Oued Hamiz présente une hausse d'un demi-mètre (0.5 m) entre l'année de référence et la première période (première 10 années), pour ce stabilisé sur le reste de la période avec une valeur de 0.87 m (annexe II, Tableau. II.1). La valeur minimale est enregistrée pour le point P1 situé dans la zone de pompage de Beraki (-13.74 m).

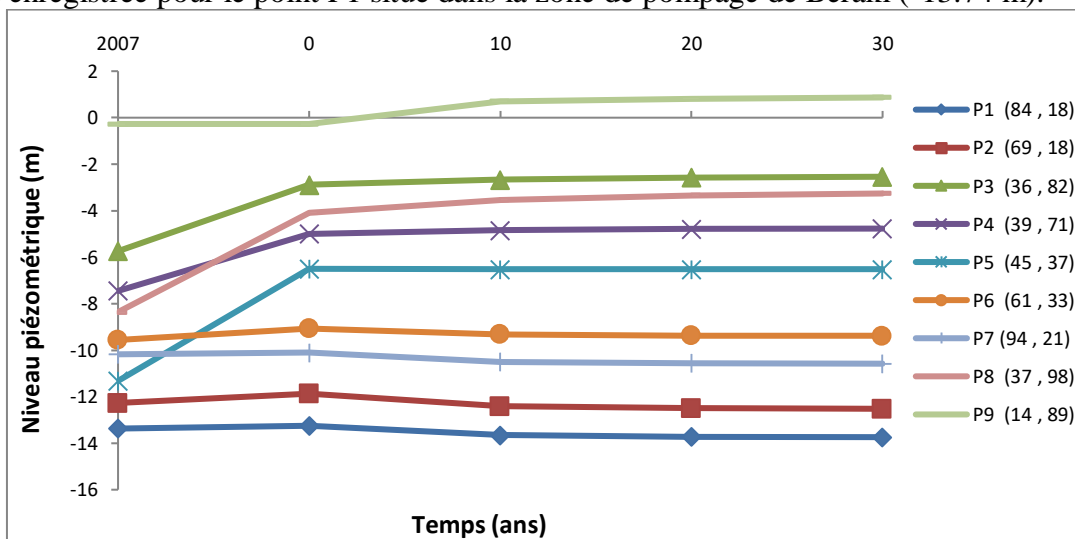


Figure IX.14 : Piézométrie en fonction du temps dans le cas du premier scénario

IV.4.3.4 Deuxième scénario

Les prélèvements des différents champs de captages ont été modifiés suite à une éventuelle augmentation de la population. Nous avons donc haussé les débits d'exploitation de +20% en

vu d'une demande croissante sur les ressources en eau. Dans ce cas, le débit de prélèvement est passé de 346 608.43 m³/j à 388 092.43 m³/j et qui sont repartis sur les forages destinés à l'AEP, l'industrie et au renforcement du système d'irrigation.

La carte piézométrique du deuxième scénario (Figure IX.15) montre un rabattement assez marqué des courbes piézométriques, sur une période de 30 ans, par rapport à la piézométrie de référence (2018).

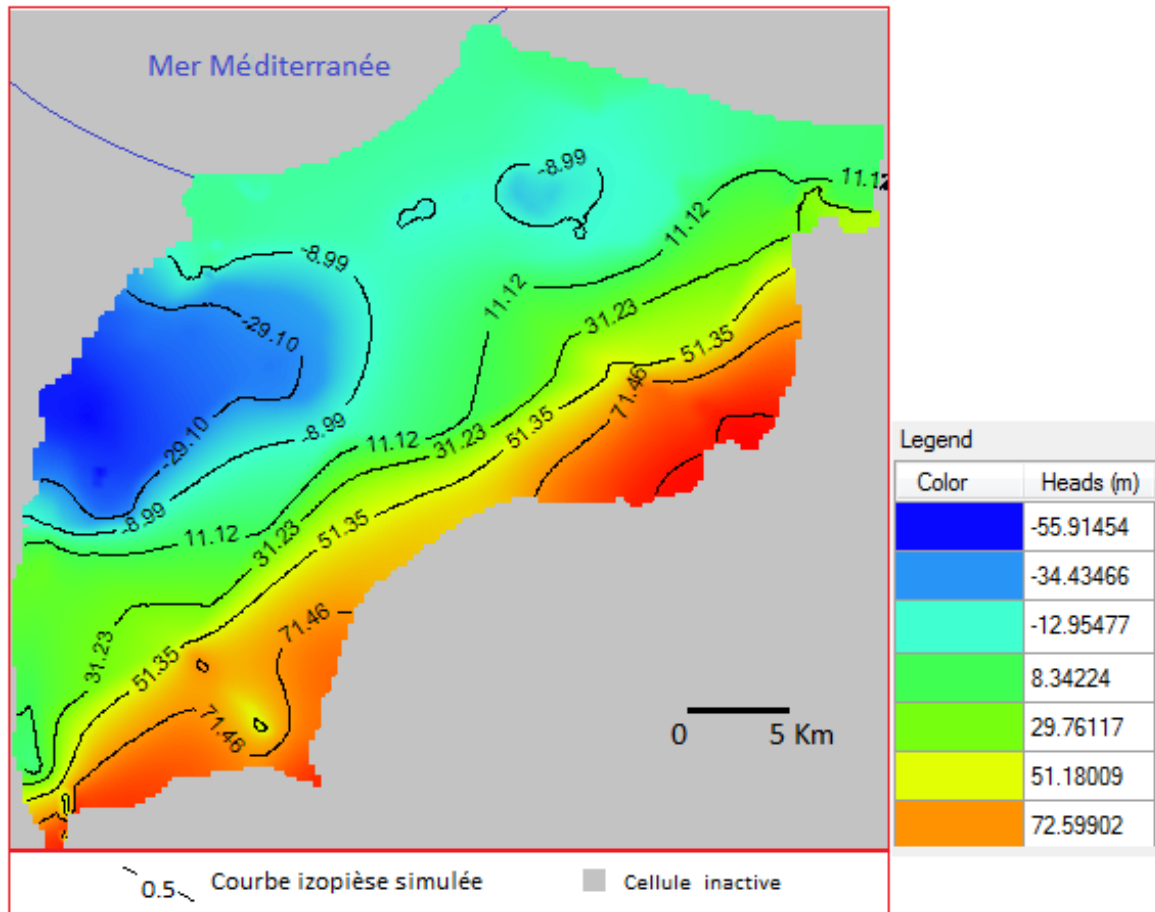


Figure IX.15 : Carte piézométrique résultant du deuxième scénario

Le bilan de la nappe établi (Figure IX.16 (a)) n'est pas déficitaire mais enregistre un débit d'intrusion marine très élevé (2 4381.41 m³/j). le stockage intervient aussi avec un débit élevé (5 847.38 m³/j).

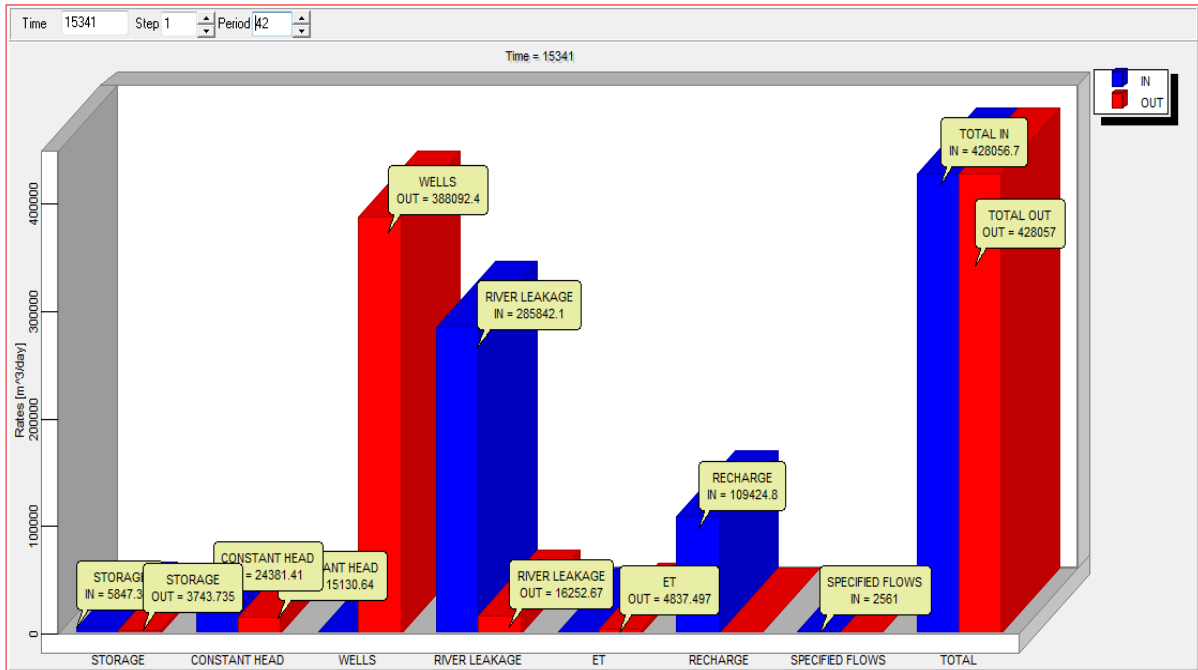


Figure IX.16 (a) : Bilan des nappes dans le cas du deuxième scénario

Suite aux variations hydrostatiques dans les points d'observations de la région d'étude (Figure IX.16 (b)). On observe que la valeur minimale du rabattement est enregistrée dans le point d'eau P1 (-46.76 m), dans la zone du champ captant de Beraki, alors que la valeur la moins touchée par le rabattement est enregistrée pour le point d'eau P3 (- 9.02 m), dans la zone de Hamiz. Ce rabattement est expliqué par la surexploitation qui provoque l'avancement de l'eau de mer.

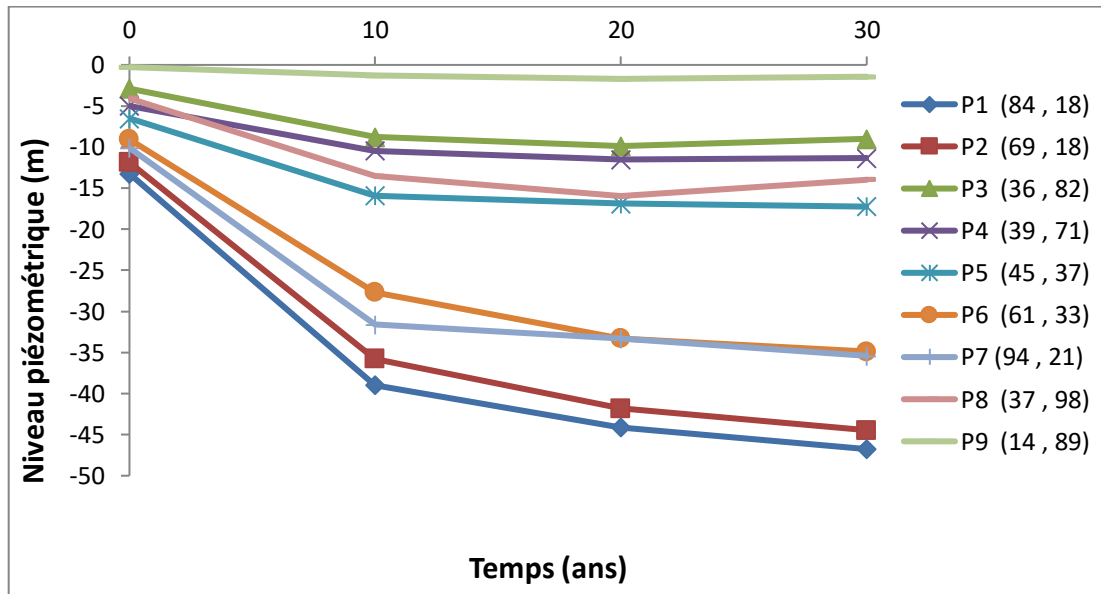


Figure IX.16 (b) : Piézométrie en fonction du temps dans le cas du deuxième scénario

II.4.3.5 Troisième scénario

Le scénario proposé dans cette étape est l'installation d'une sécheresse climatique provoquant une réduction de -20 % de taux de la recharge (passant de 109 960.4 m³/j à 82 424.18 m³/j) et un débit de prélèvement similaire à l'année de référence (346 608.4 m³/j). Pour ce cas de simulation, le niveau piézométrique enregistre une chute assez importante comparée à la piézométrie des précédents scénarios élaborés (Figure IX.17).

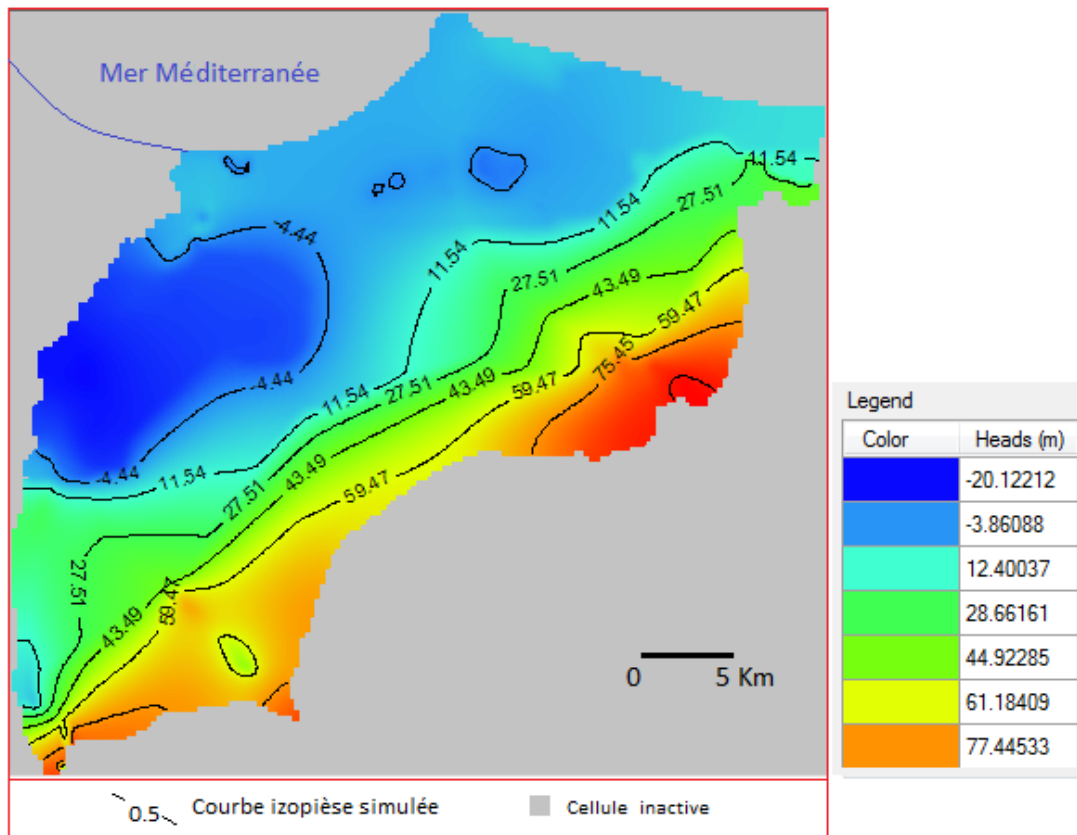


Figure IX.17 : Carte piézométrique de la nappe de la Mitidja résultant du troisième scénario

Les totaux calculés du bilan de la nappe (Figure IX.18) est donc en équilibre (entrées = sorties $\mp \Delta$ réserve). La petite variation est due principalement au cumule des erreurs faites à partir d'erreur liée aux conditions aux limites et où le pourcentage d'incohérence est nul (annexe II, Tableau II.2).

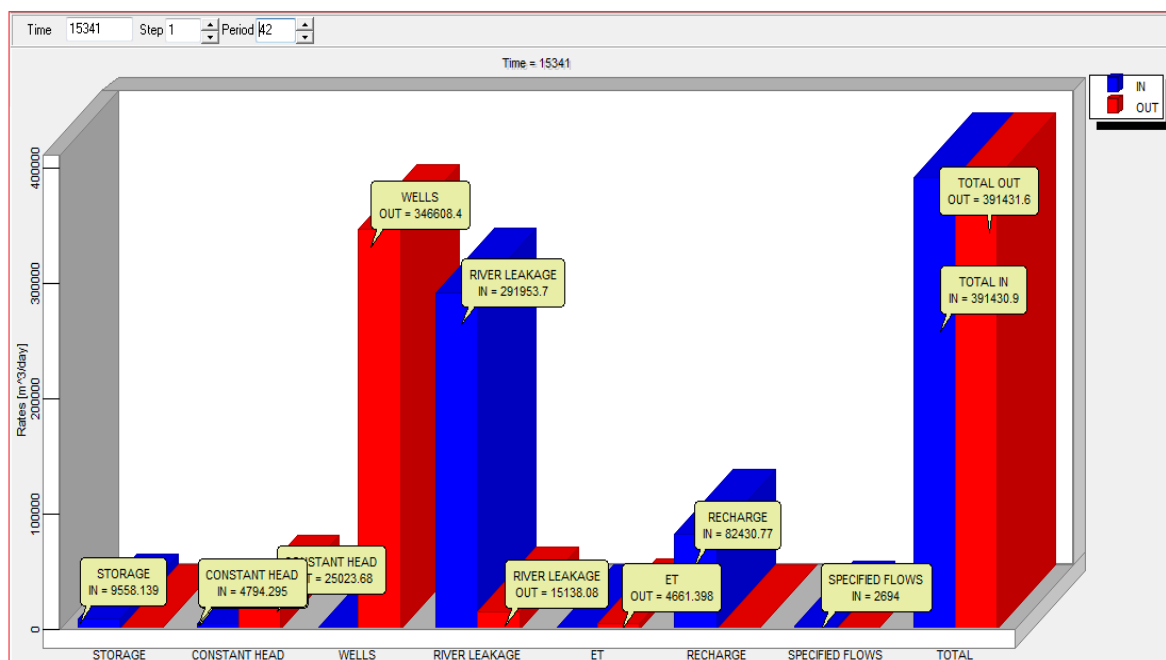


Figure IX.18 : Bilan hydrique (m³/j) de la nappe de la Mitidja résultant du troisième scénario

L'évolution piézométrique durant trente années (Figure IX.19) montre un rabattement de plus de 5 m pour les points d'observation (P 01, P 02 et P 07) de la zone aval de l'oued El Harrach (l'Ouest de la zone d'étude). La zone centrale de la Mitidja (P 03, P 04, P 05 et P 08) le rabattement enregistré est au moyenne de 1 m. le point P 09 situé près de la bais (en aval de Ouesd Hamiz) présente une recharge d'environ 0.5 m. Cet état dans la partie nord du secteur d'étude provoque un avancement rapide du biseau salé et accentue le degré de salinisation.

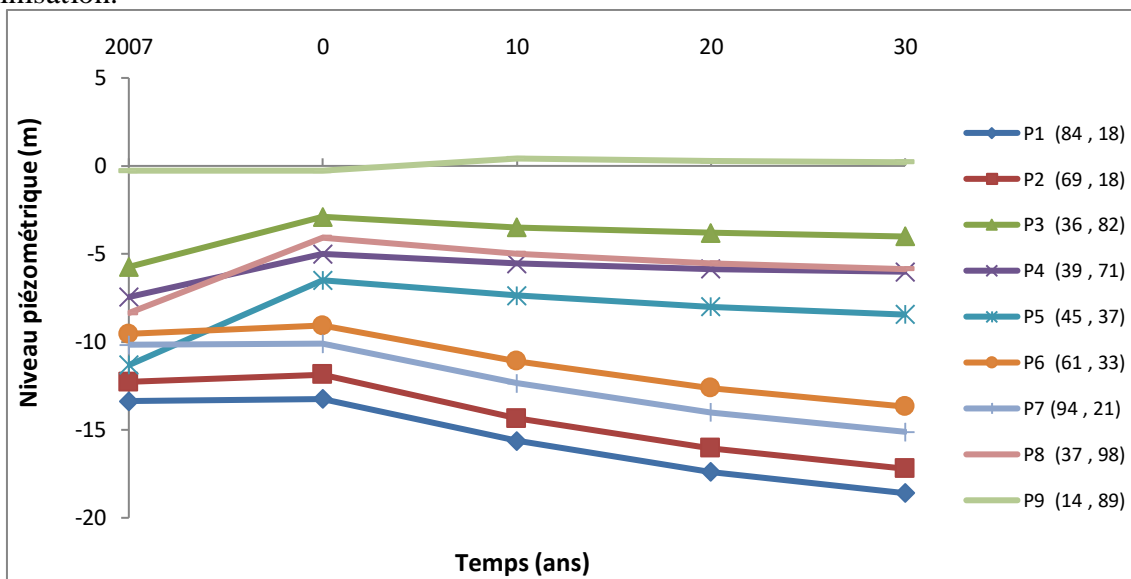


Figure IX.19 : Piézométrie en fonction du temps dans le cas du troisième scénario

IX.4.3.6 Quatrième scénario

Pour ce scénario, on garde la même proposition du scénario précédent concernant le changement climatique, où la région est soumise à une sécheresse et donc une réduction de la précipitation de -20% . On ajoute à cela une augmentation dans l'exploitation de la nappe de 20% , passant ainsi de $346\,608.44\text{ m}^3/\text{j}$ à $415\,930.15\text{ m}^3/\text{j}$, du fait de la demande croissante sur les ressources en eau pour l'Alimentation en eau potables de la ville d'Alger, ainsi que le renforcement du système d'irrigation et de l'industrie.

La carte piézométrique obtenue à partir de ce scénario (Figure IX.20) montre une chute très importante des courbes piézométriques, sur une période de 30 ans, par rapport à la piézométrie de référence (2018). La sécheresse combinée à l'augmentation de la demande ont fait apparaître le risque de manque d'eau et même de l'assèchement de la zone Ouest si ce scénario est appliqué plus de 30 ans.

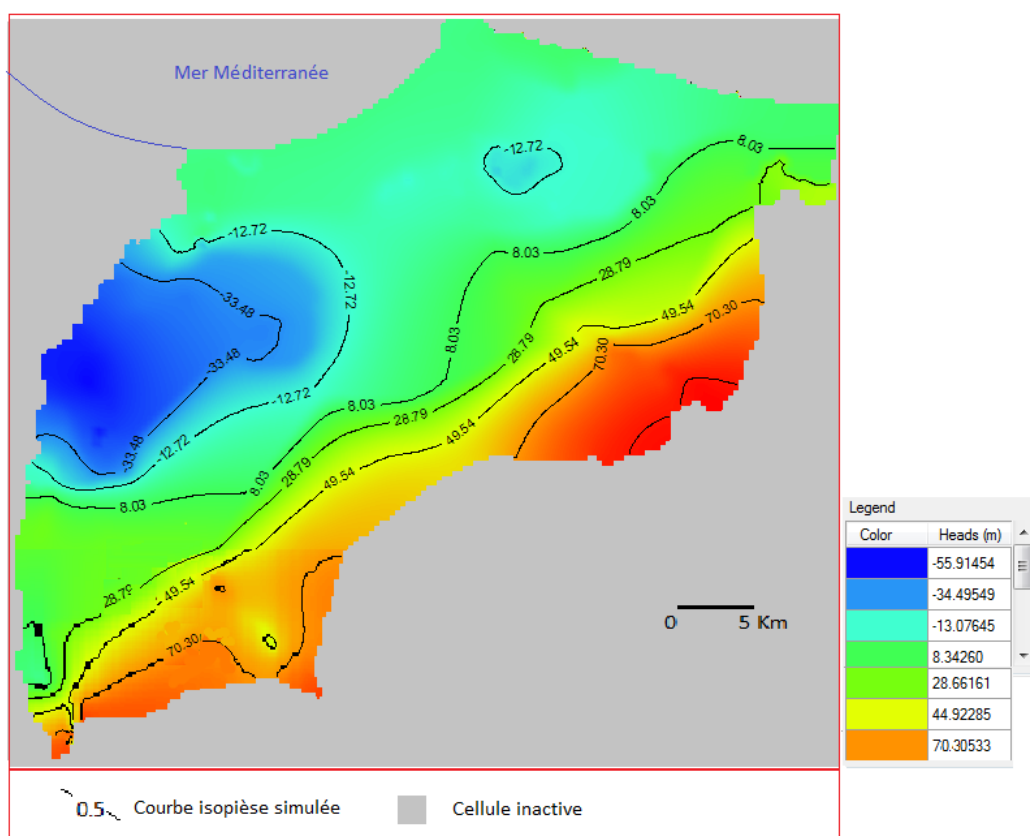


Figure IX.20 : Carte piézométrique de la nappe de la Mitidja résultant du quatrième scénario

Le bilan des nappes établi dans le cas du quatrième scénario montre une intrusion marine très importante de l'ordre de $28\,722.3\text{ m}^3/\text{j}$ pour pouvoir arriver à l'équilibre (Figure IX.21).

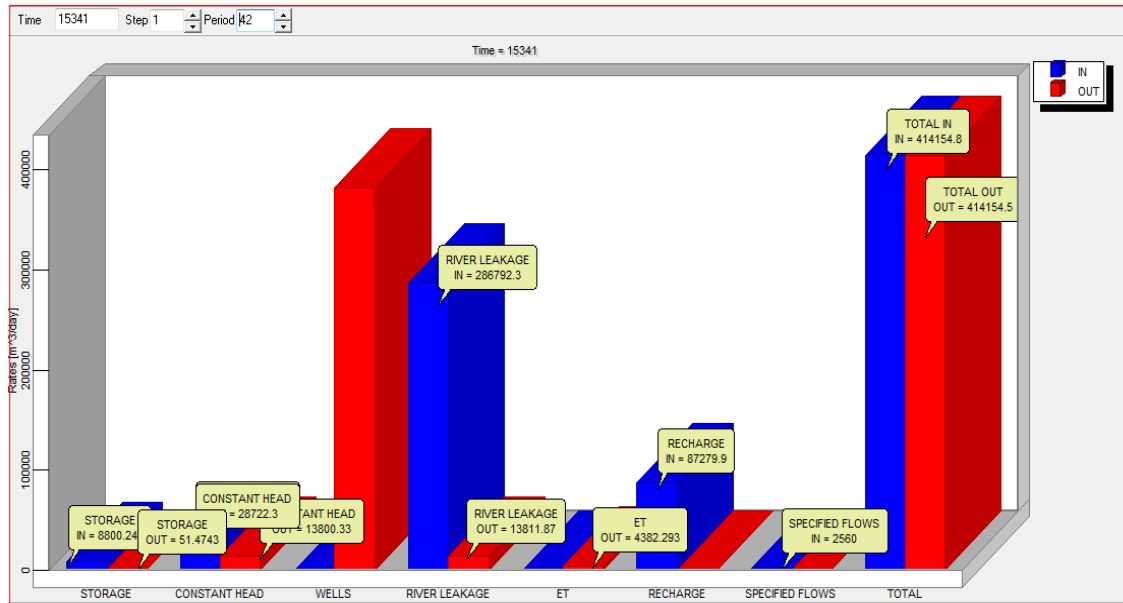


Figure IX.21 : Bilan hydrique (m³/j) de la nappe de la Mitidja résultant du quatrième scénario

La figure (Figure IX.22) montre une baisse très importante des profondeurs hydrostatiques au niveau de tous les points d'observation. Ainsi, une importante dépression de nappe, allant de 7,39 m à 36,03 m en 30 ans, selon la zone de captage. Une telle dépression entraîne une pollution de la nappe par l'accélération de l'intrusion marine au nord, cela est justifié par le signe "-" des relevés piézométriques dans les points d'observation des zones : nord-ouest et centrale-nord. Le point P 09 présente un rabattement de 1.72 m cela est dû à sa proximité de la mer et à sa situation en aval de oued Hamiz.

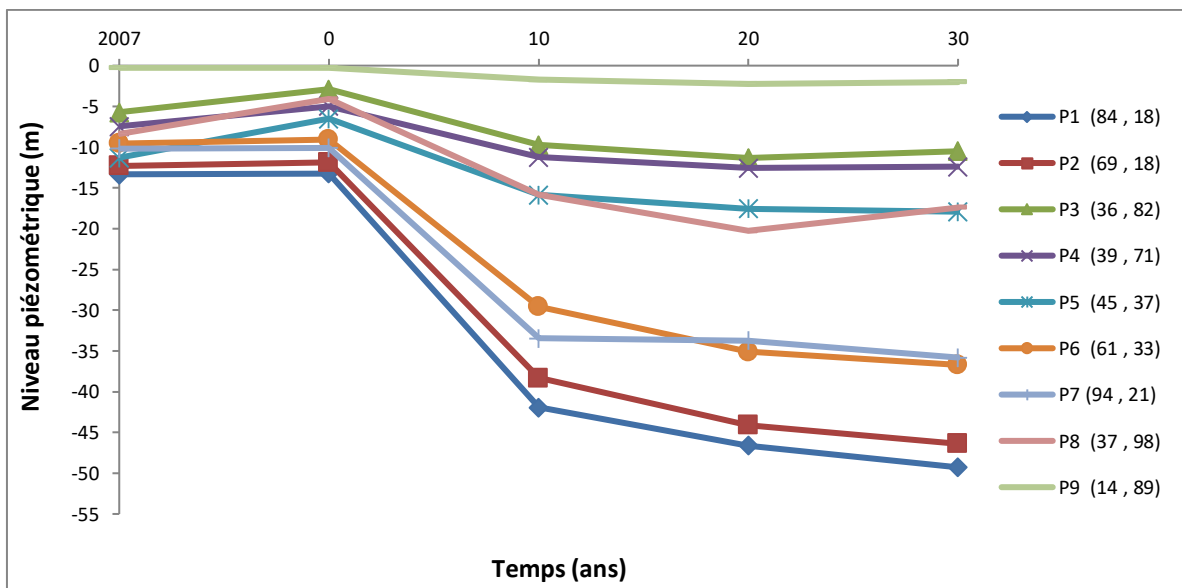


Figure IX.22 : Piézométrie en fonction du temps dans le cas du quatrième scénario

Il apparaît clairement que ce scénario est défavorable quantitativement et qualitativement la gestion de la nappe ce qui nous a amené à proposer la variante des scénarios 5 et 6.

IX.4.3.7 Cinquième scénario

Dans cette variante, nous avons supposé que le pompage est appelé à augmenter de 20% du fait que la population augmentera sur ces 30 ans ($415\,930.15\text{ m}^3/\text{j}$) et une précipitation similaire à celle de l'année de référence (2018). Ajouter cela un renforcement de la recharge par des recharges artificielles à travers les bassins d'infiltration de la zone de Tabainet (Oued El Harrach) avec un débit de $2\,840\text{ m}^3/\text{j}$ et en relance la simulation sur une période de 30 années.

Sur la carte piézométrique (Figure IX.23) et malgré un niveau piézométrique toujours inférieur au niveau de la mer (valeurs négatives), on constate que la conséquence de la recharge est immédiate. Le niveau piézométrique remonte sur toute la zone de la plaine, surtout la partie nord.

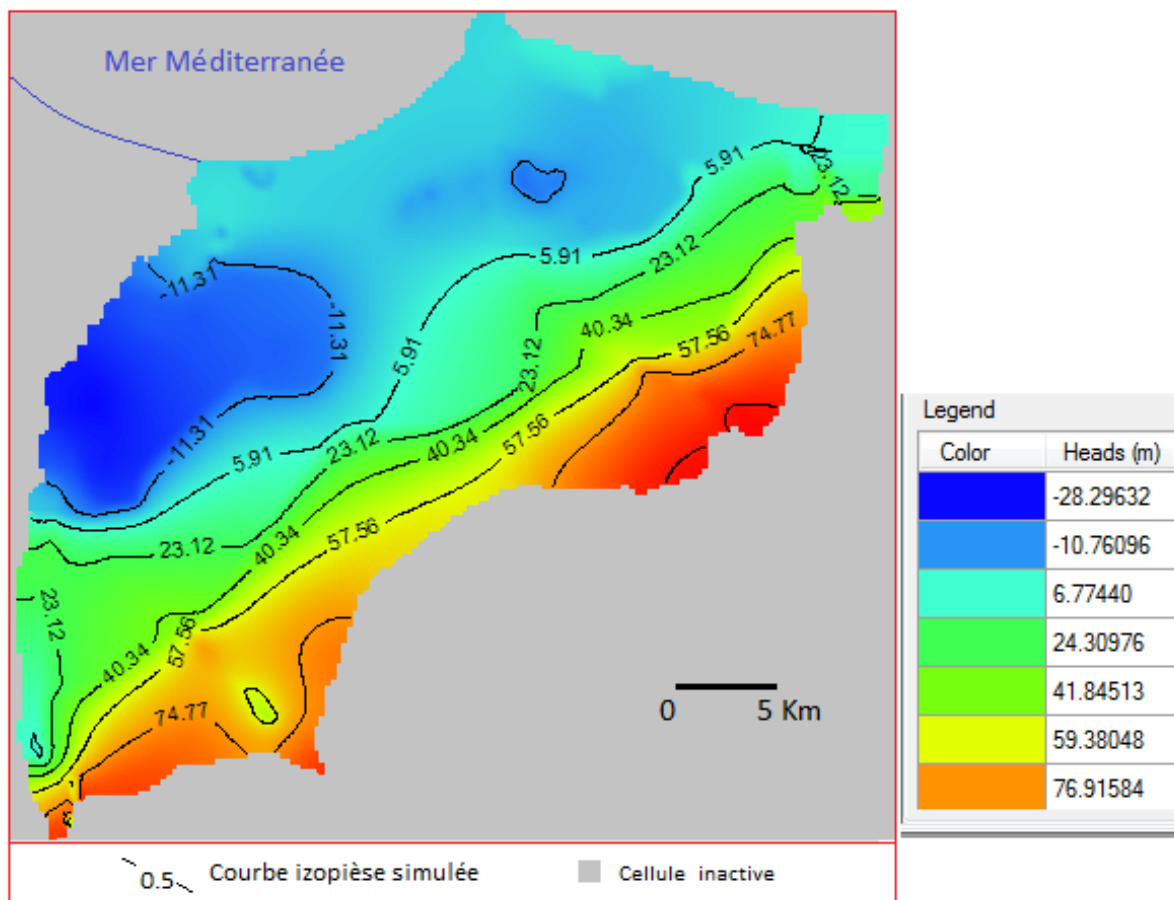


Figure IX.23 : Carte piézométrique de la nappe résultant du cinquième scénario

Pour ce cinquième scénario, sur 30 ans d'exploitation, le débit total sollicité par la nappe est le plus élevé parmi tous les autres débits des autres scénarios, cela veut dire qu'il n'y avait pas de restriction ou de décrochage des forages (Figure IX.24).

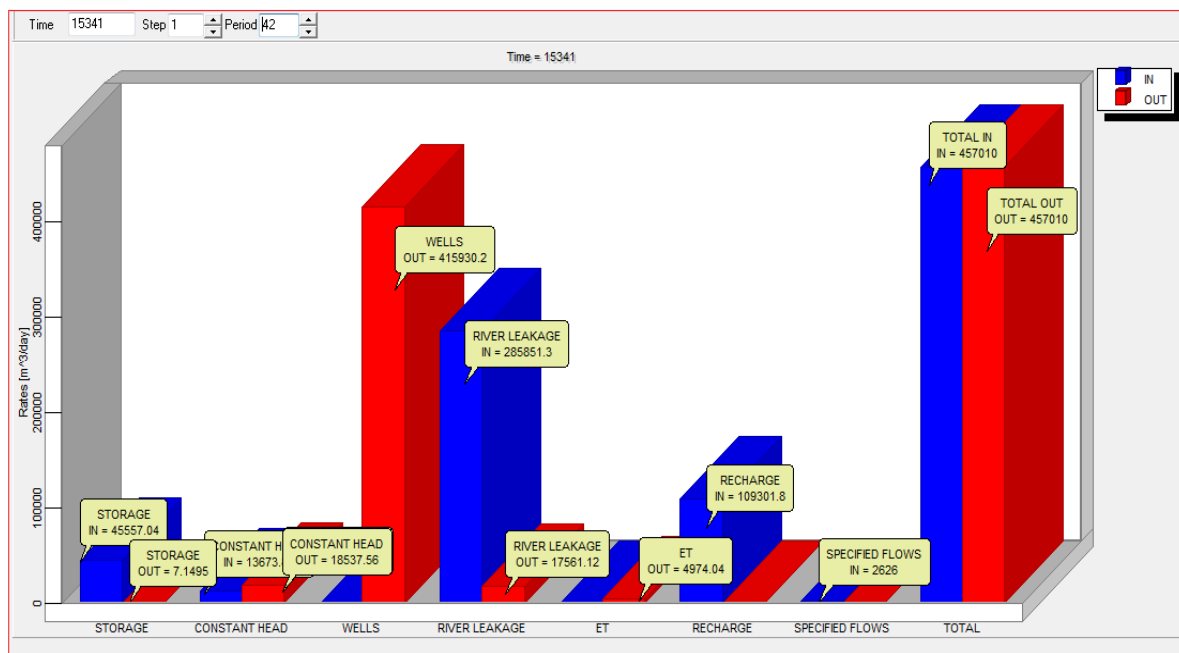


Figure IX.24 : Bilan des nappes dans le cas du cinquième scénario

L'évolution piézométrique (Figure IX.25) (annexe II (Tableau II.4)) durant la période simulée (30 ans) montre un relèvement (amélioration) dans tous les points d'observation. Un accroissement qui varie entre 4.42 m et 12,78 m. La valeur la plus basse est enregistrée pour le point d'eau P 01 au centre du champ de captage de Beraki (Ouest du secteur d'étude), alors que la valeur la plus élevée est enregistrée pour le point d'eau P 04 dans la zone de Dar El Beida. Pour le point P 09, nous avons enregistré une baisse de 0.8 m.

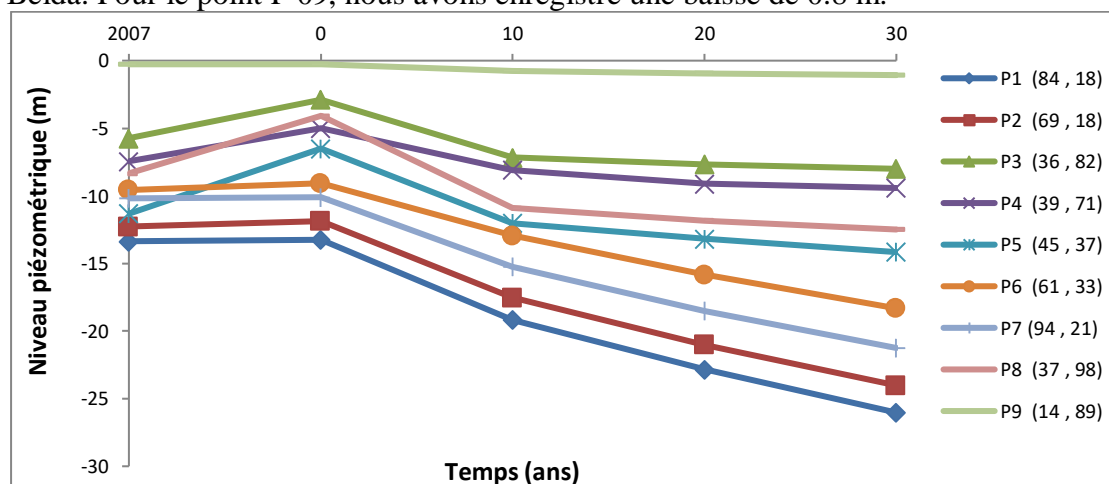


Figure IX.25 : Piézométrie en fonction du temps dans le cas du cinquième scénario

IX.4.3.8 Sixième scénario

Le sixième scénario est similaire au cinquième avec un augmenté le débit d'exploitation de la nappe à $415\,930,15\text{ m}^3/\text{j}$, une recharge artificielle à travers les bassins d'infiltration de la zone de Tabainet (Oued El Harrach) de $2\,840\text{ m}^3/\text{j}$ et avec l'hypothèse d'une installation d'une sécheresse pendant 30 ans et donc une chute de précipitation de 20 %.

Une installation d'une sécheresse, malgré la recharge artificielle, fait rabattre la nappe à des profondeurs importantes. La carte piézométrique à l'échéance 2048 (Figure IX.26) montre une ressemblance assez nette avec le cinquième scénario. Une recharge de $1\,036\,800\text{ m}^3/\text{an}$ n'améliore pas vraiment le niveau piézométrique quand on a une installation d'une sécheresse de longue période.

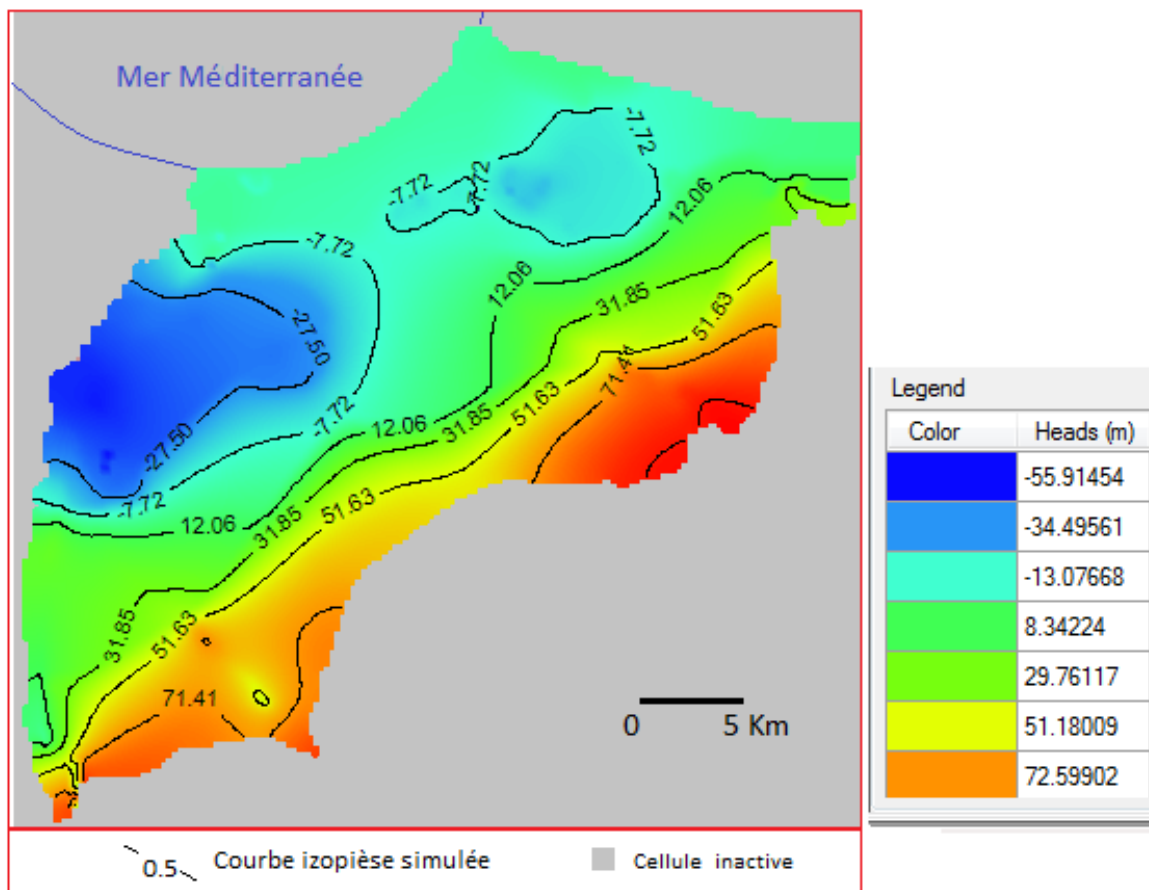


Figure IX.26 : Carte piézométrique résultant du sixième scénario

Ce scénario montre une intrusion marine importante malgré l'incorporation d'une recharge artificielle ($27404.58\text{ m}^3/\text{j}$) (Figure IX.27), et une perte conséquente à travers la mer ($14369.73\text{ m}^3/\text{j}$)

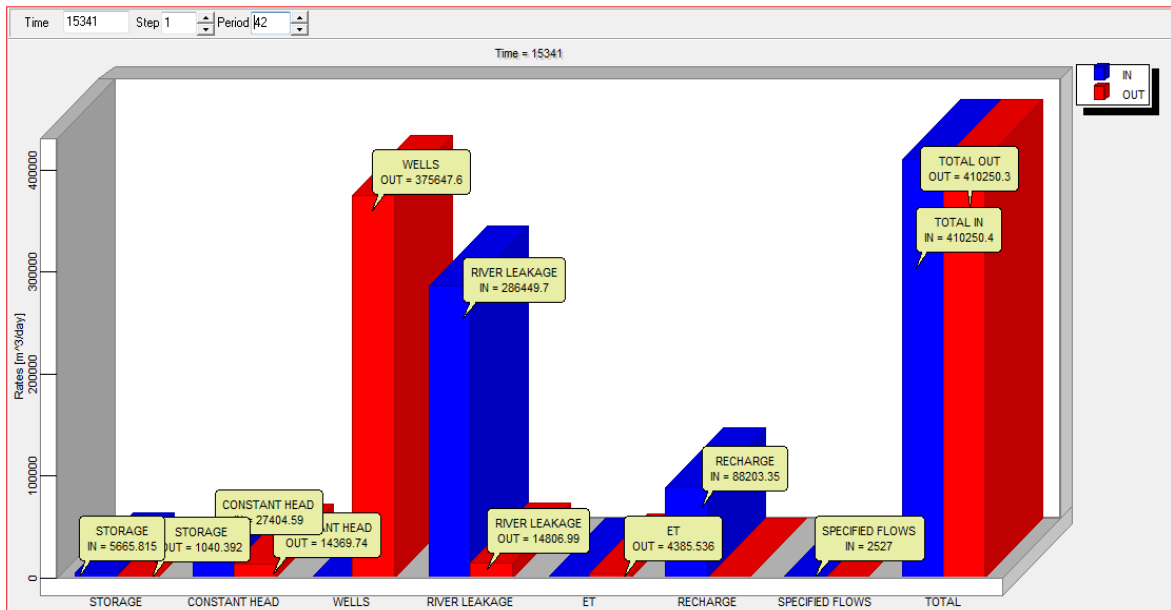


Figure IX.27 : Bilan des nappes dans le cas du sixième scénario

Les valeurs piézométriques Figure IX.28) et en annexe II (Tableau II.5)), enregistre une chute piézométrique entre 7,15 et 27,05 m par rapport à l'année de référence 2018. La chute la plus élevée est enregistrée dans le point d'eau P 04 dans la zone de captage de Beraki, tandis que la valeur la plus petite est enregistrée dans le point d'eau P 02 dans de la zone de Dar El Beida. Pendant les premières 10 années, la chute était plus importante qu'en fin de toute la période. Puis nous remarquons une élévation des courbes piézométriques de 1.69 m à 2.92 m en fin de scénario. Cela peut être expliqué par la réaction tardive de la nappe à la recharge artificielle.

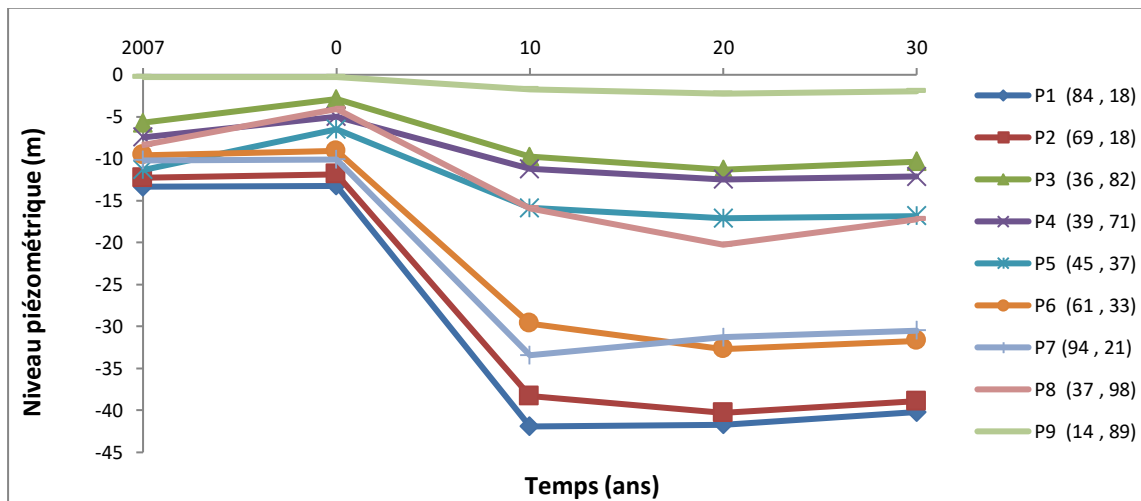


Figure IX.28 : Piézométrie en fonction du temps dans le cas du sixième scénario

Selon le tableau ci-dessous (Tableau IX.4) la comparaison de quelques paramètres par rapport aux différents scénarios nous remarquerons :

a) *Constant head* :

L'intrusion marine pour l'année 2007, où le modèle a été conduit en régime permanent, est

obtenue à partir du déficit cumulé des prélèvements précédents (5985.13 m³/j). L'année 2018 le confirme dû fait que ces prélèvements, sur les champs captant de Hamiz et Beraki, ont été diminués au maximum, voir arrêter, entre le 31 Octobre et le 1 Mai entre la période 2007 et 2015 en vue du transfert de l'eau du barrage de Taksep vers Alger (SOGREAH, 2007).

Le premier scénario a enregistré l'intrusion marine la plus faible. Une stabilité dans le rythme les prélèvements, après une période de d'arrêt des champs de captages à plus grand nombre de forages, a enregistré le plus petit débit d'infiltration d'eau saline.

Nous remarquons aussi qu'à chaque fois que les prélèvements augmentent de 20% (les scénarios 02, 04 et 06) l'intrusion marine enregistrée est la plus élevée. De même, la recharge apportée au scénario 05 aide à enregistrer une intrusion marine plus faible comparé au scénario 02.

La constant head est un débit que la nappe sollicite pour équilibré son bilan, donc nous pouvant le considéré comme le déficit enregistrer par la nappe au cours des échanges entrés-sorties.

Tableau IX.4 : Comparaison entre paramètres du bilan des différents scénarios en (m³/j)

	2007	2018	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4	Scénario 5	Scénario 6
Constant head	5985.13	1236.48	818.3	24381.4	4794.3	28722.3	13673.8	27404.5
Storage in	0	1836.67	34.6	5847.3	9558.1	8800.2	45557	5665.8
Storage out	0	4944.9	1084.7	3743.7	0	51.5	7.15	1040.4
Storage (in-out)	0	-3108.23	-1050.1	2103.6	9558.1	8748.7	45549.85	4625.4
Erreur Total (in-out)	-0.031	-0.65	-0.81	-0.31	-0.68	0.25	-0.03	0.15

Le stockage est un facteur important dans les bilans des différents débits. Selon Anderson *et al* (2015) "le rejet d'eau du stockage est compté comme un flux entrant et l'absorption est compté comme un débit sortant". Cette définition permet d'expliquer les valeurs importantes enregistrées pour chaque scénario modélisé, ce qui signifie qu'il y a un retrait net d'eau du stockage (c.-à-d. que l'eau quitte le stockage et entre dans le system). Inversement à cela, la nappe stocke peu ou pas d'eau lorsque les besoin sont élevés, que ce soit une chute de précipitation et/ou une augmentation de prélèvement.

La différence entre le stockage entrant et sortant montre clairement que la l'aquifère a stocké plus qu'il en a libéré seulement pour la période du régime transitoire 2007-2018 et celle du premier scénario.

IX.5 Conclusion

L'étude hydrodynamique de notre système aquifère à travers la modélisation nous a permit de comprendre son fonctionnement. L'analyse quantitative de l'écoulement des eaux souterraines est primordiale au problème des prélèvements de plus en plus grands. La pérennité d'une source aquifère est liée au choix de la gestion de cette ressource.

Dans le système aquifère de la plaine côtière de la Mitidja, les problèmes de gestion sont belle est bien présents. L'année de la simulation en régime permanent par l'utilisation du *code Modflow*, pour l'année de référence 2007, présente déjà un problème d'intrusion marine dû principalement à la surexploitation.

Notre objectif était d'avoir une idée plus ou moins précise sur les différents facteurs et paramètres entrant dans l'élaboration d'un modèle d'écoulement des eaux souterraines de notre aquifère, et de minimiser le maximum possible les erreurs.

La simulation sous les conditions d'exploitations (actuelles ou futures), en régime transitoire, par la proposition de six scénarios, sur une période de 30 années, a conclu :

➤ Pour les scénarios où nous avons un jumelage de sécheresse et une augmentation de prélèvement :

- une baisse du niveau piézométrique qui est liée essentiellement à une surexploitation de la nappe surtout dans la zone de captage de Beraki.
- une situation critique au nord de la plaine se traduisant par l'invasion marine
- Un risque important d'assèchement de la nappe.

➤ Pour les 5^{ème} et 6^{ème} scénarios :

Nous avons montré la nécessité d'une recharge de la nappe pour accroître les volumes d'eau emmagasinés. Cette opération, et par le choix d'un débit de recharge proposé par l'ANRH en 2005, n'a pas abouti aux résultats souhaités dû fait du faible débit. Nous proposons un débit plus élevé et sur deux zones de recharges pour une étude de modélisation ultérieure.

**Modélisation mathématique de la nappes côtière
de la Mitidja Est sous ModFlow**

Mise en évidence du stade de l'intrusion marine

Chapitre 10 : Modélisation mathématique de la nappe côtière de la Mitidja Est sous ModFlow

Mise en évidence du stade de l'intrusion marine

X. Introduction

Dans ce chapitre, et sur la base du travail déjà fait dans le chapitre précédent, nous essayerons de faire une modélisation mathématique afin de comprendre le processus de l'intrusion marine. Ce phénomène qui touche pratiquement toutes les nappes côtières suite à l'exploitation excessive de la ressource, provoque la salinisation de forages les plus proches de la mer en les rendant inutilisables. Subvenir aux besoins d'une population de plus en plus dense, à l'irrigation d'une agriculture intensive et de nouvelles zones industrielles demande plus d'extraction d'eau souterraine qui dépasse le taux de recharge. De ce fait, l'extraction empêche l'écoulement de l'eau douce vers la mer ce qui crée un vide local dans l'aquifère. Ainsi donc, l'eau de mer migre vers la nappe pour combler ce vide, accentue la salinisation de l'eau de la nappe et le phénomène d'intrusion à chaque pompage.

Afin de quantifier ce phénomène, nous avons utilisé le logiciel ModFlow qui résout l'équation de diffusivité par le modèle MT3DMS qui simule le transport hydrodispersif.

Le modèle MT3DMS ("Modular Three-Dimensional Multispecies Transport Model for Simulation of Advection, Dispersion and Chemical Reactions of Contamination in Groundwater System") présenté par Zheng and Wang (1999) permet de modéliser le transport d'espèces dissoutes à partir des modèles de flux ModFlow (Guillaumot (2018)) (Zheng et Wang (1999)).

Le transport d'un soluté en milieu poreux et caractérisé par sa concentration (ML^{-3}) dans le temps, sans prise en compte des réactions chimiques, est régi par l'équation :

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \underbrace{[(D_e/R)](\delta^2 c / \delta x^2)}_{\text{Dispersion}} - \underbrace{[(v/R) \cdot (\delta c / \delta x)]}_{\text{Convection}} - \underbrace{[\lambda c]}_{\text{Dégradation}} \quad (X.1)$$

X.1 Composantes du modèle de salinité

La simulation du phénomène de l'intrusion marine des eaux salées dans l'aquifère côtier de la Mitidja superpose le calcul du modèle des écoulements hydrogéologique des eaux douces et le modèle de transport sans réaction chimique (advection, dispersion). Le paramètre calculé dans ce cas est la salinité de l'eau exprimée en concentration des chlorures (Cl^-). Ce dernier est considéré comme un contaminant conservatif, qui ne change ni avec des processus physiques, chimiques ou biologiques et qui se déplace suivant les lignes de courant d'eau.

Du fait que les différentes phases du travail ont déjà été réalisées, dans la première partie de la modélisation, l'application du phénomène du transport se fera graduellement pour les mêmes étapes.

- Étape 1 : calage de la salinité en régime permanent pour l'année 2007.

- Étape 2 : calcul de l'évolution de cette salinité en régime transitoire pour la période 2007-2018
- Étape 3 : simulation prévisionnelle de la salinité pour les scénarios déjà élaborés.

X.2 Condition aux limites

Du fait que toutes les conditions ont été déjà élaborées, nous n'aborderons que les parties liées aux phénomènes de transport.

Notre étude du phénomène de l'intrusion marine est basée sur celle déjà réalisée par l'ANRH. La détermination des paramètres de départ et les conditions aux limites est la suivante :

- La limite de potentiel imposé qui englobe toute les mailles bordant la mer, la concentration constante est de 35 g/l ;
- La concentration de Oued El Harrach et Oued Hamiz a été déterminée à partir des analyses chimiques effectués à leurs amont, où ils ont données des valeurs de 0.8 m/l et 0.6 m/g respectivement ;
- La recharge à partir des limites étanches du Sud et de l'Est n'apporte aucune concentration (concentration nulle) ;
- La recharge à partir des pluies n'apporte aucune concentration (concentration nulle) ;

Nous avons démarré avec une concentration initiale en sel de l'aquifère de 0.5 g/l. Selon Stuyfzand (1993) cité par Hachemi A. (2016) l'eau de la partie concernée est peu saline (Tableau X.1).

Tableau X.1 Classification des eaux selon Stuyfzand (1993) cité par Hachemi (2016)

Type d'eau souterraine	Concentration en chlorure (mg/l)
Très douce	0 – 5
Très douce – douce	5 – 30
Douce	30 – 150
Douce – peu saline	150-300
Peu saline	300 -1000
Peu saline – saline	1000- 10 000
Saline	10 000 – 20 000
Très saline ou saumâtre	≥ 20 000

X.3 Résultats de la simulation

Lors du calage du modèle en régime permanent, nous avons obtenu un écoulement souterrain avec des niveaux piézométriques calculés très proches de ceux mesurés sur l'ensemble de secteurs modélisé (chapitre précédent). A travers cette étape nous avons pu caler la salinité pour les périodes du régime transitoire 2018 (après 4380 jrs) et après chaque 10 ans de chaque scénario (80303, 11680 et 15330 jrs). Les points concernés par le phénomène d'intrusion marine sont les points P3, P4, P8 et P9 situés au centre de la zone, a proximité de la baie (annexe II (Figure II.2)).

En premier lieu, la simulation de la nappe côtière pour la période du régime transitoire (2018) n'a pas conduit à une légère hausse piézométrique que celle qui exister déjà pour l'année 2007

(Voir chapitre précédent). Nous remarquons une plage assez avancée du font salé et déjà installé depuis quelques années.

Les points d'eau P4 et P9 (zone de DEB et Bordj El Kifane respectivement) se situent à la limite maximale du font salé avec une valeur située entre 5 g/l et 13 g/l respectivement pour P4 et P9 considérés comme peu salin à salin (Figure X.1). Par contre les deux autres points P3 et P8 (zone de la rive droite et gauche de Hamiz) sont assez éloignés de cette avancée du biseau salin. De plus le phénomène de l'intrusion semble évoluer fortement selon un axe de direction Nord/Ouest – Sud/Est vers le champ captant de Hamiz.

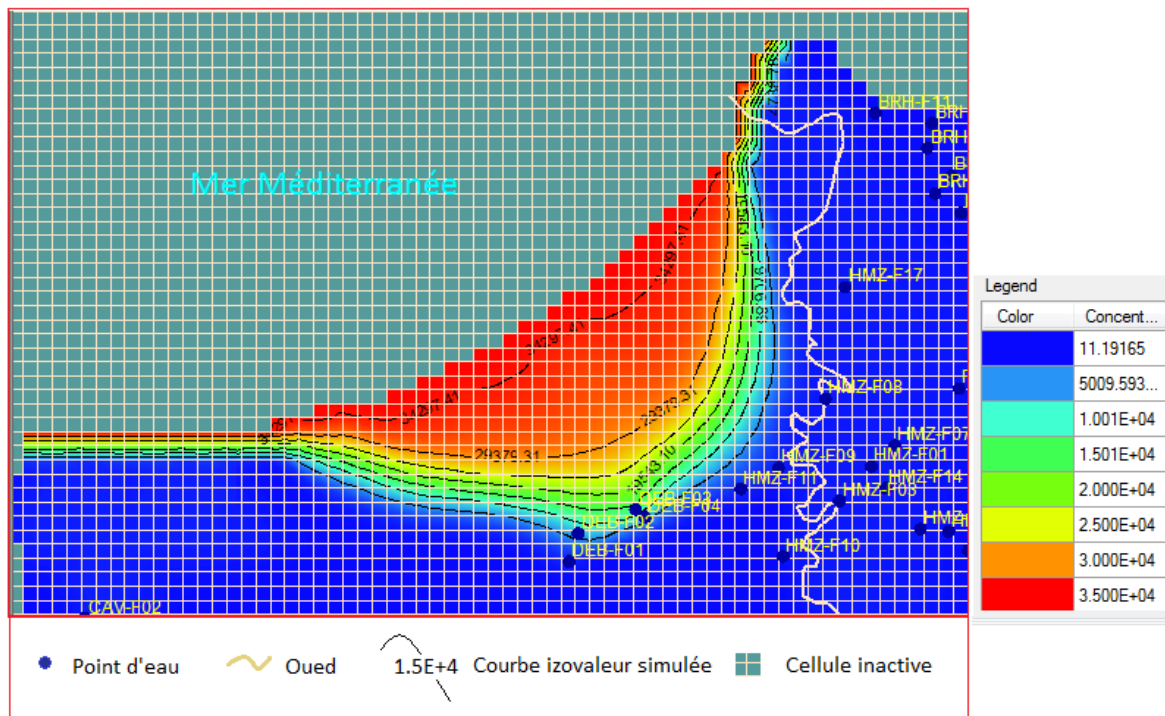


Figure X.1: Carte de simulation du font salé résultant de la simulation en régime transitoire (2018)

Le bilan issu de la modélisation en régime transitoire de l'année 2018 indique que les débits apportés par le phénomène de l'intrusion marine représentent 5.69 % du total des débits entrants vers la nappe (Tableau X.2) (annexe III Tableau III.1).

Tableau X.2 : Bilans des entrées et sortie par la limite de la baie d'Alger

Année	Débit entrant (m ³ /J)			Débit sortant (m ³ /J)		
	Constant head	Total	%	Constant head	Total	%
2018	24381.41	428056.65	5.69	15130.98	428056.65	3.53

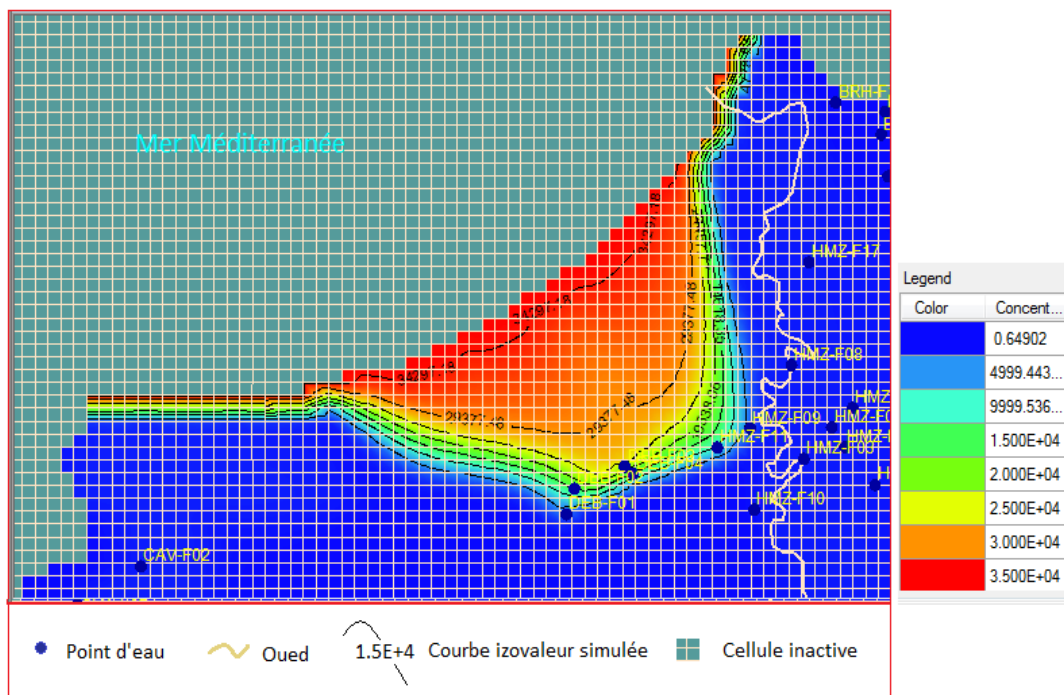
X.4 Premier scénario

Pour ce scénario où nous avons appliqué les mêmes conditions de l'année de référence 2018 pendant 30 ans ç.-à-d. recharge en précipitation constante et prélèvement constant.

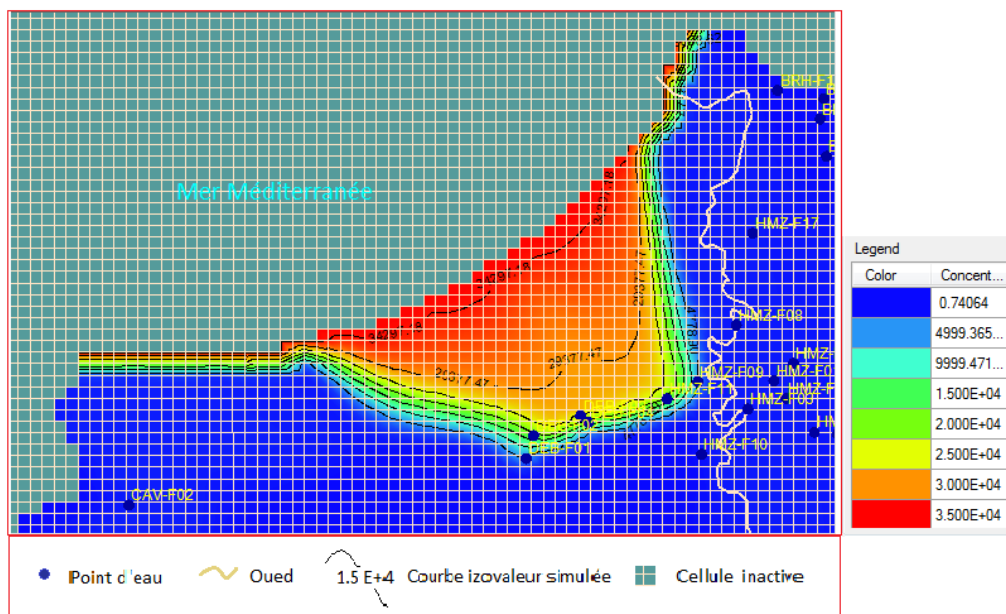
D'un point de vue piézométrique et malgré la faible évolution du niveau d'eau de la nappe

(hausse du niveau piézométrique) (voir chapitre précédant), l'observation du font salé indique une intrusion marine est plus intense que celle de l'année de référence (Figure X.2).

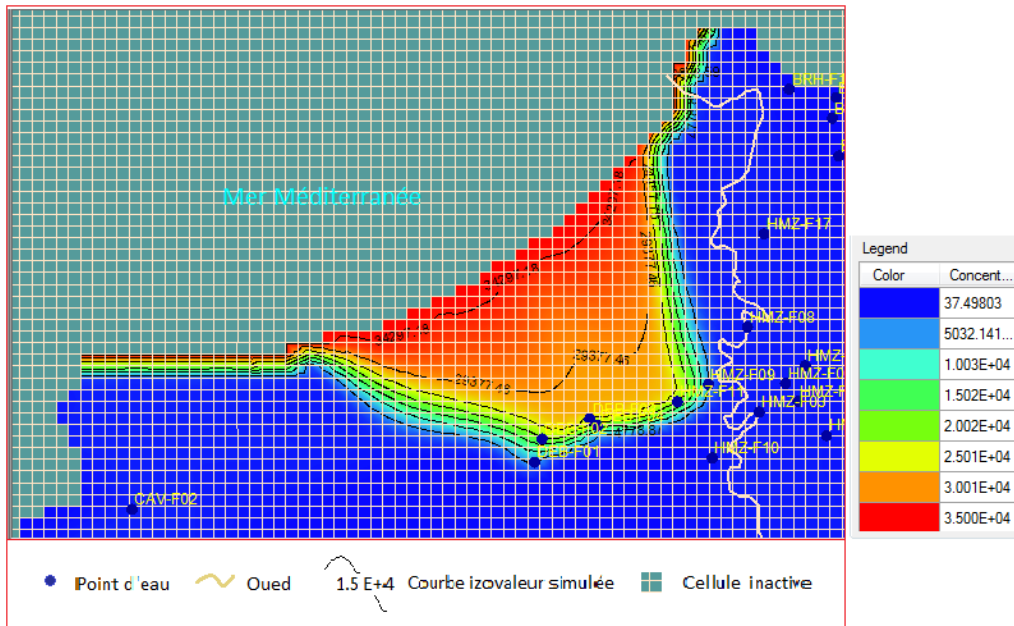
La limite maximale du font salé a non seulement dépassé les points P4 et P9, mais elle a aussi atteint le point d'eau P3 et les forages situés à l'Est du champ de captage de Hamiz. Nous remarquons aussi un élargissement de la base "Sud" de la plage du font salée. Cette situation nous a permis d'enregistrer des concentrations, en fin de simulation, plus élevées pour les points P4 et P9 avec des valeurs situées entre 15 g/l et 20 g/l respectivement pour P4 et P9 et considérés comme saline. Le point P3 enregistre une concentration qui est au alentour de 1.5 g/l. le point P8 est toujours assez éloignés de cette avancée du biseau salin (Figure X.2).



(a)



(b)



(c)

Figure X.2 : Carte de simulation du front salé résultant du premier scénario : (a) 2028, (b) 2038 et (c) 2048.

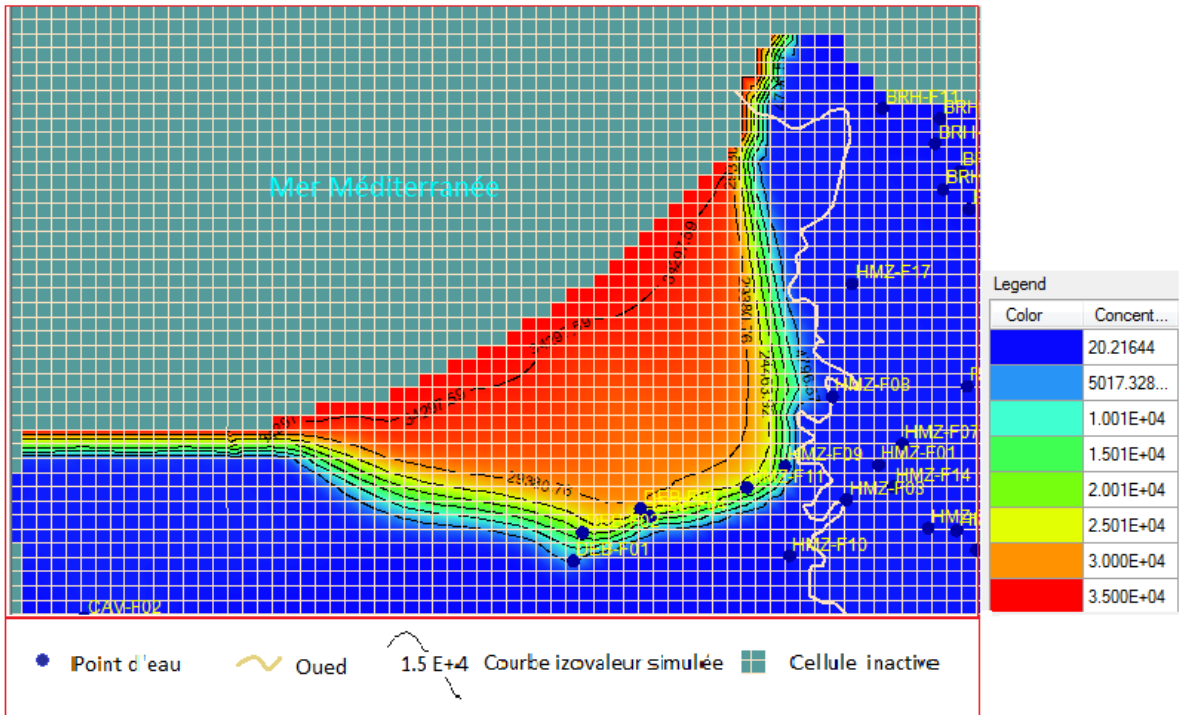
Le bilan enregistré pour ce premier scénario indique que le phénomène de l'intrusion marine apporte un débit moyen de 0.2 % du total des débits entrants vers la nappe (Tableau X.3) et cela pendant toute la période de simulation. Malgré les faibles valeurs de débits entrant, néanmoins le front salé a progressé de 1,25 km vers le Sud du côté de la zone de captage de Hamiz et de 0.25 km du côté de Da El Beida. Cela ne peut être expliqué que par le pompage continu qui a pu aspirer l'eau saline vers les forages. La même explication est donnée par plusieurs auteurs tels que Todd et Mays (2005).

Tableau X.3 : Bilans des entrées et sortie pour le premier scénario

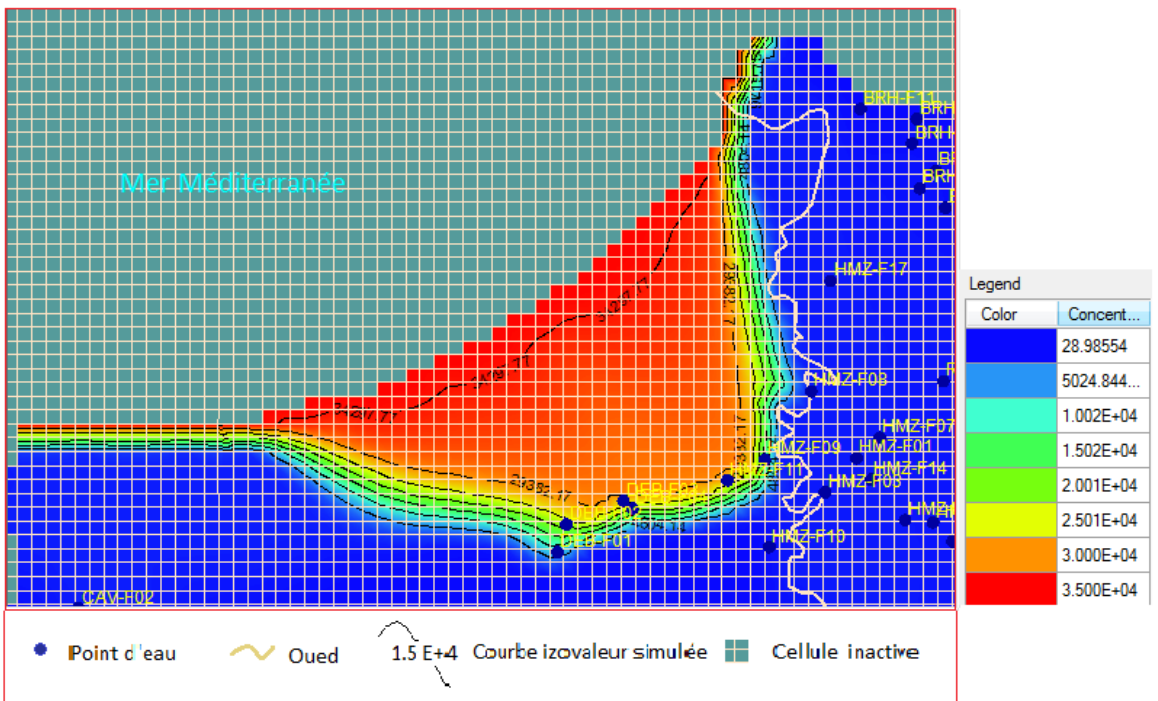
Année	Débit entrant (m ³ /J)			Débit sortant (m ³ /J)		
	Constant head	Total	%	Constant head	Total	%
2028	937.74	404305.12	0.23	3418.97	404305.96	0.84
2038	853.95	404041.75	0.21	32797.28	404043.40	8.11
2048	818.3	403946.96	0.20	32956.12	403947.78	8.15

X.5 Deuxième scénario

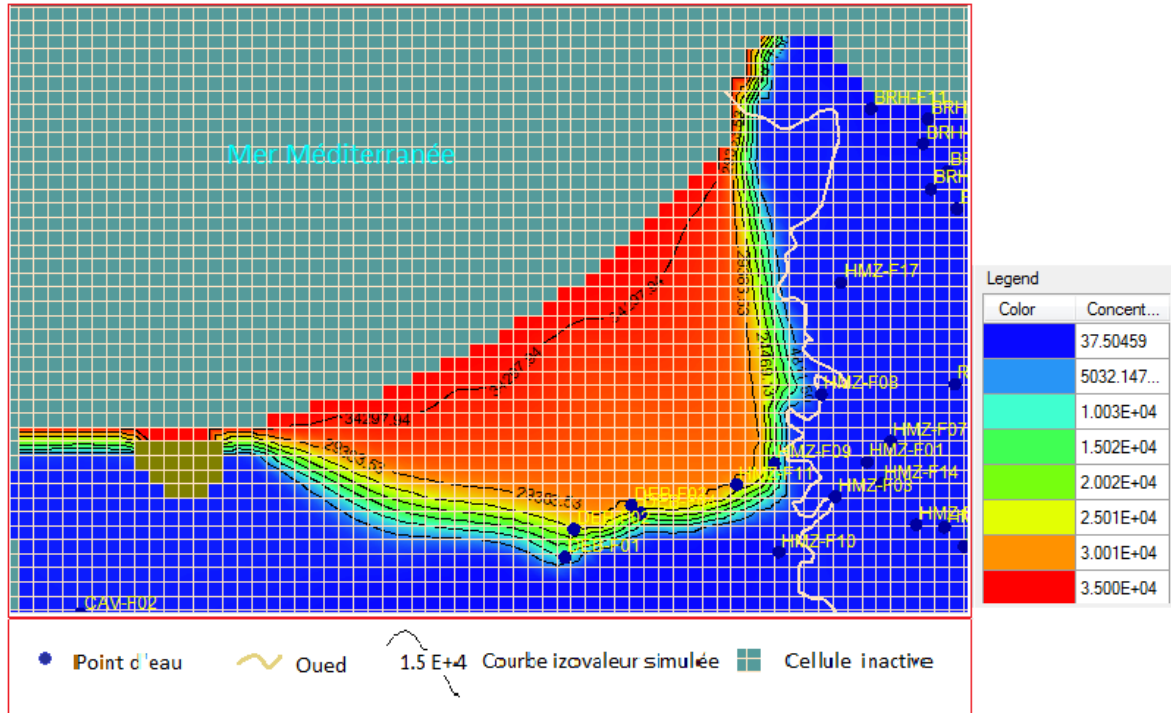
Rappelant que pour ce scénario la recharge par les précipitations est restée constante et les prélèvements ont augmenté de 20% par rapport à ceux de l'année de référence 2018 et le suivi de l'avancer du front saliné pendant 30 ans a donné le constat suivant (Figure X.3)



(a)



(b)



(c)

Figure X.3 : Carte de simulation du font salé résultant du deuxième scénario : (a) 2028, (b) 2038 et (c) 2048.

D'un point de vue piézométrique, le niveau baisse considérablement jusqu'à -14m pour la zone de Hamiz (voir chapitre précédent), l'observation du font salé indique une intrusion marine qui à la même allure que celle du premier scénario.

La différence entre le premier et le second scénario réside dans la concentration en sel. Il apparaît clairement qu'à travers ce scénario, toute la zone touchée par le biseau salé a une concentration qui dépasse le 20 g/l. le point P8 reste toujours assez éloigné de cette salinisation pour ce scénario. Nous remarquons aussi que ces valeurs de concentrations élevées sont installées dès les 10 premières années de la simulation.

L'augmentation du taux de pompage a provoqué la sollicitation des eaux de mer. Le pourcentage qui varie de 4.3% à 6.2 % est considéré comme faible néanmoins les dégâts provoqués sont conséquents, dû fait de l'installation de l'intrusion marine dans la zone (Tableau X.4).

Tableau X.4 : Bilans des entrées et sortie pour le deuxième scénario

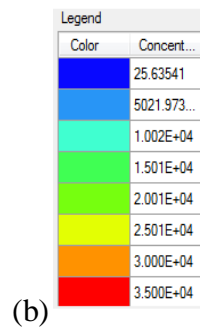
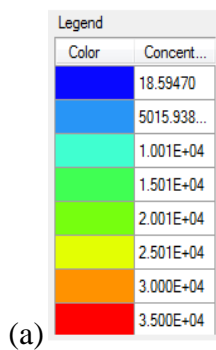
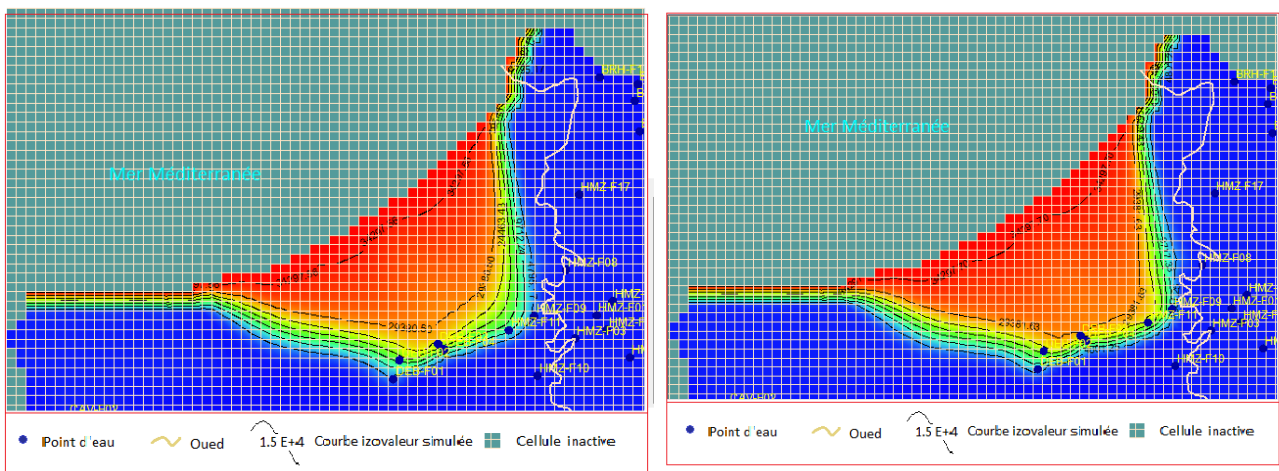
Année	Débit entrant (m ³ /J)			Débit sortant (m ³ /J)		
	Constant head	Total	%	Constant head	Total	%
2028	19198.5	446199.84	4.30	16822.11	446200.28	3.77
2038	24381.41	428056.65	5.69	151330.64	428057.05	35.35
2048	26541.34	427989.74	6.20	151268.45	427990.26	35.3

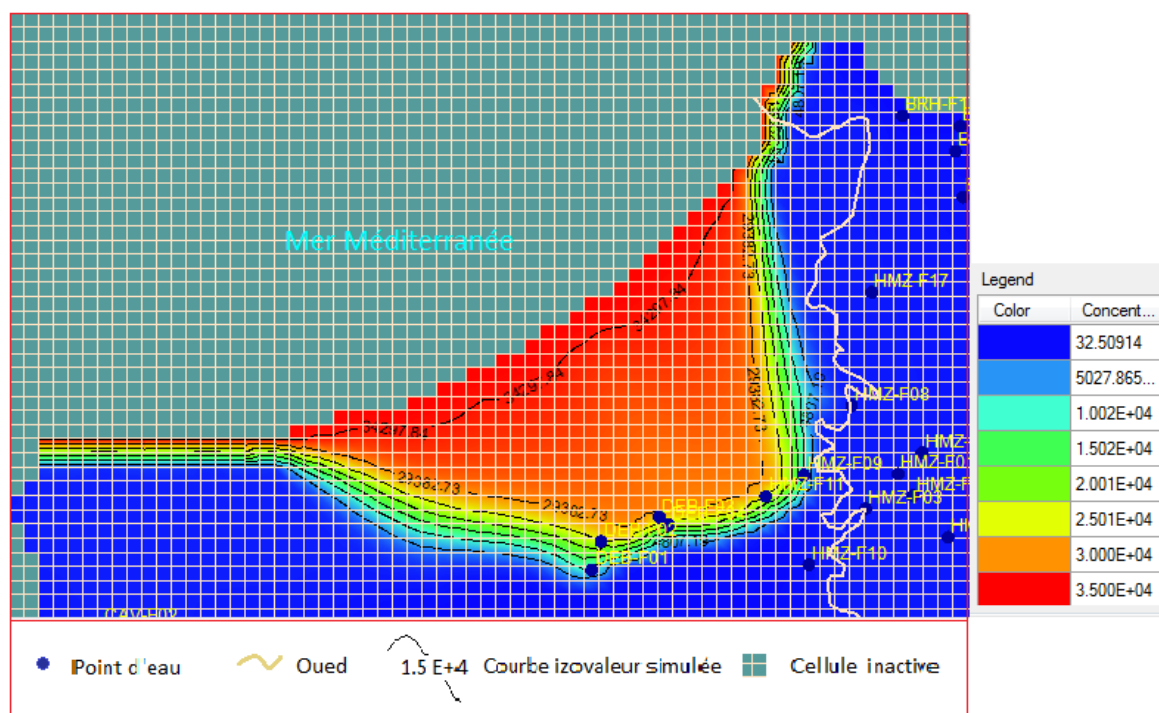
Le surplus de pompage de ce scénario accentue l'aspiration, à partir des profondeurs, des concentrations les plus élevées.

X.6 Troisième scénario

Nous remarquons que le schéma de la progression du front salé prit par les différent scénarios et plus ou moins le même, ainsi donc, nous n'allons intervenir que sur les différences majeurs entre ces derniers.

La recharge par les précipitations a chuté de 20 % pour ce scénario et les prélèvements sont constants et égale à ceux de l'année de référence. le suivi de l'avancer du front saliné a donné les figures suivantes (Figure X.4) :





(c)

Figure X.4 : Carte de simulation du front salé résultant du troisième scénario : (a) 2028, (b) 2038 et (c) 2048.

Le degré de salinité des points n'atteint son maximum qu'au troisième pas de temps d'observation.

Les valeurs du pourcentage de l'intrusion marine se situent entre les valeurs des deux précédents scénarios. Par conséquent, une chute de recharge par les précipitations engendre une sollicitation des eaux de mer pour combler ce manque et rester en équilibre.

Nous remarquons aussi à partir des données du Tableau X.5 que l'intrusion marine est plus importante pour le cas d'une augmentation de prélèvement que pour une chute de recharge par des précipitations.

Tableau X.5 : Bilans des entrées et sorties pour le troisième scénario

Année	Débit entrant (m ³ /J)			Débit sortant (m ³ /J)		
	Constant head	Total	%	Constant head	Total	%
2028	2985.48	395236.43	0.75	27470.9	395237.09	6.95
2038	4047.23	392845.21	1.03	25099.75	392846.09	6.38
2048	4794.29	391430.9	1.22	25023.67	391431.59	6.39

X.7 Quatrième scénario

Ce scénario a pris la combinaison la plus défavorable, une chute de recharge par les précipitations de 20 % et une augmentation de prélèvement de 20 %.

Dès la simulation (le premier pas de temps d'observation) les concentrations maximums ont

atteint les limites maximum (Figure X.5). La plage du font salé a atteint aussi Oued Hamiz avec des concentrations entre 5 g/l et 10 g/l. Certes, ces valeurs sont classées dans la gamme "peu salin à saline", mais un éventuel accroissement de temps avancera le font salé vers tout le champ de captage de Hamiz ainsi qu'aux champs captant de Rouiba et de Bouréah.

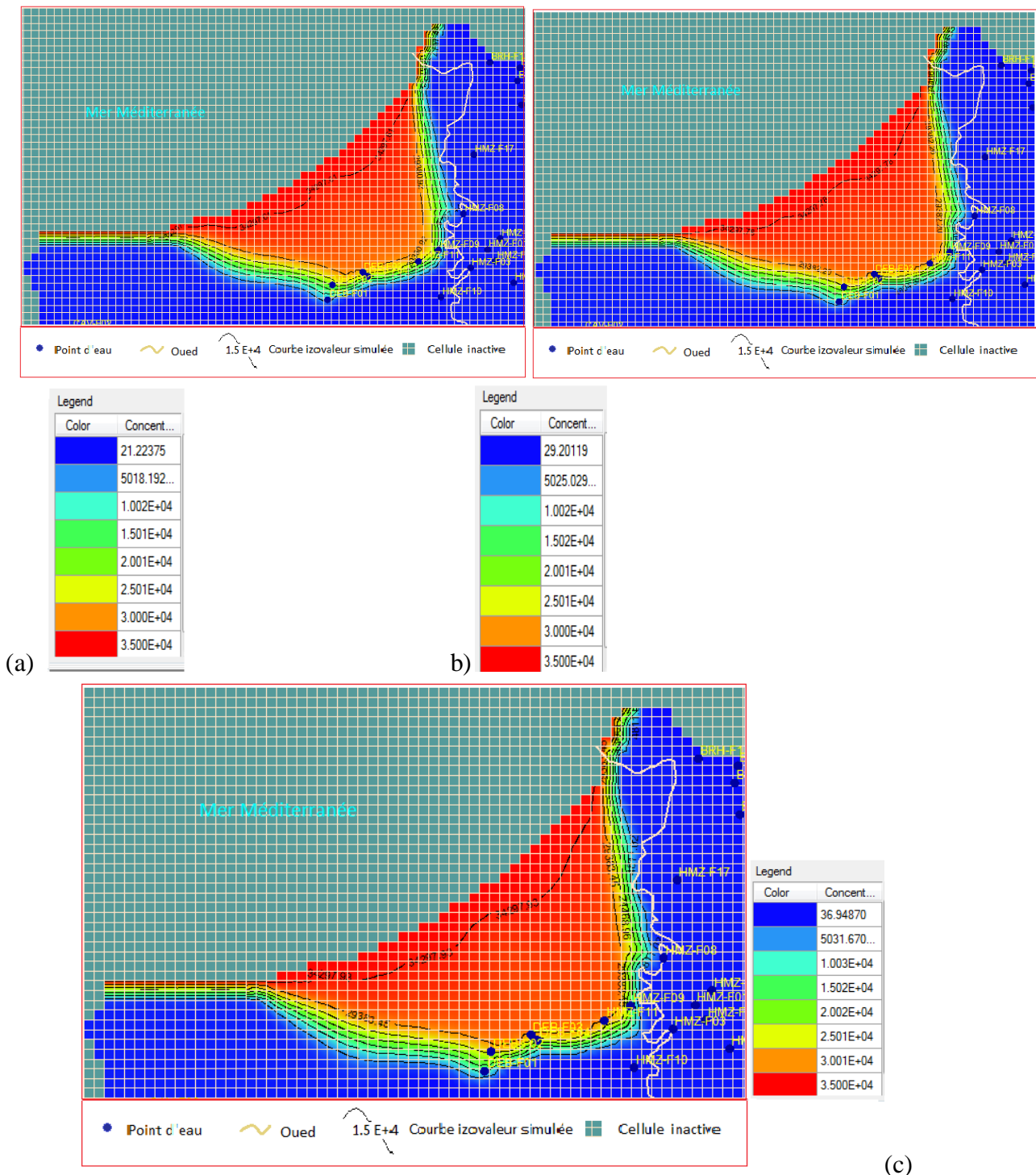


Figure X.5 : Carte de simulation du font salé résultant du quatrième scénario : (a) 2028, (b) 2038 et (c) 2048.

L'intrusion marine enregistrée pour ce cas est non seulement la plus importante, mais elle

accroît d'un pas de temps à un autre (Tableau X.6). Il convient de souligner que, le pourcentage des débits sortants est moins important à chaque augmentation de prélèvement.

Tableau X.6 : Bilans des entrées et sortie pour le quatrième scénario

Année	Débit entrant (m3/J)			Débit sortant (m3/J)		
	Constant head	Total	%	Constant head	Total	%
2028	23475.78	442881.31	5.30	15415.64	442831.06	3.48
2038	29880.25	420554.68	7.10	13672.08	420554.31	3.25
2048	28782.30	414154.71	6.94	13800.32	414154.46	3.33

X.8 Cinquième et sixième scénario

Pour ces deux scénarios, le prélèvement a augmenté de 20 % et nous avons rajouté une recharge artificielle dans la zone de Tabainet (Oued El Harrach amont) avec un débit de 2 840 m³/j. La seule différence est dans la précipitation où le scénario cinq a une précipitation similaire à l'année de référence et les précipitations du scénario six sont plus faibles de 20% (Figure X.6 et Figure X.7).

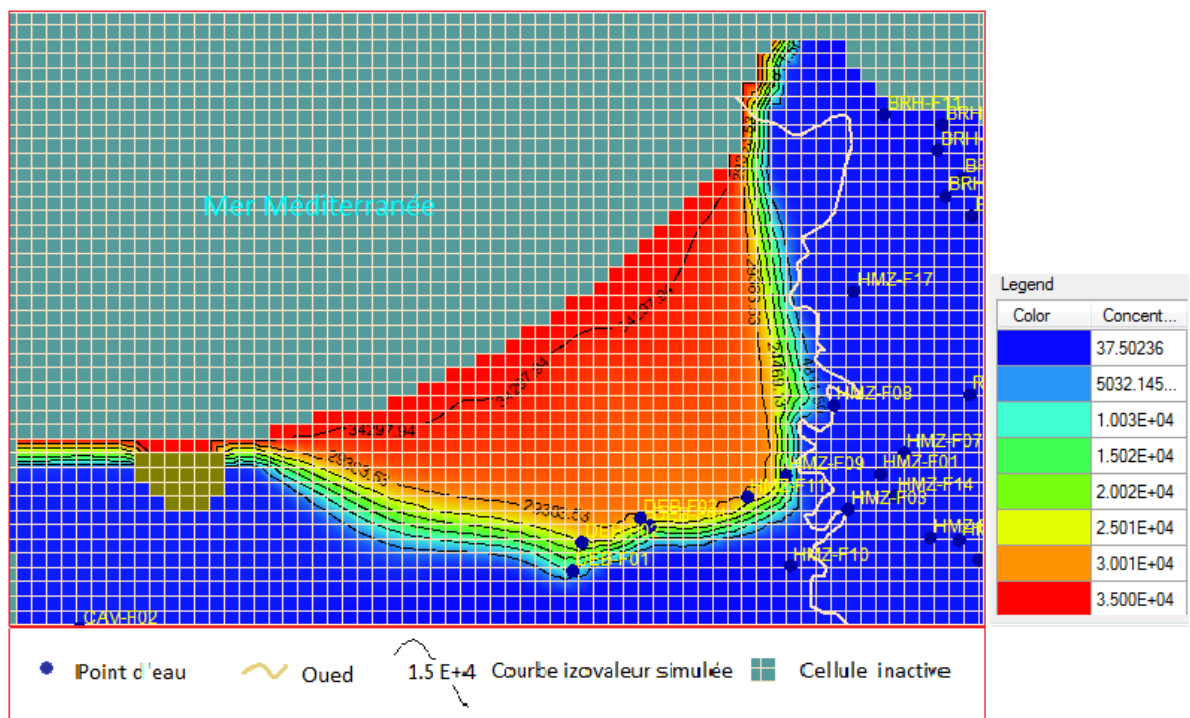


Figure X.6 : Carte de simulation du font salé résultant du cinquième scénario (2048).

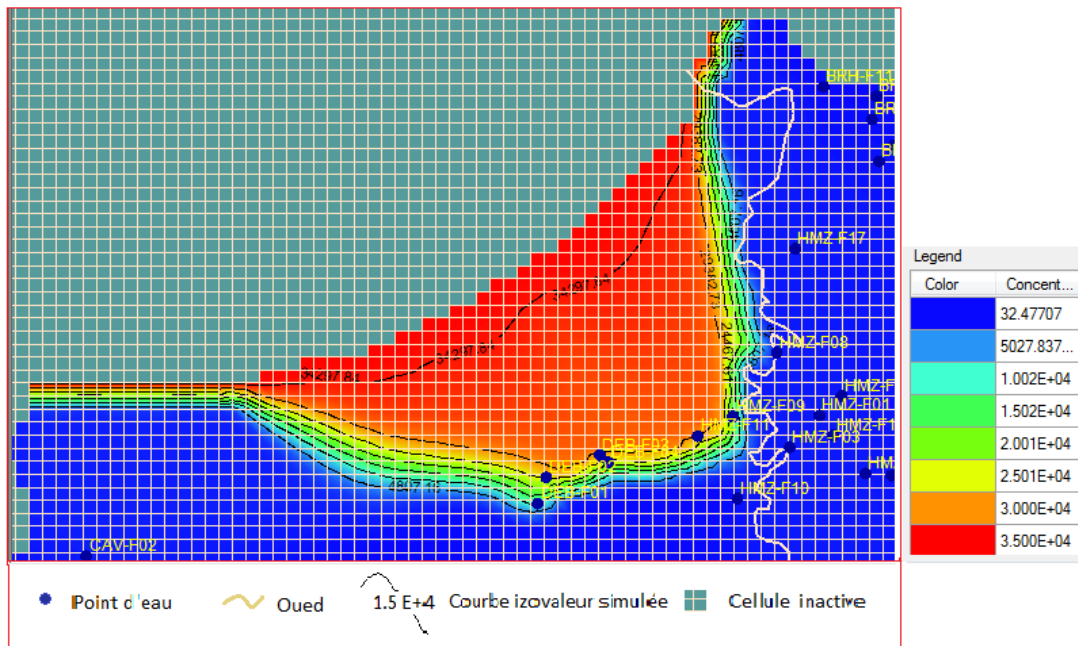


Figure X.7 : Carte de simulation du front salé résultant du sixième scénario (2048).

Les figures (Figure X.6) et (Figure X.7) de l'an 2048, montrent une similitude dans l'évolution du front salé aux cas précédents malgré l'apporte d'une recharge artificielle supplémentaire. Il en est de même pour les années 2028 et l'année 2038 (annexe II Figure III.1 et Figure III.2).

La différence entre les deux scénarios apparait dans le bilan des entres et des sorties (Tableau X.7 et Tableau X.8), où une chute de la quantité précipitée permet une plus grande intrusion marine.

Tableau X.7 : Bilans des entrées et sortie pour le Cinquième scénario

Année	Débit entrant (m3/J)			Débit sortant (m3/J)		
	Constant head	Total	%	Constant head	Total	%
2028	9339.42	460111.81	2.03	21191.9	460111.25	4.60
2038	11643.29	458217.93	2.54	19569.65	458217.43	4.27
2048	13673.87	457010.00	3.03	18537.56	457010.03	4.05

Tableau X.8 : Bilans des entrées et sortie pour le Sixième scénario

Année	Débit entrant (m3/J)			Débit sortant (m3/J)		
	Constant head	Total	%	Constant head	Total	%
2028	23500.58	443685.71	5.29	15410.27	443685.40	3.47
2038	29432.25	417661.93	7.04	13898.71	417661.59	3.32
2048	27404.58	410250.40	6.68	14369.73	410250.25	3.50

La remarque qui en découle est que, vue l'éloignement de la zone de recharge, le débit de recharge artificiel apporté n'a pas pu réduire ni la surface du font salé ni diminué sa concentration.

A partir de ce constat, nous avons rajouté un autre scénario pour essayer de trouver une solution au problème.

X.9 Septime scénario

Nous avons prit le premier scénario qui est considéré comme le prolongement de l'année de référence et nous lui avons ajouté une recharge artificielle de deux fois le débit déjà proposé ($2 \times 2\,840 \text{ m}^3/\text{j}$). Cette recharge est apportée cette fois dans la zone de recharge de Oued Hamiz. Nous avons ajouté à cela l'arrêt de pompage de la zone de captage de Dar El Beida (F1, F2, F3 et F4) et trois forages de la zone de captage de Hamiz (F11, F9 et F8). Le choix de l'arrêt de ces forages est basé sur :

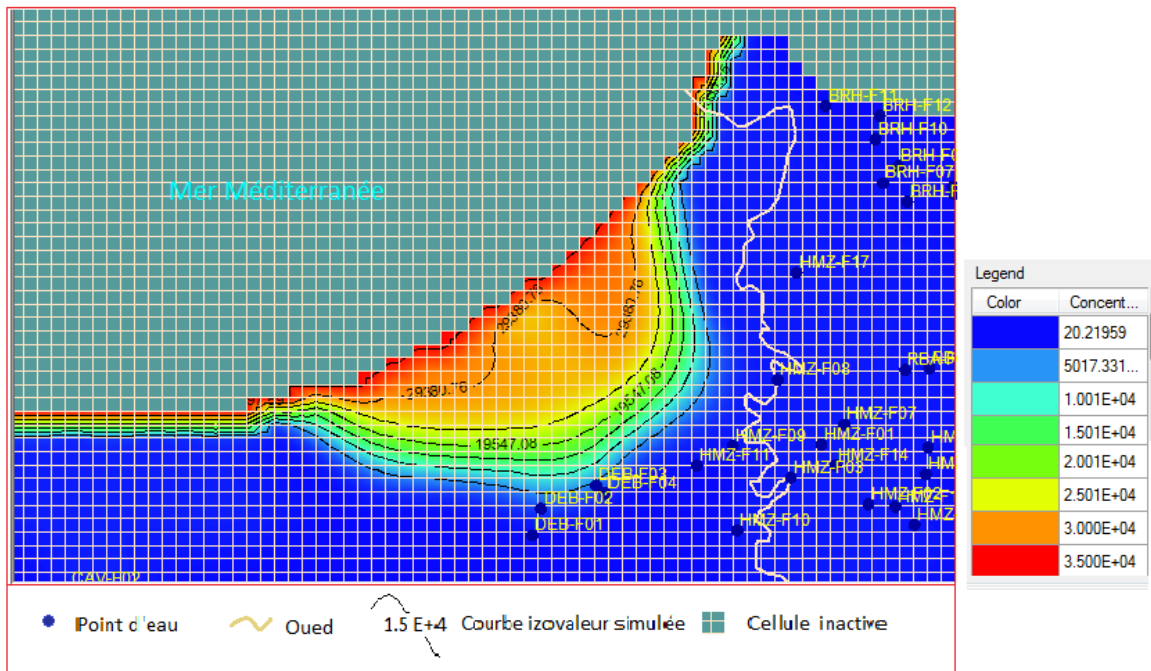
- Les trois forages de Dar El Beida (F2, F3 et F4) sont déjà touchés par la salinisation (simulation du régime transitoire 2018, Figure X.8 (a,b,c)).
- Le forage de DEB (F1) et ceux de Hamiz (F8 F9 et F11) seront touchés à chaque simulation de 30 ans.

Cet arrêt diminue le prélèvement de $19334.08 \text{ m}^3/\text{j}$, soit de 4.80 % du débit total de 2018 (Tableau X.9). Rappelant aussi que ce débit comporte les trois secteurs (AEP, AEI, AEA)

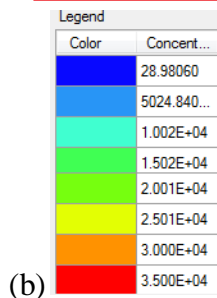
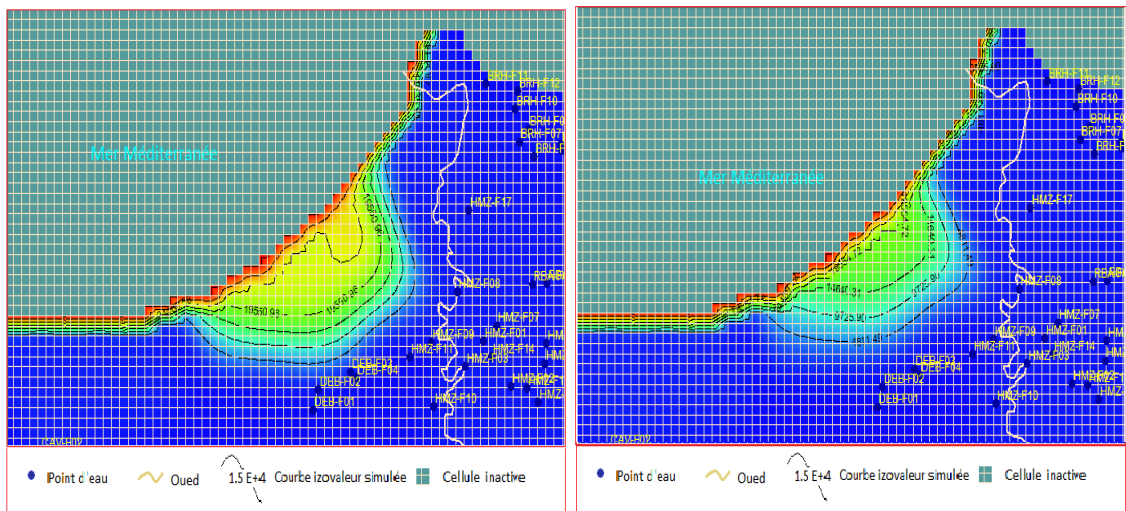
Tableau X.9 : débit de prélèvement des forages pour l'année 2018

Zone de captage	Forage	Coordonnées		Débit total (AEP, AEI, AEA) (m^3/j)
		X	Y	
DEB	F1	545230	379827	4833.52
	F2	545356	380216	4833.52
	F3	546156	380553	4833.52
	F4	546287	380443	4833.52
Hamiz	F8	548798	382088	4986,60
	F9	548145	381130	4986,60
	F11	547622	380839	4986,60

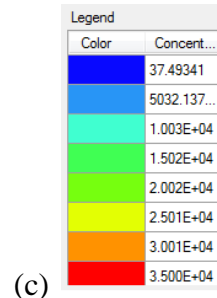
L'arrêt de pompage et la recharge artificielle ont donné un résultat appartenant sur la surface de la plage du font salé et cela au bout des dix (10) premières années (Fig.III.8). Les eaux des trois forages de la zone de Dar El Beida qui ont été chargées en sel, sont redevenues douces. La combinaison "arrêt de pompage + recharge" a fait l'effet de lessivage de la nappe et à accéléré le retrait du front salé, et si le scénario continu jusqu'à la fin, le front salé sera de plus en plus à faible surface.



(a)



(b)



(c)

Fig. X.8 : Carte de simulation du font salé résultant du septième scénario : (a) 2028, (b) 2038 et (c) 2048.

X.10 Conclusion

La modélisation de l'intrusion marine est considérée comme un outil très utile à la compréhension et au suivi du phénomène de l'intrusion marine d'un système aquifère. Sa grande force est dans sa capacité à jumeler la rapidité et la projection, présent et future, de tous les cas possibles d'exploitation d'une nappe souterraine.

Dans le système aquifère de la plaine côtière de la Mitidja Est, la simulation en régime permanent pour l'année de référence 2018 par le code ModFlow Flex MT3DMS, nous a permis de cerner l'étendu du front salé causé une surexploitation récurrente de la nappe.

La simulation de sept scénarios et sous les conditions d'exploitation actuels et futures pendant 30 ans, a permis d'exposer les conclusions suivantes :

a) Pour les six premiers scénarios :

- Un même schéma de la plage du front salé est remarqué, du principalement à la surexploitation de la nappe et cela malgré le scénario proposé ;
- Une variation plus ou moins différente de l'avancer de la concentration en sel, qui est proportionnellement liée à l'augmentation des prélèvements.
- Le jumelage d'un surplus de prélèvement (+20% par rapport à 2018) et d'une baisse de recharge par la précipitation (- 20 %) pousse l'invasion marine vers l'Est (Rouiba et Bouréah).

b) Pour le 5^{ème}, 6^{ème} et 7^{ème} scénarios :

- La recharge introduite pour le 5^{ème} et 6^{ème} scénarios (1 036 762 m³/an) n'a pas apporté une nette amélioration pour la réduction de la plage du front salé.
- L'endroit de la recharge est aussi important que la dose, où une recharge à Tabainet a fortifié l'échec de la recharge artificiel.
- L'arrêt des sept forages (4 forages dans la zone de DEB et 3 forages dans le champ captant de Hamis = 7 056 939.2 m³/an), soit 4.80 % du prélèvement total, plus une recharge équivalente à deux fois celle du scénario 5 et 6 (2 x 1 036 762 m³/an), semble réduire la surface du front salé en 10 ans.

Conclusion générale

Conclusion générale

La nappe souterraine de la Mitidja est hautement sollicitée par les différents usagers, ce qui fait d'elle une source exposée à de graves conséquences. Une pollution qui peut provenir de l'agriculture, de l'industrie et surtout de l'urbanisation intensive. Sans oublier le risque irréversible de sa salinisation par le phénomène d'intrusion marine, qui est de plus en plus élevé par une surexploitation de cette ressource.

Une gestion de la ressource est indispensable pour faire perdurer l'utilisation de cette ressource dans l'espace et dans le temps. Cette dernière n'est pas complète que si tout les usagés ne mettent leur bonne foi dans sa protection et que les autorités prennent en charges la rigueur dans l'application des décisions et des programmes de gestion.

Sachant que du point de vue climatique, seulement 7% des pluies moyennes annuelles rejoignent la nappe. Le reste part à la mer par ruissèlement ou par évapotranspiration. Malgré les grandes potentialités de la nappe de la Mitidja, les points d'eau d'exploitation sont de plus en plus grands que ce soit des zones de pompage étatique destinés à l'alimentation en eau potable, industrielle ou privé à usage personnel. Et cela sans parler des multitudes de points d'eau faites il icitement.

La plaine de la Mitidja contient plusieurs zones de captage d'eau destinée à l'AEP dans la zone Est ainsi que dans la zone Ouest (voir figure). L'examen des cartes piézométriques montre des zones de dépression à l'Est et à l'Ouest de la plaine, les courbes sont très influencées par les effets de pompage dans les stations Beraki et Haouch Bel Abbas et celui de Mazafran I et II. La comparaison de la carte piézométrique de 1970 avec celles de 1981, 1992 et 2005, montre que le niveau piézométrique de la nappe alluviale a accusé une baisse très importante.

De ce fait le suivi de la chimie des eaux de la nappe ce fait régulièrement par les autorités compétente et qui est mis à jours, où l'eau est plus ou moins salée dans la zone de la baie d'Alger et avec des concentrations croissante en direction du Nord. cela apparait clairement sur les cartes d'isovaleurs de la conductivité. Dès les années 80, le déséquilibre eau douce – eau salée a commencé à apparaitre. Sont accentuation était à son apogée dans les années 2000. La bonne gestion et la prise de décision de diminuer le pompage dans certain zones de captages ont fait que la progression de l'intrusion marine est ralentie. Ce Phénomène est constaté surtout à partir de l'année 2010. Ajouter à cela le bouchage définitif des forages et des puits salins pour que les usagers (surtout les privés) ne puissent l'utiliser. Dans la zone Ouest les valeurs sont aussi assez élevées, surtout dans la zone de Mazafran, de Sidi Rached et de Ahmer El Ain. L'explication la plus plausible est que ces concentration sont due à l'utilisation de fertilisons vue que la région est plus à vocation agricole, plus une possibilité d'utilisation des eaux usées traitées à partir de la STEP de Tipasa d'une manière il icite. (Constatations sur le terrain).

Sur les cartes faites pour la localisation de la pollution à partir de l'indice de qualité des eaux, les zones à forte concentration de zones industrielles sont les zones les plus polluées, vue la nature perméable du sol. Cette pollution est d'autant plus forte que l'industrie mise en place est lourde (transformation métallique, plastique ...). La Zone Est de la nappe représente le point noire de cette pollution vue le type d'industrie installer ainsi que l'ancienneté de sans installation. Ajouter à cela la pollution due à la forte concentration d'agglomérations dans

cette zone. La zone Ouest par contre la pollution est due principalement à l'agriculture, vu que la zone est plus à vocation agricole. Par manque de données, nous n'avons pas pu déterminer

la présence ou l'absence des métaux lourds apportés par les pesticides utilisés pour la lutte contre les mauvaises herbes et les insectes.

La modélisation hydrodynamique de l'aquifère de la Mitidja, zone Est, en régime permanent, a permis d'affiner la distribution spatiale de la perméabilité qui varie de $0,6 \times 10^{-5}$ à $1,77 \times 10^{-3}$ m/s et de dresser le bilan de l'aquifère qui est équilibré entre les entrées et les sorties totales.

La simulation sous les conditions d'exploitations (actuelles ou futures), en régime transitoire sur une période de 30 années dévoile une baisse importante du niveau piézométrique (une surexploitation) avec une situation critique dans la zone de captage de Hamiz et celle de Beraki.

La modélisation hydrochimique a permis de mettre l'accent sur le problème de l'intrusion marine. La surexploitation de la nappe depuis les années quatre-vingt dix (90) n'a fait qu'élargir la surface du front salé, pour attendre les forages avant l'année 2007.

Les scénarios élaborés, en fonction des besoins en eau de l'AEP, AEI et l'AEA ainsi que le changement climatique qui est déjà en place, ne feront qu'accélérer la baisse du niveau de la nappe et par conséquent rendre l'eau de la nappe saumâtre.

Recommandations

Les changements climatiques, le taux de croissance de la population, l'intensification de l'agriculture et la poussée frénétique de l'installation des zones industrielles, tout ces paramètres ne font qu'aggraver la situation déjà tragique de l'eau de la nappe de la Mitidja. Une nappe côtière menacée par l'intrusion marine, de plus en plus sollicitée par les agriculteurs et les industriels et qui a un devoir envers la population mérite une profonde réflexion et une bonne prise en charge par l'ensemble de ces utilisateurs.

Un certain nombre de mesures doit être pris pour assurer sa pérennité ainsi qu'une exploitation optimale de cette source.

La gestion présente un meilleur moyen de préserver cette ressource

- Un suivi continu des eaux de la nappe de la Mitidja par un réseau de surveillance dense, avec un pas de temps mensuel et en cas d'alerte, à pas de temps journalier. Cela peut aider à déterminer les probables pollutions, la vitesse et le sens de diffusion et de propagation dans l'espace et dans le temps. Ajouter à cela une meilleure connaissance de l'hydrodynamisme des eaux de l'aquifère.

- Détermination et protection des zones les plus vulnérables contre une quelconque installation agricole, industrielle ou même urbaine pouvant susciter une pollution même minime.

- Une intransigeance dans les lois déjà promulguées sur la protection de la ressource comme le cas de pollution, une application stricte et sans exception de la loi « les pollueurs payeurs ».

- Protection des sablières des oueds. Le prélèvement du sable de ce dernier provoque une fragilisation de la zone vadose où sa profondeur est elle-même fonction du climat, du sol et de l'hydrologie. Sa fragilisation donc augmente le risque d'augmentation de pollution.

-
- Contrôle continu des centres d'enfouissements techniques CET et des décharges publique où leurs lixiviats sont très polluons du fait de leurs concentrations en tout types d'éléments chimiques.
- Faire une étude économique et un investissement (même important mais très rentable à long terme) sur un traitement tertiaire des eaux usées dans le but de recharger la nappe (320 Mm³ d'eau épurée sur 1200 M m³ d'eau usée sur tout le territoire (ONA)). Ainsi que la réalisation des bassins d'infiltration dans les zones les plus favorables.

En fin, ces recommandations, infimes soient elles, ne peuvent données de résultats si le développement social et intellectuel ne suit pas. Leur réalisation dépend en premier et en dernier lieu de l'homosapien sapien.

« La source de la plupart de nos problèmes réside dans l'écart entre le mode de pensée de l'homme et le mode de fonctionnement de la nature ».

Grégory Bateson

Références

Références

- Ait Ouali, AEK. (2007) : Synthèse hydrogéologique et vulnérabilité à la pollution du système aquifère quaternaire de la Mitidja. Mémoire de magistère, IST_USTHB.Alger, 123p.
- Algéo. (1978) : Prospection géophysique, zone littorale de la baie d'Alger. Ministère de l'hydraulique 40p.
- ANRH-SOGREAH. (2010) : Étude de lutte contre l'intrusion marine dans la baie d'Alger. Coopération Algéro-Belge, Gestion intégrée des ressources en eau dans le bassin hydrographique Algérois. 31 p.
- AYME, A. (1956) : Contribution à l'étude de la plaine de la Mitidja occidentale et de sa bordure Atlasique. Bul .Serv .cartes. Géol. D'Algérie. N° 347-362
- Alizadeh Z, Mahjouri N, (2017) : A spatiotemporal Bayesian maximum entropy-based methodology for dealing with sparse data in revising groundwater quality monitoring networks: the Tehran region experience. *Environ Earth Sci* (2017) 76:436 DOI 10.1007/s12665-017-6767-6
- Anderson, M. P. Woessner, W. W. Hunt, R. J. (2015) : Applied groundwater modeling. Simulation of flow and advective transport. 2nd edition Academic Press Elsevier. 720 P.
- Arslan H. (2012) : Spatial and temporal mapping of groundwater salinity using ordinary kriging and indicator kriging: the case of Bafra Plain, Turkey. *Agric Water Manag* 113:57–63. doi:10.1016/j.agwat.2012. 06.015
- Bahrami Jovein E, Hosseini S, M. (2017) : Predicting saltwater intrusion into aquifers in vicinity of deserts using spatio-temporal kriging. *Environ Monit Assess* (2017) 189:81 DOI 10.1007/s10661-017-5795-8
- Benblidia Med et Gaelle T. (2010) : Gestion des ressources en eau : les limites d'une politique de l'offre. Les notes d'analyse du CIHEAM N°56.
- Bennie & Partners, (1983) : Schéma d'aménagement des ressources en eau dans la région d'Alger.
- Benziada M. (2003) : Hydrologie de la plaine de la Mitidja Orientale (Algérie). *Bulletin des Sciences Géographiques* N° 11, Avril 2003. Pp 43 - 52.
- Berdous, F. et Bénani, K. (1997) : Variabilité spatiale de la transmissivité de la nappe alluviale de la Mitidja (Algérie). Mémoire d'ingénieur d'état. IST / USTHB / ALGER
- Boudiaf, A. (1996) : Étude sismotectonique de la région d'Alger et de la Kabylie. Thèse de doctorat, université Montpellier II. 254 p.
- Bouguechtouli Mebarka (2011) : Aquifère côtier en zone fortement urbanisée. Evolution du comportement hydrodynamique et hydrochimique : Cas de la Mitidja orientale. Mémoire de Magister. Univ USTHB. 182 p.
- Braham Massinissa . (2011) : Approche intégrée de la vulnérabilité des aquifères par utilisation des données spatio-temporaires, de la géostatistique et des systèmes d'information géostatistiques. Mémoire de Magister. USTHB 225 p.
- Buchanan SM, Triantafilis J. (2009) : Mapping water table depth using geophysical and environmental variables. *Ground Water* 47:80–96. DOI: 10.1111/j.1745- 6584.2008.00490.x
- Chesneau M. (1982) : Notes sur les tremblements de terre en Algérie. *Anales des mines, serie 9, T.I. CGG, (1967) Etude par prospection électrique de la plaine de la Mitidja.*
- Compagnie générale de géophysique (1968) : Étude par prospection électrique dans la plaine du Hamiz Rapport de l'ANRH d'Alger. CGG (1968), Paris.
- Dassargues, A. 1995 : Modèles mathématiques en Hydrogéologie. Programme Tempus JEP 3801 science de l'eau et environnement. Université Technique de Construction, Bucarest. Editura Didactica si pedagogica Bucuresrti 131 P.
- Deramchi., (2014) : [Deramchi mohamed ; la gestion intégrée de la ressource en eau , International integrated Basin Management Workshop , 2014 Pp19
- Dhindsa, S. S., Bheel, P., & Musturia, Y. (2004) : Hydrochemical study of ground water quality variation in Tonk District, Rajasthan. *Indian Journal of Environment and Ecoplanning*, 8(1), 129–136.
- Djoudar Dahbia (2014) : Approche méthodologique de la vulnérabilité de la ressource en eau souterraine en milieu fortement urbanisé : exemple en Algérie des plaines littorales (Mitidja). Thèse de doctorat. USTHB.196 p.
- Durand Delga, M. (1969) : Mise au point sur la structure du NE de la Berbérie. Publ. Serv. Carte

- géologique .Algérie, nouv. sér., 39, 85-131
- Durand – Delga. M. (1961) : Esquisse structural de l'Algérie. lexique stratigraphique international Vol IV, Afrique Vol. 16, Algérie.
- Egwu Otu Iduma R, Kingdom Simeon Abam T, Daniel Uko E. (2017) : Geostatistical study of the spatial variability of groundwater parameters in Afikpo and Ohaozara, Southeastern Nigeria. *J. Water Resour. Environ. engine* Vol.9(4), pp. 72-85 , April 2017 DOI: 10.5897/IJWREE2017.0710 ISSN: 2141-6613
- Falivene O, Cabrera L, Tolosana-Delgado R, Sáez A. (2010) : Interpolation algorithm ranking using cross-validation and the role of smoothing effect. A coal zone example. *Comput Geosci* 36:512–519. doi:10.1016/j.cageo.2009.09.015
- Géohydraulique, (1972) : Étude hydrogéologique quantitative de la plaine de la Mitidja .Rapport de synthèse (1968-1972), Vol 06, DEMRH, Alger 67 p.
- Glangeaud A, (1952) : Étude géologique de la région littorale d'Alger. *Bull. Serv. Carte. Géol. Algérie.* 2ème série, n°8, tomes 2. 89p.
- Glangeaud, L. et Ayme, A. (1952) : Histoire géologique de la province d'Alger. XIX Congrès international, Alger. Monographies régionales, première série, Algérie, N°25 (SGA), ALGER.
- Gnanachandrasamy G, Ramkumar T, Venkatramanan S, Vasudevan S, Chung S., Bagyaraj Y M. (2015) : Accessing groundwater quality in lower part of Nagapattinam district, Southern India: using hydrogeochemistry and GIS interpolation techniques *Appl Water Sci* (2015) 5:39–55. DOI 10.1007/s13201-014-0172-z
- Gong G, Mattevada S, O'Bryant SE. (2014) : Comparison of the accuracy of kriging and IDW interpolations in estimating groundwater arsenic concentrations in Texas. *Environ Res* 130:59–69. doi:10.1016/j.envres.2013.12.005
- Goovaerts P. (2000) : Estimation or simulation of soil properties? An optimization problem with conflicting criteria. *Geoderma* 97:165–186. doi:10.1016/S0016-7061(00)00037-9
- Gouaidia, L., (2008) : Influence de la lithologie et des conditions climatiques sur la variation des paramètres physico-chimiques des eaux d'une nappe en zone semi aride, cas de la nappe de Meskiana, nord-est algérien (Ph.D. thesis). Badji Mokhtar-Annaba University, Algeria 220 p.
- Guillaumot, L. (2018) : Comment modéliser les systèmes aquifères au sein du cycle hydrologique ? Une approche « multi-observation » à différentes échelles. Thèse de doctorat de l'université de Rennes1. 248 P.
- Haddouche Abida (2012) : Approche comparative de la vulnérabilité intrinsèque d'aquifères soumis à des climas contrastés : Plaine de la Mitidja au nord et vallée de Oued M'YA au sud de l'Algérie . Mémoire . USTHB 143 p.
- Hamlat A. (2014) Contribution à la gestion des ressources en eau des bassins versants de l'Ouest Algerien à l'aide d'un système informatisé. Thèse de doctorat, univ de Med Boudiaf d'Oran 243 p.
- Heisel T, Erbsoll K. A, Andreasen C, (1999) : Weed Mapping with Co-Kriging Using Soil Properties. *Precision Agriculture*, 1, 39-52 Pp (1999).
- Horton RK. (1965) : An index number system for rating water quality. *J Water Contam Control Fed* 37:300–306 Pp.
- Izady A, Abdalla O, Ahmadi T, Chen M, (2017) : An efficient methodology to design optimal groundwater level monitoring network in Al-Buraimi region, Oman. *Arab J Geosci* (2017) 10:26 DOI 10.1007/s12517-016-2802-2
- Johnston K., Ver Hoef J M., Krivoruchko K., Lucas N. (2003) : Using ArcGIS Geostatistical Analyst (ESRI Userbook). http://dusk2.geo.orst.edu/gis/geostat_analyst.pdf ; <http://downloads2.esri.com/support/documentation/ao /Using ArcGIS Geostatistical Analyst.pdf>
- Joseph J., Sharif HO., Sunil T., Almgir H. (2013) : Application of validation data for assessing spatial interpolation methods for 8-h ozone or other sparsely monitored constituents. *Environ Pollut* 178:411– 418. doi:10.1016/j.envpol.2013.03.035
- Kaben Ouardia (2012) : Identification hydrodynamique dun systme aquifère hétérogène. Exemple de la Mitidja orientale. Mémoire de Magister. Univ USTHB. 147 p.
- Keblouti M, Ouerdachi L, Boutaghane H. (2012) : Spatial interpolation of annual precipitation in

- Annaba-Algeria—comparison and evaluation of methods. *Energy Procedia* 18:468– 475. doi:10.1016/j.egypro.2012.05.058
- Khalili K. (2014) : Comparison of Geostatistical Methods for Interpolation Groundwater Level (Case study: Lake Urmia Basin) *J. Appl. Environ. Biol. Sci.*, 4(1s)15-23, ISSN: 2090- 4274.
- Kherbach M. & Khaladi N. (2014) : La problématique de l'eau en Algérie : Enjeux et contraintes ; Thèse de doctorat Univ Abderrahmane MIRA, Bejaia Pp268.
- Kravchenko AN. (2003) : Influence of spatial structure on accuracy of interpolation methods. *Soil Sci Soc Am J* 67:1564–1571. doi:10.2136/sssaj2003.1564
- Krivoruchko K. (2012 a) : Empirical Bayesian Kriging. *ArcUser Fall 2012*, pp. 6–10. Also available online at <http://www.esri.com/news/arcuser/1012/empirical-byesian-kriging.html>
- Krivoruchko K. (2012 b) : Modeling Contamination Using EmpiricalBayesian Kriging. *ArcUser Fall 2012*. <http://www.esri.com/news/arcuser/1012/modeling-contamination-using-empirical-bayesian-kriging.html>
- Kumar V. (2007) : Optimal contour mapping of groundwater levels using universal kriging—a case study. *Hydrol Sci J* 52:1038–1050. DOI: 10.1623/ hysj.52.5.1038
- Lee J-J, Jang C-S, Wang S-W, Liu C-W. (2007) : Evaluation of potential health risk of arsenic-affected groundwater using indicator kriging and dose response model. *Sci Total Environ* 384:151–162. doi:10. 1016/j.scitotenv.2007.06.021
- Li j, Heap A-D. (2014) : spatial interpolation methods applied in the environmental science. *Environmental modeling & software* 53 (2014) 173-189;
- Liu C-W, Jang C-S, Liao C-M. (2004) : Evaluation of arsenic contamination potential using indicator kriging in the Yun-Lin aquifer (Taiwan). *Sci Total Environ* 321:173–188. doi:10.1016/j.scitotenv.2003.09.002
- Mac Donald, M., Atkins W.S. et partners (1992) : Étude de l'aménagement hydro-agricole de la plaine de la Mitidja. limited Cambridge, Angleterre en association avec BNEDER 168 p
- Mac Donald, M., Atkins W.S. et partners (1997) : Étude de l'aménagement hydro-agricole de la plaine de la Mitidja. limited Cambridge, Angleterre en association avec BNEDER 112 p
- Makhlouf N. (2012) : Cartographie et évolution de l'état actuel du biseau salé de la baie d'Alger et son impact sur l'AEP (champ de captage du Hamiz) et l'industrie (champ de captage de Rouiba). Mémoire de Magister. Univ USTHB 151 p.
- Meddi M., Boufekane A., Meddi H., Saidi H., Chebah M., et Moutz R. (2016) : Rapport général du projet PNR, Recharge artificielle de la nappe de la Mitidja. Pp 39.
- Meghraoui, M. (1988) : Géologie des zones sismiques du Nord de l'Algérie : Plaéosismologie, tectonique active et synthèse sismotectonique. Thèse de Doctorat, spécialité sciences naturelles, mention géologie structurale, Université de Paris Sud, Centre Orsay N° 3495 Paris.
- Ministère des Ressources en Eau, l'agence de bassin Algérois – Houdna - Soummam (2002) : Bassin de l'Algérois carnet N°1 : 1-37. <http://www.abhahs.org/media/documents/carnet02.pdf>
- Mirzaei R, et Sakizadeh M. (2016) : Comparison of interpolation methods for the estimation of groundwater contamination in Andimeshk-Shush Plain, Southwest of Iran. *Environ Sci Pollut Res* (2016) 23:2758–2769. DOI: 10.1007/s11356-015-5507-2
- Montoachet, M. (1952) : Assainissement de la Mitidja XIX congrès géologique. Alger. Tome II. données hydrogéologique Algériennes monographie .ONIG
- Morsli B., Habi M. et Bouchekara B. (2017) : Study of marine intrusion in costal aquifers and its repercussions on the land degradation by the use of a multidisciplinary approach. *Larhyss Journal*, ISSN 1112-3680, n°30, Juin 2017, Pp 225-237.
- Murray KS. (1996) : Hydrology and geochemistry of thermal waters in the Upper Napa Valley, California. *Ground Water* 34:1115–1124
- Mutin G. (1977) : La Mitidja, décolonisation et espace géographique, Paris, CNRS, 607 p Mutin G. (1980) Implantations industrielles et aménagements du territoire en Algérie. In: *Revue de géographie de Lyon*, vol. 55, n°1, pp. 5-37; doi : 10.3406/geoca.1980.1263. http://www.persee.fr/doc/geoca_0035-113x_1980_num_55_1_1263
- Phiip, H. (1983) : La tectonique actuelle et récente dans le domaine Méditerranéen et ses bordures, ses relations avec la sismicité. Thèse de doctorat de l'université des sciences techniques du Languedoc. 251p
- Plouffe CCF, Robertson C, Chandrapala L. (2015) : Comparing interpolation techniques for monthly rainfall

- mapping using multiple evaluation criteria and auxiliary data sources: a case study of Sri Lanka. *Environ Model Softw* 65:57–71. doi:10.1016/j.envsoft.2015.01.011
- Ramasubramanian, V., Jeyaprakash, R., Ruby Mallika, D. A., Ramasubbu, R., & Mariappan, V. (2004) : Analysis of physico-chemical characteristics of ground water quality and quality index in and around Sivakasi Town. *Indian Journal of Environment and Ecoplanning*, 8(1), 171–176.
- Ran Y., Li X., Ge Y., Lu X., Lian Y. (2015) : Optimal selection of groundwater-level monitoring sites in the Zhangye Basin, Northwest China. *J Hydrol* 525:209–215
- Rivoirard , (1952) : Aperçu sur l'hydrologie Algérienne. XIX Cong. géol. inter., Alger 32 p.
- Rosen M, Jones S. (1998) : Controls on the chemical composition of ground water from alluvial aquifers in the Wanaka and Wakatipu basins, Central Otago, New Zealand. *Hydrogeol* J6:264–281
- Sakizadeh M & Ahmadpour E. (2016) : Geological impacts on groundwater pollution: a case study in Khuzestan Province *Environ Earth Sci* (2016) 75:88 DOI 10.1007/s12665-015-4944-z
- Samsonova V. P., Blagoveshchenskii Yu. N., and Meshalkina Yu. L. (2017) : Use of Empirical Bayesian Kriging for Revealing Heterogeneities in the Distribution of Organic Carbon on Agricultural Lands. *Eurasian Soil Science*, 2017, Vol. 50, No. 3, pp. 305–311. ISSN. 1064-2293. DOI: 10.1134/S1064229317030103
- Siegel RF. (2002) : Environmental geochemistry of potentially toxic metals. Springer, Berlin, p 218.
- SOGREAH, (2004) : Etude d'Actualisation et de Finalisation du Plan National de l'Eau Régions hydrographiques Centre et Est. Rapport final. Groupement BCEOM – BG – avril 2004. 75p.
- Stamatis G. (2010) : Ground water quality of the Ag. Paraskevi Tempi valley karstic springs application of a tracing test for research of the micro-bial pollution (Kato Olympos/NE Thessaly). *Bulletin of the Geological Society of Greece* 43:1868–1877
- Sylvain, M. (2001) : Modélisation hydrodynamique de la nappe quaternaire du bassin de lac Tchad. DEA. Univ Montpellier II/ Univ Avignon 80 P.
- Theodossiou N, Latinopoulos P. (2006) : Evaluation and optimization of groundwater observation networks using the Kriging methodology. *Environ Model Softw* 21:991–1000 Pp
- Thibault M., Bouazouni O., Hadj Kaddour B., Moali A., (2006) : Plan de Gestion de la Réserve Naturelle du Lac de Réghaïa (Algérie), Projet Life3 TCY/INT/031. Maghreb zones humides. Protection et Dévelop. Durable des Zones Humides en Afrique du Nord ,84p.
- Tiwari A. K., Singh P. K., and Mahato M. K. (2014) : GIS-Based Evaluation of Water Quality Index of Groundwater Resources in West Bokaro coalfield, India. *Current World Environment* Vol. 9(3), 843-850 (2014). <http://dx.doi.org/10.12944/CWE.9.3.35>
- Todd, D. K. & Mays L. W. (2005) : *Groundwater Hydrology*. Third edition Jhon Wiley & Sons, INC. 652P.
- Toubal, A-C. (1998) : Apport de la géophysique à l'étude 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 de Doctorat d'état. IST/USTHB/Bab Ezzouar , 226p.
- Triki I., Zairi M., Dhia HB. (2012) : A geostatistical approach for groundwater head monitoring, network optimisation: case of the Sfax superficial aquifer (Tunisia). *Water Environ J* 27:362–372. doi : 10.1111/j.1747-6593.2012.00352.x
- Zamiche S., Hamaidi-Chergui F. & Demiai A. (2018) : Pollution of the quaternary Aquifer of Mitidja (Algérie) by nitrates : Origins and impacts the quality of water for Human consumption. *Journal of fundamental and applied sciences*. ISSN 1112-9867. 19p.
- Zheng, D. Wang, P. P. (1999) : Modular Three-Dimensional Multispecies Transport Model for Simulation of Advection, Dispersion and Chemical Reactions of Contamination in Groundwater System. *The Hydrogeology Group The University of Alabama*. 239 P.

ANNEXE

Annexe I

Tableau I.1 : Résultats récapitulatifs de l'évapotranspiration calculée par les 03 méthodes période (71-04)

SBV	T°C	P (mm)	E.T.R mm				Moyenne p	% p		
			Turc	Coutagn e	Wundt					
Hamiz	17,08	662,63	568	538	550	552	86		83	83
Harrach	17,08	625,15	546	514	508	523	87	82	81	84
Mazafran	19,94	574,00	540	481	500	507	94	84	87	88
Nador	19,94	566,87	534	476	500	503	94	84	88	89

Tableau I.2 : Estimation de la lame d'eau ruisselée sur le bassin de la Mitidja

SBV	P moyenne (mm)	TR moyenne E (mm)	EIP moyenne (mm)	Lame Ruisselée (mm)
Hamiz	663	552	1163	72
Harrach	625	523	1163	60
Mazafran	574	507	1326	36
Nador	567	503	1326	35

Tableau I.3 : Estimation de la lame d'eau infiltrée et bilan hydrologique

Régions	P Moy (mm)	ET R	Moy (mm)	R (mm)	%	Lame Infiltrée (mm)	%
Hamiz	663		552	72	10,85	39	5,88
Harrach	625		523	60	9,6	42	6,72
Mazafran	574		507	36	6,3	31	5,04
Nador	567		503	35	6,2	29	5,11
Moyenne	607,25		521,25	50,75	8,36	35,25	5,8

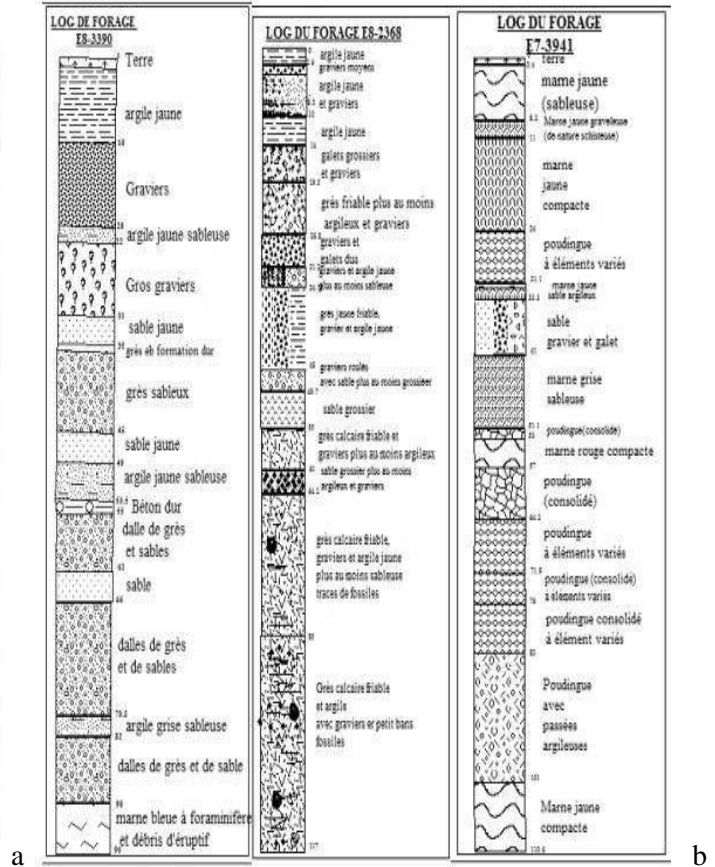
Tableau I 4 : valeurs des transmissivité de la Mitidja

**Valeurs des Transmissivité de la Mitidja obtenues par pompage d'essai
(Toubal, 1998).**

X [Km]	Y [Km]	T.10 ⁻³ m ² /s	X [Km]	Y [Km]	T.10 ⁻³ m ² /s	X [Km]	Y [Km]	T.10 ⁻³ m ² /s
542.25	377.425	0.2	545.53	379.77	5	534.666	372.485	12.8
493.62	359.96	0.23	547.88	385.3	5.3	538.825	368.16	13
473.58	359.75	0.44	538.8	378	5.57	555.35	379.275	13
500.75	348.37	0.7	504.9	360.875	6	506.125	362.675	13
538.2	363.325	0.77	511.8	362.125	6.01	510.86	369.47	13
512.662	367.35	0.8	504.53	351.35	6.1	534.465	364.3	13.5
506.4	363.1	1	531.7	366.15	7	549.32	379.8	13.7
493.925	361.41	1.1	549.58	380.45	7	512.45	360.38	13.8
556.75	384.15	1.3	531.6	365.275	7.5	511	361.7	13.9
497.1	361.09	1.4	552.5	381.1	7.6	533.862	373.792	14
539.11	377.64	1.4	533.905	372.78	8	540.4	375.7	14
533.74	372.65	1.5	540.55	374.2	8	541.98	374.6	14
531.37	370.07	1.95	531.9	367.05	8	509.47	368.65	14.8
519.745	360	2	533.33	373.51	8.6	529.3	371	15
545.8	373.55	2.2	551.7	385.8	8.6	506.8	364.8	15
516.1	356.7	2.2	554.4	377.275	9	511.08	370.02	16
541.925	368.125	2.2	511.35	360.75	9.02	549.25	380.95	16.2
530.56	373.95	2.35	506	364.9	9.02	508.575	369.7	16.3
494.25	354.1	2.5	511.6	359.975	9.02	554.3	373.8	17
489.63	353.72	2.5	533.287	374.095	9.2	533.81	373.17	17
502.425	366.575	2.5	526.9	361.7	9.5	497.56	363.53	17

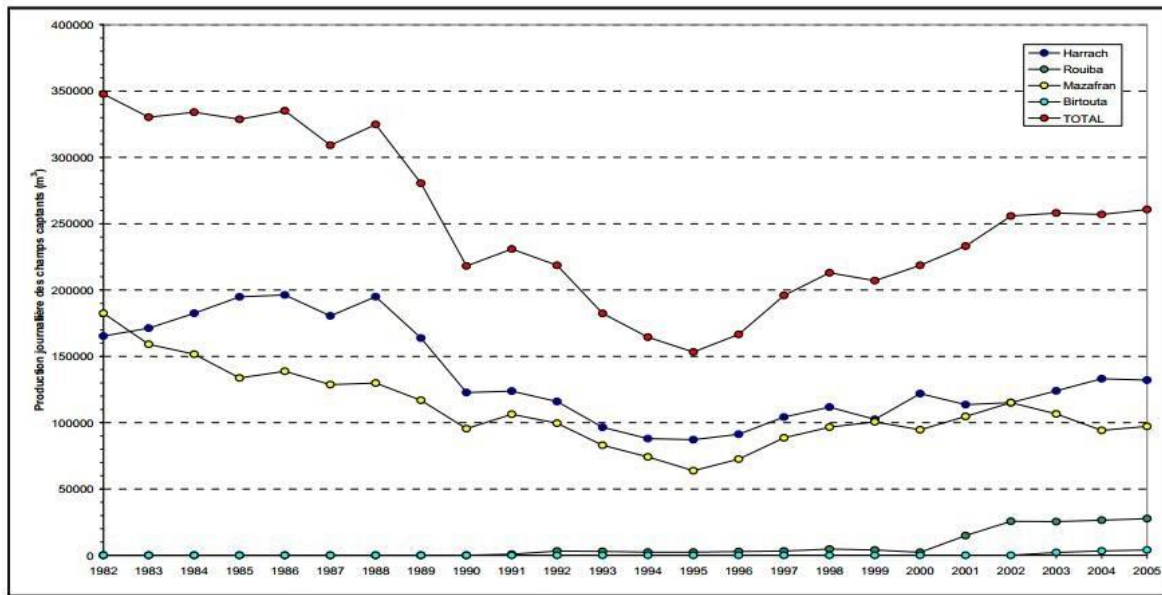
Annexe II

SONDAGE PIEZOMETRE n°1 Hamiz			X : 550550 m	
Carte : Rouiba			Y : 380450 m	
Date des travaux : 1994				
Echelle de la coupe : 1/500 ^e				
Profondeur en m	Tubage et cimentation	Plan d'eau	Coupe	Description lithologique
0				Sable fin calcaireux très peu marneux
10	D-90mm Ø 9"			Argile sableuse en présence de grès calcaireux
20				Grès calcaireux très peu sableux
30	D-90mm Ø 9"			Sable calcaireux peu gréseux
40				Marne calcaireuse très peu sableuse
50				Sable fin calcaireux très peu marneux
60	D-90mm Ø 9"			Sable calcaireux peu gréseux
70				Béton dur
80				dalle de grès et de sables
90				sable



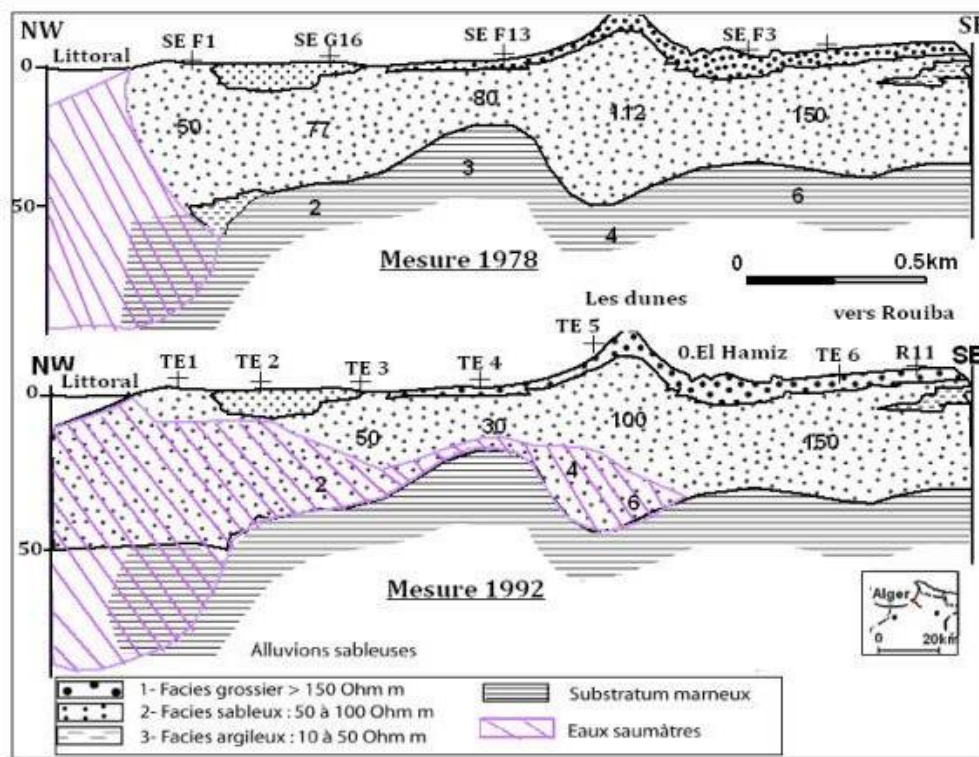
Situation	N° forage	Coordonnées (UTM-WGS84)
Rouiba	E7-7323	X= 519 014,14 Y= 4 063 245,35 Z= 16.8
	E7-3409	X= 521011,4 Y= 4065123,26 Z= 16.8
Sud de Rouiba (est de Hamadi)	E8-3388	X= 528 457,55 Y= 4 059 696,96 Z= 56
	E8-3390	X= 527 907,13 Y= 4 059 548,68 Z= 55.5
Dar El Beida	E8-2368	X= 527 047,39 Y= 4 064 550,83 Z= 28
Baraki	E7-3941	X= 507 765,29 Y= 4 056 395,28 Z= 26.83

Figure II-1 : Sondage piézomètre (a) Hamiz (b) Mazafran



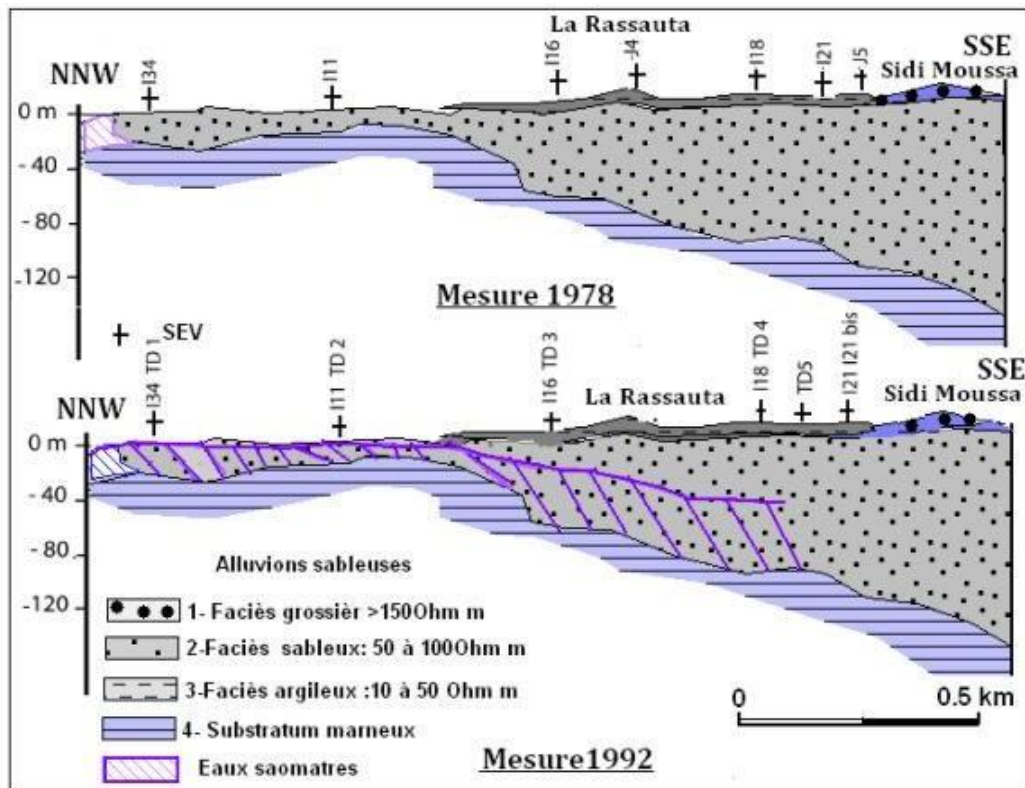
Evolution des volumes d'eau prélevés par la SEAAL par champ captant. (SOGREAH, 2008)

Figure II.2 évolution des volumes d'eau prélevés par la SEAAL (SOGREAH, 2008)



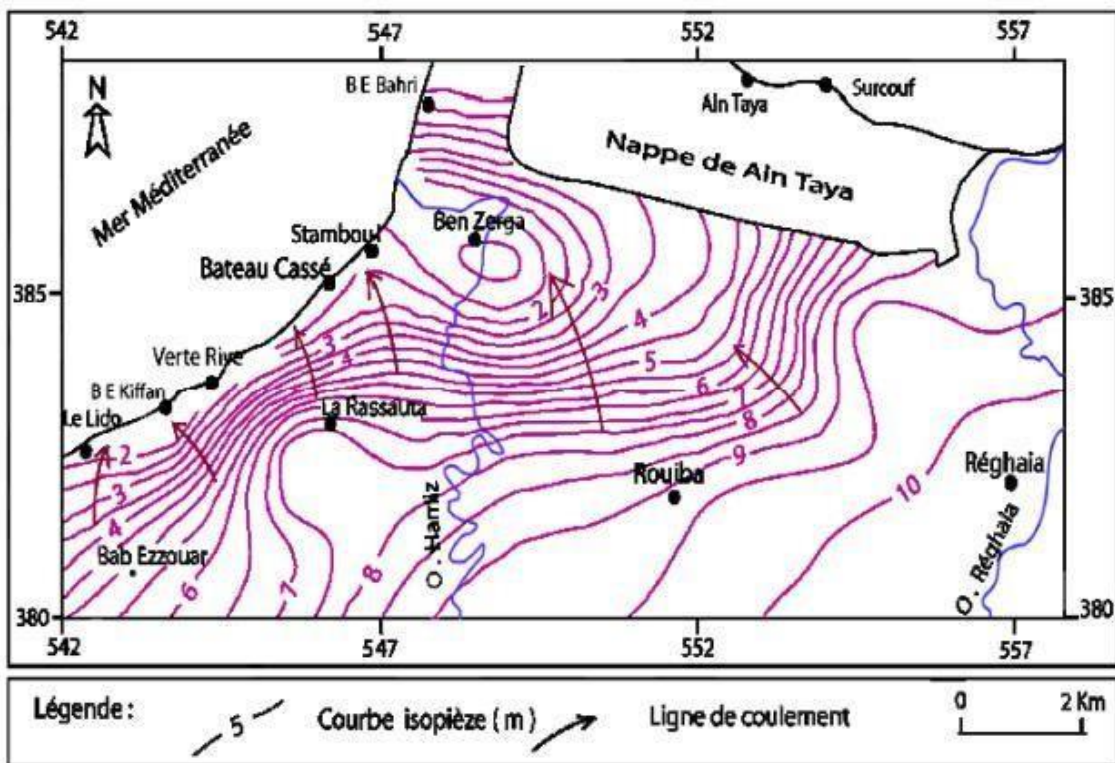
Coupes géoélectriques illustrant la progression de l'invasion marine depuis les dunes jusqu'à Oued el Hamiz (Toubal 1998).

Figure II.3(a) : Coupes géoélectriques de la zone de Oued Hamiz (Toubal, 1998)



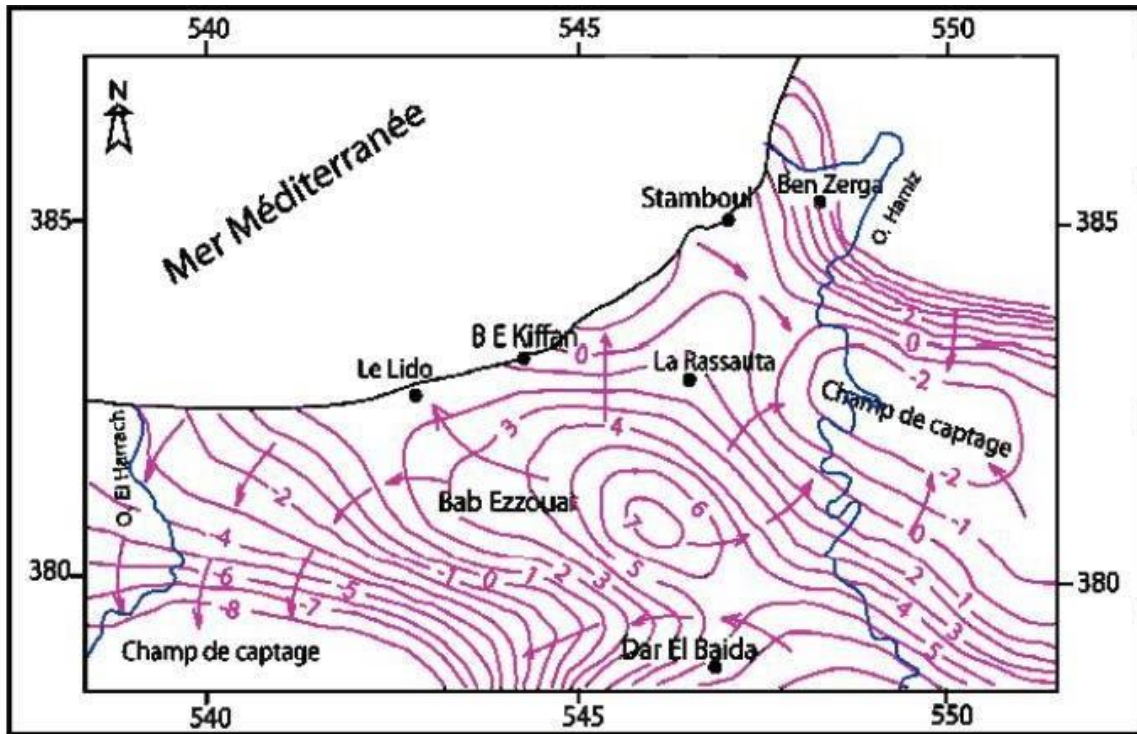
Coupes géoélectriques illustrant la progression de l'invasion marine depuis bateau casé jusqu'à l'aval de Sidi Moussa (Toubal 1998)

Figure II.3(b) : Coupes géoélectriques de la zone de bateau cassé - sidi moussa (Toubal, 1998)



Carte piézométrique de la baie d'Alger de Novembre, 1983 in (Toubal, 1998).

(a)



Carte piézométrique baie d'Alger de Juillet, 1992 in (Toubal, 1998)

(b)

Figure II 4 : carte piézométrique de la Baie d'Algé (a) Novembre 1983 (b) Juillet 1992 (Toubal, 1998)

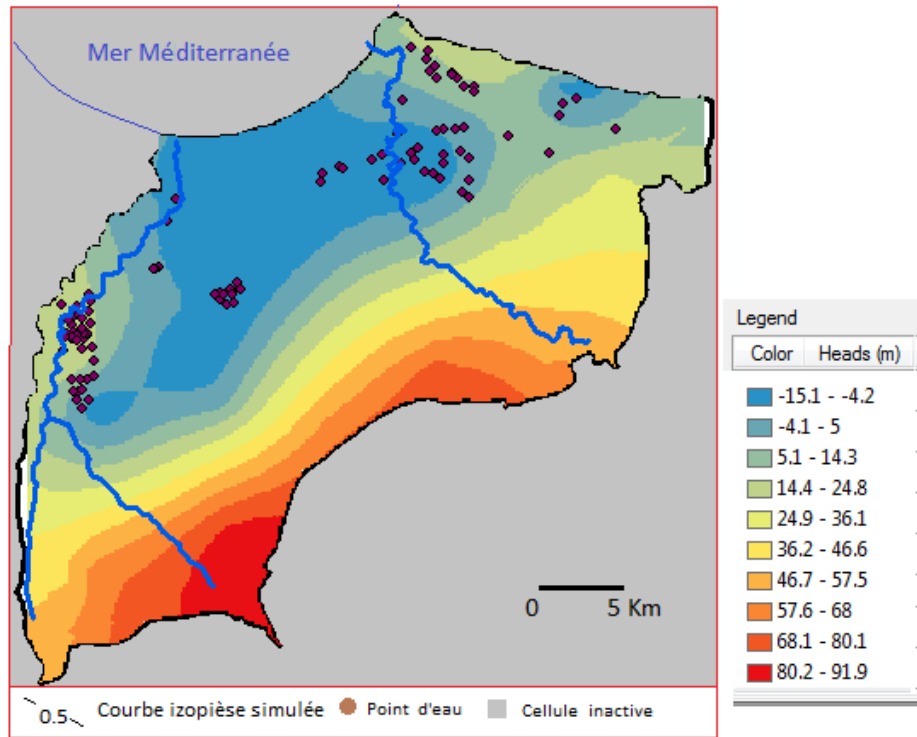


Fig. II.1 : Carte piézométrique de la nappe côtière de la Mitidja simulée en régime permanent (Mai 2007)

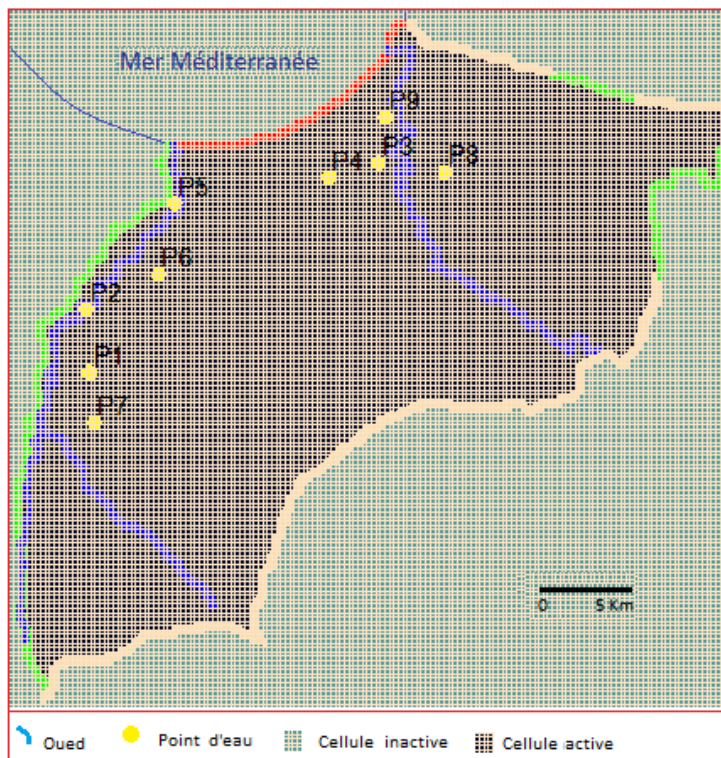


Fig III.2 : Carte de positionnement des points de contrôle

CUMULATIVE VOLUMES	L**3	RATES FOR THIS TIME STEP	L**3/T
IN:		IN:	
STORAGE =	10800206.0000	STORAGE =	24.6041
CONSTANT HEAD =	25080910.0000	CONSTANT HEAD =	818.3100
WELLS =	0.0000	WELLS =	0.0000
RIVER LEAKAGE =	4455005184.0000	RIVER LEAKAGE =	290416.6875
ET =	0.0000	ET =	0.0000
RECHARGE =	1686902528.0000	RECHARGE =	109960.3828
SPECIFIED FLOWS =	41834920.0000	SPECIFIED FLOWS =	2727.0000
TOTAL IN =	6219623936.0000	TOTAL IN =	403946.9688
OUT:		OUT:	
STORAGE =	55639204.0000	STORAGE =	1084.6907
CONSTANT HEAD =	476760032.0000	CONSTANT HEAD =	32956.1211
WELLS =	5330541056.0000	WELLS =	346608.4375
RIVER LEAKAGE =	278154400.0000	RIVER LEAKAGE =	18117.9688
ET =	78540800.0000	ET =	5180.5659
RECHARGE =	0.0000	RECHARGE =	0.0000
SPECIFIED FLOWS =	0.0000	SPECIFIED FLOWS =	0.0000
TOTAL OUT =	6219635200.0000	TOTAL OUT =	403947.7812
IN - OUT =	-11264.0000	IN - OUT =	-0.8125
PERCENT DISCREPANCY =	0.00	PERCENT DISCREPANCY =	0.00

Fig III.3 : Résultat de calcul du bilan hydrique (m³/j) résultant du calage en régime permanent 2007

1

CUMULATIVE VOLUMES	L**3	RATES FOR THIS TIME STEP	L**3/T
IN:		IN:	
STORAGE =	7859994.5000	STORAGE =	1836.6737
CONSTANT HEAD =	15005848.0000	CONSTANT HEAD =	1236.4860
WELLS =	0.0000	WELLS =	0.0000
RIVER LEAKAGE =	1272774016.0000	RIVER LEAKAGE =	290333.0312
ET =	0.0000	ET =	0.0000
RECHARGE =	481956416.0000	RECHARGE =	109960.3828
SPECIFIED FLOWS =	11952441.0000	SPECIFIED FLOWS =	2727.0000
TOTAL IN =	1789548544.0000	TOTAL IN =	406093.5625
OUT:		OUT:	
STORAGE =	35181624.0000	STORAGE =	4944.9722
CONSTANT HEAD =	120335848.0000	CONSTANT HEAD =	31310.6035
WELLS =	1532404224.0000	WELLS =	346608.4375
RIVER LEAKAGE =	79491824.0000	RIVER LEAKAGE =	18148.0215
ET =	22138262.0000	ET =	5082.1729
RECHARGE =	0.0000	RECHARGE =	0.0000
SPECIFIED FLOWS =	0.0000	SPECIFIED FLOWS =	0.0000
TOTAL OUT =	1789551744.0000	TOTAL OUT =	406094.2188
IN - OUT =	-3200.0000	IN - OUT =	-0.6562
PERCENT DISCREPANCY =	0.00	PERCENT DISCREPANCY =	0.00

Fig III.4 : Résultat de calcul du bilan hydrique (m³/j) résultant du calage en régime transitoire 2018

CUMULATIVE VOLUMES	L**3	RATES FOR THIS TIME STEP	L**3/T
IN:		IN:	
STORAGE =	10800206.0000	STORAGE =	24.6041
CONSTANT HEAD =	25080910.0000	CONSTANT HEAD =	818.3100
WELLS =	0.0000	WELLS =	0.0000
RIVER LEAKAGE =	4455005184.0000	RIVER LEAKAGE =	290416.6875
ET =	0.0000	ET =	0.0000
RECHARGE =	1686902528.0000	RECHARGE =	109960.3828
SPECIFIED FLOWS =	41834920.0000	SPECIFIED FLOWS =	2727.0000
TOTAL IN =	6219623936.0000	TOTAL IN =	403946.9688
OUT:		OUT:	
STORAGE =	55639204.0000	STORAGE =	1084.6907
CONSTANT HEAD =	476760032.0000	CONSTANT HEAD =	32956.1211
WELLS =	5330541056.0000	WELLS =	346608.4375
RIVER LEAKAGE =	278154400.0000	RIVER LEAKAGE =	18117.9688
ET =	78540800.0000	ET =	5180.5659
RECHARGE =	0.0000	RECHARGE =	0.0000
SPECIFIED FLOWS =	0.0000	SPECIFIED FLOWS =	0.0000
TOTAL OUT =	6219635200.0000	TOTAL OUT =	403947.7812
IN - OUT =	-11264.0000	IN - OUT =	-0.8125
PERCENT DISCREPANCY =	0.00	PERCENT DISCREPANCY =	0.00

Fig III.5 : Résultat de calcul du bilan hydrique (m³/j) résultant du premier scénario

Point d'observation	P 01	P 02	P 03	P 04	P 05	P 06	P 07	P 08	P 09	
Maille (Row,Column)	(84,18)	(69,18)	(36,82)	(39,71)	(45,37)	(61,33)	(94,21)	(37,98)	(14,89)	
Piézométrie										
Temps (ans)	2007	-13.37	-12.28	-5.74	-7.45	-11.32	-9.56	-10.17	-8.36	-0.27
	0	-13.25	-11.87	-2.89	-5	-6.5	-9.07	-10.1	-4.08	-0.27
	10	-13.65	-12.41	-2.66	-4.84	-6.52	-9.31	-10.5	-3.54	0.7
	20	-13.72	-12.5	-2.57	-4.79	-6.52	-9.37	-10.56	-3.34	0.82
	30	-13.74	-12.52	-2.54	-4.77	-6.52	-9.38	-10.58	-3.26	0.87

```

-----
CUMULATIVE VOLUMES      L**3      RATES FOR THIS TIME STEP      L**3/T
-----
IN:
---
STORAGE = 236269952.0000
CONSTANT HEAD = 156092352.0000
WELLS = 0.0000
RIVER LEAKAGE = 3335886336.0000
ET = 0.0000
RECHARGE = 1281926656.0000
SPECIFIED FLOWS = 30751104.0000
TOTAL IN = 5040926208.0000

OUT:
----
STORAGE = 40824820.0000
CONSTANT HEAD = 235787024.0000
WELLS = 4505396224.0000
RIVER LEAKAGE = 201238496.0000
ET = 57682212.0000
RECHARGE = 0.0000
SPECIFIED FLOWS = 0.0000
TOTAL OUT = 5040929280.0000
IN - OUT = -3072.0000
PERCENT DISCREPANCY = 0.00

IN:
---
STORAGE = 5847.3809
CONSTANT HEAD = 24381.4102
WELLS = 0.0000
RIVER LEAKAGE = 285842.1250
ET = 0.0000
RECHARGE = 109424.7578
SPECIFIED FLOWS = 2561.0000
TOTAL IN = 428056.6562

OUT:
----
STORAGE = 3743.7346
CONSTANT HEAD = 15130.6406
WELLS = 388092.4375
RIVER LEAKAGE = 16252.6670
ET = 4837.4971
RECHARGE = 0.0000
SPECIFIED FLOWS = 0.0000
TOTAL OUT = 428056.9688
IN - OUT = -0.3125
PERCENT DISCREPANCY = 0.00

```

Fig III.6 Résultat de calcul du bilan hydrique (m³/j) résultant du deuxième scénario

```

-----
CUMULATIVE VOLUMES      L**3      RATES FOR THIS TIME STEP      L**3/T
-----
IN:
---
STORAGE = 157308944.0000
CONSTANT HEAD = 52937420.0000
WELLS = 4465813504.0000
RIVER LEAKAGE = 0.0000
ET = 1395455232.0000
RECHARGE = 41328660.0000
SPECIFIED FLOWS = 0.0000
TOTAL IN = 6112843776.0000

OUT:
----
STORAGE = 36842940.0000
CONSTANT HEAD = 415271008.0000
WELLS = 5330541056.0000
RIVER LEAKAGE = 255315184.0000
ET = 74885344.0000
RECHARGE = 0.0000
SPECIFIED FLOWS = 0.0000
TOTAL OUT = 6112855040.0000
IN - OUT = -11264.0000
PERCENT DISCREPANCY = 0.00

IN:
---
STORAGE = 9558.1387
CONSTANT HEAD = 4794.2949
WELLS = 0.0000
RIVER LEAKAGE = 291953.6875
ET = 0.0000
RECHARGE = 82430.7734
SPECIFIED FLOWS = 2694.0000
TOTAL IN = 391430.9062

OUT:
----
STORAGE = 0.0000
CONSTANT HEAD = 25023.6797
WELLS = 346608.4375
RIVER LEAKAGE = 15138.0781
ET = 4661.3975
RECHARGE = 0.0000
SPECIFIED FLOWS = 0.0000
TOTAL OUT = 391431.5938
IN - OUT = -0.6875
PERCENT DISCREPANCY = 0.00

```

Fig III.7 : Résultat de calcul du bilan hydrique (m³/j) résultant du troisième scénario

Tableau. III.2. Variation de la piézométrie dans le cas du 3ème scénario

Point d'observation	P 01	P 02	P 03	P 04	P 05	P 06	P 07	P 08	P 09
Maille (Row,Column)	(84,18)	(69,18)	(36,82)	(39,71)	(45,37)	(61,33)	(94,21)	(37,98)	(14,89)

Piézométrie										
Temps (ans)	2007	-13.37	-12.28	-5.74	-7.45	-11.32	-9.56	-10.17	-8.36	-0.27
	0	-13.25	-11.87	-2.89	-5	-6.5	-9.07	-10.1	-4.08	-0.27
	10	-15.63	-14.35	-3.5	-5.55	-7.37	-11.09	-12.36	-4.99	0.42
	20	-17.39	-16.05	-3.8	-5.85	-8.01	-12.63	-14	-5.54	0.28
	30	-18.6	-17.21	-4	-6.03	-8.44	-13.68	-15.11	-5.86	0.21

VOLUMETRIC BUDGET FOR ENTIRE MODEL AT END OF TIME STEP 1 IN STRESS PERIOD 42

CUMULATIVE VOLUMES		L**3	RATES FOR THIS TIME STEP		L**3/T
IN:					
STORAGE	=	342932992.0000	STORAGE	=	8800.2129
CONSTANT HEAD	=	290134112.0000	CONSTANT HEAD	=	28722.3008
WELLS	=	0.0000	WELLS	=	0.0000
RIVER LEAKAGE	=	4386584576.0000	RIVER LEAKAGE	=	286792.3125
ET	=	0.0000	ET	=	0.0000
RECHARGE	=	1446912640.0000	RECHARGE	=	87279.8984
SPECIFIED FLOWS	=	40199968.0000	SPECIFIED FLOWS	=	2560.0000
TOTAL IN	=	6506764288.0000	TOTAL IN	=	414154.7188
OUT:					
STORAGE	=	38662228.0000	STORAGE	=	51.4739
CONSTANT HEAD	=	276724320.0000	CONSTANT HEAD	=	13800.3252
WELLS	=	5876911104.0000	WELLS	=	382108.5000
RIVER LEAKAGE	=	241538672.0000	RIVER LEAKAGE	=	13811.8711
ET	=	72927232.0000	ET	=	4382.2920
RECHARGE	=	0.0000	RECHARGE	=	0.0000
SPECIFIED FLOWS	=	0.0000	SPECIFIED FLOWS	=	0.0000
TOTAL OUT	=	6506763264.0000	TOTAL OUT	=	414154.4688
IN - OUT	=	1024.0000	IN - OUT	=	0.2500
PERCENT DISCREPANCY	=	0.00	PERCENT DISCREPANCY	=	0.00

Fig III.8 : Résultat de calcul du bilan hydrique (m³/j) résultant du quatrième scénario

Tableau III.3 : Variation de la piézométrie dans le cas du 4ème scénario

Point d'observation	P 01	P 02	P 03	P 04	P 05	P 06	P 07	P 08	P 09	
Maille (Row,Column)	(84,18)	(69,18)	(36,82)	(39,71)	(45,37)	(61,33)	(94,21)	(37,98)	(14,89)	
Piézométrie										
Temps (ans)	2007	-13.37	-12.28	-5.74	-7.45	-11.32	-9.56	-10.17	-8.36	-0.27
	0	-13.25	-11.87	-2.89	-5	-6.5	-9.07	-10.1	-4.08	-0.27
	10	-41.93	-38.33	-9.75	-11.22	-15.87	-29.56	-33.44	-15.88	-1.71
	20	-46.62	-44.11	-11.33	-12.55	-17.57	-35.11	-33.72	-20.26	-2.25
	30	-49.28	-46.39	-10.47	-12.39	-17.92	-36.71	-35.81	-17.38	-1.99

CUMULATIVE VOLUMES		L**3	RATES FOR THIS TIME STEP		L**3/T
IN:					
STORAGE	=	578990720.0000	STORAGE	=	45557.0352
CONSTANT HEAD	=	149462512.0000	CONSTANT HEAD	=	13673.8711
WELLS	=	0.0000	WELLS	=	0.0000
RIVER LEAKAGE	=	4374339072.0000	RIVER LEAKAGE	=	285851.2812
ET	=	0.0000	ET	=	0.0000
RECHARGE	=	1677023616.0000	RECHARGE	=	109301.8281
SPECIFIED FLOWS	=	40285460.0000	SPECIFIED FLOWS	=	2626.0000
TOTAL IN	=	6820101632.0000	TOTAL IN	=	457010.0000
OUT:					
STORAGE	=	58661832.0000	STORAGE	=	7.1495
CONSTANT HEAD	=	321891200.0000	CONSTANT HEAD	=	18537.5645
WELLS	=	6090166784.0000	WELLS	=	415930.1562
RIVER LEAKAGE	=	273015936.0000	RIVER LEAKAGE	=	17561.1152
ET	=	76352568.0000	ET	=	4974.0400
RECHARGE	=	0.0000	RECHARGE	=	0.0000
SPECIFIED FLOWS	=	0.0000	SPECIFIED FLOWS	=	0.0000
TOTAL OUT	=	6820088320.0000	TOTAL OUT	=	457010.0312
IN - OUT	=	13312.0000	IN - OUT	=	-3.1250E-02
PERCENT DISCREPANCY	=	0.00	PERCENT DISCREPANCY	=	0.00

Fig III.9 : Résultat de calcul du bilan hydrique (m³/j) résultant du cinquième scénario

Tableau. III.4. Variation de la piézométrie dans le cas du 5ème scénario

Point d'observation	P 01	P 02	P 03	P 04	P 05	P 06	P 07	P 08	P 09	
Maille (Row,Column)	(84,18)	(69,18)	(36,82)	(39,71)	(45,37)	(61,33)	(94,21)	(37,98)	(14,89)	
Piézométrie										
Temps (ans)	2007	-13.37	-12.28	-5.74	-7.45	-11.32	-9.56	-10.17	-8.36	-0.27
	0	-13.25	-11.87	-2.89	-5	-6.5	-9.07	-10.1	-4.08	-0.27
	10	-19.17	-17.54	-7.16	-8.1	-12.01	-12.95	-15.24	-10.91	-0.74
	20	-22.83	-21.01	-7.67	-9.1	-13.19	-15.84	-18.5	-11.83	-0.94
	30	-26.03	-24.02	-8	-9.42	-14.16	-18.32	-21.25	-12.49	-1.07

CUMULATIVE VOLUMES		L**3	RATES FOR THIS TIME STEP		L**3/T
IN:			IN:		
STORAGE	=	324509536.0000	STORAGE	=	5665.8154
CONSTANT HEAD	=	286468544.0000	CONSTANT HEAD	=	27404.5859
WELLS	=	0.0000	WELLS	=	0.0000
RIVER LEAKAGE	=	4385135104.0000	RIVER LEAKAGE	=	286449.6562
ET	=	0.0000	ET	=	0.0000
RECHARGE	=	1460637056.0000	RECHARGE	=	88203.3516
SPECIFIED FLOWS	=	39512912.0000	SPECIFIED FLOWS	=	2527.0000
TOTAL IN	=	6496263680.0000	TOTAL IN	=	410250.4062
OUT:			OUT:		
STORAGE	=	54724616.0000	STORAGE	=	1040.3922
CONSTANT HEAD	=	278298752.0000	CONSTANT HEAD	=	14369.7383
WELLS	=	5836788736.0000	WELLS	=	375647.5938
RIVER LEAKAGE	=	253428240.0000	RIVER LEAKAGE	=	14806.9922
ET	=	72903480.0000	ET	=	4385.5361
RECHARGE	=	118336.4688	RECHARGE	=	0.0000
SPECIFIED FLOWS	=	0.0000	SPECIFIED FLOWS	=	0.0000
TOTAL OUT	=	6496262144.0000	TOTAL OUT	=	410250.2500
IN - OUT	=	1536.0000	IN - OUT	=	0.1562
PERCENT DISCREPANCY	=	0.00	PERCENT DISCREPANCY	=	0.00

Fig III.10 : Résultat de calcul du bilan hydrique (m³/j) résultant du sixième scénario

Tableau. III.5 : Variation de la piézométrie dans le cas du 6ème scénario

Point d'observation	P 01	P 02	P 03	P 04	P 05	P 06	P 07	P 08	P 09	
Maille (Row,Column)	(84,18)	(69,18)	(36,82)	(39,71)	(45,37)	(61,33)	(94,21)	(37,98)	(14,89)	
Piézométrie										
Temps (ans)	2007	-13.37	-12.28	-5.74	-7.45	-11.32	-9.56	-10.17	-8.36	-0.27
	0	-13.25	-11.87	-2.89	-5	-6.5	-9.07	-10.1	-4.08	-0.27
	10	-41.91	-38.32	-9.76	-11.22	-15.87	-29.64	-33.42	-15.91	-1.71
	20	-41.68	-40.29	-11.31	-12.48	-17.1	-32.7	-31.3	-20.25	-2.25
	30	-40.22	-38.92	-10.33	-12.15	-16.83	-31.69	-30.5	-17.2	-1.96

$$\frac{1}{2}(1 + \rho) \frac{B^2}{\delta^2} = \frac{Q'_{0x}}{K} X + \frac{Q_w}{4\pi K} \operatorname{Ln} \left[\frac{(X - X_w)^2 + Y^2}{(X + X_w)^2 + Y^2} \right]$$

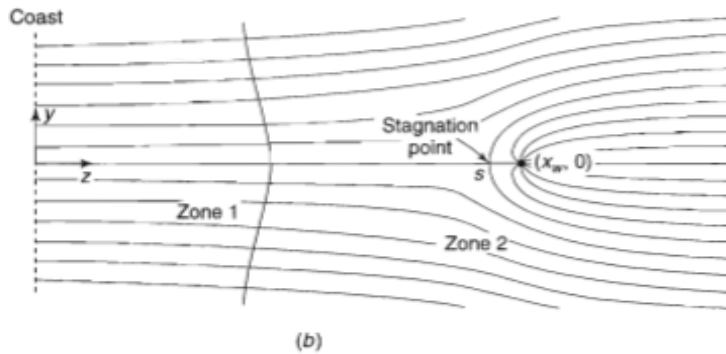
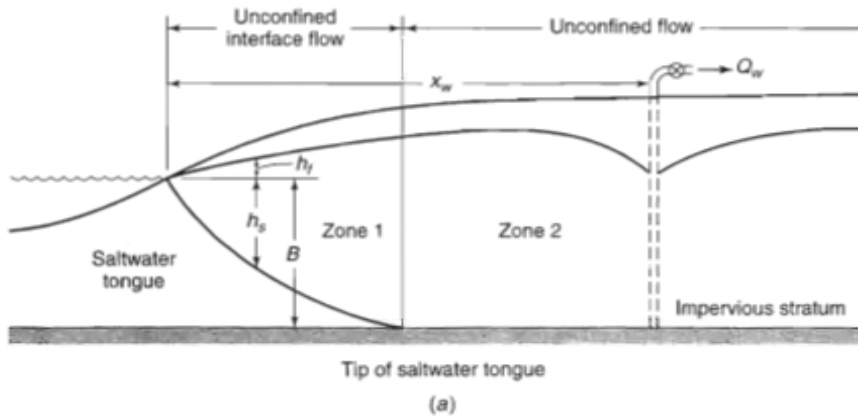


Figure 14.5.1. Shallow coastal aquifer with a well (after Strack⁵⁶).

Figure IV.1 Formule de Strack cité par Todd et Mays (2005) pp(598) :

where

$$\delta = \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} \quad (14.5.2)$$

- B : depth to bedrock below mean sea level
- Q'_{0x} : freshwater flow per unit length of shoreline (assumed uniform from infinity to the coast)
- Q_w : constant pumping rate of the well superimposed on Q'_{0x}
- K : hydraulic conductivity of the aquifer
- x_w : distance between the well and the shoreline (see Figure 14.5.1); and
- (x, y) : x - y coordinates of the toe of the interface (see Figure 14.5.1).

For the stagnation point (x_s, y_s) , Strack⁵⁶ obtained

$$x_s = x_w \left[1 - \frac{Q_w}{\pi Q'_{0,x} x_w} \right]^{1/2}; \quad y_s = 0 \quad (14.5.3)$$

Cinquième scénario

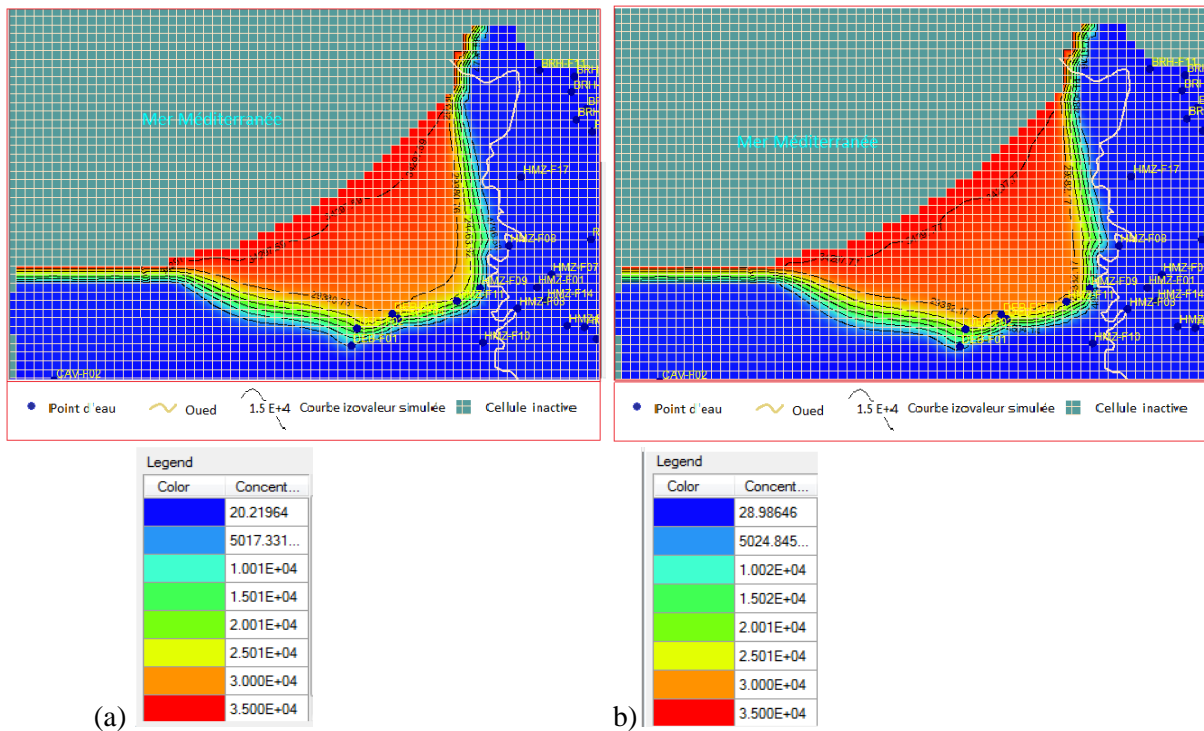


Figure IV2 : Carte de simulation du font salé résultant du cinquième scénario : (a) 2028 et (b) 2038.
Sixième Scénario

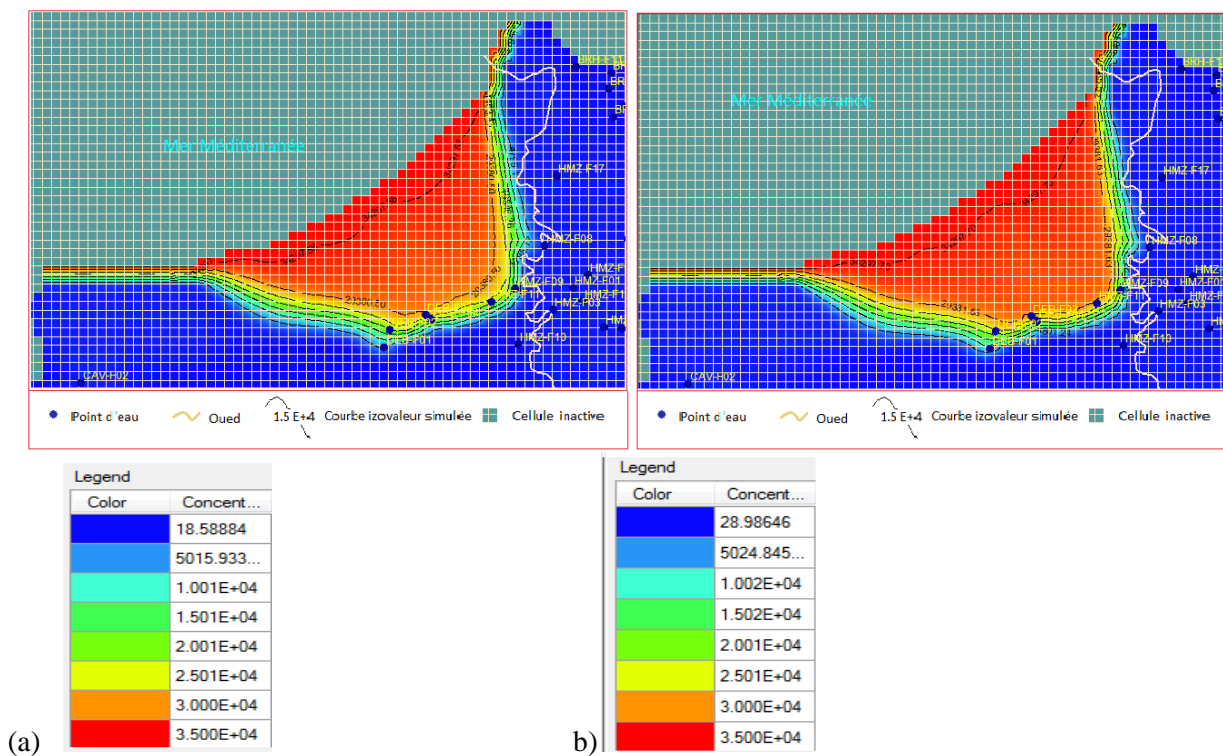


Figure IV3 : Carte de simulation du font salé résultant du sixième scénario : (a) 2028 et (b) 2038.