



Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed  
Faculté des Sciences de la Terre et de l'Univers

**THESE**

Pour l'obtention du diplôme de Doctorat en Sciences  
Sciences de la Terre  
Option : Hydrogéologie

Caractérisation des principaux paramètres affectant les eaux  
souterraines de la plaine de Sidi Bel Abbès à l'aide du programme  
Visual Modflow (applications et perspectives).

Présentée et soutenue publiquement par :  
Bellaredj Abderahim El Mehdi

Devant le jury composé de :

Nadji Abdelmansour, Professeur, Université d'Oran 2  
Mansour Hamidi, Professeur, Université d'Oran 2  
Boudjemline Djamel, M.C.A., Université USTO  
Safa Aïssa, M.C.A., Université d'Oran 2  
Azzaz Habib, M.C.A., Université de Mascara  
Bouanani Abdelrezak, Professeur, Université de Tlemcen

Président  
Directeur de thèse  
Examineur  
Examineur  
Examineur  
Examineur

Le 24 / 10 / 2019

Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed  
Faculté des Sciences de la Terre et de l'Univers

**THESE**

Pour l'obtention du diplôme de Doctorat en Sciences

Sciences de la Terre  
Option : Hydrogéologie

Caractérisation des principaux paramètres affectant les eaux  
souterraines de la plaine de Sidi Bel Abbès à l'aide du programme  
Visual Modflow (applications et perspectives).

Présentée et soutenue publiquement par :  
Bellaredj Abderahim El Mehdi

Devant le jury composé de :

Nadji Abdelmansour, Professeur, Université d'Oran 2  
Mansour Hamidi, Professeur, Université d'Oran 2  
Boudjemline Djamel, M.C.A., Université USTO  
Safa Aïssa, M.C.A., Université d'Oran 2  
Azzaz Habib, M.C.A., Université de Mascara  
Bouanani Abdelrezak, Professeur, Université de Tlemcen

Président  
Directeur de thèse  
Examineur  
Examineur  
Examineur  
Examineur

Le 24 / 10 / 2019

*COISRIGTE DON NEACH...*

*AS GRÀDHAICHE DHOMH...*

*MO MHÀTHAIR.*

## ***Avant-propos***

*Je tiens avant tout à exprimer mes sincères remerciements envers toutes les personnes qui ont contribué à l'élaboration de ce travail.*

*Mes plus vifs remerciements s'adressent en premier lieu au professeur **Mansour Hamidi** de l'Université d'Oran 2, qui m'a dirigé et orienté tout au long de ce travail. La confiance qu'il m'a témoignée ainsi que les conseils qu'il m'a prodigués ont grandement contribué à la réussite de cette thèse.*

*Pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury, je remercie vivement le professeur **Nadji Abdelmansour** de l'Université d'Oran 2.*

*Pour le plaisir de les compter parmi le jury, je remercie :*

*le Dr. **Boudjemline Djamel** de l'université de l'USTO,*

*le Dr. **Safa Aïssa** de l'Université d'Oran 2,*

*le Dr. **Azzaz Habib** de l'Université de Mascara et,*

*le Professeur **Bouanani Abdelrezak** de l'Université de Tlemcen.*

*Au travers de leurs remarques et suggestions, ils ont contribué à l'amélioration notoire de ce manuscrit.*

## تمييز أهم العوامل المؤثرة على المياه الجوفية في سهل سيدي بلعباس باستعمال البرنامج الرقمي Visual Modflow (تطبيقات وتطلعات).

### ملخص :

لقد أصبحت الساكنة بمدينة سيدي بلعباس تعتمد على ولايتي تلمسان و معسكر لاستقاء حاجاتها المتزايدة من مياه الشرب. غياب سدود ذات طاقة استيعاب كبيرة و قلة تساقط الأمطار يضاف إلى فقر المعلومات المتعلقة بالمياه الجوفية في المنطقة. رغم هذا، يمكن اعتبار طبقة المياه الجوفية المنتمية لحقبة البليو-كواترنير استثناء في المنطقة. تعتبر هذه الطبقة أهم خزان مائي تحت أرضي. يمتد هذه الأخير على مساحة تناهز الثمانمائة كيلومتر مربع وهو مستغل من قبل عدد كبير من الآبار، موجّهة في معظمها للري. لذلك، فإن الأهمية الإستراتيجية لهذا المورد المائي لمدينة سيدي بلعباس واضحة ودراسته (باستعمال نموذج رقمي) بالتالي تصبح ضرورة.

تهدف هذه الدراسة لتحديد القدرات المائية-الجوفية في سهل سيدي بلعباس، تعريف العوامل التي تؤثر عليها من الجانب الكمي و الكيفي و إلى اقتراح حلول و توصيات كفيلة بحمايتها من سوء الاستغلال. نتائج هذا البحث أعطت معلومات أوضح في ما يتعلق بالخصائص الشكلية، المناخية، الجيولوجية و البنيوية لمنطقة الدراسة. الدراسة الكيماوية حددت العوامل المتحكممة في ملوحة مياه الطبقة الجوفية المنتمية لحقبة البليو-كواترنير. النتائج أظهرت تلوث هته الأخيرة بمياه الصرف، ما يجعلها غير صالحة للاستهلاك البشري، لاستعمالها كمياه للري (من ناحية الملوحة) و ضارة لمعظم النباتات الحساسة، بسبب التركيز العالي للكور الذي يميزها. في ما يتعلق بالنموذج الحاسوبي والذي أنجز باستعمال البرنامج الرقمي (Visual Modflow)، مكن هذا الأخير من تعريف الظروف الموجودة عند أطراف طبقة المياه الجوفية المنتمية لحقبة البليو-كواترنير، مقارنة الخصائص الهيدروديناميكية المحددة لها، تخمين امتدادها (جانبيا و رأسيا)، إضافة إلى ملؤها و تفرغها. بهذا، اظهر النموذج الرقمي استهلاكا فوق القدرة لمياه الطبقة الجوفية المنتمية لحقبة البليو-كواترنير.

**كلمات مفتاحاه :** الطبقة الجوفية المنتمية لحقبة البليو-كواترنير، النموذج الرقمي، سهل سيدي بلعباس، استهلاك

فوق القدرة، *Visual Modflow*

# « Characterization of the principal parameters affecting groundwater in the plain of Sidi Bel Abbès using the program Visual Modflow (applications and prospects) »

## **Abstract:**

The population of the city of Sidi Bel Abbès has become over time reliant on the Wilayas of Tlemcen and Mascara to satisfy its growing needs for drinking water. The absence of big dams and the average and often irregular rainfall are superimposed to the poor understanding of the groundwater potential in the region. Notwithstanding this, the plio-quaternary alluvial aquifer of the Sidi Bel Abbès plain can be considered as an exception. This unconfined aquifer, which stretches over 800 km<sup>2</sup> is drained by the Mekerra River and exploited by an impressive number of wells and boreholes, most of which are intended for irrigation. The strategic importance of this water resource for the city of Bel Abbès is immense. Thus, its characterization (by modeling) is a necessity.

The present study aims to evaluate the groundwater potential in the plain of Sidi Bel Abbès, characterize the main parameters affecting both the quality and the quantity of said waters and propose practical solutions and recommendations, to protect them against deterioration and overexploitation.

The results obtained at the end of this work permitted a better understanding of the morphological, climatic, geological and structural characteristics of the study area. The hydrochemical study emphasized the mechanisms and processes controlling the salinity of the plio-quaternary aquifer waters. The results obtained demonstrated the contamination of the aquifer waters by wastewaters. Therefore, they are in their majority, unfit for human consumption, unsuitable for irrigation from a salinity point of view and inappropriate due to their high concentrations in Cl, for most sensitive plants. The computer modeling of the plio-quaternary aquifer system performed using the program Visual Modflow, permitted the characterization of the aquifer boundary conditions, the approximation of its hydrodynamic proprieties, the estimation of its extension (lateral and vertical), its recharge and its destocking. Thus, the computer modeling of the plio-quaternary aquifer has clearly demonstrated its overexploitation.

**Key words:** *Computer modeling, Plio-quaternary aquifer, Overexploitation, Sidi Bel Abbès plain, Visual Modflow.*

## **« Caractérisation des principaux paramètres affectant les eaux souterraines de la plaine de Sidi Bel Abbès à l'aide du programme Visual Modflow (applications et perspectives) »**

### **Résumé :**

La population de la ville de Sidi Bel Abbès est devenue au fil du temps dépendante des Wilayas de Tlemcen et de Mascara pour satisfaire ses besoins croissants en eau potable.

L'absence de grands barrages et la pluviométrie moyenne et irrégulière viennent se superposer à une pauvre connaissance du potentiel en eaux souterraines de la Wilaya de Sidi Bel Abbès. Nonobstant cela, l'aquifère des alluvions plio-quadernaires de la plaine de Bel Abbès peut être considéré comme une exception. Cet aquifère qui s'étend sur plus de 800 km<sup>2</sup>, porte une nappe libre drainée par l'Oued Mekerra et captée par un nombre assez impressionnant de puits et forages, destinés dans leur quasi majorité à l'irrigation des terres. L'importance stratégique de cette ressource en eau pour la Wilaya de Bel Abbès n'est donc pas à préciser et sa caractérisation (par modélisation) devient alors une nécessité.

La présente étude vise à identifier les potentialités en eaux souterraines de la plaine de Sid Bel Abbès, à caractériser les principaux paramètres les affectant à la fois qualitativement et quantitativement et à proposer des solutions et recommandations pratiques, permettant de les protéger contre la détérioration et la surexploitation.

Les résultats obtenus au terme de ce travail ont permis de mieux connaître les caractéristiques morphologiques, climatiques, géologiques et structurales générales de la zone d'étude. L'étude hydrochimique a mis l'accent sur les mécanismes et processus contrôlant la salinité des eaux de l'aquifère plio-quadernaire. Les résultats obtenus ont démontré la contamination des eaux de l'aquifère par les rejets; elles sont de ce fait dans leur majorité, impropres à la consommation humaine, inappropriées à l'irrigation d'un point de vue salinité et déconseillées en raison des teneurs en Cl les caractérisant, pour la majorité des plantes sensibles. La modélisation du système aquifère plio-quadernaire faite à l'aide du programme Visual Modflow a permis l'appréciation des conditions aux limites de l'aquifère, l'approximation des paramètres hydrodynamiques le caractérisant, l'estimation de son extension (latérale et verticale), sa recharge et son déstockage. Ainsi, la modélisation du système aquifère plio-quadernaire a clairement démontré, sa surexploitation.

**Mots clés :** *Aquifère plio-quadernaire, Modélisation, Plaine de Sidi Bel Abbès, Surexploitation, Visual Modflow.*

# TABLE DES MATIERES

## Introduction générale

### Première partie

## Caractéristiques physiques de la plaine de Sidi Bel Abbès et hydrochimie des eaux de l'aquifère plio-quadernaire

<b>Chapitre I- Etude physique</b> .....	3
I.1- Découpage administratif de la wilaya de Sidi Bel Abbès .....	3
I.2- Situation géographique de la plaine de Sidi Bel Abbès .....	3
I.3- Aperçu morphologique.....	4
I.4- Aperçu morpho-métrique .....	5
I.5- Aperçu hydrographique .....	6
I.6- Pédologie et couvert végétal .....	9
<b>Chapitre II- Etude climatique</b> .....	12
II.1- Précipitations .....	12
II.1.1- Précipitations annuelles.....	12
II.1.2- Précipitations saisonnières et mensuelles.....	14
II.2- Températures .....	15
II.3- Évapotranspiration .....	16
II.4- Humidité et vent.....	17
II.5- Hydrométrie .....	18
II.6- Bilan hydrologique de la plaine de Sidi Bel Abbès.....	19
II.7- Conclusion .....	21
<b>Chapitre III- Etude géologique</b> .....	22
III.1- Introduction .....	22
III.2- Stratigraphie .....	24
III.2.1- Le Mésozoïque .....	24
III.2.1.1- Le Trias .....	24
III.2.1.2- Le Jurassique.....	24
III.2.1.3- Le Crétacé .....	24
III.2.2- Le Cénozoïque.....	25
III.2.2.1- Le Pléogène.....	25
III.2.2.2 -Le Néogène .....	25
III.2.2.3- Le Plio-quadernaire.....	26
III.2.2.4- Le Quadernaire .....	26
III-3 Tectonique .....	27
<b>Chapitre IV- Etude hydrogéologique</b> .....	30
IV.1- Les calcaires et dolomies du Jurassique-Crétacé de Sidi Ali Benyoub.....	30
IV.2- Les calcaires del'Aptien de Zigyne.....	30
IV.3- Les calcaires de l'Eocène de Sidi Ali Boussidi.....	30
IV.4- Les grès du Pliocène de la forêt de Ténira .....	31
IV.5- Les alluvions du Plio-quadernaire.....	31
IV.5.1- Carte isopach/limite des conglomérats de l'aquifère plio-quadernaire .....	40
IV.5.2- Piézométrie .....	42

IV.5.3- Interaction nappe / Mekerra.....	44
IV.6- Comportement hydrodynamique.....	46
IV.6.1- Transmissivité.....	47
IV.6.2- Coefficient d'emménagement.....	47
<b>Chapitre V- Etude hydrochimique</b> .....	<b>48</b>
V.1- Présentation des données .....	50
V.2- Paramètres physiques .....	50
V.2.1- Le résidu sec et la conductivité électrique .....	50
V.3- Paramètres chimiques .....	54
V.3.1- Les chlorures .....	54
V.3.2- Les nitrates .....	55
V.3.3- Normes de l'organisation mondiale de la santé (OMS) .....	57
V.4- Classification des eaux .....	57
V.4.1- Classification des eaux en fonction de la dureté (TH).....	57
V.4.2- Classification géochimique .....	59
V.5- Traitement statistique des données .....	64
V.6- Origine de la salinité des eaux de la nappe plio-quaternaire .....	67
V.6.1- Tendances générales .....	67
V.6.2- Mécanismes d'acquisition de la salinité des eaux de la nappe plio-quaternaire .....	73
V.7- Adéquation des eaux de la nappe plio-quaternaire à l'irrigation.....	79
V.7.1- La salinité.....	79
V.7.2- Les chlorures .....	82
V.7.3- Le sodium.....	83
V.7.4- Le magnésium.....	87
V.7.5- Effet de la salinité et de la sodicité sur le sol .....	88
<b>VI- Conclusion</b> .....	<b>92</b>

## **Deuxième partie**

### **Modélisation des eaux souterraines de la plaine de Sidi Bel Abbès**

<b>Chapitre I- Modélisation d'un système hydrogéologique donné</b> .....	<b>95</b>
I.1- Objectifs .....	97
I.2- Disponibilité des données .....	97
I.3- Conceptualisation du modèle .....	97
I.4- Modèle mathématique .....	98
I.5- Modèle numérique .....	99
I.6- Equation de diffusivité .....	100
I.7- Modèle 2D de l'écoulement souterrain .....	101
I.7.1- Les méthodes des différences finies .....	104
I.7.2- Solutions des équations des différences finies .....	108
I.7.3- Cellules obtenues par la méthode des différences finies .....	108
I.8- Modèle 3D de l'écoulement souterrain .....	110
I.9- Les conditions aux limites.....	111
I.10- Calage du modèle .....	114
I.10.1- Analyse de sensibilité .....	115
I.10.2- Calage en régime permanent .....	115
I.10.3- Calage en régime transitoire.....	115

I.11- Prédictions.....	116
<b>Chapitre II- Modélisation du système aquifère plio-quadernaire</b> .....	<b>117</b>
II.1- Modèle conceptuel.....	117
II.1.1- Limites du modèle conceptuel.....	117
II.1.2- Epaisseur de l'aquifère.....	123
II.1.3- Caractéristiques hydrodynamiques.....	124
II.1.4- Conditions aux limites.....	127
II.1.4.1- Pertes et apports latéraux.....	127
II.1.4.2- La recharge.....	127
II.1.4.3- Interaction nappe/Oueds.....	129
II.1.4.4- Prélèvements.....	130
II.1.5- Période de simulation.....	143
II.2- Modèle numérique.....	144
II.2.1- Présentation du programme.....	144
II.2.2- Discrétisation.....	145
II.2.2.1- Extension du domaine modélisé.....	145
II.2.2.2- Epaisseur des formations aquifères.....	146
II.2.2.3- Les conditions aux limites.....	152
II.2.3- Calibration du modèle.....	157
II.2.3.1- Régime permanent.....	157
II.2.3.2- Régime transitoire.....	159
II.2.3.3- Paramètres hydrodynamiques de la calibration.....	166
II.2.4- Bilan général (1971-2014).....	168
II.2.4.1- Entrées.....	168
II.2.4.2- Sorties.....	170
II.2.4.3- Variations des réserves.....	172
II.2.5- Prédictions.....	174
II.2.5.1- Démarche adoptée.....	174
II.2.5.1.1- Scénario 1.....	174
II.2.5.1.2- Scénario 2 (état intermédiaire).....	175
II.2.5.1.3 - Scénario 3.....	176
II.2.5.2 - Résultats et interprétations.....	176
II.2.5.2.1- Scénario 1.....	176
II.2.5.2.2- Scénario 2.....	181
II.2.5.2.3- Scénario 3.....	185
<b>III- Conclusion</b> .....	<b>195</b>

## **Conclusion générale et recommandations**

<b>I- Conclusion générale</b> .....	<b>197</b>
<b>II- Recommandations</b> .....	<b>201</b>

## *Introduction général*

Depuis le début du 20<sup>ème</sup> siècle jusqu'à nos jours, le taux d'augmentation de la demande globale en eau a dépassé par deux fois celui de la croissance mondiale de la population (UN Water meeting, 2014). Cette croissance couplée au développement non durable caractérisant certaines régions dans le monde a considérablement aggravé le risque anthropique sur la ressource (Gain & Giupponi, 2015) et a mis presque un tiers de la population mondiale sous risque de pénurie d'eau (water-stress) (Vörösmarty et al, 2010). Selon des prévisions futures, au moins 40% de la population mondiale sera confrontée à de sérieux problèmes pour obtenir des eaux de qualité pour l'AEP et l'agriculture (Gleick, 2001). De nombreuses études ont déjà documenté la déplétion des ressources en eaux et montrent qu'une grande partie du monde (régions arides et semi-arides) sera plus sèche dans les années à venir, en raison notamment, de l'augmentation prédite de la demande en eau pour l'agriculture, l'énergie, l'industrie, etc., (Custodio, 2002e; Wada & Bierkens, 2014) et des effets du changement climatique (Vörösmarty et al, 2000; Mirchi et al, 2013; Steinschneider, 2015; Llamas & Martínez-Santos, 2005).

Contraints par la faiblesse de la ressource superficielle, plusieurs pays à travers le monde se sont rabattus sur les eaux souterraines; ce qui a mis cette ressource sous grande pression. En Algérie du Nord par exemple, la moyenne d'exploitation des aquifères était estimée en 2002 à environ 80% (Boudjadja et al, 2003; Loucif, 2003). Cette surexploitation a causé des intrusions d'eau salée et une salinisation des sols dans de nombreuses régions du pays (Boudjadja et al, 2003; Loucif, 2003; Douaoui et al, 2006; Bouarfa et al; 2009).

L'Algérie, et malgré les efforts consentis par les pouvoirs publiques (construction de nouveaux barrages et recours au dessalement de l'eau de mer) enregistrera un déficit en eau de près de 1 milliard de m<sup>3</sup> à l'horizon 2025. En effet, en addition au manque de ressources et à l'augmentation continue des besoins, vient s'ajouter l'envasement des barrages, l'évaporation des étendues d'eau douce, les pertes et l'eutrophisation des eaux des barrages, l'intrusion des eaux marines dans les aquifères côtiers, les rejets industriels et domestiques dans les cours d'eau, l'utilisation extensive des engrais et des pesticides, etc.

Dans la Wilaya de Sidi Bel Abbès, et à l'image des autres régions du pays, l'eau est au centre des inquiétudes. En effet, la Wilaya vit une situation alarmante et qui ne cesse de s'aggraver. Avec l'augmentation des besoins économiques et une demande encore plus accrue en perspective dans les horizons futurs, le déficit enregistré entre l'offre et la demande est le moins que l'on puisse dire atterrant.

Le potentiel en termes de ressources en eau superficielles dans la région de Sidi Bel Abbès est dérisoire. En témoigne les piètres quantités d'eau mobilisables par les quelques ouvrages présents dans la Wilaya (le barrage Sarno, le petit barrage d'écêtement de Tabia, onze retenues collinaires et six sources). Cet état des lieux est confirmé par le fait que la plus grande

partie des besoins en eau potable de Sidi Bel Abbès provient des Wilayas limitrophes, Tlemcen et Mascara, et plus précisément des barrages, Sidi Abdelli, Bouhanifia et Cheurfa et de la station de dessalement de l'eau de mer de Tlemcen.

A la lumière de ce qui vient de suivre, le rôle majeur que joue la ressource souterraine dans l'approvisionnement en eau de la région de Sidi Bel Abbès apparait clairement. Nonobstant cela, le potentiel réel (quantité et qualité) de la ressource souterraine au niveau de la plaine de Bel abbès reste mal connu, en raison du nombre réduit d'étude dont à fait l'objet cette région; on citera néanmoins les travaux de Sourisseau (1970-1973), Lerolle (1976), Lebid (2001) et Yousfi (2008).

La ressource souterraine dans la plaine de Bel Abbès subie, et depuis des années déjà une détérioration et une exploitation anarchique, en raison de la pollution et de la baisse sensible des précipitations au niveau de la plaine; le cas de l'aquifère plio-quadernaire en est l'exemple le plus édifiant. En effet, cet aquifère à remplissage alluvionnaire plio-quadernaire, s'étendant sur près de 800 km<sup>2</sup> connaît des baisses piézométriques significatives depuis le début des années 70s et jusqu'à nos jours. Ainsi, l'identification des processus hydrogéologiques régissant cette ressource est nécessaire pour permettre, non seulement le contrôle de sa qualité, mais aussi garantir sa pérennité. Toutefois, comprendre ces processus peut s'avérer parfois une tâche difficile à achever. Aussi, de plus en plus d'études utilisent la modélisation pour contourner ces difficultés. Néanmoins, les aquifères restent des systèmes complexes, avec plusieurs paramètres temporels et spatiaux variables (prélèvements, recharge, qualité des eaux, etc.) (Bekesi et al, 2009), ce qui rend leur modélisation un challenge (Alley & Leake, 2004; Welsh, 2007).

Par ce que garantir la pérennité de la ressource en eau est vitale pour n'importe quels besoins ou activités, il devient primordial de rassembler toutes les conditions nécessaires pour non seulement la protéger contre la dégradation, mais aussi, la préserver pour les générations futures; c'est dans cette perspective que ce modeste travail a été réalisé.

Cette thèse a été organisée en deux grandes parties; la première a regroupé cinq chapitres qui se sont intéressés aux volets: physique, climatique, géologique, hydrogéologique et hydrochimique du secteur d'étude. Quand à la deuxième partie, entièrement dédiée à la modélisation hydrogéologique, elle a été rédigée en deux chapitres; le premier donne une idée générale sur la modélisation des aquifères souterrains et sert d'introduction au deuxième chapitre, consacré dans son intégralité à la modélisation du système aquifère plio\_quadernaire de la nappe de Sidi Bel Abbès.

***Première partie***  
***Caractéristiques physiques de la plaine de Sidi Bel Abbès***  
***et hydrochimie des eaux de l'aquifère plio-quadernaire***

I – Etude physique

II – Etude climatique

III – Etude géologique

IV – Etude hydrogéologique

V – Etude hydrochimique

VI – Conclusion

**I- Etude physique :****I.1- Découpage administratif de la Wilaya de Sidi Bel Abbès :**

La ville de Sidi Bel Abbès s'élevant de part et d'autre de l'Oued Mekerra se trouve au Nord-ouest de l'Algérie, à environ 80 kilomètres au Sud d'Oran.

La ville de Sidi Bel Abbès est considérée depuis 1974 comme le Chef lieu de la Wilaya. Cette dernière est délimitée administrativement par les Wilayas:

d'Oran au Nord,  
d'Aïn Témouchent au Nord-ouest,  
de Mascara au Nord-est,  
de Tlemcen à l'Ouest,  
de Saïda à l'Est,  
et de Naâma et El Bayadh au Sud.

D'une superficie de 9150 km<sup>2</sup>, la Wilaya de Sidi Bel Abbès comprend 52 communes, regroupées en 15 Daïras. C'est une région principalement agricole, où fleurissent quelques activités industrielles.

La Wilaya de Sidi Bel Abbès et à l'image des autres Wilayas du pays a connu ces dernières années un boom démographique considérable (population estimée à environ 660835 habitants en 2014) ; ce qui en a fait d'ailleurs la 5ème ville la plus peuplée du pays.

**I.2- Situation géographique de la plaine de Sidi Bel Abbès :**

La Wilaya de Sidi Bel Abbès abrite l'une des plaines les plus fertiles du pays. Cette dernière se caractérise par une altitude moyenne variant de 500 à 700 m. Elle comprend la plaine de Sidi Bel Abbès proprement dite (ancienne cuvette marécageuse), la plaine de Belarbi qui en est le prolongement à l'Est, la plaine de Boukhanefis-Tabia située au Sud (à topographie assez accidentée) et la plaine de Hassi Zahana (plus haute altitude), à relief largement ondulé.

La plaine de Sidi Bel Abbès s'étend sur une superficie avoisinant les 1150 km<sup>2</sup> et elle constitue le bassin versant dit de la moyenne Mekerra. Elle ne s'étend pas d'une manière uniforme sur toute sa longueur. En effet, elle devient de plus en plus étroite, au fur et à mesure que l'on va vers le Nord-est.

La plaine de Sidi Bel Abbès est limitée au Nord par la chaîne plissée des Tessala et au Sud par le massif tabulaire de Tlemcen Saïda. A l'Est et à l'Ouest, elle se raccorde respectivement aux plaines de Mascara et des Abdellys (figures 1 et 2).

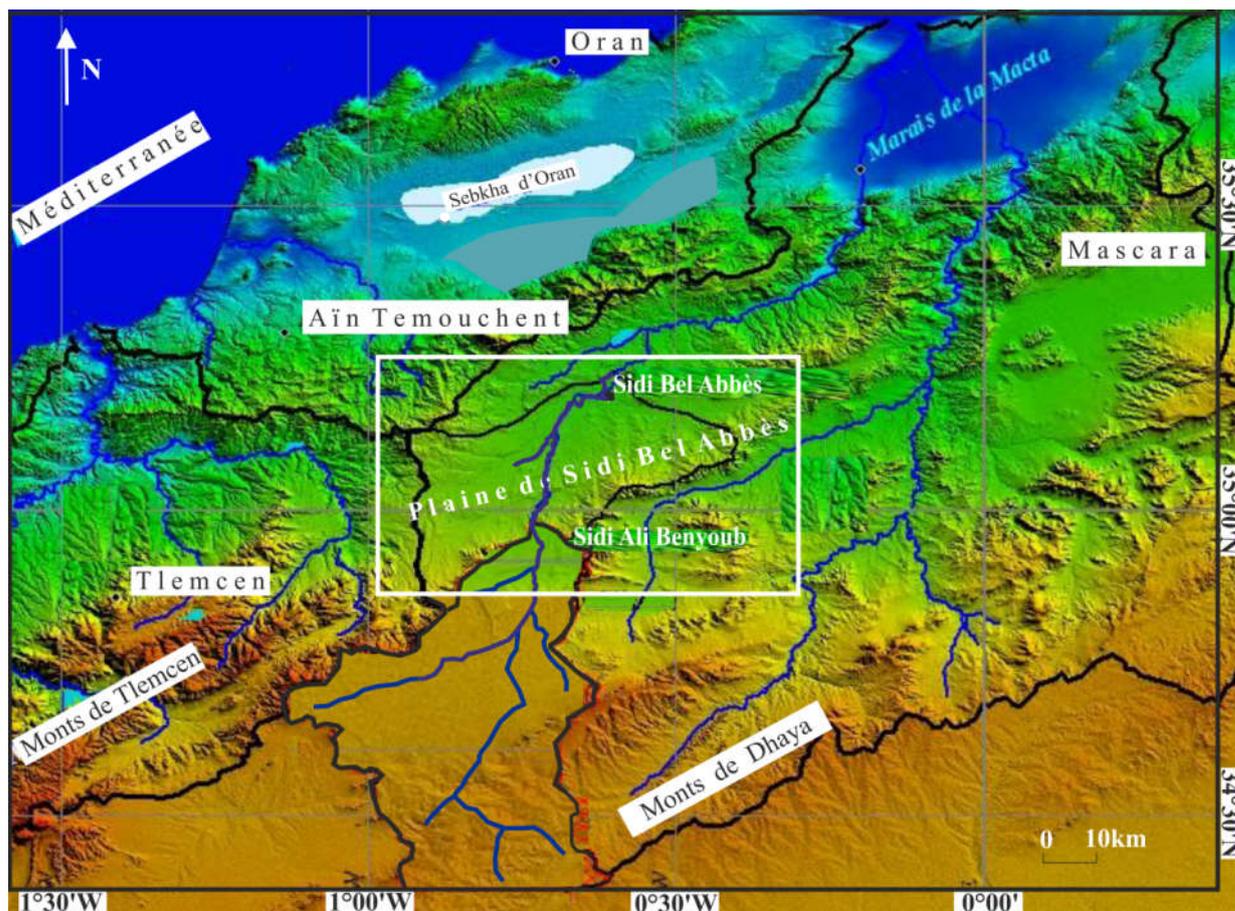


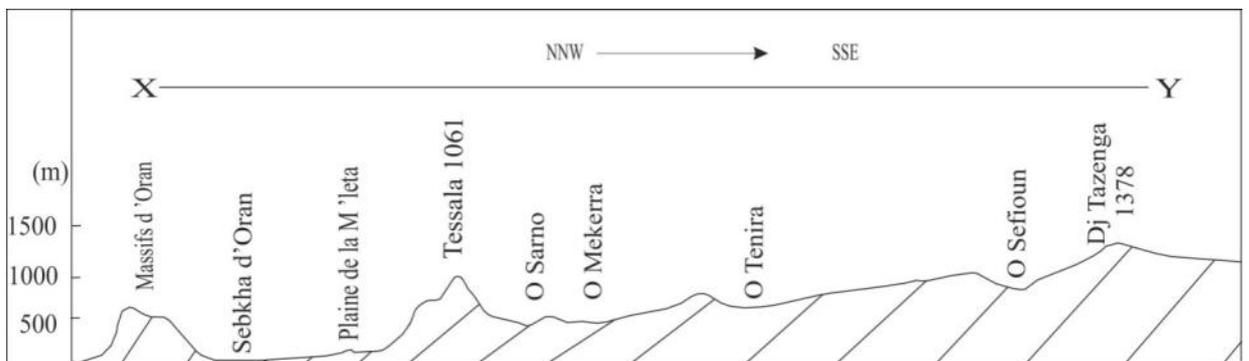
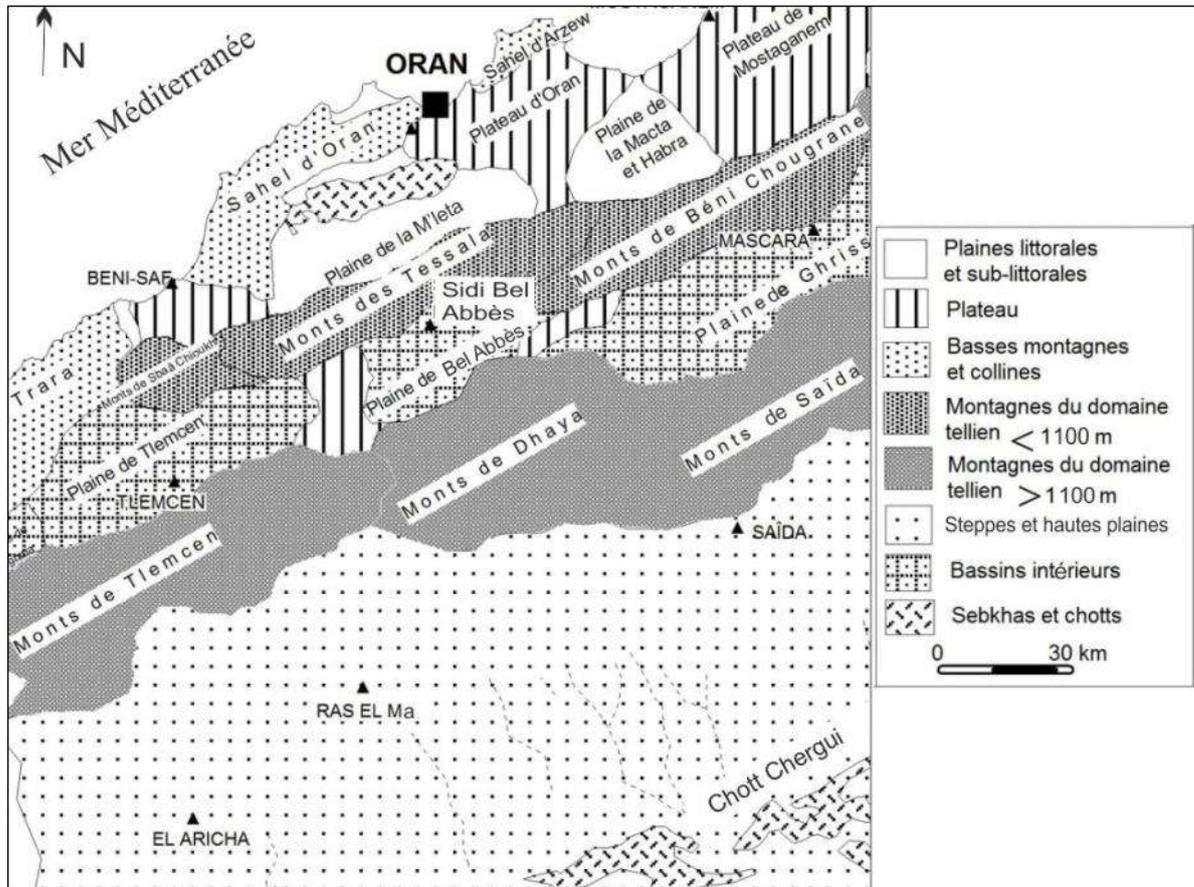
Figure 1. Localisation de la plaine de Sidi Bel Abbès.

### I.3- Aperçu morphologique:

Les figures 2 et 3, qui symbolisent une représentation morphologique simplifiée du secteur d'étude montrent que la plaine de Sidi Bel Abbès est dominée par deux massifs montagneux d'une direction WSW – ENE, à savoir : les Monts Tessala au Nord et ceux de Dhaya au Sud.

La chaîne montagneuse des Tessala s'étend sur une cinquantaine de kilomètre et se maintient à une altitude moyenne de 800 m (cime des Tessala : 1061 m).

Au Sud de la plaine, les Monts de Dhaya formés par des terrains tertiaires reposant sur les puissantes assises calcaires du Jurassique, atteignent 1378 m d'altitude au sommet du Dj Tzenga. Comparée à la M'leta, la plaine de Sidi Bel Abbès se caractérise par une moyenne d'altitude plus importante, d'où le terme de « haute plaine » de Sidi Bel Abbès retrouvé parfois dans la bibliographie de la région.



**I.4- Aperçu morpho-métrique :**

Les caractéristiques morpho-métriques du bassin versant de l'Oued Mekerra sont présentées dans le tableau 1.

Du tableau 1, on peut dire que le bassin versant de l'Oued Mekerra est un bassin assez allongé (la longueur du rectangle équivalent vaut onze fois sa largeur). Il en ressort également

(en se basant sur la classification de l'office des recherches scientifiques dans les territoires outre mer, O.R.S.T.O.M ) que le dit bassin se caractérise par un relief faible.

Tableau 1. Caractéristiques morpho-métriques du bassin versant de l'Oued Mekerra.

Dimensions	Rectangle équivalent	Indices de pente en %
Surface = 2992.5 km <sup>2</sup>	Coefficient de compacité Kc = 2,1	Global = 0,4
Périmètre = 410 km	Longueur = 186 km	De Roshe = 2,4
Longueur du Talweg principal =125 km	Largeur = 16,2 km	Moyenne = 0,6

**I.5- Aperçu hydrographique :**

Au niveau de la plaine de Sidi Bel Abbès, le chevelu hydrographique est assez peu développé; deux oueds majeurs sont présents; la Mekerra et le Tissaf. D'autres oueds longent la plaine de part et d'autre; l'Oued Sarno au Nord, l'Oued Melghir à l'Est et l'Oued Isser à l'Ouest (figure 4).

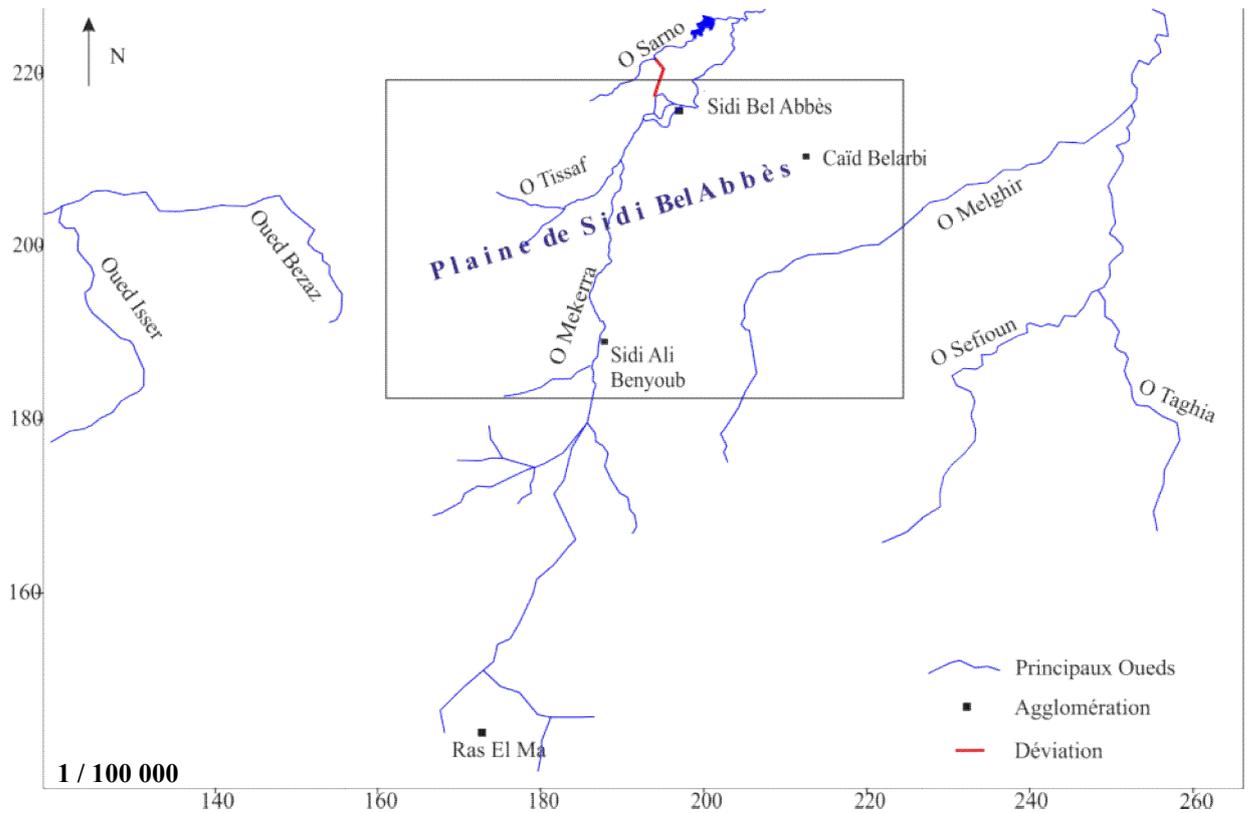


Figure 4. Réseau hydrographique de la plaine de Sidi Bel Abbès.

La plaine de Sidi Bel Abbès est une cuvette cernée, qui se loge à l'intérieur du bassin versant de l'Oued Mekerra. Ce bassin qui fait partie du grand bassin versant de la Macta est limité :

au Nord par les Monts Tessala (terrains plissés et charriés peu ou pas perméables),  
au Sud par la ride anticlinale des hauts-plateaux de Ras El Ma (terrains perméables rigides et fracturés) qui se rallie au Sud au bassin versant du Chott Echergui,

à l'Ouest par le bassin de l'Oued Isser (les collines du Serravallien de l'Oued Isser forment une limite occidentale imperméable),

et à l'Est par les Monts des Béni Chougran et Bou Henifia (bassin de l'Oued El Hammam, sous-bassin de la Macta) qui jouent le rôle d'une limite étanche orientale.

Le bassin versant de l'Oued Mekerra couvre une superficie d'environ 3000 km<sup>2</sup>. L'Oued du même nom parcourt la plaine de Sidi Bel Abbès sur une distance avoisinant les 113 Km.

L'Oued Mekerra prend naissance dans la zone des hauts plateaux, au Sud de Ras El Ma à partir des Djebels : Rharbal (1189 m), El Kemit (1265 m) et Marhoum (1250 m) et se fraye un chemin vers le Nord, en traversant de l'amont vers l'aval, les localités de Ras El Ma, Sidi Ali Benyoub, Tabia, Boukhanefis, Sidi Khaled et Sidi Bel Abbès pour rejoindre l'Oued Sig dans les marécages de la Macta et finalement se jeter dans la mer. Ses affluents les plus importants sont les Oueds Tissaf et Sarno (affluent de 30 km de long alimentant le barrage Sarno = 20 Mm<sup>3</sup>).

L'Oued Mekerra traverse deux zones de reliefs bien distinctes ; le massif montagneux de Dhaya au Sud, d'une altitude variant entre 800 et 1600 m et la plaine de la Mekerra, d'une altitude moyenne de 600 m.

Le bassin versant de l'Oued Mekerra peut être subdivisé en trois parties (figure 5) :  
la haute Mekerra qui s'étend du Sud de Ras El Ma jusqu'à Sidi Ali Benyoub,  
la moyenne Mekerra, comprise entre Sidi Ali Benyoub et Sidi Bel Abbès,  
et la basse Mekerra correspondant à la partie du bassin située en aval de la ville de Sidi Bel Abbès.

En fonction du rôle hydrologique, le bassin peut être subdivisé en trois zones:  
une zone réceptrice, entre la source de l'Oued et Mouley Slissen,  
une zone de transfert, allant de Mouley Slissen à Boukhanefis,  
et une zone dite d'expansion ou de développement, s'étendant de Boukhanefis à Sidi Bel Abbès (Marok, 2010).

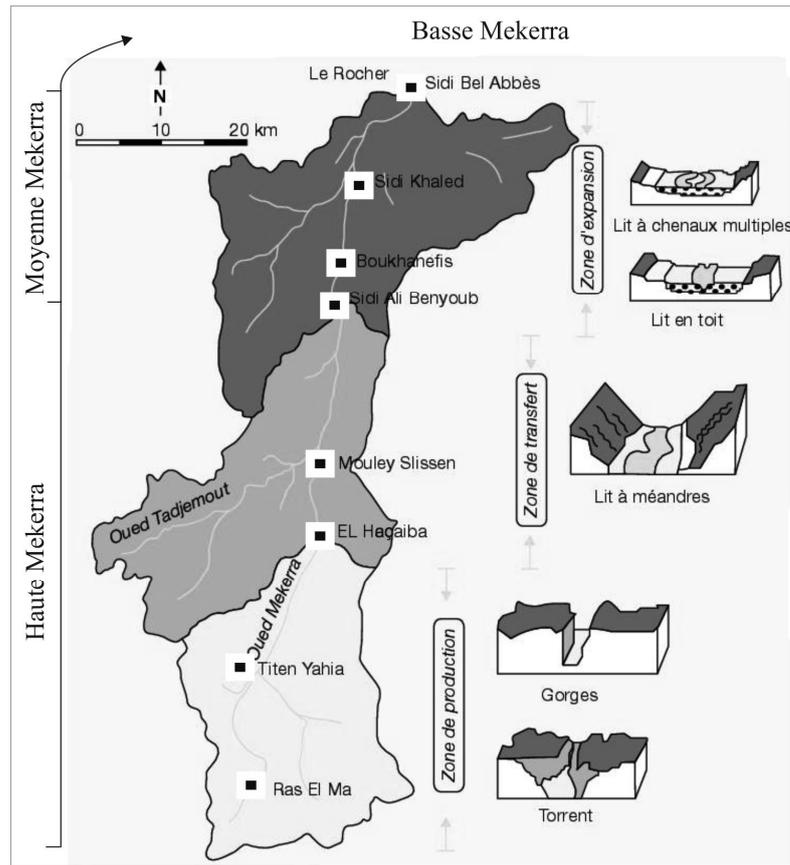


Figure 5. Représentation graphique du bassin versant de la Mekerra (Marok, 2010; modifiée).

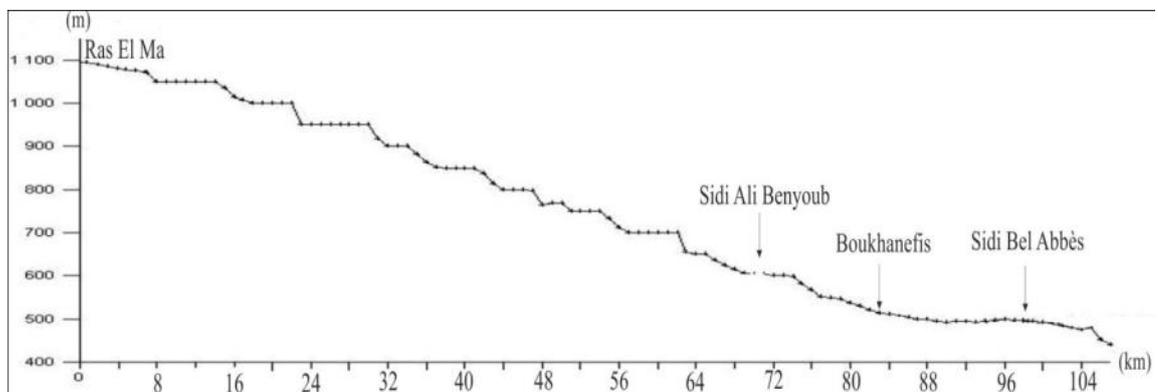


Figure 6. Profil en long de l'Oued Mekerra (ANRH; modifiée).

La pente moyenne de l'Oued dans la haute Mekerra (entre Ras El Ma jusqu'à Sidi Ali Benyoub) varie de 0,9 à 1 % et de 0,2 à 0,3 % entre Boukhanefis et Sidi Bel Abbès. Cette différence de pente est la principale cause des inondations périodiques que subie la ville de Sidi Bel Abbès.

**I.6- Pédologie et couvert végétal :**

La couverture végétale a une incidence directe sur les processus de ruissellement et d'infiltration des eaux superficielles. En effet, la densité et le type du couvert végétal jouent un rôle important dans la modération des débits des fortes crues, surtout dans les régions caractérisées par des terrains à fortes pentes. La couverture végétale augmente la résistance des sols à l'érosion des vents et des eaux de ruissellement. Elle affecte également les phénomènes d'évaporation et donc le climat.

Le couvert végétal du bassin versant de la Mekerra connaît depuis des années une dégradation accélérée, favorisée notamment par une extension anarchique du bâti (surtout au niveau de Ras El Ma et Sidi Ali Benyoub), une surexploitation des pâturages (broutement de troupeaux anarchique), ainsi que la recrudescence des incendies, principalement en été.

Le bassin versant de l'Oued Mekerra exhibe une couverture végétale dominée par les espèces et cultures suivantes :

l'alpha (faiblement présente) et la broussaille au Sud,

les céréalicultures occupant 35% de la superficie totale (Sidi Lahssen, Boukhanefis et Sidi Ali Benyoub),

les cultures-sentiers sur environ 14% de la totalité du bassin (zone d'El Haçaiba et environs de Sidi Ali Benyoub),

une zone forestière à hauteur de 10% de la superficie totale du bassin et qui couvre sa partie moyenne (massifs montagneux entre El Haçaiba et Moulay Slissen jusqu'à Sidi Ali Benyoub, ainsi que dans les zones collinaires non cultivables en périphérie du bassin).

D'après la direction de l'agriculture de Sidi Bel Abbès (2014), la surface agricole utile à l'intérieur des limites administratives de la Wilaya est occupée comme suit :

culture herbacées 209 121 ha,

vignobles 3 923 ha,

packages et parcours 3 723 ha,

arboricultures fruitières 14 690 ha,

terres au repos 1345 459 ha.

terres improductives 19 636 ha.

Il est important de noter qu'une dizaine d'espèces ont été introduites (l'âge moyen des plantations introduites varie selon les espèces entre 45 et 55 ans (Kerfouf et al, 2005)) dans le secteur d'étude; seules les espèces herbacées se sont développées au profit des conditions régnantes dans la région (Quezel, 1963).

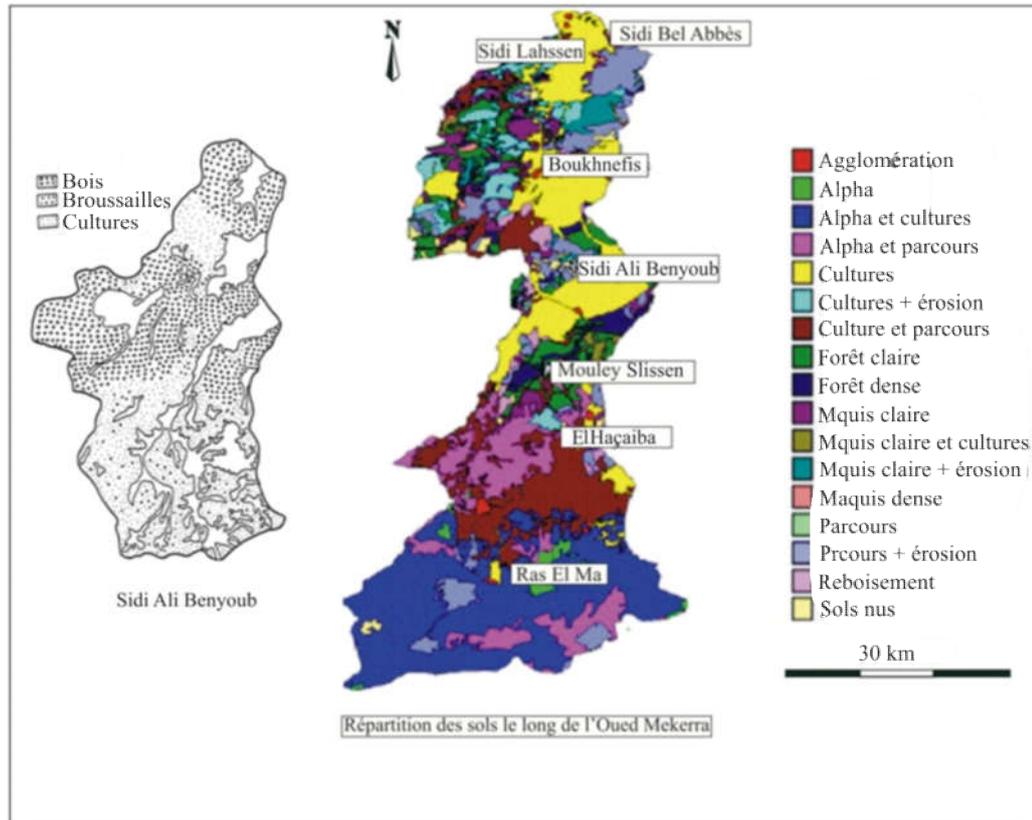


Figure 7. Occupation des sols dans le secteur d'étude (Bneder, 1979, Cherif, 2009; modifiée).

Au fil des années, les terres de la plaine de Sidi Bel Abbès intensément travaillées se sont vues épuiser leur stock d'humus accumulé pendant des siècles. Les labours trop poussés sur les pentes accentuées, l'élevage de bétail anarchique et le déboisement continu ont favorisé l'érosion des coteaux et la dégradation de la couverture végétale. La présence d'une couche calcaire filtrante à faible profondeur combinée au climat semi-aride font de la région un des points les plus arides de l'Oranie. Nonobstant cela, le développement de l'agriculture qui se fait dans la plupart des cas de façon aléatoire est assez appréciable, bénéficiant de l'emploi d'engrais et d'une irrigation intensive par puits; ce qui a fait de la plaine de Bel Abbès l'une des régions les mieux cultivées du pays.

La plaine de Sidi Bel Abbès renferme de nombreux centres agricoles dont les plus importants sont : Sidi bel Abbès, Sidi Brahim, Sidi Lhassen, Sidi Khaled, Boukhanefis, Tabia, Aïn el Hadjar, Lamtar, et Aïn Tellout.

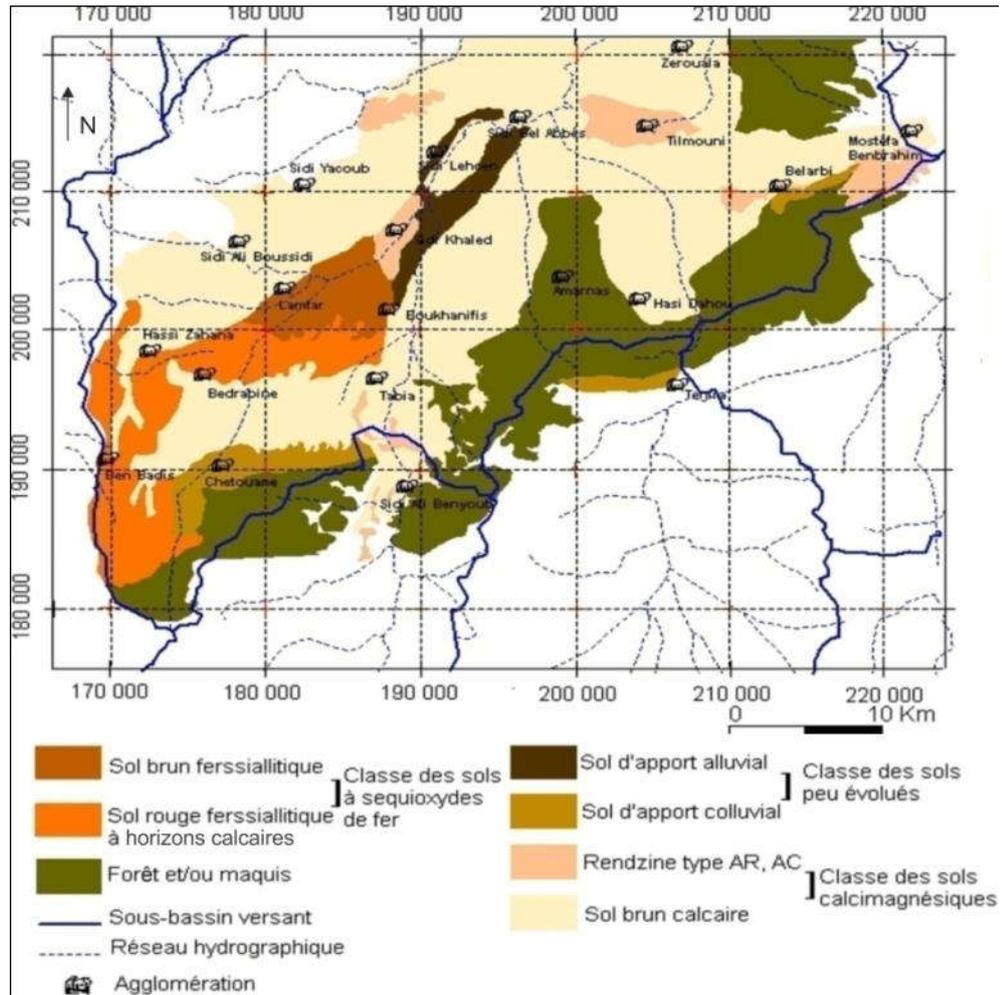


Figure 8. Répartition des sols dans la plaine de Bel Abbès (Faraoun & Benabdeli, 2010).

D'après l'étude pédologique réalisée par la SOGREAH en 1969 les terrains de la plaine de Sidi Bel Abbès se caractérisent par des sols calcaires humifères prédominants. Cette croûte calcaire est perméable et joue un rôle important lors de la montée des crues. Vers le Nord-est, le bassin versant de l'Oued Mekerra est couvert d'une mosaïque de sols alluviaux et calciques ; le ruissellement torrentiel laisse apparaître au niveau de la haute Mekerra la roche mère à quelques endroits.

Les sols de la plaine de Sidi Bel Abbès peuvent être subdivisés en trois types :

Sols peu évolués : essentiellement d'apport alluviaux et colluviaux,

Sols calci-magnésiques : formés de rendzines, de sols bruns à prédominance soit de calcaires, soit de calcaires rendzinifères ou encore de calcaires noircis,

Sols à sesquioxyde de fer : sols rouges ; bruns ou à horizons calcaires.

**II- Etude climatique :**

L'étude climatique du secteur d'étude a été faite sur la base de données fournies par l'Agence Nationale des Ressources Hydrique (ANRH) sur la période 1971 - 2014.

La région d'étude se caractérise par un climat semi aride, humide / froid en Hiver et sec / chaud en Eté, où les périodes printanière et automnale sont presque imperceptibles.

Le tableau 2 regroupe les informations générales de quelques stations pluviométriques présentes dans le secteur d'étude.

Tableau 2. Coordonnées et codes des stations pluviométriques de la plaine de Sidi Bel Abbès.

Station	code	X	Y	Z
Sidi Bel Abbès	110305	194.25	214.15	485
Sidi Ali Boussidi	110308	178.2	206.1	600
Sidi Lahssen	110318	191.2	212.9	500
Hassi Zahana	110317	172.7	198.2	650
Tabia	110322	186.8	196.7	615
Sidi Ali Benyoub	110201	186.55	192.20	640

**II.1- Précipitations :****II.1.1- Précipitations annuelles (1971-2014) :**

Depuis le début des années 70s, la lame d'eau précipitée au niveau de la plaine de Sidi Bel Abbès atteint rarement la barre des 450 mm/an; la zonalité des pluies est également considérable comme le montre le tableau 3 et la figure 9.

Tableau 3. Moyennes pluviométriques annuelles (MPA).

Station	Bel Abbès	Sidi Ali Boussidi	Sidi Lahssen	Hassi Zahana	Tabia	Sidi Ali Benyoub	Plaine de Bel Abbès
MPA (mm)	340	432	273	302	331	348	338

La figure 9, montre une nette baisse de la pluviométrie entre les deux périodes 1913/1938 et 1971/2014. En effet, une diminution d'environ 100mm en moyenne est observée aux niveaux des stations de Sidi Bel Abbès, Sidi Ali Benyoub et Caïd Belarbi.

La figure 9, confirme la zonalité de la pluviométrie sur la plaine de Bel Abbès qui est plus importante sur le versant Ouest. Ainsi, on peut dire que les précipitations dans la moyenne

Mekerra augmentent avec l'altitude et atteignent leur maximum dans la zone proche des Tessala et celle de Sidi Ali Boussidi.

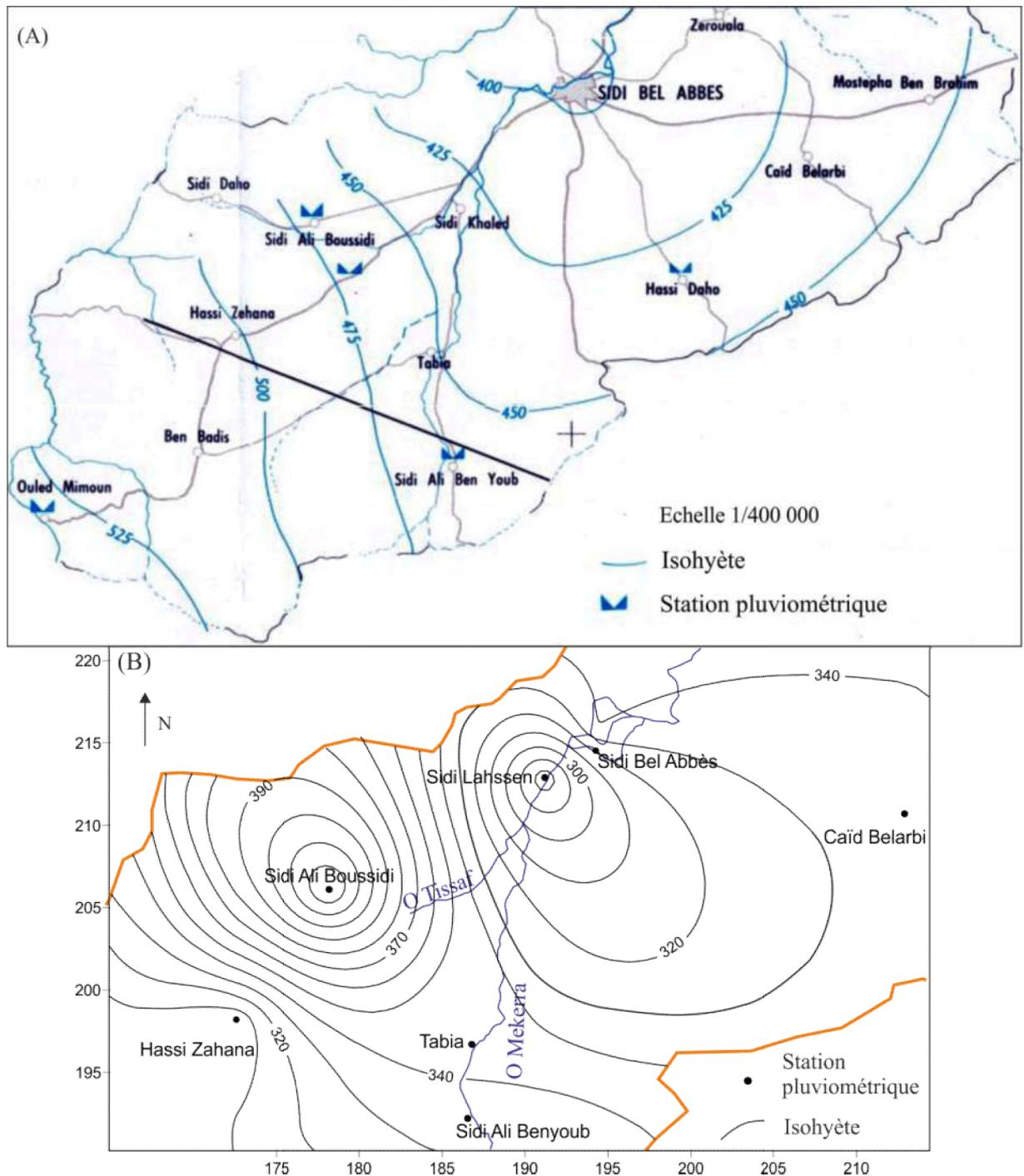


Figure 9. Cartes pluviométriques de la région d'étude (A : 1913-1938, Seltzer); (B : 1971 - 2014).

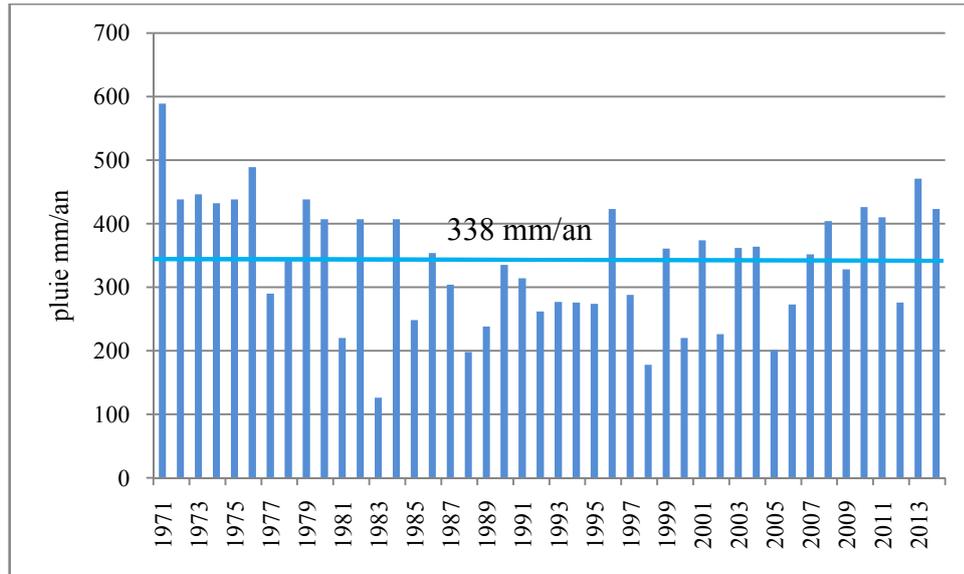


Figure 10. Moyennes de la lame d'eau précipitée sur la plaine de Bel Abbès (1971-2014).

**II.1.2- Précipitations saisonnières et mensuelles :**

Les valeurs des précipitations saisonnières ont été obtenues à partir des lames d'eau moyennes mensuelles enregistrées sur la plaine de Sidi Bel Abbès.

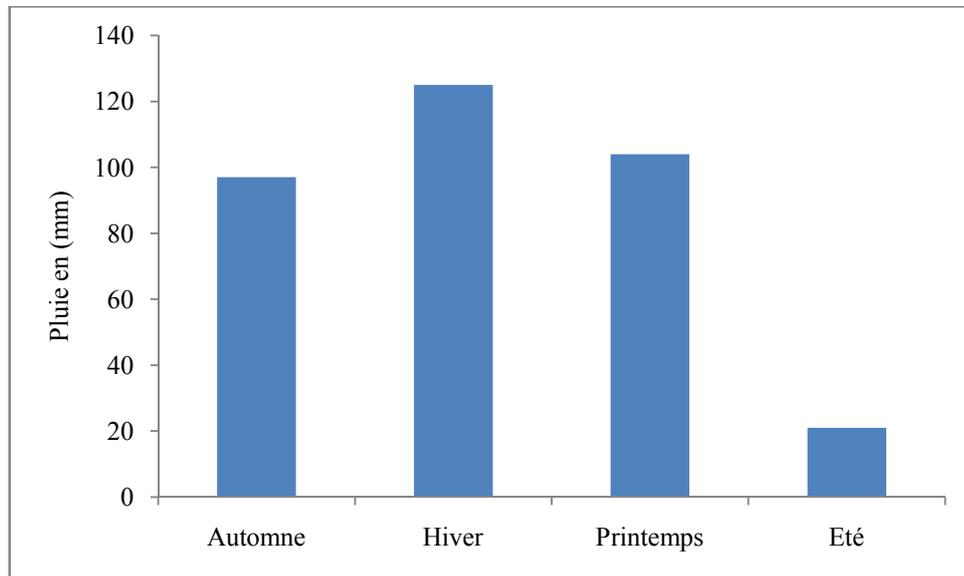


Figure 11. Précipitations saisonnières sur la plaine de Bel Abbès.

Malgré la zonalité et l'irrégularité des pluies caractérisant la région d'étude, les données de la figure 11 ne dérogent pas à la règle et montrent que les saisons les plus pluvieuses sont l'Hiver et le printemps avec des précipitations au dessus de la barre des 100mm (environ 65% du total annuel). Pour ce qui est des précipitations moyennes mensuelles (figure 12), deux périodes

majeures séparées par le mois de Septembre peuvent être distinguées; une période humide (totalisant plus de 85% de la lame d'eau précipitée annuelle), s'étalant sur huit mois, d'Octobre à Mai et une période sèche (moins de 6% de la lame d'eau précipitée annuelle), comprise entre les mois de Juin et Août. Le mois le plus sec de l'année est juillet (4.5mm), tandis que les mois les plus arrosés (plus de 42mm) sont Décembre, Janvier et Mars.

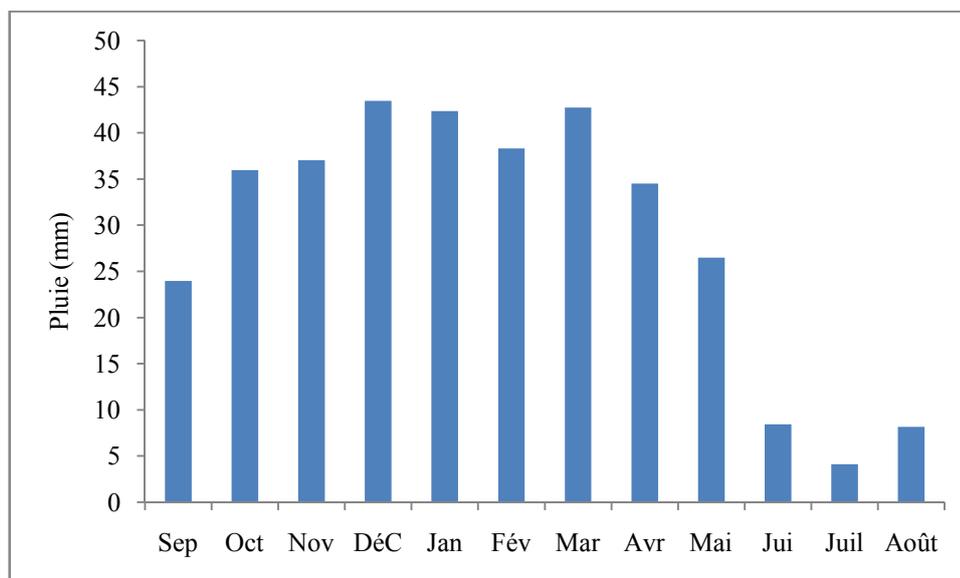


Figure 12. Précipitations mensuelles sur la plaine de Bel Abbès.

## II.2- Températures (1987-2012) :

Les données rassemblées dans le tableau 4 représentent les moyennes mensuelles des températures sur la plaine de Sidi Bel Abbès, durant la période 1987 – 2012. Du tableau 4, il ressort que les mois de Janvier et Février sont les plus froids (température moyenne égale à 8.75 °C), tandis que le mois d'Août est le plus chaud (température moyenne de 26 °C). La saison froide ( $T \leq 16$  °C) s'étale sur six mois de Novembre à Avril alors que la saison chaude dure trois mois de Juin à Août.

Tableau 4. Températures moyennes mensuelles de la plaine de Sidi Bel Abbès.

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Août
T (°c)	22	17.5	13	10	8.5	9	11.5	14	17	21	25	26

Ces températures ne semblent pas refléter les réalités sur terrains (moyenne annuelle égale à 16 °C), surtout durant la période Juin/Août (T journalière supérieure en moyenne à 35°C en été) et doivent être de ce fait, considérées avec précaution.

**II.3- Évapotranspiration :**

**II.3.1- Évapotranspiration potentielle :**

Le calcul de l'évapotranspiration potentielle par la formule de Thornthwaite (1948) est assez simple. Cependant, étant mieux adaptée aux zones tempérées humides, cette formule tend à sous-estimer l'ETP en climat sec.

$$ETP = 1.6 * \left(\frac{10}{I_t}\right)^a * t^a * f$$

ETP: évapotranspiration potentielle mensuelle (cm), pour un éclaircissement de 12 h/j.

I<sub>t</sub>: indice thermique annuel (somme des indices mensuels i; i = (t/5)<sup>1.514</sup>)

a: coefficient fonction de I<sub>t</sub>; a= 0.492 + 1792 \* 10<sup>-5</sup> \* I<sub>t</sub> - 771 \* 10<sup>-7</sup> \* I<sub>t</sub><sup>2</sup> + 675 \* 10<sup>-9</sup> I<sub>t</sub><sup>3</sup>

t: température mensuelle moyenne (°C)

f: facteur de correction, fonction de la durée du jour N (h /j) et du nombre de jours par mois (p);

f = N \* p

p=0.0778 pour un mois de 28 jours

p=0.0806 pour un mois de 29 jours

p=0.0833 pour un mois de 30 jours

p=0.0861 pour un mois de 31 jours

Tableau 5. ETP mensuelle calculée sur la plaine de Sidi Bel Abbès.

	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
Plaine de SBA	96	67	39	26	19	22	32	46	62	91	121	129

**II.3.2- Évapotranspiration réelle :**

Le calcul de l'évapotranspiration réelle a été fait en appliquant la méthode du bilan hydrique de Thornthwaite. Cette méthode simple est basée sur les données mensuelles de pluie et de l'ETP, ainsi que les variations de la réserve facilement utilisable (RFU). Elle permet non seulement, une approximation des valeurs de l'évapotranspiration réelle (ETR), mais donne également une idée sur le déficit agricole et les écoulements dans la région considérée.

Le calcul de la RFU peut se faire soit à l'aide du triangle des textures (Jamagne *et al*, 1977) soit avec la formule de Richard (1954) :

**Triangle des textures** (Jamagne *et al*, 1977) :

RFU<sub>1</sub> = RU\*2/3 avec RU = RU<sub>/cm</sub> \* P

RU<sub>/cm</sub>: réserve utile par cm de sol (volume en l/m<sup>2</sup>/cm ou mm/cm qu'un sol exploré par les racines peut fournir).

**P** : profondeur de la zone racinaire en cm ; estimée à 40 cm (profondeur d'enracinement moyenne de certaines cultures fréquemment cultivées dans la plaine de SBA : pomme de terre (45cm), haricot (30cm), choux (45cm), petits pois (30cm), etc. (source: Vitosh M.L., 1977).

**RU** : réserve utile (mm).

$$RFU_1 = 2/3(1.65 * 40) = 44mm$$

**Formule de Richard (1954) :**

$RFU_2 = 1/3$  (densité apparente du sol \* humidité équivalente % \* profondeur zone racinaire).

$$RFU_2 = 1/3(1.3 * 25\% * 40) = 43.33 \text{ mm.}$$

$$RFU_2 \approx RFU_1 = 44 \text{ mm.}$$

Tableau 6. Bilan hydrique selon Thornthwaite.

	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
P	24	36	37	44	42	38	43	34	27	8	4	8
ETP	96	67	39	26	19	22	32	46	62	91	121	129
RFU	0	0	0	18	41	44	44	32	0	0	0	0
ETR	24	36	37	26	19	22	32	46	59	8	4	8
DA	74	26							3	83	116.5	121
excédent						13	11					

Le tableau 6, montre que le déficit agricole est de 424mm/an, s'étalant de Mai à Octobre, avec un maximum de 116mm au mois d'Août. La réserve utile se forme de Décembre jusqu'à Avril. Les mois excédentaires sont ceux de Février et de Mars avec un volume d'écoulement de l'ordre de 24mm. L'ETR annuelle sur la plaine de Sidi Bel Abbès donnée par la méthode de Thornthwaite est égale à 321mm.

**II.4- Humidité et vent:**

La figure 13 représente les moyennes mensuelles de l'humidité de l'air, mesurées à la station de Sidi Bel Abbès durant la période 1987-2012. Malgré son éloignement à la mer, la région d'étude se caractérise par des valeurs d'humidité assez élevées. Elles sont maximales en Hiver (70 à 76 %) et minimales durant la période estivale (50 à 58 %).

Les vitesses du vent enregistrées au niveau de la plaine de Sidi Bel Abbès sont considérées faibles à moyennes comparées à celles des autres plaines du Nord-ouest algérien (elles valent presque la moitié des vitesses enregistrées par exemple au niveau de la plaine de la M'leta).

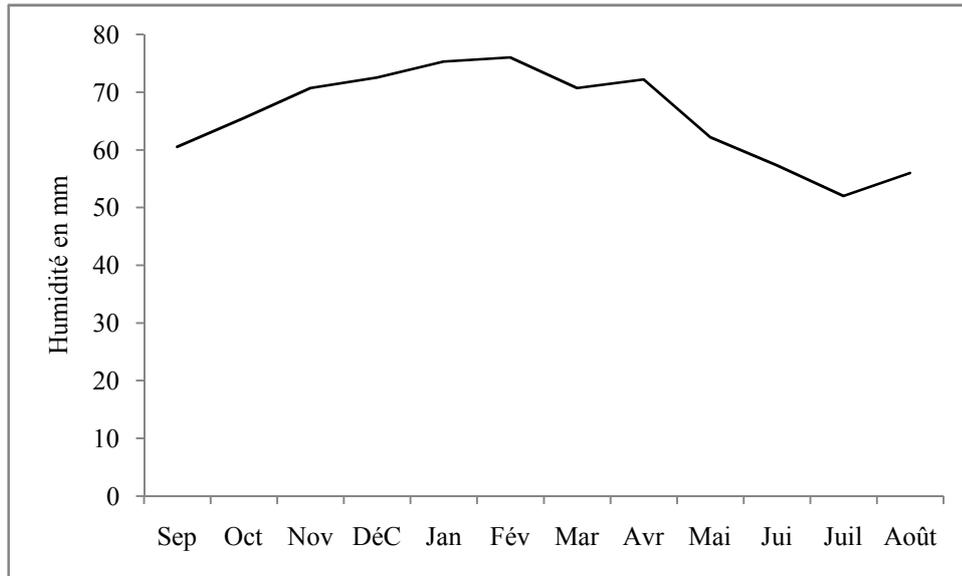


Figure 13. Courbe des humidités mensuelles.

Tableau 7. Vitesses moyennes mensuelles du vent.

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Août
V <sub>moy</sub> (cm/s)	170	170	240	190	210	210	250	320	240	240	220	180

**II.5- Hydrométrie :**

Le tableau 8, regroupe les coordonnées ainsi que les débits moyens mesurés aux niveaux de trois stations de jaugeage de l’Oued Mekerra pour la période 1970-2005 (ANRH).

L’influence des précipitations se fait clairement sentir sur l’évolution des débits de l’Oued Mekerra au cours de l’année (figure 14). Les débits les plus importants sont enregistrés dès le commencement de l’Automne et jusqu’au mois d’Octobre. On observe ensuite une baisse jusqu’au mois de Février puis une ré-augmentation des débits à partir du mois de Mars. Cela est dû en grande partie aux apports de la neige, qui, se déposant sur les hauteurs entre Décembre et Février, ne commence à fondre que vers la fin du mois de Mars.

Tableau 8. Coordonnées des stations de jaugeage et débits moyens de l’Oued Mekerra.

Station	X	Y	Z	Débits
SA Benyoub	186	192	650	562
Sarno	194	216	485	124
SB Abbès	199	219	450	724

La figure 14 montre également une pérennité du cours d'eau majeur de l'Oued Mekerra, et un assèchement fréquent de l'Oued Sarno en été.

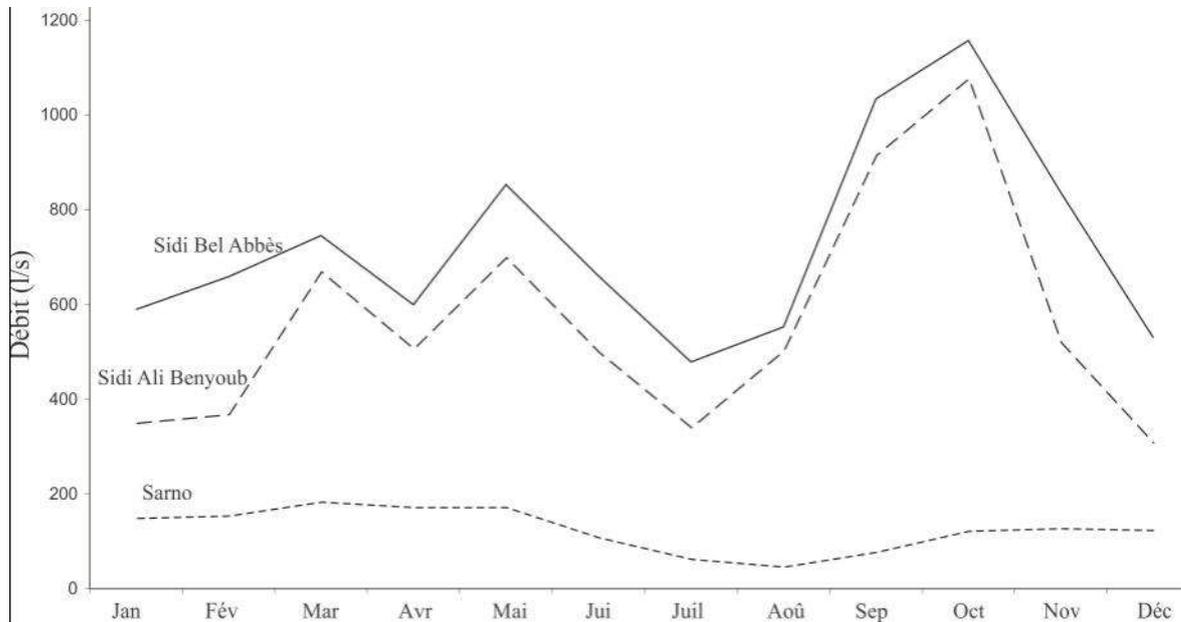


Figure 14. Evolution mensuelle des débits moyens de la Mekerra.

## II.6- Bilan hydrologique de la plaine de Sidi Bel Abbès (aquifère plio-quaternaire) :

Le bilan de la plaine de Sidi Bel Abbès a été estimé pour une surface d'environ 800 km<sup>2</sup>, correspondant à l'extension des formations aquifères plio-quaternaires (APQ) sur une période de 12 mois correspondant à une année climatique (de Septembre à Août). Le bilan de l'aquifère a été fait pour l'année 2006/2007 (année la plus récente et dont les données hydriques sont disponibles : débits des sources de Sidi Ali Benyoub, volumes d'eaux usées rejoignant la nappe, volumes des apports hors wilaya, etc.) en supposant une pluie de 338mm (moyenne des précipitations entre 1971 et 2014), une ETR de 321 mm (moyenne pour la période 1987-2012) et en utilisant les débits moyens de la Mekerra relatifs à la période 1970 - 2005 (tableau 8 et figure 32). Le calcul du bilan de la plaine de Sidi Bel Abbès a été fait en se basant sur l'équation suivante :

$$P + Q_1 + Q_2 + Q_3 \pm \Delta S = ETR + Q_4 + Q_5$$

### Entrées = 360mm

P : moyenne de pluie sur la plaine de SBA = 338 mm

Q1 : débit des écoulements souterrains et superficiels à l'entrée (limite sud de la plaine)= 110 l/s + 55 l/s = 6.5mm

Débit des écoulements souterrains à l'entrée : déduit à partir des débits des sources de Sidi A li Benyoub (Aïn Mekerrag et Aïn Skhouna) dont le débit a baissé entre 1971 et 2007 d'environ 56% passant de 247 l/s à 110 l/s (ANRH).

Débit des écoulements superficiels à l'entrée : calculé en supposant la même baisse (56%) des écoulements superficiels à l'entrée soit  $124 * 44\% = 55$  l/s.

Q2 : retour des volumes extraits pour l'irrigation =  $11\text{Mm}^3 = 14\text{mm}$

Calculé en tenant compte des prélèvements agricoles pour l'année 2006-2007, ainsi que le type (besoin en eau en  $\text{m}^3/\text{h}$ ) et la surface allouée pour chaque culture (voir partie modélisation).

Tableau 9. Estimation du retour des volumes extraits pour l'irrigation.

*culture	* $\text{m}^3/\text{ha}$	moyenne	*1969-1970. Superficie irriguée : 2120 ha	2006-2007. Superficie irriguée : 7000 ha	Volumes extraits (irrigation) – besoins en eau pour l'année 2006-2007
Vignes et Oliviers	2400	5067 $\text{m}^3/\text{ha}$	Besoins en eau : $10.8\text{Mm}^3$	Besoins en eau $35\text{Mm}^3$	$46 - 35 =$ $11 \text{Mm}^3$
fruitières	4800				
Céréales	1600				
Agrumes	6400				
Maraichages	10000				
Fourrages	5200				

\*Données SOGREAH

Q3 : Volumes d'eaux usées =  $0.78 \text{Mm}^3 = 1\text{mm}$ .

Donnée de l'Inspection de l'Environnement de Sidi Bel Abbès.

**Sorties = 422mm**

ETR (Thornthwaite) = 321mm

Q4: écoulements souterrains et superficiels = (différence des débits de la Mekerra entre les stations de Sidi Ali Benyoub et Bel Abbès + débits dérivés de la Mekerra pour l'irrigation + débit de la dérivation vers le barrage Sarno) =  $(724 - 562 + 587 + 4)$  l/s = 30mm.

Q5: volumes totaux extraits (voir partie modélisation) =  $57\text{Mm}^3 = 71\text{mm}$

**Variation du stock :**

$\Delta S$  : variation du stock de la nappe entre le début et la fin du cycle hydrologique

$\Delta S = S1$  (volumes totaux entrants) –  $S2$  (volumes totaux sortants)

$S1$  : écoulements à l'entrée (souterrains + superficiels) + retour volumes extraits pour l'irrigation + apports extra wilaya (voir partie modélisation).

$S2$  : prélèvements totaux + écoulements souterrains et superficiels à l'exutoire.

$\Delta S = (5.21 + 10.5 + 11) - (57 + 23.8) = - 54 \text{Mm}^3 = - 67.5\text{mm}$

Ce volume de déstockage ( $-54 \text{ Mm}^3$ ) de l'aquifère plio-quaternaire est en concordance avec celui obtenu par modélisation (figure 122) ( $-42 \text{ Mm}^3$ ), en tenant compte toutefois des apports des aquifères adjacents (figure 117) ( $+11 \text{ Mm}^3 = +13.75 \text{ mm}$ )

**Entrées + ( $\Delta S$ ) – Sorties = 5.5mm.**

En se basant sur la formule simplifiée du bilan hydrologique ( $P \pm \Delta S = \text{ETR} + R + I$ ), on peut faire une estimation des infiltrations (I) rejoignant l'aquifère plio-quaternaire. Pour ce faire, on calcule d'abord le ruissellement (R) donné par la formule de Tixeront- Berkaloff comme suit :

$$R = (\text{pluie})^3 / 3 \text{ ETP}^2$$

R = 23mm, soit 7% de pluie.

Avec :

P: 338mm,

ETP: 750mm (tableau 5).

Connaissant la valeur de R, on déduit la valeur de I comme suit :

$$I = P - (\text{ETR} + R) \pm \Delta S$$

I =  $338 + 67.5 - (321 + 23) = 61.5 \text{ mm}$  soit environ 18% de pluie.

Cette recharge (entre 1 et 20 %) est caractéristique des régions semi-arides (similaires à celle de la plaine de Sidi Bel Abbès), comme l'ont montré des études réalisées en Inde, au Botswana, en Namibie, en Afrique du Sud et en Algérie (étude de la SOGREAH sur la plaine de Maghnia et le plateau de Mostaganem). Le rapprochement du taux de recharge de la plaine de Bel Abbès (18%) de la limite supérieure de la fourchette (1 et 20 %) peut être expliqué par la tendance plus humide que sec caractérisant le secteur d'étude (1971-2014 : pluie moyenne = 338mm).

## II.7- Conclusion :

La région d'étude de part ces précipitations moyennes et ces températures importantes est caractérisée par un climat semi aride. Les précipitations enregistrées après 1970 au niveau de la plaine de Bel Abbès dépassent rarement 400mm et sont reprises dans leur majorité par l'évapotranspiration égale en moyenne à environ 320mm.

Le bilan hydrogéologique de la plaine de Bel Abbès réalisé sur l'année 2006-2007 a clairement démontré la baisse considérable des réserves de l'aquifère plio-quaternaire et nous a permis d'avoir une idée sur les volumes d'écoulement (23mm) et d'infiltration (61.5mm) dans le secteur d'étude.

### III- Etude géologique:

#### III.1- Introduction :

La plaine de Sidi Bel Abbès est une large cuvette à substratum argilo-marneux, gris vert du Mio-pliocène. Elle est surplombée de part et d'autre par des terrains à très grande disparité (figures 15 et 16). En effet, au Nord (les Tessala), les terrains sont très plissés, à ossature crétacée et à recouvrement tertiaire très épais (Sourisseau, 1973). Au Sud (les Monts de Tlemcen-Saïda), ils sont formés presque totalement de matériaux du Jurassique supérieur et du Crétacé inférieur. Sur la bordure ouest, les collines de marnes serravaliennes séparent les bassins versants des Oueds Isser et Mekerra. A l'Est par contre, la plaine de Sidi Bel Abbès est reliée au prolongement des Béni Chougran, par la série des marnes miocènes de Bou Henifia.

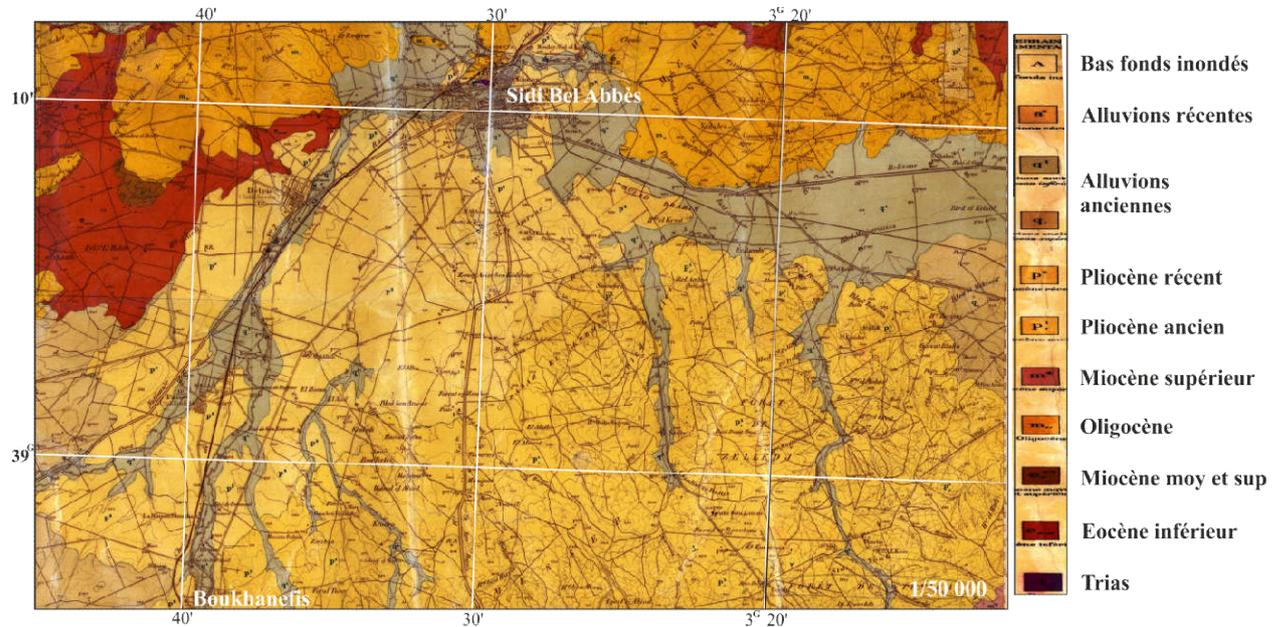


Figure 15. Carte géologique de la plaine de Sidi Bel Abbès-boukhanefis (extrait de la carte au 50. 000° du service géographique de l'armée; publiée par le service géologique de l'Algérie, 1934).

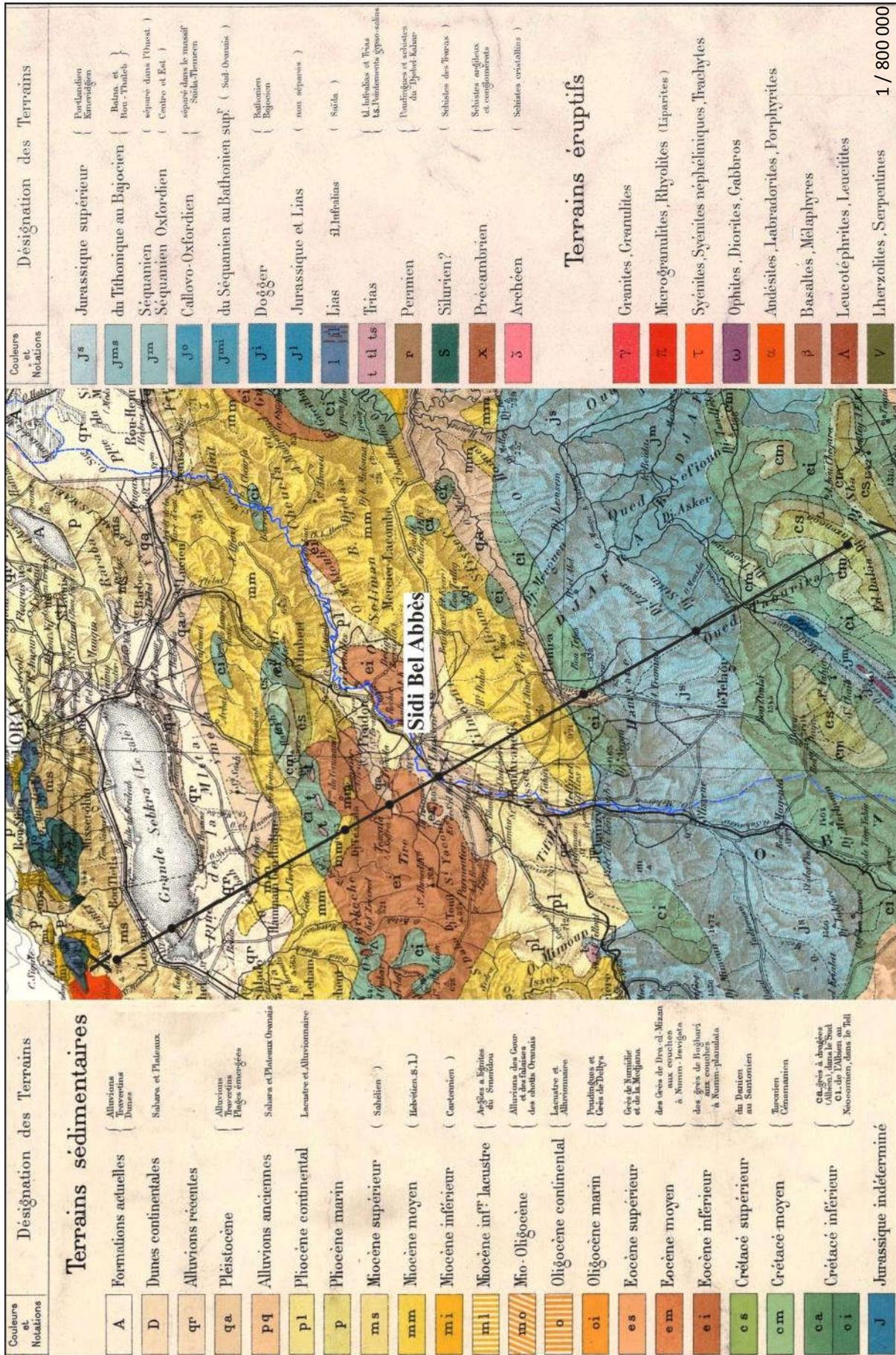


Figure 16. Extrait de la carte géologique de l'Algérie (Ministère des travaux publics)

**III.2- Stratigraphie :****III.2.1- Le Mésozoïque :****III.2.1.1- Le Trias:**

Il affleure dans les Tessala et à Aïn Tellout, représenté par des marnes et argiles bariolées multicolores salifères (sels, gypses), dolomies bréchiques, calcaires coquilliers noirs, cargneules et gabbros.

**III.2.1.2- Le Jurassique****a- Le Kimméridgien:**

Représenté par des bancs épais de calcaires fins séparés par des marnes ainsi que des dolomies cristallines karstifiées et fissurées, à intercalations calcaires et marneuses. Ces dolomies dites de Tlemcen atteignent environ 500 m d'épaisseur au Sud-ouest de la plaine de Sidi Bel Abbès.

**b- Le Portlandien:**

Le Portlandien, d'une épaisseur d'environ 200 m constitue avec le Kimméridgien l'essentiel du massif sud du bassin versant de la zone d'étude. Il affleure entre Sidi Ali Benyoub et Aïn Tellout et est représenté par des couches marno-calcaires, des grès blancs et des marnes violacées et verdâtres.

**III.2.1.3- Le Crétacé :****a- Le Berriasien et le Valanginien:**

Ces deux étages ont une épaisseur variant entre 120 et 140 m. Ils affleurent au Sud-est et au Sud-ouest de la plaine et sont formés de marnes vertes et jaunes et de calcaires graveleux, soit zoogènes, soit lumachelliques, à macrofaune importante (Ostea, oursins, entroques, térébratules).

**b- L'Hauterivien:**

L'Hauterivien affleure au Sud-est du bassin versant de la plaine, aux niveaux des Djebels Tenezara et Briouiga et il correspond aux :

- formations calcaires de Remaïlia (150 m),
- marnes à bancs de calcaires gréseux (30 m),
- grès massifs (20 m),
- calcaires graveleux oolithiques (15 m),
- grès durs (10 m),

calcaires graveleux-gréseux à traces de coquilles (20 m),  
et aux grès (12 m) en alternance avec des calcaires, gris zoogènes ou lumachelliques (35 m).

**c- Le Barrémien :**

Les formations du Barrémien de 700 m d'épaisseur affleurent à l'Est de la plaine et plus précisément au Sud de la forêt de Caïd Belarbi. Elles sont représentées par des grès roux, des argiles gréseuses et des calcaires graveleux.

**d- L'Aptien:**

Cet étage d'une épaisseur moyenne de 150 mètres correspond à des calcaires microcristallins, gris-bleus clairs, à traces de lamellibranches et à pendage accentué vers le Sud. Il affleure à la faveur d'un horst au Sud de Caïd Belarbi.

**e- Le Crétacé moyen supérieur :**

Le Crétacé moyen supérieur est retrouvé au Nord-ouest du bassin versant de la plaine, au niveau des Tessala. Formé essentiellement de marnes gypseuses contenant des bancs de calcaires sombres, gréseux et peu épais, il repose sur des formations salifères triasiques.

**III.2.2- Le Cénozoïque :****III.2.2.1- Le Paléogène**

L'Eocène supérieur et moyen affleure près de Zérouela, à l'Ouest de Sidi Ali Boussidi et au niveau du Djebel Tignemar. Il est représenté par des calcaires gris-bleus, massifs, lités, percés de lapiaz et ornements de fossiles (Ostracées, pectinides, échinides, thalles de lithothamnium). Cette formation très érodée appartient aux nappes de charriage et repose en contact anormal sur le Miocène anté-nappe.

L'Oligo-miocène correspond aux terrains nappés des Monts Tessala. On y retrouve des formations à base de marnes parfois gypseuses grises avec quelques bancs de grès à grains fins et à ciment calcaire à la base et de minces couches de grès dans la partie supérieure.

**III.2.2.2- Le Néogène**

Les dépôts continentaux miocènes aux niveaux de Tenira et de Caïd Belarbi atteignent environ 300 m d'épaisseur et sont formés de marnes grises à bancs de grès et lentilles de galets plus ou moins cimentées. Quant aux dépôts marins qui ont comblé la dépression du substratum mésozoïque avec des épaisseurs pouvant atteindre les 500 m, ils sont représentés par des argiles-

marnes grises et bleuâtres très fines, contenant des bancs de grès et quelques galets et graviers. Ces dépôts marins, affleurant principalement le long de l'Oued Isser assurent l'étanchéité des aquifères de la plaine de Bel Abbès.

A l'Est de la plaine, le Pliocène marin se manifeste par des marnes bleues, des grès et des molasses. Le Pliocène continental par contre, se caractérise par d'épaisses couches continentales au Sud-est de la plaine, qui s'y sont amoncélées durant sa longue période d'exonde. Ces épaisses couches continentales sont faites de Conglomérats à la base, puis de sédiments plus fins, essentiellement sableux et gréseux, en alternance avec des limons rouges et des petites lentilles de conglomérats.

### **III.2.2.3- Le Plio-quaternaire :**

Affleurant principalement sur la partie sud-ouest de la plaine de Bel Abbès, le Plio-quaternaire est représenté par des dépôts alluvionnaires des plateaux, où l'on retrouve :

- des limons rubéfiés à horizons foncés et clairs,
- des limons argileux noirs se déposant en bandes, le long des vallées,
- et des limons rouges, parfois à dalles calcaires, aux niveaux des collines sud de la plaine

### **III.2.2.4- Le Quaternaire :**

- Les dépôts quaternaires sont formés par :
- des alluvions plus ou moins cimentées,
- des conglomérats des chenaux aquifères, pouvant atteindre 50 m, principalement près de Sidi Bel Abbès,
- des travertins près de la région de l'Oued Mimoun,
- une croûte calcaire localisée principalement en bordure des massifs calcaires,
- des alluvions et conglomérats de terrasses en bordures des Oueds,
- des limons et des argiles sableuses, d'une épaisseur allant jusqu'à 10 m,
- des dépôts caillouteux et limoneux parfois grésosableux, à intercalation de lentilles et de bancs de poudingues à gros éléments,
- un complexe argilo-sableux principalement au Sud et à l'Est de la plaine, d'une épaisseur maximale de 70 m,
- des conglomérats (conglomérats à ciment argilo-carbonaté, formés d'éléments centimétriques à décimétriques provenant des matériaux de destruction du Jurassique et du Crétacé) des hauts-plateaux, au Sud de la plaine et dans les vallées alluviales de Sidi Ali Benyoub et des Oueds Mekerra et Lamtar et,

des alluvions très fines et boueuses, reposant sur des formations graveleuses et encroûtées aux niveaux de Mellinet, Boukhanefis et Sidi Khaled.

### **III.3- Tectonique**

La plaine hétérométrique de Sidi Bel Abbès, est le siège de deux types de tectoniques. L'un au Nord, se matérialisant par des phénomènes de charriage, où les formations de l'Oligo-miocène (lambeaux de calcaires éocènes) recouvrent des terrains autochtones d'âge Crétacé moyen et supérieur ; le tout, reposant sur le Miocène moyen marin anté-nappe. L'autre, au Sud, représenté par une tectonique cassante, observée sur des terrains calcaires (karst peu plastique, légèrement ondulé), affectés par des accidents verticaux et sub-verticaux selon les directions suivantes (Auclair & Biehler, 1967) :

Ouest-sud-ouest – Est-nord-est (substratum jurassico-crétacé effondré en graben, à proximité d'Aïn Tellout et au niveau du quartier jonchant la gare de Sidi Bel Abbès (Sourisseau, 1973) et,

Est-sud-est – Ouest-nord-ouest (accidents obliques, délimitant des panneaux en horst et graben).

A l'intérieur de la plaine et aux niveaux des terrains plio-quadernaires, seuls de petits rejets de 10 à 20 mètres sont enregistrés tels que ceux observés dans les conglomérats quadernaires des terrasses de l'Oued Tissaf.

A l'Ouest, les formations plio-quadernaires de la plaine, sont nettement séparées des terrains mésozoïques des hauts plateaux (Thomas, 1985).

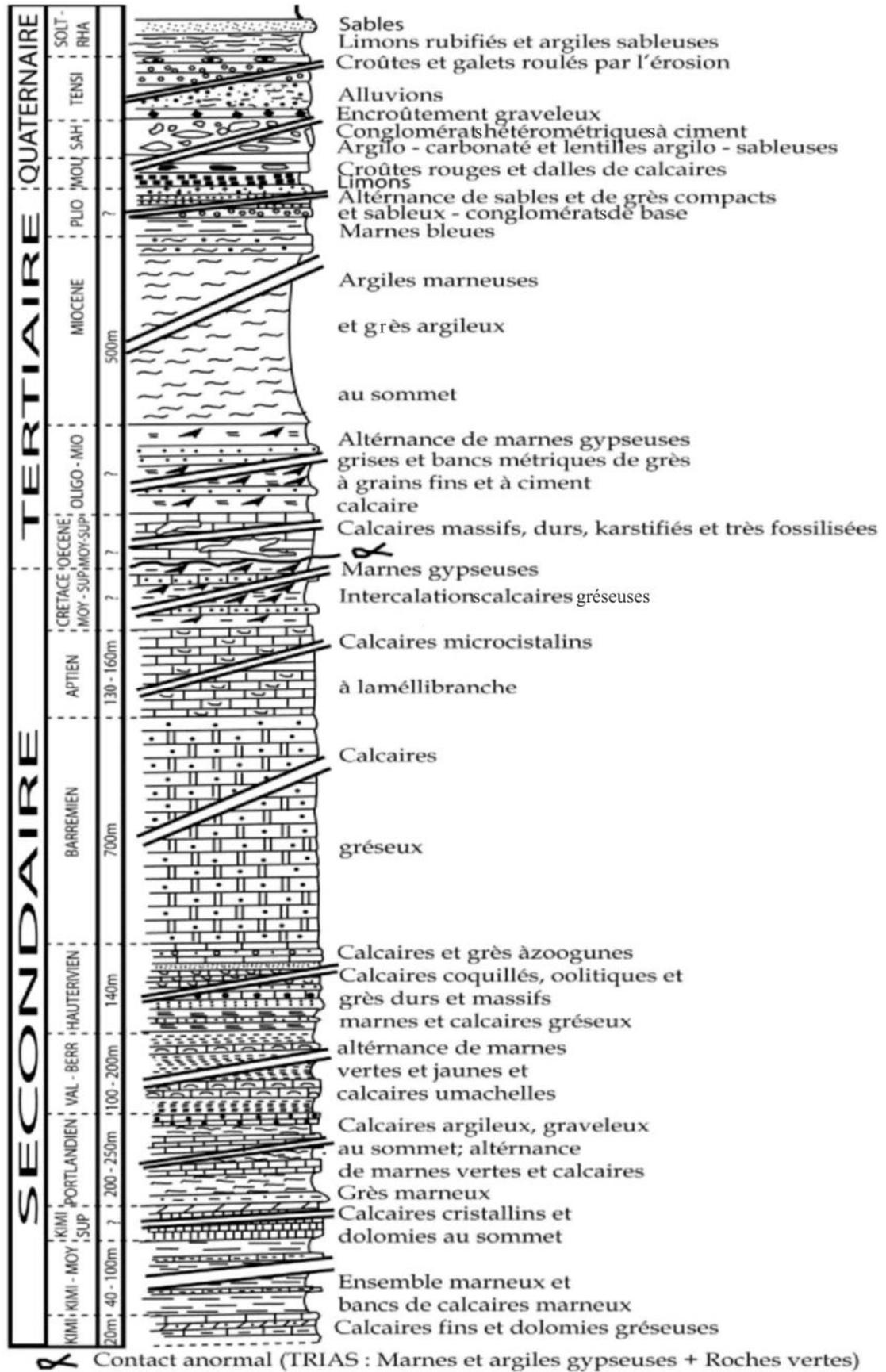


Figure 17. Log géologique synthétique de la plaine de Sidi Bel Abbès (Sourisseau, 1972).

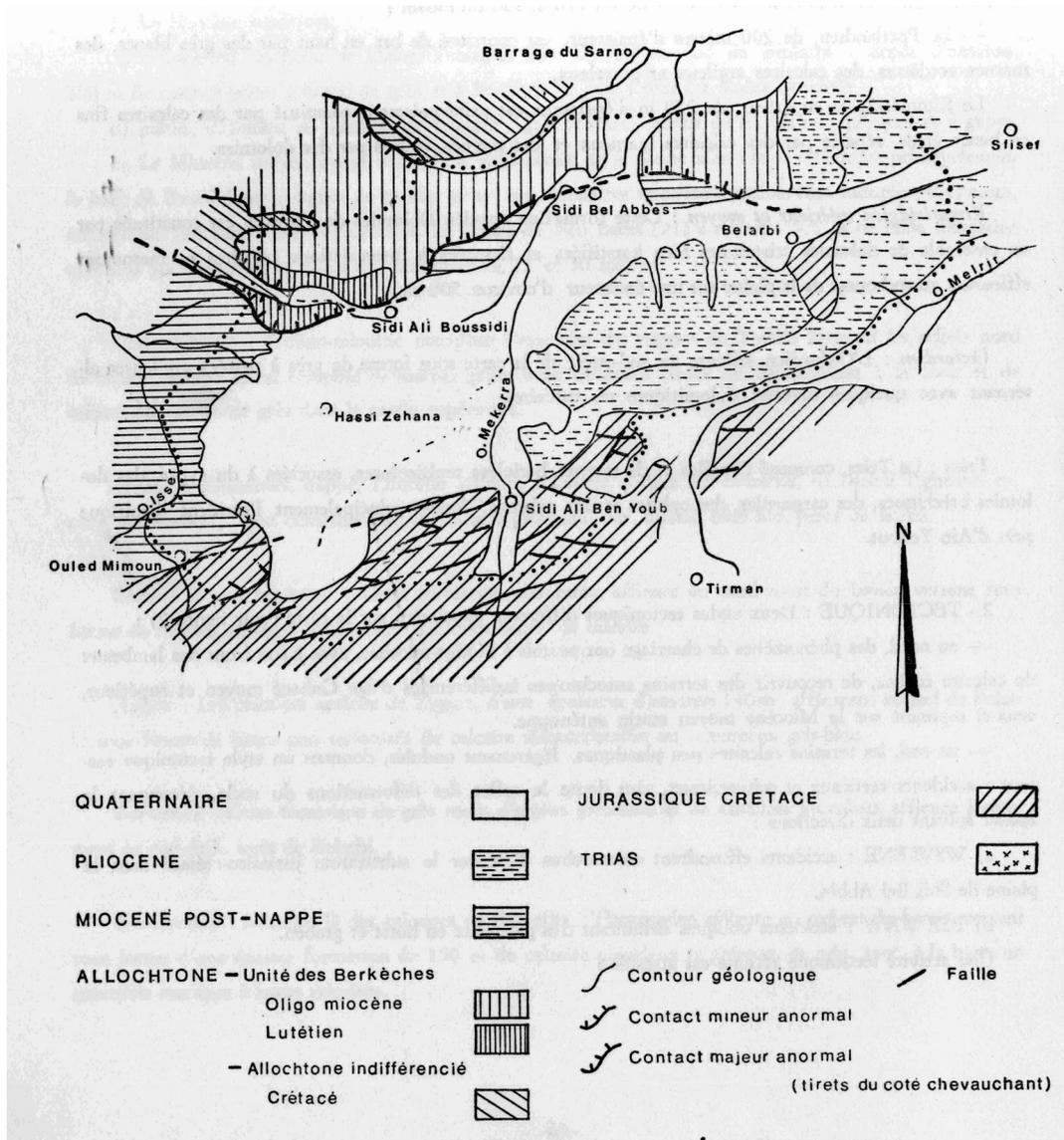


Figure 18. Aperçu structural de la plaine de Sidi Bel Abbès (ANRH, 1974).

**IV- Etude hydrogéologique :**

La plaine de Sidi Bel Abbès n'est pas très connue du point de vue hydrogéologique. En effet, elle n'a fait l'objet que d'une seule étude relativement complète au début des années 70s (Sourisseau) conclue par le tracé d'une carte hydrogéologique de la région d'étude (figure 19). Pour ce qui est des travaux actuels menés par l'ANRH, ils ne s'intéressent qu'aux suivis (non continus) piézométriques et aux analyses hydro-chimiques des eaux de la nappe du Plio-quadernaire.

Le potentiel aquifère de la plaine de Sidi Bel Abbès résumé sur la figure 20 est détaillé ci-dessous. On distingue de bas en haut :

**IV.1- Les calcaires et dolomies du Jurassique-Crétacé de Sidi Ali Benyoub;**

Cette nappe est hydro-géologiquement mal connue. Toutefois, on suppose que les formations jurassico-crétacées (les calcaires de Remaïla et les dolomies de Tlemcen à intercalations marneuses reposant respectivement sur les terrains éocènes et les argiles triasiques) forment un seul horizon aquifère, vu les nombreuses failles susceptibles de les mettre en interconnexion. Cette nappe est essentiellement présente dans le Sud du bassin et sa recharge se fait essentiellement par son impluvium. Elle communique avec la nappe alluviale soit par infiltration latérale directe dans les alluvions et les conglomérats, soit par l'intermédiaire des sources de : Aïn Skhrouna, Aïn Tellout, Aïn Mekarreg, Aïn Tass et Aïn Tatfamane .

**IV.2- Les calcaires de l'Aptien de Zigyne :**

Cette nappe est peu étendue. Formée essentiellement par des calcaires de l'Aptien, elle n'est connue qu'à l'Est de la plaine, au niveau de la forêt de Caïd Belarbi.

**IV.3- Les calcaires de l'Eocène de Sidi Ali Boussidi:**

Cet aquifère est limité vers le bas par un mur formé de marnes du Crétacé moyen supérieur et du Miocène moyen marin. Nonobstant leurs bonnes propriétés hydrodynamiques, les calcaires éocènes de Sidi Ali Boussidi n'ont qu'une importance moindre, en raison de la petitesse de leur impluvium (Auclair et Biehler , 1967).

L'alimentation de cette nappe se fait principalement par son impluvium. Cette nappe était entièrement drainée par les sources de : Aïn El Hadjar, Aïn Anefress et Aïn Meddah dans les années 70s. Ces eaux venaient ensuite, soit se déverser dans les alluvions plio-quadernaires, soit s'écoulaient sur le Miocène marneux pour se ré-infiltrer dans les alluvions de l'Oued Anefress en amont.

**IV.4- Les grès du Pliocène de la forêt de Ténira :**

Cette nappe ne présente pas une grande importance du point de vue hydrogéologique (discontinuité de ses couches aquifères). Toutefois, elle contribue à la recharge de la nappe alluviale par l'intermédiaire de petites vallées étroites qui jouent le rôle de drain. Cet aquifère est constitué de formations conglomératiques pliocènes continentales à la base, surmontées par des grès sableux, parfois argileux ou à limons rouges et repose sur un substratum de marnes grises du Miocène supérieur continental.

**IV.5- Les alluvions du Plio-quadernaire**

La nappe alluviale du Plio-quadernaire de la plaine de Sidi Bel Abbès est, et de loin le réservoir souterrain le plus important de la région d'étude. son intérêt réside également dans le fait qu'elle soit en communication avec les autres horizons aquifères présents dans le secteur d'étude.

L'aquifère du Plio-quadernaire repose sur des marnes bleues, des grès et des molasses du Pliocène marin. Il est formé de dépôts alluvionnaires et de conglomérats (en bordure des Oueds) et porte une nappe libre, sauf entre Sidi Ali Benyoub et Boukhnemis, où elle apparaît semi-captive. L'alimentation de cette nappe se fait par :

- les précipitations,
- les aquifères adjacents (infiltration latérale directe ou des eaux des sources),
- les Oueds, principalement en période de crue, sauf pour l'Oued Tissaf (perte constante de débit près de Sidi Khaled).

L'exutoire principal de l'aquifère plio-quadernaire se trouve au niveau du quartier le « Rocher », au Nord de la ville de Sidi Bel Abbès, où l'Oued Mekerra draine la plus grande partie des eaux de l'aquifère.

En se basant sur les logs géologiques présentés sur les figures (21 – 26), ainsi que la carte hydrogéologique de la plaine de Bel Abbès, nous avons pu réaliser une représentation 3D de l'extension verticale des alluvions plio-quadernaires (figure 27).

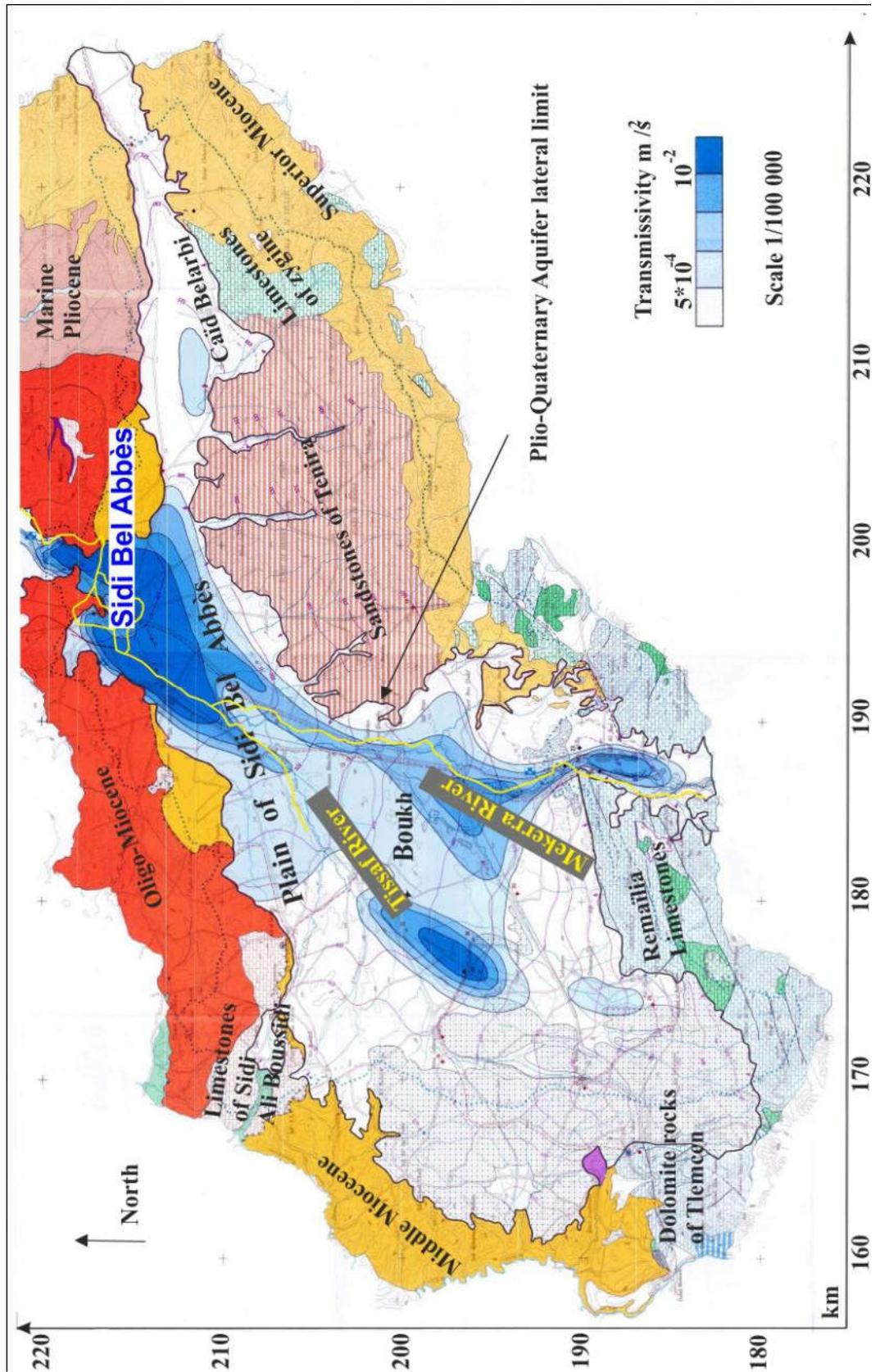
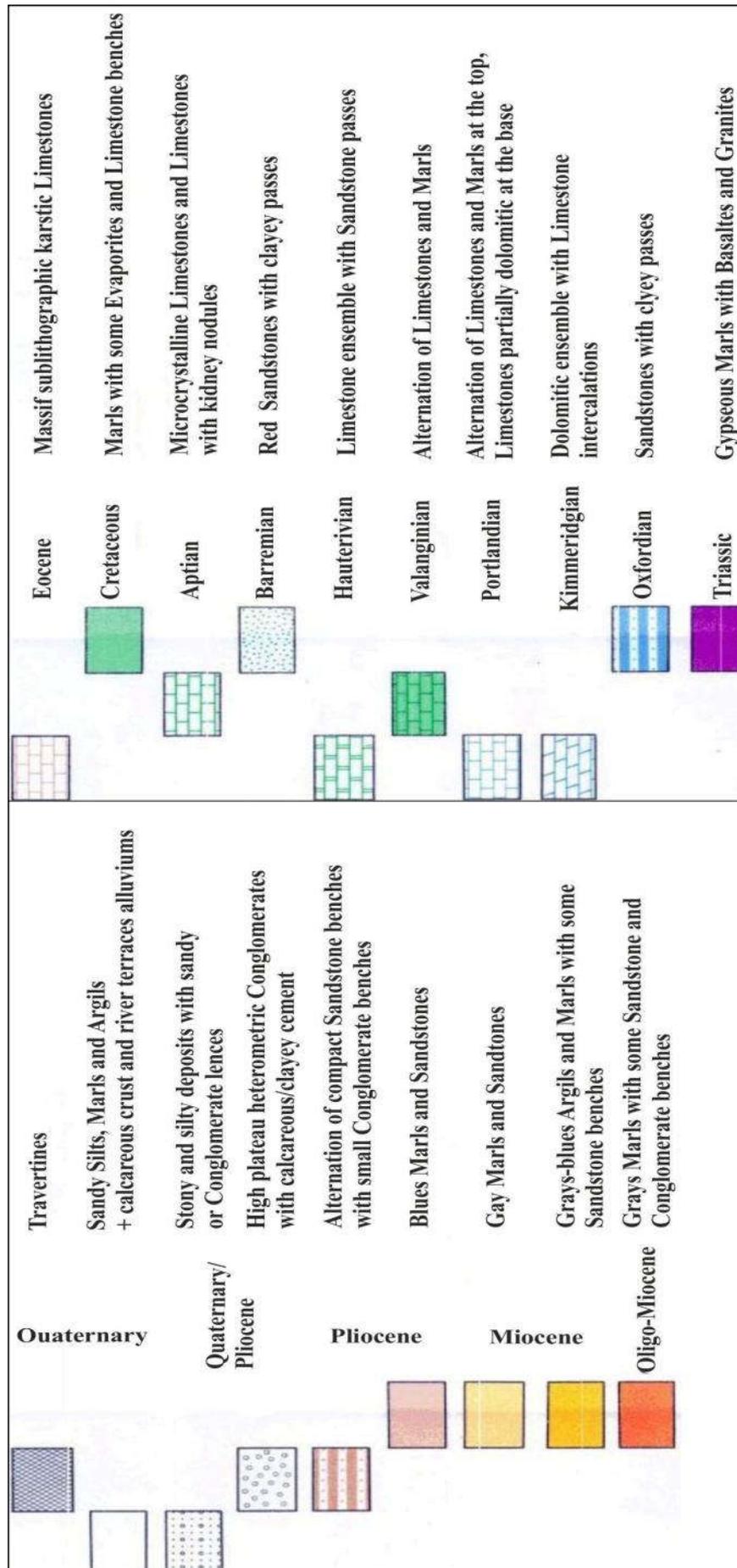


Figure 19. Carte hydrogéologique de la plaine de Bel Abbès (ANRH, 1974)



Âge	Géologie	Hydrogéologie	Epaisseur	
Cénozoïque	Plio-quaternaire	Dépôts caillouteux limoneux, argileux et sableux avec des intercalations de lentilles de sables ou de conglomérats, coupés par un grand chenal d'alluvions grossiers et de conglomérats (parfois hétérométriques) le long de la Mekerra drainant les eaux des calcaires/dolomies jurassico-crétacées au environs de Sidi Ali Benyoub	Moins de 40 m aux limites de la plaine de SBA à plus de 150 m à son Sud	
		Aquifère plio-quaternaires (APQ)		
	Pliocène	Conglomérats surmontés par des sables ou grès en alternance avec des limons rouges et de petite lentilles de conglomérats reposant sur des marnes bleues et grès marins	Aquifère de Tenira	Pliocène continental à épaisseur considérable (non connue)
	Miocène	Argiles marnieuses grises-bleues + grès (sommet), avec q'qs bancs de grès		300 à 500m
	Oligo-miocène	Marnes grises avec des bancs (parfois métriques) de grès et de conglomérats	Formation imperméable: mur de l' APO et toit des calcaires éocènes	Non connue
	Eocène	Calcaires massifs, karstifiés et fossilifères	Aquifère de Sidi Ali boussidi	Non connue
	Crétacé moyen et supérieur	Marne salifère avec intercalations de calcaires	Formation peu perméable au Nord-ouest de la plaine	Non connue
		Calcaires microcristallins	Aquifère de Zyghine	150m
	Mésozoïque	Formation gréseuse rousse parfois argileuse	Formation perméable à faible extension affleurant au Sud de la forêt de Belarbi	700m
		Alternance de calcaires et de marnes puis calcaires partiellement dolomitisés reposant sur une assise dolomitiques à intercalations de calcaires	Aquifère des calcaires de Remaïlia et des dolomies de Tlemcen	500 à 700m
formation gréseuse à passées d'argiles		Formation presque inexistante sur la plaine	Non connue	
Marnes salifères mouchetées contenant de roches volcaniques		Substrat imperméable des calcaires de Remaïlia/dolomies de Tlemcen. Affleure dans les Tessala et à Ain Tellout	Non connue	

Figure 20. Colonne hydrogéologique type de la plaine de Bel Abbès

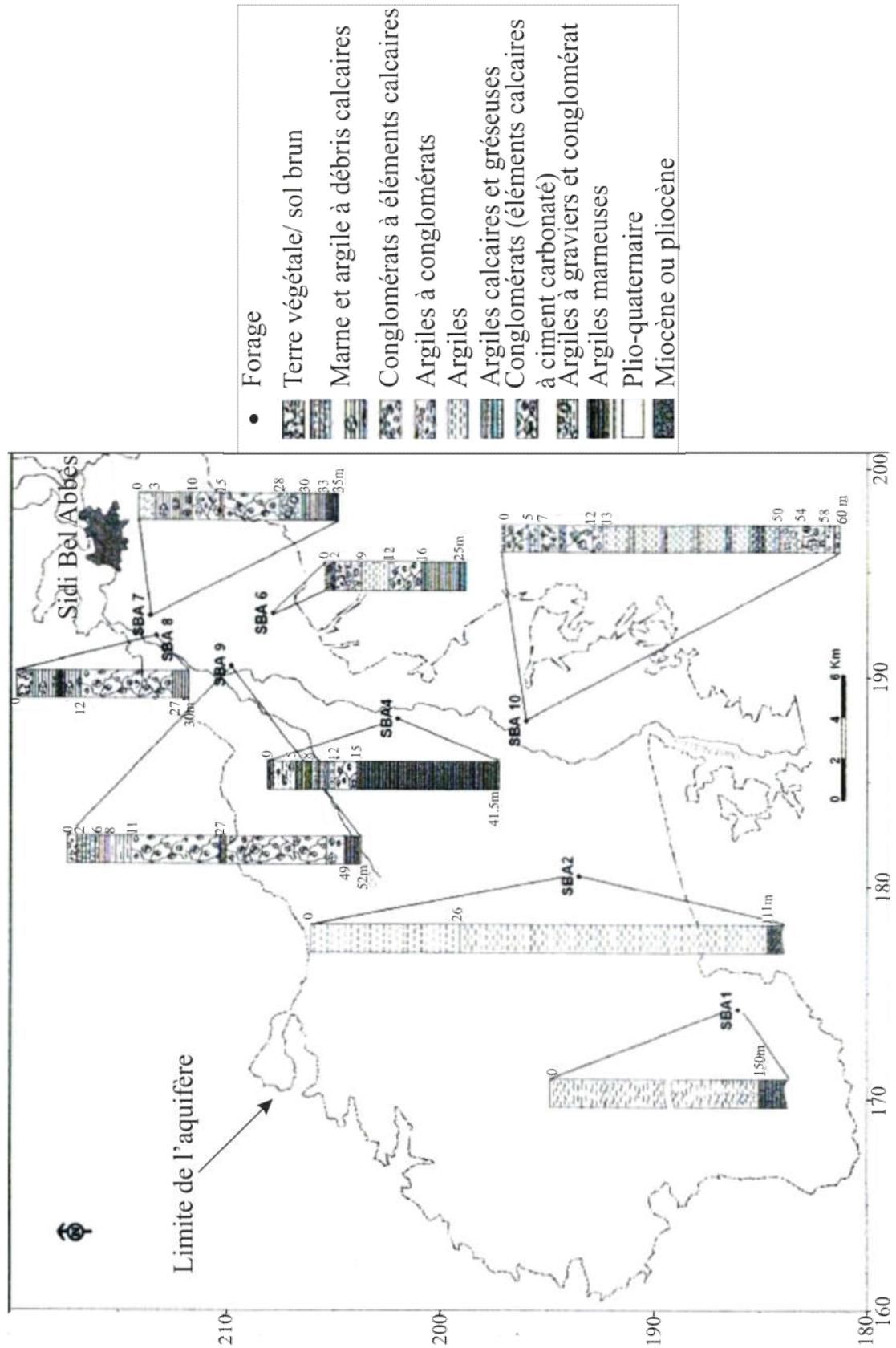


Figure 21. Logs géologiques de quelques forages implantés sur la plaine de Bel Abbès (Sourisseau, 1972 )

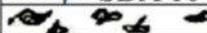
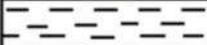
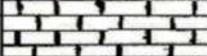
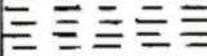
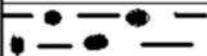
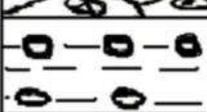
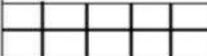
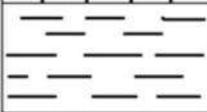
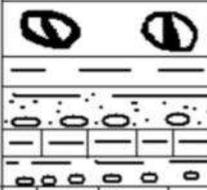
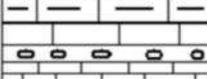
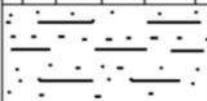
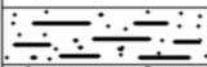
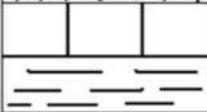
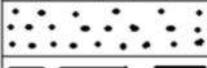
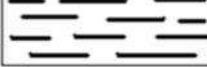
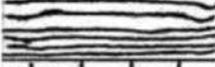
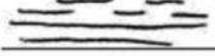
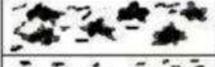
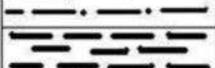
Coupe SBA 10	Profondeur (m)	Description géologique
	0 à 1	Sol rouge croûte calcaire
	1 à 5	Galet et conglomérats calcaires
	5 à 7	Argile plastique rouge et galet
	7 à 11	Galet et conglomérat dans l'argile sableuse
	11 à 13	Calcaire sableux très pur, fissuré, fracturé, avec débit millimétrique
	13 à 17	Conglomérats légèrement argileux
	17 à 19	Galet et roulé et argile
	19 à 50	Argile beige plastique à passage d'argile marneux
	50 à 54	Argile à graviers conglomérats
	54 à 58	Conglomérats
	58 à 61	Argile verdâtre et calcaire gréseux avec base conglomératique
Coupe S YAG	Profondeur (m)	Description géologique
	0 à 2	Calcaire blanc, beige
	2 à 6	Argile brune brique
	6 à 50	Intercalation graviers, gris beige, fin ciment calcaire et argile beige
	50 à 68	Calcaire gris argileux et graviers
	68 à 80	Argile brune plastique
	80 à 90	Argile gris beige sableuse
	90 à 120	Sable et argile grise beige
	120 à 132	Calcaire blanc crayeux et argile
	132 à 138	Sable
	138 à 160	Marne grise

Figure 22. Logs géologiques SBA 10 et Sidi Yagoub (DHW de SBA).

Coupe SBA4	Profondeur (m)	Description géologique
	0 à 1	Terre végétale
	1 à 5	Marne beige et calcaire gréseux friables
	5 à 8	Argile beige.
	8 à 12	Argiles calcaires gréseux beiges.
	12 à 16	Conglomérats avec élément de calcaire gris a ciment carbonaté
	16 à 41	Argile plastique, jaune au sommet verte a la base

Coupe SBA5	Profondeur (m)	Description géologique
	0 à 7	Sol argilo-sableux
	7 à 17	Conglomérats assez dur
	17 à 24	Conglomérats dans une matrice argileux
	24 à 31	Argile jaune sableuse
	31 à 36	Conglomérats très dur bien cimentes
	36 à 66	Argile jaune plastique, argile verte

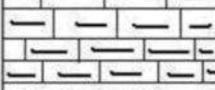
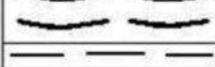
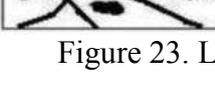
Coupe SBA9	Profondeur (m)	Description géologique
	0 à 2	Sol brun
	2 à 6	Marne verdâtre jaune avec débit calcaire crayeux
	6 à 8	Argile plastique verte et ocre jaune
	8 à 11	Marne de débit calcaire crayeux et d'argile verte
	11 à 27	Ciment argilo-carbonaté
	27 à 28	Conglomérats et argile jaune
	28 à 49	Ciment argilo-carbonaté

Figure 23. Logs géologiques SBA5, SB4 et SB9 (DHW de SBA).

SBA 7	Profondeur (m)	Description géologique
	3 -10	Argiles sableuses
	10-15	Alternance de graviers roulés et de calcaires bruns/bleus
	15-16	Argiles à graviers calcaires
	16-26	Lits de graviers calcaires
	26-30	Argiles à graviers
	30-33	Argiles grises/vertes

Figure 24. Logs géologiques SBA7 (DHW de SBA).

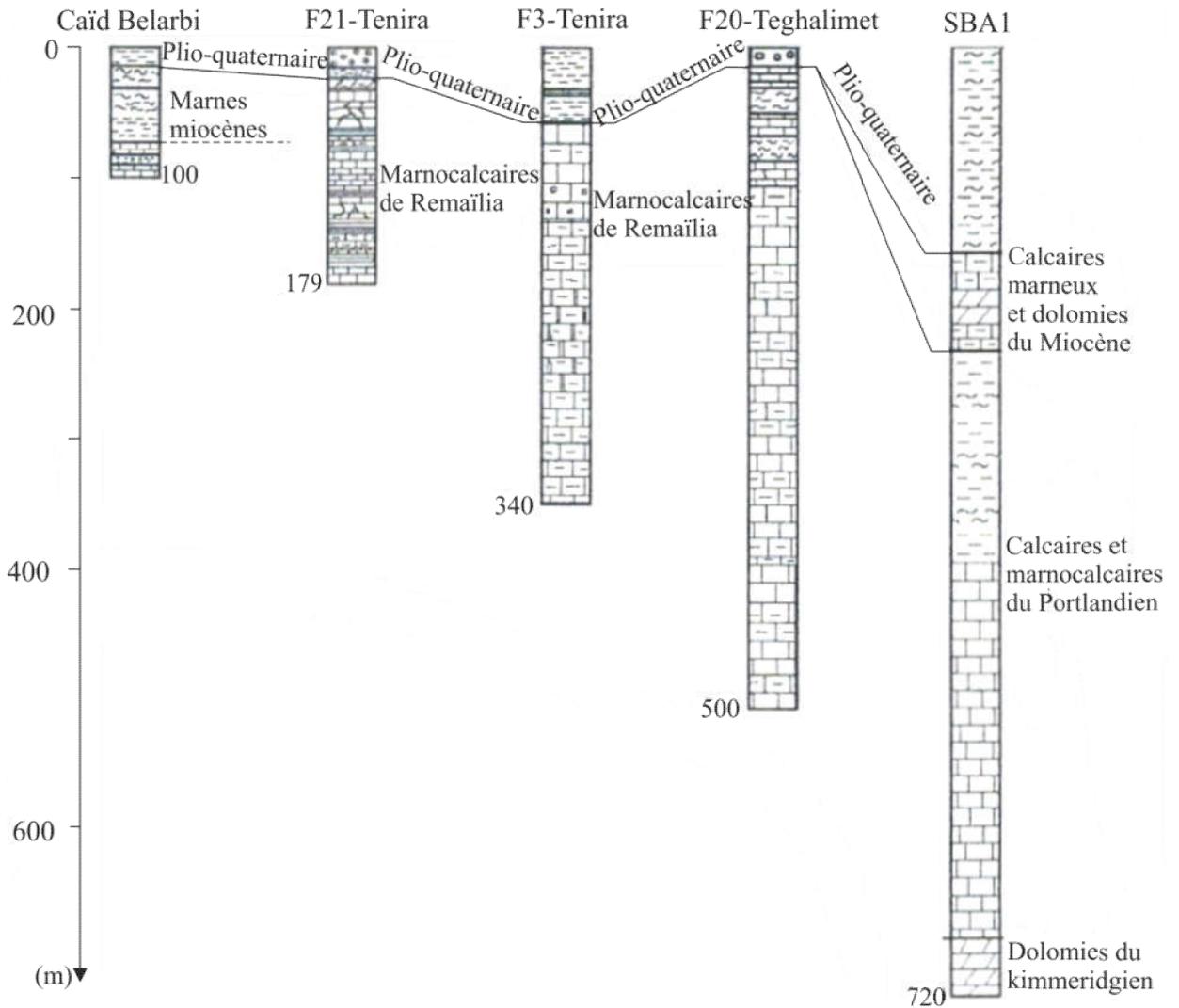


Figure 25. Logs géologiques CB, F20, F3, F21 et SBA1 (in Lebid, 2001).

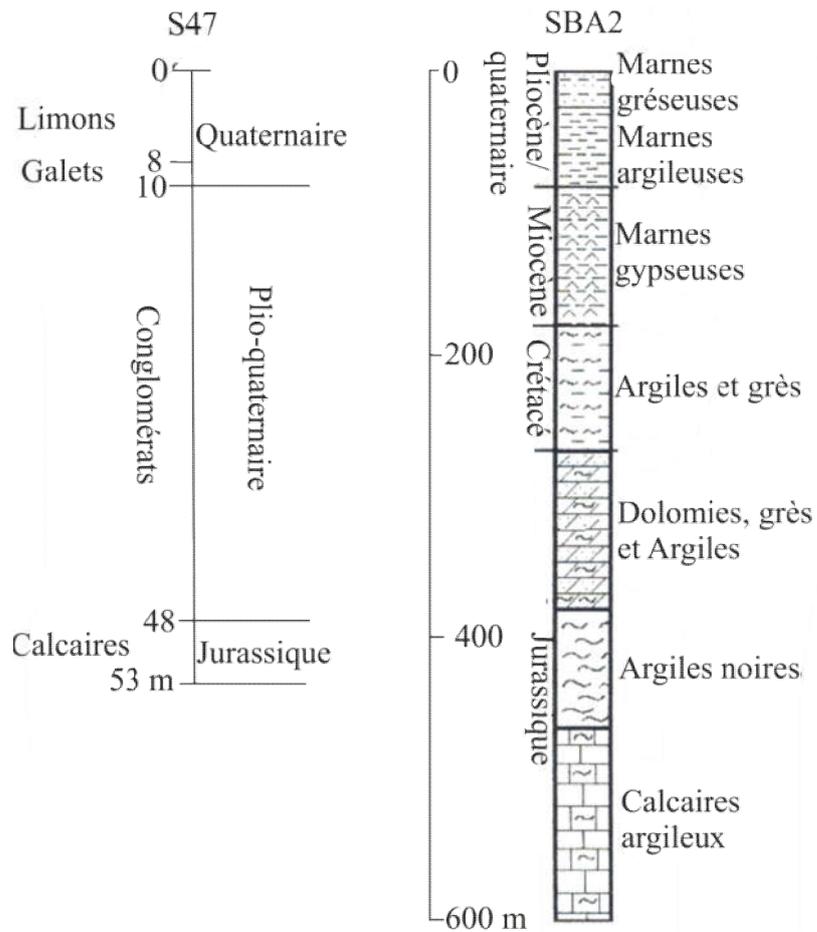


Figure 26. Logs géologiques S47 (ANRH, 1974) et SB2 (in Lebid, 2001)

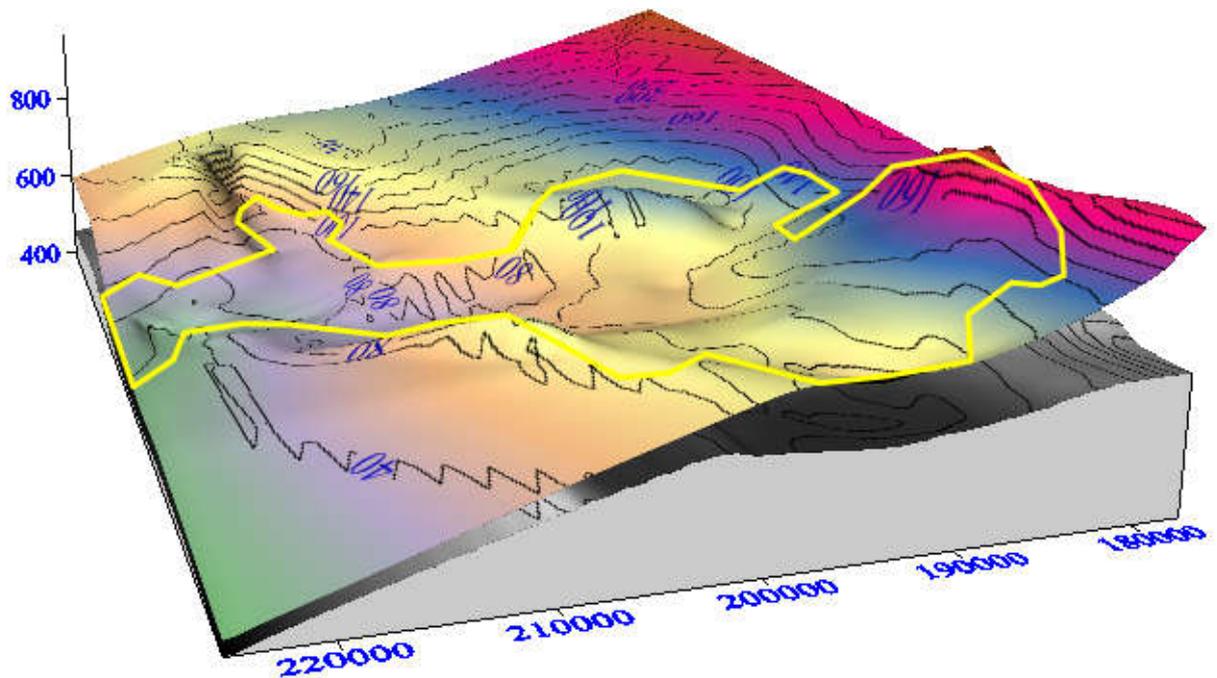


Figure 27. Représentation en 3D des limites verticales et latérales des alluvions plio-quaternaires.

L'observation de la figure 27 montre que l'épaisseur des alluvions plio-quaternaires varie considérablement. En effet, elle est inférieure à 40 m au Nord de la plaine, dépasse 160 m au Sud et se maintient à environ 80 m au centre. Cette grande variation d'épaisseur se répercute non seulement sur le comportement hydrodynamique de la nappe alluviale, mais aussi sur la qualité de ses eaux.

#### IV.5.1- Carte isopach/limite des conglomérats de l'aquifère plio-quaternaire:

En 1973, Sourisseau avait établi une carte d'épaisseur des conglomérats plio-quaternaires (figure 28). Il en ressort que les conglomérats atteignent un maximum d'environ 20 m d'épaisseur au centre du chenal. Toutefois, la carte mentionnée plus haut ne concerne qu'un pan réduit de la plaine.

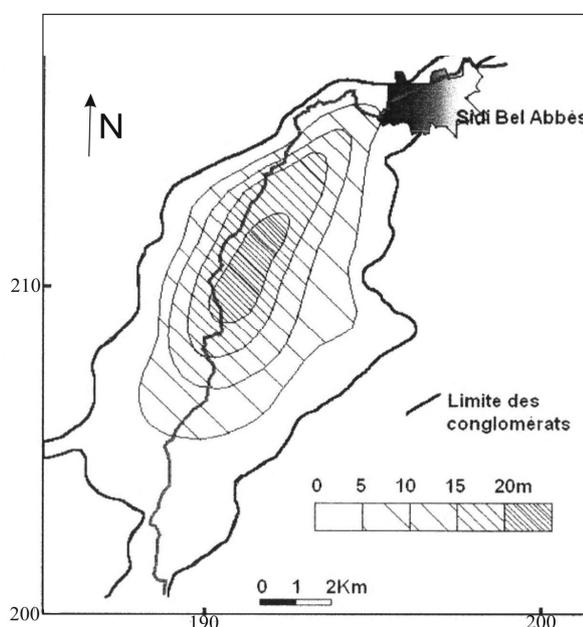


Figure 28. Carte isopache des conglomérats plio-quaternaires (Sourisseau, 1973).

A la lumière de cela et en se basant sur les coupes géologiques de certains forages présents dans la région, ainsi que la carte délimitant la zone des conglomérats (figure 29), nous avons établi une nouvelle carte isopach/limite des conglomérats (figure 30).

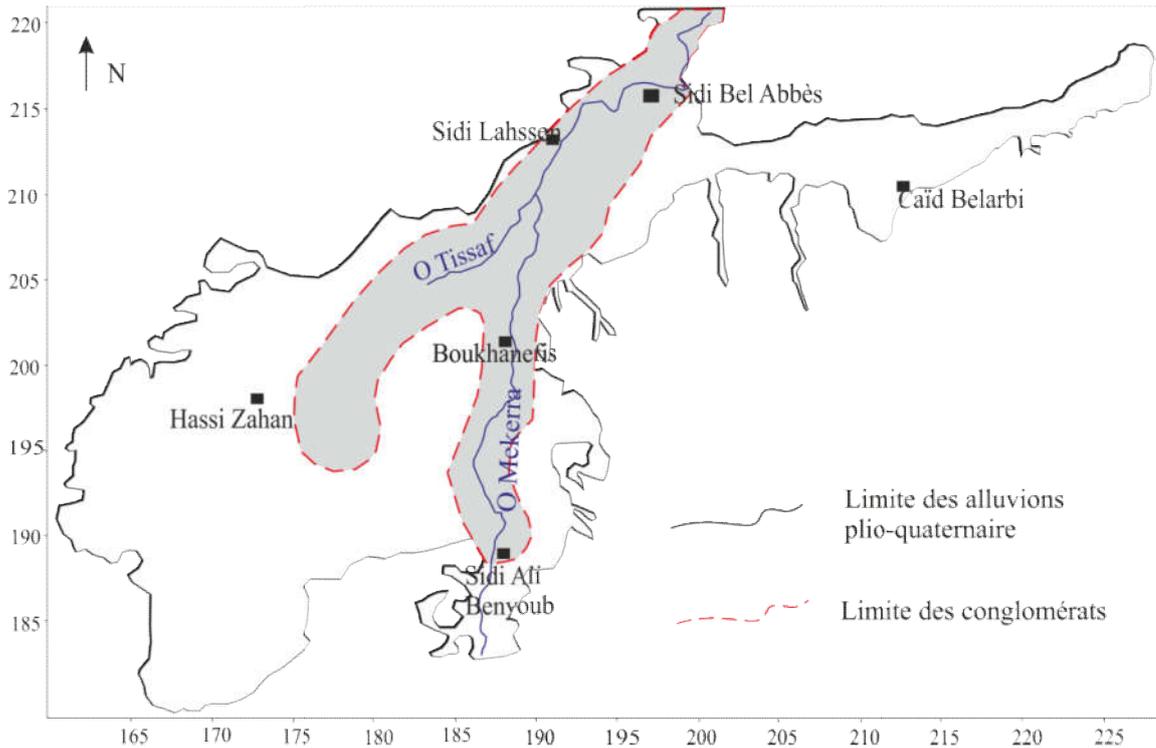


Figure 29. Limite grossière des conglomérats (d'après la SOGREAH).

De la figure 30, les conglomérats plio-quaternaires sont présents le long de l'Oued Mekerra et entre Lamtar et Bedrabine. En effet, sur la base des logs géologiques ainsi que la carte hydrogéologique de la plaine de Bel Abbès (figure 19), nous pensons que les conglomérats au niveau de l'Oued Tissaf ne sont présents qu'au niveau de son affluent l'Oued Bedrabine ; entre la localité portant le même nom et celle de Lamtar. Cela s'appuie dans un premier lieu, sur les valeurs importantes du coefficient d'emmagasinement dans la vallée de Bedrabine (30 %) comparée au reste de l'Oued Tissaf et dans un second lieu, sur les débits de l'Oued Tissaf qui passent de 180 l/s en période d'étiage en amont (au niveau de son affluent Lamtar) à moins de 40 l/s en aval de la confluence avec l'Oued Mekerra (Lerolle, 1976) ; laissant supposée une importante infiltration des eaux, favorisée par une grande perméabilité des terrains entre Bedrabine et Lamtar.

Par ailleurs et contrairement à la carte isopach établie par Sourisseau (figure 28), la figure 30 montre :

que l'épaisseur des conglomérats plio-quaternaires n'atteint pas son maximum uniquement au niveau de Sidi Khaled mais bien aussi à Sidi Ali Benyoub

que l'épaisseur maximale du chenal est d'environ 50m et non 20m seulement.

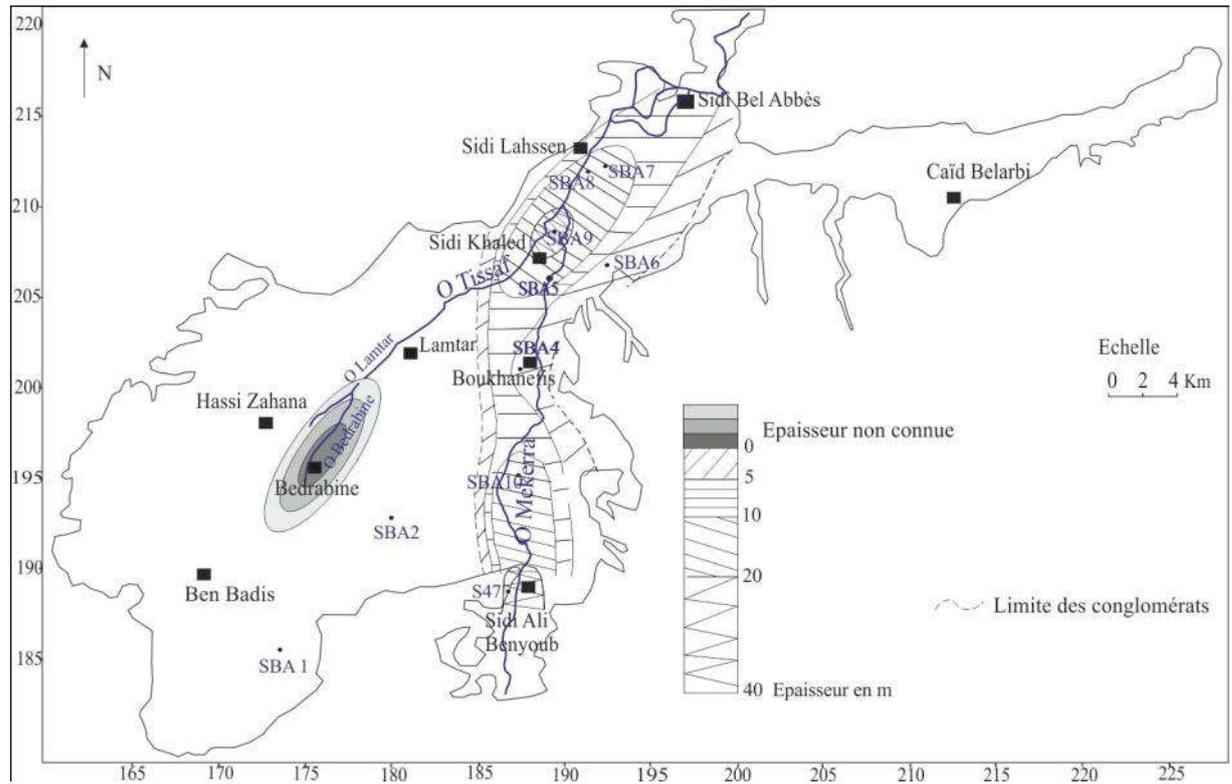


Figure 30. Carte isopach/limite grossière des conglomérats plio-quaternaires.

#### IV.5.2- Piézométrie :

Deux cartes piézométriques de la nappe plio-quaternaire, relatives aux périodes de Janvier 1971 (Sourisseau, 1971) et de Décembre 2014 (carte réalisée par nos soins avec des données de l'ANRH) sont présentées dans ce Chapitre. Toutefois, il est important de signaler qu'en raison du manque de points de mesure utilisés pour dresser la carte de Décembre 2014 (10 pour une superficie de 800 km<sup>2</sup>), cette dernière ne doit être considérée que comme une appréciation personnelle approximative, plutôt qu'une représentation exacte de la piézométrie de la nappe plio-quaternaire.

Les deux cartes (figure 31) épousent la même allure générale. Néanmoins, un net recoulement des isopièzes est observé entre les deux, notamment aux environs de Caïd Belarbi. Cette baisse du niveau de la nappe est due à une diminution des apports pluviométriques et à une exploitation plus importante de la nappe entre 1971 et 2014.

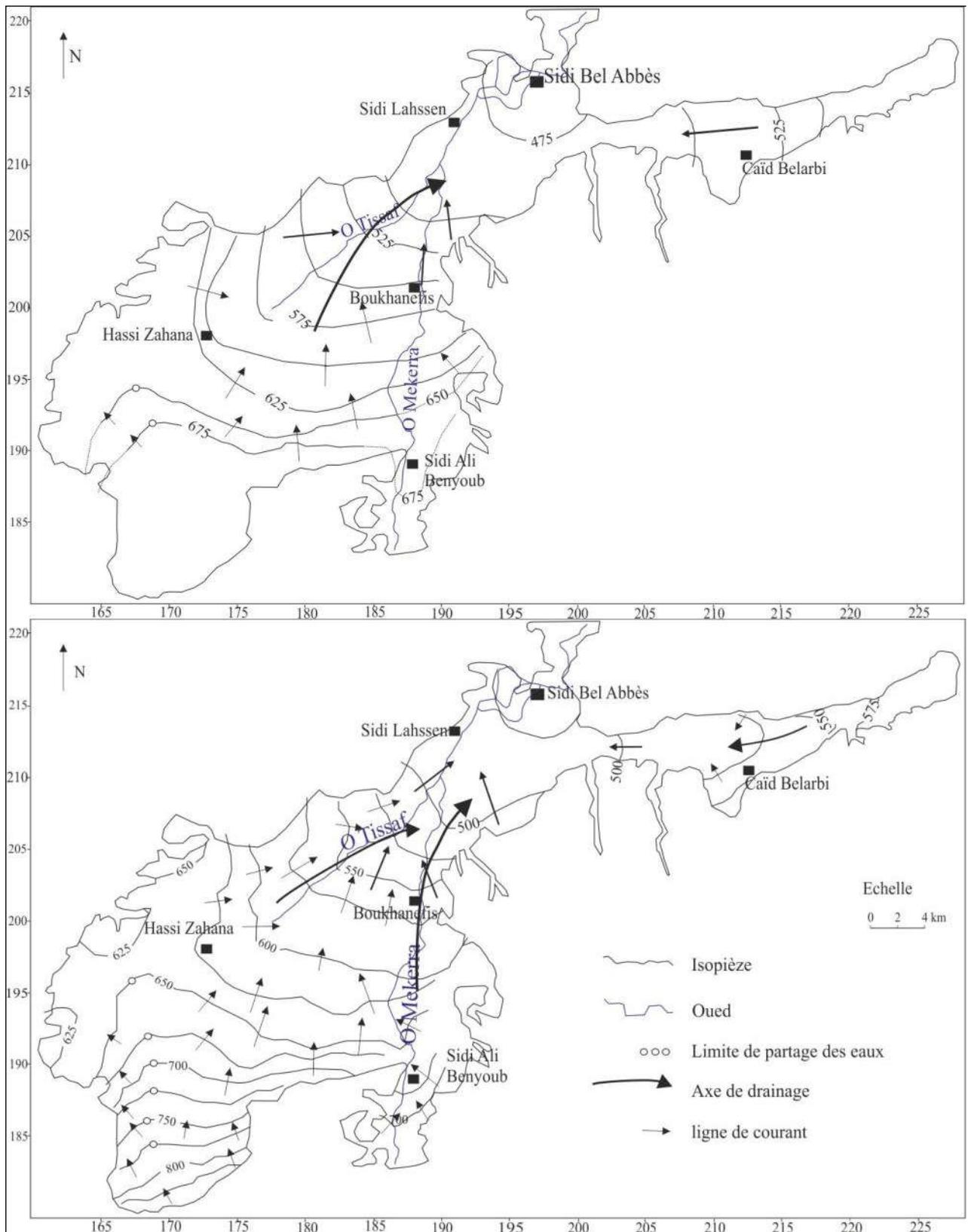


Figure 31 .Cartes piézométriques de la nappe plio-quaternaire (A : Décembre 2014 et B : Janvier 1971).

La figure 31 montre très bien la convergence des eaux vers l'exutoire du Rocher (aval de Bel Abbès). Les directions majeures Nord-Sud et Sud/ouest-Nord/est de l'écoulement souterrain

suivent les tracés respectifs des Oueds Mekerra et Tissaf ; renseignant sur les grandes quantités d'eaux de la nappe drainées par les deux rivières. A l'Est, les écoulements sont moins importants, en raison de la petitesse de la section de la nappe et son épaisseur moins conséquente. Au Sud-ouest, la ligne de partage des eaux se confond presque avec la limite du bassin versant de la Mekerra (voir figure 19). A l'Ouest de cette ligne, il apparait que les eaux de la nappe sont, soit drainées directement par les Oueds Anefress, Bou Khanem et Lamtar (affluents de l'Oued Tissaf), soit butent sur le Miocène imperméable (marnes et argiles) et réapparaissent aux niveaux des sources : Aïn Tellouf, Aïn Berkouk et Aïn Meddah.

L'alimentation de la nappe plio-quadernaire se fait principalement par son impluvium et à un degré moindre par les aquifères adjacents mentionnés auparavant.

#### **IV.5.3- Interaction nappe libre / Mekerra :**

L'étude piézométrique a mis la lumière sur l'influence que peut avoir la Mekerra sur l'aquifère plio-quadernaire. Ainsi, dans le but d'apporter plus d'éclaircissement sur les interactions prenant place entre ces deux entités hydrogéologiques, nous présentons la figure 32.

Les deux tracés « a et b » sur la figure 32 sont presque identiques, sauf entre Sidi Lahssen et le Rocher. Cela s'explique par le fait que dans le tracé « a », il n'est pris en considération que les débits du cours d'eau principal (naturel) de la Mekerra, sans ceux des dériviatiions.

De la figure 32, il apparait que le débit de l'Oued augmente de l'entrée de la plaine (Sud de Sidi Ali Benyoub) jusqu'à Tabia ; arrivant à Boukhanefis, le débit diminue de 80 l/s, passant de 430 à 340 l/s. Cette faible diminution des débits de l'Oued (la diminution de 80l/s du débit de la Mekerra ne correspond pas aux débits de 171 l/s soustrais à l'Oued par les dériviatiions) est due à une remonté des eaux en charge (le niveau du lit de l'Oued est plus haut que le niveau de la nappe libre dans cette zone pour supposer un drainage de la nappe libre) à travers l'affleurement des conglomérats de base pliocènes (de nombreux affleurements de conglomérats fissurés peuvent être observés entre Sidi Ali Benyoub et Boukhanefis, notamment au niveau de Tifiles), qui constituent à ce niveau de la plaine, la partie semi-captive de la nappe plio-quadernaire.

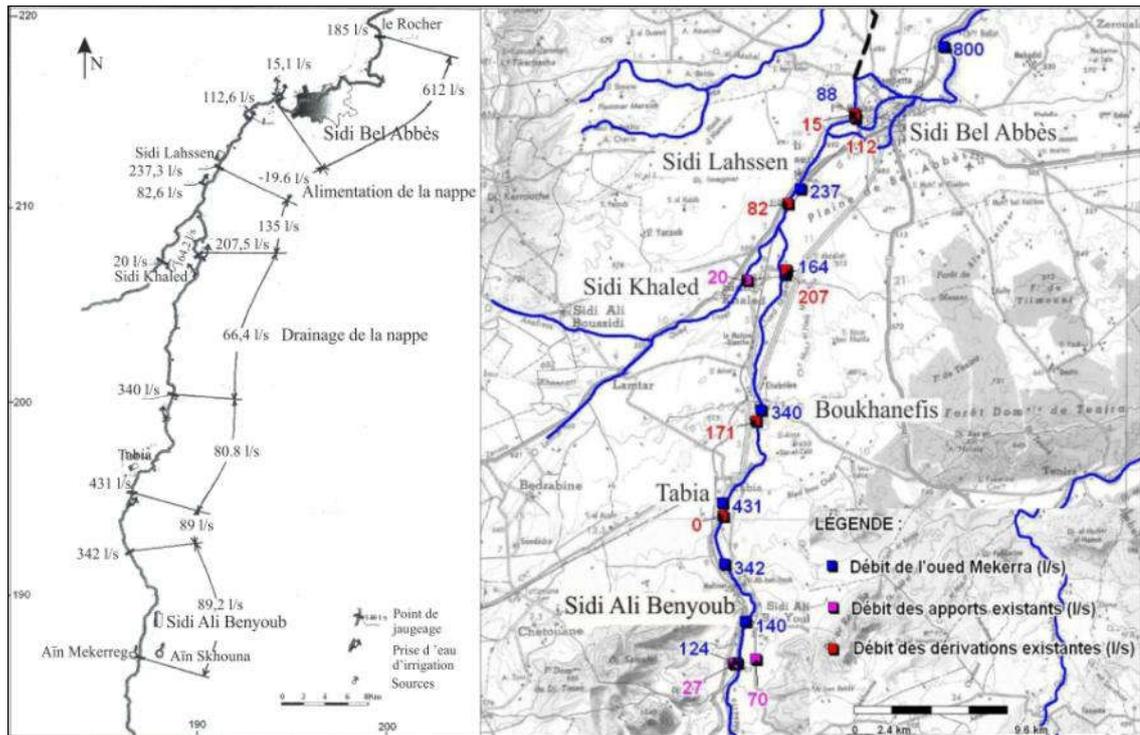


Figure 32. Interaction de l'aquifère plio-quadernaire avec la Mekerra (Sourisseau, 1973; DEMRH, Janvier 1971).

De Boukhanefis à Sidi Khled, le débit de l'Oued Mekerra diminue de moitié à cause des nombreuses dérivations (207 l/s) destinées à l'irrigation. De Sidi Khaled à Sidi Lahssen, il apparait que les échanges nappe/rivière ne sont pas très importants, en raison d'une sédimentation de plus en plus argileuse du lit de l'Oued. Par ailleurs, on note des apports de l'ordre de 20 l/s de l'Oued Tissaf qui viennent se déverser dans la Mekerra.

Entre Sidi Lahssen et le Rocher, la Mekerra draine d'importante quantité d'eau de la nappe plio-quadernaire. En témoigne le débit de l'Oued qui a presque triplé en moins de 15 km, passant de 237 l/s à 800 l/s (sans prendre en compte les débits des dérivations).

D'après l'étude réalisée par Lerolle en 1976 (figure 33), les débits de la Mekerra augmentent régulièrement de Sidi Ali Benyoub jusqu'à la confluence avec l'Oued Tissaf. A ce niveau, on remarque que la courbe de Juillet 1974 dépasse celle de Mars de la même année. Cela pourrait être le résultat d'un évènement pluvieux singulier, précédant la période de jaugeage. De la confluence avec l'Oued Tissaf jusqu'à la dérivation vers le barrage Sarno, l'alimentation de l'Oued par la nappe diminue. Au niveau de la station du Rocher, les trois courbes rebondissent de façon assez spectaculaire, indiquant un drainage important des eaux de la nappe du plio-quadernaire par la Mekerra.

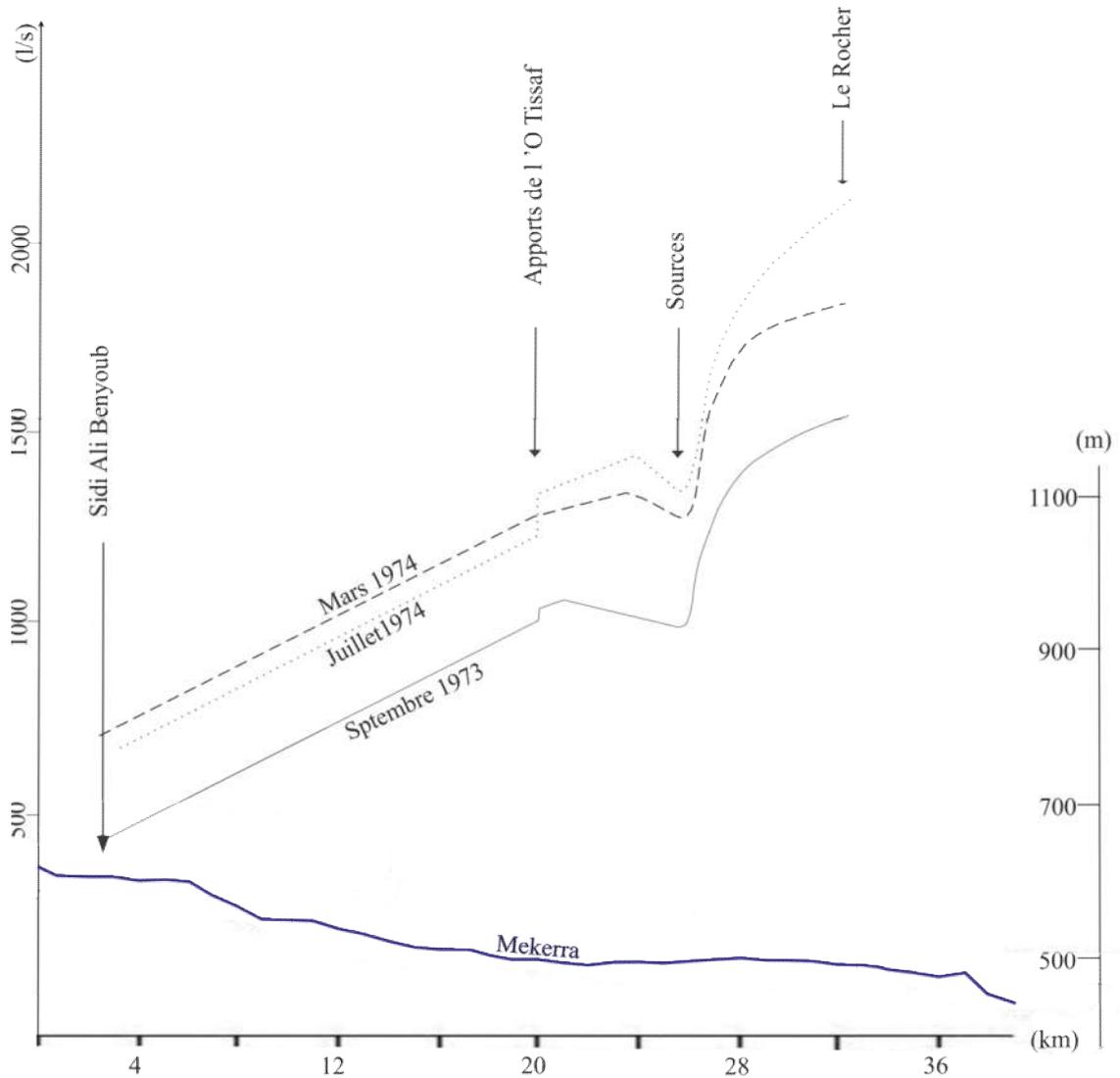


Figure 33. Evolution du débit de la Mekerra de Sidi Ali Benyoub jusqu'à l'exutoire du Rocher (Lerolle, 1976; modifiée).

**IV.6- Comportement hydrodynamique :**

Le tableau 10 regroupe les valeurs de Transmissivité « T » et du coefficient d'emmagasinement « S » relatives aux différentes nappes de la plaine de Sidi Bel Abbès.

Tableau 10. Paramètres hydrodynamiques des aquifères de la plaine de Bel Abbès.

	T (m <sup>2</sup> /s)	S
Nappe du Plio-quaternaire	De 5.10 <sup>-4</sup> à 10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-3</sup> à 3.10 <sup>-1</sup>
Nappe des grès pliocènes	10 <sup>-4</sup> à 5. 10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-2</sup>
Nappe des calcaires éocènes	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-1</sup>

**IV.6.1- Transmissivité :**

Les zones les plus transmissives au niveau de la plaine de Sidi Bel Abbès se trouvent aux environs des localités de Sidi Bel Abbès, Sidi Lhassen, Bedrabine et Sidi Ali Benyoub.

Durant la période 1972/73, de nombreux essais de pompage ont été réalisés par Sourisseau. Toutefois, bon nombre de ces essais fût remis en question par Lerolle en 1976, estimant que les résultats obtenus par les essais réalisés sur les puits de ferme, ne représentaient pas les perméabilités réelles du milieu, mais seulement la vidange des ouvrages. Ainsi, il estima les valeurs de la perméabilité verticale entre  $5.10^{-9}$  m/s (alluvions et conglomérats) et  $8.10^{-8}$  m/s (zone aval de l'Oued Tissaf).

Concernant les transmissivités des grès pliocènes et des calcaires éocènes, elles sont assez faibles, dues à une présence conséquente d'argile au sein des deux formations aquifères.

**IV.6.2- Coefficient d'emmagasinement**

Les coefficients d'emmagasinement obtenus à partir des essais de pompage sur forages réalisés par Sourisseau entre 1972 et 73 ont démontrés que les zones présentant le plus fort potentiel d'emmagasinement ( $S = 25$  à  $30$  %) sont celles des vallées : de Bedrabine, Tabia et Sidi Ali Benyoub. Les vallées de Tatfamane et de l'Oued Annefress, pareillement que le long de la Mekerra, présentent également de bonnes valeurs d'emmagasinement, de l'ordre de  $10$  %.

**V- Etude hydrochimique:**

La salinité des eaux souterraines est liée soit à l'eau de mer (directement ou indirectement), soit aux interactions eaux-roches. Malgré l'éloignement par rapport à la mer, le cycle marin joue un rôle prépondérant dans la salinité des eaux dans le domaine continental. L'origine marine se matérialise par les aérosols, l'intrusion directe de l'eau de mer dans les aquifères côtiers, les saumures sédimentaires et les eaux marines connées (syngénétiques). L'évaporation de l'eau de mer conduit à la formation de saumures sédimentaires primaires, qui peuvent se transformer en roches évaporites. Ces dernières sont dissoutes en contact avec des eaux souterraines ou de surface et donnent naissance à des saumures dites "secondaires", qui, même à faibles quantités, engendrent une salinisation significative des eaux.

Les eaux de surface, initialement faiblement minéralisées, peuvent par interaction avec la roche et sous l'effet de l'évaporation, devenir salines, avec des concentrations en sel, pouvant conduire jusqu'à la précipitation d'évaporites, notamment dans les zones arides ou semi-arides. La formation des sels solides se fait principalement dans les sols agricoles fréquemment irrigués et les bassins endoréiques, où le taux d'évaporation atteint ou excède celui des précipitations. L'interaction avec des roches cristallines (interaction favorisée par des températures et pressions élevées (fluides hydrothermales)) qui contiennent des inclusions fluides de tailles microscopiques, mais souvent très concentrées en sels (Nordstrom et al, 1989) est une autre source majeure de salinité (exemple des zones des boucliers scandinaves et canadiens). Dans les régions volcaniques actives, les gaz riches en chlorures, soufre et autres composés, contribuent également à la salure des eaux.

Etant presque toujours en mouvement, les eaux souterraines interagissent avec le matériau aquifère en milieu souterrain et dissolvent, transportent et déposent : des minéraux, du gaz et de la matière organique. La composition ionique des eaux souterraines varie sensiblement en fonction, des caractéristiques chimiques de la pluie et des eaux de surface, des propriétés des sols de ruissellement et des roches dans lesquelles elles se déplacent. Le temps de contact entre les eaux souterraines et le matériau géologique le long de leur trajet d'écoulement influe directement sur les phénomènes, d'échange d'ions, les réactions d'oxydoréduction, la dissolution, l'évaporation, la précipitation et les processus microbiologiques. En règle générale, la qualité chimique des eaux souterraines dépend grandement du matériau aquifère hôte (Eriksson et Khunakassen, 1966).

Un certain nombre d'actions humaines se superposent à celles du cycle naturel sels / eau et contribuent à la salinisation des eaux telles que, la surexploitation des nappes par pompage (intrusions salines dans les aquifères côtiers (biseau salé) ou échanges verticaux, faisant remonter

des eaux salines profondes), l'irrigation (salinisation des sols et des nappes), surtout dans les climats arides et semi-arides, les rejets domestiques et industriels (eaux usées, les exhaures miniers, les eaux du salage hivernal des routes, les répercussions de l'exploitation de la potasse, du dessalement et de la production de soude, etc.) ainsi que les déchets solides (qui peuvent se dissoudre et contribuer à la salinisation des eaux).

L'aquifère plio-quaternaire de la plaine de Sidi Bel Abbès, de par son extension (grande hétérogénéité des formations le composant), ainsi que son emplacement (zone à grande densité de population et à grande activité industrielle et surtout agricole) est soumis à un bon nombre de processus cités plus haut. Ainsi, la caractérisation hydrochimique des eaux de l'aquifère plio-quaternaire aura pour but d'identifier et d'étudier ces processus.

Dans ce Chapitre, on essayera donc, de répondre aux deux questions fondamentales suivantes :

d'où provient la salinité des eaux souterraines de la plaine de Sidi Bel Abbès ?

et

par quels mécanismes, elles l'acquièrent ?

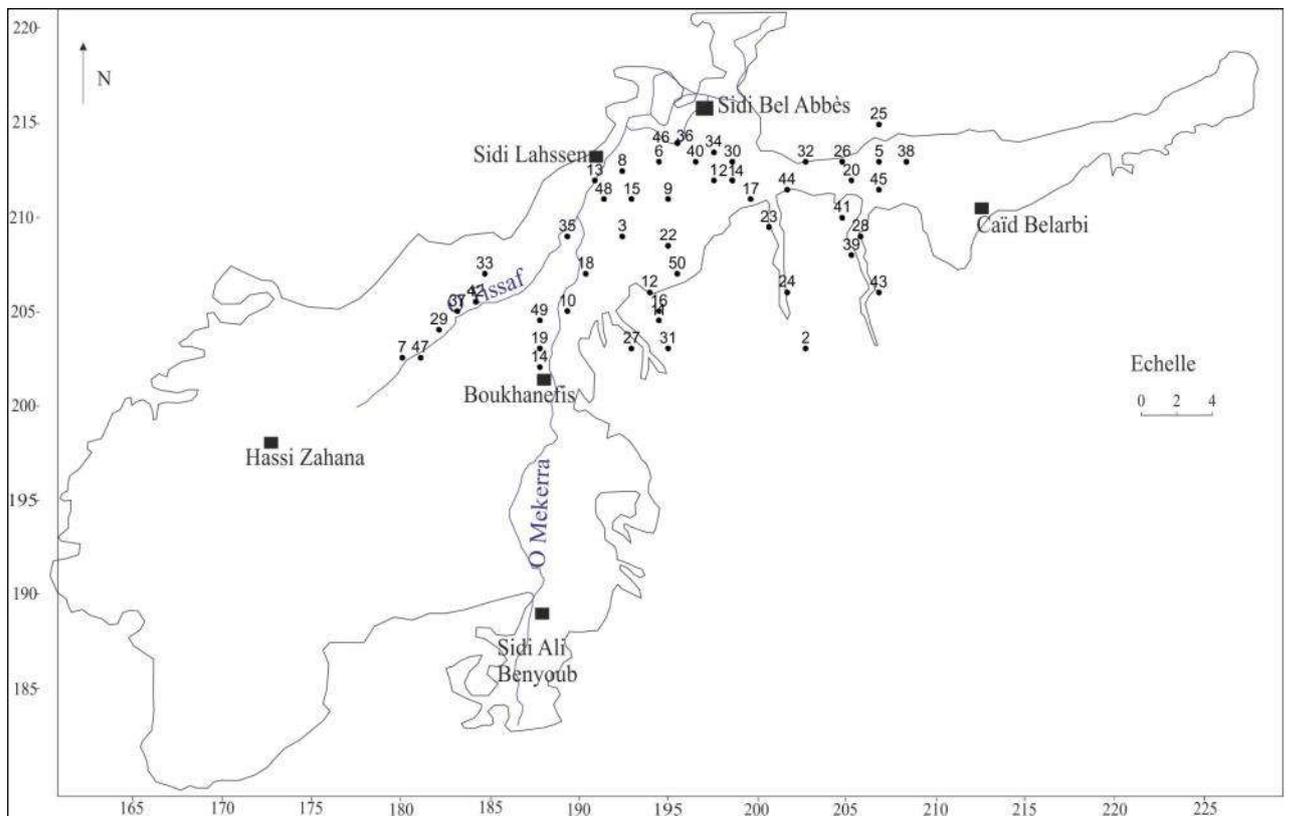


Figure 34. Localisation des points d'eau échantillonnés en Mai / 1989 (ANRH).

**V.1- Présentation des données :**

L'étude hydrochimique des eaux de la nappe plio-quadernaire de la plaine de Sidi Bel Abbès s'est basée sur des données de l'ANRH d'Oran, récoltées lors des campagnes d'échantillonnage de Mai / 1989 et celles entre 1970 - 2006. Ainsi, après traitement des données, 50 échantillons dont la balance ionique était inférieure à 5% ont été retenus pour l'étude hydrochimique des eaux de la nappe plio-quadernaire.

Il est important de signaler ici, que nous avons disposé de données récentes, relatives à la campagne de Juin / 2008 que nous n'avons pas utilisé dans ce chapitre, en raison du nombre réduit des points d'eau échantillonnés (< 20) lors de cette campagne.

Les résultats des analyses chimiques des eaux de la nappe plio-quadernaire sont présentés en annexe (annexe 1).

**V.2-Paramètres physiques :**

Du tableau 11, il apparaît que les eaux de la nappe plio-quadernaire sont assez minéralisées, surtout au niveau du puits P41. En effet, à l'exception de P11, P49 et P27, tous les échantillons ont une minéralisation supérieure à 1 g/l.

Tableau 11. Paramètres physiques des eaux de la nappe plio-quadernaire.

Paramètres	Min / Puits 11, 27 et 49	Max / Puits 41	Moyennes
Conductivité ( $\mu\text{s}/\text{cm}$ )	1300	8400	3843
Minéralisation (mg/l)	802	5208	2382
Résidu sec (TDS) (mg/l)	1035	8139	2946

**V.2.1- Le résidu sec et la conductivité électrique:**

Il existe plusieurs classifications de la salinité des eaux en fonction du résidu sec ; le tableau 12 en regroupe quelques-unes.

Il est à noter que d'autres classifications sont présentes dans la bibliographie; certaines, relativement récentes, telles que celle de Hem (1985), d'autres, plus anciennes à l'image de celle de Gosselet (1886). Toutefois, elles se superposent presque toutes à celles du tableau 12.

D'après Robinove et al (1958) et Heath (1983), 30 échantillons sont légèrement salés et 20 le sont modérément. D'après Davis par contre, ils sont tous saumâtres.

D'après les directives de l'organisation mondiale de la santé (OMS) (Genève, 2008), la palatabilité d'une eau avec un résidu sec inférieur à 600 mg/l est généralement considérée bonne.

Par ailleurs, lorsque la valeur dépasse 1g/l, les caractéristiques organoleptiques de l'eau potable sont significativement affectées.

Tableau 12. Classification des eaux de la nappe plio-quaternaire selon le résidu sec.

Résidu sec (g/l) Classification	Robinove et al, 1958	Davis, 1964	Heath, 1983
< 1	Douce	Douce	Douce
1 - 3	Légèrement salée	-	Légèrement salée
1 - 10	-	Saumâtre	-
3 - 10	Modérément salée	-	Modérément salée
> 10	Très salée	-	-
10 - 35	-	-	Très salée
10 - 100	-	Salée	-
> 35	-	-	Saumure naturelle (brine)
> 100	-	Saumure naturelle	-

Tableau 13. Palatabilité des eaux en fonction du résidu sec  
(directives de l'OMS pour les eaux potables).

Résidu sec (mg/l)	Palatabilité (eau potable)
< 300	Excellente
300 - 600	Bonne
600 - 900	appréciable
900 - 1200	mauvaise
> 1200	intolérable

Sur la base des données du tableau 13, trois échantillons uniquement (P11, P27 et P49) présentent un caractère gustatif relativement acceptable.

D'après Rodier (2005) (tableau 14), tous les échantillons de la nappe plio-quaternaire sont impropres à la consommation humaine, exception faite des eaux des puits P11, P27 et P49, dont le résidu sec  $\approx$  1g/l .

Tableau 14. Potabilité des eaux en fonction du résidu sec (Rodier, 2005).

Résidu sec (mg/l)	Potabilité
< 500	Bonne
500 - 1000	Passable
3000 - 4000	Mauvaise

Pour les eaux potables, l'OMS préconise deux valeurs de résidu sec : désirée (< 0,5 g/l) et maximum à ne pas dépasser (< 1,5 g/l). Sur cette base, 5 puits uniquement captent des eaux à potabilité acceptable (du point de vue salinité seulement).

La potabilité des eaux peut être également estimée en fonction de leur conductivité électrique (CE). D'après la classification de Rodier (2005) (tableau 15). 12 échantillons sont très minéralisés, tandis que les 38 restants n'appartiennent à aucune catégorie (CE > 2500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). D'après Petelon et Zysman (1993) (tableau 16), tous les échantillons de la nappe plio-quaternaire ont une minéralisation excessive.

Tableau 15. Classification des eaux de la nappe plio-quaternaire en fonction de la CE (Rodier, 2005).

CE $\mu\text{S}/\text{cm}$	Type d'eau
< 23	Eau pure
100 - 200	Eau douce peu minéralisée
250 - 500	Eau à minéralisation moyenne
1000 - 2500	Eau très minéralisée

Tableau 16. Potabilité des eaux en fonction de la CE (petelon et Zysman, 1993).

CE $\mu\text{S}/\text{cm}$	minéralisation	Qualité de l'eau
< 100	Très faible	Excellente
100 - 200	Faible	Excellente
200 - 400	Peu remarquée	Excellente
400 - 600	Moyenne	Bonne
600 - 1000	Importante	Utilisable
> 1000	Excessive	Utilisable

La figure 35, représente la répartition spatiale des moyennes du résidu sec sur 36 ans (de 1970 à 2006) des eaux de la nappe plio-quadernaire.

De la figure 35, l'augmentation de la salinité des eaux de la nappe plio-quadernaire ne se fait pas suivant une direction préférentielle définie. Néanmoins, il apparaît que les plus faibles concentrations sont enregistrées dans le secteur entre Lamtar, Hassi Zahana et jusqu'au Sud-est de Ben Badis. Les moyennes et fortes concentrations sont plutôt observées au centre et au Nord du secteur d'étude. Cette différence de minéralisation est liée à :

un changement de faciès géologique qui passe des alluvions à bonne perméabilité, vers une sédimentation plus fine, surtout entre Sidi Khaled et Sidi Lahssen, induisant une circulation plus lente et un temps de contact eau/roche plus important

un rapprochement du niveau piézométrique de la nappe de la surface (baisse significative du relief de Boukhanefis jusqu'à l'exutoire du Rocher), se traduisant par une intensification de l'évapotranspiration.

Outre les facteurs naturels cités ci-dessus, les engrais et pesticides utilisés en agriculture ainsi que les rejets domestiques et industriels contribuent eux aussi grandement à la salure des eaux de la nappe plio-quadernaire.

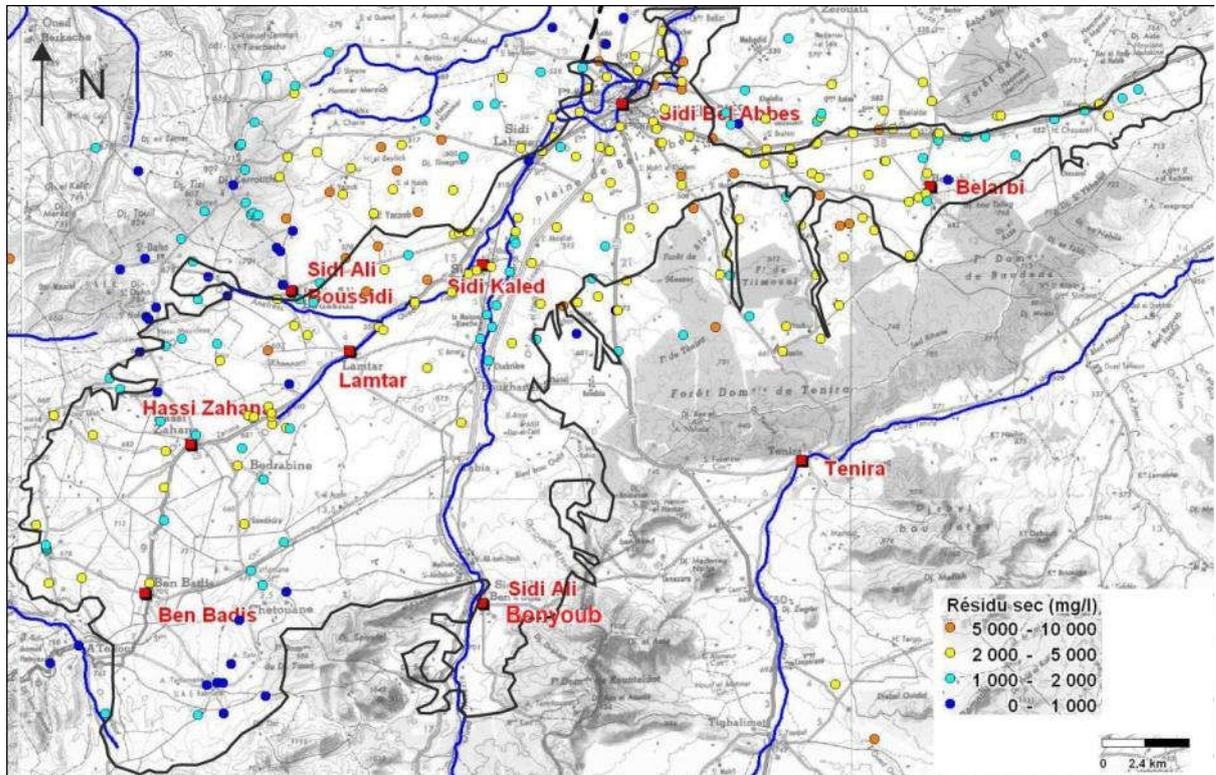


Figure 35. Répartition spatiale des moyennes du résidu sec des eaux de la nappe plio-quadernaire (ANRH, 1970 - 2006).

**V.3- Paramètres chimiques:**

Sur le tableau 17, sont présentées les valeurs maximales, minimales et moyennes des principaux éléments chimiques, ainsi que leurs échantillons correspondants :

Tableau 17. Paramètres chimiques des eaux de la nappe plio-quadernaire.

Concentrations mg/l	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO <sub>4</sub>	NO <sub>3</sub>	HCO <sub>3</sub>
Moyenne	352	134	462	12	1348	230	67	323
Maxima	P30 / 1020	P41 / 382	P41 / 1840	P41 / 29	P41 / 3937	P41 / 912	P4 / 196	P19 / 572
Minima	P11 / 85	P7 / 9	P49 / 60	P29 / 4	P49 / 190	P19 / 7	P49 / 13	P33 / 159

Du tableau 17, les ions prédominants dans les eaux de la nappe plio-quadernaire sont les chlorures pour les anions et le sodium pour les cations. Ce constat est bien illustré par la figure 36, qui montre aussi, une abondance assez importante des ions calcium dans les eaux de la nappe plio-quadernaire.

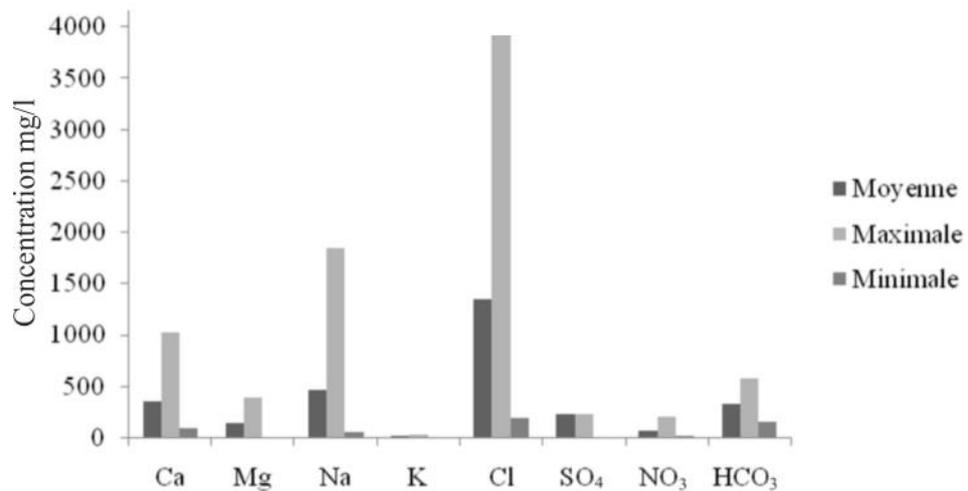


Figure 36. Variations des concentrations en (mg/l) des éléments chimiques pour les eaux de la nappe plio-quadernaire.

**V.3.1- Les chlorures :**

Les éléments de base de toute étude de salinisation sont la conductivité électrique et la concentration en chlorures. Ainsi, des valeurs élevées de ces deux paramètres (couramment mesurés lors des suivis de qualité des eaux), indiquent un risque de salinisation. Comme ils sont mesurés de façon quasi-systématique, ils permettent d'établir des cartes de l'évolution de la salinité des nappes.

Les teneurs en chlorures étant les plus élevées, conditionnent les valeurs du résidu sec dans le secteur d'étude. Cela apparait clairement sur la carte des chlorures (figure 37), où les tendances générales suivent, à quelques différences près, celles de la carte du résidu sec (figure 35). La carte de répartition spatiale des chlorures montre également que la majorité des eaux ont des concentrations variant entre 1000 et 2500 mg/l surtout dans le secteur localisé entre Sidi Khaled, Caïd Belarbi et Sidi Bel Abbès. Les chlorures peuvent avoir plusieurs origines, dont la dissolution des chlorures de sodium, de potassium et calcium (alluvions salifères), l'atmosphère ou encore la pollution.

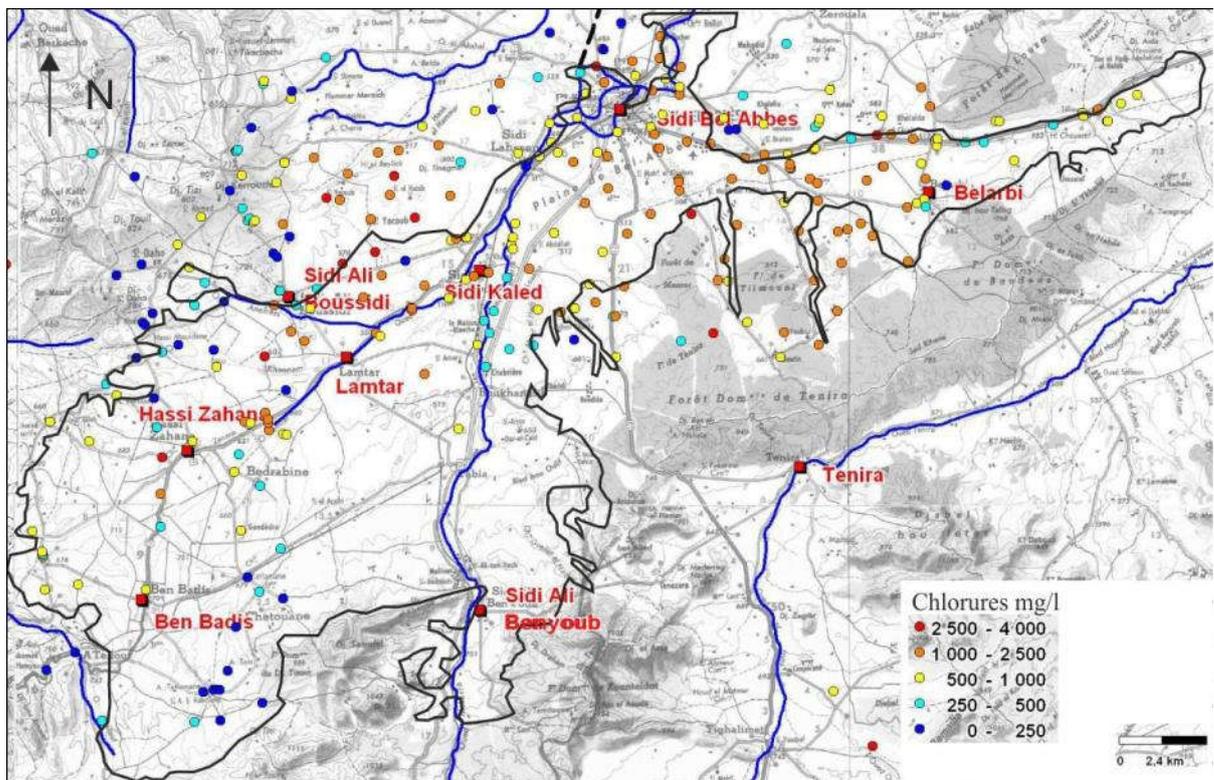


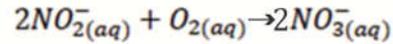
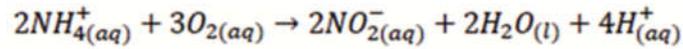
Figure 37. Répartition spatiale des concentrations moyennes des chlorures de la nappe plio-quaternaire (ANRH, 1970 - 2006).

### V.3.2- Les nitrates :

Les processus de nitrification /dénitrification, l'oxydation du sulfure, la réduction des sulfates et la formation de méthane sont généralement en relation étroite avec les matières organiques, qu'elles soient liées aux activités humaines (agricoles ou urbaines) ou présentes naturellement dans le sol.

Les agents oxydants disponibles dans les eaux souterraines classés par ordre de potentiel d'oxydoréduction sont : l'oxygène, les nitrates et les sulfates. Lorsque l'oxygène s'épuise, les microorganismes se rabattent sur les nitrates et le milieu passe d'un environnement oxydant

$O_2/NO_2$  à un environnement  $NO_3$  réducteur. Ce passage est souvent appelé le front de nitrate ou la zone anoxique. Durant le processus de nitrification, l'ammonium est dans un premier lieu oxydé en nitrites, avant que ces dernières ne soient oxydées en nitrates.



Dans un milieu anaérobie, les nitrates peuvent jouer le rôle d'agent oxydant dans les processus de dénitrification. L'agent réducteur par contre, peut être soit la matière organique ou la pyrite, qui sont toutes deux, oxydées en gaz carbonique et en ions sulfates.

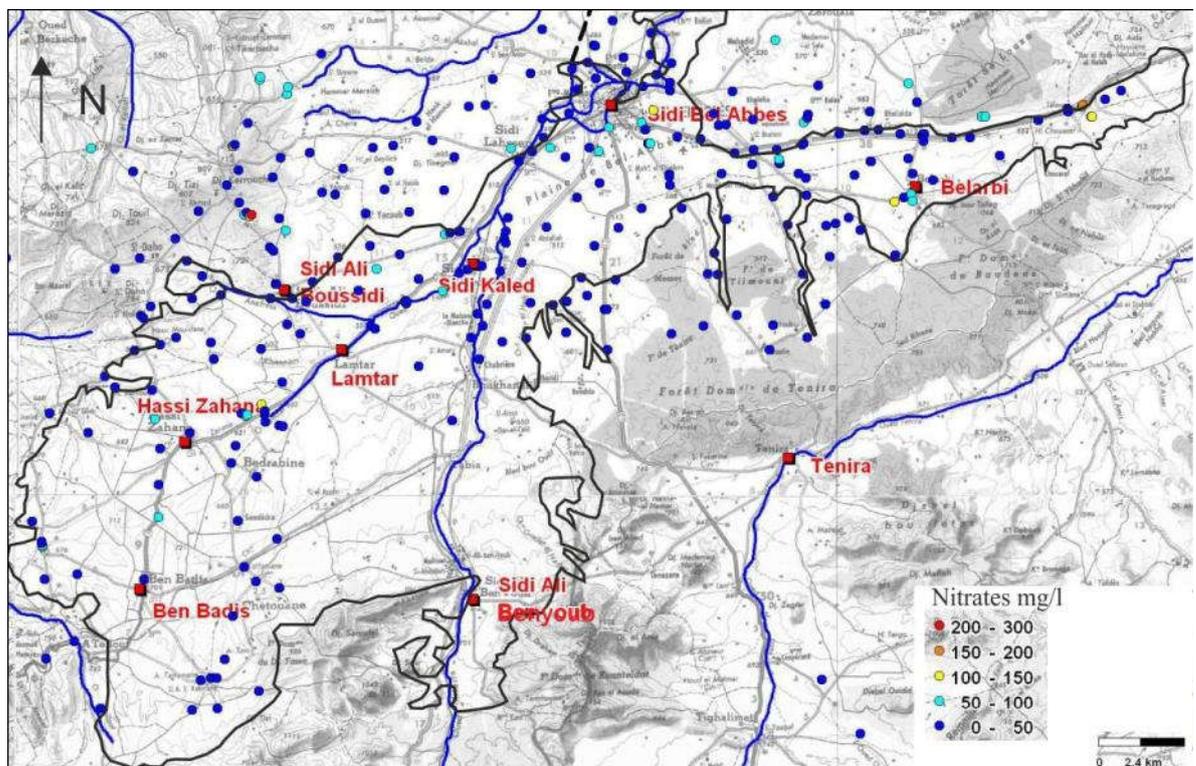


Figure 38. Répartition spatiale des concentrations moyennes des nitrates de la nappe plio-quaternaire (ANRH, 1970 - 2006).

D'après la figure 38, la majorité des eaux échantillonnées ont des teneurs en nitrates inférieures à 50 mg/l, exception faite de quelques puits localisés au niveau de Caïd Belarbi et Sidi Bel Abbès. La carte des nitrates montre aussi que 4 échantillons seulement présentent des teneurs dépassant 100 mg/l, localisés pour la plupart au Nord de la nappe. Toutefois, lorsqu'on compare ces résultats aux teneurs en nitrates des 50 échantillons de la campagne de Mai / 1989 (19 échantillons seulement ont des concentrations en  $NO_3 < 50\text{mg/l}$ ), il apparaît clairement que les eaux de la nappe plio-quaternaire se sont enrichies en nitrates.

**V.3.3- Normes de l'organisation mondiale de la santé (OMS) :**

La plupart des échantillons (42) ont des teneurs en chlorures supérieures aux normes de l'OMS (tableau 18). A contrario, les concentrations en ions sulfates sont celles qui respectent le plus ces normes (49 échantillons).

Quant aux concentrations du total nitrogène (nitrates + nitrites), seulement 19 puits captent des eaux avec des teneurs en nitrates inférieures à 50 mg/l.

Concernant les autres ions, 30 échantillons pour le Mg et seulement une dizaine pour le Ca et le Na présentent des teneurs inférieures aux normes de l'OMS.

Tableau 18. Normes OMS de potabilité des eaux.

Paramètres	Concentrations (mg/l)			
	Désirées / nombre d'échantillons		Maximales permises / nombre d'échantillons	
Ca	75	0	200	12
Mg	50	7	150	30
Na	200	10	200	10
Cl	200	1	600	8
SO <sub>4</sub>	200	29	500	46
NO <sub>3</sub>	45	14	50	19

**V.4- Classification des eaux :****V.4.1- Classification des eaux en fonction de la dureté (TH) :**

La dureté est un critère important lorsqu'il y a lieu d'étudier la convenance d'une eau à des besoins domestiques ou industriels. La dureté totale a été déterminée par l'équation suivante (Todd, 1980 ; Hem, 1985 ; Ragunath, 1987) :

$TH = 2,497 Ca + 4,115 Mg$  , où les concentrations de Ca et Mg sont exprimées en meq/l.

Tableau 19. Classification des eaux de la nappe plio-quaternaire selon le TH.

TH (CaCO <sub>3</sub> en mg/l)	Type d'eau	Nombre d'échantillons
< 75	Douce	26
75 - 150	Modérément dure	20
150 - 300	Dure	4
> 300	Très dure	0

D'après Sawyer et McCarty (1967) ainsi que Vasanthavignare (2010) (tableau 19), la moitié des puits captent des eaux douces avec un TH inférieur à 75 mg/l.

D'après Berne et cordonnier (1991), la majorité des eaux (46 échantillons) sont douces (TH < 15 °F); tandis que 4 seulement sont moyennement dures (15 < TH en °F < 30).

En fonction des valeurs du TH (°F), on peut dire que l'aquifère plio-quaternaire porte des eaux :

très peu calcaires (TH < 10, 30 échantillons),

peu calcaires (10 < TH °F < 20, 17 échantillons) et

calcaires (20 < TH °F < 30, 3 échantillons).

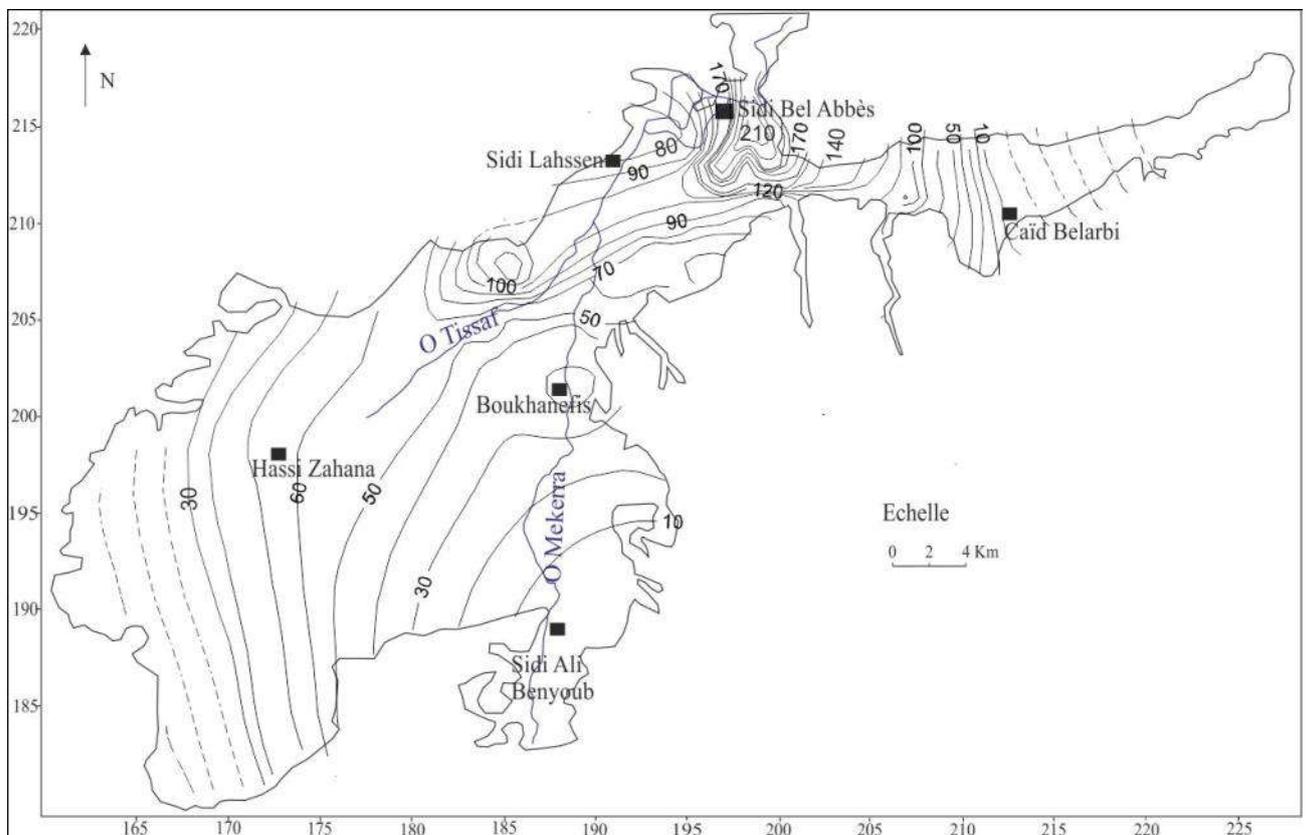


Figure 39. Répartitions spatiale du TH ( $\text{CaCO}_3$  en mg/l) des eaux de la nappe plio-quaternaire.

La figure 39, montre que la dureté des eaux de la nappe plio-quaternaire augmente au fur et à mesure qu'elles avancent vers l'exutoire du Rocher; c'est-à-dire du Sud au Nord et vers le centre de la nappe. Les faibles valeurs du TH au centre de la plaine, seraient peut être dues aux vitesses de circulation assez rapides des eaux, dans les chenaux conglomératiques (conglomérats fissurés et d'une épaisseur importante), ne permettant pas un contact eau/roche suffisamment long pour dissoudre de grande quantité de Ca et Mg. Ces faibles valeurs du TH, pourraient également correspondre à des zones au voisinage des airs de recharge ; les grès du pliocène au

Sud-est et les calcaires de Zygine à l'Est. Cette hypothèse est appuyée par la répartition des plus faibles valeurs du résidu sec ( $< 1000$  et  $2000$  mg/l) ainsi que la distribution des faciès hydrochimiques les plus calciques et magnésiens, observés au Sud et sur les flancs de la nappe.

#### **V.4.2- Classification géochimique :**

D'après les quantités en réaction calculées des différents éléments chimiques, deux faciès hydrochimiques sont prédominants dans la nappe plio-quadernaire, les eaux chlorurées calciques (30 échantillons) et les eaux chlorurées sodiques (20 échantillons). Cependant, des sous faciès sont identifiés pour les deux classes d'eau :

les eaux chlorurées calciques :

chlorurées calciques et sodiques (6 échantillons),

chlorurées calciques et magnésiennes ou magnésiennes/sodiques (5 échantillons).

les eaux chlorurées sodiques :

chlorurées sodiques calciques ou calciques/magnésiennes (6 échantillons),

chlorurées sodiques magnésiennes (1 échantillon).

A la lumière de cela, il apparaît que les ions Cl sont largement les anions prédominants.

Les cations Na, Ca et Mg présentent pour 37 échantillons des concentrations en meq/l assez proches les unes des autres, d'où la présence des nombreux sous faciès mentionnés plus haut.

Le diagramme de Piper (figure 40) montre que la majorité des eaux de la nappe plio-quadernaire sont chlorurées sulfatées et calciques magnésiennes. Cette représentation confirme les résultats obtenus par la méthode classique des quantités en réaction.

Le diagramme de Chadha (1999) (figure 41), montre que la majorité des échantillons représentent des eaux du type Cl-Ca-Mg, où les alcalins et les faibles anions acides dominent les alcalis et les anions acides forts. Ces eaux ont une dureté permanente et ne déposent pas du carbonate de sodium résiduel quand elles sont utilisées pour l'irrigation (Chadha, 1999).

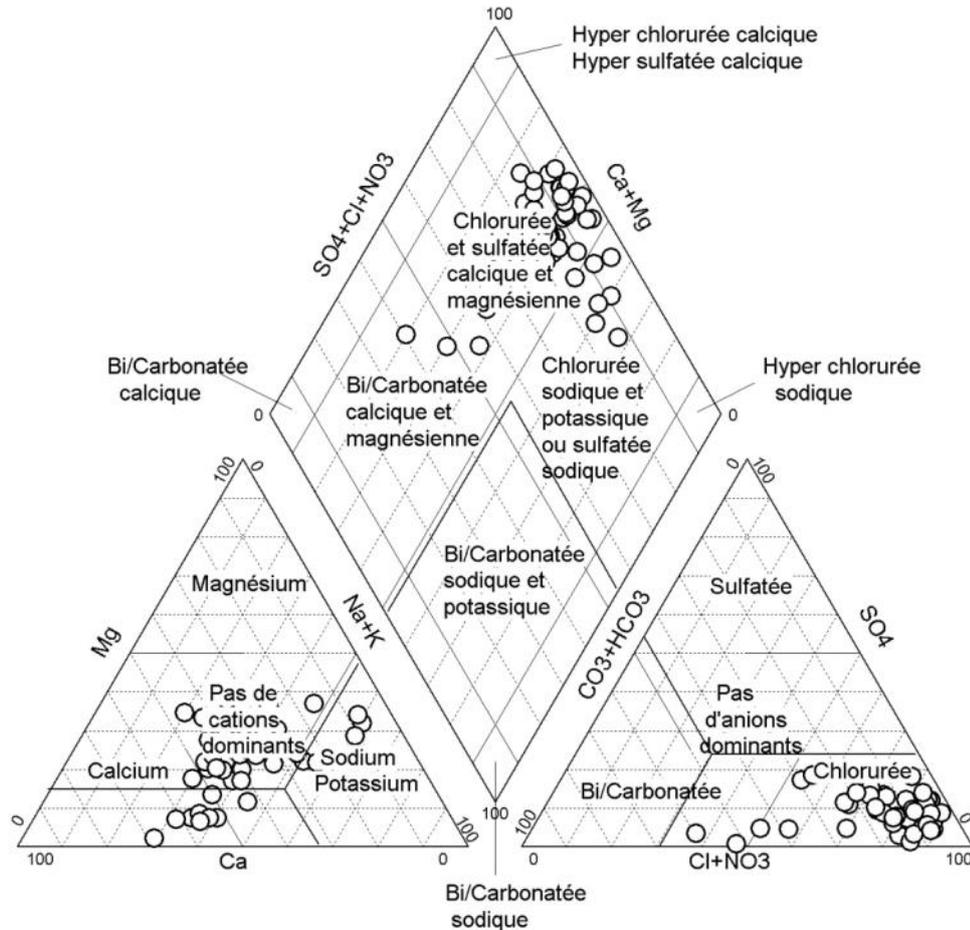


Figure 40. Faciès hydrochimiques des eaux de la nappe plio-quaternaire.

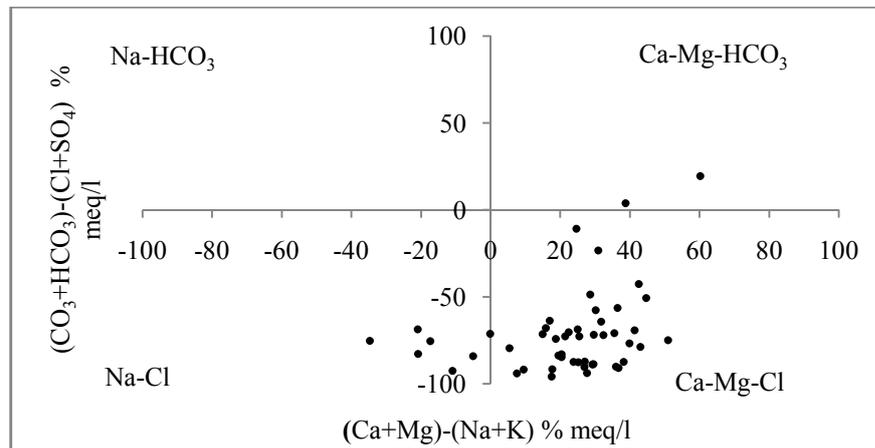


Figure 41. Projection des échantillons sur le diagramme de Chadha (1999).

Le diagramme de Ludwig-Langelier (1942) (figure 42) permet de visualiser les proportions relatives des principaux cations en abscisse et anions en ordonnée.

Les échantillons projetés dans le coin inférieur gauche sont dominés par les ions Ca et HCO<sub>3</sub>, représentant généralement des eaux souterraines relativement jeunes. Les échantillons

projetés dans le coin opposé sont quant à eux dominés par les cations Na et K et les anions Cl et  $\text{SO}_4$  ; des caractéristiques généralement relatives à des eaux souterraines plus anciennes, avec parfois des influences marines possibles.

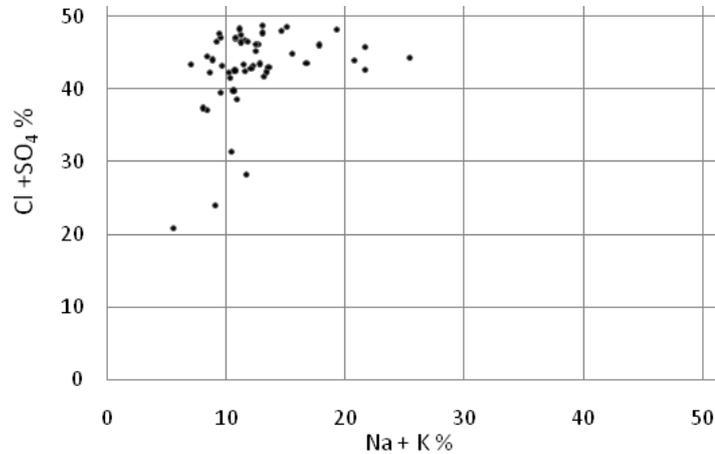


Figure 42. Représentation des eaux de la nappe plio-quaternaire selon le diagramme Ludwig-Langelier (1942).

Du diagramme Ludwig-Langelier, tous les échantillons se rapprochent de l'ordonnée; la majorité (41) avec des pourcentages en  $(\text{Cl}+\text{SO}_4)$  entre 40 et 50 %. Cela démontre que l'on a affaire à des eaux relativement jeunes, à caractère presque en équilibre alkalis  $(\text{Na}+\text{K})$  alcalins  $(\text{Ca}+\text{Mg})$ . Par ailleurs, les forts pourcentages en  $(\text{Cl}+\text{SO}_4)$  observés pour la majorité des échantillons sont essentiellement dus aux teneurs élevées des ions Cl dans les eaux de la nappe plio-quaternaire; indiquant probablement des origines extérieures (rejets).

Plusieurs autres classifications des eaux basées sur des critères chimiques sont retrouvées dans la bibliographie ; on citera:

**Rogers (1917)**, utilisée chez les pétroliers),

**Durov (1948)**, où les eaux sont divisées en 5 types:

eaux primaires : résidu sec variant entre 100 et 300 mg/l et faibles teneurs en Cl et  $\text{SO}_4$  (résultat du lessivage des sels solubles par les précipitations),

eaux secondaires : résidu sec entre 500 - 1000 mg/l et rapport  $r\text{Mg} / r\text{Ca}$  entre 0,3 - 0,7 (eaux primaires enrichies par dissolution de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{NaCl}$ ,  $\text{MgCl}_2$ ),

eaux sulfatées : eaux secondaires appauvries en  $\text{HCO}_3$  (transformée en  $\text{CO}_3$ ) et contenant de faibles concentrations en Cl,

eaux chlorurées : résultat de l'évaporation dans les bassins fermés. Eaux riches en ions Cl et pauvre en  $\text{HCO}_3$  et  $\text{SO}_4$  (précipitation du  $\text{CaCO}_3$ ,  $(\text{CaMg})\text{CO}_3$  et  $\text{CaSO}_4$ ),

eaux bicarbonatées sodiques : privées ou pauvres en  $\text{SO}_4$  (eaux secondaires soumises aux phénomènes d'échange de bases).

D'après la classification de Durov (1948), 49 échantillons appartiennent à la classe des eaux chlorurées, tandis qu'un seul à celle des eaux secondaires (P49 avec  $\text{RS} \approx 1000 \text{ mg/l}$ ).

**Souline (1946-1948)** qui s'était basé sur les quantités en réaction distingue 4 classes d'eaux :

sulfatées sodiques :	$r_{\text{Na}} > r_{\text{Cl}}$ ,	$r_{\text{Na}} - r_{\text{Cl}} < r_{\text{SO}_4}$ ,
bicarbonatées sodiques :	$r_{\text{Na}} > r_{\text{Cl}}$ ,	$r_{\text{Na}} - r_{\text{Cl}} > r_{\text{SO}_4}$ ,
chlorurées magnésiennes :	$r_{\text{Na}} < r_{\text{Cl}}$	$r_{\text{Cl}} - r_{\text{Na}} < r_{\text{Mg}}$ ,
chlorurées calciques :	$r_{\text{Na}} < r_{\text{Cl}}$ ,	$r_{\text{Cl}} - r_{\text{Na}} > r_{\text{Mg}}$ ,

D'après Souline (1946-1948), 36 échantillons représentent des eaux chlorurées calciques et 14 des eaux chlorurées magnésiennes.

**Ovtchinnikov et Bogomolov (1955)** :

classe 1 : eaux alcalines douces (essentiellement liées aux roches cristallines et aux gisements de pétrole),

classe 2 : type intermédiaire entre la classe 1 et 3,

classe 3 : eaux dures (liées aux roches sédimentaires),

classe 4 : eaux à composition voisine de celle de la mer ou eaux phréatiques des régions arides,

classe 5 : eaux acides des gisements métalliques (à pH bas et contenant des métaux lourds).

D'après Ovtchinnikov et Bogomolov (1955) les eaux de la nappe plio-quadernaire se répartissent entre la classe des eaux dures et celles similaire à l'eau de mer.

**Schoeller (1934)** :

Toutes les eaux en se concentrant (par évaporation ou par dissolution) tendent à acquérir une composition chimique convergeant vers un même type en raison des différences de solubilité des sels, dont l'ordre croissant est le suivant : bicarbonates > sulfates > chlorures (Seuls  $\text{NaHCO}_3$  et  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  ont des solubilités sortant de cet ordre). Ainsi, toutes les eaux en se concentrant convergent généralement vers la séquence suivante :  $r_{\text{Cl}} > r_{\text{SO}_4} > r_{\text{HCO}_3}$  et  $r_{\text{Na}} > r_{\text{Mg}} > r_{\text{Ca}}$

Dans les régions arides, cette séquence sera fréquemment rencontrée dans les eaux hautement concentrées des nappes à circulation facile (Schoeller, 1934).

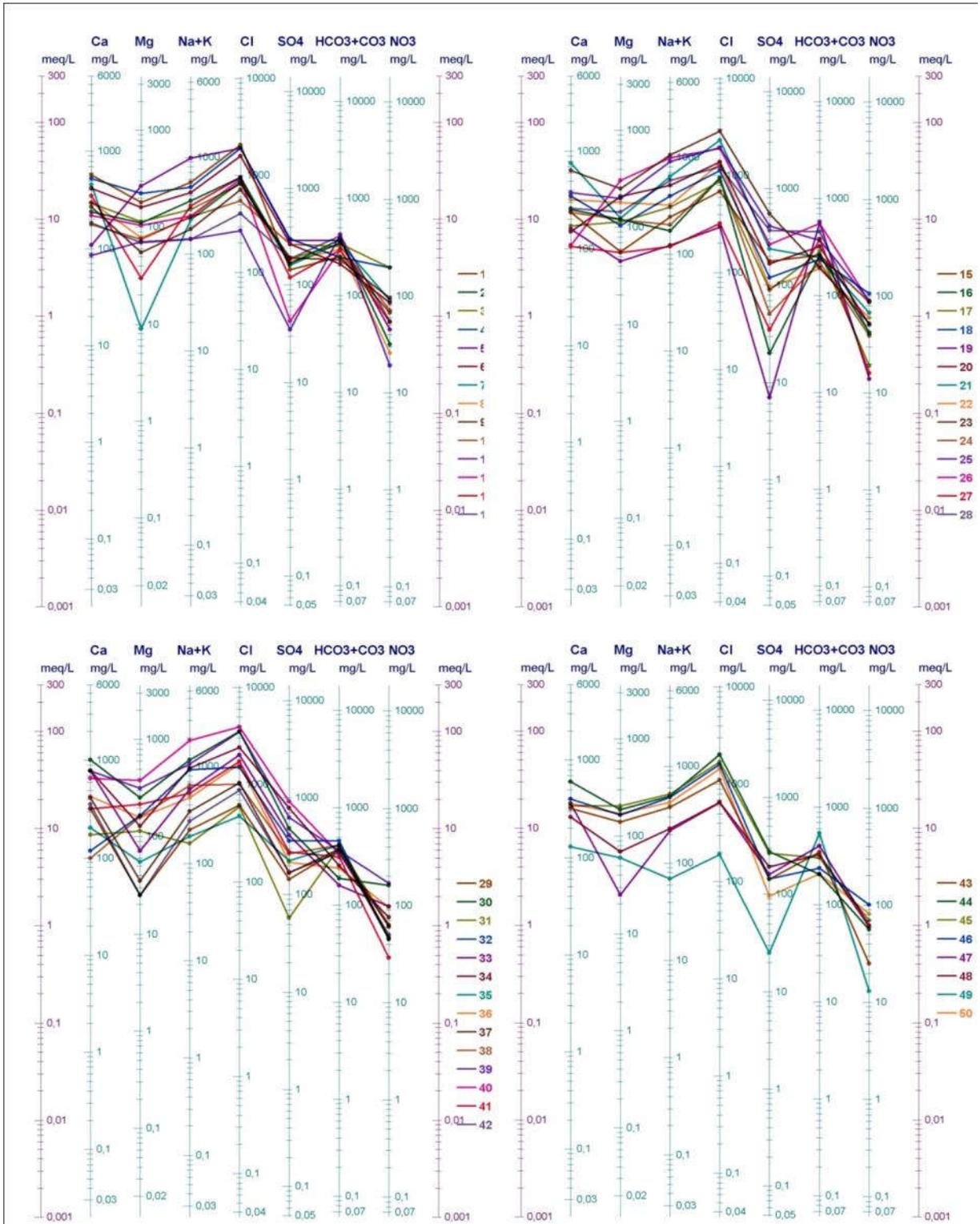


Figure 43. Représentation des eaux de la nappe plio-quaternaire d'après Schoeller-Berkaloff.

En fonction de la convergence des eaux, Schoeller distingue :

eaux convergeant vers le type rCl - rNa - rK < 0 : eaux des rivières, des lacs, des bassins fermés, eaux souterraines issues des roches cristallines et eaux souterraines des régions très arides

eaux convergeant vers le type rCl - rNa - rK > 0 (eaux similaires à l'eau de mer) : eaux incluses dans les sédiments marins actuels et eaux souterraines à concentration très élevée.

D'après Schoeller (1951), toutes les eaux de la nappe plio-quaternaire convergent vers le type rCl - rNa - rK > 0; en d'autres termes, celui des eaux très minéralisées.

Des diagrammes Schoeller-Berkaloff (figure 43), trois pôles de minéralisation sont observés, les chlorures pour les anions et le sodium (27 échantillons) et le calcium (23 échantillons) pour les cations.

Ainsi, les différentes classifications montrent que les eaux de la nappe plio-quaternaire sont chlorurées : sodiques, calciques ou magnésiennes, avec une minéralisation moyenne à forte et une dureté faible à élevée. Ces caractéristiques sont généralement le résultat soit des processus d'échange d'ions soit d'un mélange entre des eaux fraîches avec d'autres plus salines (Adams et al, 2001).

#### V.5- Analyse statistique :

L'analyse statistique s'est basée sur la méthode ACP (analyse en composantes principales); largement utilisée pour le traitement des données hydro-chimiques des eaux souterraines.

La statistique descriptive des 50 échantillons (observations) et des 09 variables représentées par les éléments chimiques : Na, Ca, Mg, K, HCO<sub>3</sub>, Cl, SO<sub>4</sub>, NO<sub>3</sub> ainsi que la CE est donnée dans le tableau suivant :

Tableau 20. Statistique descriptive des eaux de la nappe plio-quaternaire.

	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Na (mg/l)	K (mg/l)	Cl (mg/l)	SO <sub>4</sub> (mg/l)	NO <sub>3</sub> (mg/l)	HCO <sub>3</sub> (mg/l)	CE (µS/cm)
Moyenne	352,04	134,52	462,54	11,6	1348,5	230,52	67,42	322,68	3661,9
Ecart-type	215,45	84,57	348,5	5,39	859,46	184,21	41,66	96,78	1956,26

Du tableau 20, les ions Cl ainsi que la CE présentent les plus grandes valeurs relatives à l'écart type. Ce qui renseigne sur la grande dispersion de ces deux paramètres et par conséquent, sur leur évolution spatiale non uniforme.

Le tableau 21 (matrice de corrélation) montre que les meilleures corrélations entre paramètres physiques et chimiques, sont celles qu'on retrouve entre la CE et les ions Na et Cl ; éléments

grandement responsables de la salinité des eaux. La bonne corrélation de la CE avec les ions Ca, Mg, SO<sub>4</sub> démontre que ces éléments contribuent tous à la salinité des eaux.

Tableau 21. Matrice de corrélation des variables.

Variables	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Na (mg/l)	K (mg/l)	Cl (mg/l)	SO <sub>4</sub> (mg/l)	NO <sub>3</sub> (mg/l)	HCO <sub>3</sub> (mg/l)	CE (µS/cm)
Ca (mg/l)	1								
Mg (mg/l)	0,338	1							
Na (mg/l)	0,536	0,828	1						
K (mg/l)	0,364	0,525	0,47	1					
Cl (mg/l)	0,784	0,822	0,9	0,531	1				
SO <sub>4</sub> (mg/l)	0,638	0,613	0,86	0,436	0,813	1			
NO <sub>3</sub> (mg/l)	0,518	0,315	0,28	0,153	0,441	0,344	1		
HCO <sub>3</sub> (mg/l)	-0,57	-0,149	-0,1	-0,143	-0,392	-0,159	-0,355	1	
CE (µS/cm)	0,76	0,81	0,942	0,527	0,987	0,879	0,44	-0,292	1

La bonne corrélation relative du Ca et SO<sub>4</sub> (0.639) suggèrerai la dissolution du gypse; une dissolution qui serai moindre dans la zone d'étude comme le montrent les concentrations en SO<sub>4</sub>, où toutes les valeurs (Log SO<sub>4</sub>) sont inférieures à 10 mmol/l. L'altération des silicates, la dissolution des carbonates, ainsi que l'échange ionique sont communément responsables des bonnes corrélations du Mg, Cl et Na dans les eaux souterraines salines. Les meilleures corrélations positives sont observées entre les ions Cl, Na et SO<sub>4</sub>. Elles sont le résultat de la dissolution des évaporites (moindre) et des activités anthropiques intenses caractérisant le secteur d'étude (eaux usées industrielles et domestiques et engrais et pesticides). Par ailleurs, La faible corrélation du SO<sub>4</sub> et NO<sub>3</sub> pourrait révéler la déplétion de ces deux éléments par les réactions redox.

Deux facteurs (tableaux 22 et 23) expliquant plus de 75% de la variance totale des données ont été retenus. Le factor 1 représente presque 62 % de la variance totale, avec des corrélations positives respectives à l'égard de la CE et des éléments Cl, Na, SO<sub>4</sub>, Mg and Ca; suggérant fortement que ces variables ont une évolution temporelle commune. Ainsi, le facteur 1 représente la tendance de salinisation résultant de la dissolution des carbonates et évaporites, des échanges ioniques et de la pollution. Quant au facteur 2, il explique environs 15 % de la variance, dont 42% est représenté par les HCO<sub>3</sub>. Ce facteur est grandement assimilé à la dissolution des carbonates (éléments carbonates du chenal conglomératique), aux réactions redox (milieu réducteur) et à l'altération des silicates.

Tableau 22. Valeurs propres et variabilité en % des axes factoriels.

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8
Valeur propre	5,5474699	1,3673077	0,7299021	0,6101826	0,4843108	0,1982234	0,0571234	0,0054801
Variabilité (%)	61,638555	15,192307	8,1100231	6,7798062	5,3812316	2,2024827	0,6347041	0,0608901
% cumulé	61,638555	76,830862	84,940885	91,720691	97,101923	99,304406	99,93911	100

Tableau 23. Corrélation entre les variables et les facteurs.

Variables	F1	F2
Ca (mg/l)	0,778	-0,464
Mg (mg/l)	0,811	0,327
Na (mg/l)	0,909	0,325
K (mg/l)	0,594	0,226
Cl (mg/l)	0,983	0,002
SO <sub>4</sub> (mg/l)	0,868	0,16
NO <sub>3</sub> (mg/l)	0,509	-0,516
HCO <sub>3</sub> (mg/l)	-0,383	0,766
CE (μS/cm)	0,987	0,08

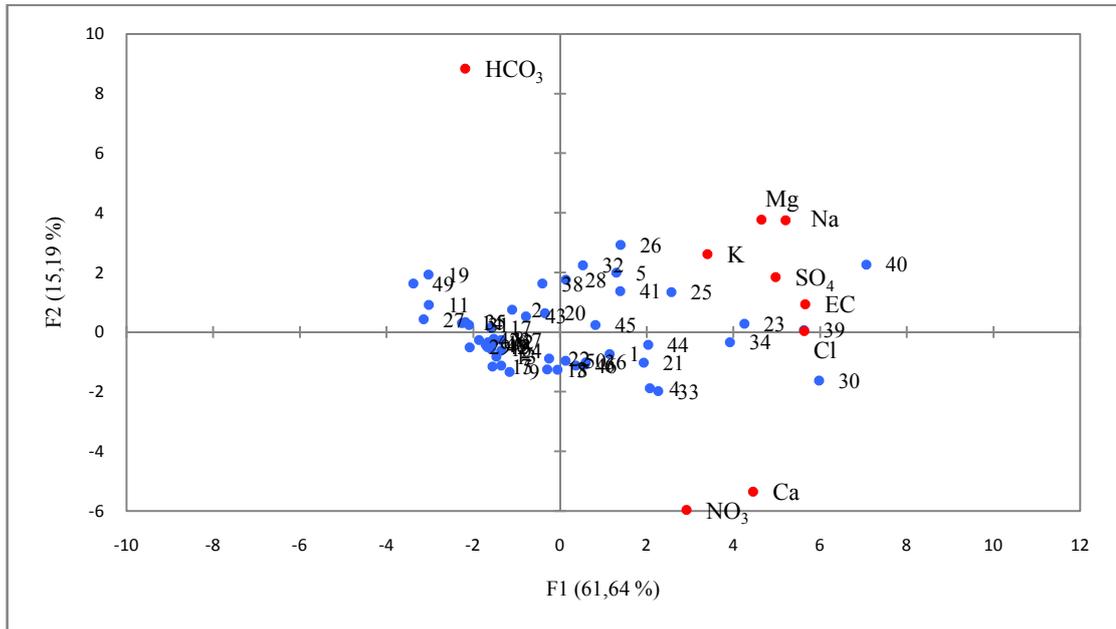


Figure 44. Représentation graphique des variables et des individus.

En se basant sur les résultats de l'ACP, on a pu subdiviser les 50 échantillons en deux grands groupes. Le premier contient 27 échantillons et représente les eaux douces à modérément salées. Ces eaux sont principalement associées aux zones de recharge (les grès pliocènes de Ténira) celles se trouvant le long des Oueds Mekkera et Tissaf, où la vitesse d'écoulement est

considérable (abondance des graviers et conglomérats). La salinité de ces eaux dérive principalement de la dissolution des carbonates, des échanges ioniques et des processus d'altération des silicates. Le second groupe représente les eaux salines à extrêmement salines; échantillons prélevés aux environs du chef lieu de la wilaya de Bel Abbès (zone la plus peuplée et la plus active du secteur d'étude) et de Caïd Belarbi (où les effets de l'évapotranspiration sont maximums en raison de la faible profondeur de la nappe alluviale et de la faible extension des formations aquifères dans cette partie de la plaine). Les fortes concentrations caractérisant ces eaux sont essentiellement le résultat des activités anthropiques.

Tableau 24. Classification des eaux de la nappe plio-quadernaire selon les résultats de l'ACP.

	Groupe 1			Groupe 2	
	Relativement douces	Légèrement salines	Modérément salines	Salines	Extrêmement salines
Nombre d'échantillons	5	14	8	14	6
Moyenne TSD (mg/l)	1159	1781	2279	3337	4693

La salinité des échantillons 30, 39 et (moyenne TSD = 7259 mg/l) est considérée comme anormal et peut représenter des zones de pollution ponctuelle.

#### V.6- Origine de la salinité des eaux de la nappe plio-quadernaire:

Les sources et mécanismes qui peuvent conduire à une salinisation des eaux sont multiples et liés à des processus aussi bien naturels, qu'induits par l'homme. On rencontre fréquemment des situations complexes où plusieurs sources et vecteurs de salinisation se superposent.

##### V.6.1- Tendances générales

Le diagramme de Gibbs (1970) (figure 45) permet d'étudier la relation entre les eaux souterraines et la lithologie de leurs aquifères et par conséquent, les mécanismes contrôlant la chimie de ces eaux (Feth et Gibbs, 1971; Kilham, 1990; Négrel, 1999; Wanty et coll, 2009; Martin et Sudhakar, 2010).

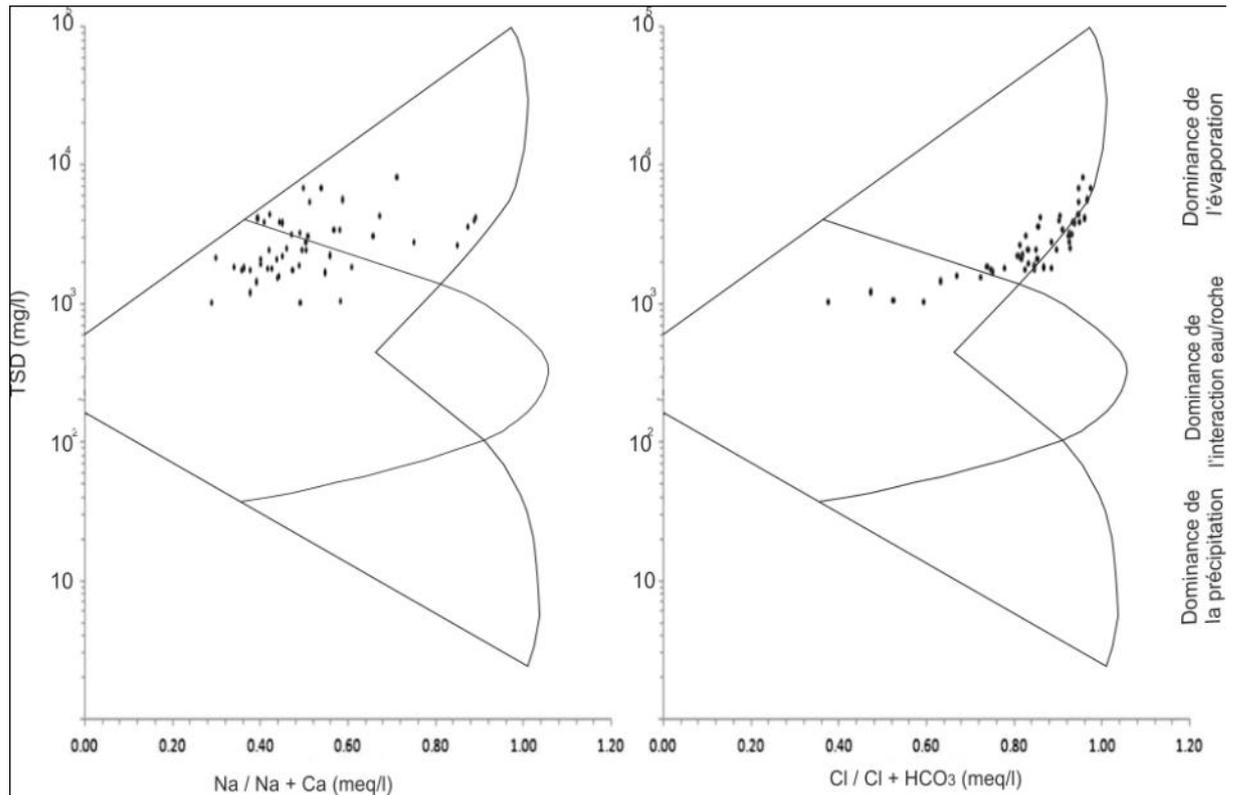


Figure 45. Projection des eaux de la nappe plio-quadernaire sur le diagramme de Gibbs.

Sur les 50 échantillons, 30 ont un ratio  $\text{Na} / (\text{Na} + \text{Ca}) < 0,5$  et des valeurs du TSD (total solide dissous) relativement faibles, suggérant que l'interaction eau/roche est le mécanisme dominant contrôlant le chimisme de ces eaux (Wang et al). Les 20 échantillons restants dont le ratio  $\text{Na} / (\text{Na} + \text{Ca}) > 0,5$  ont des valeurs de TSD élevées et doivent leur chimisme au processus d'évaporation. Cela ressort clairement sur la figure 45, où les 50 échantillons se retrouvent, soit dans la partie dominée par l'évaporation, soit celle dominée par l'interaction eau/roche. Toutefois, l'échange cationique et l'augmentation du TSD, peuvent être aussi des processus importants pour expliquer la prédominance du Na ( $\text{Na} / (\text{Na} + \text{Ca}) > 0,5$ ) par rapport aux autres cations (Guo et Wang, 2004) ; exemple des eaux souterraines du désert de Chihuahua au Texas (USA) (Fisher et Mullican, 1997) et des aquifères limoneux pampéens (Cirelli et Miretzky, 2004). L'apport en ions Na peut donc provenir de la réaction suivante :

$$\text{Na}_2\text{-(argile)} + (\text{Ca}, \text{Mg})\text{-(Eau)} \leftrightarrow (\text{Ca}, \text{Mg})\text{-(argile)} + \text{Na}_2\text{-(Eau)} \dots (\text{Hidalgo et Cruz-Sanjulian, 2001}).$$

Par ailleurs, 39 échantillons ont un rapport  $\text{Cl} / (\text{Cl} + \text{HCO}_3) > 0,8$ . Ce qui montre que l'évaporation comparée à l'interaction eau/roche fournit plus de Cl aux eaux de la nappe plio-quadernaire. Toutefois, la quinzaine d'échantillons observée hors du diagramme de Gibbs renseigne sur un surplus en ions Cl provenant des rejets.

Au niveau de la plaine de Bel Abbès, les fortes concentrations en Cl sont le résultat direct de la pollution et cela malgré la présence d'une importante station d'épuration au niveau de la wilaya avec une capacité de 330,000 équivalent/habitant. Malheureusement, la station supposé traiter initialement 28000 m<sup>3</sup>/j pour arriver à 45000 m<sup>3</sup>/j, recevait en 2007 6000 à 7000 m<sup>3</sup>/j (office nationale de l'assainissement : ONA). Selon la Direction de l'Hydraulique de la Wilaya de Sidi Bel Abbès (DHW), le volume des rejets totaux valait en 2006 98,000 m<sup>3</sup>/j (la Mekkera, en traversant la plaine du Sud au Nord reçoit 47 effluents. Bensalem, 2012); Cela en addition, aux rejets non inventoriés (absence d'assainissement) des petites localités (population inférieure à 200 habitants. Ramdani, 2007) donne une idée sur l'ampleur de la calamité environnementale frappant la zone d'étude.

#### V.6.1.1- Processus d'échange d'ions :

Grace à leurs charges électriques, les ions dans l'eau sont adsorbés sur les surfaces solides, surtout celles des oxydes de fer et des minéraux argileux. Les argiles sont particulièrement efficaces pour adsorber les cations, parce que leurs surfaces sont toujours négativement chargées.

La tendance d'adsorption /désorption des cations majeurs dans les eaux naturelles est la suivante : (fortement adsorbé) Ca > Mg > K > Na (faiblement adsorbé) ; ce qui signifie que les ions calcium sont beaucoup plus susceptibles d'être adsorbés que le sont les ions sodium.

L'échange d'ions entre les eaux souterraines et leur environnement hôte peut être étudié à l'aide des indices chloro-alcalins proposés par Schoeller (1965) :

$$\text{ICA 1} = [\text{Cl} - (\text{Na} + \text{K})] \div [\text{Cl}],$$

$$\text{ICA 2} = [\text{Cl} - (\text{Na} + \text{K})] \div [\text{HCO}_3 + \text{SO}_4 + \text{CO}_3 + \text{NO}_3].$$

où tous les ions sont exprimés en (meq.l<sup>-1</sup>).

Quand les deux indices sont négatifs, il y a un échange de Ca ou Mg des eaux souterraines avec le Na ou K du matériau aquifère (déséquilibre chloro-alcalin). Au cours de ce processus, la roche est la principale source de minéralisation des eaux souterraines. Quand les valeurs sont positives par contre, c'est l'inverse qui se produit.

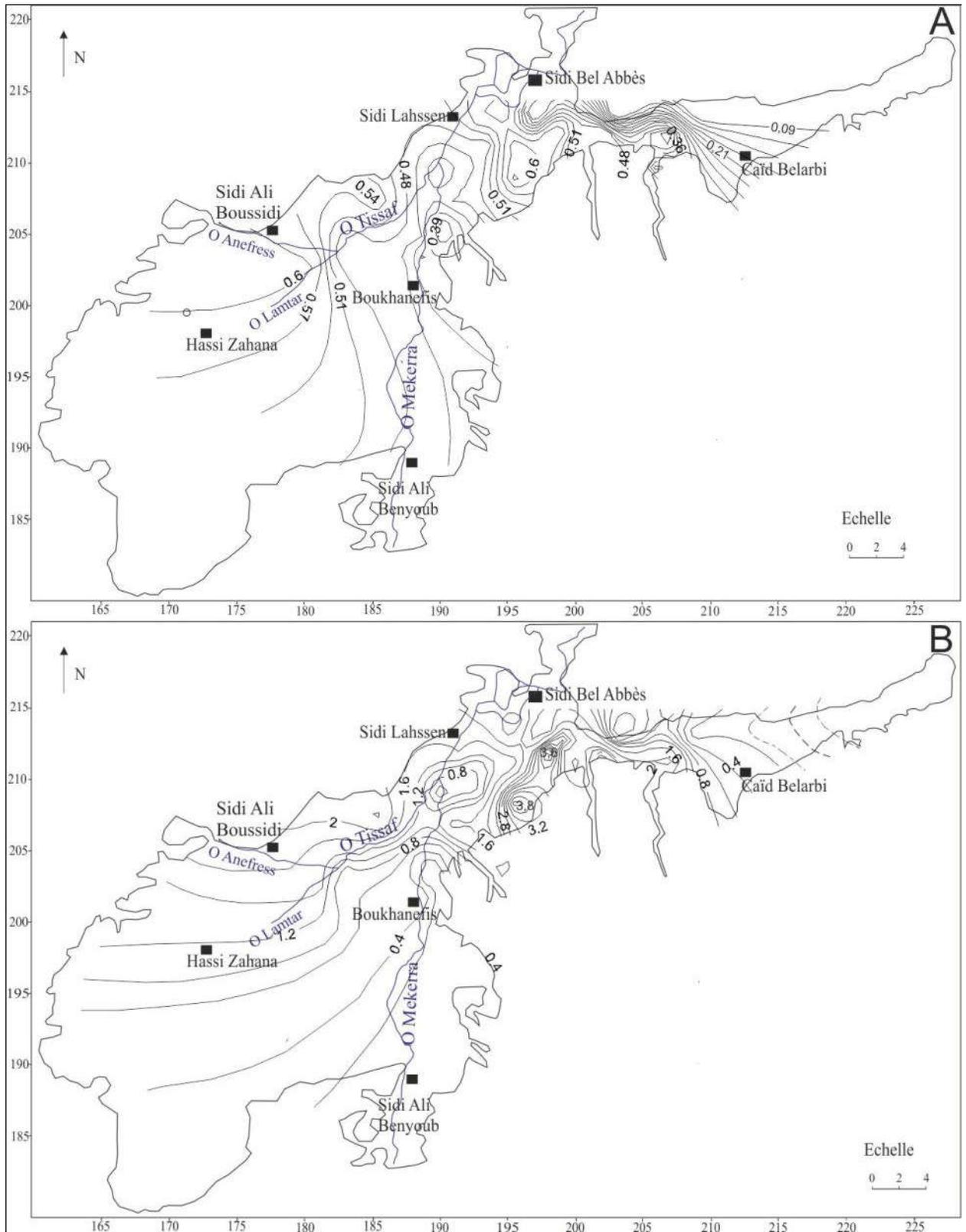


Figure 46. Répartition spatiale des indices chloro-alkalins, A : ICA 1 et B : ICA 2.

Tous les échantillons dans notre secteur d'étude ont des indices chloro-alkalins positifs et renseignent sur la présence d'un échange de  $(Na + K)$  eaux avec  $(Mg + Ca)$  roches dont le taux est inconnu en raison des grands apports extérieur en Cl.

Il ressort de la figure 46 que les valeurs des deux indices augmentent du Sud au Nord et d'Est en Ouest. C'est-à-dire suivant le tracé des Oueds, (conglomérats formés d'éléments calcaires), où les rejets de la Wilaya sont déversés.

#### V.6.1.2 - La dissolution (hydrolyse) des silicates :

Lorsque le pH descend au dessous de 6.7, les minéraux silicatés deviennent instables et sont convertis en minéraux argileux ou hydroxydes. Ces réactions sont complexes et plus lentes comparées à celles relatives à la dissolution des carbonates. L'altération des silicates peut se faire selon les réactions suivantes :



ou



#### V.6.1.3 - La dissolution des carbonates :

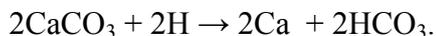
Les eaux souterraines dont la minéralisation découle des processus de dissolutions/précipitations des roches carbonatées seront relativement riches en Ca,  $\text{HCO}_3^-$  et Mg. Les carbonates sont présentes dans la plupart des roches sédimentaires et même certaines roches ignées et métamorphiques ; la calcite en est un parfait exemple; sa dissolution se fait selon la réaction :



incluant :

$3\text{CO}_2 + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{H}^+ + 3\text{HCO}_3^-$  ... (création de conditions acides ( $\text{H}^+$ ) favorisant la dissolution de calcite)

et



Des trois réactions, il ressort que la solubilité de la calcite est contrôlée dans un premier lieu par la quantité de dioxyde de carbone disponible dans le milieu et dans un second lieu par le pH ( $\text{H}^+$ ). D'autres processus tels que l'oxydation des composés sulfurés peuvent également produire des ions hydrogène et favoriser la dissolution de la calcite.

Lorsque l'eau s'infiltré dans le sol, elle s'enrichit en  $\text{CO}_2$  et dissout assez facilement les roches carbonatées sur son chemin jusqu'à, soit saturation en minéraux carbonatés, soit épuisement de  $\text{CO}_2$ . Lorsque le pH diminue, les ions  $\text{CO}_3^{2-}$  sont convertis en ions  $\text{HCO}_3^-$ ; ce qui se traduit par une dissolution plus accrue du  $\text{CaCO}_3$ . Au fil du temps, cela crée un front acide (pH = 7-8), au dessous duquel, les eaux souterraines sont agressives.

D'après les indices Ryzenar (IR) et sur les 50 échantillons de la nappe plio-quadernaire : 42 captent des eaux en équilibre, 2 (P5 et P38) : des eaux légèrement corrosives (agressives) et 7 (puits 7, 21, 34, 37, 39, 40 et 47) : des eaux légèrement incrustantes.

#### V.6.1.4 - Réactions d'oxydoréduction :

Les réactions d'oxydoréduction ou réactions redox, impliquent un transfert d'électrons d'un ion à un autre. Elles contrôlent, la nitrification/dénitrification, l'oxydation des sulfures, la réduction des sulfates et la formation de méthane.

Les directions et les vitesses des réactions redox dépendent de l'état d'oxydation du milieu considéré. L'oxygène et la matière organique sont respectivement les agents oxydants et réducteurs majeurs dans le milieu naturel. La consommation de la matière organique se traduit par une réduction bactérienne des espèces carboniques en méthane. D'autres agents réducteurs peuvent exister dans les eaux souterraines, tels que les formes réduites de fer et les composés sulfurés.

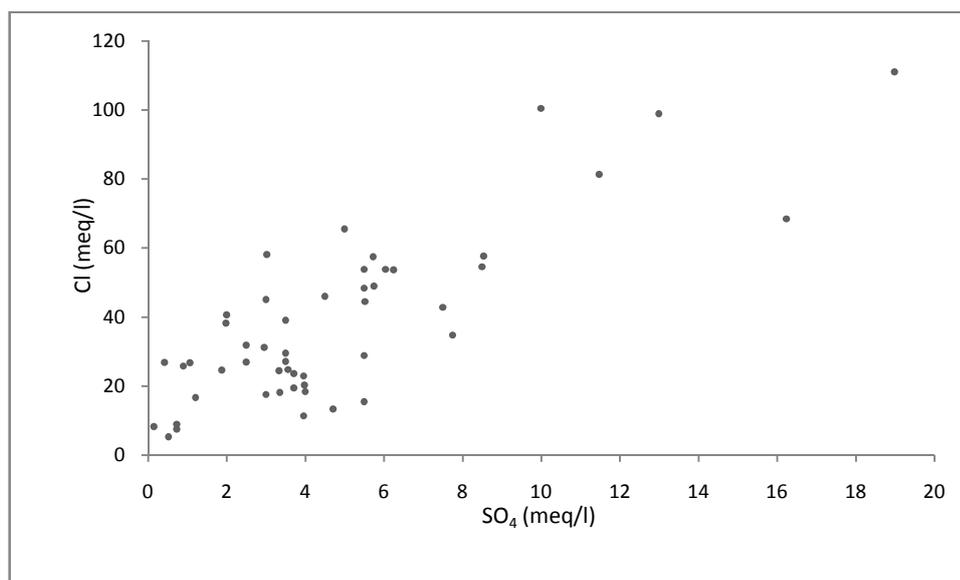


Figure 47. Diagramme SO<sub>4</sub> vs Cl.

Lorsque les nitrates sont épuisés, les sulfates deviennent les agents oxydants dans les eaux souterraines. Cela à comme corolaire, leur réduction en sulfure d'hydrogène dont une partie se précipite en présence de fer, en pyrite. Les quantités de sulfure d'hydrogène restantes doivent être éliminées, car non seulement elles confèrent aux eaux un goût âcre, mais elles leurs attribuent aussi, un caractère corrosif.

Les concentrations des ions sulfates sont assez faibles et pourraient provenir de la dissolution du gypse ( $\text{H}_2\text{O} + \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca} + \text{SO}_4 + 3\text{H}_2\text{O}$ ), des pluies acides ou de la pyrite.

Les très faibles valeurs du rapport  $\text{SO}_4 / \text{Cl}$  (moyenne = 0.13, max = 0.35, min = 0,015) suggèrent que les sulfates s'épuisent; éventuellement, par réduction (Lavitt et al, 1997; Datta et Tyagi, 1996).

Les processus de réduction des ions  $\text{SO}_4$ , ainsi que l'augmentation concomitante des  $\text{HCO}_3$  peuvent s'expliquer comme suit:



La réduction des  $\text{SO}_4$  selon la deuxième réaction nécessite la présence de bactéries.

## V.6.2- Mécanismes d'acquisition de la salinité des eaux de la nappe plio-quadernaire

### V.6.2.1- Ratio Na vs Cl :

La relation Na-Cl est souvent utilisée pour identifier les mécanismes d'acquisition de la salinité des eaux dans les régions semi arides (Magaritz et al, 1981; Dixon et Chiswell, 1992; Sami, 1992 ; Singh et al, 2005 ; Zhu et al, 2008).

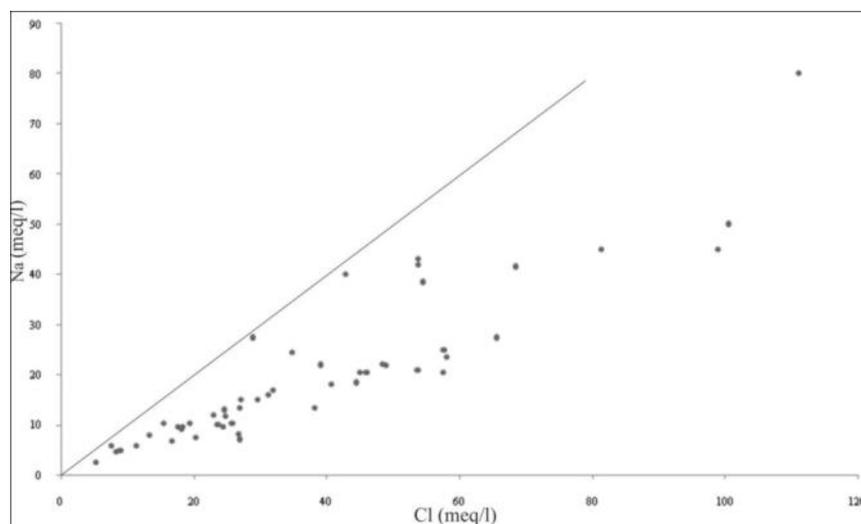


Figure 48. Diagramme Na vs Cl.

La figure 48 montre que la totalité des échantillons se trouve au-dessous de la ligne 1:1; ce qui indique que l'évaporation n'est pas le seul processus contrôlant la qualité chimique des eaux de la nappe plio-quadernaire.

**V.6.2.2- Ratio Na / Cl vs EC :**

En générale, si le processus d'évaporation est dominant et aucun minéral n'est précipité, le rapport Na/Cl reste constant (Jankowski et Acworth, 1997). Par ailleurs, lorsque la dissolution de la halite est la source principale du sodium, le rapport Na/Cl est approximativement égale à 1 ; lorsqu'il est supérieur à 1, le sodium est plutôt le résultat de l'altération des silicates (Meybeck, 1987) ; une altération toutefois, généralement parallèle à la prédominance des ions HCO<sub>3</sub> par rapport aux autres anions (Rogers, 1989).

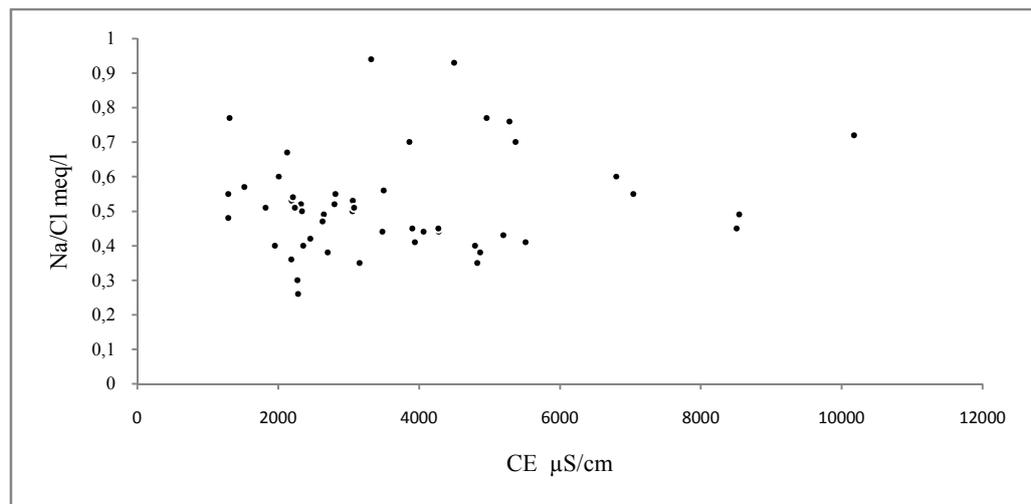
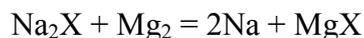
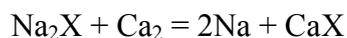


Figure 49. Diagramme Na / Cl vs EC.

De la figure 49, tous les échantillons ont un rapport Na/Cl < 1. Cela est dû soit aux apports extérieurs conséquents en chlorures (rejets), soit à un échange de cation Na-Ca, conduisant à un adoucissement des eaux de la nappe plio-quaternaire (Hidalgo et al, 1995 ; Schwartz et Muehlenbachs, 1979 ; Phillips et al, 1986) selon les réactions suivantes :



où X représente le complexe d'échange.

D'après la figure 50, le ratio (Na /Ca +Mg) augmente du Sud au Nord, indiquant un enrichissement des eaux de la nappe plio-quaternaire en Na. Cela est dû à un échange du Na adsorbé sur les formations argileuses avec le Ca et Mg des eaux et à l'altération des silicates.

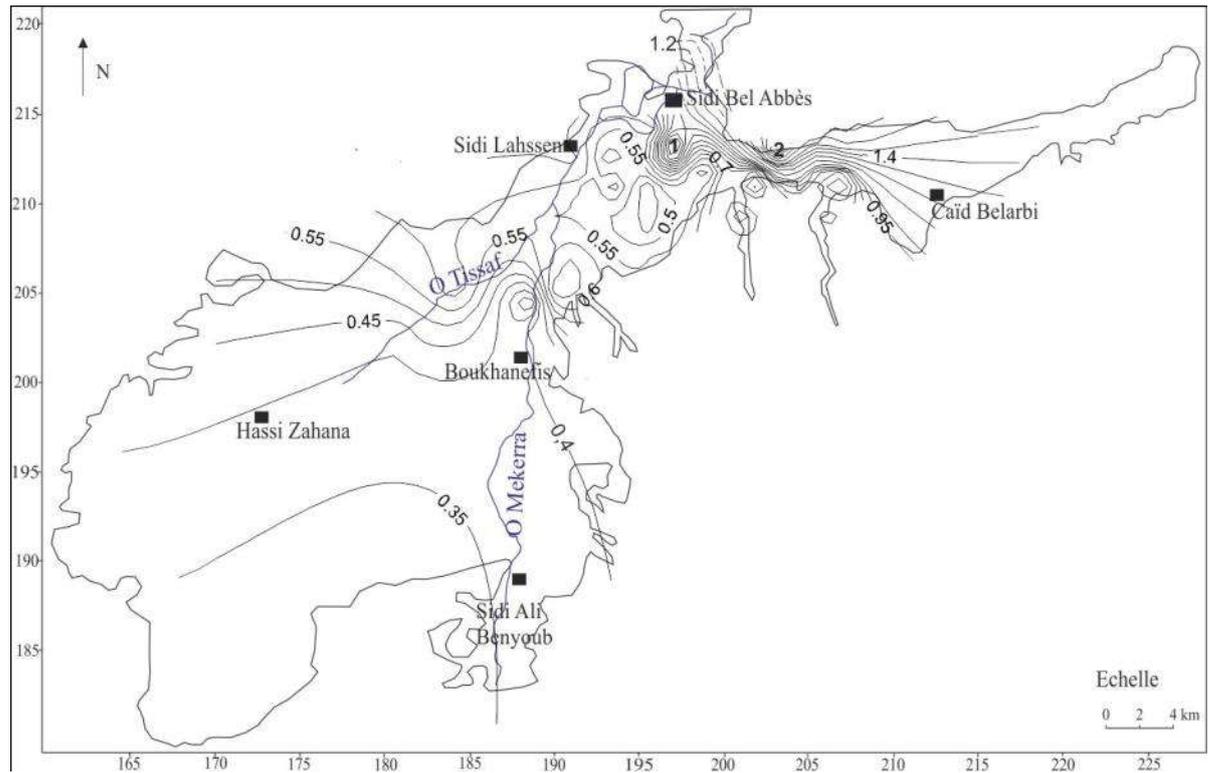


Figure 50. Evolution spatiale du rapport (Na /Ca +Mg) des eaux de la nappe plio-quaternaire.

**V.6.2.3- Ratio (Ca + Mg) vs HCO<sub>3</sub>:**

Le diagramme (Ca + Mg) vs HCO<sub>3</sub> (figure 51) montre que la totalité des eaux échantillonnées se retrouvent au-dessus de l'équiline 1:1 ; ce qui traduit un excès des alcalins Ca et Mg par rapport aux ions HCO<sub>3</sub>. Cet excès est équilibré par les processus d'échanges d'ions et reflète la présence de sources supplémentaires en ions Ca et Mg, outre que l'altération des carbonates ; à savoir, la dissolution des évaporites et l'altération des silicates (Ettazarini, 2005 ; Singh et al, 2005).

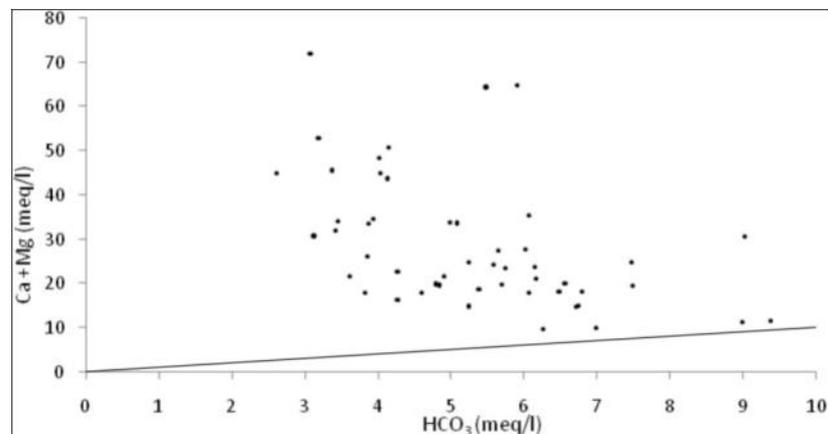


Figure 51. Diagramme (Ca + Mg) vs HCO<sub>3</sub>.

**V.6.2.4- Ratio (Ca + Mg) vs (HCO<sub>3</sub> + SO<sub>4</sub>) (Diagramme de Datta et Tyagi) :**

Le diagramme (Ca + Mg) vs (HCO<sub>3</sub> + SO<sub>4</sub>) permet d'identifier les processus d'échanges d'ions et d'altération soit des carbonates soit des silicates (Garcia et al, 2001).

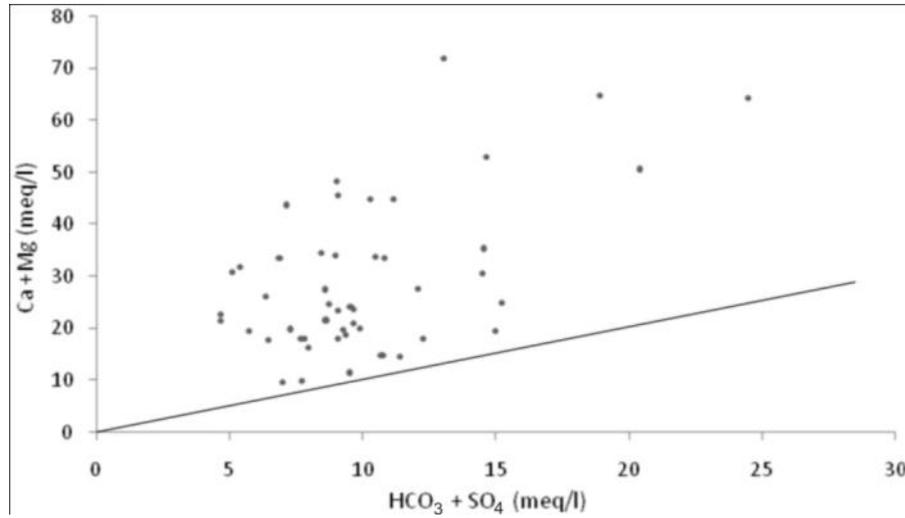


Figure 52. Diagramme (Ca + Mg) vs (HCO<sub>3</sub> + SO<sub>4</sub>).

Le diagramme (Ca + Mg) vs (HCO<sub>3</sub> + SO<sub>4</sub>) montre que la totalité des échantillons se projettent au dessus de la ligne 1:1, dénotant :

un excès de (Ca + Mg) par rapport à (HCO<sub>3</sub> + SO<sub>4</sub>) dû aux phénomènes d'échange d'ions inversés (Cerling et coll, 1989 ; Fisher et Mullican, 1997 ; Ettazarini, 2005) et,

une altération plus accrue des carbonates comparées aux silicates, confirmée par le diagramme HCO<sub>3</sub> vs Na (figure 53), où la majorité des échantillons se retrouvent au dessus de la ligne 1:1.

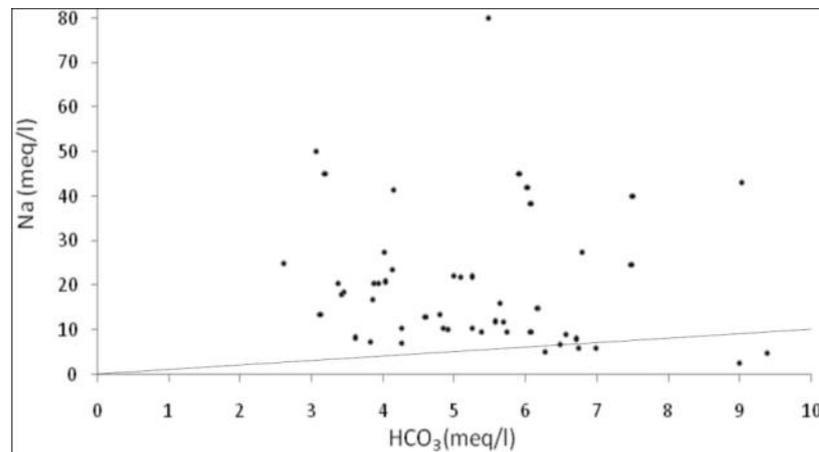


Figure 53. Diagramme (Na) vs (HCO<sub>3</sub>).

### V.6.2.5- Ratio (Ca + Mg) vs Total cations:

Du diagramme (Ca + Mg) vs TC (total cations), tous les échantillons sont au dessous de la ligne 1:1, indiquant une contribution croissante des alcalis (Na +K) dans la minéralisation des eaux de la nappe plio-quadernaire. Toutefois, le rapport (Ca + Mg) / TC (variant de 0,32 à 0,8 et avec une moyenne de 0,61 > 0,5) indique que les cations Ca et Mg restent prédominants et renseignent sur la présence de processus de précipitation et d'évaporation (Ekwere, 2010).

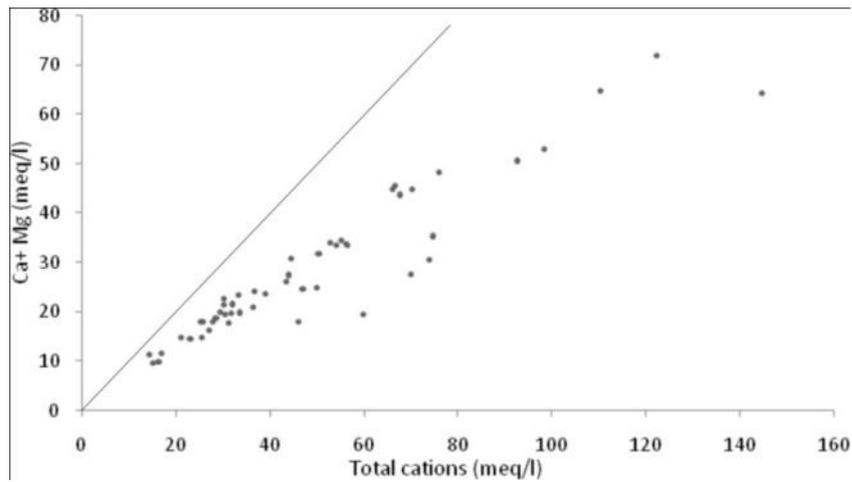


Figure 54. Diagramme (Ca + Mg) vs Total cations.

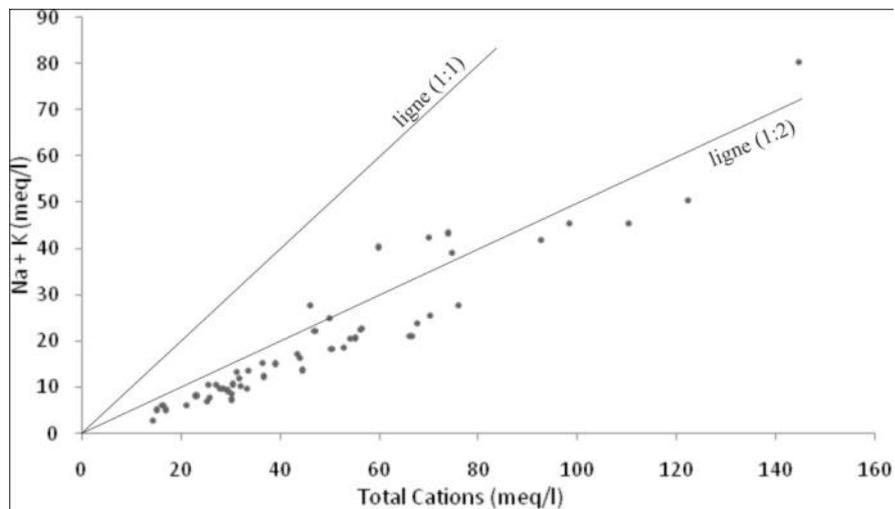


Figure 55. Diagramme (Na + K) vs Total cations.

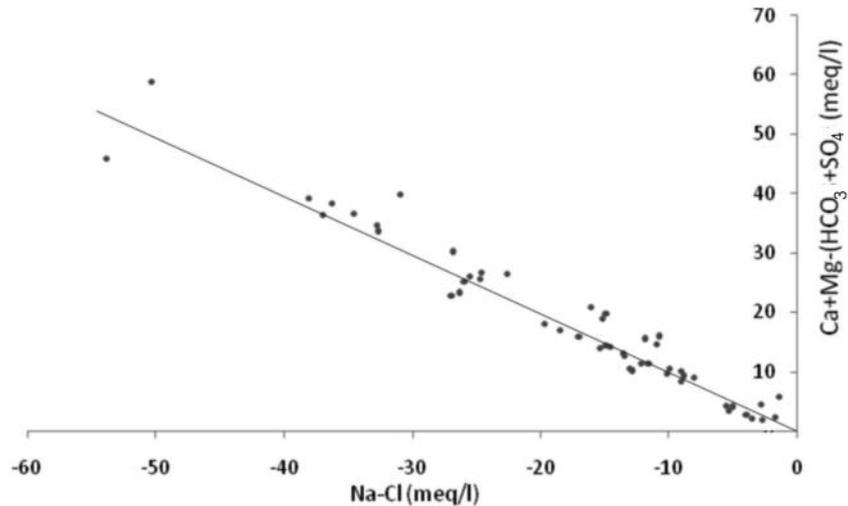


Figure 56. Diagramme (Na-Cl) vs (Ca + Mg) – (HCO<sub>3</sub>+SO<sub>4</sub>).

#### V.6.2.6- Ratio (Na + K) vs Total cations:

Le diagramme (Na + K) vs TC (total cations), montre que tous les échantillons sont au dessous de la ligne 1:1 et que la majorité se retrouve le long de la ligne 1:2 (Na + K = 0,5 Total cations). D'après Datta et Tyagi (1996), lorsque Na + K = 0,5 Total cations, l'apport de cations peut-être dérivé de l'altération des silicates. Dans notre secteur d'étude, le rapport (Na + K) / TC (de 0,2 à 0,67 et moyenne  $\approx$  0,4), est légèrement inférieur à 0,5 en raison des échanges d'ions inversés Na (solution) – Ca (roche) qui abaissent les teneurs du Na dans les eaux de la nappe plio-quaternaire. Néanmoins, la valeur (Na + K) / TC = 0,4 indique un apport en alkalis provenant des silicates.

#### V.6.2.7- Ratio (Na-Cl) vs (Ca + Mg) – (HCO<sub>3</sub>+SO<sub>4</sub>):

L'examen de la figure 56 permet de voir que tous les échantillons sont projetés le long de la ligne -1:1 dont la pente = -1. D'après Jankowski et al (1997), ceci indique que les processus d'échanges d'ions jouent un rôle important dans la composition chimique des eaux de la nappe plio-quaternaire.

Lorsque les eaux souterraines ont des rapports Cl /  $\Sigma$  anions > 0,8 et HCO<sub>3</sub> /  $\Sigma$  anions < 0,8 avec de faibles valeurs de SO<sub>4</sub>, elles proviennent soit de l'eau de mer, des saumures ou encore des évaporites (Hounslow, 2006). 38 % des échantillons de la nappe plio-quaternaire répondent à ces critères et les 62% restant ne diffèrent que par un rapport Cl /  $\Sigma$  anions < 0,8.

Par ailleurs, la totalité des échantillons ont un rapport Na / (Na + Cl) < 0,5, induisant un excès de Cl, dû à un apport extérieur (Hounslow, 2006). En outre, le rapport Ca / Na dont la moyenne est = 1,1 suggère que les eaux ont tendance à remplacer le Na par le Ca.

**V.7- Adéquation des eaux de la nappe plio-quaternaire à l'irrigation :**

La distribution des sels dissous dans le sol suit le chemin d'écoulement des eaux d'irrigation avec une tendance d'accumulation à la périphérie de la masse mouillée du sol. La zone des racines n'est pas contaminée par les sels durant la période d'irrigation (salinité faible à moyenne). Près de la surface (à cause de l'évaporation), l'accumulation des sels est cinq fois supérieure à ce qu'elle est en profondeur, augmentant latéralement et verticalement, au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la source d'eau.

L'accumulation des sels est associée à l'utilisation combinée des eaux salines et des engrais; une combinaison qui peut constituer un problème, surtout dans les régions à faible précipitation. En générale, les valeurs de la CE de l'eau valent 1/2 à 1/3 celles du sol au voisinage des sources d'irrigation et 1/6 à 1/10 celles enregistrées entre chaque sources.

Les paramètres régissant la qualité des eaux d'irrigation sont : la salinité, le taux de sodium, le pH, l'alcalinité, pathogènes microbiens, ainsi que les concentrations des ions, chlorures, sulfates, nitrates et bores.

**V.7.1- La salinité :**

Le niveau de salinité des eaux dépend de leur concentration/composition en sels dissous ; les chlorures étant très solubles restent dans la solution du sol, tandis que les sulfates et les bicarbonates s'associent avec le calcium et le magnésium, pour former des sulfates de calcium et des carbonates de calcium ; des composés très peu solubles.

L'utilisation des eaux à CE élevée se traduit par une diminution de la productivité des cultures, en raison de l'incapacité des plantes à rivaliser avec les ions dans le sol pour l'acquisition de l'eau (sécheresse physiologique). En effet, la salinité dans la zone racinaire augmente la pression osmotique de la solution du sol et entraîne une réduction de la vitesse d'absorption de l'eau par les plantes (Saleh et al, 1999). Ainsi, plus la CE est élevée, moins d'eau, il y aura pour les plantes ; ce qui peut se traduire par une carence d'eau continue, même si le sol est constamment irrigué (trompé).

Les symptômes de flétrissement peuvent ne pas se manifester, mais la croissance et le rendement sont considérablement réduits (tableau 25). Par conséquent, il n'est plus possible ni de maintenir des conditions favorables à un développement des cultures, ni de prédire des rendements futures (germination des graines retardée, voir même empêchée).

Tableau 25. Effets de la salinité sur les cultures  
(Quality of Water for irrigation, Ayers R.S., 1977).

Cultures	Réduction de la productivité en %			
	0%	20%	25%	50%
	Valeurs de la CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )			
Orge	5300	6700	8700	1200
Blé	4000	4900	6400	8700
Betterave	4700	5800	7500	1000
Pomme de terre	1100	1700	2500	3900
Oignon	800	1200	1800	2900

Tableau 26. Adaptation des eaux de la nappe plio-quaternaire à l'irrigation  
(Richards, 1954 ; Vasanthanvigar, 2010).

CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Qualité de l'eau			
	Richards, 1954	Nombre d'échantillons	Vasanthanvigar, 2010	Nombre d'échantillons
< 250		-	Excellente	-
100-250	Excellente	-		-
250-750	Bonne	-	Bonne	-
750-2000		-	Permise	6
750-2250	Douteuse	11		-
> 2250	Inutilisable	39		-
2000-3000		-	Douteuse	16

D'après le tableau 26, les eaux de la nappe plio-quaternaire constituent de mauvaises eaux d'irrigation. En effet, d'après Richards (1954), 11 puits uniquement captent des eaux douteuses, tandis que les 39 restants, des eaux inutilisables. D'après Vasanthanvigar (2010) par contre, 6 échantillons seulement représentent des eaux pouvant être utilisées pour l'irrigation, alors que les échantillons restants évoquent soit des eaux douteuses, soit des eaux carrément inappropriées à l'agriculture.

D'après la classification établie par la FAO en 1985 (d'après Maas, Tableau 27) et proposée comme guide pratique pour l'évaluation de la qualité des eaux d'irrigation, la majorité

des eaux de la nappe plio-quaternaire sont soit légèrement salines (23 échantillons), soit moyennement salines (22 échantillons), donc inappropriées à l'irrigation.

Tableau 27. Adaptation des eaux de la nappe plio-quaternaire à l'irrigation selon la classification de la FAO (1985).

Eau	CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Nombre d'échantillons
Non saline	< 700	-
Légèrement saline	700 - 3000	23
Moyennement saline	3000 - 6000	22
Saline	6000 - 14000	5
Hautement saline	> 14000	-
Très saline	14000 - 42000	-
Saumure	> 42000	-

Le tableau 28 ci-dessous permet de définir la limite d'utilisation des eaux de la nappe plio-quaternaire pour l'irrigation.

Tableau 28. Recommandation d'utilisation des eaux pour l'irrigation (Bauder et al, 2010).

Limite d'utilisation	CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Nombre d'échantillons
Aucune	$\leq 750$	-
Peu	750-1500	3
Modérée (lessivage requis à grande échelle)	1500-3000	20
Sévère (drainage nécessaire et culture des plantes sensibles à éviter)	$\geq 3000$	27

Du tableau 28, il ressort que les champs irrigués avec les eaux de la nappe plio-quaternaire nécessitent soit un drainage soit un lessivage après chaque période d'irrigation.

D'après Doneen (1962), l'aptitude d'une eau à l'irrigation ne dépend pas de la salinité totale, mais plutôt de celle des sels fortement solubles. Ainsi, il estima la salinité potentielle comme suit :

$$\text{SP (meq/l)} = [(\text{Cl}) - (\frac{1}{2} \text{SO}_4)].$$

Du tableau 29, 7 échantillons uniquement appartenant à la classe 2, peuvent être utilisés pour l'irrigation; ceux-là même cependant, occasionneront, du lessivage et de la percolation en

profondeur. Les 43 restants présentent des valeurs élevées soit de la CE soit de la SP et sont d'après Doneen (1962), mauvaises à inutilisables (classe 3) pour l'agriculture.

Tableau 29. Classification des eaux d'irrigation d'après Doneen (1962).

Classes / Qualité de l'eau						
1 / Excellente à bonne		2 / bonne à mauvaise		3 / Mauvaise à inutilisable		Effet sur le sol
SP(meq/l)	CE( $\mu$ S/cm)	SP(meq/l)	CE( $\mu$ S/cm)	SP(meq/l)	CE( $\mu$ S/cm)	
3	500	3 – 5	500 - 800	> 5	> 800	Lessivage minimal et percolation lente
5	800	5 – 10	800 - 1700	> 10	> 1700	Lessivage modéré et percolation lente en profondeur
7	1200	7 – 15	1200 - 2500	> 15	> 2500	Lessivage maximal et percolation rapide en profondeur

### V.7.2- Les chlorures :

Une multitude de substances trouvées dans les eaux d'irrigation peuvent être toxiques aux plants, principalement le sodium, le chlorure et le boron. Les dégâts ne sont observés généralement sur les cultures que si la salinité des eaux d'irrigation est importante.

En raison de leur grande solubilité, les chlorures restent dans la solution du sol, contrairement aux sulfates et bicarbonates, qui forment en présence du calcium et du magnésium des composés faiblement solubles. Les chlorures sont absorbés par les racines des plantes et transportés vers les tiges et feuilles, où ils s'accumulent. Cela causera dépendamment des concentrations absorbées (surtout dans les régions arides et semi-arides), soit des brûlures/perte prématuré des feuilles, soit la réduction de croissance et de production des cultures; dans la majorité des cas, les plantes n'exhibent des problèmes de toxicité clairs que lorsqu'il est trop tard pour remédier à la situation.

Dans le secteur d'étude, la majorité des eaux ont une concentration Cl > 350 mg/l. elles sont donc inappropriées à de nombreuses cultures (Mass, 1990); les échantillons 11, 19 et 49 sont les seuls dont la concentration Cl < 350 mg/l et peuvent être utilisés pour des plantes sensibles telles que l'ognon, la carotte, la laitue, etc. (Tanji, 1990). 12 échantillons avec 525<

concentration Cl (mg/l) < 875 peuvent être utilisés pour des cultures plus tolérantes à l'image du maïs, de la pomme de terre, de la tomate, du concombre, etc. (Tanji 1990).

### V.7.3- Le sodium:

Un taux de sodium élevé dans l'eau d'irrigation peut créer un problème de perméabilité du sol. La forte solubilité des sels sodiques ainsi que le remplacement des ions Ca et Mg par le Na sont les principales causes de la prédominance du Na par rapport aux autres cations dans les eaux salées. Cette abondance des ions Na provoque la dispersion des agrégats du sol et la détérioration de sa structure, le rendant ainsi, imperméable à l'eau et l'air.

L'augmentation de la concentration du Na échangeable peut entraîner une hausse du pH du sol (à plus de 8,5) et réduire la disponibilité de certains micronutriments, tels que le fer et le phosphore.

#### V.7.3.1- Ratio d'adsorption du sodium (SAR) :

De nombreux facteurs, dont la texture du sol, la matière organique, le type de culture et les systèmes d'irrigation utilisés, régissent les effets du Na sur le sol. Ainsi, à un SAR élevée (> 6), les sols les plus vulnérables seront ceux contenant plus de 30 % de smectite (argile expansive ou gonflante).

Le SAR est calculé par la formule présentée ci-dessous :

$$\text{SAR} = \text{Na} \div [\text{Ca} + \text{Mg} \div 2]^{1/2}, \text{ où les concentrations sont exprimées en meq/l.}$$

Tableau 30. Classification des eaux de la nappe plio-quadernaire selon le SAR  
(Todd, 1959 ; Richards (USSL), 1954,).

SAR / Classe	Qualité	Nombre d'échantillons
< 10 / S1	Excellente	48
10 – 18 / S2	Bonne	2
19 – 26 / S3	Assez médiocre	-
> 26 / S4	Inutilisable	-

Du tableau 30, les 50 puits échantillonnés captent tous des eaux parfaitement adaptées à l'irrigation selon les valeurs du SAR ; 48 échantillons appartiennent à la classe S1 et 2 uniquement à la classe 2.

Etant donné que les eaux de la nappe ont des teneurs en  $\text{HCO}_3^- > 200 \text{ mg/l}$ , nous avons calculé le SAR ajusté (SARadju).

Tableau 31. Classification des eaux de la nappe plio-quadernaire selon le SARadju.

SARadju / Classe	Qualité	Nombre d'échantillons
< 10 / S1	Excellente	43
10 – 18 / S2	Bonne	11
19 – 26 / S3	Assez médiocre	-
> 26 / S4	Inutilisable	-

Les valeurs du SARadju calculées ne diffèrent pas beaucoup de celles du SAR, même si le nombre d'échantillons appartenant à chaque classe change, passant de 48 à 43 pour la classe S1 et de 3 à 11 pour la classe S2.

A la lumière de cela, il apparaît que les problèmes d'infiltration et de perméabilité potentiels, résultant de l'application des eaux d'irrigation à haute sodicité, ne peuvent être étudiés sur la seule base du SAR. De ce fait, une évaluation plus précise, combinant le SAR et la CE a été introduite. Cette approche élaborée par Richards (1954) et rendue célèbre par : « the US Salinity Laboratory, USSS, 1954 », consiste à représenter le SAR en ordonnée et la CE ( $\mu\text{S/cm}$ ) en abscisse.

Les échantillons de la classe 1 (figure 57) peuvent être utilisés pour la plupart des cultures et sols (sauf dans le cas des sols très peu perméables). Ceux de la classe 2 peuvent être utilisés si l'opération d'irrigation est suivie d'un lessivage modéré. Les classes salinité élevée/faible SAR (C4 et C5) peuvent être utilisés pour certaines cultures à haute tolérance de sels. Toutefois, leur emploi doit être restreint, surtout dans les sols à faible drainage (Karanth, 1989 ; Mohan et al, 2000) et même avec un drainage adéquat, un contrôle continu de la salinité est requis.

Les données du tableau 32 permettent de dire, que les problèmes d'infiltration susceptibles d'affecter les sols de la plaine de Bel Abbès, en conséquence à l'utilisation des eaux de la nappe plio-quadernaire sont improbables.

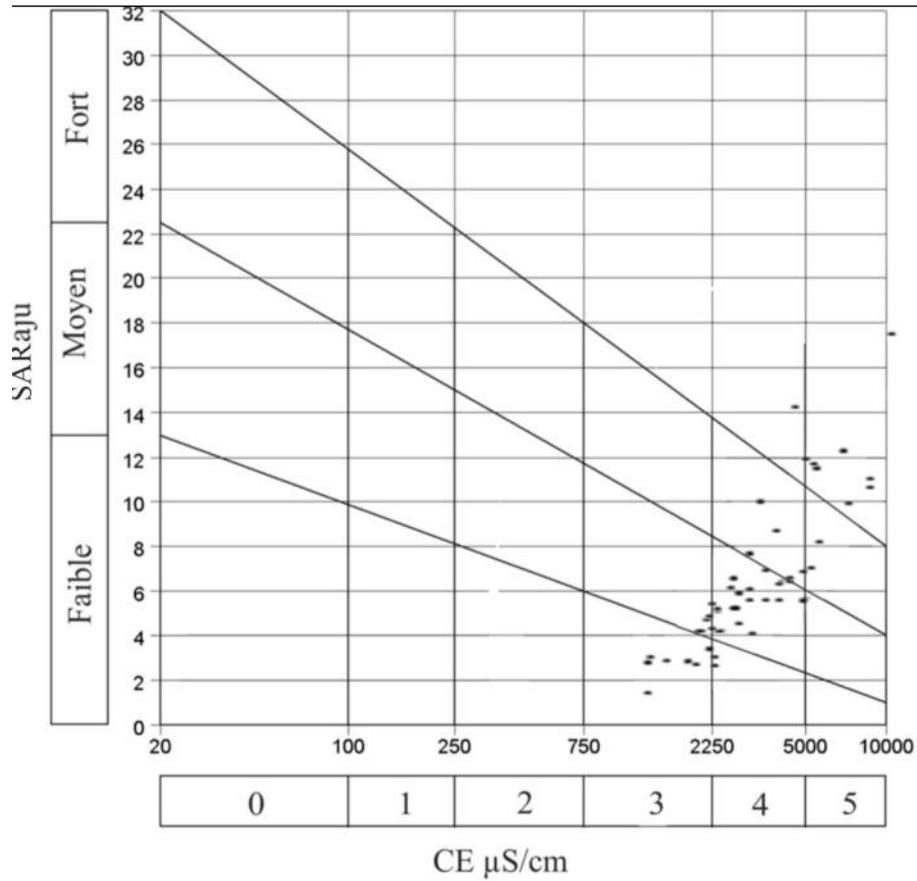


Figure 57. Classification des eaux de la nappe plio-quaternaire selon Richards (1954).

Tableau 32. Répercussions de la variation du SAR et de la CE sur l’infiltration (Ayers et Westcot, 1994).

SAR	Problème d’infiltration en fonction de la CE (µS/cm)	
	improbable	Probable
0 – 3	> 0,7	< 0,2
3 – 6	> 1,2	< 0,4
6 – 12	> 1,9	< 0,5
12 – 20	> 2,9	< 1
20 - 40	> 5	< 3

**V.7.3.2- Pourcentage de sodium (% NA)/ Pourcentage de sodium soluble (PSS):**

Le % Na est calculé selon la formule de Wilcox (1995) :

$$\% \text{ Na} = (\text{Na} * 100) / (\sum \text{ Cation majeur}), \text{ où toutes les concentrations sont exprimées en meq.l}^{-1}.$$

La figure 58, où une vingtaine d'échantillons se retrouvent hors du champ de projection, montre clairement que, comparée à la sodicité, la salinité globale des eaux de la nappe plio-quaternaire est plus nocive aux sols et aux cultures de la plaine de Bel Abbès.

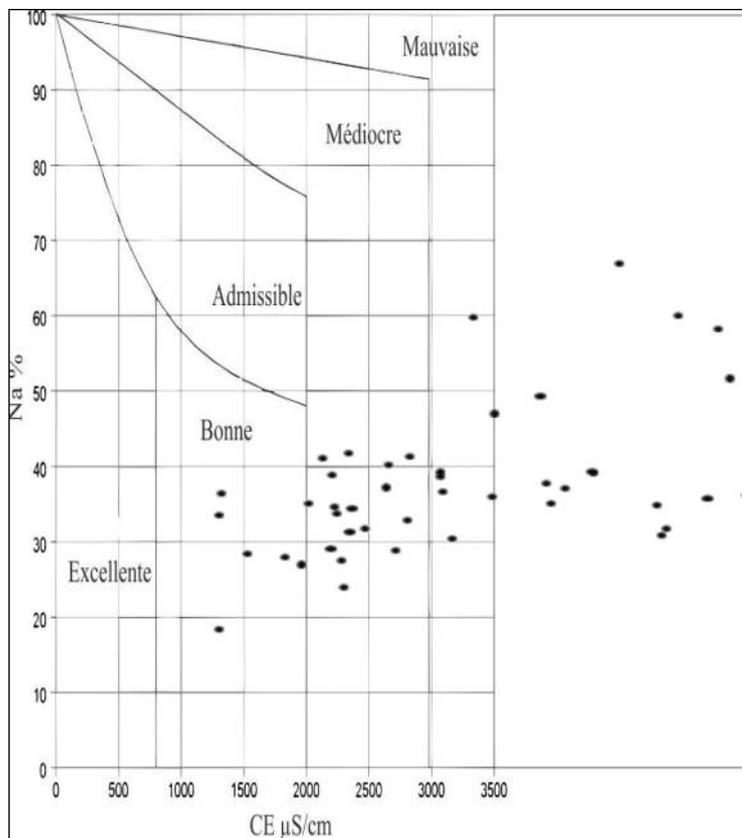


Figure 58. Diagramme Na % VS CE.

Le pourcentage de sodium soluble est donné par la formule suivante :

$$SSP = (Na * 100) / (Ca + Mg + Na)$$
, où toutes les concentrations sont exprimées en meq/l.

Tableau 33. Classification des eaux de la nappe plio-quaternaire selon le PSS (Todd, 1959).

PSS	Classe	Nombre d'échantillons
0 – 20	Excellente	1
20 – 40	Bonne	33
40 – 60	Admissible	13
60 – 80	Médiocre	3
80 - 100	Mauvaise	-

Du tableau 33, il apparaît que la majorité des échantillons représentent des eaux pouvant être utilisées pour l'irrigation, dont une trentaine adaptées à un grand nombre de cultures.

#### V.7.3.3- Sodium carbonate résiduel (SCR):

Dans les eaux souterraines, l'excédent en  $\text{CO}_3 + \text{HCO}_3$  par rapport aux teneurs  $\text{Ca} + \text{Mg}$  régit également leur convenance à l'irrigation. Le SCR est donné par la formule suivante (Eaton, 1950 ; Ragunath, 1987) :

$$\text{SCR} = (\text{CO}_3 + \text{HCO}_3) - (\text{Ca} + \text{Mg}), \text{ où toutes les concentrations ioniques sont exprimées en meq/l.}$$

Dans notre secteur d'étude, tous les échantillons ont un indice SCR inférieur à 1,25. Ainsi, et d'après Richards (1954), toutes les eaux de la nappe plio-quadernaire peuvent être utilisées pour l'irrigation.

#### V.7.3.4- Sodium bicarbonate résiduel (SBCR) :

D'après Gupta et Gupta (1987), le SBCR en (meq/l) est défini par l'équation suivante :

$$\text{SBCR} = (\text{HCO}_3 - \text{Ca}).$$

Toutes les eaux de la nappe plio-quadernaire ont des valeurs du SBCR  $< 5$  (meq/l) et conviennent donc à l'irrigation.

#### V.7.3.5- Indice de Kelly :

Pour calculer le taux de Na échangeable, Kelly proposa en 1951 une formule qui s'énonce comme suit :

$$\text{IK (meq/l)} = \text{Na} / (\text{Ca} + \text{Mg}).$$

La majorité des échantillons (44) ont un IK  $< 1$  (meq/l) et indiquent ainsi que les eaux de la nappe plio-quadernaire sont bonnes pour l'irrigation.

#### V.7.4- Le magnésium (MHR) :

Les fortes teneurs en Mg sont nocives et généralement liées à la présence de Na échangeable dans le sol ; le rendant plus alcalin, elles réduisent considérablement sa productivité.

Le pourcentage en magnésium d'une eau d'irrigation est calculé selon la formule de Paliwal (1972) :  $\text{MHR} = \text{Mg} * 100 / \text{Mg} + \text{Ca}$ , où toutes les concentrations sont exprimées en meq/l.

Pour les eaux de la nappe du plio-quatenaire, 8 échantillons seulement ont des % Mg > 50 et représentent des eaux mauvaises pour l'irrigation.

#### V.7.5- Effet de la salinité et de la sodicité sur le sol :

Le Na et la CE ont des effets opposés sur le sol ; alors qu'une CE élevée peut augmenter sa floculation, la saturation en Na peut causer sa dispersion (Hanson et al. 2006).

En raison de sa taille, sa charge électrique singulière, ainsi que son abondance, le Na adsorbé a tendance à réduire l'infiltration du sol ainsi que sa conductivité hydraulique, à créer des encroutements durs à sa surface et à causer sa dispersion (séparation des particules du sol). Les fortes concentrations en Na, le type d'argile et les épisodes répétés d'humectation et de séchage du sol engendrent une solidification et une transformation de ce dernier en un sol-ciment avec presque aucune structure (Frenkel et al. 1978; Hardy et al. 1983; Buckman and Brady 1984).

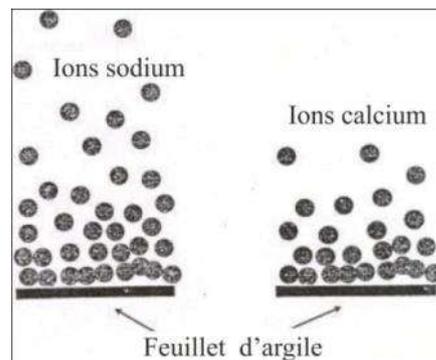


Figure 59. Comportement des ions Na et Ca à la surface de l'argile (Hanson et al, 2006).

Comparés aux ions Na, les cations divalents Ca et Mg, de taille inférieure, n'ont pas le même comportement dans le sol (charges divalentes) et n'occasionnent pas les mêmes effets (Hanson et al, 2006) (figure 59). En effet, quand le Mg et surtout le Ca sont les cations dominants par rapport aux ions Na et K, les forces attractives entre les feuillets d'argiles saturés en Ca (petit ion hydraté) sont supérieures aux forces répulsives existantes entre les surfaces de charge négative des argiles, ce qui limite l'expansion de ces dernières (Rengasamy et al. 1984; Rengasamy 2002). Quand c'est le K et le Na qui domine par contre, c'est les forces répulsives qui prennent le dessus; l'espace entre les plaquettes d'argile augmente et se traduit par la dispersion du sol (Rengasamy, 2002).

Quand  $Mg/Ca < 4$  (meq/l) et  $Na/Ca < 3$  (meq/l), la dispersion du sol et les problèmes d'infiltration sont improbables en raison de la présence de quantités suffisantes en Ca pour contrecarrer l'effet dispersif du Na (Michael, 1978). Les échantillons 5, 26, 32 et 38 sont les

seuls à avoir des ratios excédant les limites citées plus haut, ce qui signifie que les eaux de la nappe plio-quaternaire ne constituent pas un risque pour les sols de la plaine de Bel Abbès. Cela est confirmé par les informations du tableau 34 et de la figure 60.

Tableau 34. Effets de la CE et du SAR (Sodium Adsorption Ratio) sur l'infiltration du sol (Ayers et Westcot, 1976; Oster et al. 1979).

EC (dS/m)	Réduction de l'infiltration en fonction du SAR				problème d'infiltration selon la CE (dS/cm)		
	Aucune	Légère	Moyenne	Sévère	SAR	improbable	Probable
≤ 0,7	< 1	15	5 à 11	> 11	0-3	> 0,7	< 0,2
0,7 - 3	< 10	10 à 15	11 à 23	> 23	3-6	> 1,2	< 0,4
3 - 6	< 25	> 25	Aucun effet	Aucun effet	6-12	> 1,9	< 0,5
6 - 14	< 35	> 35	Aucun effet	Aucun effet	12-20	> 2,9	< 1
> 14	Aucun effet	Aucun effet	Aucun effet	Aucun effet	20-40	> 5	< 3

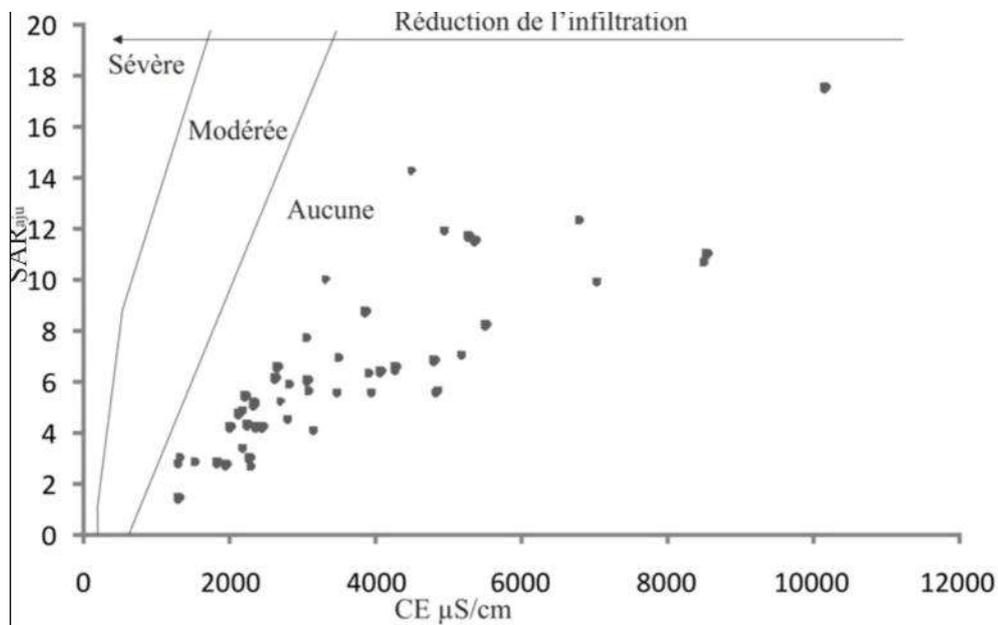


Figure 60. Incidence d'utilisation des eaux de la nappe plio-quaternaire sur l'infiltration (Rhoades, 1977; Oster et al, 1979).

Usuellement, le SAR et l'ESP (exchangeable sodium percentage) sont utilisés comme mesure de sodicité des sols et conséquemment, comme indicateurs de la structure du sol (dispersion et floculation); même si les deux paramètres n'incluent pas le potassium échangeable et traitent les cations monovalents et divalents de manière identique. Cependant, les concentrations élevées en magnésium (et/ou en potassium, qu'elles soient dues à la composition du sol, ou résultant de l'utilisation d'eau d'irrigation polluée), jouent également un rôle majeur dans la stabilité de la structure du sol, en raison du plus faible effet de floculation du Mg sur le sol, comparé au Ca (Emerson and Bakker 1973; Rengasamy et al. 1986); comme reporté par Chen et al (1983), qui avaient estimé l'ordre de contribution des cations échangeables à la stabilité du sol selon l'ordre : Ca > Mg > K > Na.

Les concentrations en Mg des échantillons de la nappe plio-quaternaire sont relativement élevées; la moitié a un MHR > 40 %. A la lumière de cela, nous avons décidé de calculer les ratios MCAR (Monovalent Cations Adsorption Ratio. Smiles et Smith, 2004)) et CROSS (Cation ratio of soil structural stability. Rengasamy et Marchuk, 2011) qui, comparés au SAR et à l'ESP permettent une meilleure appréciation des effets des cations monovalents Na et K et divalents Ca et Mg sur, respectivement, la dispersion et la floculation du sol (Emerson et Bakker, 1973; Chen et al, 1983; Rengasamy et al, 1986; Rengasamy, 2002; Rengasamy et Marchuk, 2011).

ESP (U.S. Salinity Laboratory 1954; Bower 1959) =  $(100 \cdot \text{ESR}) \div (1 + \text{ESR})$

ESR (Bower 1959) (Exchangeable Sodium Ratio):  $\text{ESR} = (-0.0126) + (0.01475 \cdot \text{SAR})$

$\text{MCAR} = (\text{Na} + \text{K}) \div \sqrt{[(\text{Ca} \oplus \text{Mg}) \div 2]}$

$\text{CROSS} = (\text{Na} + 0.56\text{K}) \div \sqrt{[(\text{Ca} \oplus 0.6\text{Mg}) \div 2]}$

Les résultats du tableau 35 traduisent un faible risque de sodicité des eaux de la nappe plio-quaternaire, une dispersion improbable des sols dans la plaine de Bel Abbès et donc une adaptabilité à l'irrigation.

Tableau 35. Paramètres de sodicité.

Paramètre	Moyenne	fourchette
ESP	7.6	0.8 – 19.7
SAR	5	1 – 14.1
SARadj	6.5	1.4 – 17.5
MCAR	5.1	1.1 – 14.1
CROSS	4	0.8 – 11.1

Les eaux d'irrigation de mauvaise qualité peuvent également réduire la perméabilité des sols. Ainsi, Doneen (1964) et Rangunath (1987) estimèrent la prédisposition d'une eau à l'irrigation selon un indice de perméabilité (PI) donné en (meq/l) selon la formule suivante :

$$IP = [Na + (HCO_3)^{1/2}] \div [\sum \text{Cation majeur}]$$

Les eaux sont classées en classe 1 et classe 2, représentant des eaux bonnes pour l'irrigation (75% ou plus de perméabilité), alors que la classe 3, représente des eaux inappropriées à l'irrigation (maximum de 25% de perméabilité); tous les échantillons de la nappe alluviale appartiennent à la classe 1 (figure 61).

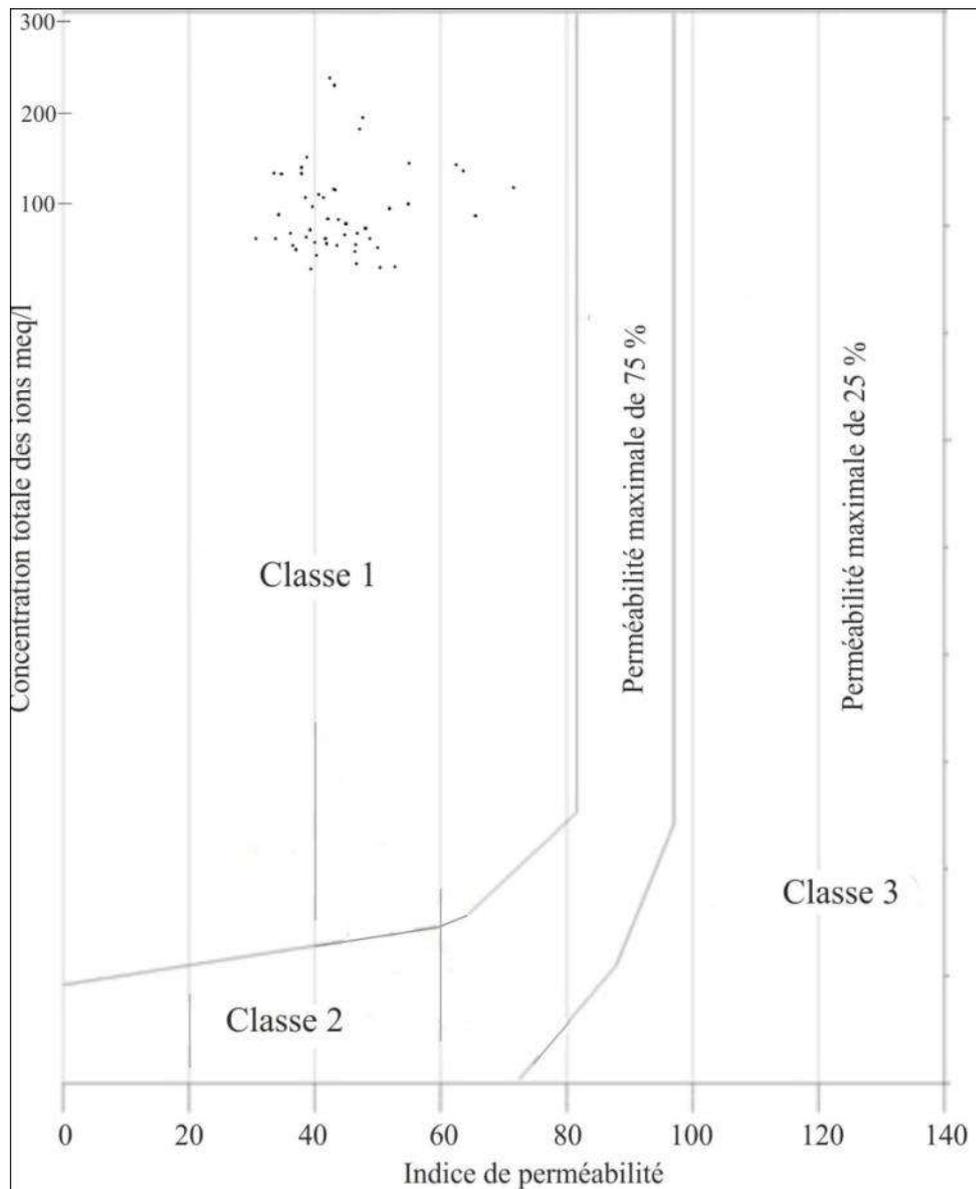


Figure 61. Indices de perméabilité des eaux de la nappe plioquaternaire (Doneen, 1964; Rangunath, 1987).

**VI- Conclusion :**

La ville de Sidi Bel Abbès, localisée à environ 80 kilomètres au Sud d'Oran abrite une cuvette d'une altitude moyenne variant de 500 à 700 m, formée par la plaine de Sidi Bel Abbès proprement dite, la plaine de Caïd Belarbi à l'Est, la plaine de Boukhanefis-Tabia au Sud et la plaine de Hassi Zahana au Sud-ouest. D'une superficie avoisinant les 1150 km<sup>2</sup>, la plaine de Sidi Bel Abbès forme le bassin versant de la Moyenne Mekerra et est dominée par les Monts Tessala au Nord et ceux de Dhaya au Sud. Deux Oueds majeurs s'écoulent sur la plaine; le Tissaf et la Mekerra. Cette dernière parcourt la plaine sur une distance de 113 Km de Ras El Ma, jusqu'au lieu dit le Rocher.

La couverture végétale du bassin versant de la Mekerra est formée essentiellement d'alpha et de broussaille au Sud, de céréalicultures à Sidi Lahssen, Boukhanefis et Sidi Ali Benyoub, des cultures-sentiers aux environs d'El Haçaïba et de Sidi Ali Benyoub et de forêts aux niveaux des massifs se trouvant entre El Haçaïba, Moulay Slissen et Sidi Ali Benyoub.

La région d'étude se caractérise par un climat semi aride, où la lame d'eau précipitée depuis 1970 dépasse rarement 400mm et se retrouve reprise dans sa majorité par l'évapotranspiration, égale en moyenne à 320mm. La plaine est plus arrosée au Nord-ouest et enregistre des baisses importantes de la pluviosité depuis le début des années 1970s. Les mois de Janvier et Février sont les plus froids, les plus fortes températures sont par contre, enregistrées durant le mois d'Août. Le bilan hydrogéologique de la plaine de Bel Abbès (2006-2007) a confirmé la surexploitation qu'endure l'aquifère plio-quadernaire depuis des années et nous a permis d'estimer le taux de recharge de l'aquifère à 18%.

D'un point de vue géologique, la plaine de Sidi Bel Abbès est une large cuvette à substratum argilo-marneux mio-pliocène. Elle est limitée au Nord par les Tessala, formés de terrains très plissés, essentiellement créacés et recouverts de formations tertiaires très épaisses. Au Sud, la plaine est dominée par les terrains des Monts de Tlemcen-Saïda, formés presque totalement de matériaux du Jurassique supérieur et du Crétacé inférieur. Vers l'Ouest, les collines de marnes serravaliennes jouent le rôle d'une barrière séparatrice entre les bassins versants des Oueds Isser et Mekerra. Sur la bordure est, la plaine de Sidi Bel Abbès est reliée au prolongement des Béni Chougran, par la série des marnes miocènes de Bou Hanifia.

Cinq aquifères sont présents au niveau de la plaine de Sidi Bel Abbès ; les calcaires aptiens de Zigyne, les calcaires/dolomies jurassico-crétacés de Sidi Ali Benyoub, les calcaires éocènes de Sidi Ali Boussidi, les grès pliocènes de la forêt de Ténira et enfin les alluvions plio-quadernaires. Ce dernier aquifère constitue le réservoir le plus important de la région d'étude et est formé de dépôts alluvionnaires et de conglomérats (en bordure des Oueds) reposant sur un

mur de marnes bleues grises gréseuses du Miocène. L'aquifère plio-quadernaire est alimenté par les précipitations, les aquifères adjacents et par les Oueds. Il est caractérisé par des transmissivités variant de  $10^{-2}$  m<sup>2</sup>/s aux niveaux des chenaux conglomératiques à  $10^{-5}$  m<sup>2</sup>/s dans les alluvions peu perméables. Les zones les plus transmissives se trouvent aux environs de Sidi Bel Abbès, Sidi Lhassen, Bedrabine et Sidi Ali Benyoub. Quant aux coefficients d'emmagasinement, ils atteignent 25 à 30 % dans les vallées de Bedrabine, Tabia et Sidi Ali Benyoub et varient de 5 à 15 % dans le reste de la plaine.

L'étude de l'interaction aquifère plio-quadernaire/Mekerra a montré que les débits de l'Oued augmentent de Sidi Ali Benyoub jusqu'à la confluence avec l'Oued Tissaf. De cette zone et jusqu'à la dérivation vers le barrage Sarno, le drainage de la nappe par la Mekerra diminue pour réaugmenter ensuite considérablement en allant vers l'exutoire principal se trouvant au Nord de la ville de Sidi Bel Abbès, au niveau du Rocher.

L'étude hydrochimique des eaux de l'aquifère plio-quadernaire a montré qu'elles se détériorent en allant des zones de recharge au Sud et à l'Est de la plaine de Bel Abbès vers l'exutoire de l'aquifère au Nord, au lieu dit le « Rocher ». Les eaux les moins salées (TSD < 1g / l) sont observées au Sud de Ben Badis, où la densité de population est faible et l'activité industrielle inexistante. Au Nord de Hassi Zahan, entre Lamtar et Ben Badis, ainsi que le long de la rivière Mekerra, les eaux de l'aquifère sont relativement de bonne qualité (TSD: 1 à 2 g / l); au Nord de Hassi Zahana, la plupart des eaux à faible salinité proviennent des calcaires karstiques éocènes de Sid Ali Boussidi; entre Lamtar et Ben Badis, ces eaux sont principalement présentes le long de l'Oued Bedrabine. Ceci est dû aux bonnes propriétés hydrodynamiques (perméabilité et gradients hydrauliques) des calcaires éocènes et des alluvions (graviers et conglomérats le long des rivières Bedrabine et Mekerra, qui ne favorisent pas de longues périodes d'interactions eau/roche), à la profondeur de la nappe phréatique dans cette zone (protection relative) et la modération de l'activité agricole et industrielle (uniquement Hassi zahana) caractérisant ce pan du secteur d'étude. Les eaux salées à extrêmement salées (TSD > 3 g / l) sont trouvées près du chef lieu de la wilaya de Bel Abbès (zone la plus peuplée et la plus active et par où transitent une grande partie des eaux polluées de la rivière Mekerra) et aux environs de la localité de Caïd Belarbi (où l'aquifère est le plus exposé à l'évapotranspiration, aux extractions et à la pollution)

Les eaux de l'aquifère plio-quadernaire sont dans leur majorité relativement douces et peuvent être utilisées à des fins industrielles et agricoles (si les concentrations en Cl sont réduites). Elles deviennent plus dures, au fur et à mesure qu'elles se rapproche de l'exutoire du Rocher, en dissolvant les roches carbonatées (les calcaires de Zigyne à l'Est, les dolomies et les calcaires de Sidi Ali Benyoub au Sud, les calcaires éocènes de Sidi Ali Boussidi et le éléments

carbonatés des conglomérats le long des rivières Tissaf et Mekerra) sur leur trajet. Malgré une légère prédominance (Ca + Mg) par rapport au (Na + K), la plupart des eaux de l'aquifère sont presque en équilibre chloro-alkalin.

Le processus d'échange d'ions joue un rôle majeur dans la salinité des eaux de l'aquifère, en particulier en ce qui concerne les concentrations en Na. L'altération des silicates et la dissolution des évaporites contribuent également à l'augmentation des concentrations de cet élément dans les eaux de l'aquifère plio-quadernaire. Les concentrations relativement faibles des sulfates et des nitrates résultent des réactions redox, favorisées par l'abondance de la matière organique (eaux usées) dans les eaux de la l'aquifère. Les fortes concentrations en Cl, qui représentent avec la contamination bactériologique le principal problème de la zone d'étude, contrastent avec la faible présence d'évaporites et de sels chlorurés (à l'exception de quelques marnes et argiles salifères triasiques, créacées et oligo-miocènes au niveau d'Aïn Tellout et surtout des Tessala) dans la région et sont principalement attribuées aux eaux usées. Cette contamination est non seulement une conséquence de la déficience des réseaux d'assainissement et des stations d'épuration de la région, mais également celle de la non-application de la législation en vigueur en matière de protection de l'environnement.

L'étude hydrochimique des eaux de l'aquifère plio-quadernaire révèle un risque de salinité important, quant à leur utilisation en irrigation. En effet, plus de la moitié des échantillons analysés présentent des valeurs de CE supérieures à 3000 ( $\mu\text{S} / \text{cm}$ ). Les résultats chimiques montrent que l'utilisation de la plupart des échantillons comme eaux d'irrigation doit être suivie soit par un lessivage extensif, soit par un drainage des terres agricoles. Les fortes concentrations en chlorures sont dans leur majorité toxiques ( $> 350 \text{ mg} / \text{l}$ ) pour la plupart des plantes sensibles. L'analyse chimique des eaux de l'aquifère plio-quadernaire montre que leur utilisation en irrigation présente un faible risque sodium (sodium hazard), comme l'ont prouvé les valeurs du SAR, SARadjust, NA%, PSS, SCR et SBCR. Les mêmes conclusions sont tirées pour les dangers du magnésium et de l'alcalinité, sur la base des valeurs du MHR ainsi que les concentrations des eaux en  $\text{CaCO}_3$ . Outre les valeurs du PI, SAR et ESP, les ratios MCAR et CROSS ont confirmé le moindre effet dispersif des eaux de l'aquifère plio-quadernaire, indiquant qu'elles ne sont ni susceptibles de modifier la structure des sols dans la plaine de Bel Abbès ni de réduire leur perméabilité.

***Deuxième partie***  
***Modélisation des eaux souterraines de la plaine***  
***de Sidi Bel Abbès***

I – Modélisation d'un système hydrogéologique donné

II – Modélisation du système aquifère plio-quaternaire

III – Conclusion

**I- Modélisation d'un système hydrogéologique donné:**

Un modèle est une représentation plus ou moins conceptuelle d'un système. Ainsi, à chaque besoin donné correspond un niveau de conceptualisation; en d'autres termes, un type de modèle et un ou plusieurs types de méthodes pour sa mise en œuvre.

Un modèle peut être défini comme une version simplifiée d'un système naturel. La simplification se fait sur la base d'un nombre d'assomptions reflétant la nature du système étudié, telles que les conditions aux limites, le type de matrice rocheuse (homogénéité, isotropie, etc.), le type et le régime d'écoulement (uni, bi ou tridimensionnel / laminaire ou non), les types d'eau ou de fluide considérés (exemple : effet du TSD et/ou de la température sur la densité et la viscosité), etc.

La sélection du modèle conceptuel ainsi que son degré de simplification dépendent des objectifs escomptés et de la disponibilité des données. Ainsi, la mise en place d'un modèle pour un système hydrogéologique donné nécessite la connaissance (dans la mesure du possible) de son extension, son épaisseur et les propriétés hydrauliques de ses différentes formations, les unités hydrologiques y contrôlant l'écoulement, la distribution horizontale et verticale des charges hydrauliques, les pertes vers la surface ou en profondeur, la répartition de la recharge, ainsi que les pompages (out) / injections (in) qui y sont implantés.

Les modèles distinguent généralement deux types de milieux souterrains :

le milieu finement divisé (où la distinction des vides ne peut se faire qu'à l'échelle microscopique), représenté par les milieux poreux et ceux finement fissurés ;

le milieu discontinu (où la distinction entre la matrice rocheuse et les vides est nette), représenté par les milieux peu fissurés et les systèmes karstiques.

Dans les milieux finement divisés, l'exploitation de la ressource en eau est tributaire du type de formation rencontrée (exemple : porosité d'interstices pour des grès et de fissures pour des calcaires compacts) et son aptitude à la circulation des eaux. Par conséquent, Il est d'usage de classer les différents types de formations géologiques rencontrées en trois catégories:

les formations perméables aquifères permettant une circulation aisée de l'eau ;

les formations imperméables (pouvant contenir une grande quantité d'eau, mais ne permettent pas sa mobilisation);

les formations semi-perméables (dans lesquelles l'eau n'est pas mobilisable) permettant des transferts à l'échelle régionale entre les formations aquifères.

Il convient de noter que ces distinctions sont relatives et dépendent notablement de l'échelle du problème posé.

En pratique les études de modélisation se focalisent habituellement sur :

l'étude quantitative des ressources en eau par quantification des écoulements dans un aquifère (ou un système d'aquifères),

simulation de l'impact des phénomènes naturels ou provoqués par l'activité humaine,

les études de génie civil concernant le rabattement de nappe, le dénoyage d'ouvrages, l'exhaure des mines, l'écoulement dans les digues et barrages, etc.

L'aspect qualitatif par contre, associé à l'écoulement le transfert de substances et est de ce fait assez délicat à modéliser, car il combine des paramètres hydrodynamiques et physico-chimiques. Les problèmes qualitatifs rencontrés sont généralement liés à la pollution des aquifères.

La modélisation de n'importe quel système hydrogéologique se fait sur plusieurs étapes, dont la durée et la complexité sont tributaires d'une multitude de paramètres. La figure 62 résume les plus importantes étapes nécessaires à la mise en place d'un modèle hydrogéologique.

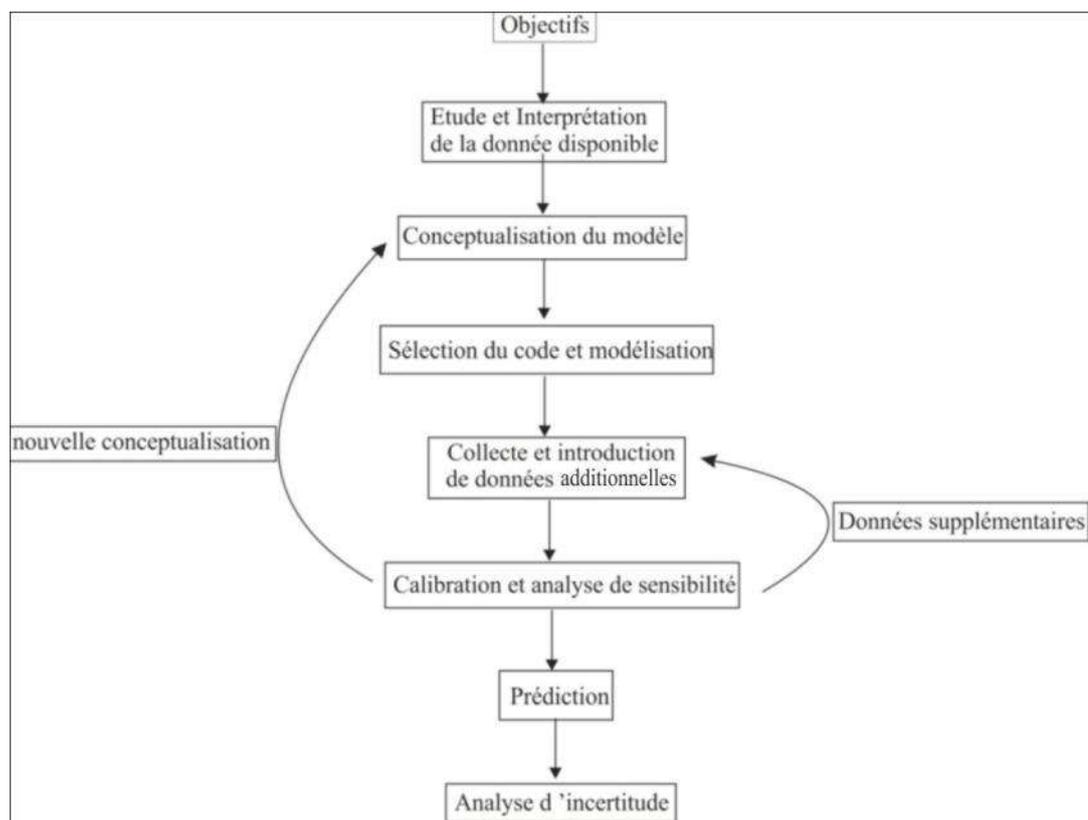


Figure 62. Différentes étapes de conceptualisation d'un modèle hydrogéologique.

**I.1- Objectifs :**

La modélisation d'un système hydrogéologique dépend étroitement des objectifs escomptés par les différents acteurs concernés. Ainsi, la complexité et l'étendue du modèle peut varier considérablement, passant d'une simple évaluation d'un problème local à une étude beaucoup plus approfondie et détaillée sur une échelle régionale.

**I.2- Disponibilité des données :**

Dans la nature, les écoulements et les transports sont d'une grande complexité et change continuellement dans le temps. De ce fait, la simplification des réalités sur terrains devient impérative pour tout modèle. Cependant, une bonne conceptualisation du modèle nécessite une grande disponibilité de données et cela dans le but de refléter au maximum les caractéristiques du système hydrogéologique étudié. A la lumière de cela, il apparaît clairement que plus la donnée est abondante, plus le modèle sera fiable. Par ailleurs, des campagnes de suivis et de collecte de données périodiques du système étudié permettront une mise à jour continue du modèle, lui assurant ainsi, une sorte de pérennité relative.

**I.3- Conceptualisation du modèle :**

La sélection du modèle conceptuel approprié est l'une des étapes les plus importantes dans le processus de modélisation (Bear et al, 1992). Durant le développement du modèle, il y a toujours un compromis à faire entre réalisme, généralisation et précision, car il est impossible de maximiser les trois simultanément (Levins, 1966). Il n'existe pas de façon parfaite pour simplifier un système hydrogéologique. Néanmoins, une sur-simplification peut conduire à un modèle incomplet, tandis qu'une sous-simplification résultera en un modèle onéreux ou pauvrement calibré. Ainsi, la sélection du modèle conceptuel et sa simplification dépendront des objectifs à atteindre, des ressources et des données disponibles et des contraintes relatives au site étudié.

Le modèle conceptuel schématise le comportement supposé du système hydrogéologique et cela sur la base des données géologiques, stratigraphiques, des propriétés hydrogéologiques et des processus de recharge/décharge (Anderson & Woessner, 1992).

Lors de cette étape, les données du système hydrogéologique sont assemblées pour décrire les processus d'écoulement des eaux souterraines et de transfert de contaminant et cela dans le but de déterminer l'approche à entreprendre et le choix du code ou du programme à utiliser.

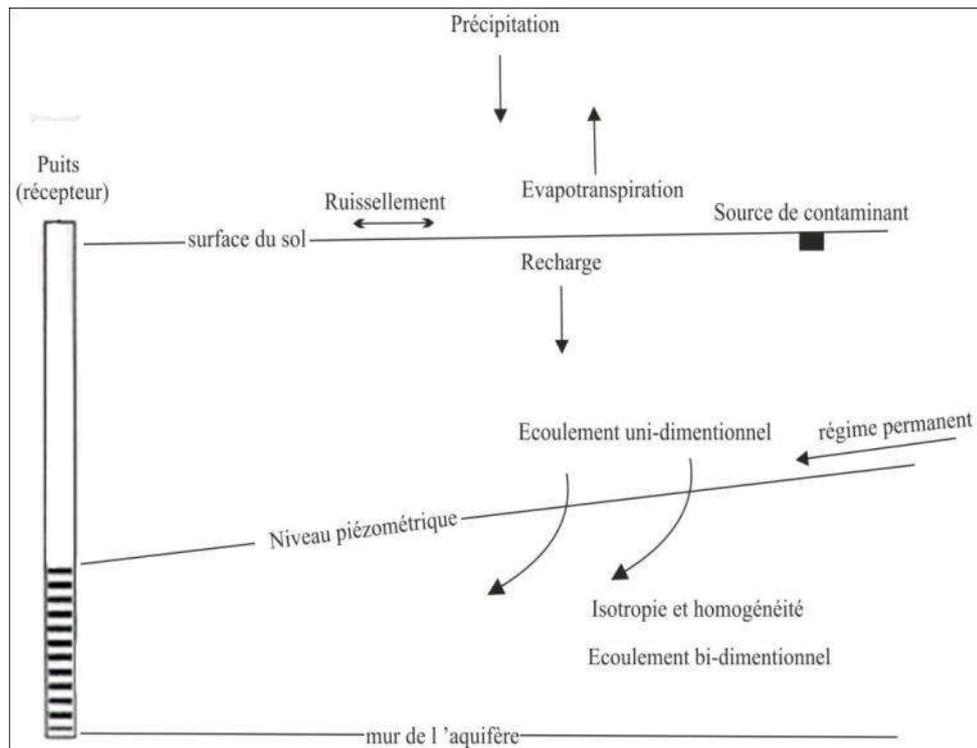


Figure 63. Représentation simple d'un modèle conceptuel.

Durant la phase préliminaire de la conceptualisation, les assomptions suivantes sont faites :

- régime permanent (Steady-State),
- dimensionnalité restreinte,
- conditions aux limites simplifiées,
- processus d'écoulement et de transport Simplifiés,
- homogénéité du système.

Durant la phase de caractérisation du modèle conceptuel, les assomptions faites sont plus complexes et se résument comme suit :

- écoulements permanent et transitoire,
- multi-dimensionnalité,
- conditions aux limites complexes ;
- hétérogénéité du système.

#### I.4- Modèle mathématique :

L'étape suivante dans le processus de modélisation est la transformation du modèle conceptuel en un modèle mathématique. Ce dernier doit prendre en considération les éléments suivants:

la géométrie du domaine considéré et ses limites,  
une équation (ou plusieurs) qui exprime la balance de la quantité (ou quantités) extensive considérée,  
une équation d'écoulement reliant le flux de la quantité extensive considérée aux différentes variables du problème étudié,  
une équation définissant le comportement des fluides et des solides considérés,  
une équation (ou plusieurs) exprimant les conditions initiales du système,  
une équation (ou plusieurs) renseignant sur les conditions aux limites, décrivant l'interaction entre le domaine et son environnement.

La plupart des modèles mathématiques n'expriment que la balance de la quantité de masse extensive considérée (masse d'eau ou de soluté) et ne font que reprendre les informations du modèle conceptuel en les exprimant cependant, sous forme d'équations, destinées à fournir des solutions analytiques et numériques.

L'un des buts principaux du modèle mathématique est de synthétiser le modèle conceptuel en termes numériques, permettant d'étudier les processus d'écoulement et de transport. Le passage du modèle conceptuel au mathématique se fait selon les étapes suivantes :

a) partitionnement du modèle conceptuel en unités de temps et d'espace :

dans un modèle numérique, la région d'intérêt est subdivisée en séries de blocks (éléments) arrangés sous forme de couches. Ce processus dénommé discrétisation, remplace de façon efficiente les problèmes du domaine étudié par une collection de blocks et de nœuds.

b) définition des conditions aux limites et des conditions initiales :

Les conditions aux limites sont les variables connues utilisées pour identifier les paramètres inconnus du problème; des variables qui peuvent être associées à l'écoulement ou au transport de contaminant.

Les limites physiques sont transformées en termes mathématiques et introduites dans le modèle numérique.

Les conditions initiales représentent les valeurs des niveaux statiques ou des concentrations du contaminant, à un temps « t » initial de référence (en régime permanent, seul les conditions aux limites sont requises; en régime transitoire par contre, les deux conditions sont nécessaires).

### **I.5- Modèle numérique :**

Les modèles de ressources en eau peuvent être appliqués soit à des problèmes locaux (nappe alluviale locale), soit à grande échelle, pour étudier et résoudre des problèmes régionaux

relatifs à des structures complexes (bassin sédimentaire comportant plusieurs aquifères superposés (structure multicouche)). La conceptualisation de telles structures conduit au modèle multicouche constitué par un empilement de couches subhorizontales, où l'écoulement est bidimensionnel (écoulement en nappe). Ces couches subhorizontales sont reliées entre elles, par des écoulements sub-verticaux monodimensionnels (couches semi-perméables). Toutefois, la schématisation multicouche ne constitue qu'une simplification, ayant pour but un allègement des calculs ultérieurs. Ainsi, le travail du modélisateur doit débiter par une étude hydrogéologique approfondie, qui permettra d'élaborer une ou plusieurs interprétations, qui seront par la suite traduites par le modèle. En pratique, l'alternance de couches sédimentaires de lithologie variée se traduit dans les aquifères par des circulations souterraines subhorizontales. Les conditions régnautes généralement dans les aquifères privilégient l'écoulement horizontal au dépend du vertical. Par conséquent, à l'échelle régionale, la composante verticale de l'écoulement est le plus souvent négligée au profit des composantes horizontales ou subhorizontales. Cette pratique connue sous le nom d'hypothèse de Dupuit, est justifiée par l'absence de variations significatives de la charge (ou côte piézométrique) le long d'un aquifère.

**I.6- Equation de diffusivité :**

Le volume élémentaire représentatif (VER) de l'écoulement en nappe représente le domaine d'écoulement sur toute la hauteur mouillée de l'aquifère, du substratum imperméable, jusqu'au recouvrement imperméable pour une nappe captive et jusqu'à la surface piézométrique pour une nappe libre. Ainsi, en supposant que le repère cartésien O (Ox, Oy, Oz) est le repère principal d'anisotropie pour la perméabilité et en intégrant selon la verticale Oz supposée elle-même, direction principale d'anisotropie, l'équation de diffusivité à trois dimensions s'énonce comme suit :

$$\frac{\partial}{\partial x} (K_x \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_y \frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (K_z \frac{\partial h}{\partial z}) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} + q \quad \dots(1)$$

En intégrant et en tenant compte de  $\partial h / \partial z = 0$  (hypothèse de Dupuit):

$$\int_{z_1}^{z_2} \frac{\partial}{\partial x} (K_x \frac{\partial h}{\partial x}) dz + \int_{z_1}^{z_2} \frac{\partial}{\partial y} (K_y \frac{\partial h}{\partial y}) dz = \int_{z_1}^{z_2} S_s \frac{\partial h}{\partial t} dz + \int_{z_1}^{z_2} q dz$$

En admettant que  $z_1$  et  $z_2$  varient faiblement en fonction de x et y:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \left( \int_{z_1}^{z_2} K_x dx \right) \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \left( \int_{z_1}^{z_2} K_y dy \right) \frac{\partial h}{\partial y} \right) = \left( \int_{z_1}^{z_2} S_s dz \right) \frac{\partial h}{\partial t} + \int_{z_1}^{z_2} q dz$$

En posant:

$T_x$  et  $T_y$  : transmissivités de l'aquifère suivant les directions Ox et Oy ( $[L^2] [t^{-1}]$ ) :

$$T_x = \int_{z_1}^{z_2} K_x dz, \quad T_y = \int_{z_1}^{z_2} K_y dz ;$$

$S$  : coefficient d'emménagement (sans dimension) :

$$S = \int_{z_1}^{z_2} S_s dz ;$$

$W$  : débit prélevé par unité de surface :

$$W = \int_{z_1}^{z_2} q dz ;$$

On aura :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( T_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( T_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) = S \frac{\partial h}{\partial t} + W \quad \dots(2)$$

La notion de transmissivité mentionnée ci-dessus est relative aux nappes libres. On admet qu'elle peut dépendre de la cote piézométrique  $h$  et de la répartition de la perméabilité de l'aquifère considéré selon la relation :

$$T_x(h) = \int_{z_1}^{z_2} K_x(z) dz$$

La notion d'emménagement dans le cas de la nappe libre est représentée par la valeur de la porosité de drainage du milieu poreux. De ce fait, le stockage et le déstockage d'eau correspondent à des phénomènes d'humidification ou de drainage du milieu selon le sens de déplacement de la surface libre dans le temps (les mécanismes d'humidification-drainage ne sont pas instantanés et dépendent du matériau aquifère).

### I.7- Modèle 2D de l'écoulement souterrain:

Dans les modèles 2D, l'écoulement et le transport se font essentiellement horizontalement. Ainsi, une quantité de données moins conséquentes est requise, comparés aux modèles 3D plus compliqués à réaliser. Dans les modèles 2D, l'assomption de la présence d'un écoulement horizontal strict n'est plus valable aux abords des sources, des rivières et des forages profonds. Néanmoins, et d'après Bear (1979), l'écoulement vertical peut être négligé loin de ces limites à des distances égales à 1,5 à 2 fois l'épaisseur de l'aquifère considéré. L'écoulement est également supposé horizontal, lorsque les deux paramètres perméabilité et épaisseur de l'aquifère sont largement supérieurs à ceux de la couche semi-perméable (où l'écoulement est pratiquement vertical) (De Marsily, 1986).

Il existe un bon nombre de modèles 2D de l'écoulement, dont le plus célèbre étant probablement celui développé par Pinder (Pinder, 1970; Trescott et al, 1976).

La formulation 2D dans un système aquifère conceptualise l'écoulement comme un processus se faisant exclusivement horizontalement (deux directions de coordonnées orthogonales). Le mouvement (vélocité) de l'eau dans une direction donnée est négativement proportionnel au gradient hydraulique. La formulation 2D ne prend pas vraiment en compte l'écoulement vertical et ne permet pas de ce fait une bonne simulation des systèmes caractérisés par une conductivité verticale significative. La solution des problèmes formulés en 2D se fait par discrétisation de l'aquifère en unités (cellules) et par résolution de l'équation de l'écoulement pour chaque point conceptuel (nœud), à des pas de temps successifs. Ainsi pour un système, hétérogène, anisotrope à nappe libre, l'équation suivante est appliquée :

$$\frac{\partial}{\partial x} (T_{xx} \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (T_{yy} \frac{\partial h}{\partial y}) = S \frac{\partial h}{\partial t} + W \quad \dots(3)$$

- où  $X, Y$  : directions orthogonales (unité de longueur « L »);  
 $T_{xx}, T_{yy}$ : transmissivités selon les directions  $X (i)$  et  $Y(j)$  ( $L^2/t$ );  
 $h$ : niveau de la nappe (L);  
 $S$  : coefficient d'emménagement (sans dimension) ;  
 $W$ : taux de recharge ou d'exhaure par unité de surface (L/t) ;  
 $t$  : temps.

Cette équation combine celle de la continuité avec la loi de Darcy. En régime permanent et lorsque les valeurs de la transmissivité  $T$  et du niveau piézométrique  $h$  sont connues, le terme  $(\partial h / \partial t)$  est nul et l'équation (3) s'écrit :

$$\frac{\partial}{\partial x} (T_{xx} \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (T_{yy} \frac{\partial h}{\partial y}) = W \quad \dots(4)$$

Ainsi, l'équation (4) permet de calculer la recharge  $W$ .

La figure 64 représente un prisme élémentaire d'un aquifère compressible, à écoulement horizontal, d'une épaisseur  $E$  et à nappe captive.

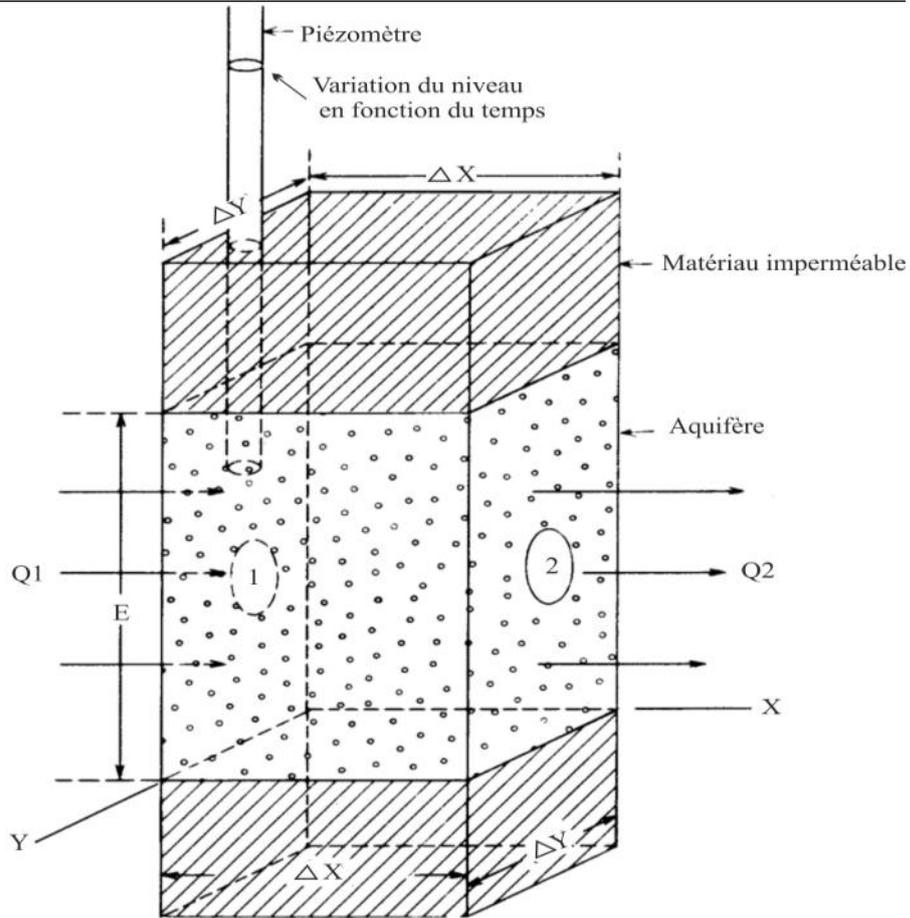


Figure 64. Ecoulement unidirectionnel (non équilibre) à travers un prisme élémentaire d'un aquifère à nappe captive.

En assumant que l'écoulement se fait uniquement selon la direction X, la différence entre les flux entrants et sortants représentera donc le volume d'eau resté emmagasiné dans le prisme à un certain temps « t » selon l'équation suivante :

$$Q_1 - Q_2 = \frac{dV}{dt} \quad \dots(5)$$

Du moment que le coefficient d'emmagasinement représente le volume d'eau libéré par unité de surface et de baisse du niveau piézométrique sur toute l'épaisseur de l'aquifère, l'équation (5) peut s'écrire comme suit:

$$Q_1 - Q_2 = S \Delta x \Delta y \frac{\partial h}{\partial t}$$

En supposant que l'aquifère est isotrope et homogène et en utilisant la lois de Darcy,  $Q_1 - Q_2$  peut être approximé :

$$Q_1 - Q_2 \approx KE \Delta y \Delta x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \quad \dots(6)$$

où  $KE$  représente la perméabilité multipliée par l'épaisseur de l'aquifère (transmissivité  $T$ ). D'après l'équation de continuité, la différence entre l'entrée et la sortie doit correspondre au volume d'eau resté emmagasiné dans le prisme pour avoir:

$$T\Delta y\Delta x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} = S\Delta x\Delta y \frac{\partial h}{\partial t}$$

et donc la relation:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t}$$

Cette relation décrit pour un aquifère homogène, isotrope à nappe captive, un écoulement unidirectionnel des eaux souterraines. Ainsi pour un modèle 2D, elle s'écrit selon la relation :

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t} \quad \dots(7)$$

Les solutions mathématiques conventionnelles pour l'équation (7) sont applicables pour un nombre réduit de problèmes rencontrés sur le terrain (conditions aux limites simples). Par conséquent, des solutions approximatives sont utilisées. L'une des méthodes de simulation des équations différentielles de l'écoulement les plus utilisées est celle de l'équation des différences finies (Appel et al, 1976 ; FINDER, 1974). Pour un modèle 2D, le réseau de cellules est superposé à la carte du domaine considéré et chaque intersection entre deux lignes est considérée comme un nœud, pour lequel, les valeurs de  $T$ ,  $S$  et  $K$  sont introduites dans le modèle (les conditions aux limites doivent également être définies).

### **I.7.1- Les méthodes des différences finies:**

Les équations différentielles partielles décrivant les écoulements et le transport souterrains incluent des termes représentant des dérivées de variables continues. Les méthodes des différences finies sont basées sur les approximations de ces mêmes dérivées (pentes des courbes).

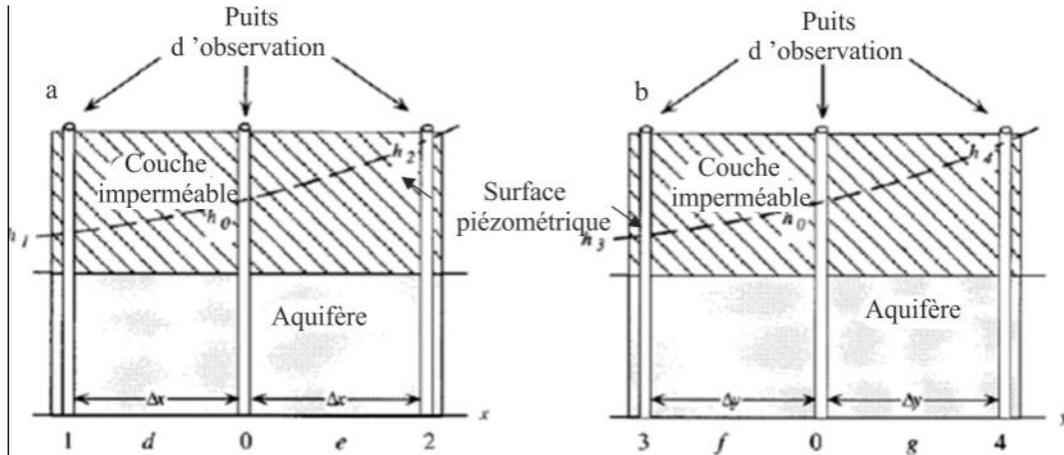


Figure 65. Approximation numérique des dérivées  $\partial h/\partial x$  (a) et  $\partial h/\partial y$  (b) (tous les puits sont à équidistance) (Bennett 1976 ; modifiée).

Bennett (1976) (figure 65) démontra que l'approximation raisonnable de la dérivée de la charge hydraulique  $\partial h/\partial x$ , à un point (d) entre les puits 0 et 1 est :

$$\left( \frac{\partial h}{\partial x} \right)_d \approx \frac{h_0 - h_1}{\Delta x}$$

De même, l'approximation de la deuxième dérivée,  $(\partial^2 h/\partial x^2)$ , au point 0 (puits centrale) est donnée par :

$$\left( \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \right) \approx \frac{\left( \frac{\partial h}{\partial x} \right)_e - \left( \frac{\partial h}{\partial x} \right)_d}{\Delta x} = \frac{\frac{h_2 - h_0}{\Delta x} - \frac{h_0 - h_1}{\Delta x}}{\Delta x} = \frac{h_1 + h_2 - 2h_0}{(\Delta x)^2}$$

Pour les puits 3 et 4 se trouvant le long d'une ligne parallèle à l'axe des « Y », la dérivée  $(\partial^2 h/\partial y^2)$  au même point 0 est estimée comme suit :

$$\left( \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \right) \approx \frac{h_3 + h_4 - 2h_0}{(\Delta y)^2}$$

Pour des intervalles  $\Delta x = \Delta y$ , on aura :

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \approx \frac{h_1 + h_2 + h_3 + h_4 - 4h_0}{a^2}$$

Ces approximations peuvent être également obtenues en utilisant les expansions des séries de Taylor. Les erreurs d'approximation des dérivées sont proportionnelles aux valeurs des intervalles  $\Delta x$  et  $\Delta y$  ; plus ces dernières sont petites, plus l'approximation est bonne. Ces erreurs d'approximation sont appelées erreurs de tronquaison; parce que remplacer des dérivées par des différences de quotient équivaut à utiliser les séries tronquées de Taylor (Peaceman, 1977).

Le temps peut être considéré comme une autre dimension et est ainsi représenté par un index différent (discrétisation du temps). La pente de l'hydrographe (figure 66) à n'importe quel point représente la dérivée de la charge hydraulique par rapport au temps et peut être approximée de la sorte :

$$\partial h / \partial t \approx \Delta h / \Delta t.$$

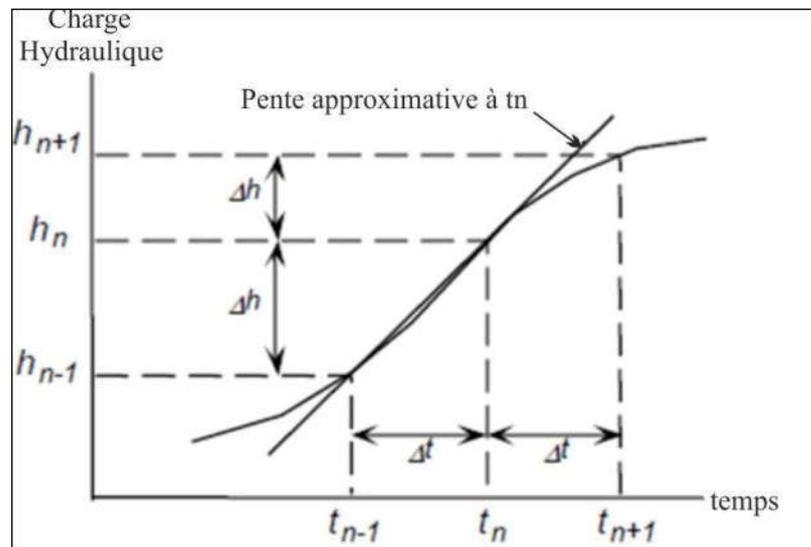


Figure 66. Hydrographe montrant l'approximation de la dérivée  $\partial h / \partial t$  (pente) à un temps «  $t_n$  » par le quotient  $\Delta h / \Delta t$  (Konikow, 1996).

Ainsi, la pente de l'hydrographe à un temps «  $t_n$  » est donnée comme suit:

différence en avant à  $t = n\Delta t$  ( $n$  à  $n+1$ ) :

$$\left( \frac{\partial h}{\partial t} \right)_{n\Delta t} \approx \frac{h_{n+1} - h_n}{\Delta t}$$

différence en arrière à  $t = n\Delta t$  ( $n$  à  $n-1$ ) :

$$\left( \frac{\partial h}{\partial t} \right)_{n\Delta t} \approx \frac{h_n - h_{n-1}}{\Delta t}$$

La résolution de l'équation de l'écoulement pour un nœud  $(i, j)$  se fait en considérant le niveau piézométrique de cinq nœuds à deux instants différents.

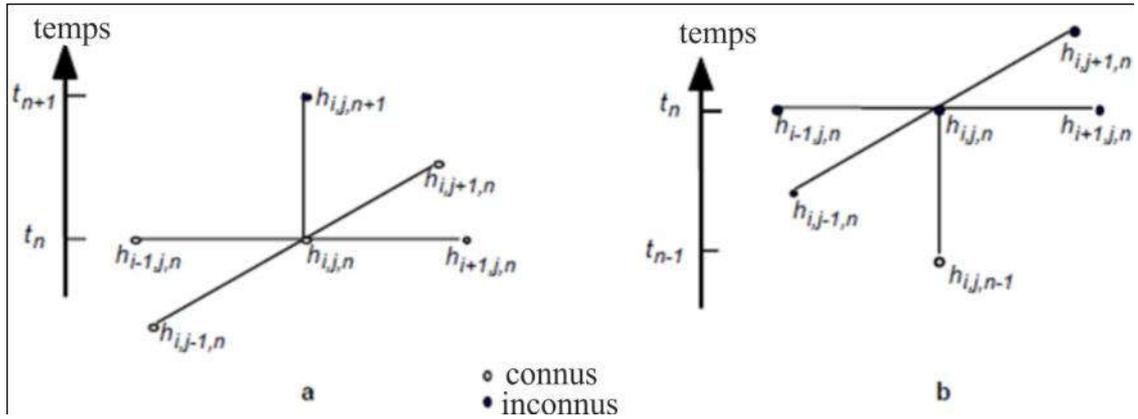


Figure 67. Discrétisation du temps au nœud (i, j) dans une grille deux dimensionnelles à différences finies, A : différence en avant et b : différence en arrière (Konikow, 1990).

Sur la figure 67-(a), sont représentées les dérivées spatiales de h au temps  $t_n$  (toutes les variables sont connues) et la dérivée du temps comme différence en avant des valeurs de h inconnues au temps  $n+1$ . Ainsi, pour chaque nœud de la grille on aura une équation de différence séparée, contenant une seule variable inconnue. Ces équations (explicites) sont assez simples à résoudre, mais peuvent être associées à des problèmes de stabilité, lorsque les intervalles de la variable temps sont importants. Par conséquent, des erreurs numériques mineures peuvent se propager à grande échelle, lors des dernières étapes de calcul.

Sur la figure 67-(b) par contre, sont représentées les dérivées spatiales de h au temps  $t_n$ , où toutes les variables sont inconnues. Ainsi, pour chaque nœud de la grille, on aura une équation contenant cinq inconnus, qui ne peut être résolue directement. Néanmoins, pour un nombre N de nœud dans la grille, on aura un système de N équations contenant un total de N inconnus. Ces systèmes associés à des conditions aux limites bien spécifiées ont l'avantage d'être stables, même s'ils sont plus compliqués à résoudre.

Une équation de différence finie d'un nœud (i, j) pour un écoulement à deux dimension d'un aquifère hétérogène et anisotrope, pour lequel les coordonnées du système sont alignées avec les axes majeurs du tenseur transmissivité, peut être approximée comme suit :

$$T_{xx[i-1/2,j]} \left( \frac{h_{i-1,j,n} - h_{i,j,n}}{(\Delta x)^2} \right) + T_{xx[i+1/2,j]} \left( \frac{h_{i+1,j,n} - h_{i,j,n}}{(\Delta x)^2} \right) + T_{yy[i,j-1/2]} \left( \frac{h_{i,j-1,n} - h_{i,j,n}}{(\Delta y)^2} \right) + T_{yy[i,j+1/2]} \left( \frac{h_{i,j+1,n} - h_{i,j,n}}{(\Delta y)^2} \right) = S \left( \frac{h_{i,j,n} - h_{i,j,n-1}}{\Delta t} \right) + \frac{W_{i,j}}{\Delta x \Delta y} - \frac{K_z}{m} (H_{s[i,j]}) \dots (8)$$

Cette formulation assume que n'importe quel changement de  $W_{i,j}$ , affecte la totalité de la surface de la cellule et non le seul point du nœud (i,j). La transmissivité dans l'équation (8) représente la moyenne harmonique des transmissivités des deux cellules mitoyennes. Cette

moyenne convient à l'assomption que les valeurs de transmissivité sont constantes et uniformes à l'intérieur de chaque cellule, mais peuvent varier de l'une à l'autre. D'autres types de moyennes peuvent être plus appropriés à d'autres assomptions de distribution de la transmissivité (Goode & Appel, 1992).

### **I.7.2- Solutions des équations des différences finies :**

Les approximations des équations de différences finies donnent naissance à des équations algébriques pour chaque nœud, qui peuvent être résolues numériquement, soit par la méthode directe, soit itérative (répétitive). Pour la méthode directe, une séquence d'opérations est faite une seule fois pour résoudre l'équation de la matrice de façon exacte (excepté l'erreur d'arrondissement de l'ordinateur). Les solutions par la méthode directe se font par des:

- solutions à l'aide de déterminants,
- solutions par élimination successive des inconnues,
- solutions par matrice inversée.

La méthode directe a deux inconvénients majeurs. Elle nécessite un ordinateur à grande performance et engendre une accumulation des erreurs arrondies pour certains types de matrice.

La méthode itérative quant à elle donne la solution en se basant sur une succession d'approximation; une supposition initiale est faite au début de la solution et est améliorée par une succession de processus répétitifs jusqu'à satisfaire un critère d'erreur (la convergence et le taux de convergence peuvent causer des soucis pour la méthode répétitive). La méthode itérative permet d'éviter le stockage des grandes matrices, ce qui la rend utile pour la résolution de problème à grand nombre de variables inconnues.

Il est à noter qu'une méthode semi itérative appelée méthode de gradient conjugué est de plus en plus utilisée pour résoudre les équations de différences finies. L'avantage majeur de cette méthode est qu'elle ne requiert pas l'utilisation (spécification) d'un paramètre d'itération.

### **I.7.3- Cellules obtenues par les méthodes des différences finies:**

Les cellules varient selon les caractéristiques générales du pan de terrain considéré. Les nœuds représentant des pompages et des puits d'observation devraient être placés près de leurs emplacements pour faciliter la calibration. Les sorties (discharge) peuvent être additionnées et attribuées à un seul nœud, lorsqu'un nombre important de points de pompage est présent. Le nombre de nœuds dans un modèles 2D varie entre 10000 et 20000 selon les restrictions économiques et physiques relatives au problème considéré.

Les équations différentielles partielles décrivant les écoulements souterrains et le transport de contaminant peuvent être résolues mathématiquement, en utilisant soit des méthodes analytiques, soit numériques.

Les avantages des méthodes analytiques (la courbe de Theis représente un bon exemple de solution analytique) quand il est possible de les appliquer, est qu'elles offrent une solution précise et simple aux équations gouvernantes de l'écoulement et du transport. Un grand nombre de méthodes analytiques ont été développées pour les équations d'écoulement. Néanmoins, la plupart sont limitées aux problèmes hydrauliques des puits (symétrie radiale) (Walton, 1962 ; Lohman, 1972 ; Reed, 1980).

Les solutions analytiques peuvent être également utilisées pour résoudre les équations de transport de soluté (Bear, 1979 ; Javandel et al, 1984 ; Van Genuchten and Alves, 1982 ; Wexler, 1992). En général, obtenir une solution analytique exacte pour une équation différentielle partielle requiert une connaissance presque parfaite des propriétés et des conditions aux limites du système. Par conséquent, lorsque les modèles analytiques sont inadéquats, les équations différentielles partielles sont résolues (par approximation) numériquement en remplaçant les variables continues avec des variables discrétisées (blocks grilles ou nœuds). Ainsi, l'équation différentielle continue définissant la charge hydraulique ou la concentration du soluté n'importe où dans le système, est remplacée par un nombre fini d'équations algébriques (système d'équations algébriques résolu à l'aide de matrices).

Les équations différentielles décrivant les écoulements souterrains et le transport de soluté sont dites de deuxième ordre ; il en existe trois types : paraboliques, elliptiques, et hyperboliques (Peaceman, 1977). Elles sont classifiées et distinguées selon la nature et la magnitude des coefficients de l'équation (les méthodes numériques pour chaque type doivent être développées séparément pour avoir une justesse et une efficacité lors de la résolution de l'algorithme). Deux types de méthodes numériques sont largement utilisées pour résoudre les équations d'écoulement souterrain; celle des différences finies et celle des éléments finis (Remson et al, 1971; Wang et Anderson, 1982). Ces deux méthodes requièrent une subdivision du domaine d'intérêt en cellules ou en éléments.

La méthode des différences finies approxime les premières dérivées comme une différence de quotients (la différence entre les valeurs de variables de nœuds adjacents, à la fois dans le temps et dans l'espace, relativement à l'intervalle existant entre ces mêmes nœuds) (Peaceman, 1977; Remson et al, 1971; Von Rosenberg, 1969).

La méthode des éléments finis utilise des fonctions supposées des variables et des paramètres pour évaluer les formulations intégrales équivalentes des équations différentielles partielles (Huyakorn et Pinder, 1983).

Les deux approches présentent des avantages et des inconvénients. En général, les méthodes de différences finies (se basant sur des grilles rectangulaires) sont conceptuellement et mathématiquement plus simples à programmer. Les méthodes des éléments finis sont plus compliquées mais sont plus précises numériquement, comparées à celles des différences finies.

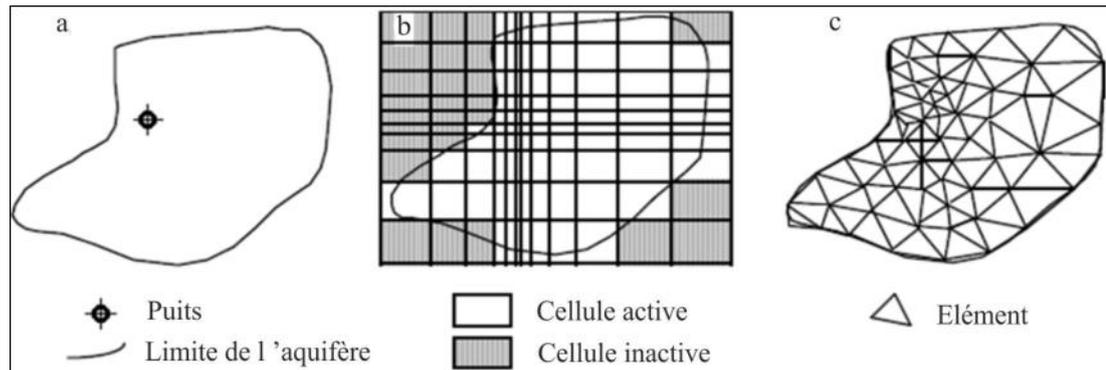


Figure 68. Système aquifère à limites (irrégulières) imperméables (a), discrétisé selon la méthode des différences finies (b) et selon celle des éléments finis (c) (Konikow, 1996).

### I.8- Modèle 3D de l'écoulement souterrain:

La construction des modèles 3D (conditions aux limites et initiales ainsi que les grilles à différences finies) est presque similaire à celle des modèles 2D.

Dans les modèles 3D, le processus d'écoulement souterrain est décrit selon trois directions de coordonnées orthogonales ; comparés aux modèles 2D, une composante verticale est ajoutée dans une simulation 3D. Ainsi pour les modèles 3D, l'équation de continuité nécessite le calcul des entrées et sorties pour les six faces du prisme (figure 64), au lieu de quatre seulement comme c'est le cas pour la simulation en 2D. Le calcul des changements du volume d'eau emmagasiné par contre s'opère de la même manière pour les deux modèles.

Dans les modèles 3D le réseau de grilles est superposé sur la zone étudiée et les valeurs de la perméabilité, de la charge hydraulique et du coefficient d'emmagasinement sont introduites dans le modèle pour chaque nœud du réseau, parallèlement aux données relatives aux conditions aux limites, pompages, recharge, etc. (Trescott, 1976 ; Trescott et al, 1976).

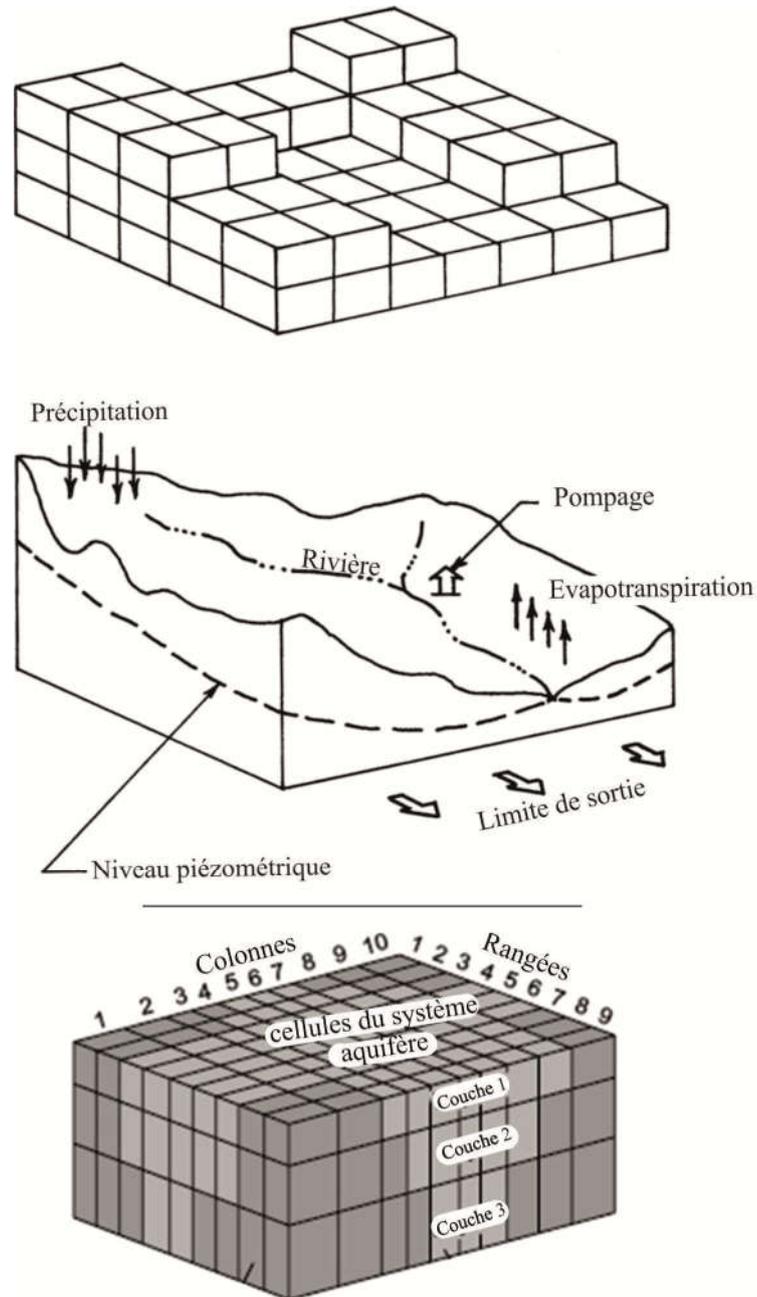


Figure 69. Exemple de discrétisation tridimensionnelle.

**I.9- Les conditions aux limites :**

Les conditions aux limites régissent les règles d'échange des flux (eau, matière transportée par l'eau, ainsi que la chaleur) entre le domaine modélisé et l'environnement extérieur. Généralement, il est préférable pour la représentativité du modèle que les limites du domaine d'étude coïncident avec des limites physiques, pour permettre une conceptualisation des flux, basée sur des observations sur terrain.

La description des conditions aux limites fait partie de la définition de la structure du modèle et en conditionne par conséquent fortement la validité (bilan d'un aquifère).

Il existe deux types de conditions aux limites (pouvant coexister) dans les modèles d'écoulement souterrain. Les conditions de charges (niveaux piézométriques) imposées (figure 70), où le niveau piézométrique le long d'un contour (linéaire ou surfacique) est déterminé par une cause extérieure (lac, réservoir, cours d'eau, sources, etc.).

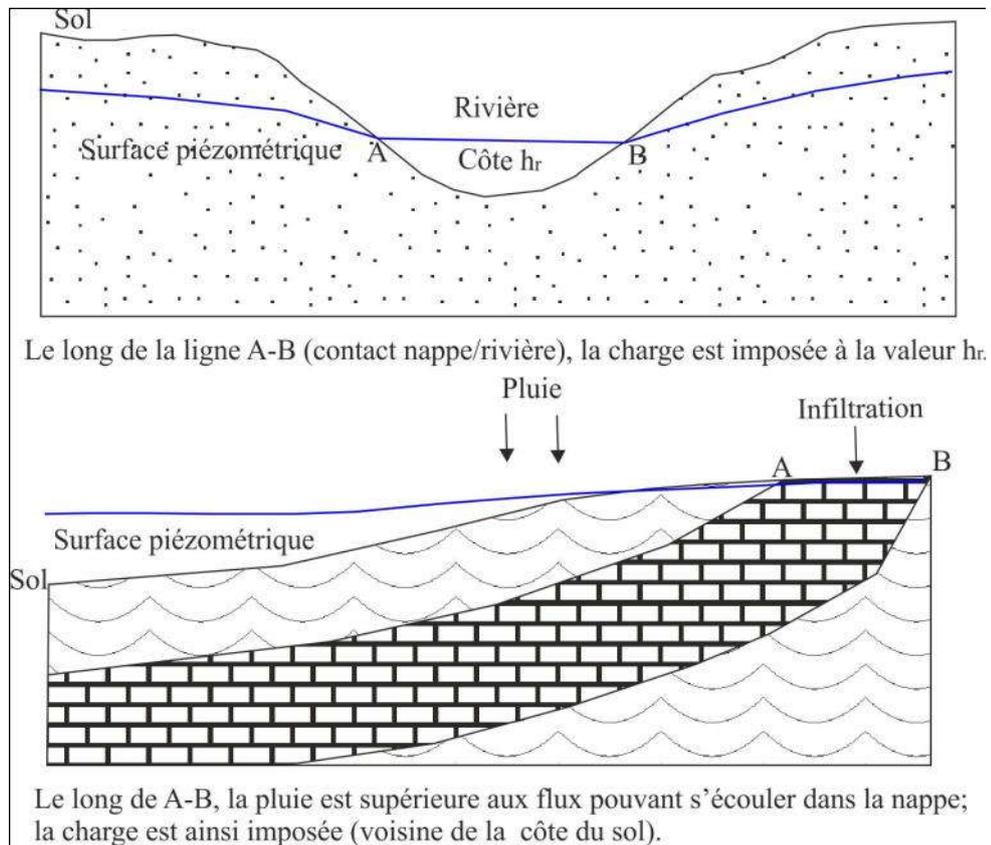
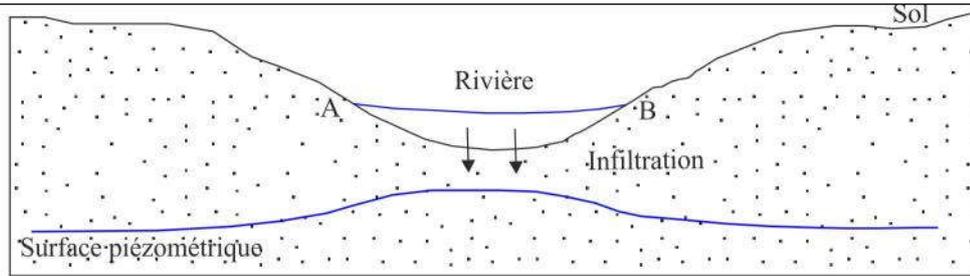
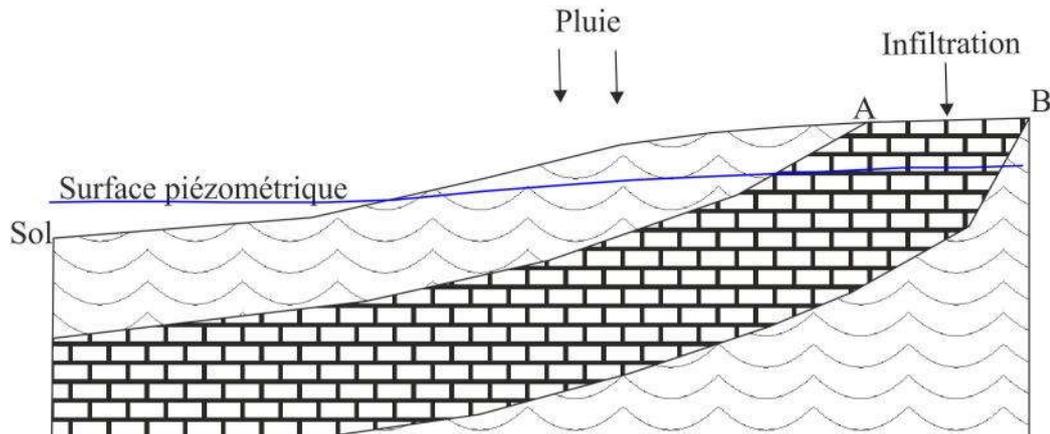


Figure 70. Exemples de conditions aux limites de type "charge imposée".

Les conditions de débits imposés (figure 71), où les échanges avec le milieu extérieur sont régis par la connaissance du flux d'eau traversant une portion donnée de limite. Ce type de condition aux limites est représenté par les zones d'alimentation de piedmont à l'amont d'un aquifère, l'infiltration à partir d'un cours d'eau non directement connecté à la nappe, les lignes de courant de l'écoulement souterrain suffisamment éloignées de la zone d'intérêt pour qu'elles puissent être raisonnablement considérées comme invariantes (constant head), la recharge par les pluies, aquifères adjacents, les prélèvements in/out, etc.



Le long de A-B, le contact nappe rivière est inexistant; la rivière alimente la nappe à travers la zone non saturée.



Le long de A-B, la pluie est inférieure aux flux pouvant s'écouler dans la nappe; le flux entrant dans la nappe équivaut à la recharge par infiltration de la pluie.

Figure 71. Exemples de conditions aux limites de type "débit imposé".

Les conditions mixtes (changement des conditions aux limites de type débit imposé vers celles du type charge imposées et vice versa) (figure 72) peuvent être représentées par deux exemples. Une source est bien représentée par une charge imposée correspondant à sa côte d'émergence, tant qu'elle débite, mais une baisse du niveau piézométrique de la nappe conduira à son tarissement. Ainsi, au lieu de représenter la source par une condition de charge imposée, une condition de débit imposé nul lui est attribuée.

Le deuxième exemple de conditions mixtes (figure 72) est celui du processus d'échange nappe-rivière. Cette relation est considérée comme une condition de charge imposée aussi longtemps que la rivière reste en connexion avec la nappe. En supposant une période de sécheresse (ou de basse eaux dans d'autres contextes), la baisse de la surface piézométrique peut provoquer l'apparition d'une zone non saturée, à travers laquelle, le débit d'alimentation de la nappe en provenance de la rivière prend une valeur constante, dépendant des caractéristiques physiques de l'aquifère et du matériau du lit de la rivière; une condition de débit imposé doit être alors substituée à une charge imposée.

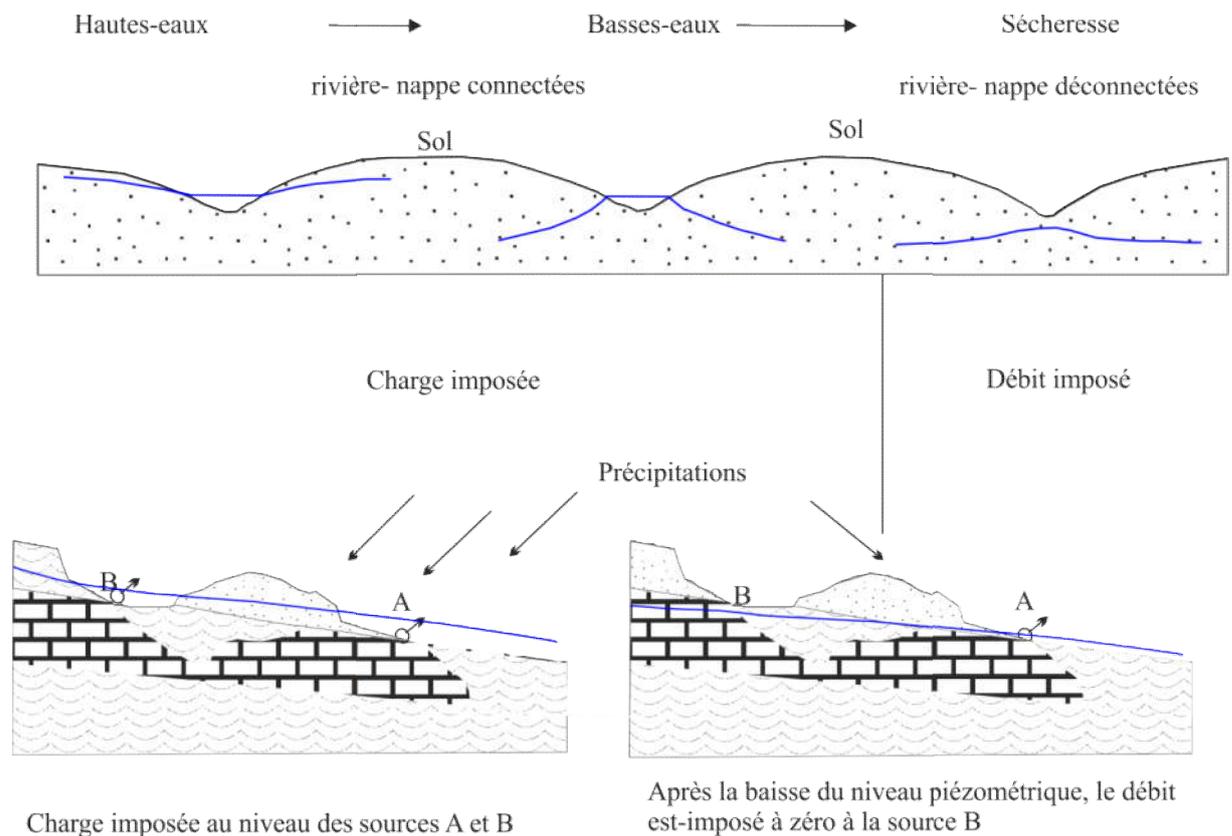


Figure 72. Exemples de conditions aux limites mixtes.

**I.10- Calage du modèle:**

Les modèles de simulation des eaux souterraines requièrent une quantité importante de données pour chaque nœud du réseau de grille et représentent une tentative de résolution d'un grand nombre d'équations simultanées.

Pour évaluer un modèle, on compare généralement les observations de terrain (changement du niveau d'eau pour les écoulements et de concentration pour le transport de contaminant) avec les valeurs obtenues à l'aide du dit modèle. L'objectif de la procédure de calibration est de minimiser les différences entre ces deux approches. Généralement, le modèle est considéré callé lorsqu'il reproduit des données historiques avec un niveau de précision accepté (un mauvais calage engendrera des erreurs dans le modèle ; un bon calage ne prouve pas nécessairement la validité et l'adéquation du modèle pour autant (Konikow and Bredehoeft, 1992).

Le calage du modèle se fait par une série d'ajustement des données d'entrée (propriétés de l'aquifère, conditions aux limites et initiales) pour modifier les résultats finaux du modèle. (Cooley, 1982 ; Knopman and Voss, 1987 ; Neuman, 1980 ; Wagner and Gorelick 1986 ; Yeh, 1986). Les nouvelles approches tendent à traiter le processus de calage du modèle de façon

statistique. Ainsi, les incertitudes de sa construction, son application et son calage reflètent les résultats finaux du modèle ; c'est-à-dire les prédictions et les évaluations futures qui seront faites avec (Cooley et al, 1986). Néanmoins, l'opérateur reste le facteur majeur intervenant dans le processus de calage du modèle. En effet, le modélisateur doit être assez familier avec le domaine à modéliser pour évaluer la bonne ou la mauvaise représentativité des caractéristiques du site étudié par la base de donnée disponible et le modèle numérique proposé.

#### **I.10.1- Analyse de sensibilité:**

Une analyse de sensibilité consiste à varier les données d'entrée pour un ou plusieurs paramètres (charge hydraulique, débit d'écoulement et transport de contaminant) et observer les réponses du modèle. Si la variation d'un paramètre donné occasionne un changement significatif dans le modèle, alors ce dernier est sensible à ce paramètre. L'analyse de sensibilité est également importante pour les démarches futures à entreprendre dans la collecte de données (Anderson et Woessner, 1992 ; Zheng et Bennett, 1995).

De nombreuses méthodes permettant d'évaluer l'incertitude dans les processus de modélisation ont été proposées telles que, la méthode spectrale (Gelhar, 1976 et 1986 ; Gelhar & Axness, 1983 ; Gelhar *et al*, 1974-1979 ; Gutjahr & Gelhar, 1981; Bakr *et al*, 1978 ; Dagan, 1982), la méthode de perturbation (Sagar, 1978 ; Winter *et al*, 1984) et la méthode de Monte-Carlo (Freeze, 1975 ; Neuman, 1984 ; De Marsily, 1986). Une fois l'incertitude du système évaluée, des prédictions peuvent être faites (Graham & McLaughlin, 1989).

#### **I.10.2- Calage en régime permanent:**

Le régime permanent reflète les conditions initiales du système aquifère n'ayant connu aucun changement. Les conditions du régime permanent sont représentées par des « conditions historiques » caractérisant l'aquifère avant que ce dernier n'ait subi des changements significatifs (entrées = sorties et pas de changement de volume d'eau dans l'aquifère). Ainsi, la reproduction (par étapes) des conditions initiales observées sur terrain avec le modèle numérique est appelée calage en régime permanent.

#### **I.10.3- Calage en régime transitoire:**

Le bon calage en régime transitoire dépend étroitement de la bonne estimation des perméabilités et des conditions aux limites obtenues lors du calage en régime permanent.

Généralement, la porosité efficace et le coefficient d'emmagasinement sont les paramètres majeurs ajustés lors du calage en régime transitoire.

**I.11- Prédiction:**

Après calibration, analyse de sensibilité et vérification sur terrain, le modèle peut être utilisé pour prédire des scénarios futurs, tels que l'estimation des réponses hydrauliques d'un site donné, la direction possible de migration d'un contaminant, etc.

La prédiction à l'aide d'un modèle calibré devrait se faire sur une période semblable à celle de l'historique des données et sa précision devrait être la meilleure indication quant à la fiabilité du modèle proposé. Cependant, cette précision n'est atteinte que des années après que la prédiction n'ait été faite (Anderson et Woessner, 1992).

Les erreurs de prédiction sont généralement le résultat de l'utilisation de séries de données trop courtes pour refléter de manière assez représentative le fonctionnement du système étudié. L'une des sources majeures des erreurs de prédiction est l'ignorance des changements futurs pouvant se manifester à court, moyen ou à long terme (facteurs démographiques, politiques, économiques et sociaux) (Bredehoeft and Konikow, 1993).

Pour les modèles à grande importance, des suivis continus sur terrain doivent être envisagés pour permettre un calage périodique et par conséquent, une meilleure connaissance du système aquifère étudié et un faible degré d'erreur de prédiction.

**II- Modélisation du système aquifère plio-quadernaire :**

La modélisation des eaux souterraines de la plaine de Sidi Bel Abbès a concerné uniquement la nappe du plio-quadernaire, étant donné qu'elle représente le seul réservoir souterrain, dont l'importance hydrogéologique est significative (les autres aquifères présents dans la région d'étude sont mal connus).

**II.1- Modèle conceptuel :**

L'étude géologique de la plaine de Sidi Bel Abbès a démontré qu'elle prend l'allure d'une cuvette. Cette dernière est comblée par des dépôts alluvionnaires plio-quadernaires, assez perméables et très hétérogènes.

Les dépôts pliocènes sont surtout continentales et correspondent à de forts amoncellements de matériaux hétérogènes; alluvions représentées par des alternances de dépôts grossiers (conglomérats ou galets) à la base couvertes par des dépôts plus fins, essentiellement sableux ou gréseux en alternance avec des limons rouges. Pour ce qui est du Quadernaire, sa base qui repose sur les plateaux pliocènes est faite de matériaux grossiers (conglomérats des chenaux, et de terrasses; éléments centimétrique à décimétriques à ciment argilo-carbonaté) ensevelis dans des dépôts caillouteux, graveleux et limoneux (parfois gréseux ou sableux); son sommet par contre, correspond à des alluvions fines et boueuses.

A des profondeurs variant entre 40 et 150 m environ (le remplissage peut dépasser 150 m d'épaisseur au Sud de la plaine), les dépôts alluvionnaires plio-quadernaires reposent sur un substratum mésozoïque, comblé essentiellement par des argiles marneuses marines (grises ou bleuâtres très fines) mio-pliocènes, dont l'épaisseur peut dépasser 500 m.

**II.1.1-Limites du modèle conceptuel :****II.1.1.1-Limites latérales :**

L'extension latérale du modèle conceptuel représente une superficie d'environ 800 km<sup>2</sup>. Les limites géologiques latérales de l'aquifère plio-quadernaire sont dans leur majorité peu ou pas perméables, exception faite pour les formations des aquifères adjacents.

En se basant sur les connaissances acquises dans le chapitre 1, les limites latérales de l'aquifère plio-quadernaire peuvent être résumées comme suit (figure 73):

la limite nord est représentée par :

Les formations des Tessala, essentiellement crétacées recouvrant du tertiaire très épais (argiles-marneuses du Crétacé moyen et supérieur reposant sur le Trias salifère et gypseux, recouvrant à leurs tour en contact anormal les terrains miocènes anté-nappes) et

formation Oligo-miocène reposant anormalement soit sur le Crétacé supérieur, soit sur le Miocène.

la limite sud est représentée par les Monts de Tlencem-Saïda, formés par les calcaires de Remailia / dolomies de Tlemcen d'âge allant du Kimmeridgien à l'Hautérvien

la limite ouest se matérialise par les collines de marnes du Miocène moyen, recouvertes par des dépôts caillouteux plio-quadernaires, séparant les bassins versants des Oueds Isser et Mekerra. Ces dépôts semblent faciliter l'émergence par sources et le drainage par les oueds (au niveau de Ali boussidi) des eaux de l'aquifère plio-quadernaire soustraites à la nappe en amont par la ligne de partage des eaux se trouvant au Sud est de la plaine et qui lui sont restituées par la suite soit par percolation directe soit par les affluents de l'Oued Tissaf .

Pour ce qui est de la limite est, elle est représentée par la série des marnes miocènes imperméables de Bou Henifia.

#### **II.1.1.2-Limites verticales :**

Puisque les alluvions plio-quadernaires sont considérées comme un seul aquifère hétérogène en raison de l'absence de couches continues, peu ou non perméables pouvant perturber les directions d'écoulement, les gradients hydrauliques, l'interaction nappe-Oueds, etc., du système aquifère, la limite verticale inférieure de l'aquifère plio-quadernaire a été assimilée à la base des formations plio-quadernaires, représentées par les argiles et marnes grises-bleuâtres du Miocène marin imperméable.

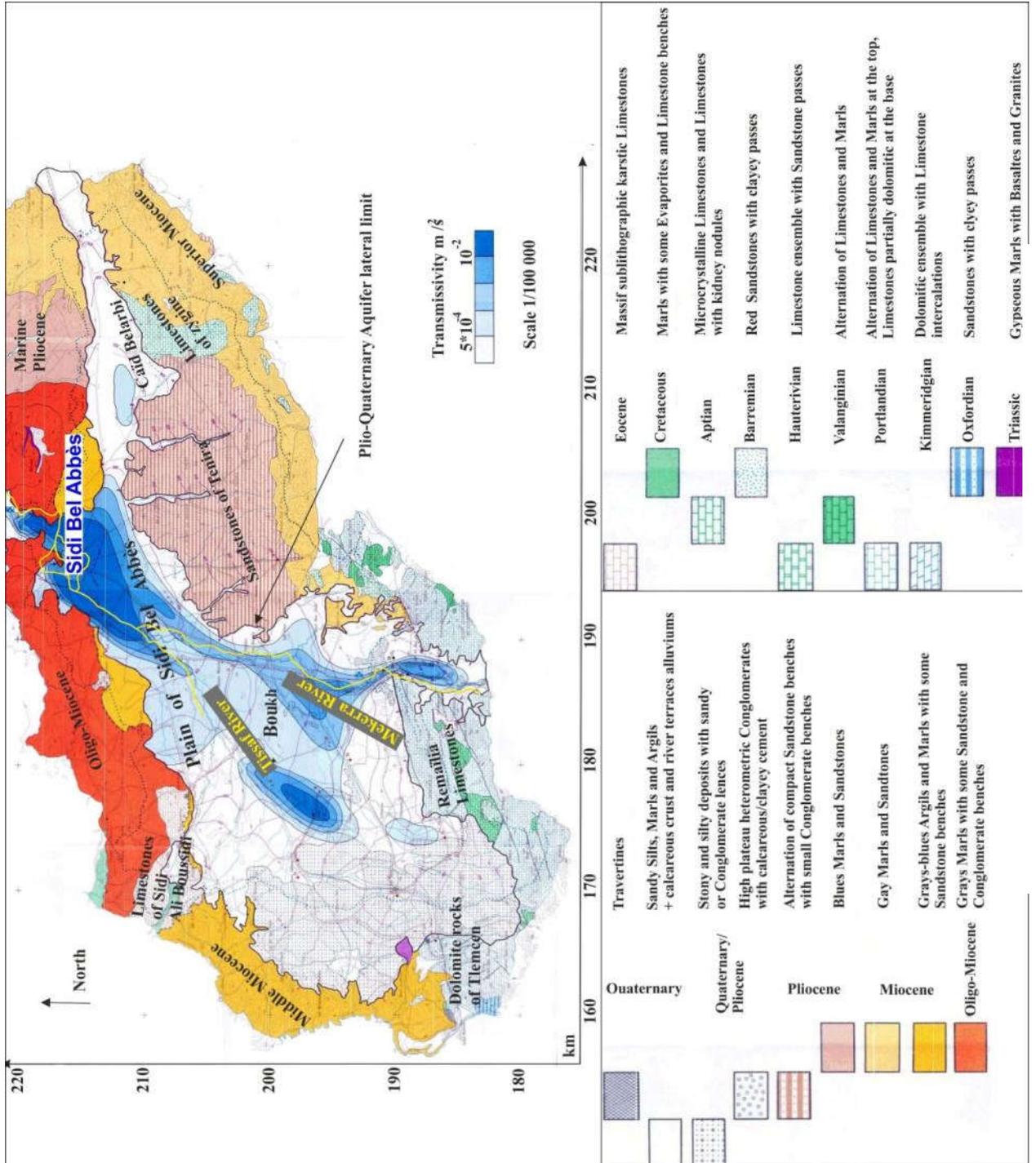
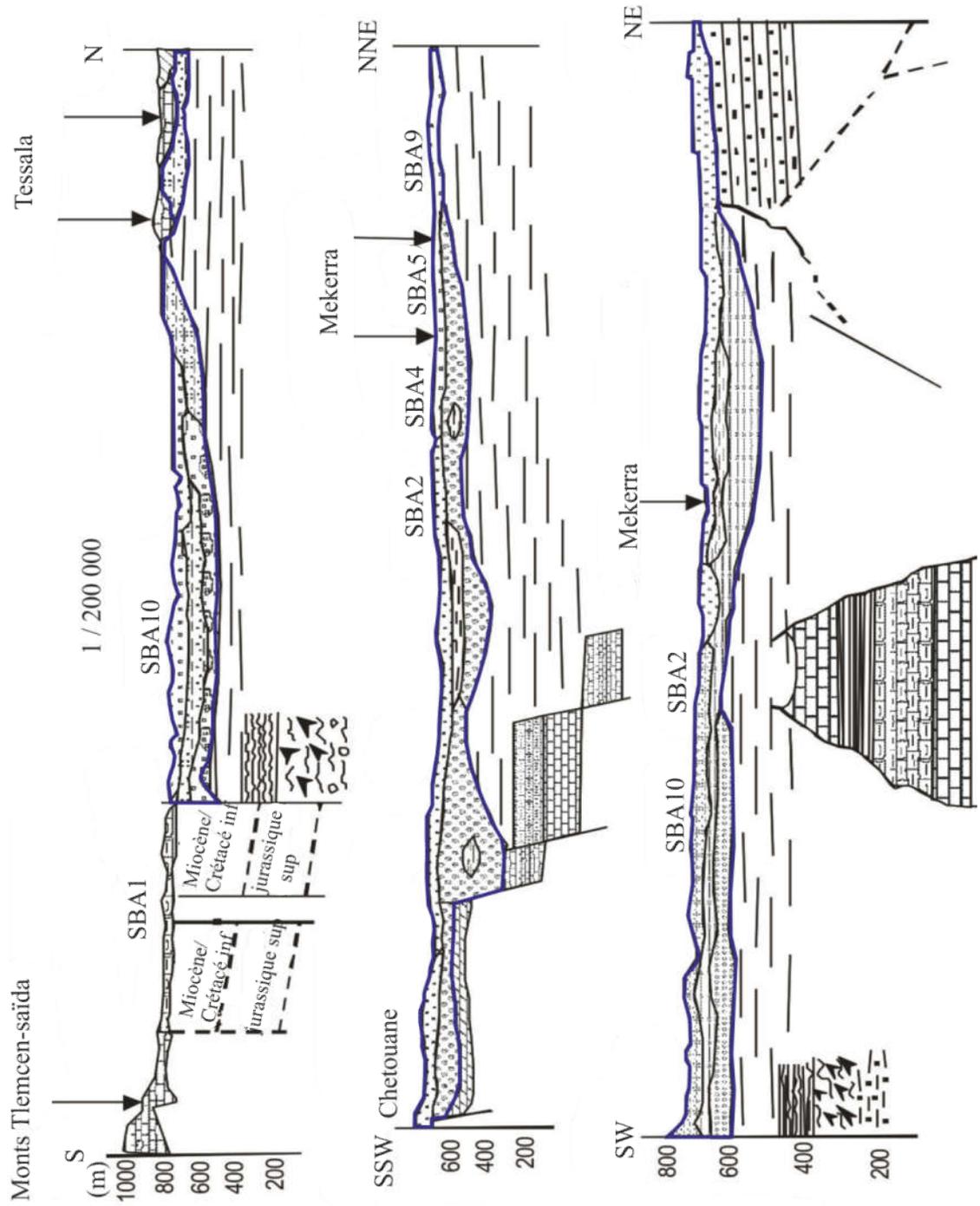


Figure 73. Limites latérales du modèle conceptuel.



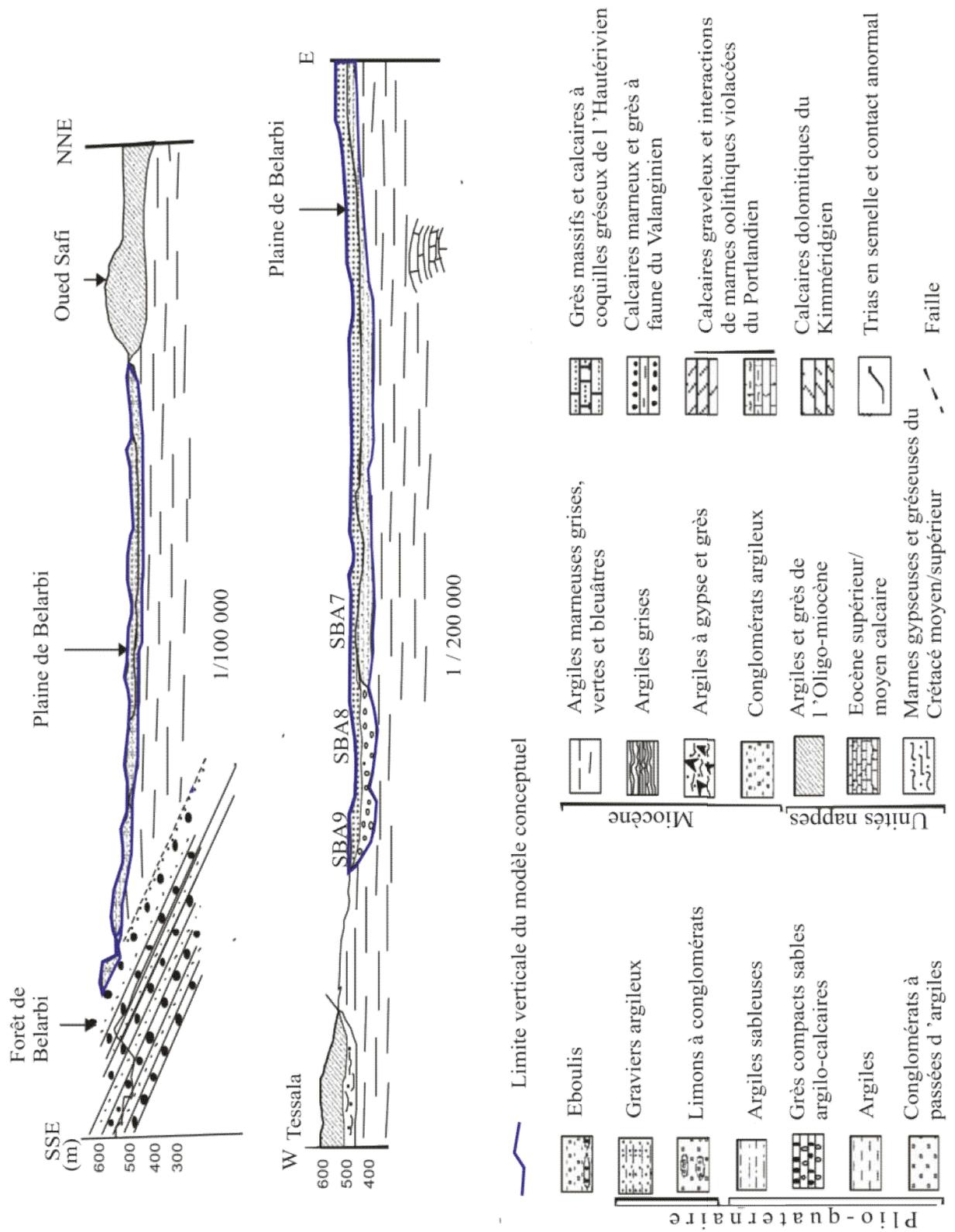


Figure 74. Limites verticales du modèle conceptuel selon les coupes géologiques réalisées par Sourisseau (1973).

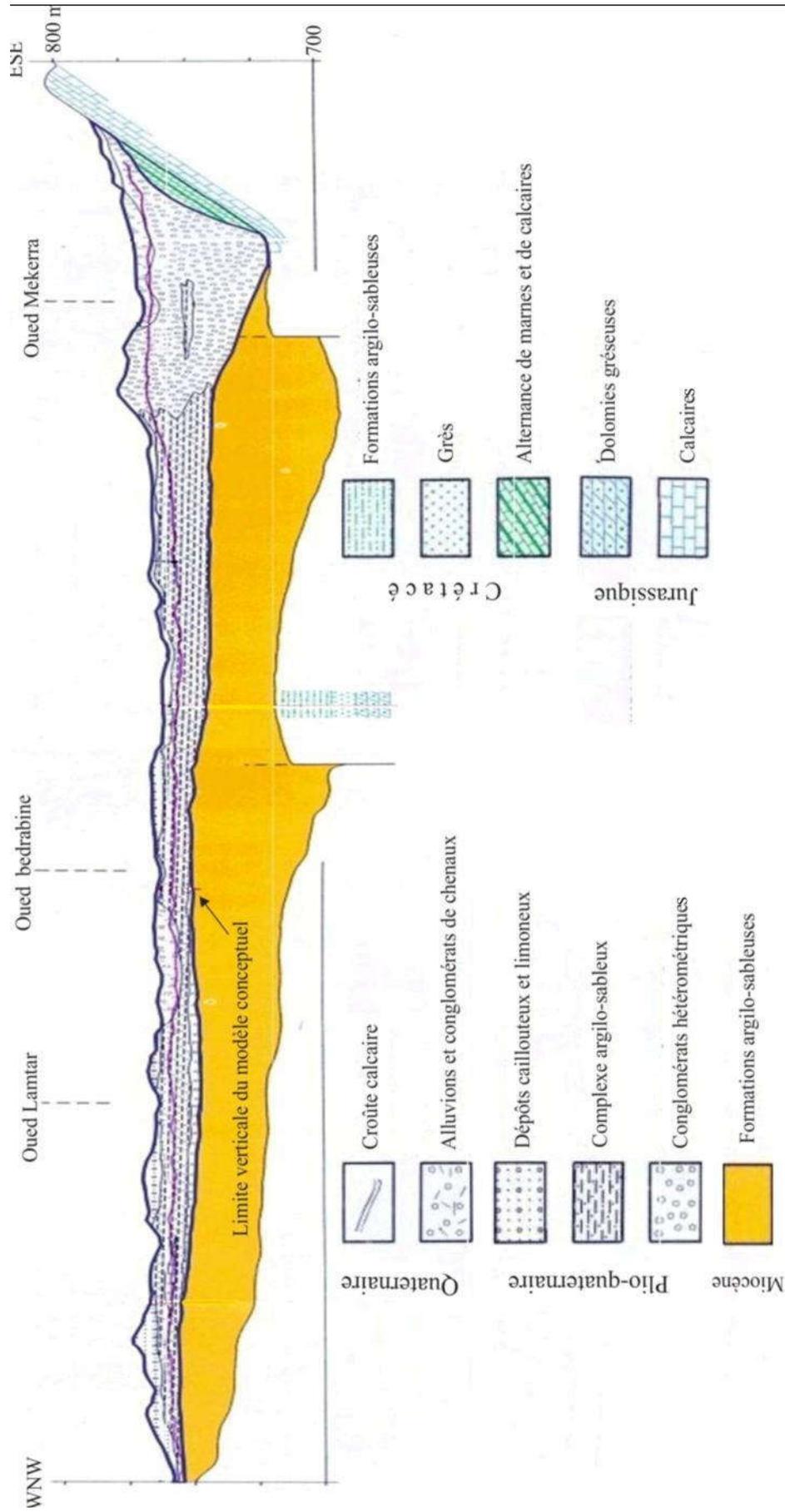


Figure 75. Limite verticale du modèle conceptuel selon la coupe géologique réalisée par l'ANRH (1974).

La limite verticale supérieure à été admise quant à elle comme étant le sommet des alluvions plio-quadernaires.

La grande extension latérale, combinée à la forte hétérogénéité des formations plio-quadernaires, rend la délimitation verticale du domaine à modéliser assez compliquée. Néanmoins, la limite verticale du modèle conceptuel a été tracée en se basant sur les coupes géologiques réalisées par Sourisseau (1973) et l'ANRH (1974) (figures 74 et 75).

Des figures 74 et 75, il apparaît que l'épaisseur de l'aquifère plio-quadernaire n'est pas la même pour tout le domaine modélisé. Par conséquent, la profondeur du substratum miocène imperméable retenue pour le modèle conceptuel a été estimée sur la base des logs et coupes géologiques retrouvés dans la bibliographie.

### **II.1.2- Epaisseur de l'aquifère :**

En se basant sur les coupes et logs géologiques disponibles, ainsi que quelques informations relatives aux comportements, hydrogéologique et hydrodynamique de l'aquifère plio-quadernaire, nous avons pu estimer l'épaisseur des formations aquifères du modèle conceptuel.

Les formations miocènes formées d'argiles marines marneuses et sableuses représentent le substratum de l'aquifère et peuvent dépasser 500 m d'épaisseur. L'épaisseur du remplissage plio-quadernaire représentant l'aquifère modélisé varie considérablement. En effet, elle atteint plus de 150 m au Sud (voir log géologique SB1 en annexe) et ne dépasse pas les 40 m aux limites et au Nord de la plaine de Sidi Bel Abbès. Au centre des alluvions plio-quadernaires, entre Hassi Zahan, Boukhanefis et Sidi Khaled, il apparaît que l'épaisseur des formations aquifères se maintient entre 70 et 80 m environ.

Les changements d'épaisseur observés des alluvions plio-quadernaires sont également accompagnés par une grande hétérogénéité des formations aquifères, ce qui influence directement leurs comportements hydrogéologique et hydrodynamique.

Il est important de rappeler et comme il a été mentionné auparavant, que l'hydrogéologie de la plaine de Bel Abbès reste mal connue. Ainsi, l'estimation des épaisseurs de l'aquifère plio-quadernaire qui s'étend sur plus de 800 km<sup>2</sup> faite sur la base de quelques logs et coupes géologiques, ne peut être considérée comme une représentation « exacte » des réalités pouvant être rencontrées sur le terrain, mais plutôt comme la meilleure estimation possible à faire, en fonction des données disponibles.

### II.1.3- Caractéristiques hydrodynamiques :

Les paramètres hydrodynamiques du modèle conceptuel ont été tirés des travaux réalisés dans le début des années 1970s par Sourisseau.

#### II.1.3.1- Transmissivité :

La répartition spatiale de la transmissivité pour l'aquifère plio-quaternaire n'est pas uniforme. En effet, elle atteint  $10^{-2}$  m<sup>2</sup>/s dans les conglomérats et diminue considérablement aux niveaux des alluvions plio-quaternaires, où elle varie entre  $10^{-5}$  m<sup>2</sup>/s et  $10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s. Les données tirées de la carte de transmissivité établie par Sourisseau en 1973 et par l'ANRH en 1974 seront utilisées comme données initiales dans la réalisation du modèle.

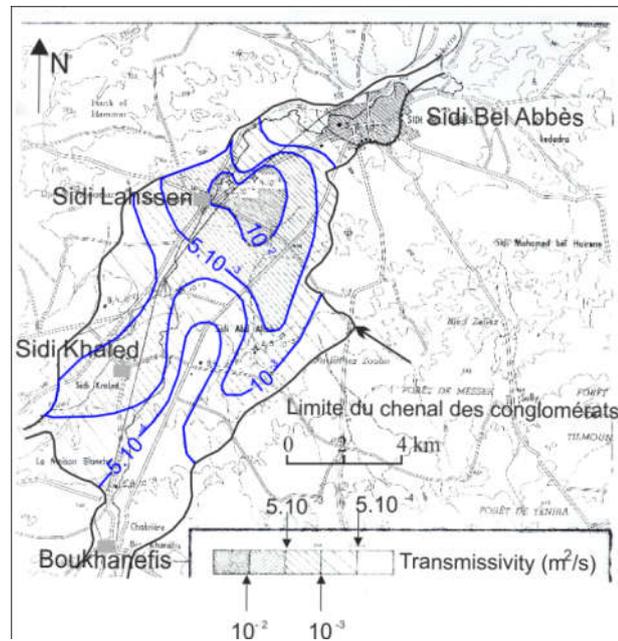


Figure 76. Carte des transmissivités du chenal conglomératique (Sourisseau, 1973).

Entre 1972 et 1973, plusieurs essais de pompages (5 essais sur forages équipés de piézomètres et 53 essais sur puits) avaient été réalisés dans le but d'étudier le comportement hydrodynamique de l'aquifère plio-quaternaire. Cependant, d'après Lerolle (1976), un bon nombre de ces essais réalisés sur des puits de ferme ne représentaient pas la perméabilité réelle des alluvions et conglomérats, laquelle il estima en moyenne à  $5 \cdot 10^{-9}$  m/s avec des valeurs maximales de l'ordre de  $8 \cdot 10^{-8}$  m/s en aval de l'oued Tissaf (entre Sidi Khaled et Sidi Lahssen). Ces tendances générales de la perméabilité semblent néanmoins concorder avec celles de la carte des transmissivités du chenal conglomératique dressé par Sourisseau (1973), où les plus grandes valeurs de transmissivité ( $\geq 10^{-2}$  m<sup>2</sup>/s) sont observées au niveau de la localité de Sidi Lahssen.



La figure 77, montre clairement que les zones les plus transmissives sont celles se trouvant le long de l'Oued Mekerra et surtout aux niveaux de Tabia, Sidi Ali Benyoub et entre Sidi Lahssen et Sidi Bel Abbès, où le chenal conglomératique est le plus épais. Aux environs de Bedrabine (amont de l'Oued Tissaf), il semblerait que les fortes transmissivités observées correspondraient à des dépôts caillouteux et limoneux assez perméables véhiculés par les Oueds Bedrabine et Lamtar.

### II.1.3.2- Coefficient d'emmagasinement :

La variation spatiale des valeurs du Coefficient d'emmagasinement dans les conglomérats est représentée sur la figure ci-dessous.

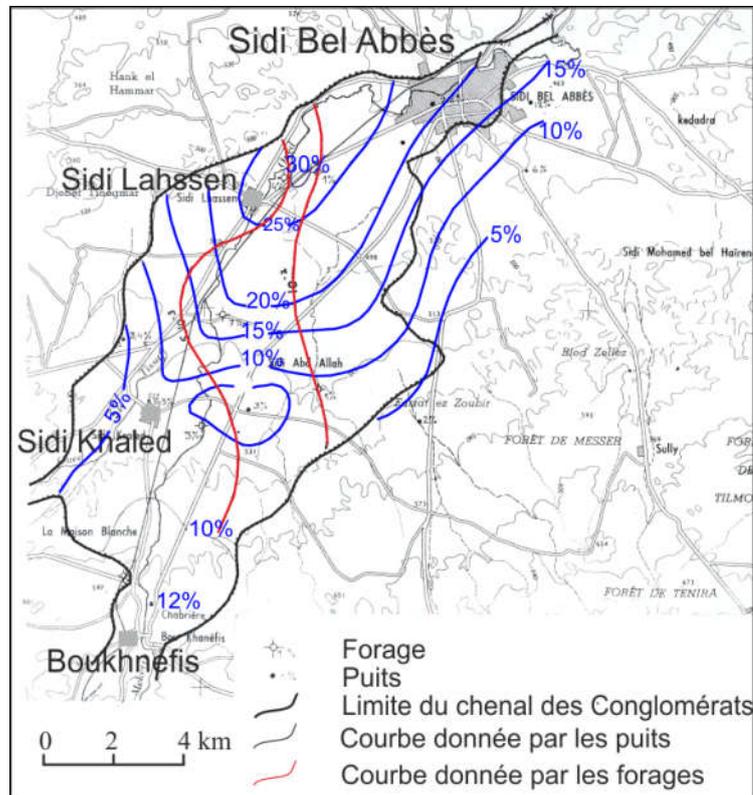


Figure 78. Répartition spatiale du coefficient d'emmagasinement dans les conglomérats (Sourisseau, 1973).

D'après les essais de pompage sur forages réalisés par Sourisseau en 1973, les zones présentant le plus fort potentiel d'emmagasinement ( $S = 25$  à  $30\%$ ) sont celles des vallées de Bedrabine, Tabia et Sidi Ali Benyoub. D'autres zones telles que les vallées de Tatifmane et de l'Oued Anness bénéficient également de bonnes valeurs d'emmagasinement de l'ordre de  $10\%$ .

**II.1.4- Conditions aux limites :**

Les conditions aux limites relatives (figure 79) à l'aquifère plio-quadernaire de la plaine de Sidi Bel Abbès (échange entre l'aquifère modélisé et son environnement) ont été définies comme suit :

**II.1.4.1- Pertes et apports latéraux :**

Les apports latéraux s'infiltrant dans les alluvions plio-quadernaires proviennent des calcaires de Zygone de l'Aptien au Nord-est, des calcaires de Remaïlia /dolomies de Tlemcen du Jurassique et du Crétacé au Sud, des grès du Pliocène continental à l'Est et enfin des calcaires de l'Eocène à l'Ouest. Ces apports sont représentés dans le modèle comme des débits imposés le long des cellules de contact aquifère plio-quadernaire/aquifères adjacents.

Les pertes sont observées au Nord (dérivation vers le barrage Sarno) et au Sud-est, à gauche de la ligne de partage des eaux coïncidant avec la limite du bassin versant de la moyenne Mekerra. Les pertes enregistrées au Sud-est n'ont pas été modélisées comme telles, car la majorité de ces eaux sont soit drainées par les affluents de l'Oued Anefress, soit butent sur le Miocène moyen imperméable et réapparaissent aux niveaux des sources, pour rejoindre par la suite le sens majeur de l'écoulement vers l'exutoire du Rocher.

Vers le Nord, les marnes grises de l'Oligo-miocène et les marnes bleues du Pliocène marin forment une limite étanche qui oblige la plus grande majorité des eaux de l'aquifère plio-quadernaire à converger vers un exutoire principal, au lieu dit le Rocher.

**II.1.4.2- La recharge :**

La recharge peut être exprimée comme un pourcentage des précipitations ou en mm/an. Plusieurs méthodes d'estimation de la recharge sont retrouvées dans la bibliographie et se basent généralement sur :

des régions hydrogéologiques : régions à caractéristiques similaires (climat, géologie, géomorphologie, etc.) (Lerner et al, 1990),

des zones hydrologiques : atmosphère, eaux de surface, zones saturées et non saturées (Bredenkamp et al, 1995 ; Beekman et al, 1999 ; Scanlon et al, 2002),

des approches physiques, telles que la méthode darcyenne, les traceurs isotopiques et gazeux (Lerner et al, 1990 ; Kinzelbach et al, 2002), etc. Néanmoins, l'application d'une multitude de méthodes pour l'estimation de la recharge est conseillée pour avoir les meilleurs résultats possibles (Beekman et al, 1996 ; De Vries and Simmers, 2002 ; Scanlon et al, 2002).

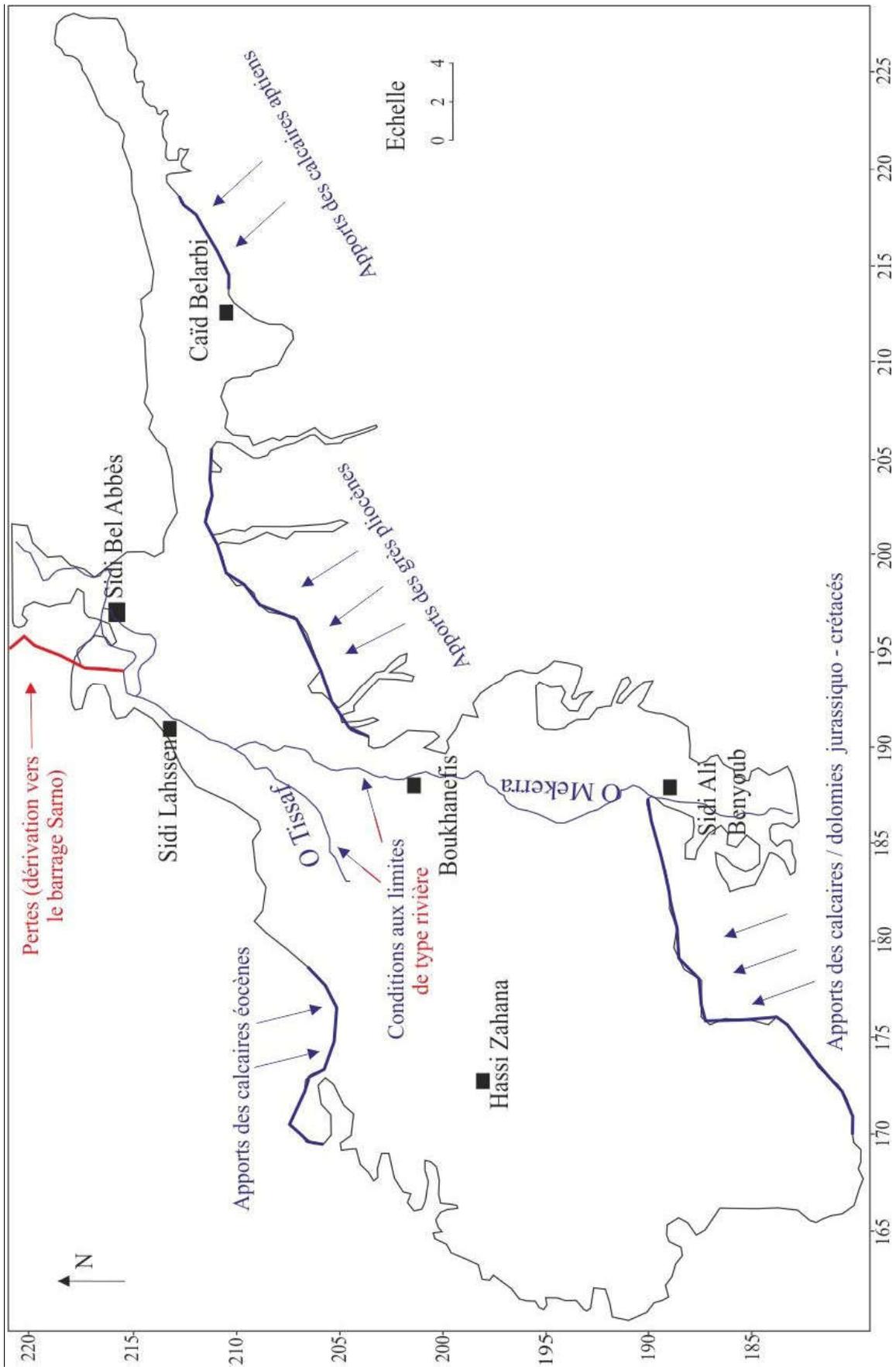


Figure 79. Représentation des conditions aux limites du modèle conceptuel.

Il existe de nombreuses méthodes d'estimation de la recharge dans les régions arides et semi-arides, dont les plus célèbres sont, la méthode de balance de masse en chlorures (bilan chlorure), la méthode cumulative des précipitations, la méthode de fluctuation piézométrique, la méthode EARTH, etc.

Dans notre secteur d'étude, la recharge de l'aquifère plio-quadernaire par les pluies a été estimée en 1973 par Lerolle (1976) sur la base des jaugeages réalisés sur les Oueds à 2.8 l/s/km<sup>2</sup>, soit 88 mm/an pour une lame d'eau précipitée de 550 mm/an. Toutefois, d'après les données ANRH, ce taux de pluviosité est largement supérieur aux valeurs observées dans la plaine de Bel Abbès en 1973, égales en moyenne à 450 mm/an.

D'après les bilans réalisés par Sourisseau entre le 01/04/1970 et le 31/03/72 sur la plaine de Bel Abbès, la recharge moyenne par les précipitations des aquifères présents dans la région d'étude est égale à environ 63 mm/an pour une pluviosité moyenne de 448 mm/an.

Sur la base des résultats du bilan hydrogéologique, la recharge par les pluies de l'aquifère plio-quadernaire choisie initialement pour le modèle était de 18%, puis elle fut ramenée à 15% après la phase de calage du modèle. La recharge représente dans le modèle conceptuel un débit imposé (mm/an) sur toute la surface de l'aquifère plio-quadernaire.

#### **II.1.4.3- Interaction nappe/Oueds :**

Il existe deux Oueds majeurs dans le secteur d'étude, la Mekerra et l'Oued Tissaf. Le premier cité est le plus important et traverse l'ensemble de la plaine de Sidi Bel Abbès du Sud vers le Nord jusqu'à l'exutoire du Rocher, où l'Oued draine les eaux de l'aquifère plio-quadernaire.

Concernant l'Oued Tissaf, il est formé par les Oued Anefress et Lemtar recevant à leur tour, les eaux d'autres Oueds, tels que l'Oued Bedrabine.

En raison de l'absence de données récentes relatives aux Oueds, les données qui ont été utilisées dans le modèle sont celles relatives aux campagnes de jaugeage réalisées dans les années 1970s. Cette démarche qui s'est basée sur des débits et des niveaux d'eau dans les Oueds relatifs à 1970, a été adoptée dans le but d'étudier la relation aquifère plio-quadernaire / Oueds de 1971 à 2014 (conditions supposées inchangées). Cette approche nous permettra d'avoir une idée assez claire sur les volumes d'eau échangés, que ça soit par drainage ou infiltration entre l'aquifère plio-quadernaire et les Oueds, même si les résultats obtenus ne seront pas totalement représentatifs des conditions régnantes, tout au long de la période de simulation (débits et hauteurs d'eau des Oueds variables dans le temps).

**II.1.4.4- Prélèvements**

**II.1.4.4.1- Prélèvements pour l'eau potable :**

Les données utilisées dans le modèle peuvent être classées en deux catégories, anciennes, tirées de l'étude réalisée par Sourisseau en 1971 ainsi que l'inventaire BIRH et récentes, fournies par les services de l'ADE, la DHW, et la Wilaya de Bel Abbès sur la période allant de 1999 à 2014.

**II.1.4.4.1.1- Les données anciennes :**

Les données tirées de l'étude d'alimentation en eau potable réalisée par Sourisseau (janvier 1971) sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau 36. Volumes AEP mobilisés pour la ville de Bel Abbès en 1971 d'après Sourisseau.

Localités alimentées	Points de prélèvement	Débits (l/s)	Aquifères captés	
Chef lieu	Aïn Mekarreg	80	Calcaires de Remaïlia (A et B)	
Sidi Khaled	Aïn Skhrouna	4.3		
Boukhanefis		12.5		
Sidi Lhassen		5.25		
Sidi Ali Benyoub		6.67		
Tifiles		1		
Tabia		4.16		
Sidi Yacoub	Aïn El Hadjar	2.9		Calcaires éocènes
Lamtar	5.56			
Sidi Ali Boussidi	3			
	Aïn Annefres	2.6		
Sidi Daho	Aïn El Guemal	1	Calcaires éocènes*	
Ben Badis	Aïn Tاتفامانه	1.5 à 3	Calcaires de Remaïlia (A et B)* et dolomies de Tlemcen	
Hassi Zahana	Aïn Tellout	2		
Caïd Belarbi	Puits	4.17	calcaires de Remaïlia (C et D)	
Hassi Daho		0.3	Alluvions plio-quaternaires	
Télioum		2		
Chef lieu		70		
Bédrabine		2.3	Alluvions plio-quaternaires*	
Chetouane		1		
Hassi Zahana		1.5		
Ben Badis		Forages		2
Télioum		2.7	Alluvions plio-quaternaires	

\* Aquifères non mentionnés dans l'étude de Sourisseau et que nous avons supposé (sur la base des logs géologiques disponibles et de la carte hydrogéologique de la plaine de Sidi Bel Abbès).

En se basant sur les données du tableau 36, le total des débits extraits des différents aquifères peut être calculé comme suit :

Tableau 37. Volumes AEP extraits des différents aquifères dans le secteur d'étude.

Aquifères	Volumes extraits (Mm <sup>3</sup> /an)
Alluvions plio-quaternaires	2.58
Calcaires éocènes	0.47
Calcaires de Remaïlia / dolomies de Tlemcen jurassiquo-crétacés	3.72

Le tableau 37 montre que les prélèvements AEP extraits des alluvions plio-quaternaires d'après Sourisseau, avoisinaient 2.6 Mm<sup>3</sup>/an en Janvier 1971.

**II.1.4.4.1.2- Les données récentes :**

Les données récentes relatives à l'alimentation en eau potable de la wilaya de Sidi Bel Abbès sont présentées dans les tableaux 38, 39 et 40.

Tableau 38. Evolution des besoins AEP de 1999 à 2014 (Wilaya de Sidi Bel Abbès).

Descriptions	1999	2014
Longueur du réseau A.E.P(km) / % de raccordement	1 205 / 80	2 021 / 98
Dotation journalière (l/j/hab)	60	120
Nombre de forages	49	112
Nombre /capacité de stockage des retenues Collinaires (Mm <sup>3</sup> /an)	2 / 0.8	16 / 2.66
Nombre / capacité de stockage des réservoirs et châteaux d'eau (m <sup>3</sup> /j)	95/ 48 600	200 / 117 460

Tableau 39. Volumes journaliers AEP intra-Wilaya mobilisés en 2014  
(Wilaya de Sidi Bel Abbès).

Provenance et nombre	Volumes mobilisés (m <sup>3</sup> /j)
Forage + puits /134	28600
Sources / 25	15000
Barrage Sarno	400
Total	44000

D'après les tableaux 38, 39 et 40, la demande en eau potable a plus que doublé entre 1999 et 2014, en témoigne la capacité de stockage journalière qui est passée de 48600 à 117 460 m<sup>3</sup>/j en 15 an. La lecture des tableaux montre également un déficit de 66 000 m<sup>3</sup>/j (besoins AEP globaux estimés à 110 000 m<sup>3</sup>/j) comblé par des apports hors Wilaya de l'ordre de 76 000 m<sup>3</sup>/j,

ramenant les volumes totaux AEP mobilisés pour la Wilaya de Bel Abbès à 120 000 m<sup>3</sup>/j, soit environ 44 Mm<sup>3</sup>/an.

Tableau 40. Volumes journaliers AEP extra -Wilaya mobilisés en 2014  
(Wilaya de Sidi Bel Abbès).

Provenance		Volume mobilisé (m <sup>3</sup> /j)
Barrages	Sidi Abdelli	45 000
	Bouhanifia	2600
	Cheurfa	400
Station de dessalement de l'eau de mer de Tlemcen		28000
Total		76000

En se basant sur les données ADE, ABH et DHW (ressources mobilisées propres à la/hors Wilaya, capacités de stockage, volumes prélevés, dotation journalière par habitant, etc.) ainsi que ceux de l'ONS (Office nationale des statistiques) (croissance démographique de la population de Sid Bel Abbès), nous avons estimé l'évolution des besoins AEP de la wilaya de Sidi Bel Abbès comme suit :

Tableau 41. Evolution des besoins AEP de 1999 à 2014.

Années	Volumes mobilisé (Mm <sup>3</sup> /an)*
1999	16.6
2004	17.9
2005	18.3
2006	19.2
2008	23.6
2011	29.9
2014	40.2

Comparés aux volumes AEP estimés par Sourisseau en 1971, il apparaît que la demande en eau potable augmente considérablement depuis le début des années 2000. Cette augmentation est due entre autre, au boom démographique qu'a connu la Wilaya de Bel Abbès ces dernières années. En effet une croissance de 165 430 habitants a été enregistrée dans la Wilaya entre 1998 et 2014 contre seulement 106985 habitants de 1966 à 1998. Ce constat est d'ailleurs confirmé par l'augmentation substantielle des apports hors Wilaya, notamment ceux provenant du barrage de Sidi Abdelli, qui sont passés de 6.1 à 16.5 Mm<sup>3</sup>/an entre 2004 et 2014 (ADE de Bel Abbès).

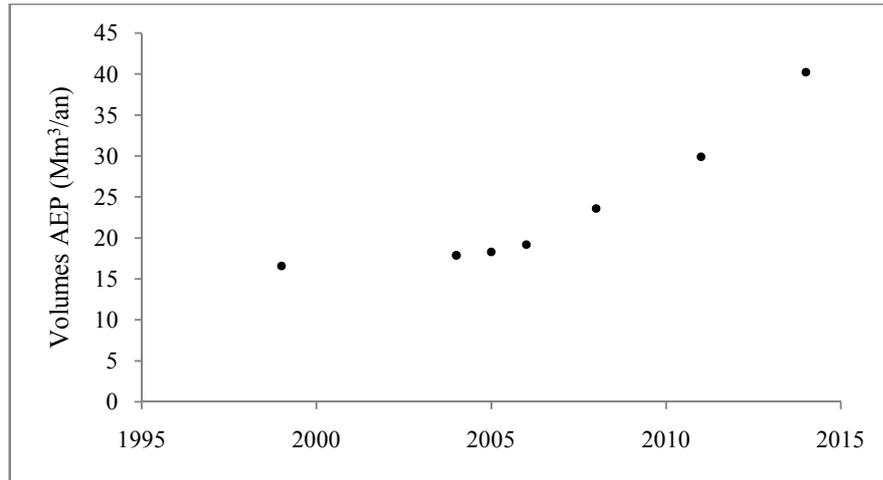


Figure 80. Evolution des besoins AEP de la Wilaya de Sidi Bel Abbès de 1999 à 2014.

Les points de pompage AEP implantés dans les alluvions de l'aquifère plio-quaternaire sont représentés sur la figure 81.

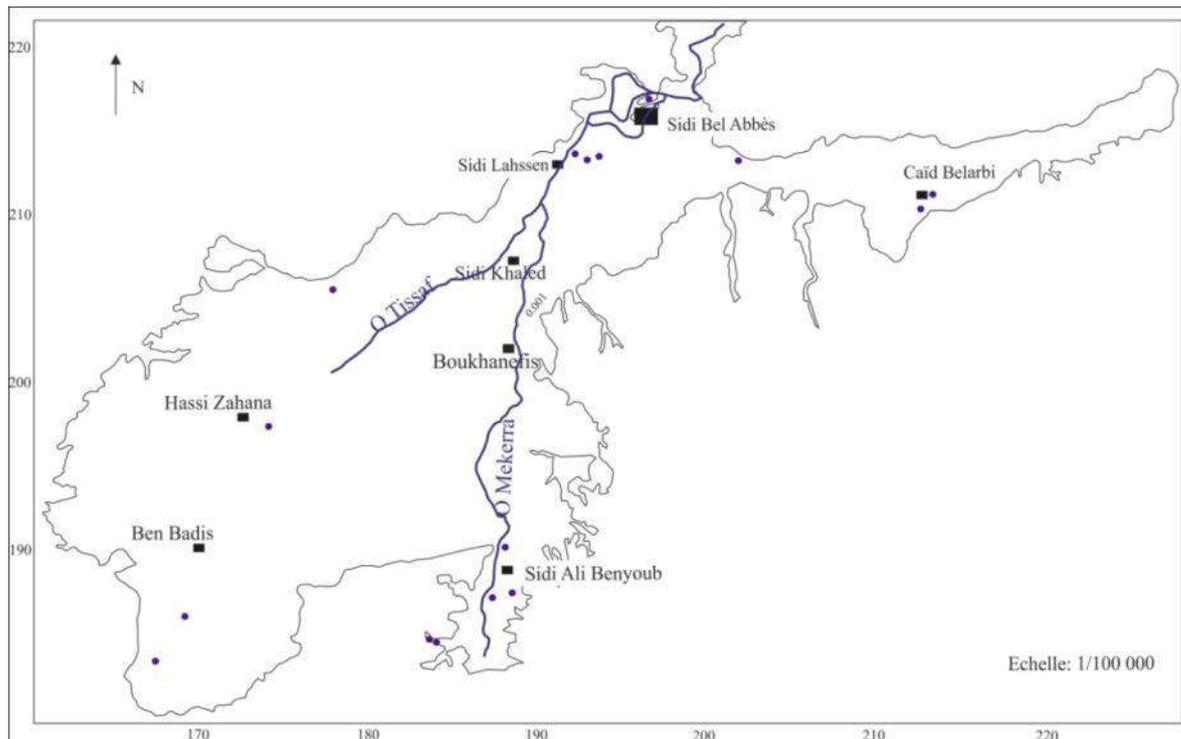


Figure 81. Localisation des prélèvements AEP sur les alluvions plio-quaternaires.

En raison du manque de données sur toute la période de simulation, l'évolution des prélèvements AEP extrais des alluvions plio-quaternaires a été supposée linéaire selon les années repaires suivantes :

Tableau 42. Volumes AEP retenus pour le modèle.

Années	Volumes prélevés en Mm <sup>3</sup> /an
1971	6.87
1999	9.45
2004	9.92
2006	10.12
2014	10.8

#### II.1.4.4.2- Prélèvements destinés à l'industrie :

L'activité industrielle au niveau de la Wilaya de Bel Abbès est assez éparse. Elle se localise au chef lieu de la Wilaya ainsi que dans les localités de Aïn El Berd, Sfifef, Mostefa Benbrahim, Ben Badis, Telagh, Tenira, Hassi Zahana, Sidi Ali Boussidi et Sidi Ali Benyoub.



Figure 82. Localisation des zones industrielles et d'activités au niveau de la Wilaya de Sidi Bel Abbès.

Les sociétés majeures, ainsi que leurs domaines d'activités sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 43. Industries majeures au niveau de la Wilaya de Bel Abbès.

Société	Activité
ENIE	Fabrication de produits électroniques
ENPMA	Production du matériel agricole
Giplait (OROlait)	Production de lait
NAFTAL	Distribution des dérivés pétroliers
Thermoplastique	Fabrication d'accessoires PVC et PE
ENGI	Production de gaz industriels
ENA	Production de sucre

Tableau 44. Superficies des zones industrielles et d'activités.

Zone	Superficie allouée (ha)	Superficie occupée (ha)
Chef lieu	382	248
Ben Badis	89	79
Telagh	28	8
Sfisef	11	5
Aïn El Berd	4	2
Mostefa Benbrahim	1.5	1.5

Les volumes d'eau mobilisés pour le secteur industriel étaient estimés en 2013 à 1.3 Mm<sup>3</sup>/an pour des besoins annuels égaux à 2.5 Mm<sup>3</sup>/an, soit un déficit de l'ordre de 1.2 Mm<sup>3</sup>/an (DHW de Bel Abbès).

D'après quelques données fournies par les services de l'ADE de Bel Abbès, les prélèvements industriels de la Wilaya ne dépassaient pas 300 000 m<sup>3</sup>/an en 2010.

La figure 83 nous permet d'avoir une idée sur l'évolution des volumes d'eau mobilisés pour l'industrie de 1999 à 2013.

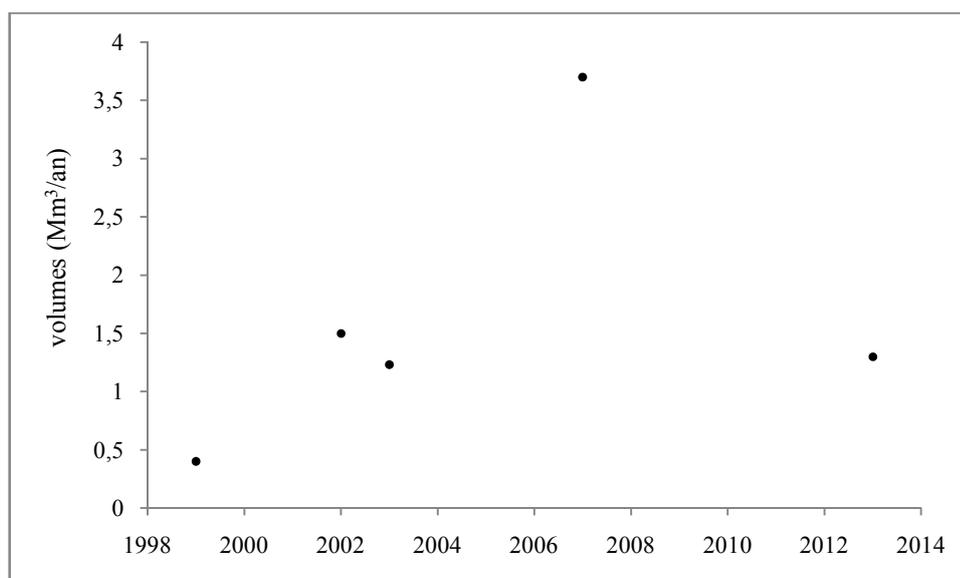


Figure 83. Evolution des besoins en eau industriels au niveau de la Wilaya de Bel Abbès (Kalaliz, 2013).

A l'exception de 2007, il apparaît que les volumes mobilisés pour l'industrie durant la période 2002 - 2013 ne dépassent pas la barre des 1.5 Mm<sup>3</sup>/an. Etant donné le manque de données relatif aux prélèvements industriels (localisation, volumes prélevés pour chaque activité, etc.), nous avons décidé de subdiviser ces volumes en fonction de la superficie occupée et du type d'activité de chaque zone industrielle. En supposant une évolution linéaire entre 1971 à 2014, les prélèvements industriels (années repaires), extrais des alluvions plio-quaternaires calculés pour le modèle sont présentés dans le tableau 45.

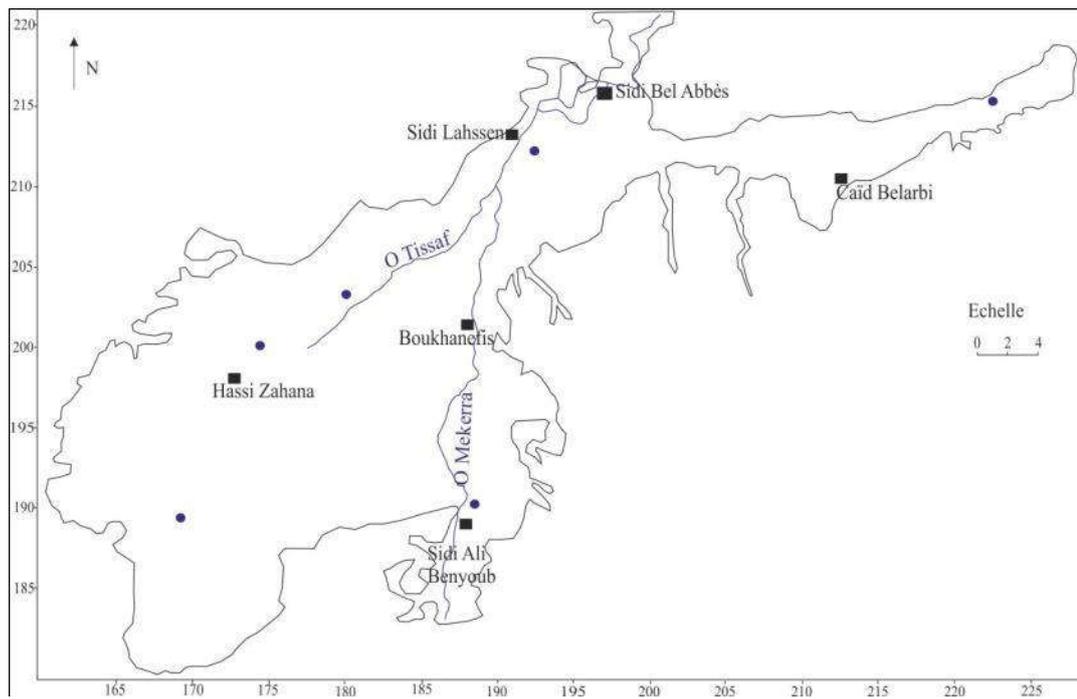


Figure 84. Localisation des prélèvements industriel implantés sur les alluvions plio-quaternaires.

Tableau 45. Prélèvements industriels retenus pour le modèle.

Année	Volume mobilisé m <sup>3</sup> /an
1971	217 000
1999	320 000
2002	580 000
2007	1 200 000
2014	2 020 000

**II.1.4.4.3- Prélèvements destinés à l'irrigation :**

L'estimation des prélèvements agricoles dans notre secteur d'étude est assez compliquée en raison du manque de données précises relatives à l'évolution temporelle et spatiale des

besoins en eau agricoles. Par conséquent, le calcul des volumes d'eau extraits des formations plio-quaternaires s'est fait en se basant sur :

l'inventaire BIRH de 1972,

les études de Sourisseau (1973) et de Lerolle (1976),

les données de la Direction des Services Agricoles de Bel Abbès (DSA 1999 - 2014),

les données de la SOGREAH (1969, 1970 et 2006) et,

les données générales de la FAO.

#### II.1.4.4.3.1- Aperçu général :

La proportion des terres irriguées (figure 85) dans les régions caractérisées par un climat aride ou semi-aride est élevée. En Algérie, cette proportion était en 1998 égale à 7.5% environ. Dans la région de l'Afrique du Nord, où les possibilités de développement de l'agriculture non irriguée sont restreintes, l'expansion des terres irriguées s'est faite au fil des années, essentiellement par la conversion de terres, déjà exploitées par l'agriculture pluviale.

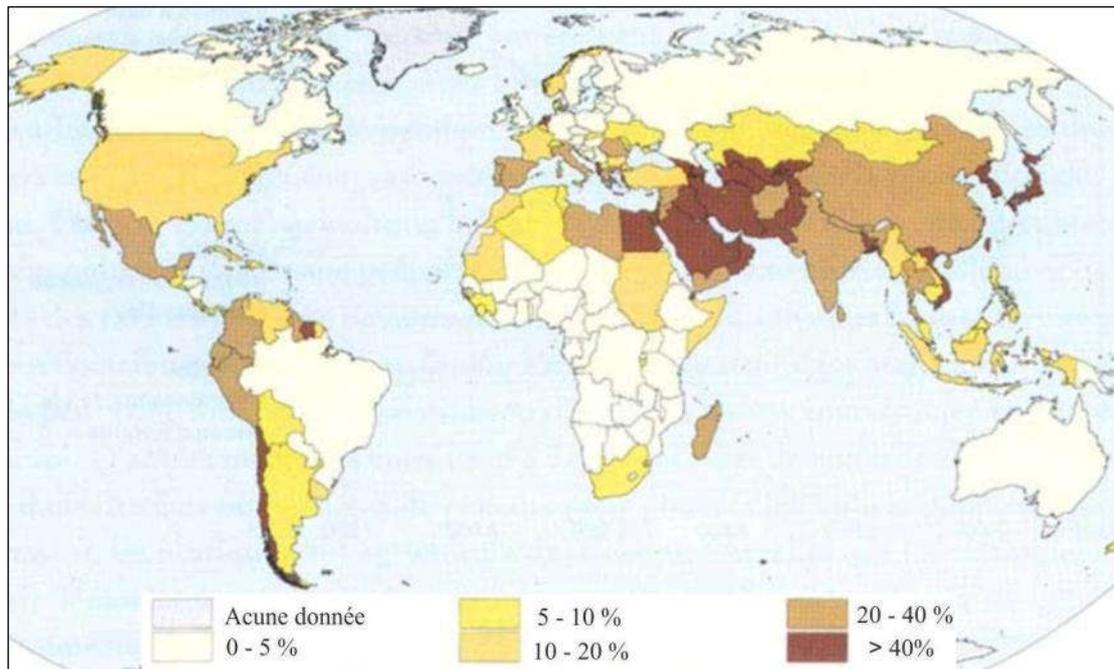


Figure 85. Pourcentage des zones aménagées pour l'irrigation par rapport aux terres arables en 1998 (FAO, 2002).

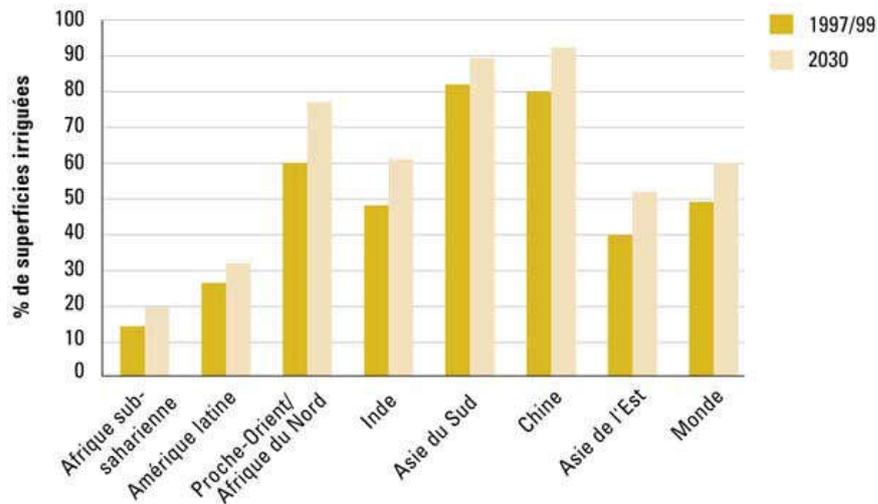


Figure 86. Pourcentage de superficies irriguées par rapport au potentiel d’irrigation dans les pays en développement (FAO, 2002).

Le graphique ci-dessus (figure 86) montre qu’une part importante du potentiel d’irrigation est déjà utilisée dans la région du Proche-Orient/Afrique du Nord, où l’eau est un facteur restrictif. Selon les prévisions de la FAO, la part de l’irrigation dans la production agricole mondiale devrait augmenter au cours des prochaines décennies, surtout dans les pays en développement. Ainsi, il est prévu que les superficies aménagées pour l’irrigation auront augmenté de 20 % (40 millions d’hectares) d’ici 2030. .

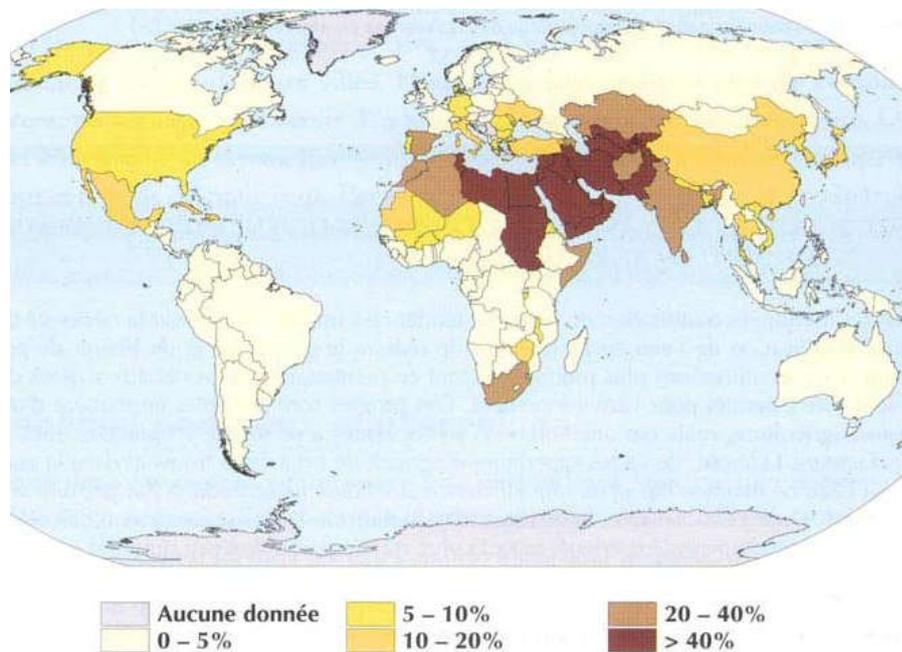


Figure 87. Pourcentage des prélèvements en eau pour l’irrigation par rapport aux ressources en eau renouvelables en 1998 (Aquastat, 2002).

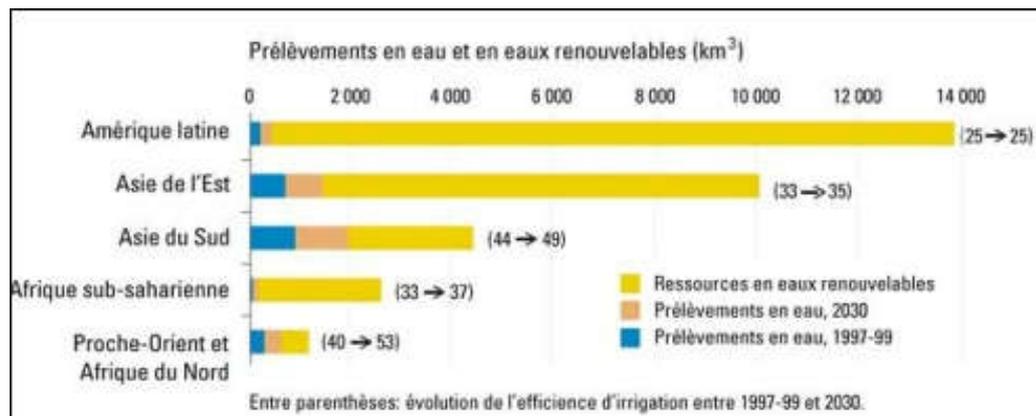


Figure 88. Estimation des prélèvements en eaux pour l'irrigation de 1999 à 2030 (FAO, 2002).

Les figures 88 et 87 illustrent l'importance des prélèvements en eau pour l'agriculture dans la région de l'Afrique du Nord, qui dépassaient déjà en 1998 plus de 40% de la ressource en eau totale et la dépasseraient de plus de 50 % à l'horizon 2030.

#### II.1.4.4.3.2- Estimation des prélèvements agricoles dans le secteur d'étude :

D'après une étude hydrogéologique réalisée en 1947 (hauteur inconnu, document ANRH), les prélèvements destinés à l'irrigation entre Sidi Bel Abbès et Sidi Khaled étaient estimés à 19,5 Mm<sup>3</sup>/an.

D'après l'inventaire BIRH réalisé sur la plaine de Sidi Bel Abbès en 1972, environ 380 ouvrages, entre puits et sources avaient été recensés. Selon cet inventaire, les débits extraits étaient égaux à 33 Mm<sup>3</sup>/an, dont 22 Mm<sup>3</sup>/an de puits et forages et 11 Mm<sup>3</sup>/an des sources (la majorité de ces sources drainent soit les calcaires de Rmaïlia/dolomie de Tlemcen, soit les calcaires éocènes). Quant aux volumes extraits des alluvions plio-quaternaires, ils sont égaux à 29 Mm<sup>3</sup>/an, répartis selon les différents besoins comme suit :

- 24 Mm<sup>3</sup>/an pour l'irrigation,
- 4,4 Mm<sup>3</sup>/an pour l'eau potable,
- 60 000 m<sup>3</sup>/an pour l'industrie.

D'après l'étude de Lerolle (1976), les volumes totaux extraits de la plaine de Bel Abbès (AEP, Irrigation et industrie) étaient égaux à 18.6 Mm<sup>3</sup>/an. Estimant que les résultats de l'inventaire BIRH (1972) étaient exagérés, comparés aux besoins réels en eau des plantations ; il supposa une irrigation excessive pour expliquer le surplus en eau (nous avons pu confirmer ce constat par le bilan hydrologique de l'aquifère (voir cadre hydrogéologique), lors du calcul du

retour des débits pour l'irrigation, que nous jugeons supérieurs aux besoins réels des plantations cultivées sur la plaine de Bel Abbès).

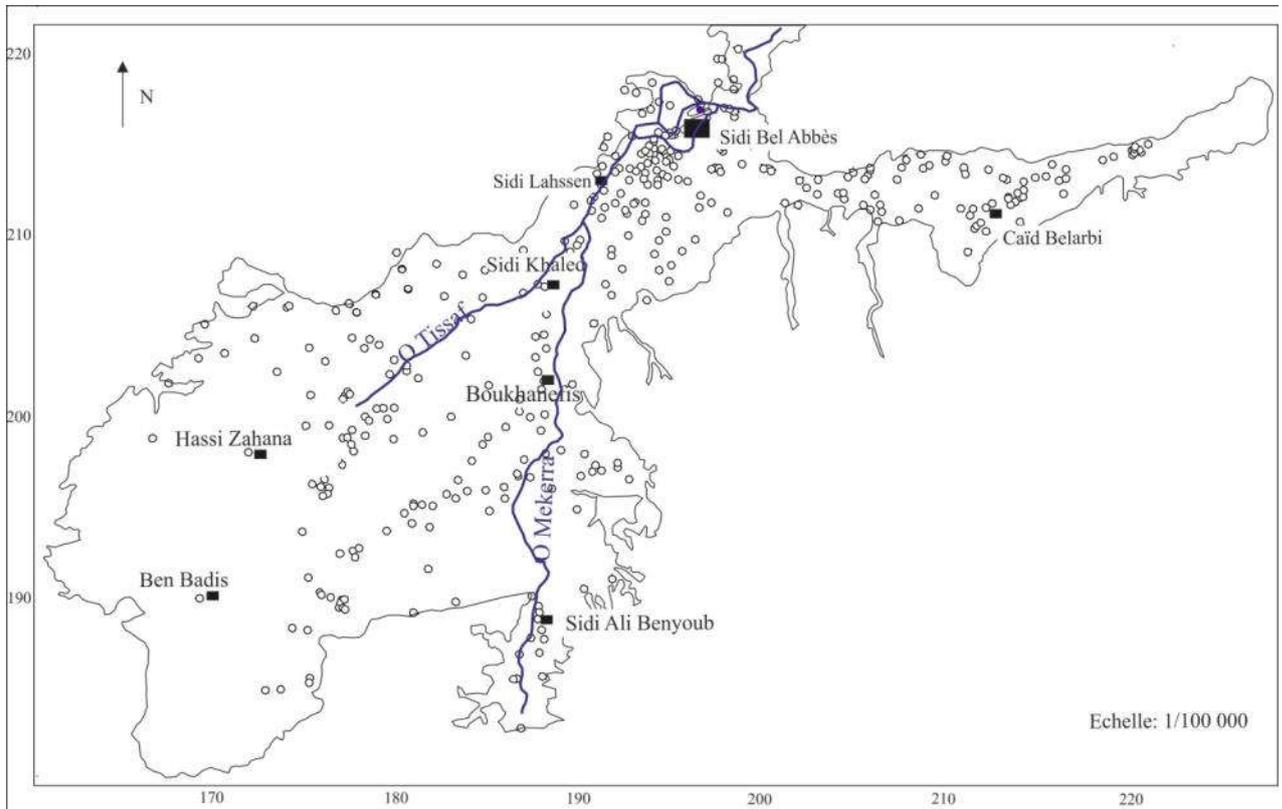


Figure 89. Localisation des prélèvements destinés à l'irrigation (inventaire BIRH, 1972).

**III.1.4.4.3.- Superficies agricoles :**

D'après les données de la DSA (tableau 46), la superficie agricole utile sur tout le territoire de la Wilaya de Bel Abbès n'a pas connue une grande expansion passant de 356 501 ha en 1999 à 363 191 en 2014, soit une augmentation de 6700 ha en 15 ans. Par ailleurs, et durant la même période, la superficie agricole utile irriguée (SAUI) a plus que doublé, augmentant de plus de 5500 ha.

Tableau 46. Superficies agricoles utiles et irriguées au niveau de la Wilaya de Bel Abbès 1999 - 2014 (DSA de Bel abbès).

Années	SAU Wilaya (ha)	SAUI Wilaya (ha)
1999/2000	356 501	3030
2001/2002	357 484	4635
2004/2005	358 938	6626
2005/2006	359 179	6912
2013/2014	363 191	8534

**II.1.4.4.3.4- Occupation des superficies agricoles :**

D’après les tableaux 47-49, une augmentation très importante des surfaces irriguées entre 1969 et 2013 est observée pour toutes les cultures, sauf pour la vigne en raison de la nette diminution de la production du vin après l’indépendance du pays. Par ailleurs, il apparait que les cultures maraichères, arbustives et fourragères sont les plus répandues dans la plaine de Sidi Bel Abbès.

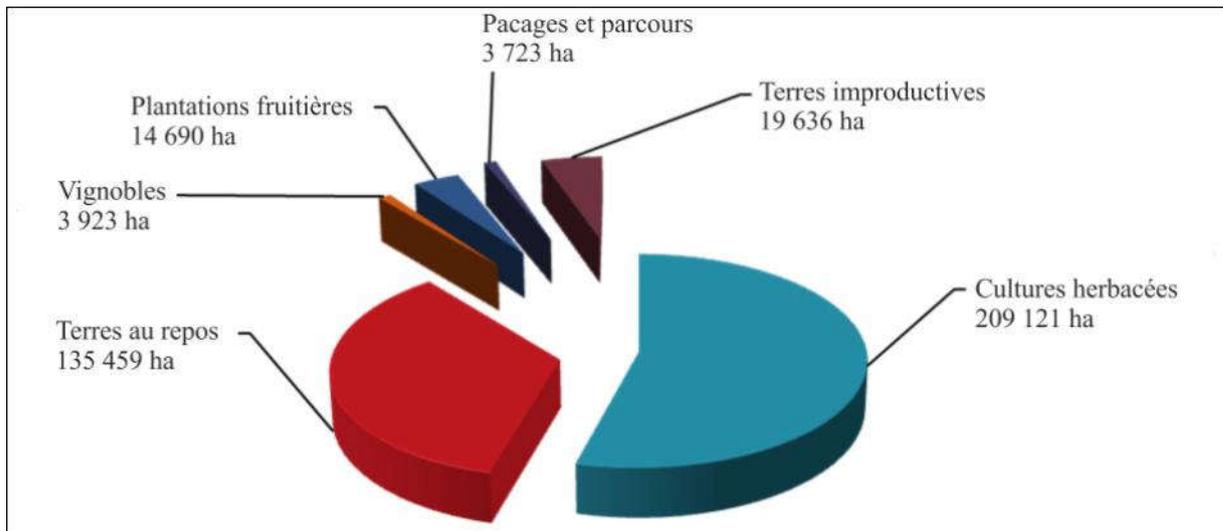


Figure 90. Occupation de la superficie agricole (DSA de Bel Abbès, 2014).

Tableau 47. Superficies irriguées et récoltées sur le bassin de la Mekerra (SOGREAH, 1969).

	SI* (ha)	S récoltée (ha)
Jardin (Maraichages + A-fruitiers)	20	/
A-Fruitiers	40	1400
Agrumes	/	/
Vignes	1280	1280
Maraichages	800	1015
Oliviers	/	23000
Céréales	/	50
Fourrages	/	145
Total	2140	26890

SI\* : superficie irriguée

Tableau 48. Superficies irriguées par type de culture (2001 : RGAA ; 2005 : DSA de Bel Abbès).

Culture	SI Wilaya (ha)	
	2001	2005
Céréales	93	/
Maraichages	2440	1218
Jardins potagers	7	/
Fourrages	325	/
Industrielles	26	24.5
Pépins et noyaux	1270	871
Figuier	19	
Agrumes	3	
Oliviers	54	
Vignes	204	424
Pépinières et autres	178	17

Tableau 49. Superficies irriguées par type de culture (DSA de Bel Abbès, 2013).

Cultures	SI Wilaya (ha)
Céréales	45
Maraichage	3120
Arboricultures	2020
Fourrages	245
Industrielles	210
Vignes	520

Tableau 50. Superficies irriguées et volumes d'eau utilisés selon le type d'alimentation (SOGREAH, 2006).

Type d'alimentation	Nombre	Volume d'eau (Mm <sup>3</sup> /an)	SI (ha)
Puits	2277	25.29	5058
Forages	218	4.66	932
Sources	35	0.46	90
Autres	5	4.15	830

D'après le tableau 50, la superficie totale irriguée sur l'ensemble du territoire de la Wilaya était égale à 6900 ha en 2006. Cette superficie était arrosée par un volume de l'ordre de 34.5 Mm<sup>3</sup>/an, provenant de 2535 points d'eau, répartis entre forages, puits, sources et autres.

**II.1.4.4.3.5- Prélèvements agricoles calculés pour le modèle :**

Après la synthèse des données citées plus haut et de même que pour les prélèvements AEP et industriels, une augmentation linéaire des volumes d'eaux destinés à l'irrigation est supposée; les volumes prélevés pour l'irrigation des alluvions plio-quaternaires (années repaires) ont été estimés comme suit :

Tableau 51. Prélèvements agricoles introduits dans le modèle.

Années	Volumes d'eau (Mm <sup>3</sup> /an)
1971	24
1999	34.24
2001	43.7
2005	46
2014	49

**II.1.5- Période de simulation :**

La modélisation de l'aquifère plio-quaternaire sera faite sur deux étapes.

Dans un premier lieu en régime permanent pour essayer de reproduire les conditions initiales avec comme point de référence (calibration) la carte piézométrique réalisée par Sourisseau en Janvier 1971. En second lieu, le comportement de l'aquifère en régime transitoire sera simulé sur une période de 44 ans, de 1971 jusqu'à 2014 avec comme points de calibration les données piézométrique de 1971, 1998-2007, 2009-2011 et 2013-2014 (figures 91 et 92).

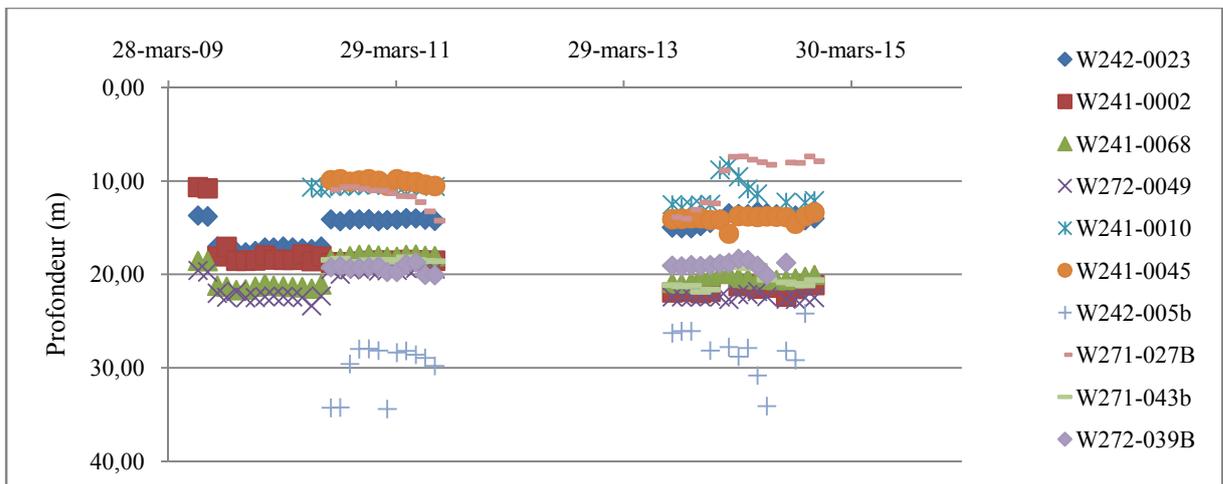


Figure 91. Evolution piézométrique aux niveaux de quelques ouvrages de 2009 à 2014 (ANRH).

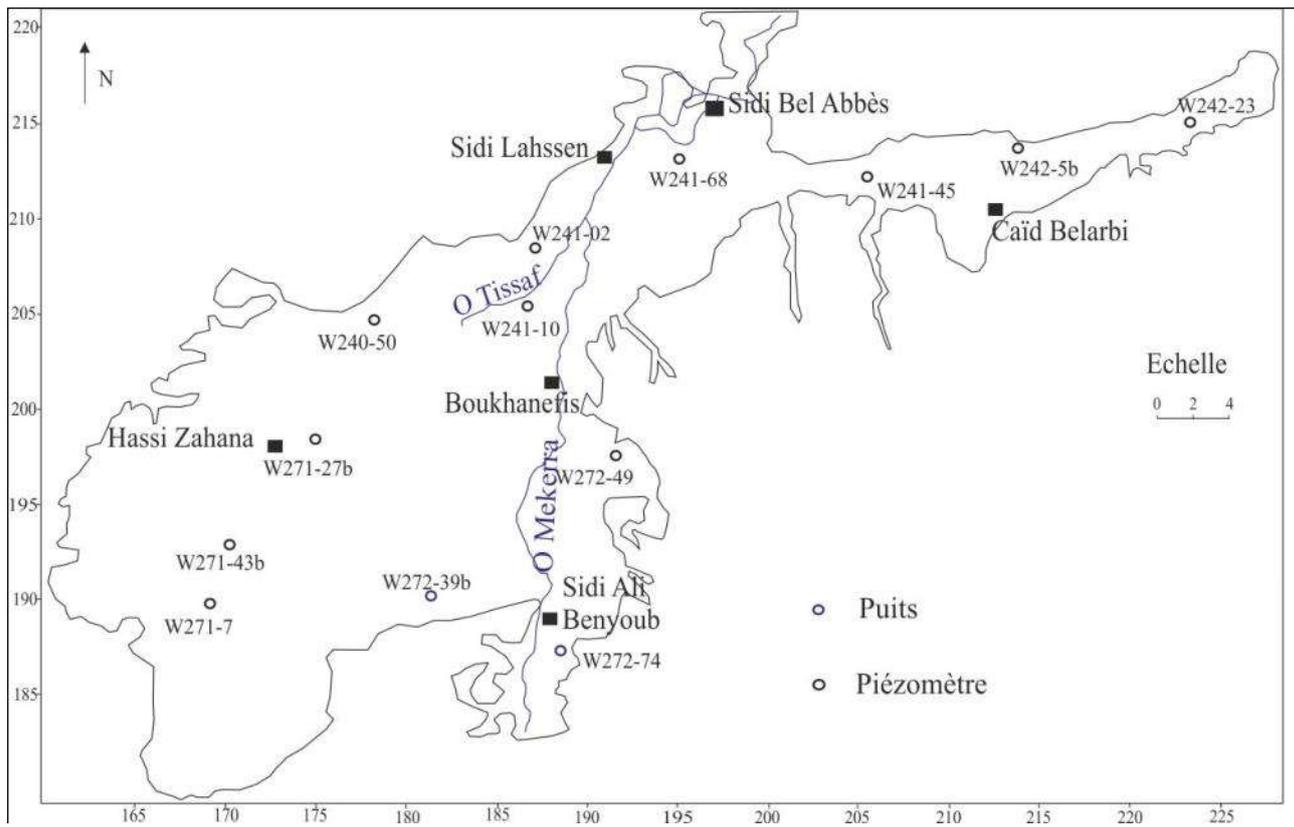


Figure 92. Localisation des ouvrages suivis par l'ANRH d'Oran.

## II.2- Modèle numérique :

### II.2.1- Présentation du programme :

La modélisation du système aquifère plio-quaternaire de la plaine de Sidi Bel Abbès a été faite à l'aide du programme Visual Modflow (VMF). Ce dernier est une interface du code MODFLOW (basé sur la méthode des différences finies), développé par l'USGS (United States Geological Survey) en 1988 (McDonald & Harbaugh, 1988).

Modflow est considéré comme le programme le plus utilisé à travers le monde pour les études de modélisation des écoulements souterrains et de transport de contaminants en régime permanent ou transitoire.

Le programme a été écrit au début des années 1980 et fut modifié plusieurs fois au fil des années. Il permet l'utilisation de plusieurs packages tels que MODFLOW (écoulements souterrains), MODPATH (chemin d'écoulement des particules par rapport à un point de référence) MT3D (transport de contaminants), ZoneBudget, etc.

Visual Modflow a été programmé pour simuler le comportement des systèmes aquifères où :

- l'écoulement se fait en zone saturée,
- la loi de Darcy est applicable,

la densité de l'eau est constante,

la direction de la transmissivité horizontale ne change pas dans le temps.

Visual Modflow est un programme qui permet non seulement une reproduction assez précise des conditions naturelles retrouvées sur le terrain, mais aussi une visualisation uni, bi ou tridimensionnelle simple et claire des résultats obtenus.

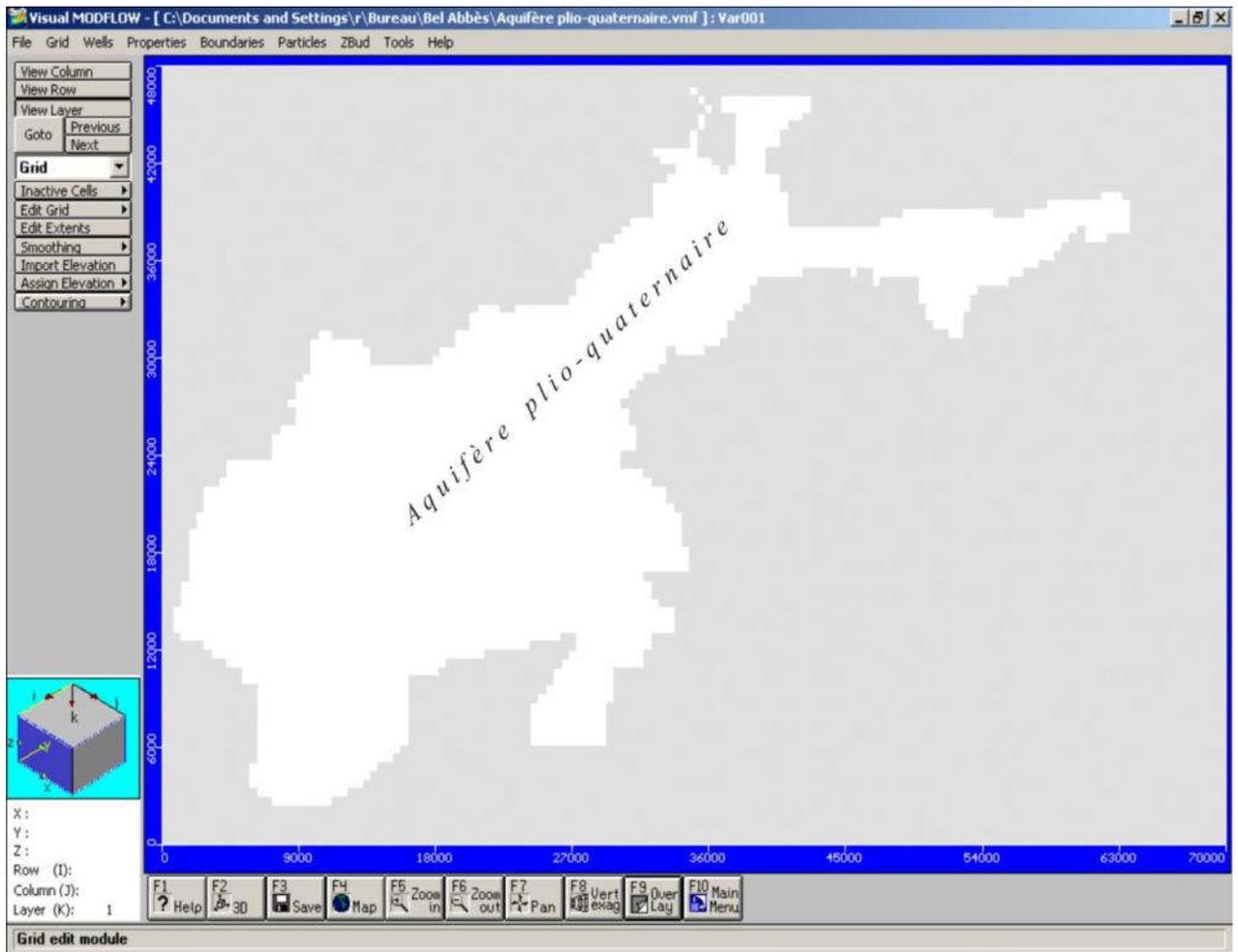


Figure 93. Prise d'écran sous Visual Modflow.

### III.2.2- Discrétisation :

#### III.2.2.1- Extension du domaine modélisé :

En se basant sur le modèle conceptuel, le domaine de la plaine de Sidi Bel Abbès a été discrétisée en 13440 mailles quadrilatères de 500 m de coté. La limite latérale de l'aquifère plio-quaternaire a été représentées par un polygone, à l'intérieur du quel, toutes les mailles sont marquées actives ; les mailles restantes sont marquées inactives et ne sont pas prises en compte lors des calculs (figure 94).

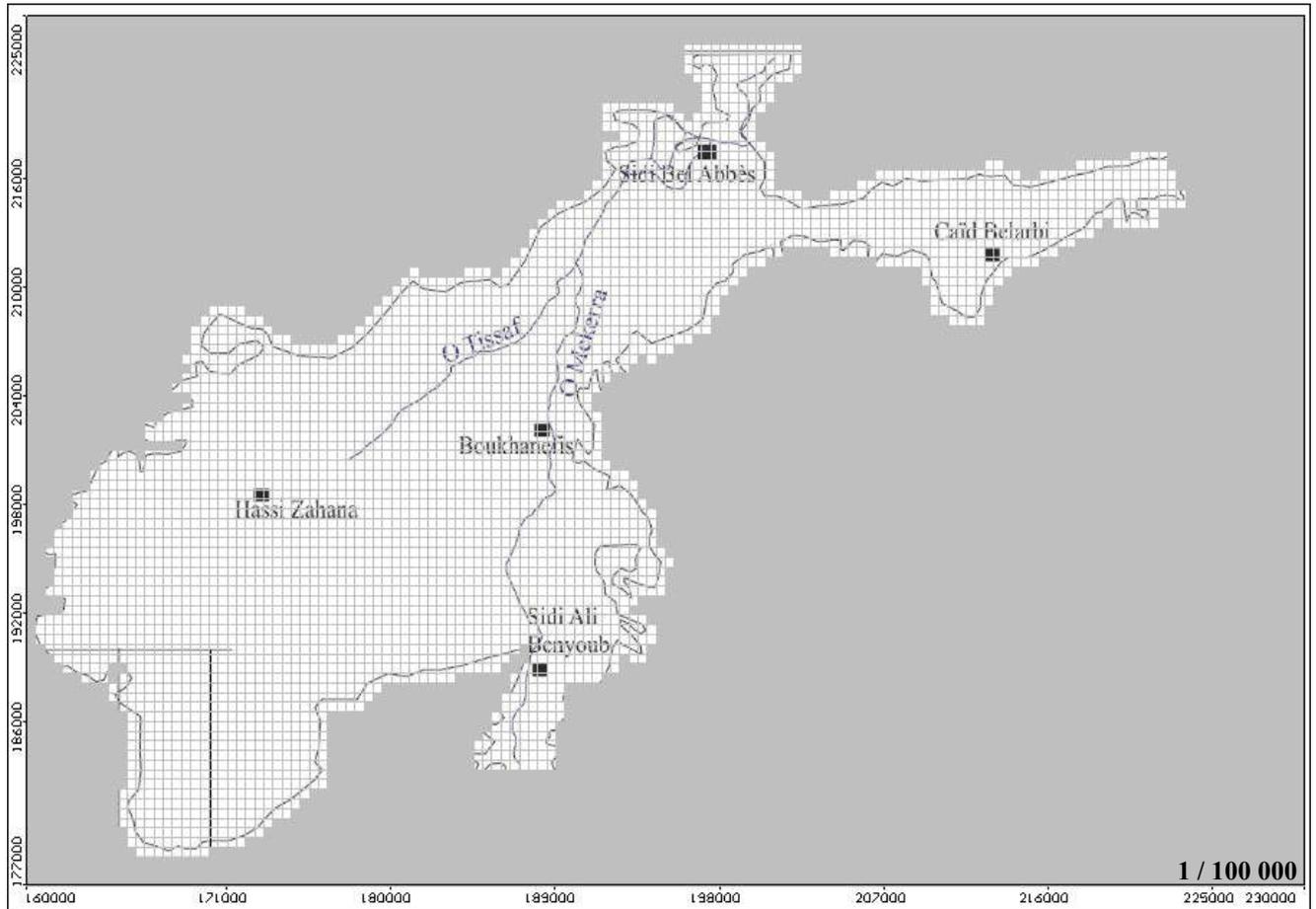


Figure 94. Discretisation de l'extension du domaine modélisé.

### III.2.2.2- Epaisseur des formations aquifères :

L'épaisseur des alluvions plio-quaternaires et comme il a été vu précédemment (voir modèle conceptuel) à été estimée grâce aux coupes et logs géologiques, ainsi que les caractéristiques hydrogéologiques de ces formations aquifères. Les données récoltées nous ont permis d'estimer l'altitude du toit et du mur de l'aquifère. Ces données ont par la suite été introduites sous VMF, d'où l'épaisseur des formations plio-quaternaires a pu être déduite (figure 95).

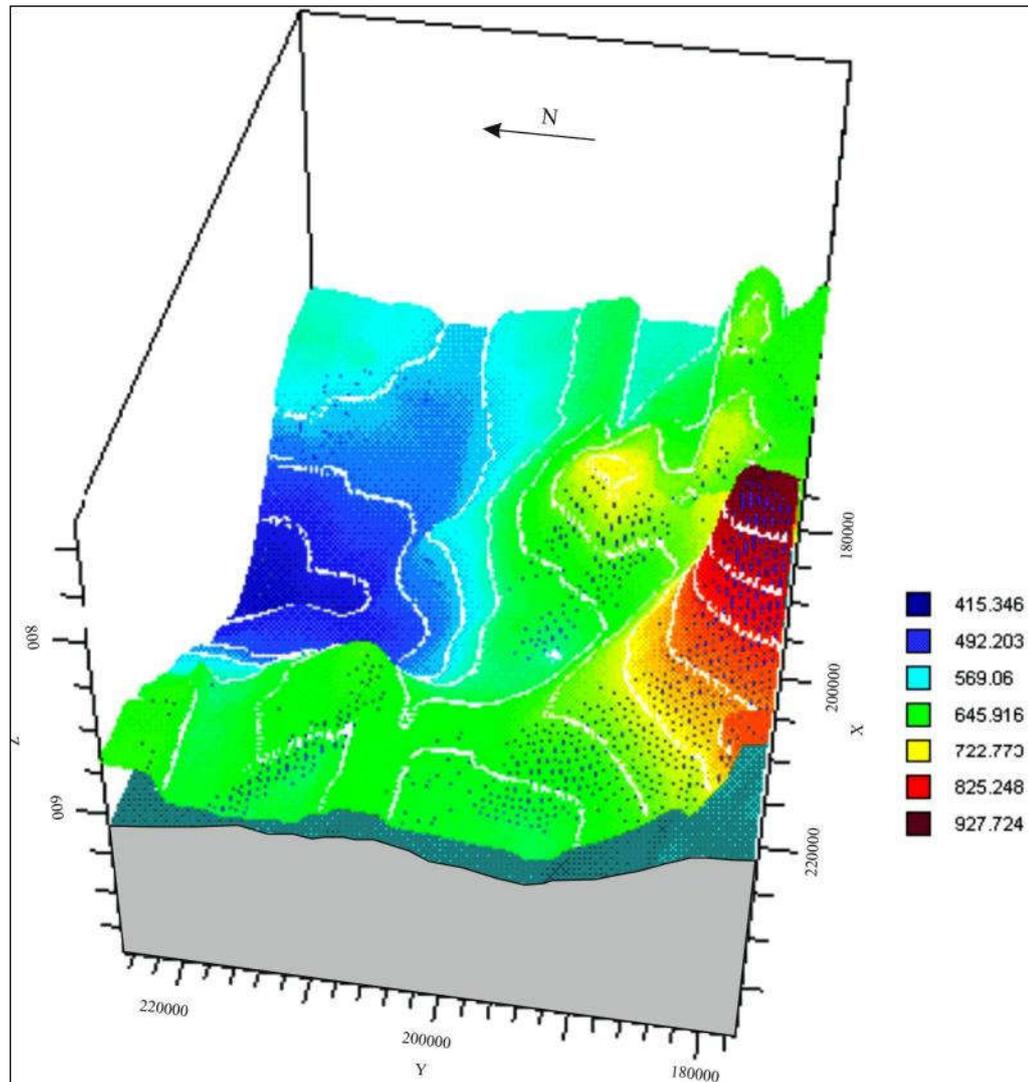


Figure 95. Représentation en 3D de la zone d'étude sous VMF.

De la figure 95, la forme de la plaine de Sidi Bel Abbès ressemble plus à un toboggan qu'à une cuvette, comme il est retrouvé dans la bibliographie. Par ailleurs, la figure 95 permet aussi de voir que les eaux recueillies sur le bassin versant de la moyenne Mekerra, ainsi que celles de l'aquifère convergent dans leur majorité vers l'exutoire principal du système aquifère plio-quaternaire au niveau du Rocher au Nord.

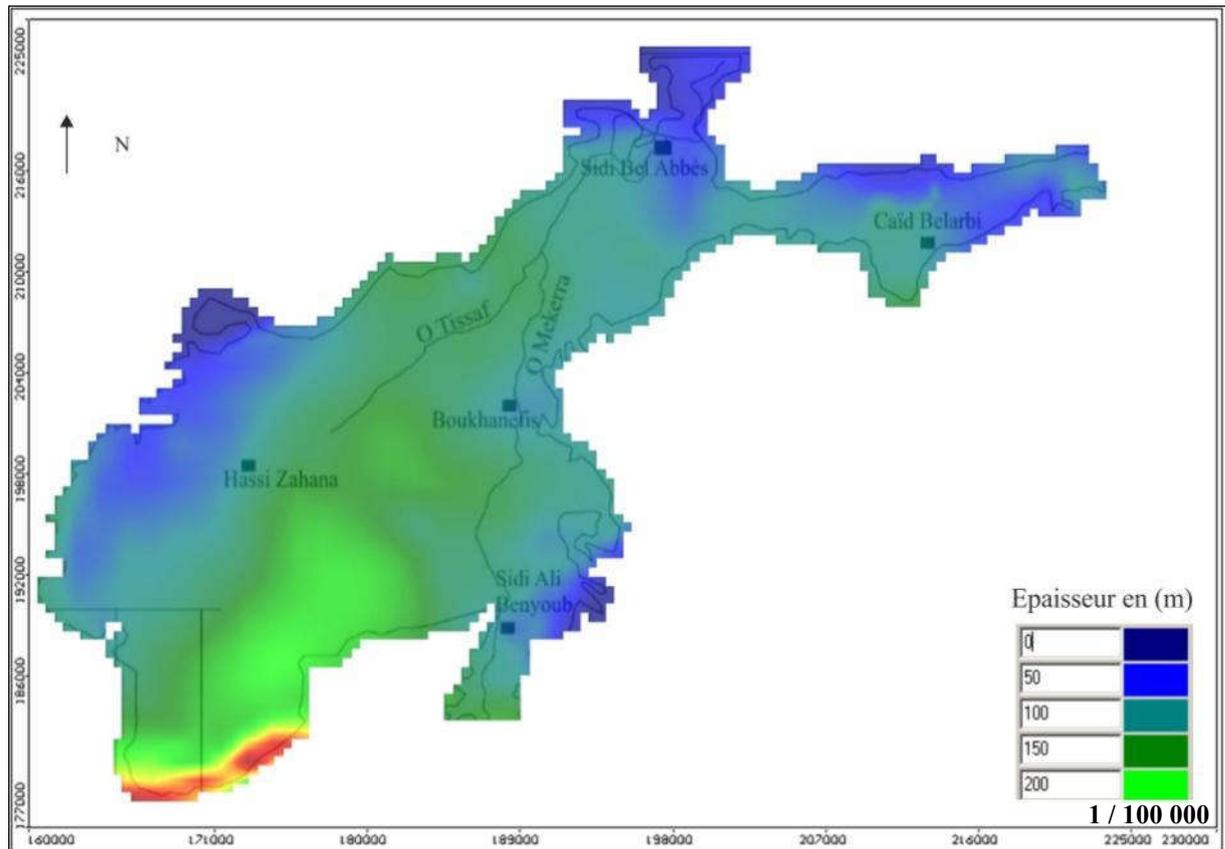


Figure 96. Discrétisation de la variation spatiale de l'épaisseur des alluvions plio-quaternaires.

La figure 96 montre que les plus grandes épaisseurs sont observées au Sud et au Centre du remplissage plio-quaternaire. Les plus faibles épaisseurs par contre sont enregistrées au Nord de Bel Abbès et de Caïd Belarbi, au Nord-ouest de Hassi Zahana et au Nord est de Sidi Ali Benyoub.

Sur les figures 97 - 99, les coupes Sud-Nord et Est-Ouest obtenues par VMF des localités de Sidi Ali Benyoub, Sidi Lahssen, Caïd Belarbi, Boukhanefis, Sidi Bel Abbès ainsi que de l'exutoire du Rocher sont présentées.

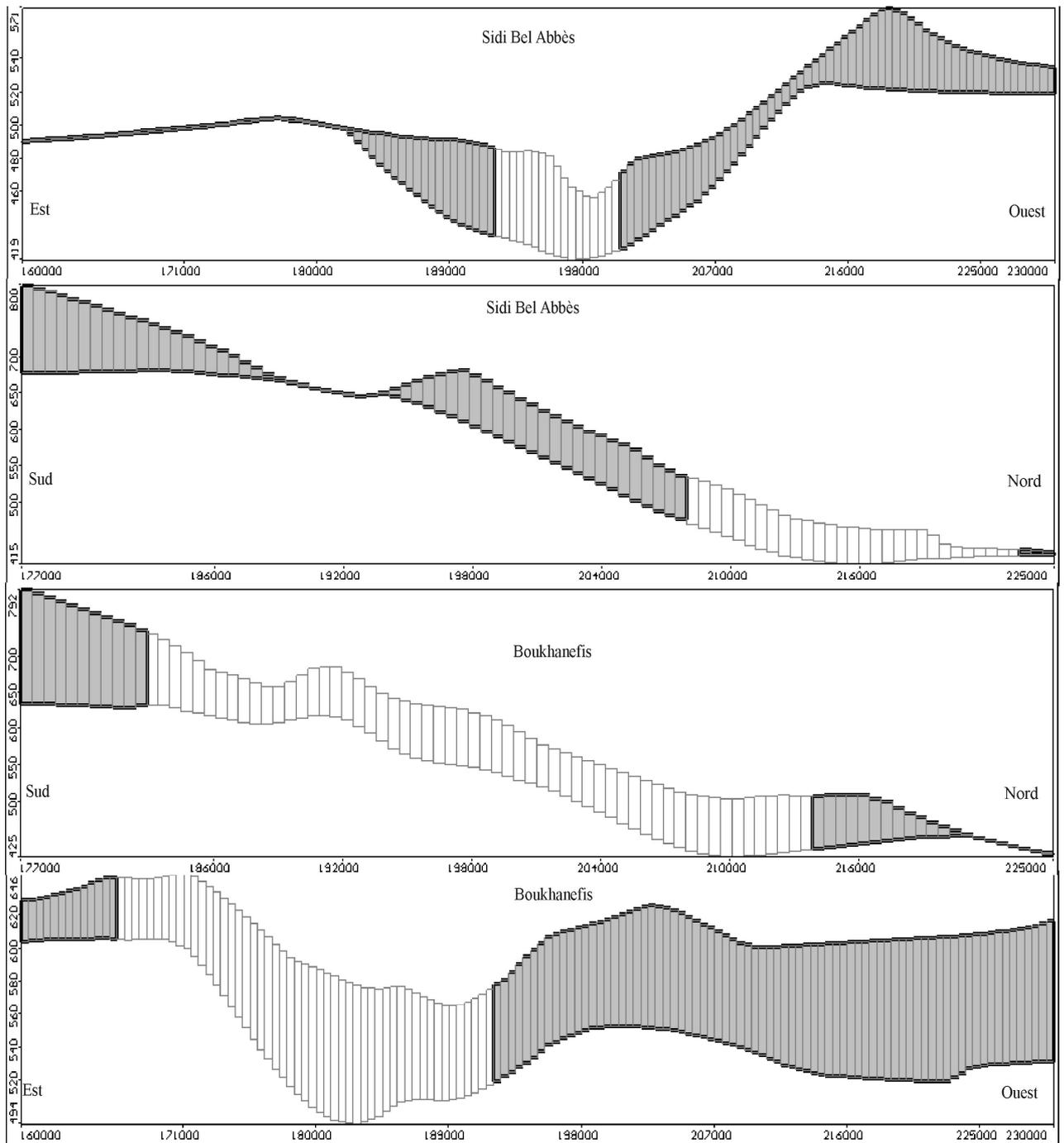


Figure 97. Coupes S-N et E-O au niveau de Bel Abbès et de Boukhanefis.

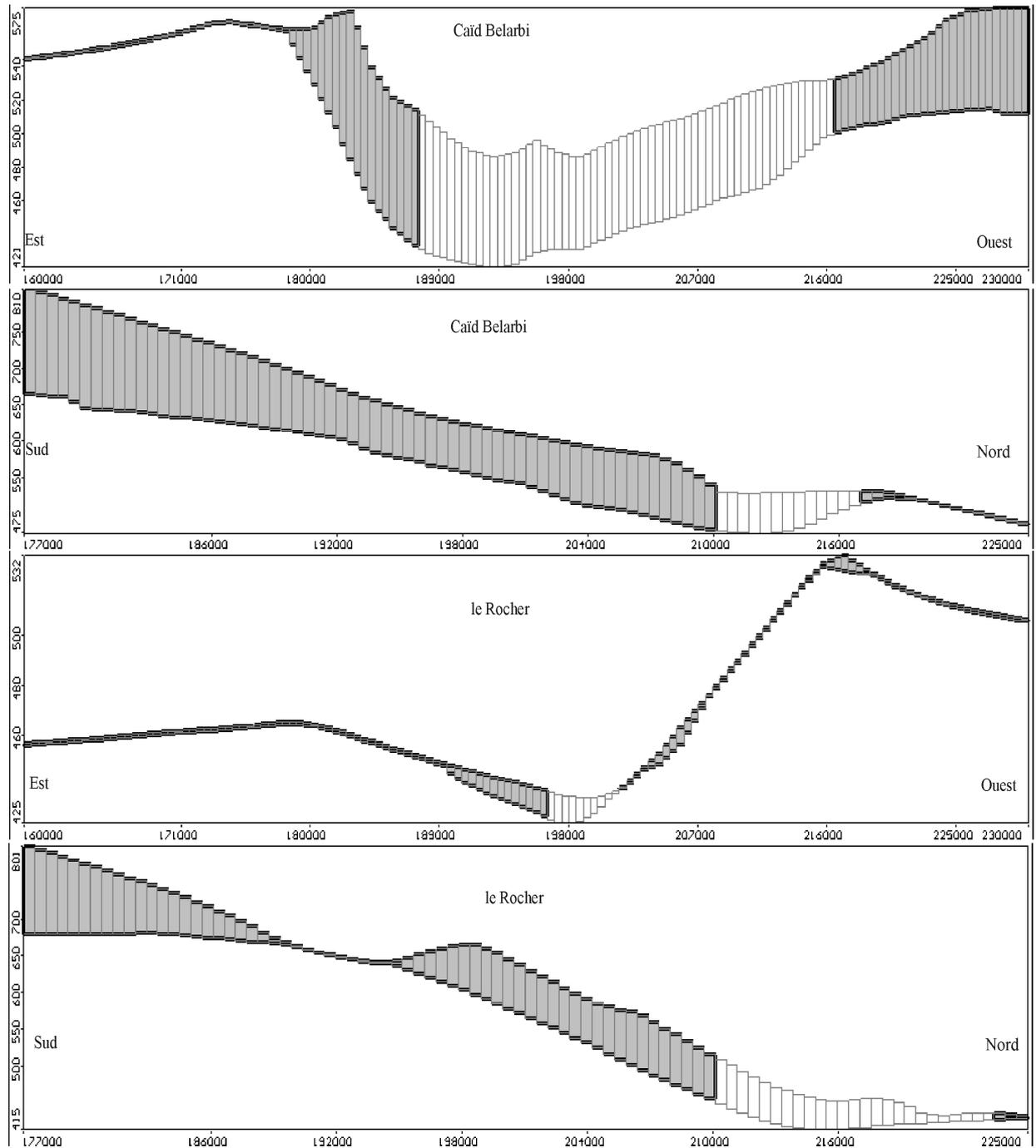


Figure 98. Coupes S-N et E-O au niveau de Caïd Belarbi et du Rocher.

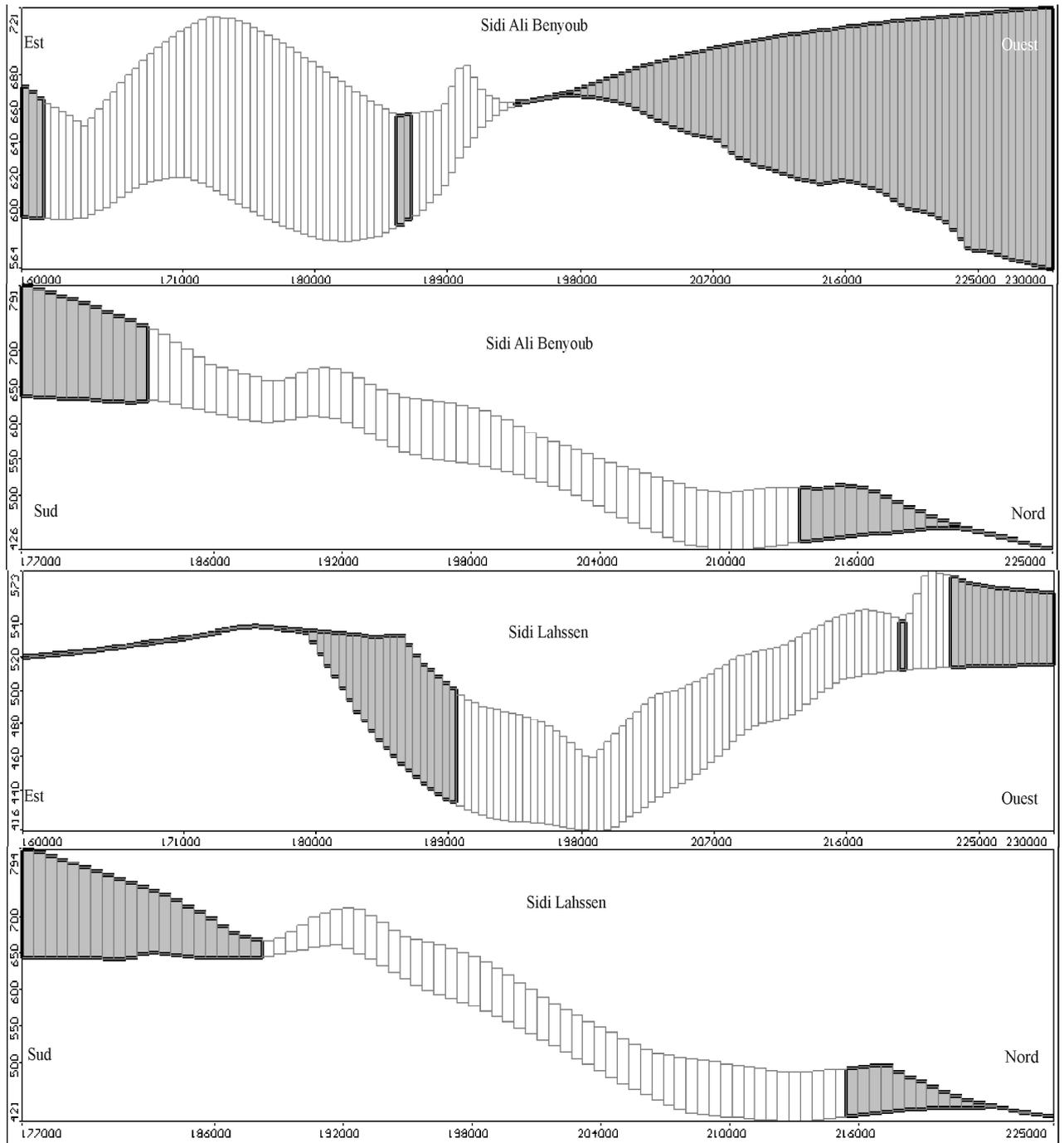


Figure 99. Coupes S-N et E-O au niveau de Sidi Ali Benyoub et de Sidi Lahssen.

L'examen des figures 97 - 99 permet d'observer la grande variabilité de l'épaisseur des alluvions plio-quaternaires au niveau de la plaine de Sidi Bel Abbès, surtout en allant du Sud au Nord.

**II.2.2.3- Les conditions aux limites :****II.2.2.3.1- Les prélèvements :**

Tous les prélèvements (AEP (16), agricoles (300) et industriels (5)) introduits dans le modèle sont présentés sur la figure 100, d'où il apparaît clairement que la majorité des points d'eau se concentre en amont de Sidi Bel Abbès au Nord et aux environs de Caïd Belarbi à l'Est.

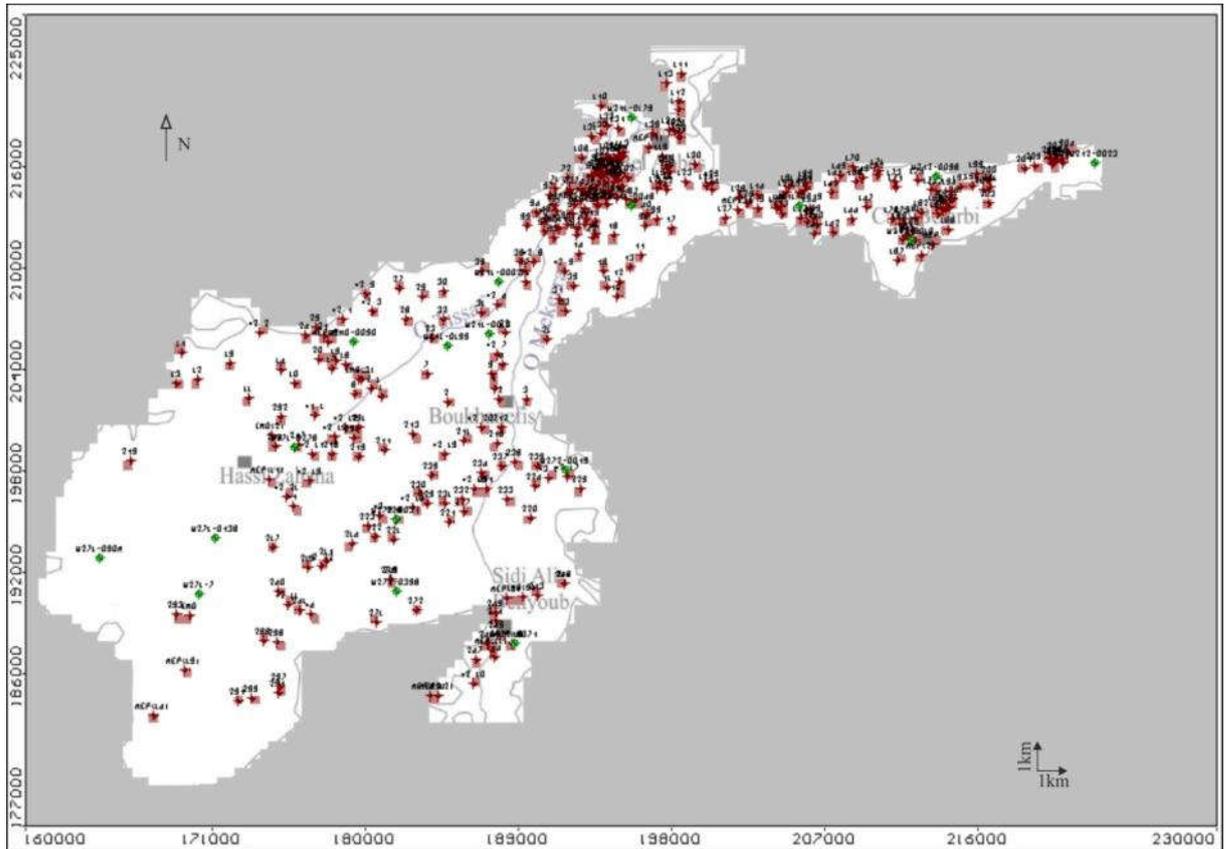


Figure 100. Discretisation des prélèvements (AEP, agricoles et industriels) introduits dans le modèle.

**II.2.2.3.1.1- Prélèvements AEP :**

En raison du manque de données relatives aux prélèvements AEP sur toute la période de simulation (1971-2014), l'évolution des besoins en eau potable a été supposée linéaire, sauf pour les années où la donnée est disponible (années repaires). Les résultats retenus pour le modèle sont représentés sur la figure 101.

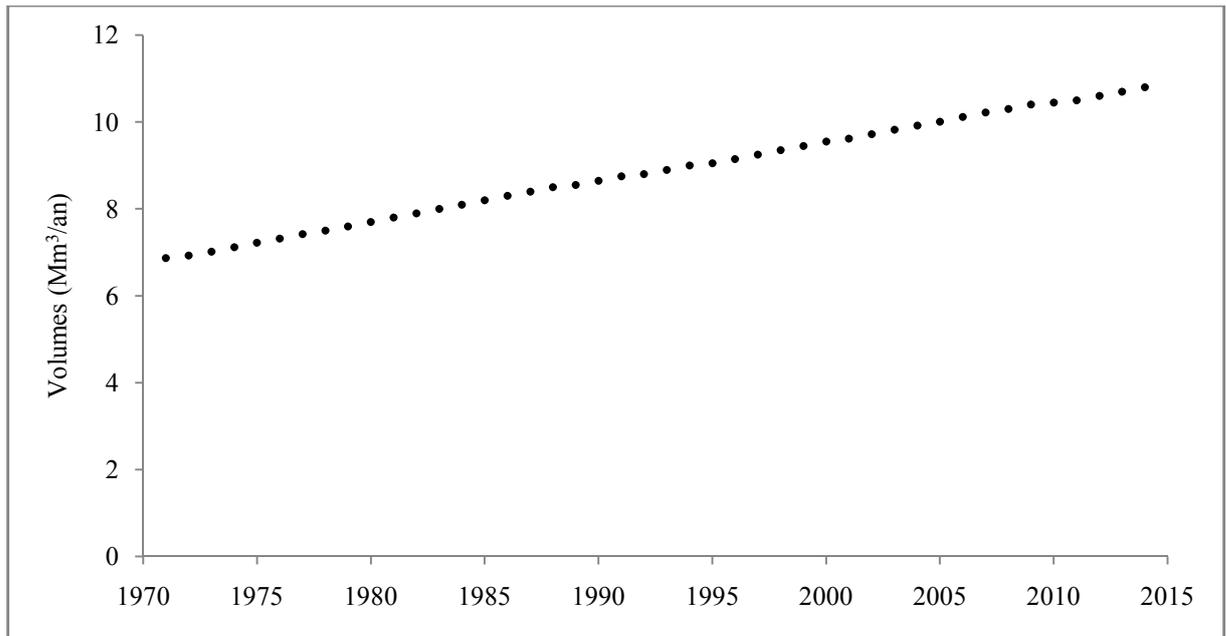


Figure 101. Evolution des prélèvements AEP introduits dans le modèle.

#### II.2.2.3.1.2- Prélèvements agricoles :

Les besoins en eau pour l'agriculture ont été estimés en se basant sur le recensement BIRH de 1972, l'évolution des surfaces agricoles utiles et irriguées de la Wilaya de Bel Abbès (données de la DSA) et les consommations d'eau par type de culture (tirées des rapports de la SOGREHA). Néanmoins, cette estimation reste personnelle et peut différer selon l'appréciation et le raisonnement adoptés dans les calculs. Les volumes d'eau destinés à l'irrigation, ainsi que leur évolution temporelle sont représentés sur la figure 102.

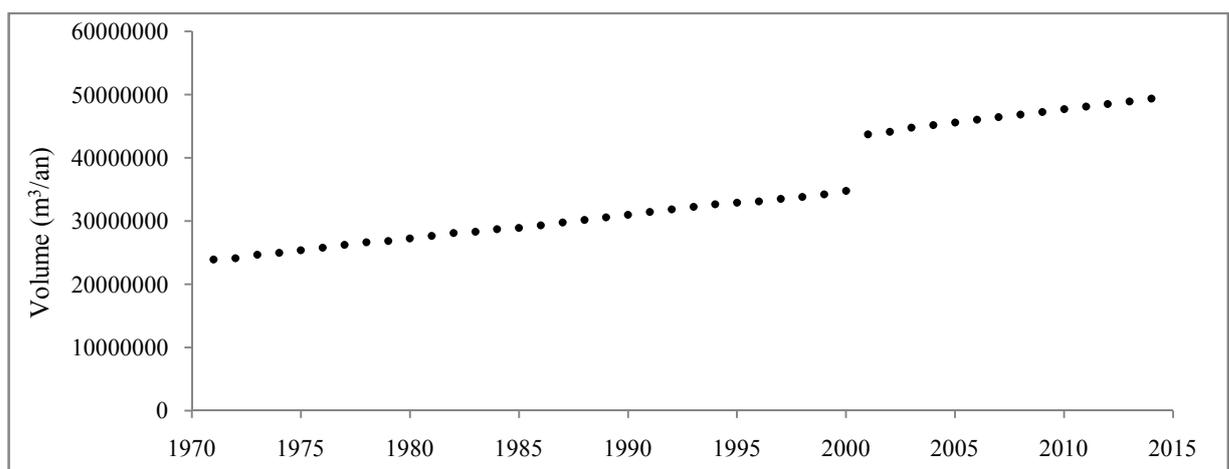


Figure 102. Evolution des prélèvements agricoles introduits dans le modèle.

**II.2.2.3.1.3- Prélèvements industriels :**

Les données relatives aux prélèvements industriels, telles que les volumes mobilisés, leur provenance (la localisation des points d'eau), leur variation temporelle, etc., sont assez pauvres au niveau de la Wilaya de Bel Abbès. Néanmoins, les données récoltées auprès des services de l'ADE, de la DHW ainsi que quelques documents consultés au niveau de l'Université de Bel Abbès, nous ont permis de faire une estimation approximative des prélèvements industriels extraits des alluvions plio-quadernaires. Ces prélèvements ont été introduits dans le modèle selon l'évolution temporelle présentée sur la figure 103.

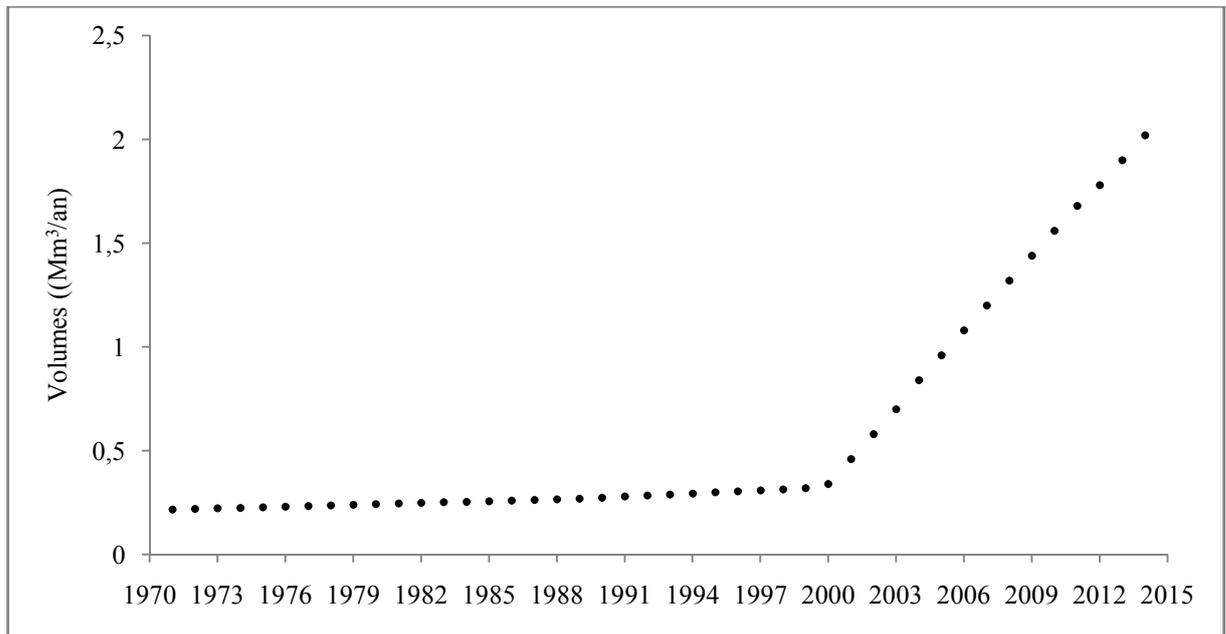


Figure 103. Evolution des prélèvements industriels introduits dans le modèle.

**II.2.2.3.2- La recharge :**

La recharge de l'aquifère plio-quadernaire se fait principalement par les pluies. Ces dernières ont baissées au niveau de la plaine de Sidi Bel Abbès (de plus de 100 mm/an) depuis le début des années 90s, mais se maintiennent en moyenne au dessus de 333 mm/an. La recharge par les pluies a été estimée dans un premier lieu à 18 % puis réajustée à 15 % après la calibration du modèle.

La recharge a été introduite dans le modèle en mm/an sur l'ensemble du domaine modélisé sans tenir compte des zonalités rencontrées sur terrains, étant donné que toutes les eaux du système aquifère sont modélisées convergentes vers le seul exutoire du Rocher. La recharge introduite dans le modèle a été calculée à partir des moyennes pluviométriques présentées sur la figure 104.

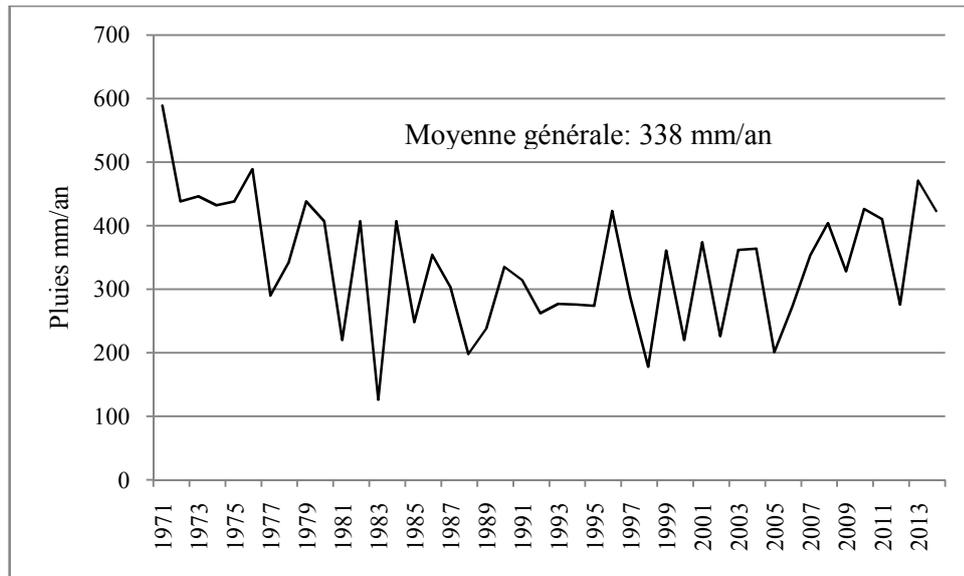


Figure 104. Moyennes pluviométriques annuelles utilisées pour le calcul de la recharge.

### III.2.2.3.3- Apports latéraux et pertes :

Les apports provenant des aquifères adjacents ont été introduits dans le modèle sous forme de débits imposés surfaciques positifs (du milieu extérieur vers l'aquifère). Ces derniers ont été calculés en se basant sur l'extension latérale de chaque bassin versant adjacent, ainsi que les caractéristiques hydrogéologiques générales des formations longeant l'aquifère plio-quadernaire, tout en supposant une recharge uniforme pour l'ensemble des aquifères considérés.

Les volumes obtenus sont par la suite introduits dans le modèle en traçant des polygones le long de chaque aquifère et en assignant les débits correspondants au centre de chaque maille (figure 105).

Les pertes représentées par la dérivation vers le barrage Sarno via le lac Sidi Md Benali ont été représentées dans le modèle par un drain, dont la conductance a été ajustée lors du calage du modèle.

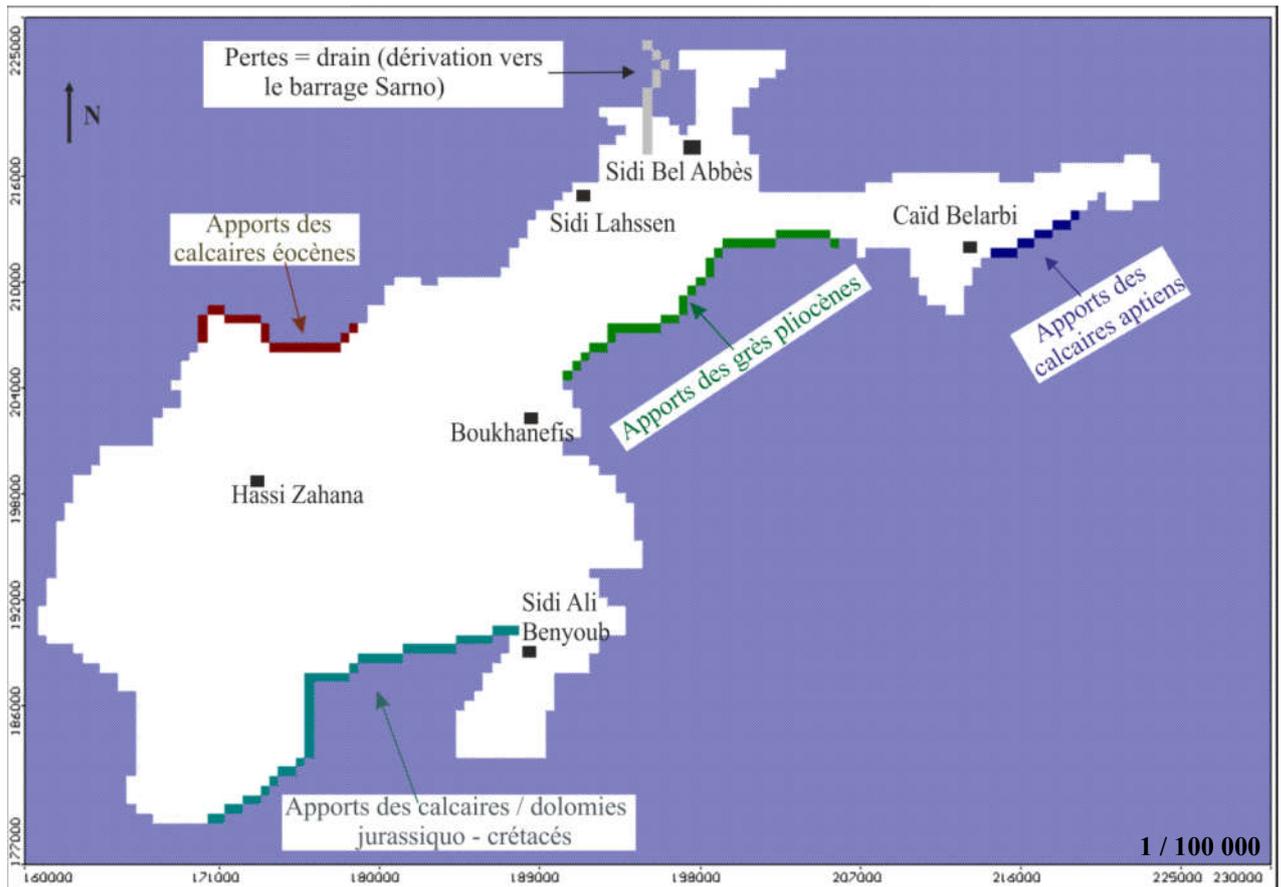


Figure 105. Discretisation spatiale des apports latéraux et des pertes.

#### III.2.2.3.4- Réseau hydrographique :

En raison du manque de données relatives aux Oueds dans le secteur d'étude, le réseau hydrographique a été relativement simplifié.

Pour la Mekerra : le bras majeur a été modélisé comme étant l'Oued, la dérivation vers le barrage Sarno comme drain, alors que le canal évacuateur de crue n'as pas été introduit dans le modèle (les visites sur terrain nous ont permis de constater que le canal est toujours quasiment à sec (écoulement faible d'eaux usées), sauf en période de crue).

Pour l'Oued Tissaf, les affluents Anefress et Lamtar n'on pas été introduits dans le modèle.

La discrétisation des Oueds Mekerra et Tissaf s'est faite en se basant sur :

l'étude de la topographie le long des deux Oueds,

l'analyse des cartes piézométriques de 1971,

les jaugeages différentiels réalisés au début des années 1970s,

les chroniques de débits entre les deux stations amont de Sidi Ali Benyoub et aval de Sidi Bel Abbès entre 1970 et 2006 ,

la relation Mekerra-aquifère plio-quaternaire décrite par Sourisseau (1973) et Lerolle (1976).

Les niveaux d'eau observés pour chaque Oued ainsi que la conductance (coefficient de colmatage), régissant les échanges susceptibles de prendre place entre les Oueds et l'aquifère plio-quaternaire sont introduits par la suite dans le modèle sous VMF grâce à l'option conditions aux limites de type « Rivière ».

Le paramètre conductance (C) sous VMF a été ajusté lors de la phase de calibration du modèle.

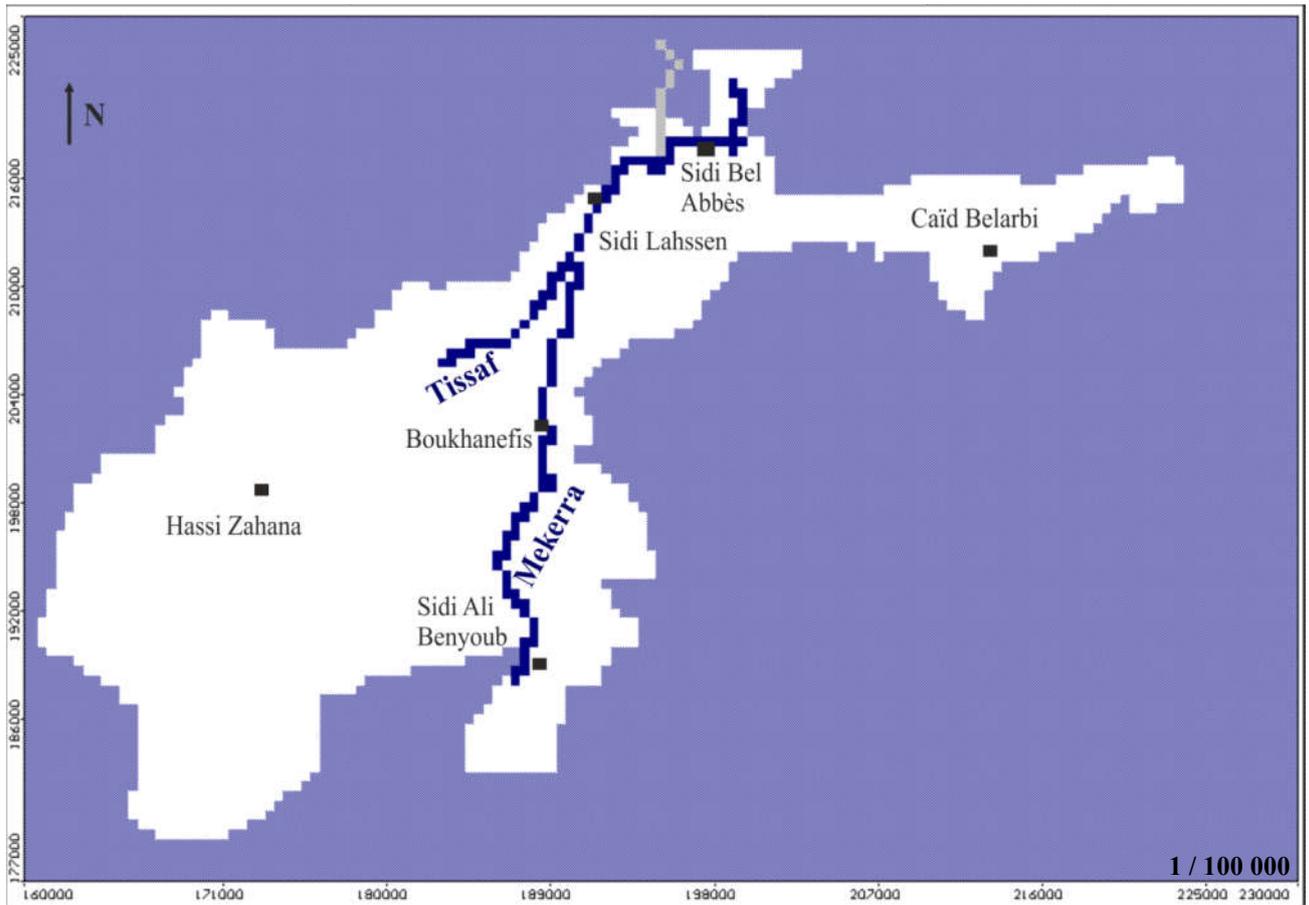


Figure 106. Discretisation des Oueds et de la dérivation vers le barrage Sarno.

## II.2.3- Calibration du modèle :

### II.2.3.1- Régime permanent :

Le calage du modèle en régime permanent a été fait sur l'année 1971. Ainsi, les données introduites dans le modèle ont été ajustées afin de reproduire au mieux l'allure de la carte piézométrique de Janvier 1971, réalisée par Sourisseau (figure 107).

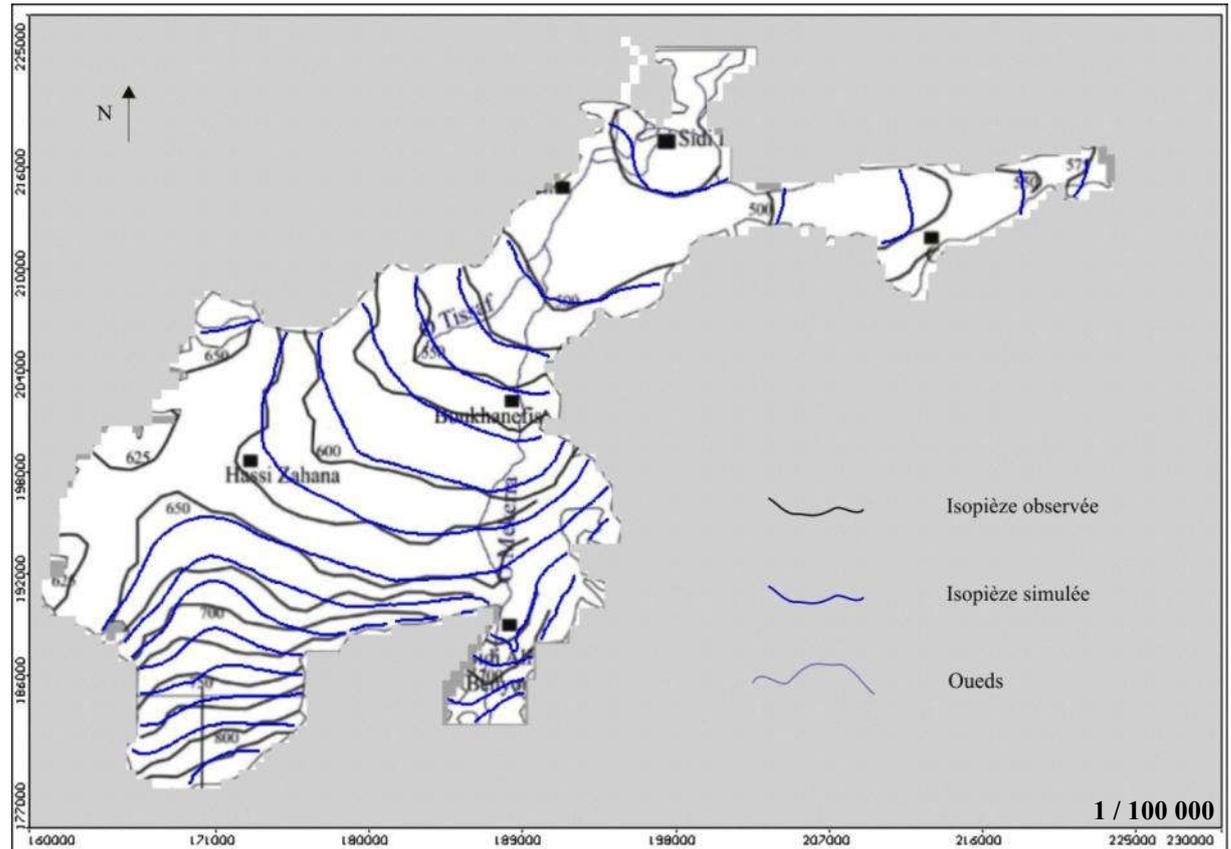


Figure 107. Cartes piézométriques : simulée (régime permanent, 1971) et observée (Sourisseau, Janvier 1971).

L'examen de la figure 107, montre que la carte piézométrique simulée se calque assez bien sur celle établie par Sourisseau en 1971. En effet, l'allure générale des courbes est retracée selon les mêmes directions d'écoulement (surtout pour les axes d'écoulement majeurs) et en respectant les mêmes valeurs du gradient hydraulique. En addition, les tendances piézométriques simulées le long des Oueds Mekerra et Tissaf sont assez proches de celles observées et dénotent de la bonne reproduction de la relation entre les Oueds et l'aquifère plio-quaternaire.

Les résultats obtenus après la phase de calage en régime permanent (1971) (tableau 52) sont assez proches de ceux des bilans réalisés par Sourisseau sur la nappe alluviale de la plaine de Bel Abbès entre 1970 et 1972. Ces résultats montrent que les précipitations sont la source majeur des entrées dans le système aquifère plio-quaternaire avec plus de  $70 \text{ Mm}^3/\text{an}$ .

Les apports latéraux provenant des aquifères adjacents sont également importants et avoisinent les  $23 \text{ Mm}^3/\text{an}$ . L'infiltration par le lit des Oueds est assez faible comparée aux entrées citées ci-dessus et atteint presque  $5 \text{ Mm}^3/\text{an}$ .

La vidange de l'aquifère plio-quaternaire se fait essentiellement par les Oueds avec des volumes drainés hors de l'aquifère égales à  $65 \text{ Mm}^3/\text{an}$  environ. Les prélèvements, surtout

agricoles, sont la deuxième source de déstockage de la nappe avec des volumes de presque 30 Mm<sup>3</sup>/an. Quant aux volumes transférés via le canal de dérivation vers le barrage Sarno, ils avoisinent les 4 Mm<sup>3</sup>/an et concordent avec les débits mesurés sur cette dérivation (débit entre 1970 et 2005 égal en moyenne à 125 l/s).

Tableau 52. Bilan des entrées et sorties en régime permanent du système aquifère plio-quadernaire.

Volumes en m <sup>3</sup> /an	In	Out
Recharge par les précipitations	71033400	
Apports latéraux	22368688	
Prélèvements		29859830
Rivières	4760722	64202627
Drains		4100255
Total	98162810	98162712

### II.2.3.2- Régime transitoire :

La simulation du système aquifère plio-quadernaire en régime transitoire s'est faite pour une période de 44 ans de 1971 à 2014. Cette longue période nous a permis d'étudier le comportement général du système aquifère selon des circonstances variées dans le temps (recharge, prélèvements, échanges nappe-Oueds, etc.). La calibration du modèle en régime transitoire s'est faite sur la base de données piézométriques (1998 à 2014) relatives à 13 ouvrages suivis par l'ANRH d'Oran. Toutefois, il est important de signaler que sur les 13 points de contrôle présents dans le secteur d'étude, 10 uniquement possèdent des données piézométriques entre 2009 et 2014, le reste ont été soit comblés, soit abandonnés.

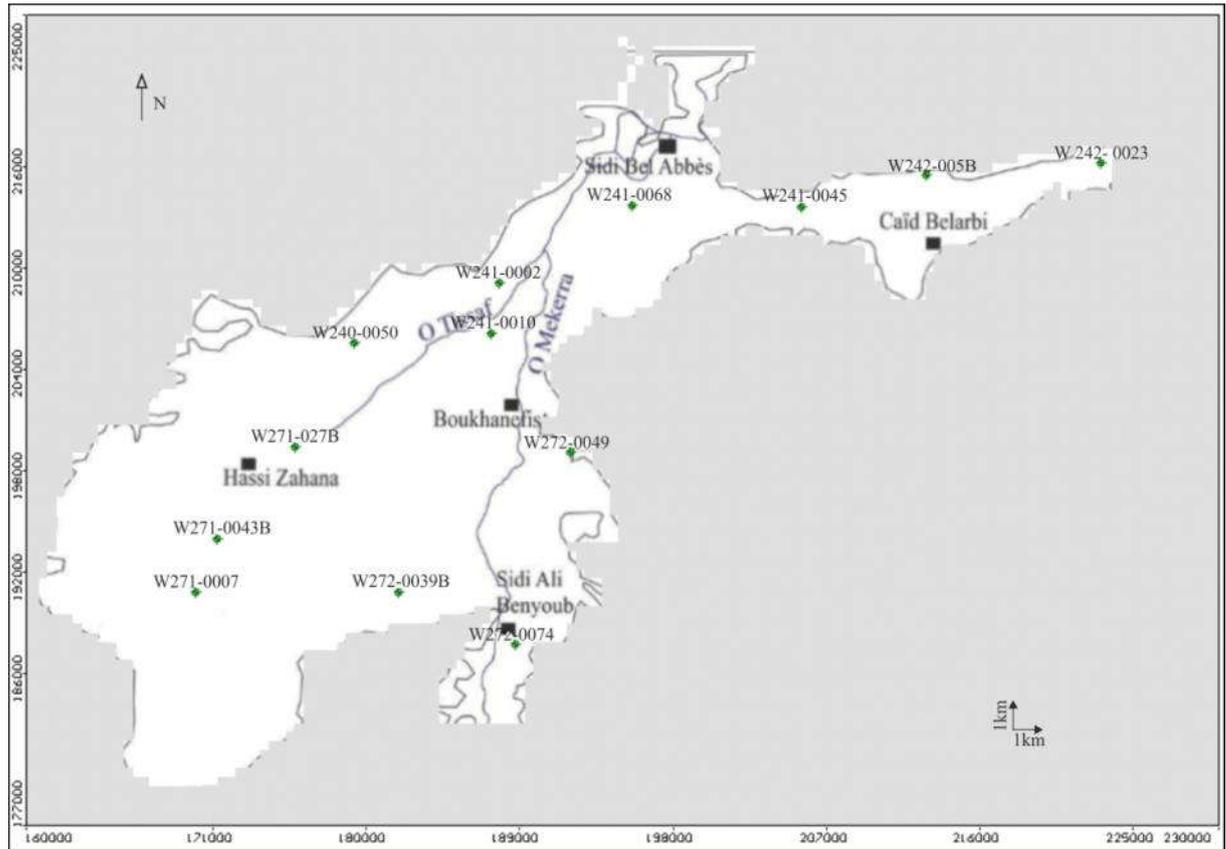


Figure 108. Ouvrages de calibration du le modèle.

### II.2.3.2.1- Analyse des chroniques piézométriques :

L'étude des chroniques piézométriques a concerné les 13 piézomètres dont les données ont pu être récoltées entre 1998 et 2014 (janvier 1998 - janvier 2007, juillet 2009 - Août 2011 et Septembre 2013 - Décembre 2014) auprès des services de l'ANRH. En raison de la grande extension latérale du système aquifère plio-quaternaire (environ 804 km<sup>2</sup> d'après nos estimations) et du faible nombre de piézomètres, l'étude de l'évolution piézométrique s'est faite par zones géographiques, selon la localisation des 13 points de contrôle. Ainsi, 4 zones ont été distinguées : Nord (Amont du chef lieu de la Wilaya), Est (environ de Caïd Belarbi), Centre (centre de la plaine de Bel Abbès) et Sud (Sud de Hassi Zahana et Sidi Ali Benyoub).

#### II.2.3.2.1.1- Zone Nord :

De la figure 109, il apparaît que le modèle reflète bien l'évolution piézométrique aux niveaux des piézomètres W 241-10 et W241-02, où la différence entre les valeurs observées et calculées est en moyenne inférieure à 2 m pour le premier et 1 m pour le deuxième. Quant au piézomètre W241-68, le décalage entre les valeurs simulées et calculées est plus important variant entre 3 et 5 m. Cela pourrait être dû à la présence d'un grand nombre de puits illégaux

(non modélisés), dont les prélèvements rabaisent encore plus le niveau de la nappe à ce niveau de la plaine.

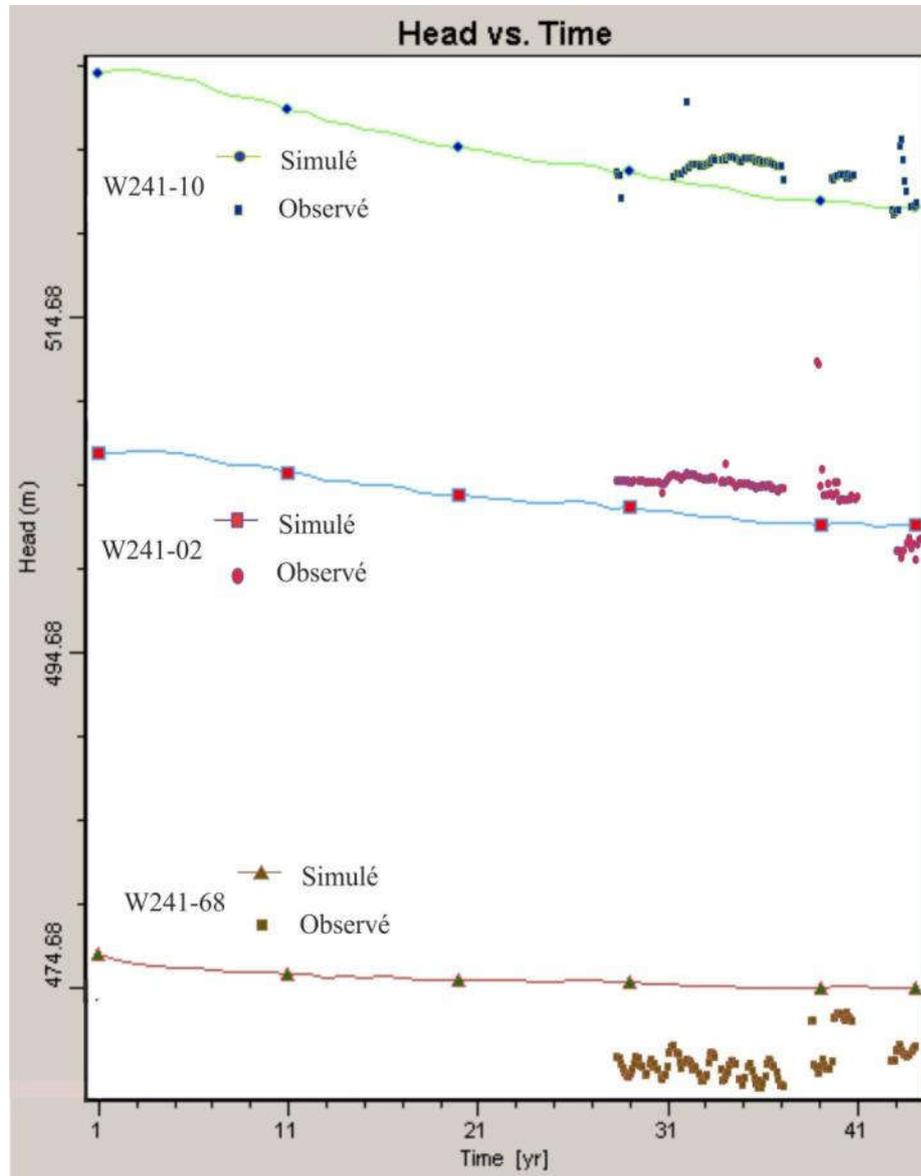


Figure 109. Variation piézométrique simulée – observée dans la zone Nord.

**II.2.3.2.1.2- Zone Est :**

le modèle reproduit bien la tendance piézométrique observée au niveau des trois piézomètres W242-23, W242-05b et W241-45, où l'on enregistre une baisse d'environ 15 mètres entre 1971-2014.

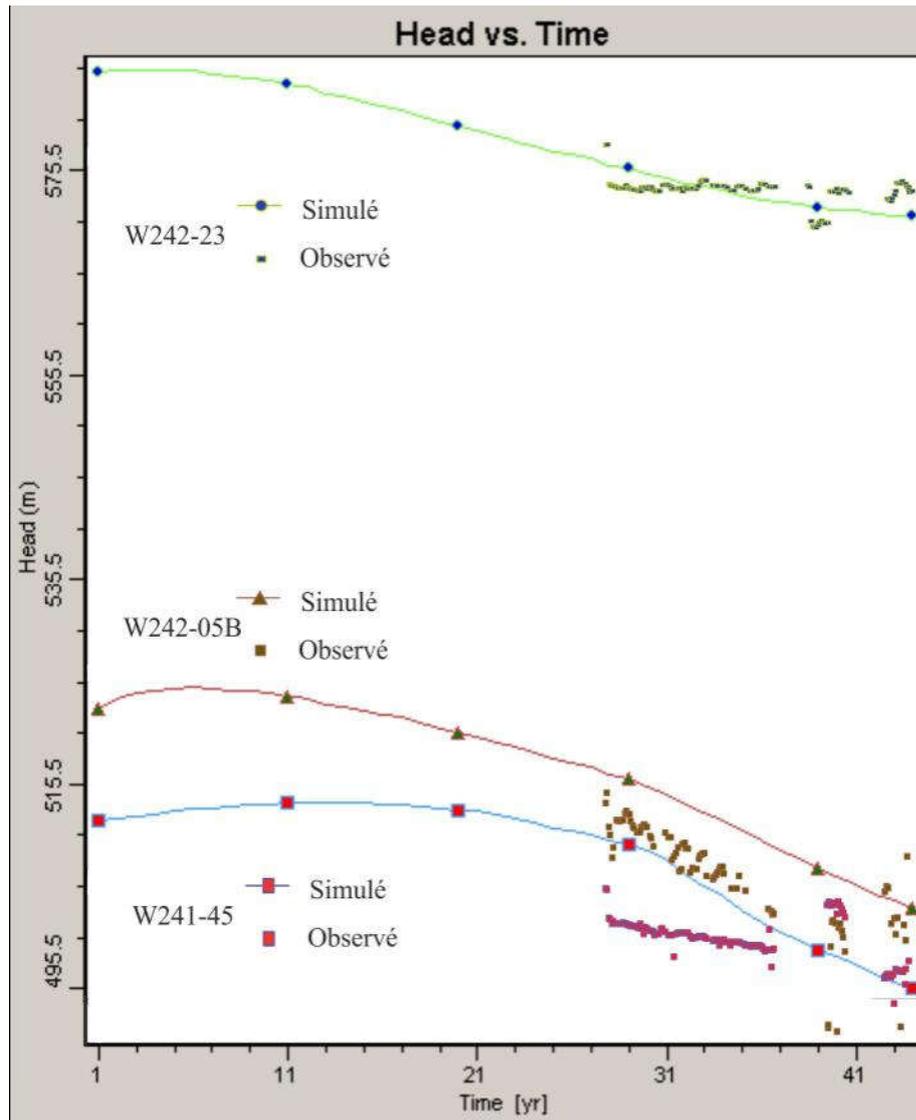


Figure 110. Variation piézométrique simulée – observée dans la zone Est.

#### II.2.3.2.1.3- Zone Centre :

Une augmentation du niveau piézométrique est remarquée pour les piézomètres W272-49 et W240-50 entre 1971-1988 en raison de l'effet de l'approximation initiale faite par ModFlow (existence d'un état antérieur à 1971 non pris en compte) lors du début de la simulation et qui disparaît dans le temps (rapprochement des états simulés avec les réalités sur terrains avec le temps). Après 1988, les valeurs piézométriques simulées pour les trois ouvrages W272-49 et W240-50 et 271-27B sont presque similaires à celles observées avec une baisse du niveau piézométrique de l'ordre de 2 m entre 1971 et 2014.

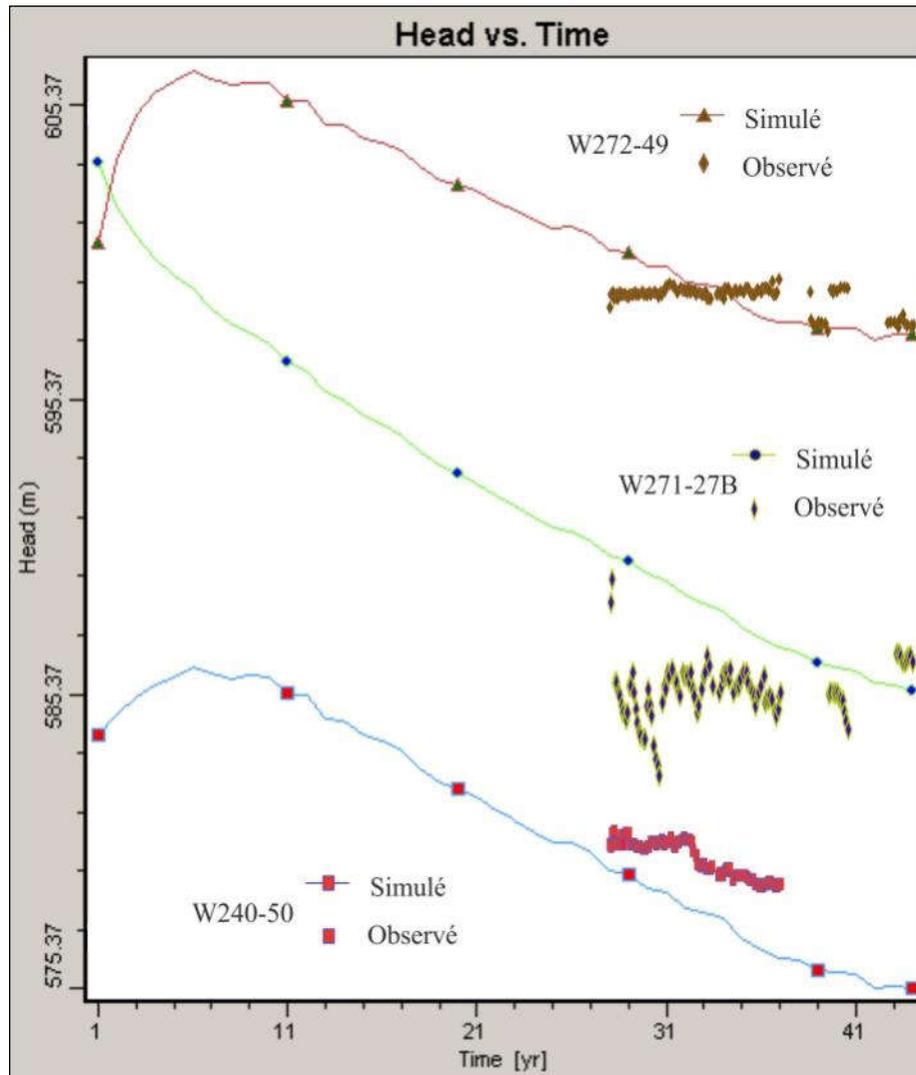


Figure 111. Variation piézométrique simulée – observée dans la zone centre.

#### II.2.3.2.1.4- Zone Sud :

Le modèle reproduit bien l'évolution piézométrique aux niveaux des piézomètres W271-7, W272-74, W271-43B et W272-39B, surtout pour les deux derniers, où la moyenne des différences entre les valeurs observées et calculées est inférieure à 2.5 m pour W272-39B et 1.5 m pour W271-43B. le décalage enregistré à partir de 2001 et 2007, respectivement pour W272-74 et W271-7 serait dû à l'influence de la Mekerra sur la côte piézométrique au niveau du premier ouvrage (variation des hauteurs d'eau dans les Oueds (river stage sous VMF) non prise en considération (hauteurs d'eau constantes pour toute la durée de la simulation) en raison de l'absence de données.) et à une recharge très variable dans le temps ( les écoulements en bordures des domaines modélisés sont très influencés par les conditions aux limites dans les modèles d'écoulement souterrain) par les calcaires de Remaïlia /dolomies de Tlemcen pour le

second (très grande fluctuation du niveau piézométrique au niveau de W271-7 entre 1998 et 2007).

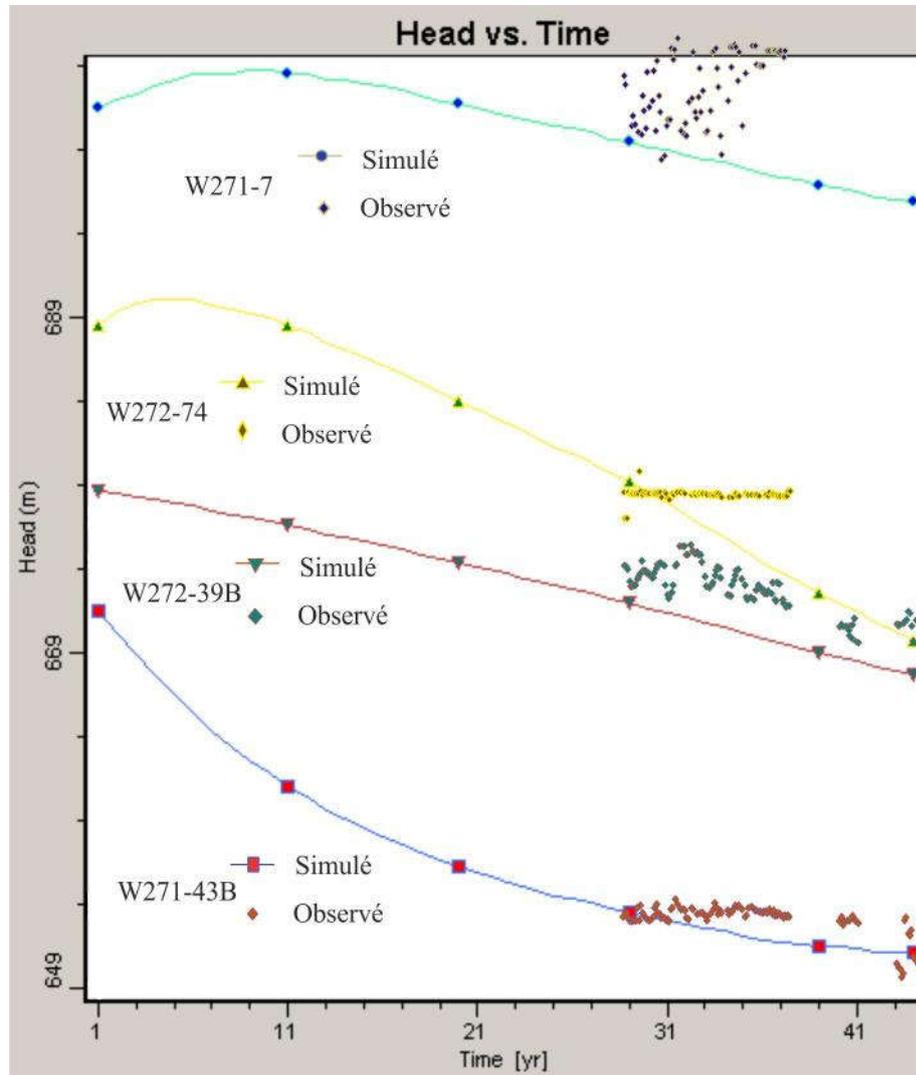


Figure 112. Variation piézométrique simulée – observée dans la zone Sud.

**II.2.3.2.1.5- Baisse du niveau piézométrique :**

Sur le tableau 53, sont présentées les baisses du niveau de la nappe alluviale plio-quaternaire pour chaque piézomètre et zone géographique.

Du tableau 53, on remarque que les plus grandes baisses du niveau piézométrique sont observées dans la zone Est, aux environs de Caïd Belarbi. Cela est dû non seulement à la faible extension des formations aquifères, mais aussi à une pullulation de puits et forages (légaux et illégaux) sur ce pan du secteur d'étude. Par ailleurs, et dû au fait que la grande majorité des eaux du système aquifère convergent vers l'exutoire principal du Rocher, la zone Nord est la moins

affectée par la diminution de la réserve et enregistre par conséquent, les plus faibles baisses du niveau piézométrique.

Tableau 53. Baisse du niveau de la nappe plio-quadernaire entre 1971 et 2014.

Piézomètres	Baisse (m) 1971- 2014	Baisse moyenne (m) par zone géographique
W241-68	2.06	Zone Nord :4.08
W241-02	4.3	
W241-10	7.97	
W242-23	14.35	Zone Est :17.03
W242-05B	19.98	
W241-45	16.78	
W240-50	8.46	Zone Centre :9.71
W272-49	3.05	
W271-27B	17.64	
W271-43B	20.38	Zone Sud :13.95
W272-39B	10.99	
W272-74	18.84	
W271-7	5.59	
		Moyenne aquifère ≈ 11

**II.2.3.2.1.6- Carte piézométrique :**

La carte piézométrique de Décembre 2014 (observée) a été réalisée en se basant sur 10 observations uniquement pour une nappe s'étendant sur plus de 800 km<sup>2</sup>. Ainsi, il va sans dire qu'elle ne doit être prise que comme une approximation générale des tendances piézométriques de l'aquifère plio-quadernaire et non comme une représentation exacte des réalités sur terrain. Nonobstant cela, il apparaît que la carte simulée en Décembre 2014 (figure 113) reproduit assez bien les directions d'écoulement et les gradients hydrauliques de l'aquifère plio-quadernaire. En effet, on observe presque la même baisse du niveau piézométrique entre les deux couples de cartes 1971-2014 simulées et observées.

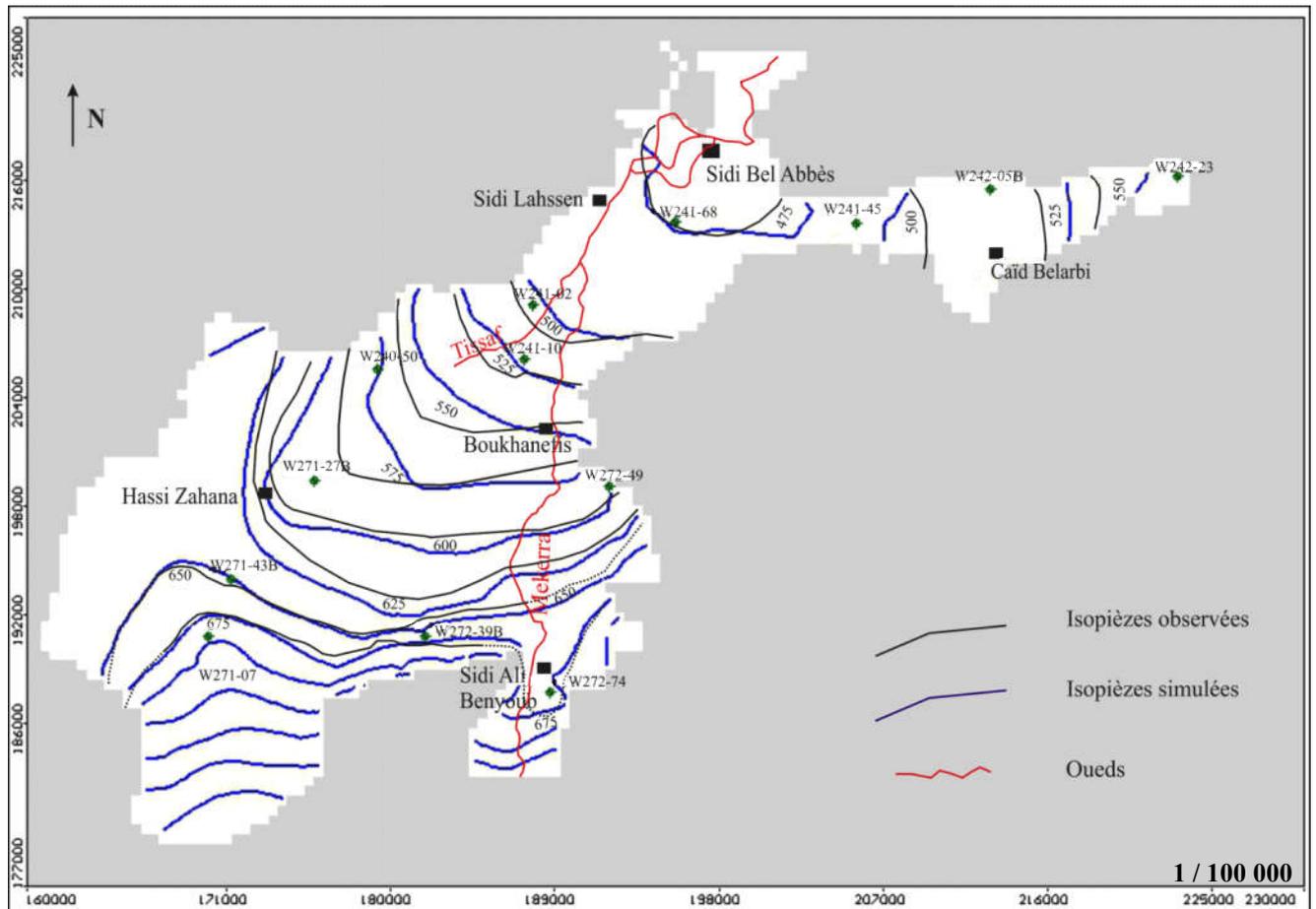


Figure 113. Cartes piézométriques : observée et simulée (Décembre 2014).

### II.2.3.3- Paramètres hydrodynamiques de la calibration:

#### II.2.3.3.1- Perméabilité :

Les valeurs de perméabilité utilisées au début de la modélisation du système aquifère plio-quaternaire ont été obtenues de la carte des transmissivités établie par Sourisseau (1973) ainsi que des épaisseurs des alluvions plio-quaternaires que nous avons estimé. Les perméabilités ont été par la suite réajustées lors de la calibration du modèle et les résultats obtenus sont présentés sur la figure 114.

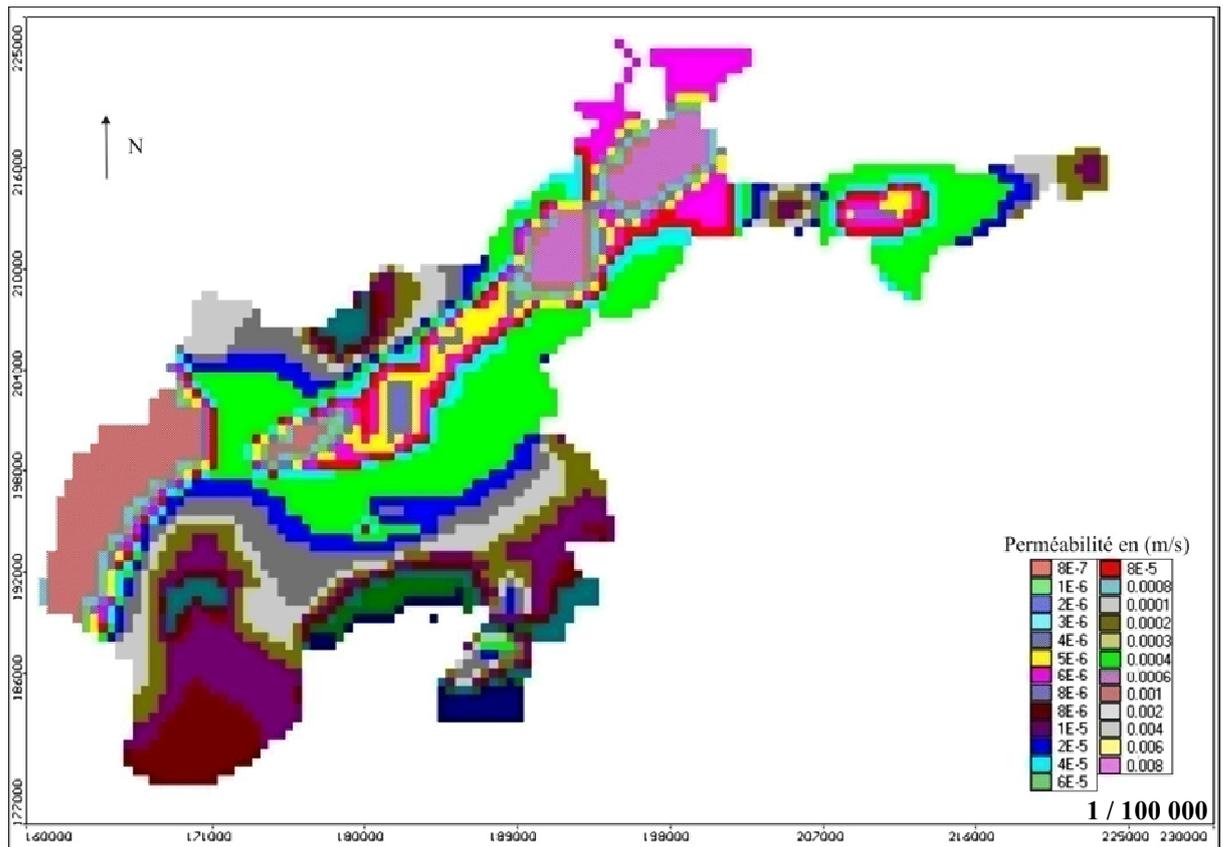


Figure 114. Variation spatiale des perméabilités au niveau de l'aquifère plio-quadernaire.

### III.2.3.3.2- Coefficient d'emmagasinement :

Du fait du manque de données relatives à ce paramètre, les valeurs introduites initialement dans le modèle ont été tirées des cartes des coefficients d'emmagasinement établie par Sourisseau (1972) et celle isopach/limite des conglomérats plio-quadernaire que nous avons réalisé (figure 30), tout en tenant compte de la variation spatiale de la géologie des alluvions plio-quadernaire.

Durant le calage du modèle, le coefficient d'emmagasinement a été ajusté de façon à reproduire au maximum le comportement général de l'aquifère plio-quadernaire (figure 115).

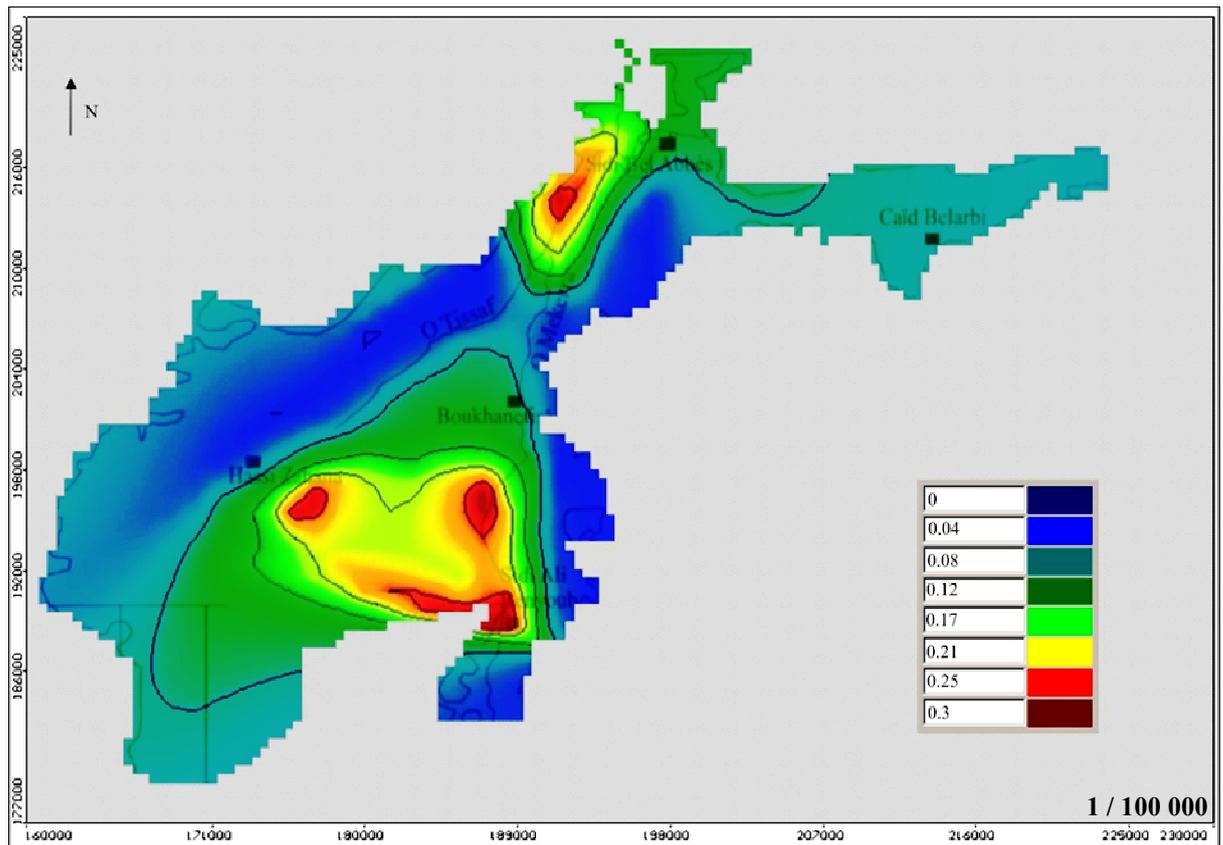


Figure 115. Variation spatiale des valeurs du coefficient d'emmagasinement au niveau de l'aquifère plio-quaternaire.

## II.2.4- Bilan général (1971-2014) :

### II.2.4.1- Entrées :

#### II.2.4.1.1- Recharge par les précipitations :

La recharge de l'aquifère plio-quaternaire est tributaire de la pluviométrie sur la plaine de Bel Abbès et présente de ce fait les mêmes variations interannuelles. Ces dernières sont assez importantes, allant de 71 Mm<sup>3</sup> en 1971 à 15 Mm<sup>3</sup> en 1983. La figure 116 montre que les plus faibles valeurs sont observées entre 1981 (26 Mm<sup>3</sup>/an) et 1989 (28 Mm<sup>3</sup>/an). Ce déficit interannuel de la recharge se traduit par la baisse des volumes d'eau stockés dans l'aquifère plio-quaternaire ; une baisse qui se fait parallèlement à l'augmentation des prélèvements.

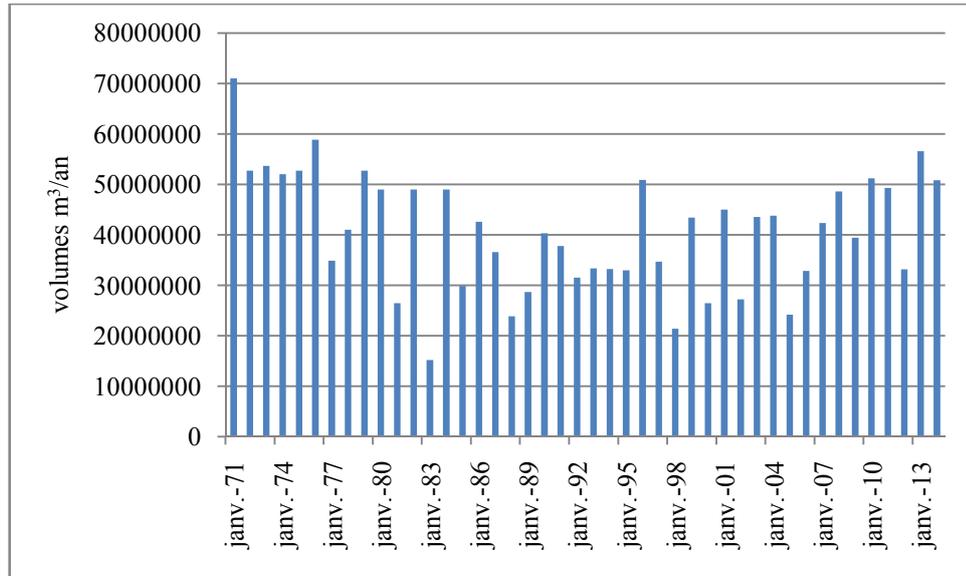


Figure 116. Variation de la recharge de l’aquifère plio-quaternaire entre 1971 et 2014.

**II.2.4.1.2- Apports latéraux :**

Les apports latéraux provenant des aquifères adjacents sont presque toujours supérieurs à 10 Mm<sup>3</sup>/an et dépassent la barre des 15 Mm<sup>3</sup>/an pour les années dont la pluviosité est supérieure à 400 mm/an. Les apports en eaux proviennent essentiellement des grès pliocène de Ténira à l’Est et des calcaires de Rmaïlia/dolomies de Tlemcen jurasico-crétacés au Sud du secteur d’étude.

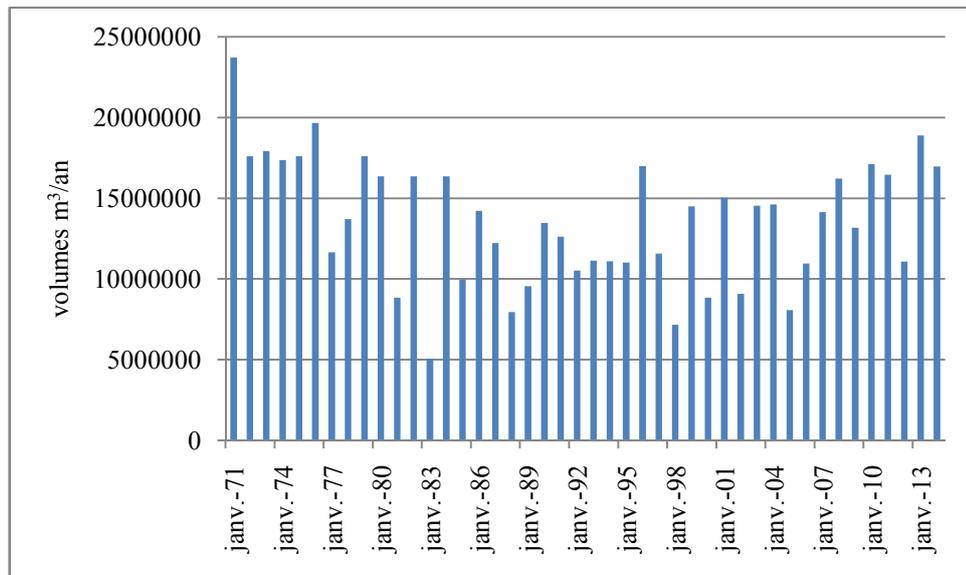


Figure 117. Variation des apports latéraux entre 1971 et 2014.

**II.2.4.1.3- Les Oueds :**

Les volumes infiltrés des Oueds vers la nappe alluviale augmentent à partir de 1975 passant de 15 Mm<sup>3</sup>/an à plus de 24 Mm<sup>3</sup>/an entre 2005 et 2014. Cela est dû à la baisse du niveau piézométrique de la nappe le long des Oueds en raison de l'augmentation considérable des prélèvements, parallèlement à une tendance générale en baisse de la pluviosité entre le début et la fin de la simulation.

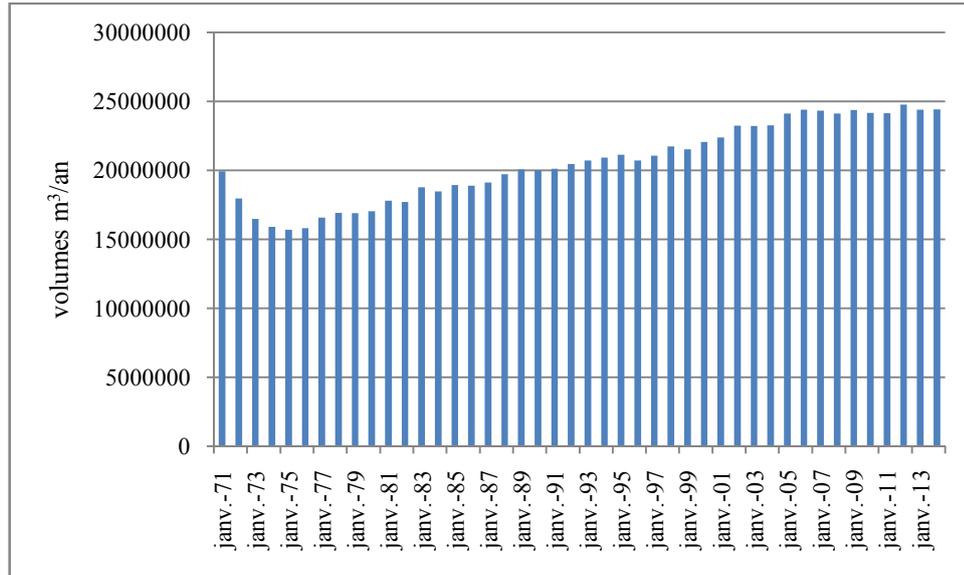


Figure 118. Variation de l'infiltration par les Oueds vers l'aquifère entre 1971 et 2014.

**II.2.4.2- Sorties :****II.2.4.2.1- Les Oueds :**

Comme il a été mentionné auparavant, la majorité des eaux du système aquifère plio-quaternaire convergent vers l'exutoire du Rocher. Ainsi les plus grands volumes extraits à la nappe alluviale sont drainés par les Oueds (essentiellement la Mekerra) et véhiculés hors de la plaine de Bel Abbès au Nord vers l'Oued Sig. L'examen de la figure 119 permet de dire que les volumes drainés par les Oueds sont assez importants au début de la simulation, surtout entre 1971 et 1980. Par ailleurs, il apparaît qu'à partir de 1989, les volumes d'eau drainés par les Oueds sont presque identiques à ceux estimés par Sourisseau en 1972 (48.5 Mm<sup>3</sup>/an).



Figure 119. Evolution des volumes d'eau drainés par les Oueds de l'aquifère plio-quaternaire entre 1971 et 2014.

**II.2.4.2.2- Les prélèvements :**

Les prélèvements représentent la deuxième source des sorties après les Oueds au début de la simulation et deviennent la cause majeure du déstockage de l'aquifère plio-quaternaire vers la fin de la simulation. Les Prélèvement totaux augmentent sur deux périodes bien distinctes, de 30 à 42 Mm<sup>3</sup>/an, entre 1971 et 2000 et de 51 à 58 Mm<sup>3</sup>/an entre 2001 (lancement du projet FNDRA) et 2014.

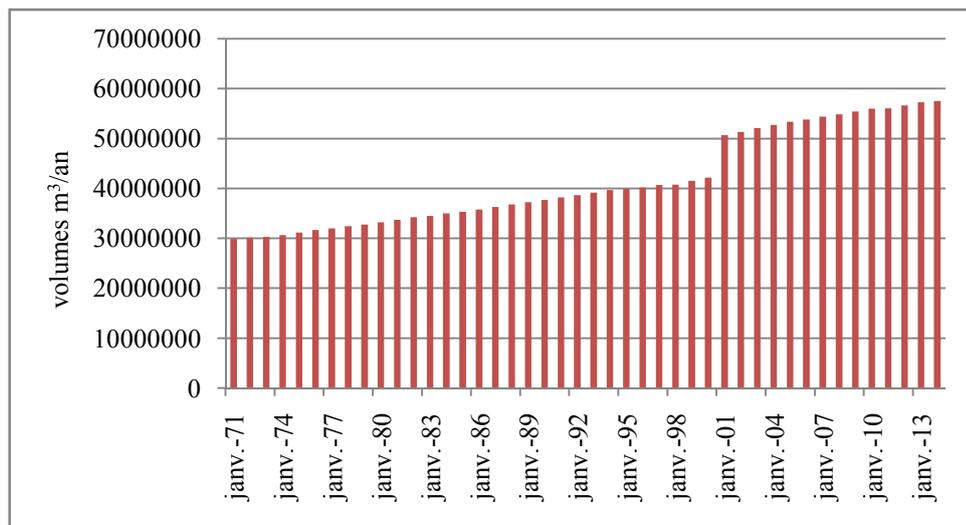


Figure 120. Variation des prélèvements globaux entre 1971 et 2014.

**II.2.4.2.3- Les drains :**

Les drains introduits dans le modèle correspondent à la dérivation de la Mekerra vers le Barrage Sarno. A l'exception des années 1971, 72 et 73 (début de la simulation), les volumes simulés, transférés vers le barrage Sarno correspondent aux débits obtenus par jaugeage sur la dérivation de la Mekerra au niveau de la station Amont Sidi Bel Abbès (125 l/s en moyenne entre 1970 et 2006) et qui avoisinent les 4 Mm<sup>3</sup>/an.

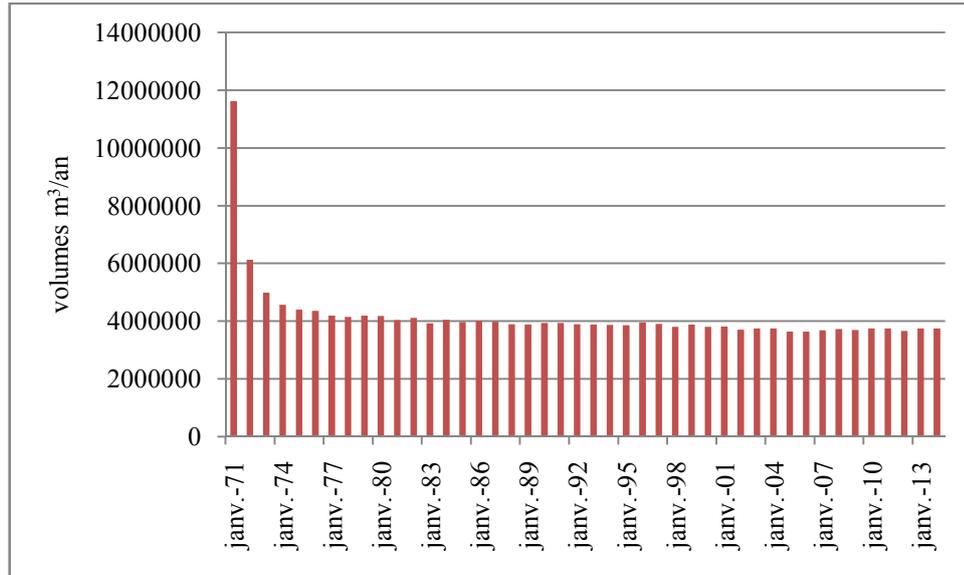


Figure 121. Variation des volumes transférés vers le barrage Sarno entre 1971 et 2014.

**II.2.4.3- Variations des réserves :**

Dans le but d'avoir une idée plus ample sur les volumes totaux entrants et sortants du système aquifère plio-quaternaire, nous avons établi un bilan global interannuel et cumulatif des entrées et sorties entre 1971 et 2014.

L'allure en dent de scie de la figure 122 est le résultat des grandes variations de la pluviométrie sur la plaine de Bel Abbès, couplée à une demande de plus en plus accrue en eau. De la figure 122, il ressort que la vidange de l'aquifère se fait sur toute la période de simulation et de façon très variée. Les années 81, 83, 88, 98, 02 et 05 coïncident avec les plus fortes baisses annuelles de la réserve en eau avec des volumes égaux ou supérieurs à -40 Mm<sup>3</sup>/an. Les plus faibles baisses de la réserve par contre sont enregistrées pour les années 72-75, 79, 84, 96, 2010 et 2013, où la différence entre les sorties et les entrées est inférieure ou égale à -10 Mm<sup>3</sup>/an. De manière générale (pour les 28 années restantes), il apparaît que les baisses de la réserve oscillent entre ces deux limites.

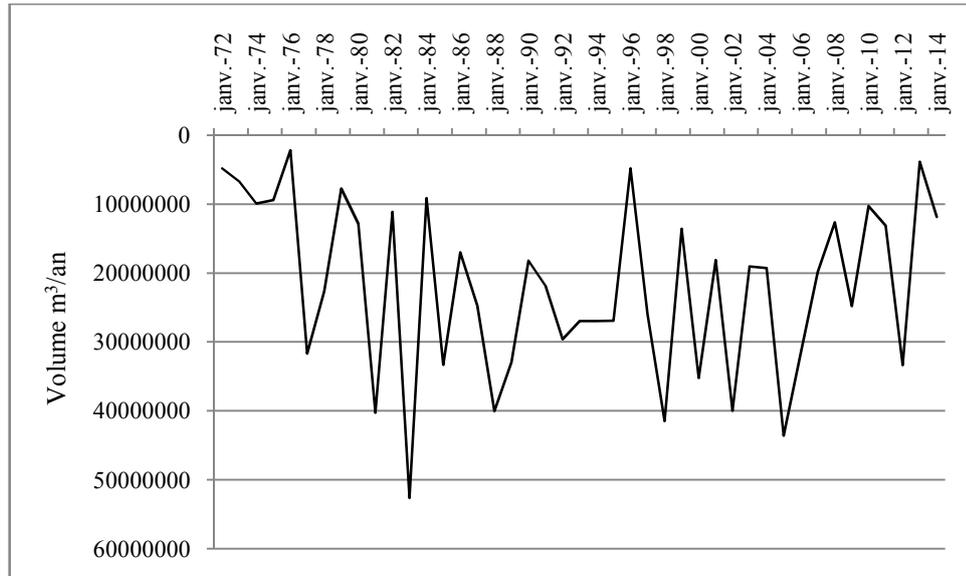


Figure 122. Variation interannuelle de la réserve de l'aquifère plio-quaternaire entre 1971 et 2014.

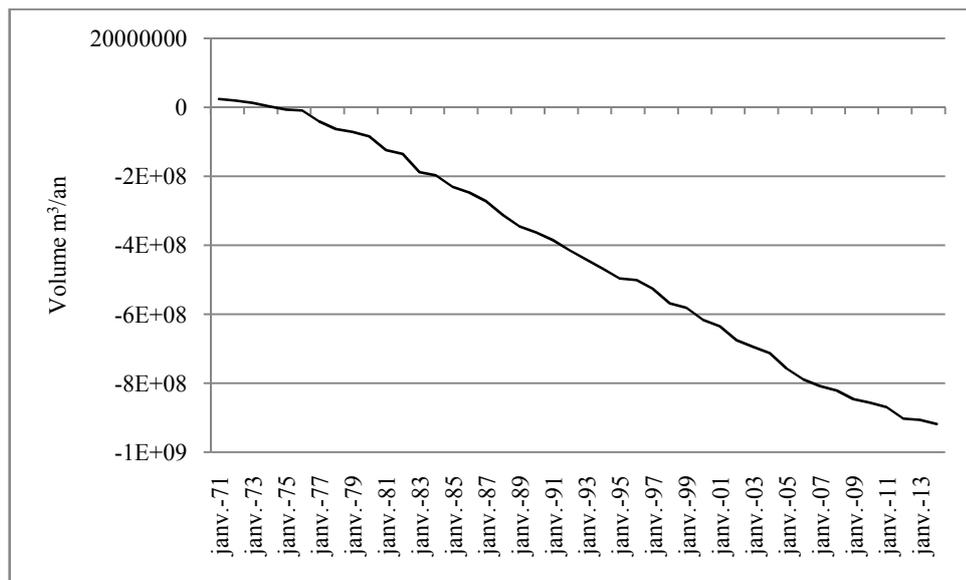


Figure 123. Bilan cumulé ( $\Sigma$  entrées –  $\Sigma$  sorties) de l'aquifère plio-quaternaire entre 1971 et 2014.

Le terme surexploitation est employé quand la quantité d'eau extraite d'un système hydrogéologique donné dépasse sa recharge, au point où cela causera des effets indésirables persistants (baisse et détérioration continues des niveaux d'eau et de sa qualité), sur des périodes suffisamment longues (par opposition aux périodes sèches limitées dans le temps), qu'il devienne virtuellement impossible pour le système de retrouver son état normal, même durant

les années humides (Sima et al, 2013; Madani & Dinar, 2013; Custodio, 2000a, 2000b; Candela et al, 1999; Simmers et al, 1991).

De ce qui vient de suivre, il apparaît clairement que l'aquifère plio-quadernaire endure une surexploitation qui se poursuit déjà depuis des années.

La figure 123 renseigne clairement sur une tendance au déstockage des alluvions plio-quadernaires entre 1971 et 2014. En effet, les volumes cumulatifs  $\sum$  entrées –  $\sum$  sorties atteignent presque 1 Milliard de m<sup>3</sup> (920 Mm<sup>3</sup>/an) à la fin de la simulation ; un constat confirmé par la baisse du niveau de la nappe sur toute l'étendue de l'aquifère plio-quadernaire de l'ordre de 11 m en moyenne.

## **II.2.5- Prédications :**

### **II.2.5.1- Démarche adoptée :**

La démarche que nous avons adoptée pour simuler les comportements futurs du système aquifère plio-quadernaire s'est faite en supposant 3 scénarios d'exploitation sur une période de 15 ans de 2015 à 2030. Cette durée, tout en étant suffisamment longue pour permettre l'étude de la réactivité de l'aquifère, est également assez courte pour admettre certaines prédictions relatives à l'évolution des deux paramètres, prélèvements et recharge pluviométrique dans la plaine de Bel Abbès.

Il est important de signaler qu'il est de coutume que la durée des prédictions soit égale à celle de la simulation. Cependant, et en raison du manque à la fois quantitatif et qualitatif des données utilisées dans le modèle, il nous est apparu que des prédictions faites sur 44 ans, auraient été, le moins que l'on puisse dire, irrationnelles.

#### **II.2.5.1.1- Scénario 1 :**

Dans ce scénario, on suppose que les prélèvements AEP et agricoles continuent d'augmenter entre 2015 et 2030 et on maintient les prélèvements industriels constants.

L'estimation des prélèvements AEP pour ce scénario s'est basée sur l'évolution de la population de la Wilaya de Bel Abbès, qui, depuis 2008, s'accroît de 1.57 % chaque année.

Quant aux prélèvements agricoles, une augmentation annuelle (correspondant à un accroissement annuel supposé de la surface irriguée) de l'ordre de 0.8 % a été retenue.

Le scénario 1 suppose également une pluviométrie de l'ordre de 338mm/an correspondant à la moyenne générale des précipitations entre 1971 et 2014.

**II.2.5.1.2- Scénario 2 (état intermédiaire):**

Le scénario 2 a été imaginé comme une situation intermédiaire entre les scénarios 1 et 3. Dans ce scénario, l'évolution des prélèvements totaux est semblable à celle du scénario 1. La pluviométrie est par contre estimée pour caractériser une période sèche. La valeur choisie pour ce scénario est égale à 250 mm/an. Ce taux de pluviosité est assez représentatif des périodes déficitaires observées sur la plaine de Bel Abbès.

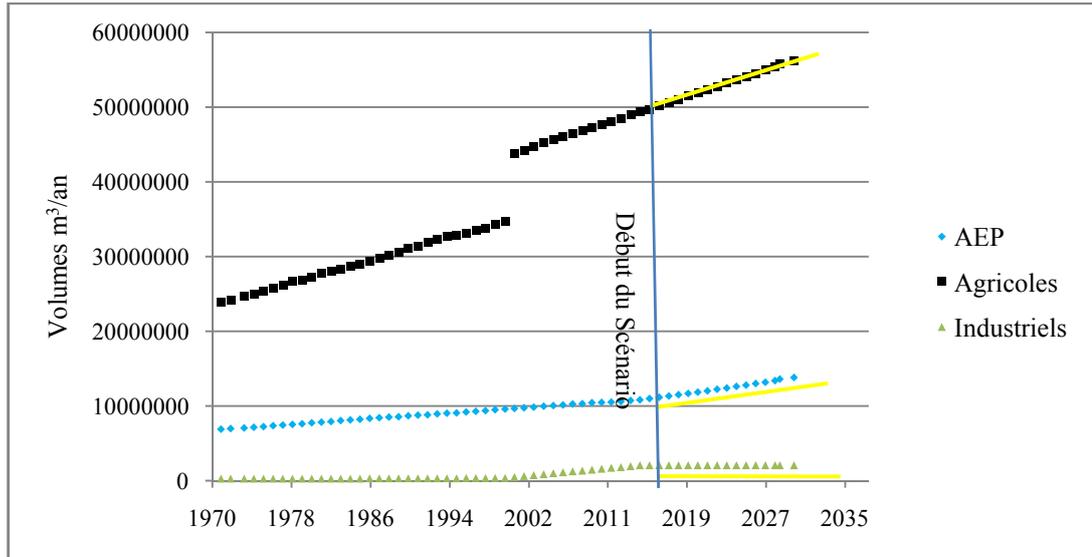


Figure 124. Evolution des prélèvements globaux retenus pour les scénarios 1 et 2.

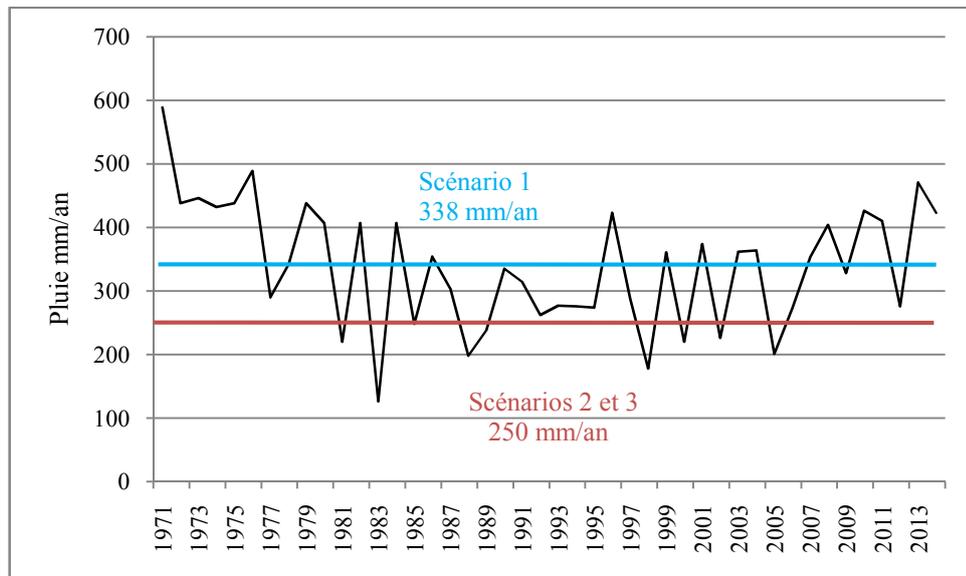


Figure 125. Moyennes pluviométriques retenues pour les scénarios 1, 2 et 3.

Le contraste entre les deux scénarios 1 et 2 permet une comparaison des réactivités du système aquifère plio-quaternaire sous conditions supposées normales, à la fois en période humide et sèche.

### II.2.5.1.3 - Scénario 3 :

Le scénario 3 simule une augmentation considérable des prélèvements AEP et agricoles selon des pourcentages annuels respectifs égaux à 3 et 2 % parallèlement à une recharge faible (250 mm/an), caractéristique d'une période sèche.

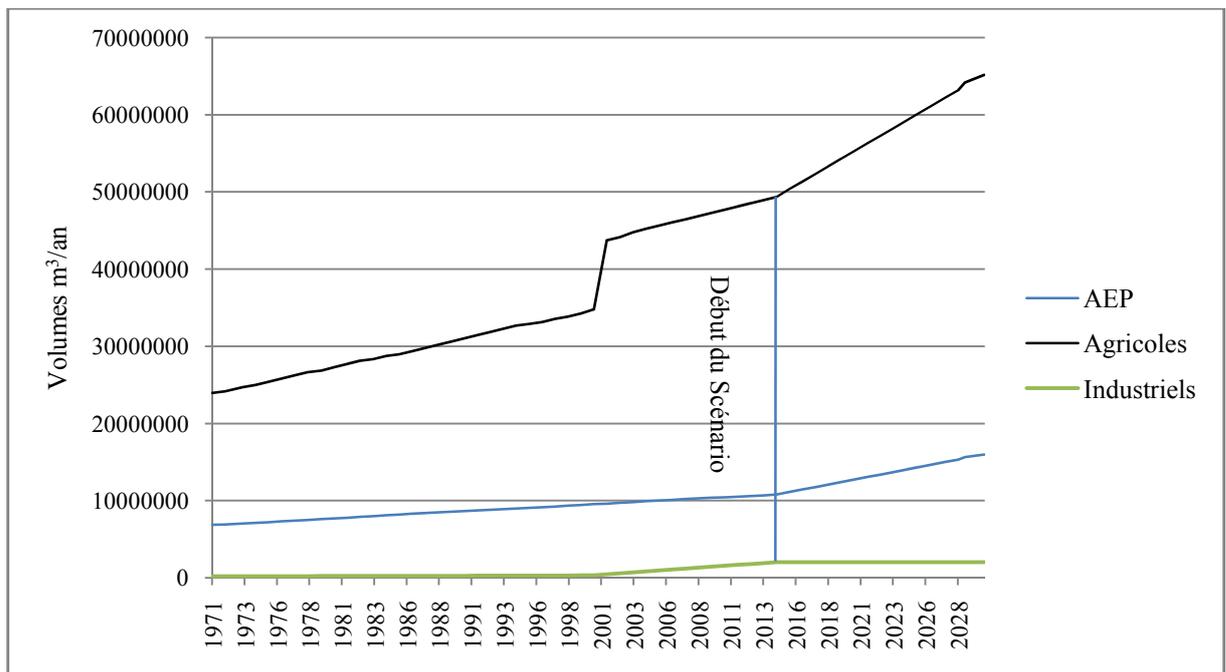


Figure 126. Evolution des prélèvements totaux pour le scénario 3.

## II.2.5.2 - Résultats et interprétations :

### II.2.5.2.1- Scénario 1 :

Après la fin de la simulation, un nombre très réduit de cellules sèches (dénoyées) apparaît sur la carte piézométrique de Décembre 2030. Ce problème a été remédié sous VMF en augmentant l'épaisseur de ces cellules (20 m) parallèlement au réajustement des valeurs de perméabilités qui leurs sont respectives ( $\text{Transmissivité (m}^2/\text{s)} = K \text{ (m/s)} * \text{Epaisseur (m)}$ ).

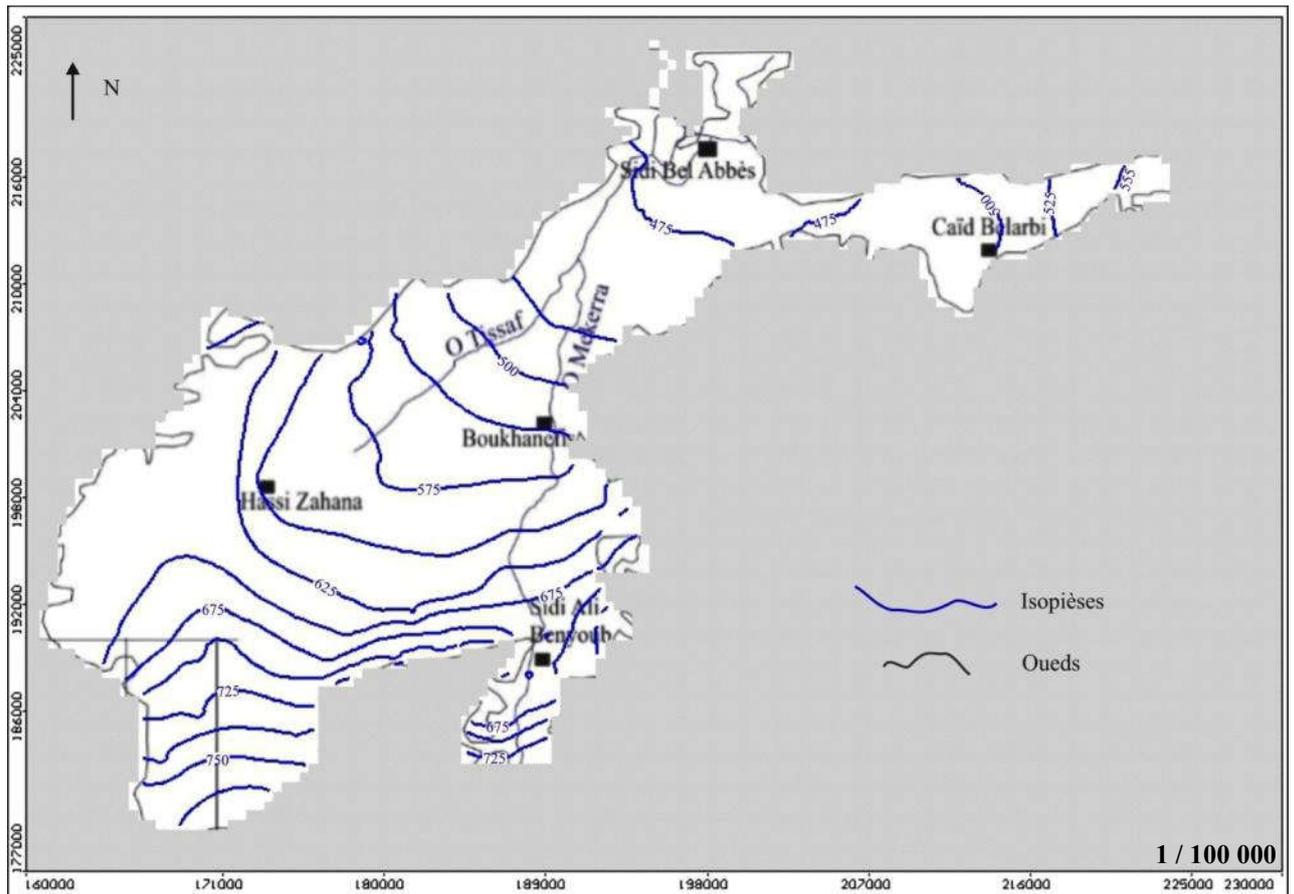


Figure 127. Carte piézométrique de l'aquifère plio-quaternaire en 2030 (scénario 1).

La carte piézométrique fait clairement ressortir la baisse du niveau de la nappe alluviale, surtout à l'Est de Caïd Belarbi et au Sud de Benbadis.

Le tableau 44 et la figure 128 dressent un état des lieux de l'évolution générale de la piézométrie de l'aquifère plio-quaternaire entre 2014 et 2030 selon le scénario 1.

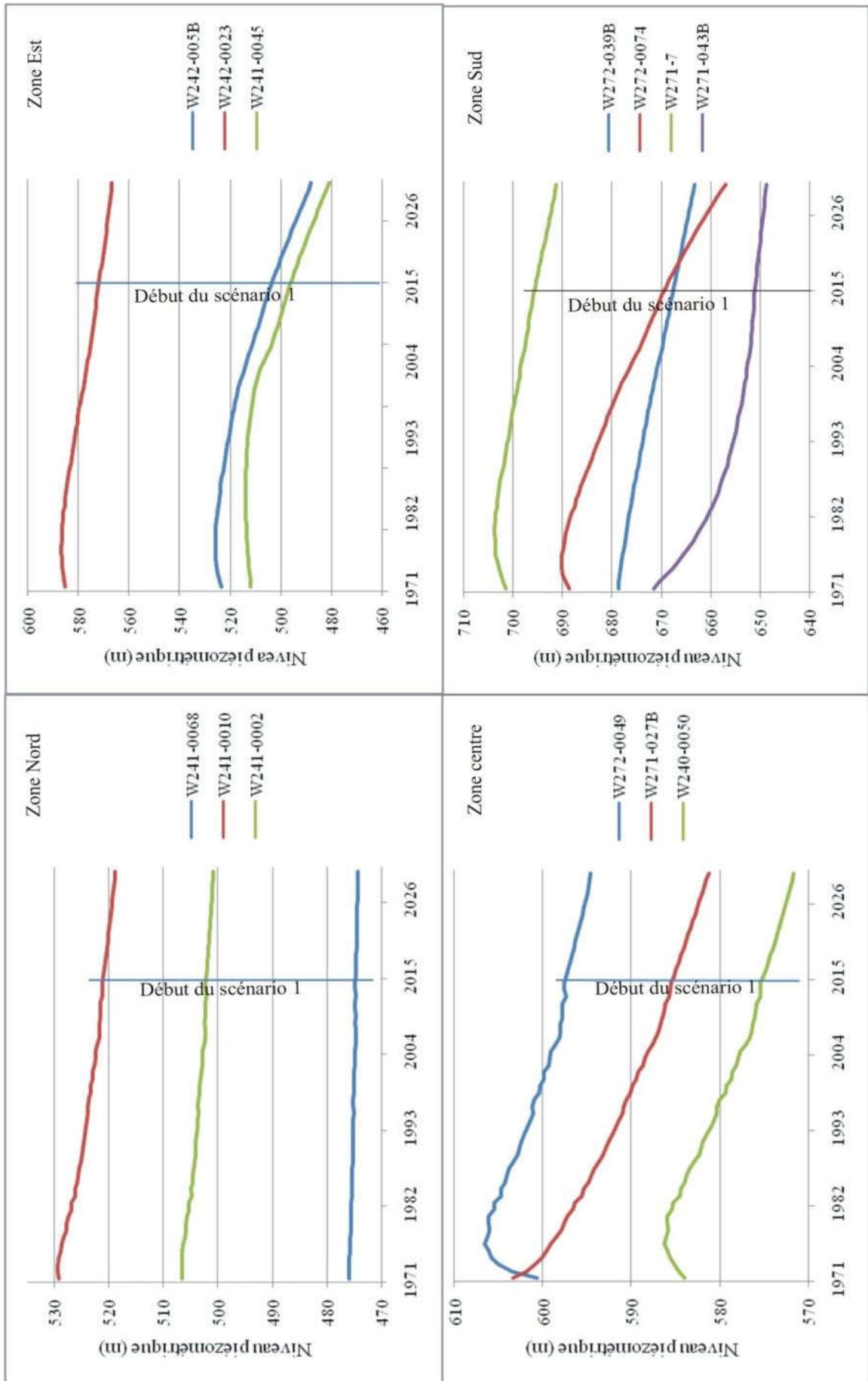


Figure 128. Evolution piézométrique de l'aquifère plio-quaternaire selon le scénario 1.

Tableau 54. Baisse du niveau de la nappe selon le scénario 1.

Piézomètre	Baisse (m) 2014 - 2030	Baisse moyenne (m) par zone géographique
W241-68	0.38	Zone Nord : 1.13
W241-02	1.29	
W241-10	1.73	
W242-23	5.83	Zone Est : 13.05
W242-05B	16.88	
W241-45	16.54	
W240-50	3.74	Zone Centre : 3.33
W272-49	3	
W271-27B	3.26	
W271-43B	2.45	Zone Sud : 6.11
W272-39B	4.5	
W272-74	12.79	
W271-7	4.7	

Du tableau 54, on constate que la baisse du niveau piézométrique est très réduite au Nord de la nappe et cela en raison de la convergence des eaux dans cette direction, vers l'exutoire principale du Rocher. La zone Est est la plus affectée par la baisse du niveau piézométrique, en raison de la faible extension latérale et verticale des formations aquifères dans ce secteur de la zone d'étude.

La carte d'isoprofondeur de la nappe pli-quadernaire (figure 129) en 2030 montre très bien que celle-ci est beaucoup plus profonde à l'Est de Caïd Belarbi et au Sud de la plaine. Elle reste toutefois proche de la surface en zone Nord et centre à environ 20 m de profondeur.

La carte du rabattement du niveau de la nappe entre 2014 et 2030 (figure 130) montre que les plus importantes baisses sont à l'Est (3 à 17 m) et au Sud de Sidi Ali Benyoub (2 à 11 m). Sur le reste de la nappe, il apparaît que l'abaissement du niveau de la nappe reste assez réduit, à hauteur de 2 m. La baisse relativement faible est due à la recharge stable et appréciable (50.7 mm/an) supposée dans ce scénario.

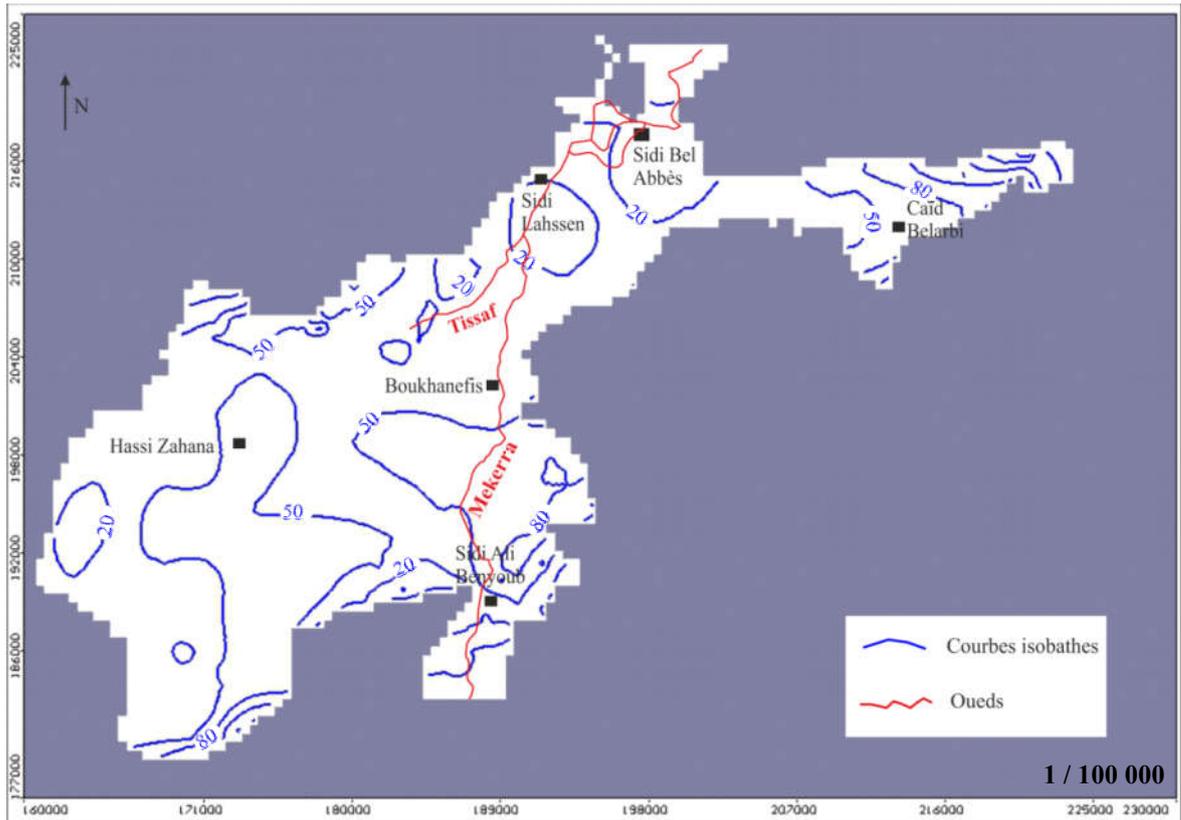


Figure 129. Profondeur de la nappe en 2030, selon le scénario 1.

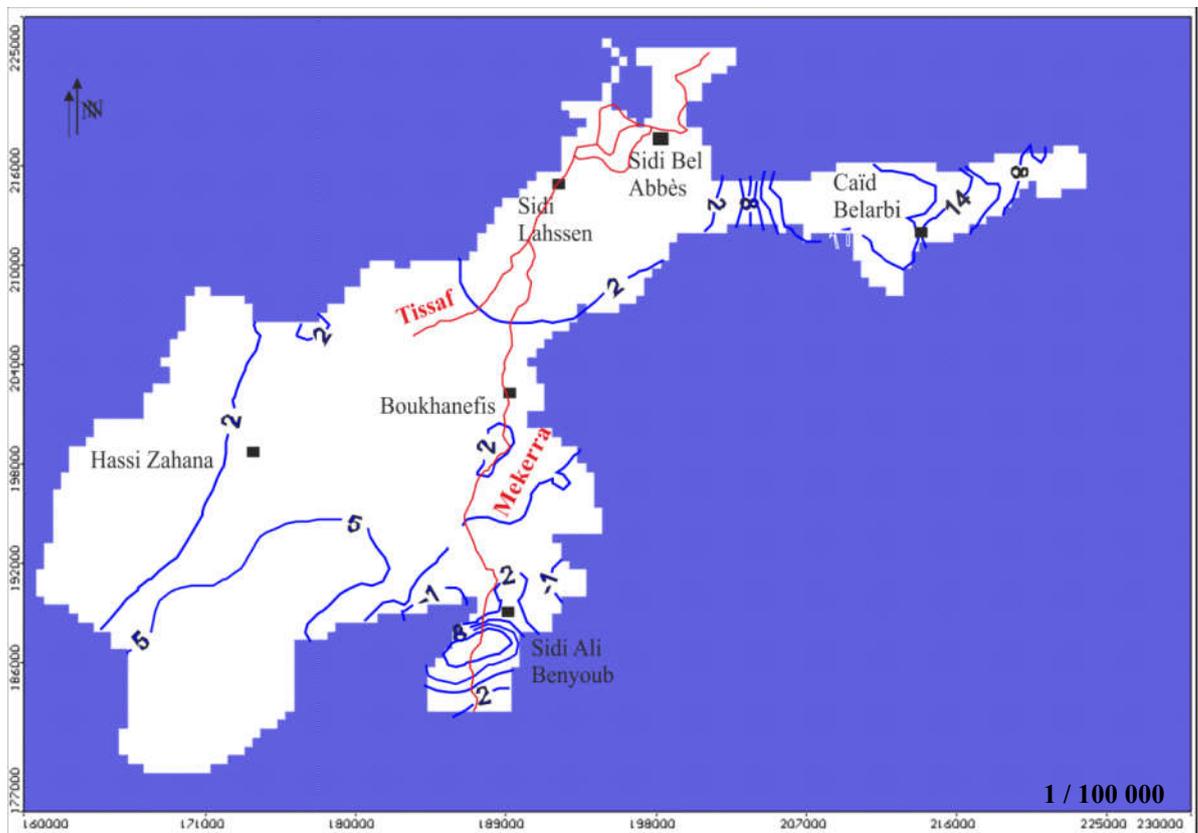


Figure 130. Rabattement de la nappe entre 2014 et 2030 selon le scénario 1.

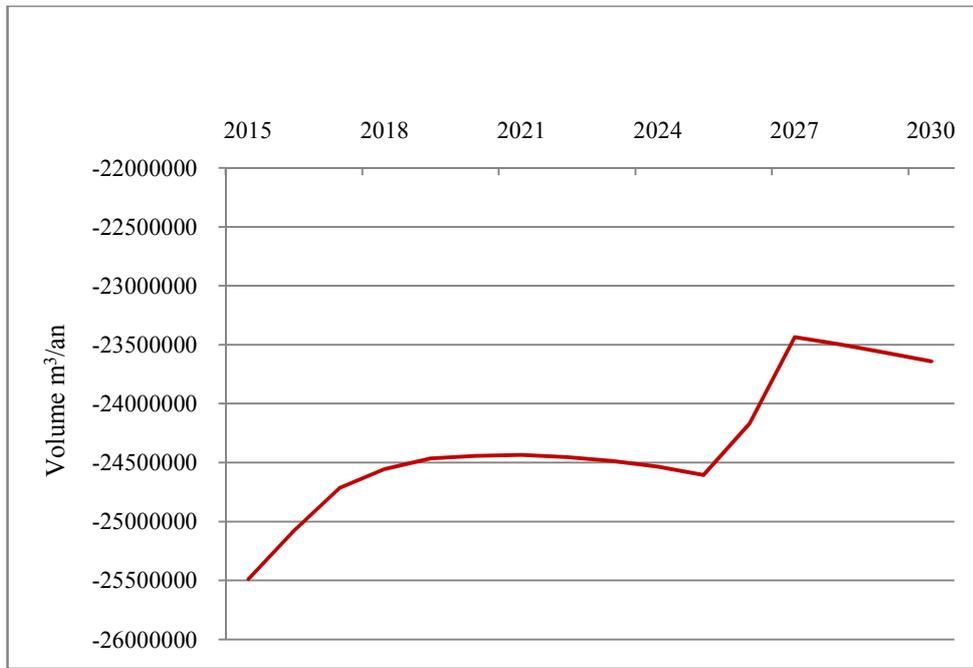


Figure 131. Déstockage de l'aquifère plio-quadernaire selon le scénario 1.

Le déstockage de l'aquifère pour le scénario 1 reste presque constant variant entre 23.5 et 25.5 Mm<sup>3</sup>/an entre 2015 et 2030, avec toutefois, une tendance générale à la baisse, favorisée par une recharge moyenne constante.

La comparaison des bilans des années 2014 et 2030 montre que l'évolution du système aquifère plio-quadernaire selon le scénario 1 se traduit par une multiplication par 2 des volumes déstockés.

#### II.2.5.2.2- Scénario 2 :

La carte piézométrique de 2030 de l'aquifère plio-quadernaire résultant de la deuxième simulation ressemble à celle obtenue pour le premier scénario. Néanmoins, un recul assez net des isopièzes est observé à l'Est de Caïd Belarbi et aux environs de Sidi Ali Benyoub (figure 132).

La baisse du niveau de la nappe entre les scénarios 1 et 2 est assez réduite, surtout en avançant vers l'exutoire du Rocher comme on peut le constater au niveau du piézomètre W241-68 (figure 133). Ce pan du secteur d'étude, étant la zone de transit principale des eaux du système aquifère plio-quadernaire vers l'exutoire du Rocher, reste ainsi faiblement affecté par la baisse du niveau piézométrique.

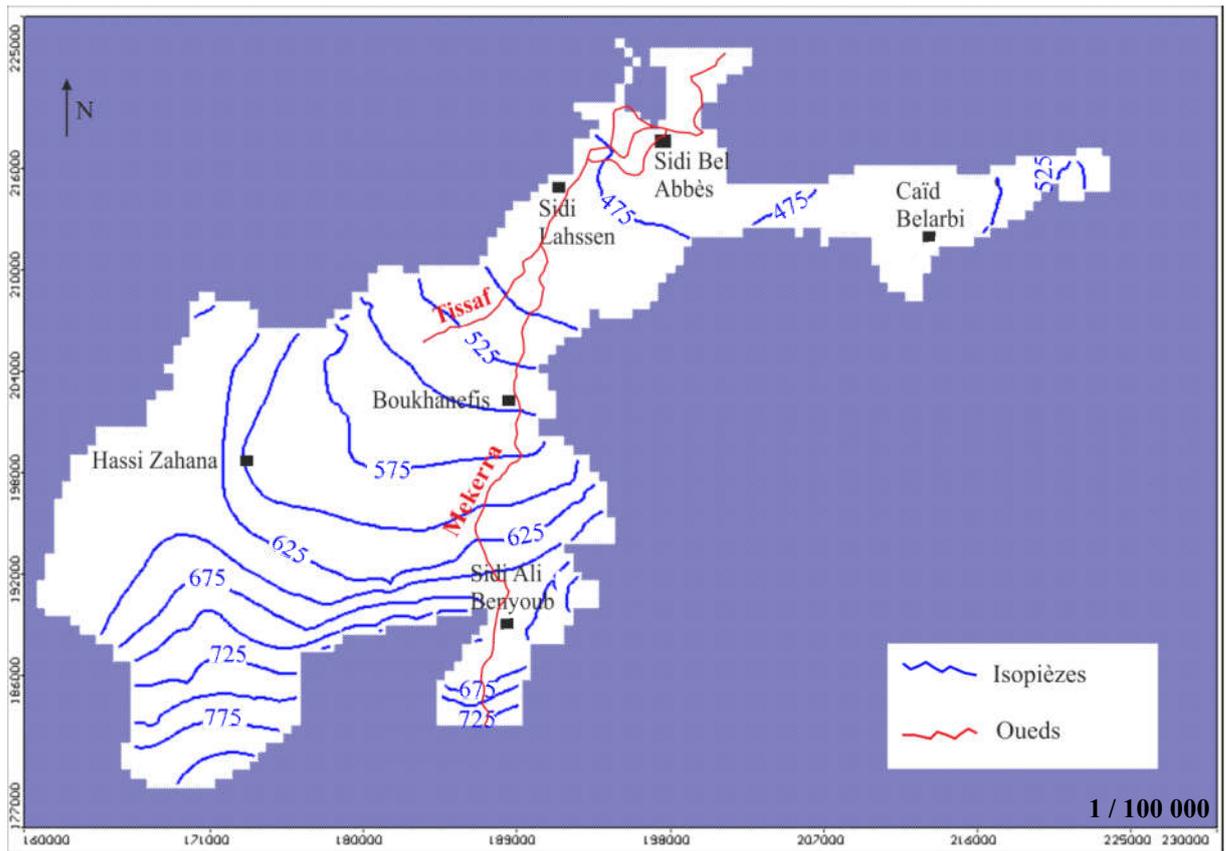


Figure 132. Carte piézométrique de la nappe plio-quaternaire en 2030 (scénario 2).

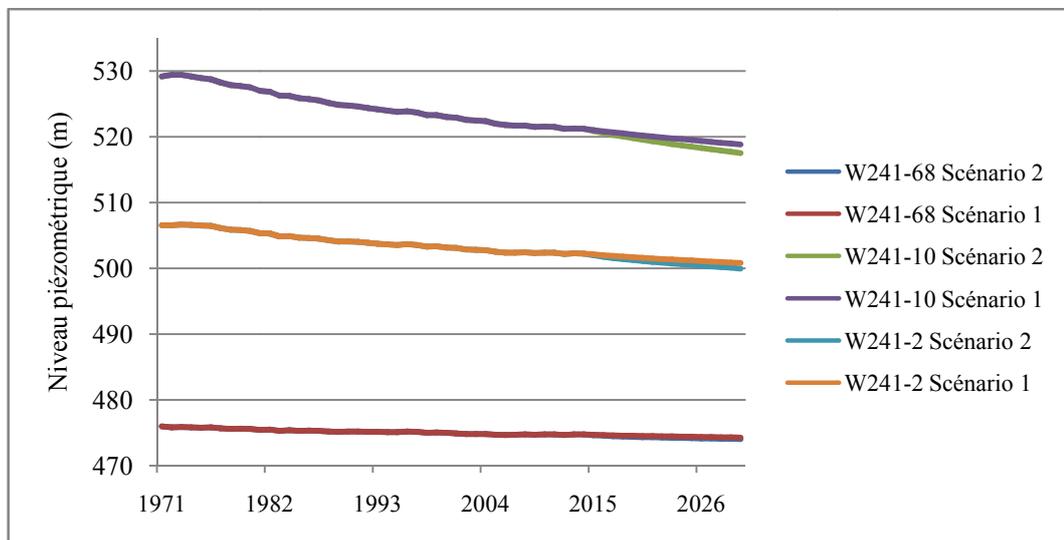


Figure 133. Evolution piézométrique de la nappe plio-quaternaire en zone Nord (scénarios 1 et 2).

La baisse du niveau piézométrique est maximale dans la zone Est et Sud, surtout aux environs des piézomètres W241-45 et W272-74, où l’extension des alluvions plio-quaternaires est assez faible, notamment à Caïd Belarbi et au Sud de Sidi Ali Benyoub.

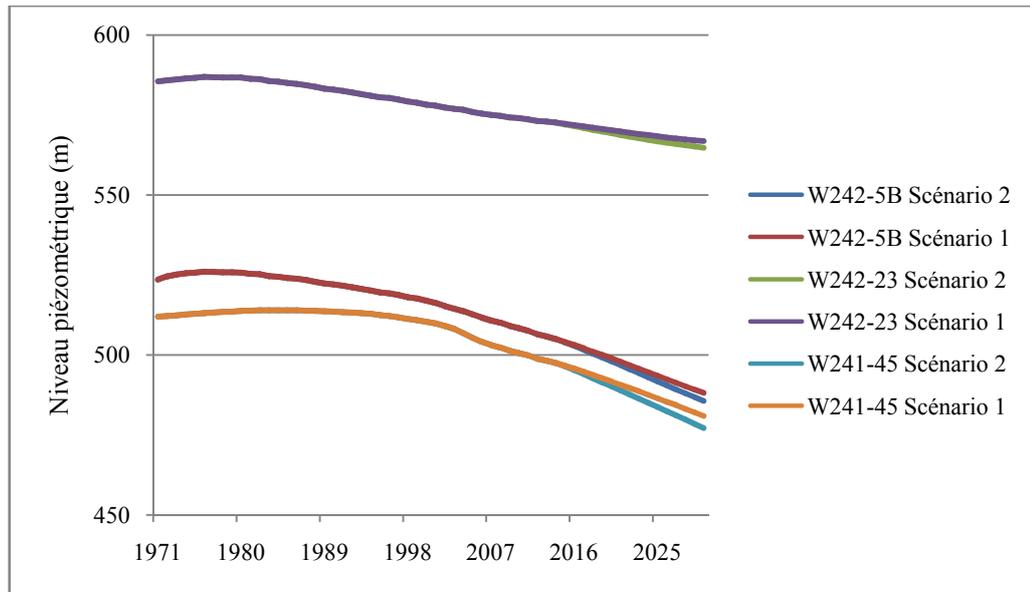


Figure 134. Evolution piézométrique de la nappe plio-quadernaire en zone Est (scénarios 1 et 2).

Dans le centre de la plaine, le rabaissement de la nappe semble se maintenir à environ 2.5 m entre les deux scénarios (W272-49 : 2.5 m, W271-27B : 2.1 m, W240-50 : 2.9 m).

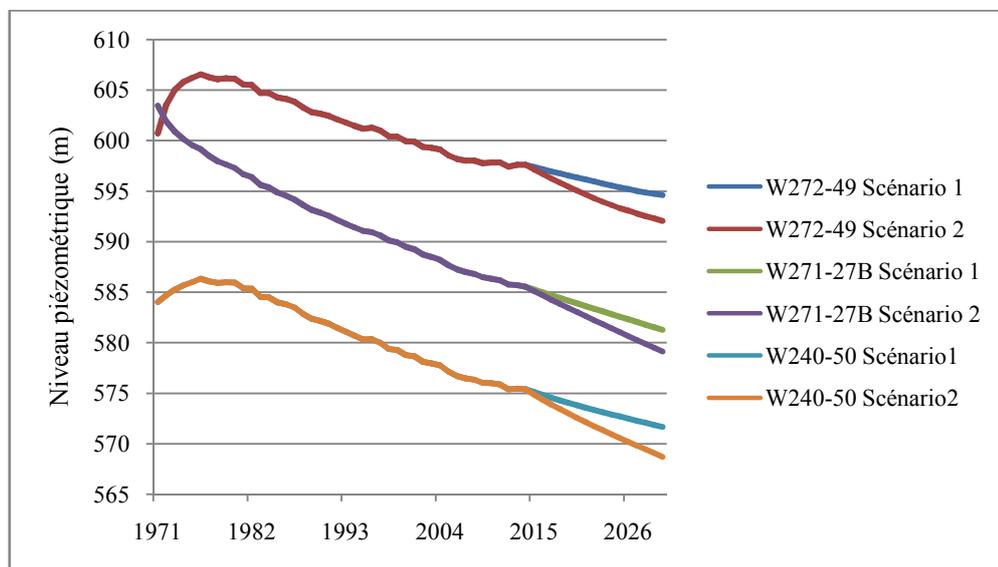


Figure 135. Evolution piézométrique de la nappe plio-quadernaire en zone centre (scénarios 1 et 2).

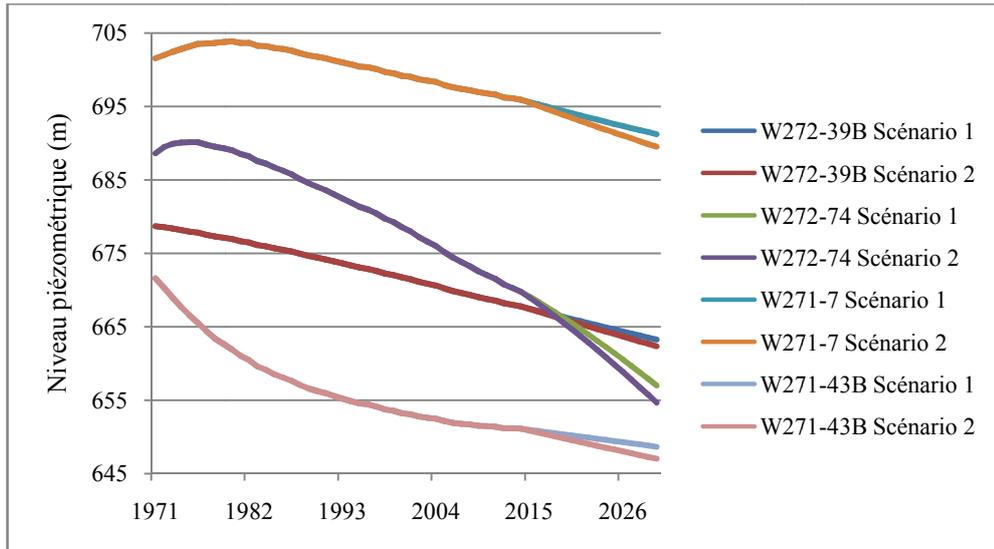


Figure 136. Evolution piézométrique de la nappe plio-quaternaire en zone Sud (scénarios 1 et 2).

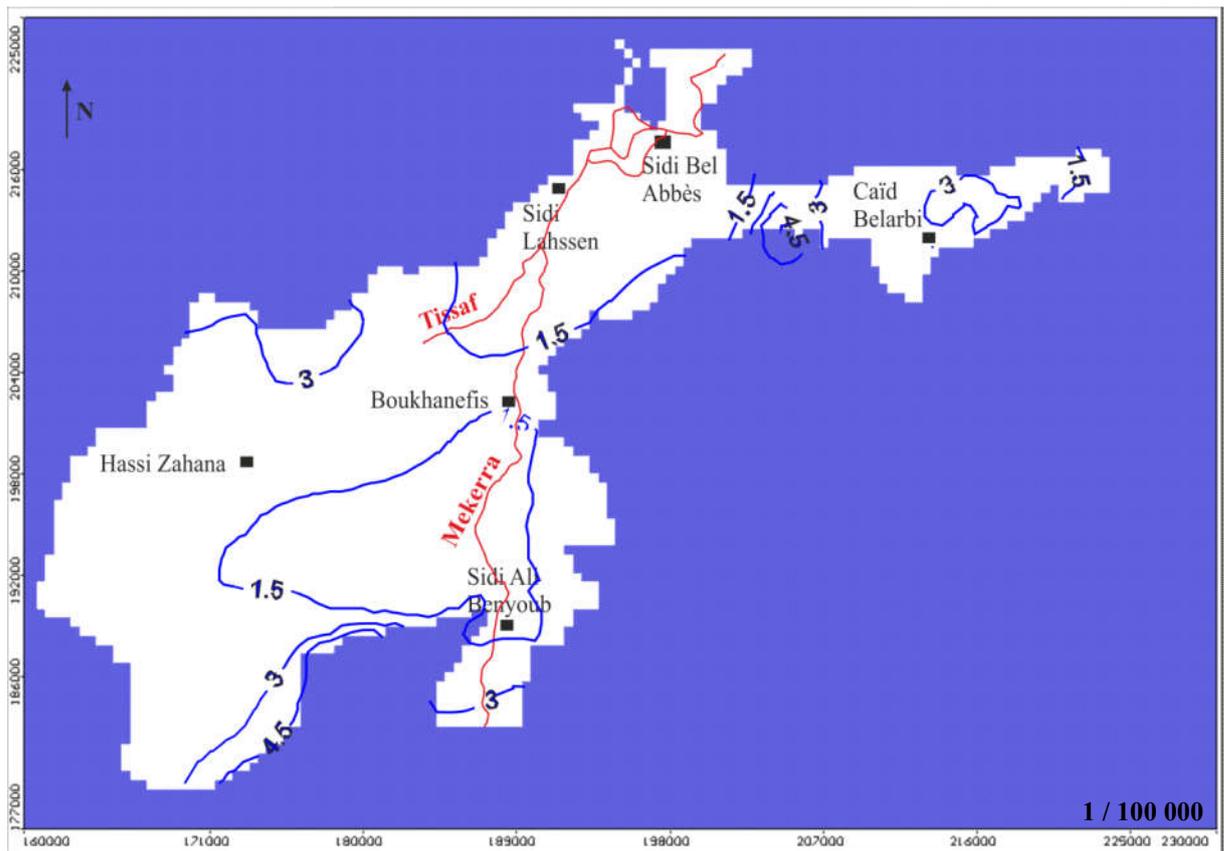


Figure 137. Rabattement de la nappe plio-quaternaire entre les scénarios 1 et 2 en 2030.

La figure 137 permet de constater la baisse généralisée du niveau de la nappe plio-quaternaire en 2030 entre les Scénarios 1 et 2. Les plus forts rabattements de la nappe sont

localisés surtout à l'Est et au Sud de la zone d'étude et atteignent 4.5 m. La baisse reste toutefois limitée au centre et au Nord de l'aquifère entre Hassi Zahana et Sidi Bel Abbès (1.5 m).

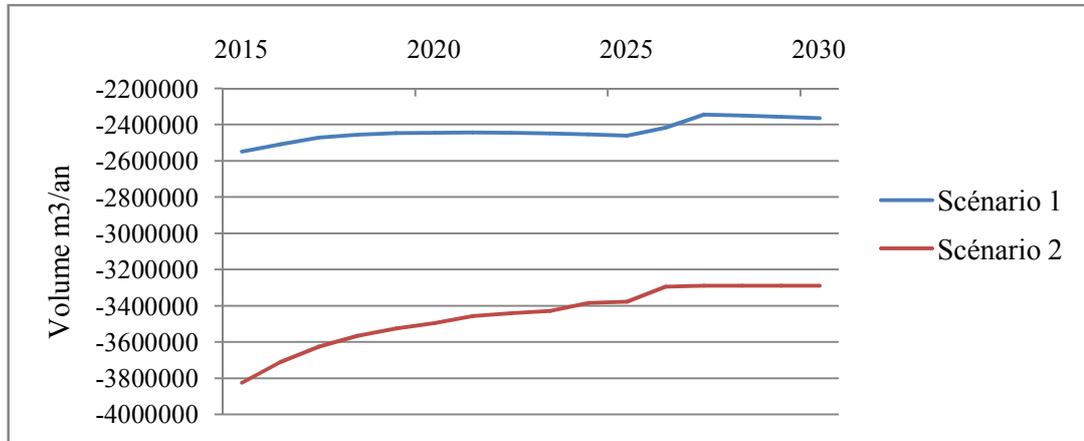


Figure 138. Déstockage de l'aquifère plio-quaternaire selon les scénarios 1 et 2 en 2030

La différence de 88 mm/an de pluviométrie entre les Scénarios 1 et 2, se traduit non seulement par une augmentation du déstockage de l'aquifère (plus de 13 Mm<sup>3</sup>/an au début des scénarios), mais aussi par une plus longue période de regain de stabilité du niveau de la nappe, qui ne s'opère qu'à partir de 2026 pour le Scénario 2. La tendance relative en baisse du déstockage est le résultat de la diminution du drainage des Oueds et des drains (en raison du rabaissement du niveau de la nappe) et de la recharge moyenne constante.

### III.2.5.2.3-Scénario 3 :

La figure 139 montre très bien le recul des isopièzes simulées en 2030 dans le scénario 3, par rapport à celles du scénario 1. Cette baisse considérable du niveau de la nappe plio-quaternaire est due à une très forte augmentation des prélèvements globaux (différence de 8 Mm<sup>3</sup>/an entre le scénario 1 et 3 en 2030) appariée à une recharge faible de l'ordre de 37.5 mm/an.

La figure 139 laisse également apparaître une convexité plus apparente des isopièzes (625 - 475) le long des oueds (vers l'aval), pour le scénario 3, renseignant sur une plus grande infiltration des eaux superficielles vers la nappe et une diminution du drainage des eaux souterraines par les oueds (déconnection entre la nappe et l'Oued probable; on passe peut être d'une condition à charge imposée à celle de débit imposé le long des oueds).

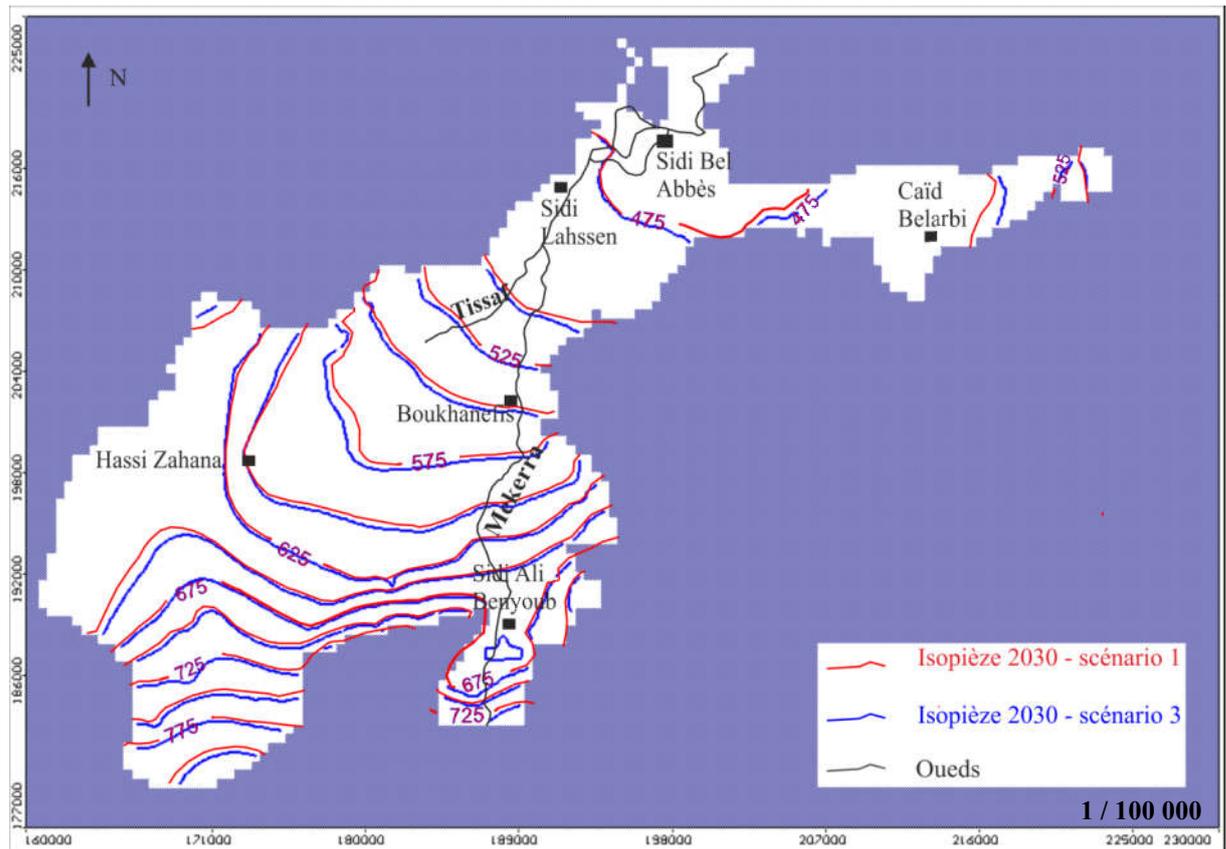


Figure 139. Allures piézométriques de l'aquifère plio-quaternaire en 2030 selon les scénarios 1 et 3.

Les chroniques piézométriques enregistrées sur les 13 points de contrôle (figures 140 à 143) reflètent les mêmes tendances générales observées pour les deux scénarios précédents. A savoir, une baisse du niveau de la nappe maximale à l'Est (piézomètre W241-45) et au Sud (piézomètre W272-74) de la plaine et une faible baisse constante sur le reste de la zone d'étude, où les points de pompage sont moins nombreux.

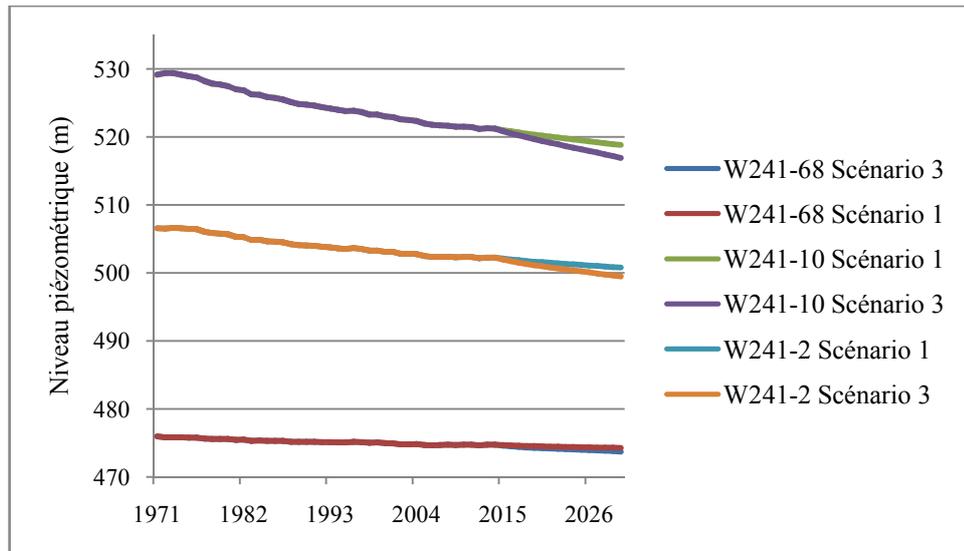


Figure 140. Evolution piézométrique dans la zone Nord (scénarios 1 et 3).

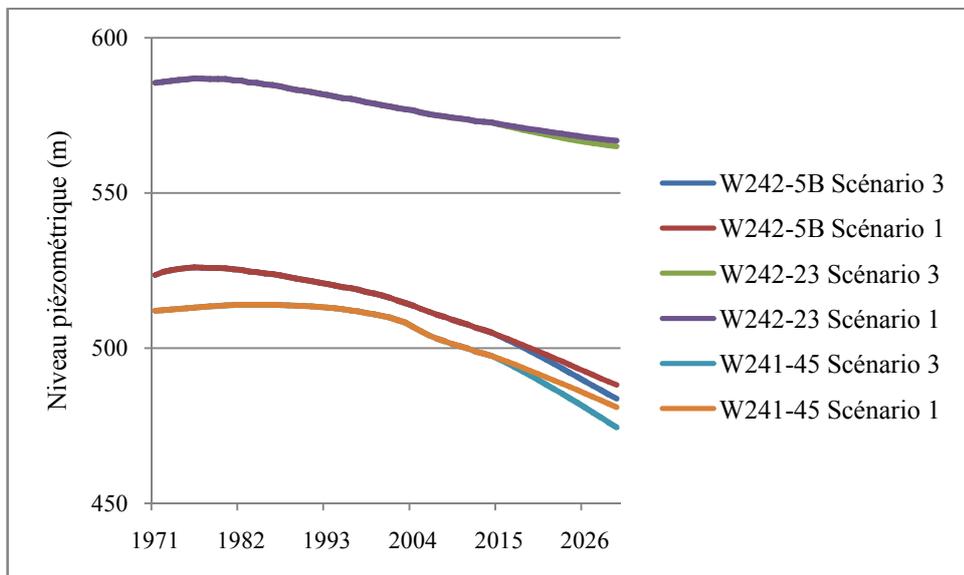


Figure 141. Evolution piézométrique dans la zone Est (scénarios 1 et 3).

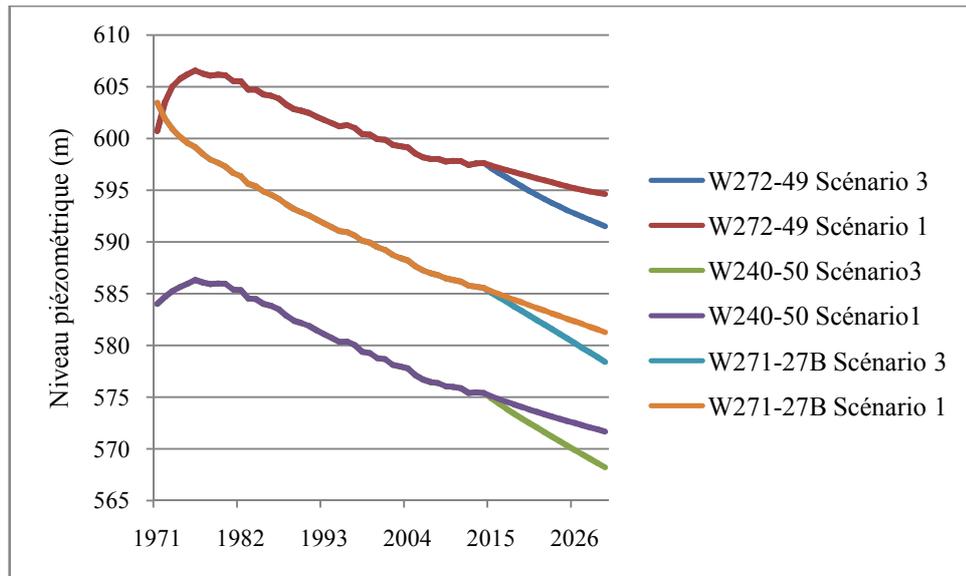


Figure 142. Evolution piézométrique dans la zone centre (scénarios 1 et 3).

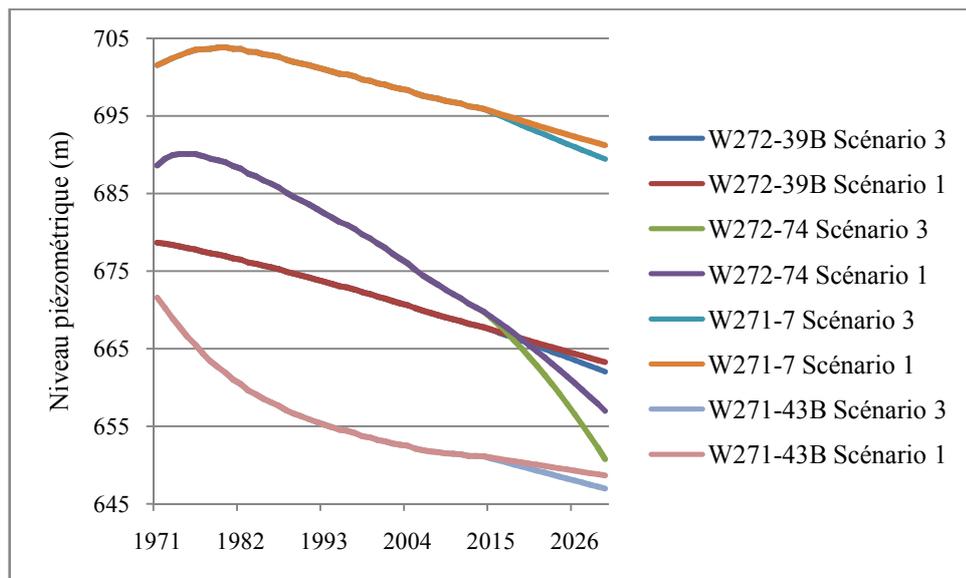


Figure 143. Evolution piézométrique dans la zone Sud (scénarios 1 et 3).

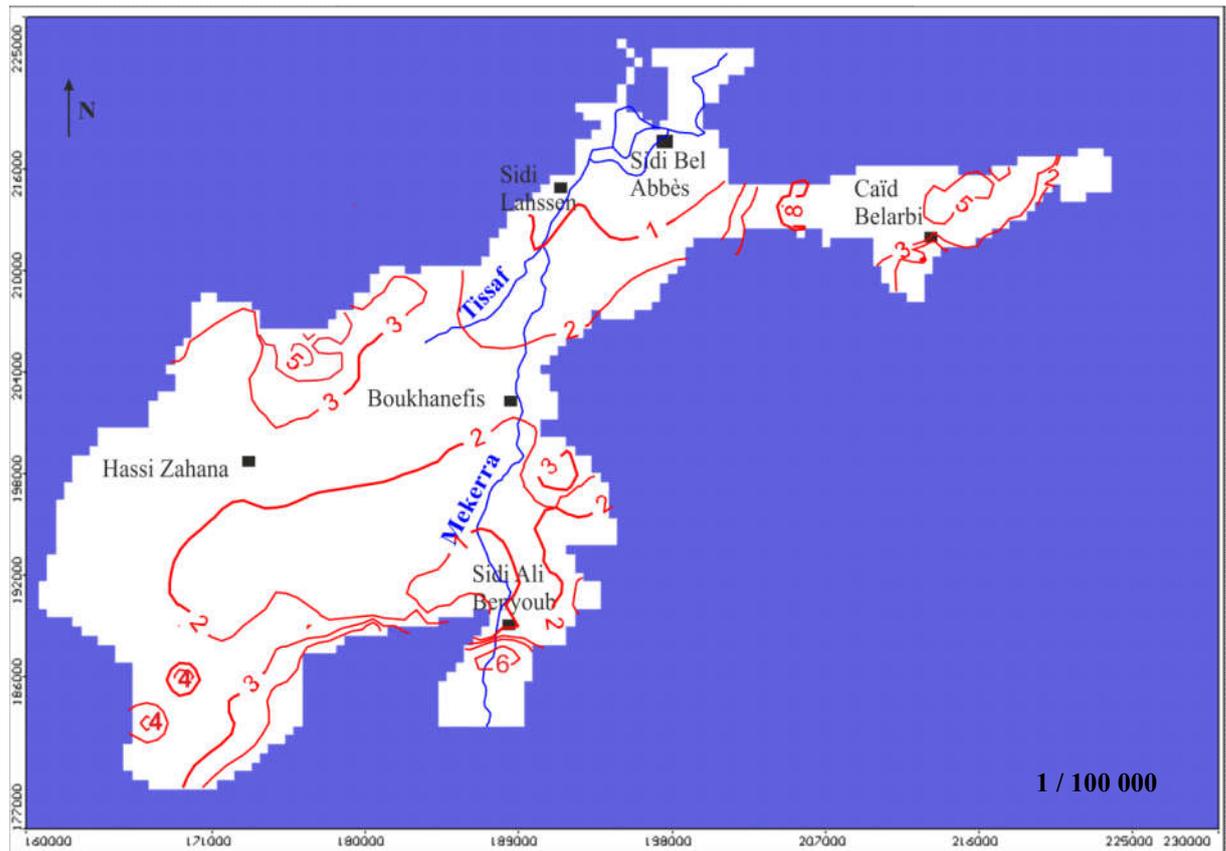


Figure 144. Rabattement en 2030 de la nappe plio-quaternaire entre les scénarios 1 et 3.

Aux abords des zones de recharge « latérale », les rabattements du niveau de la nappe enregistrés entre les scénarios 1 et 3 valent presque le double de ceux notés entre les scénarios 1 et 2. Selon les secteurs, les valeurs extrêmes se répartissent de la sorte :

- à l'Est entre 5 et 8 m (scénarios 1 et 3) contre 3 et 4.5 m (scénarios 1 et 2),
- au Sud de Sidi Ali Benyoub, 6 m (scénarios 1 et 3) contre 3 m (scénarios 1 et 2)
- à l'Ouest, en amont des calcaires éocènes 5 m (scénarios 1 et 3) contre 3 m (scénarios 1 et 2).

Cette grande différence est due à la baisse de la recharge, à la fois par les pluies (de 338 à 250 mm/an), mais aussi par les aquifères adjacents. Au centre de la plaine, l'augmentation des prélèvements totaux occasionne une baisse d'environ 0.5 m entre les scénarios 2 et 3 et une baisse d'environ 2 m entre les scénarios 1 et 3.

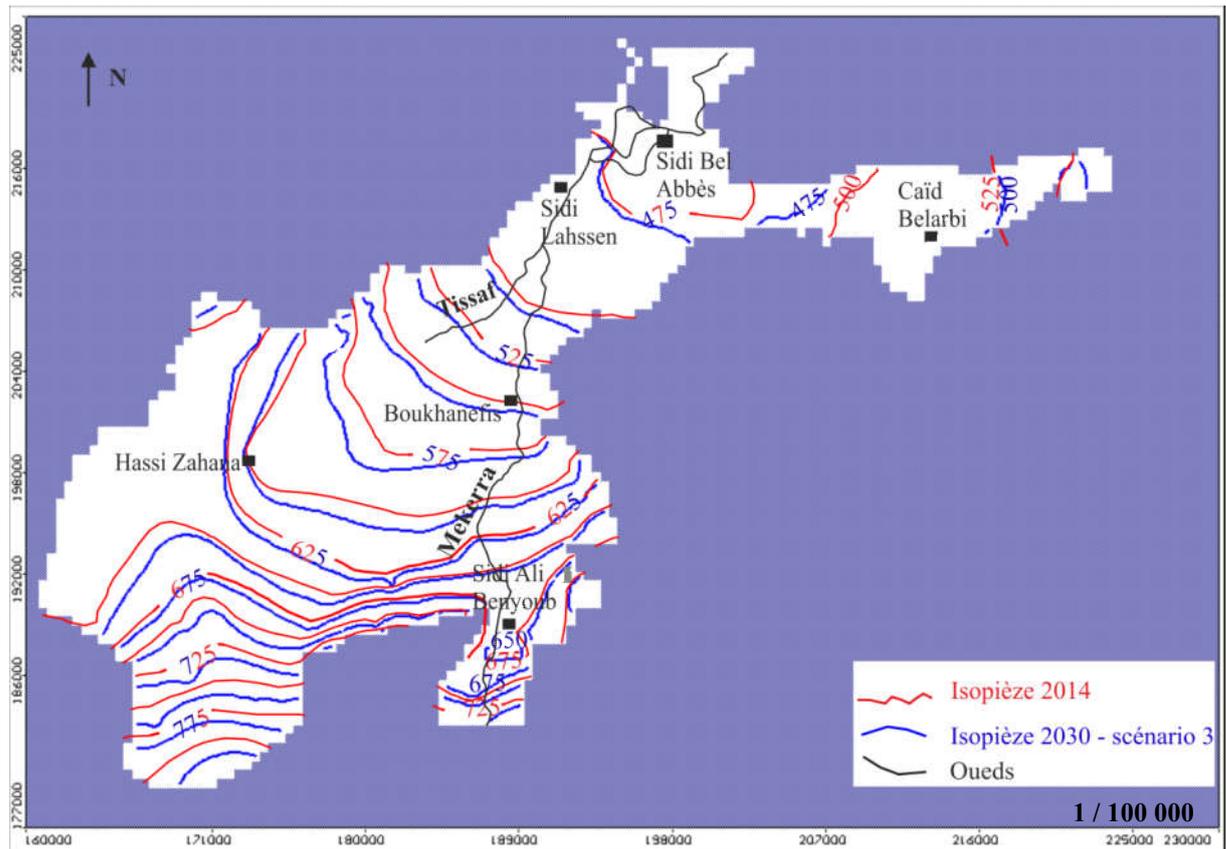


Figure 145. Cartes piézométriques de l'aquifère plio-quaternaire en 2014 et 2030 (scénario 3).

En prenant en considération l'augmentation de l'épaisseur de l'aquifère en zone Est de 20 m, la baisse du niveau piézométrique d'environ 25 m enregistrée entre 2014 et 2030 selon le scénario 3 dans cette région, occasionnera théoriquement (épaisseur exacte mal connue dans ce secteur) soit une très forte diminution des niveaux d'eau dans les ouvrages, soit carrément leur assèchement (cellules du model dénoyées avant rabaissement du mur de l'aquifère).

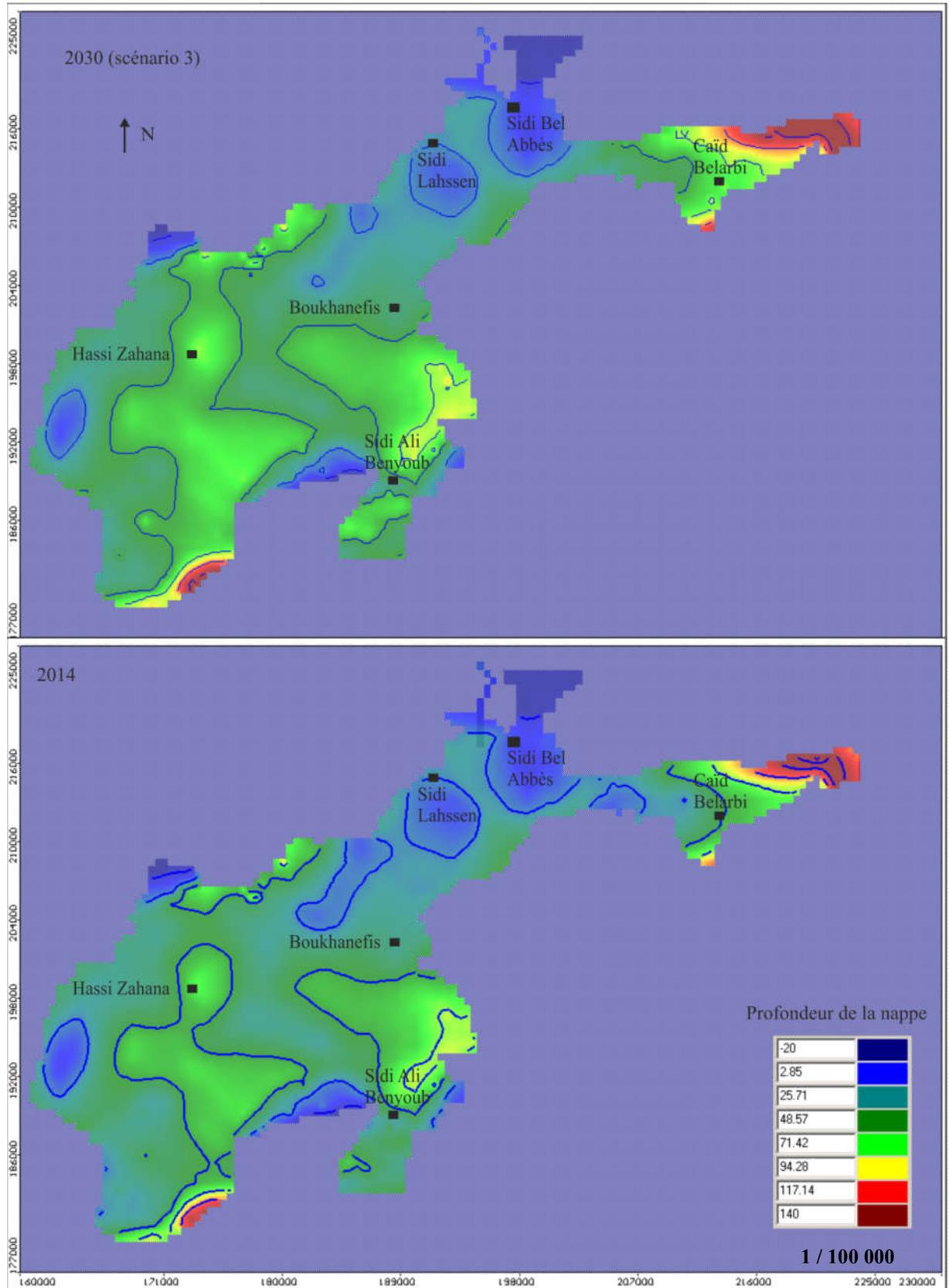


Figure 146. Profondeur de nappe plio-quaternaire en 2014 et 2030 (scénario 3).

La figure 146, permet une meilleure comparaison des niveaux d'eau de la nappe plio-quaternaire entre 2014 et 2030 (scénario 3). En effet, la nappe s'éloigne de la surface et se retrouve à environ 100 m de profondeur à l'extrême Est de la zone d'étude (abords de la limite du bassin versant). Aux environs de Caïd Belarbi, la nappe baisse de plus de 20 m, passant de 40 à 65 m de profondeur. Le même constat est observé au Sud de la plaine, notamment entre les localités de Sidi Ali Benyoub – Boukhanefis et Hassi Zahana – Benbadis. Quant aux plus faibles chutes du niveau de la nappe, elles se localisent au centre et au Nord du secteur d'étude, entre Sidi Lahssen et Sidi Bel Abbès.

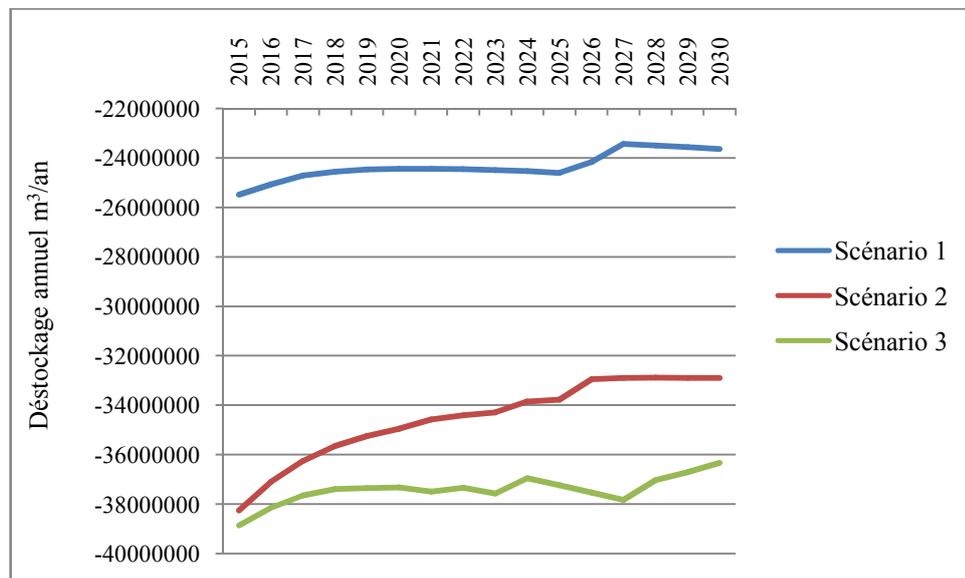


Figure 147. Evolution du déstockage annuel de l'aquifère plio-quaternaire de 2015 à 2030 selon les scénarios 1, 2 et 3.

Le déstockage de l'aquifère plio-quaternaire dans le scénario 3 oscille entre 37 et 39  $\text{Mm}^3/\text{an}$  entre 2015 et 2028. Une légère baisse des volumes déstockés d'environ  $1 \text{ Mm}^3/\text{an}$  est par la suite observée jusqu'à 2030. La comparaison du déstockage dans les 3 scénarios indique que les volumes soustraits aux alluvions plio-quaternaires dans le scénario 3 valent 1.5 fois ceux extraits de la nappe dans le scénario 1. Entre les scénarios 2 et 3 par contre, il apparaît que l'éloignement des courbes de déstockage l'une de l'autre vers la fin des simulations est dû à la grande augmentation des prélèvements totaux dans le scénario 3 (la recharge étant la même dans les deux scénarios :  $37.5 \text{ mm}/\text{an}$ ).

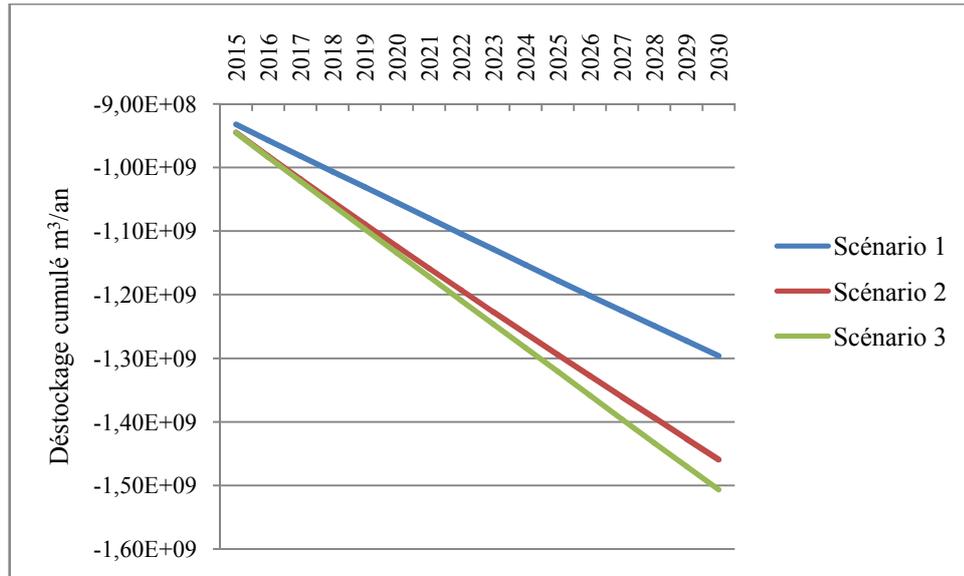


Figure 148. Evolution du déstockage cumulé de l’aquifère plio-quaternaire de 2015 à 2030 selon les scénarios 1, 2 et 3.

La figure 148 montre que l’aquifère plio-quaternaire est plus affecté par la baisse de la recharge que par la forte augmentation des Prélèvements. En effet, la différence du déstockage cumulé en 2030 du système aquifère entre les scénarios 2 et 3 n’est que de 47 Mm<sup>3</sup>/an (prélèvements totaux différents / recharge similaire), alors qu’elle dépasse 163 Mm<sup>3</sup>/an entre les scénarios 1 et 3 (prélèvements totaux différents / recharge différente).

Les bilans des entrées et sorties des trois scénarios simulés sont présentés dans le tableau 55.

Tableau 55. Bilans des entrées et sorties des scénarios 1, 2 et 3.

		2030		
(m <sup>3</sup> /an)	2014	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3
Entrées	92203586	82263754	69993300	65570326
Sorties	104047480	105904048	102890331	104431844
Entrées - Sorties	-11843894	-23640294	-32897031	-36326021
Différence 2030 - 2014		-11796400	-21053137	-24482127
Rythme de déstockage annuel (2015_2030)		-24272079	-34307102	-37414833

Le tableau 55 montre un déficit entrées / sorties en 2030 deux fois supérieur à celui de 2014 pour le scénario 1. Ce déficit entre 2030 et 2014 vaut presque le triple pour le scénario 2 et le quadruple pour le scénario 3.

Tableau 56. Moyennes annuelles pour toute la simulation (1971-2014)

Déstockage	Recharge	Baisse de la piézométrie	Prélèvements
-22 Mm <sup>3</sup> /an	50.7 mm/an	0.25 m/an	42 Mm <sup>3</sup> /an

En se basant sur les données du tableau 56, il faudra théoriquement un surplus de presque +31 Mm<sup>3</sup>/an de recharge annuelle (input-output) (soit environ 27mm de surplus annuel de recharge sur toute la plaine de Bel Abbès  $\approx 1150 \text{ km}^2$ ) pour enregistrer une augmentation de 0.1 m du niveau piézométrique de l'aquifère plio-quaternaire. Même avec cette démarche irréaliste, il faudra plus de 100 ans pour que l'aquifère se rétablisse des 11m de rabattements enregistrés entre 1971 et 2014.

La seule approche réalisable et qui pourrait être adoptée serait de maintenir les prélèvements totaux au dessous de la barre des 20 Mm<sup>3</sup>/an, supposant des précipitations de l'ordre de 340 mm/an (les prélèvements pourraient être proportionnellement augmentés ou réduits selon la pluviosité de la période considérée), ce qui stopperait la baisse du niveau de la nappe dans un premier lieu. La second étape consisterait à recharger l'aquifère artificiellement en utilisant les techniques les mieux adaptées au contexte du secteur d'étude. La recharge artificielle est une méthode qui a donné de bons résultats dans des conditions similaires ou voisines à celles de la plaine de Bel Abbè (Panoras et al, 2004; Hionidi et al, 2001). Le transfert des eaux de surface des bassins voisins extérieurs, les bassins de recharge, la méthode MAR (Managed Aquifer Recharge), etc., font partie des multiples techniques utilisées pour augmenter la réserve des aquifères et éventuellement, améliorer la qualité de leurs eaux (Boisson et al, 2014).

En Algérie, les bassins de recharge ont déjà été utilisés (2004) dans la zone centrale de la Mitidja (région de Chebli) et ont donné des résultats satisfaisants. Dans le secteur d'étude, la construction de grands barrages d'écêtement pourrait non seulement réduire la fréquence des inondations, contribuer à la recharge de l'aquifère, mais aussi à minimiser la grande dépendance de la wilaya de Bel Abbès aux apports en eau extérieurs (Mascara et Tlemcen).

### **III- Conclusion :**

La modélisation du système aquifère plio-quadernaire de la plaine de Sidi Bel Abbès a montré que l'on a affaire à une nappe libre (à caractère parfois semi-captif), portée par un aquifère, formé par une succession de petits bassins connectés, déversant leurs eaux, l'un vers l'autre jusqu'à l'exutoire du Rocher au Nord. L'aquifère est formé par des alluvions du Plio-quadernaire assez perméables et son étanchéité est assurée par un substratum d'argiles marno-sableuses marines miocènes.

Le domaine modélisé atteint une superficie de 800 km<sup>2</sup> environ et est limité au Nord par les marnes du Miocènes et de l'Oligo-miocène, au Sud par les terrains jurassiques et créacés des Monts de Tlencem-Saïda, à l'Ouest par les collines de marnes serravaliennes, séparant les bassins versants des Oueds Isser et Mekerra et à l'Est par les reliefs des Beni Chougran et Bou Hanifia. Quant aux limites verticales supérieures et inférieures, elles sont assimilées respectivement, à l'extension horizontale des alluvions plio-quadernaires et au sommet du substratum mio-pliocène.

Les transmissivités initiales introduites dans le modèle varient entre 10<sup>-2</sup> m<sup>2</sup>/s (conglomérats) et 10<sup>-5</sup> à 10<sup>-4</sup> m<sup>2</sup>/s (alluvions plio-quadernaires) et ont été réajustées lors de la phase de calage selon une fourchette de perméabilité oscillant entre 8\*10<sup>-7</sup> et 8\*10<sup>-3</sup>.

Concernant le coefficient d'emménagement, des valeurs de l'ordre de 20 à 30 % sont attribuées le long des Oueds, alors que le reste de la plaine se caractérise par un potentiel d'emménagement variant entre 5 et 15 %.

Les entrées dans le système aquifère sont représentées par la recharge pluviale estimée à 15 % des précipitations et par les apports latéraux, surtout ceux provenant des grès de Tenira et des calcaires de Remaïlia / dolomies de Tlemcen.

La vidange de l'aquifère se fait par les Oueds, les drains et par les prélèvements AEP, agricoles et industriels. L'interaction nappe/Oueds (Mekerra et Tissaf) est supposée invariable dans le temps (manque de données relatives aux Oueds) et est simulée selon les conditions régnautes en 1971.

A partir du modèle conceptuel, la modélisation du système aquifère plio-quadernaire a été faite sur une période de 44 ans de 1971 à 2014, à la fois en régime permanent et en régime transitoire, à l'aide du programme Visual Modflow.

Le modèle a été discrétisé en 13440 mailles quadrilatères de 500 m de coté.

Le calage en régime permanent fait sur l'année 1971 a permis une bonne reproduction des écoulements souterrains et des gradients hydrauliques avec un bilan entrées / sorties assez similaire à celui réalisé par Sourisseau entre 1970 et 1972.

Les résultats obtenus après calibration du modèle en régime transitoire reflètent bien l'évolution piézométrique de la nappe entre 1971 et 2014 qui se rabat d'environ 11 m en moyenne sur toute la zone d'étude. La simulation en régime transitoire a également démontré une surexploitation de l'aquifère plio-quadernaire due essentiellement à une augmentation continue des prélèvements totaux, parallèlement à une recharge faible, surtout entre 1981 et 2006.

Après la fin de la phase de calage, 3 Scénarios d'exploitation ont été supposés. Les conditions imaginées dans le scénario 1 se traduisent par une légère baisse du niveau piézométrique de la nappe en 2030, surtout au centre de la plaine. Pour les scénarios 2 et 3, la nappe s'éloigne encore plus de la surface, notamment dans les secteurs Est et Sud (aux abords des zones de recharge).

Au final, les résultats obtenus par le modèle reflètent une baisse importante du toit de la nappe entre 1971 et 2014 et supposent une baisse encore plus importante à l'horizon 2030. Ces résultats renseignent sur une surexploitation dangereuse de la ressource, qui en se poursuivant à ce rythme, pourrait même résulter en un assèchement de la nappe en certains endroits de la plaine de Bel Abbès.

## *Conclusion générale et recommandations*

## *Conclusion générale et recommandations*

### **I- Conclusion générale :**

Au terme de ce travail, un bon nombre de conclusions peuvent être avancées, les plus importantes sont citées ci-dessous

L'étude du cadre physique général de la plaine de Sidi Bel Abbès a montré que l'on a affaire à une haute plaine, d'une altitude moyenne variant entre 500 et 700 m et d'une superficie avoisinant les 1150 km<sup>2</sup>. Ces vastes étendues de terres très fertiles représentent le bassin versant de la Moyenne Mekerra et sont surplombées par deux chaînes de montagne, à savoir, les Tessala au Nord et les Monts de Dhaya au Sud. La plaine de Sidi Bel Abbès se caractérise par un réseau hydrographique peu développé ; seulement quelques Oueds majeurs s'y écoulent, le Tissaf, et la Mekerra entre autres.

Le couvert végétal dans le secteur d'étude connaît une dégradation importante depuis des années, due essentiellement à une extension anarchique du bâtis (Ras El Ma et Sidi Ali Benyoub), une surexploitation des pâturages (broutement des troupeaux) et à une plus grande fréquence des incendies, notamment en été. Le développement de l'agriculture qui se fait dans la plupart des cas, aléatoirement, reste toutefois assez appréciable et cela grâce à l'emploi d'engrais et à une irrigation intensive (sur-irrigation).

La plaine de Sidi Bel Abbès se trouvant à 80 Km du littoral se caractérise de ce fait par un climat méditerranéen semi aride, avec des précipitations généralement en dessous des 450 mm/an. Les températures atteignent leur maximum durant le mois d'Août, et leur minimum pendant les deux mois de Janvier et Février. La vitesse des vents est faible comparée à celle observée sur les plaines voisines, en raison de la présence des chaînes montagneuses qui jouent le rôle de barrières naturelles contre le vent.

La plaine de Sidi Bel Abbès est une large cuvette qui repose sur une base argilo-marneuse mio-pliocène. Les terrains plissés crétacés et tertiaires très épais des Monts Tessala forment sa limite nord, tandis qu'au Sud, la plaine est dominée par les Monts de Tlemcen-Saïda, formés essentiellement de terrains jurassico-crétacés inférieurs/moyens. La limite ouest de la plaine est représentée par les collines de marnes helvétiques séparant les bassins versants des Oueds Isser et Mekerra. Enfin, vers l'Est, la plaine est limitée par la série des marnes miocènes de Bou Henifia.

La zone d'étude est le siège de deux phénomènes tectoniques majeurs. Au Nord, un recouvrement par charriage des terrains autochtones crétacés par les formations oligo-miocènes, alors que l'on observe des accidents verticaux et sub-verticaux, caractéristiques d'une tectonique cassante, au Sud.

## *Conclusion générale et recommandations*

D'un point de vue hydrogéologique, la plaine abrite cinq aquifères dont le plus important est celui des alluvions plio-quadernaires. L'étanchéité de cet aquifère composé d'alluvions et de conglomérats est assurée par un mur formé essentiellement de marnes pliocènes marines. La recharge de l'aquifère se fait par les pluies, les aquifères adjacents et par infiltration des eaux des Oueds. Les paramètres hydrodynamiques sont caractéristiques d'une nappe libre et oscillent entre  $10^{-2}$  et  $10^{-5}$  m<sup>2</sup>/s pour la transmissivité et entre 5 à 30 % pour le coefficient d'emmagasinement.

La caractérisation hydrochimique des eaux de l'aquifère plio-quadernaire PQA a montré qu'elles se dégradent dévalant des zones de recharge vers l'exutoire de l'aquifère situé au Nord du secteur d'étude; au niveau du quartier dit le « Rocher ». La salinité des eaux de l'aquifère varie considérablement et dépend de facteurs naturels (géologiques) et d'autres anthropiques (densité de population, intensité et type d'activité). Les eaux de l'aquifère plio-quadernaire appartiennent à deux grands groupes; celui des eaux douces à faiblement minéralisées et celui des eaux salées à extrêmement salées. Les échantillons les moins salés (TSD <1g / l) sont observés au Sud de Ben Badis, au Nord de Hassi Zahan, entre Lamtar et Ben Badis, ainsi que le long de la rivière Mekerra. Quand aux eaux moyennement minéralisées (TSD: 1 à 2 g / l), elles sont surtout localisées au Nord de Hassi Zahana (eaux provenant des calcaires éocènes de Sid Ali Boussidi) et entre Lamtar et Ben Badis (présentes le long de l'Oued Bedrabine). Pour ce qui est des eaux salées à extrêmement salées (TSD > 3 g / l), elles sont spécifiques au chef lieu de la wilaya de Bel Abbès et à l'agglomération de Caïd Belarbi.

De part leur faibles concentrations en CaCO<sub>3</sub>, la majorité des eaux de l'aquifère plio-quadernaire peuvent être utilisées en industrie. Le processus d'échange d'ions joue un rôle majeur dans la salinité des eaux de l'aquifère, en particulier en ce qui concerne les concentrations en Na et cela malgré la légère prédominance des alcalins par rapport aux alkalis (eaux presque en équilibre chloro-alcalin). Les fortes teneurs en Na des eaux de l'aquifère plio-quadernaire sont également attribuées à l'hydrolyse des silicates et à la dissolution des évaporites. Les faibles teneurs en sulfates et nitrates sont dues probablement à leur épuisement par réactions redox (abondance de la matière organique). Les fortes concentrations en Cl ne reflètent pas la faible présence d'évaporites et de sels chlorurés dans la région et résultent principalement de la contamination des eaux de l'aquifère par les rejets.

L'étude de l'adaptabilité des eaux de l'aquifère plio-quadernaire à l'irrigation a dévoilé qu'elles posent un risque de salinité important et que leur utilisation nécessite selon les cas, soit des lessivages extensifs, soit des drainages. Elle a également montré que ces eaux

## *Conclusion générale et recommandations*

sont inappropriées pour les plantes sensibles en raison de leur forte toxicité en ions Cl. Les résultats montrent par contre, que l'utilisation des eaux de l'aquifère plio-quadernaire en irrigation présente de faibles risques sodium, magnésium et alcalinité. Les valeurs des paramètres PI, SAR, ESP, MCAR et CROSS ont également démontré que les eaux de l'aquifère plio-quadernaire ne sont pas susceptibles de modifier la structure des sols dans la plaine de SBA ou de réduire leur perméabilité.

Le modèle conceptuel établi au début de la phase de modélisation du système aquifère plio-quadernaire de la plaine de Sidi Bel Abbès a montré que la nappe libre s'écoule dans un aquifère épousant la forme d'un « toboggan » (succession de petits bassins connectés les uns au dessous des autres) plutôt que celle d'une cuvette comme il est retrouvé dans la bibliographie du secteur d'étude.

Le modèle conceptuel renseigne également sur la grande extension du domaine modélisé et qui avoisine les 800 km<sup>2</sup>, faisant de l'aquifère plio-quadernaire l'un des plus importants du pays. Les résultats de la conceptualisation ont également mis la lumière sur la grande hétérogénéité et variation des épaisseurs des formations retrouvées dans le secteur d'étude, se traduisant par un comportement non uniforme de l'aquifère sur toute son étendue.

A l'issue de la phase de calage en régime permanent, des perméabilités et des coefficients d'emmagasinement variant respectivement entre  $8 \cdot 10^{-7}$  à  $8 \cdot 10^{-3}$  m/s et 5 à 30 % ont été retenues sur tout le secteur d'étude. Les résultats du calage en régime permanent (1971) ont permis une bonne reproduction des tendances générales des écoulements souterrains, des gradients hydrauliques et des bilans entrées / sorties de la nappe plio-quadernaire.

La bonne reproduction des réalités sur terrain par le calage en régime permanent a été confirmée après calibration du modèle en régime transitoire. En effet, les résultats reflètent bien le rabattement moyen d'une dizaine de mètres du niveau de la nappe entre 1971 et 2014, faisant état d'une surexploitation de l'aquifère plio-quadernaire, surtout durant la période s'étalant entre 1981 et 2006.

Les 3 Scénarios d'exploitation future, imaginés après le calage du modèle se traduisent pour le premier, par une baisse relativement faible de l'ordre de 3.5 m en moyenne (exception faite pour le secteur Est) du niveau de la nappe plio-quadernaire en 2030, notamment au centre de la plaine. Cette baisse se conjugue néanmoins, par une multiplication par 2 du déstockage de l'aquifère qui passe d'environ 12 Mm<sup>3</sup>/an en 2014 à 24 Mm<sup>3</sup>/an en 2030.

Pour les scénarios 2 et 3, la baisse du niveau de la nappe est nettement plus importante, notamment dans les secteurs est et sud. Les rabattements du niveau de la nappe en

### *Conclusion générale et recommandations*

2030 entre les scénarios 1, 2 varient de 3 à 4.5 m à l'Est, 3 m au Sud de Sidi Ali Benyoub et en amont des calcaires éocènes à l'Ouest et 1.5 m au centre de la plaine. Ces rabattements enregistrés entre les scénarios 1 et 2 sont presque doublés entre les scénarios 1 et 3, sauf au centre du secteur d'étude, où les rabattements occasionnés en 2030 par les conditions imaginées dans le scénario 3 n'augmentent que de 0.5 m comparés aux rabattements enregistrés pour le scénario 1. Ces baisses considérables du niveau de la nappe enregistrées en 2030 pour les scénarios 2 et 3 sont bien reflétées par les taux de déstockage de l'aquifère plio-quaternaire, relatifs à ces deux scénarios et qui sont égaux à 33 et 36 Mm<sup>3</sup>/an respectivement.

Les résultats de la modélisation ont également montré que l'auto-rétablissement de l'aquifère est pratiquement impossible et que le maintien des extractions à environ 20 Mm<sup>3</sup>/an parallèlement à sa recharge artificielle pourraient constituer une solution à étudier.

Tous ces résultats basés sur des suppositions assez réalistes, renseignent clairement sur une surexploitation de l'aquifère plio-quaternaire, causée essentiellement par une augmentation continue des prélèvements qui se fait parallèlement à une recharge pluviométrique faible, surtout depuis le début des années 1980s. Ainsi, le maintien du rythme actuel d'exploitation de l'aquifère plio-quaternaire, pourrait avoir des conséquences dévastatrices non seulement sur la ressource (jusqu'à même son épuisement à certains endroits de la plaine de Bel Abbès), mais aussi sur la stabilité du terrain (subsidence) dans le secteur d'étude.

## *Conclusion générale et recommandations*

### **II-Recommandations :**

De par leur extension et leur épaisseur, les alluvions plio-quadernaires de la plaine de Bel Abbès devront bénéficier dans le futur d'une attention particulière de la part des pouvoirs publics et des différents acteurs concernés dans cette région. Cette ressource soumise à des contraintes naturelles, se matérialisant essentiellement par une baisse des précipitations et une contamination par les rejets, est également menacée par une exploitation non contrôlée, de plus en plus anarchique. A la lumière de cela, il devient plus que primordial de non seulement protéger cette ressource contre la dégradation, mais aussi de garantir sa pérennité pour les générations futures; nous proposons dans ce sens, les recommandations suivantes :

des études géophysiques sur l'ensemble de l'aquifère plio-quadernaire pour connaître l'épaisseur exacte des alluvions et la variation de leur faciès géologique, à la fois spatialement et en profondeur, dans le but de connaître le vrai potentiel de l'aquifère et d'identifier les meilleures zones susceptibles d'abriter de futures ouvrages de pompage ;

des campagnes piézométriques faites sur un grand nombre d'ouvrage, dans le but de bien identifier les zones de recharge, les directions d'écoulement, les variations des gradients hydrauliques, les zones susceptibles d'être le siège des plus fortes baisses du niveau de la nappe, etc. ;

des études détaillées des aquifères adjacents pour déterminer leur extension, leur taux de recharge et les mécanismes régissant leur relation avec l'aquifère plio-quadernaire ;

des suivis au moins mensuels des Oueds Mekerra et Tissaf, se faisant par des campagnes périodiques de jaugeage, de mesure d'hauteurs d'eau et d'échantillonnage pour des analyses chimiques ;

des études de re-profilage et de dérivation de l'Oued Mekerra permettant une meilleure utilisation des eaux de crues, par la construction de nouveaux barrages (d'écêtement ou pour la recharge artificielle des aquifères), la création de nouvelles zones d'épandage (eaux pouvant être utilisées pour le drainage des terres agricoles) ;

des études de suivis chimiques permettant une appréciation de l'évolution de la salinité des eaux de l'aquifère plio-quadernaire, au cours de l'année et sur de longues périodes ;

la construction de nouvelles stations d'épuration des eaux usées et/ou l'utilisation plus judicieuse des capacités des stations déjà existantes sur la plaine de Bel Abbès et cela par l'augmentation des volumes journaliers traités, une modernisation des procédés adaptés, etc.; ce qui permettra l'utilisation des eaux traitées en agriculture et en industrie et réduira les volumes extraits d'eaux souterraines ;

## *Conclusion générale et recommandations*

la législation et/ou le renforcement des lois pénalisant le rejet d'eaux usées non traitées dans la rivière Mekerra, en obligeant tous les industriels opérant dans la région à traiter leurs propres eaux usées avant de les rejeter dans la nature ;

des campagnes de sensibilisation auprès des fellahs pour les inciter à produire les plantations les plus appropriées aux conditions de la plaine de la Bel Abbès (climat, sols, etc.), afin de prévenir l'utilisation excessive de pesticides et d'engrais (de préférence à moins de 500  $\mu\text{S}/\text{cm}$  d'engrais ajoutés à la salinité totale des eaux d'irrigation),

la modernisation des techniques d'arrosage des terres pour éviter la sur-irrigation, l'inondation de la superficie agricole irriguée une fois par an (de préférence après la période de récolte (en particulier après des saisons de basses précipitations pour évacuer le surplus de sels hors de la zone racinaire),

éviter les « inondations » excessives (par des volumes d'eau exagérés ou par répétition excessive de l'opération) en utilisant des quantités adéquates d'eau (de préférence en utilisant des sprinklers à faible flux), afin d'éviter la lixiviation (sels naturels et éléments nutritifs) des terres agricoles, sauf dans les régions où l'accumulation de sel est très importante (au Nord et à l'Est de la plaine de la SBA) ;

le catalogue de tous les utilisateurs de la ressource afin d'éliminer les points d'extraction illégaux susceptibles de dégrader la qualité ou de surexploiter les eaux de la PQA et enfin ;

la mise en place d'un plan général de gestion de la ressource en eau dans la plaine de Bel Abbès, permettant d'estimer les volumes extraits à ne pas dépasser en fonction des précipitations moyennes annuelles.

*Liste des abréviations dans le texte*

ABH : Agence des bassins hydrographiques de l'Oranie  
ADE : algérienne des eaux  
AEP: alimentation eau potable  
ANRH : Agence nationale des ressources hydriques  
APQ : aquifère plio-quadernaire  
CE : conductivité électrique  
CROSS : ratio de cations de stabilité structurale du sol  
DHW : direction de l'hydraulique de la Wilaya de Sidi Bel Abbès  
DSA: direction des services agricoles de la Wilaya de Sidi Bel Abbès  
ESP : pourcentage de sodium échangeable  
ETP : évapotranspiration potentielle  
ETR : évapotranspiration réelle  
ICA: indices chloro-alcalins  
IP : indice de perméabilité  
KI : indice de Kelly  
MCAR : ratio d'adsorption de cations monovalents  
MHR : ratio du risque magnésium  
Na% : pourcentage de sodium  
OMS : organisation mondiale de la santé  
ONA : office nationale de l'assainissement  
PSS : pourcentage de sodium soluble  
S : coefficient d'emmagasinement  
SAR : ratio d'adsorption du sodium  
SARadj : ratio ajusté d'adsorption du sodium  
SBA : Sidi Bel Abbès  
SBSR : sodium bicarbonate résiduel  
SCR : sodium carbonate résiduel  
SP: salinité potentielle  
T : transmissivité  
TDS : total solide dissous  
TH : titre hydrotimétrique  
VMF: Visual Modflow

## *Liste des figures et tableaux*

## Liste des figures

Figure 1. Localisation de la plaine de Sidi Bel Abbès.....	4
Figure 2. Carte géomorphologique simplifiée du secteur d'étude.....	5
Figure 3. Profil morphologique simplifié du secteur d'étude .....	5
Figure 4. Réseau hydrographique de la plaine de Sidi Bel Abbès .....	6
Figure 5 : représentation graphique du bassin versant de la Mekerra (Marok , 2010 ; modifiée) .....	8
Figure 6. Profil en long de l'Oued Mekerra (ANRH ; modifiée).....	8
Figure 7. Occupation des sols dans le secteur d'étude (Bneder, 1979; Cherif, 2009; modifiée) .....	10
Figure 8. Répartition des sols dans la plaine de Bel Abbès (Faraoun & Benabdeli, 2010).....	11
Figure 10. Moyennes de la lame d'eau précipitée sur la plaine de Bel Abbès (1971-2014)....	14
Figure 9. Cartes pluviométriques de la région d'étude (A : 1913-1938, Seltzer ; B : 1971-2014,).....	13
Figure 11. Précipitations saisonnières sur la plaine de Bel Abbès .....	14
Figure 12. Précipitations mensuelles sur la plaine de Bel Abbès.....	15
Figure 13. Courbe des humidités mensuelles .....	18
Figure 14. Evolution mensuelle des débits moyens de la Mekerra .....	19
Figure 15. Carte géologique de la plaine de Sidi Bel Abbès-boukhanefis .....	22
Figure 16. Extrait de la carte géologique de l'Algérie (Ministère des travaux publique).....	23
Figure 17. Lg géologique synthétique de la plaine de Sidi Bel Abbès (Sourisseau. B., 1972)	28
Figure 18. Aperçus structural de la plaine de Sidi Bel Abbès (ANRH, 1974).....	29
Figure 19. Carte hydrogéologique de la plaine de Bel Abbès (ANRH, 1974).....	32-33
Figure 20. Colonne hydrogéologique type de la plaine de Bel Abbès.....	34
Figure 21. Logs géologiques de quelques forages implantés sur la plaine de Bel Abbès (Sourisseau, 1972 ).....	35
Figure 22. Logs géologiques SBA 10 et Sidi Yagoub (DHW de SBA).....	36
Figure 23. Logs géologiques SBA5, SB4 et SB9 (DHW de SBA) .....	37
Figure 24. Logs géologiques SBA7 (DHW de SBA).....	38
Figure 25. Logs géologiques CB, F20, F3, F21 et SBA1 (in Lebid, 2001).....	38
Figure 26. Logs géologiques S47 (ANRH, 1974) et SB2 (in Lebid, 2001) .....	39
Figure 27. Représentation en 3D des limites verticales et latérales des alluvions .....	39

Figure 28. Carte isopach des conglomérats plio-quadernaires (Sourisseau, 1973).....	40
Figure 29. Limite grossière des conglomérats (d'après la SOGREAII).....	41
Figure 30. Carte isopach/limite grossière des conglomérats plio-quadernaires.....	42
Figure 31. Cartes piézométriques de la nappe plio-quadernaire (A : Décembre 2014 et B : Janvier 1971) .....	43
Figure 32. Interaction aquifère plio-quadernaire/ Mekerra (Sourisseau, 1973; DEMRH, Janvier 1971).....	45
Figure 33. Evolution du débit de la Mekerra de Sidi Ali Benyoub jusqu'à l'exutoire du Rocher (Lerolle, 1976; modifiée) .....	46
Figure 34. Localisation des points d'eau échantillonnés en Mai / 1989 (ANRH).....	49
Figure 35. Répartition spatiale des moyennes du résidu sec des eaux de la nappe plio- quadernaire (1970 - 2006) .....	53
Figure 36. Variations des concentrations en (mg/l) des éléments chimiques pour les eaux de la nappe plio-quadernaire .....	54
Figure 37. Répartition spatiale des concentrations moyennes des chlorures de la nappe plio- quadernaire (1970 - 2006) .....	55
Figure 38. Répartition spatiale des concentrations moyennes des nitrates de la nappe plio- quadernaire (1970 - 2006) .....	56
Figure 39. Répartitions spatiale du TH (CaCO <sub>3</sub> en mg/l) des eaux de la nappe plio- quadernaire .....	58
Figure 40. Faciès hydrochimiques des eaux de la nappe plio-quadernaire .....	60
Figure 41. Projection des échantillons sur le diagramme de Chadha.....	60
Figure 42. Représentation des eaux de la nappe plio-quadernaire selon le diagramme Ludwig-Langelier .....	61
Figure 43. Représentation des eaux de la nappe plio-quadernaire (Schoeller-Berkaloff).....	63
Figure 44. Représentation graphique des variables et des individus.....	66
Figure 45. Porjection des eaux de la nappe plio-quadernaire selon le diagramme de Gibbs.....	68
Figure 46. Répartition spatiale des indices chloro-alcalins; A : ICA 1 et B : ICA 2.....	70
Figure 47. Diagramme SO <sub>4</sub> vs Cl.....	72
Figure 48. Diagramme Na vs Cl.....	73
Figure 49. Diagramme Na / Cl vs EC.....	74
Figure 50. Evolution spatiale du rapport (Na /Ca +Mg) des eaux de la nappe plio- quadernaire .....	75
Figure 51. Diagramme (Ca + Mg) vs HCO <sub>3</sub> .....	75

Figure 52. Diagramme (Ca + Mg) vs (HCO <sub>3</sub> + SO <sub>4</sub> ).....	76
Figure 53. Diagramme (Na) vs (HCO <sub>3</sub> ).....	76
Figure 54. Diagramme (Ca + Mg) vs Total cations.....	77
Figure 55. Diagramme (Na + K) vs Total cations.....	77
Figure 56. Diagramme (Na-Cl) vs (Ca + Mg) – (HCO <sub>3</sub> +SO <sub>4</sub> ).....	78
Figure 57. Classification des eaux de la nappe plio-quaternaire selon Richards, 1954. ....	85
Figure 58. Diagramme Na % VS CE.....	86
Figure 59. Comportement des ions Na et Ca à la surface de l'argile (Hanson et al, 1999).....	88
Figure 60. Incidence d'utilisation des eaux de la nappe plio-quaternaire sur l'infiltration (Rhoades, 1977; Oster et al, 1979) .....	89
Figure 61. Indices de perméabilité des eaux de la nappe plioquaternaire (Doneen, 1964; Ragunath, 1987).....	91
Figure 62. Différente étapes de conceptualisation d'un modèle hydrogéologique .....	96
Figure 63. Représentation simple d'un modèle conceptuel.....	98
Figure 64. Ecoulement unidirectionnel (non équilibre) à travers un prisme élémentaire d'un aquifère à nappe captive .....	103
Figure 65. Approximation numérique des dérivées $\partial h/\partial x$ (a) et $\partial h/\partial y$ (b) (tous les puits sont à équidistance) (Bennett 1976, modifiée).....	105
Figure 66. Hydrographe montrant l'approximation de la dérivée $\partial h/\partial t$ (pente) à un temps « $t_n$ » par le quotient $\Delta h/\Delta t$ (Konikow, 1996).....	106
Figure 67. Discrétisation du temps au nœud (i, j) dans une grille deux dimensionnelles à différences finies. A : différence en avant et b : différence en arrière (Konikow, 1990).....	107
Figure 68. Système aquifère à limites (irrégulières) imperméables (a), discrétisé selon la méthode des différences finies (b) et selon celle des éléments finis (c) (Konikow, 1996).....	110
Figure 69. Exemple de discrétisation tridimensionnelle .....	111
Figure 70. Exemples de conditions aux limites de type charge imposée .....	112
Figure 71. Exemples de conditions aux limites de type "débit imposé" .....	113
Figure 72. Exemples de conditions aux limites mixtes .....	114
Figure 73. Limites latérales du domaine modélisé .....	119
Figure 74. Limites verticales du modèle selon les coupes géologiques réalisées par Sourisseau (1973) .....	120-121
Figure 75. Limite verticale du modèle selon la coupe géologique réalisée par l'ANRH (1974).....	122

Figure 76. Carte des transmissivités du chenal conglomératique (Sourisseau, 1973).....	124
Figure 77. Répartition spatiale des transmissivités ; tirée de la carte hydrogéologique de la plaine de Bel Abbès (ANRH, 1974).....	125
Figure 78. Répartition spatiale des coefficients d’emmagasinement dans les conglomérats (Sourisseau, 1973) .....	126
Figure 79. Représentation des conditions aux limites du domaine conceptuel.....	128
Figure 80. Evolution des besoins AEP de la wilaya de Sidi Bel Abbès de 1999 à 2014. ....	133
Figure 81. Localisation des prélèvements AEP sur les alluvions plio-quaternaire .....	133
Figure 82. Localisation des zone industrielles au niveau de la wilaya de Sidi Bel Abbès.....	134
Figure 83. Evolution des besoins industriels au niveau de la wilaya de Bel Abbès (S. Kalaliz, 2013).....	135
Figure 84. Localisation des prélèvements industriel sur les alluvions plio-quaternaires .....	136
Figure 85. Pourcentage des zones aménagées pour l’irrigation par rapport aux terres arables en 1998 (FAO, 2002).....	137
Figure 86. Pourcentage de superficies irriguées par rapport au potentiel d’irrigation dans les pays en développement (FAO, 2002).....	138
Figure 88. Estimation des prélèvements en eaux pour l’irrigation de 1999 à 2030 (FAO, 2002) .....	139
Figure 87. Pourcentage des prélèvements en eau pour l’irrigation par rapport aux ressources en eau renouvelables en 1998 (Aquatat, 2002).....	138
Figure 89. Localisation des prélèvements destinés à l’irrigation (inventaire BIRH, 1972) ...	140
Figure 90. Occupation de la superficie agricole (DSA de Bel Abbès, 2014).....	141
Figure 91. Evolution piézométrique aux niveaux de quelques ouvrages de 2009 à 2014 (ANRH).....	143
Figure 92. Localisation des ouvrages suivis par l’ANRH d’Oran.....	144
Figure 93. Prise d’écran sous Visual Modflow .....	145
Figure 94. Extension du domaine modélisé.....	146
Figure 95. Représentation en 3D de la zone d’étude.....	147
Figure 96. Discrétisation de la variation spatiale de l’épaisseur des alluvions plio- quaternaires.....	148
Figure 97. Coupes S-N et E-O au niveau de Bel Abbès et de Boukhanefis.....	149
Figure 98. Coupes S-N et E-O au niveau de Caïd Belarbi et du Rocher.....	150
Figure 99. Coupes S-N et E-O au niveau de Sidi Ali Benyoub et de Sidi Lahssen .....	151
Figure 100. Discrétisation des prélèvements introduits dans le modèle.....	152
Figure 101. Evolution des prélèvements AEP introduits dans le modèle .....	153

Figure 102. Evolution des prélèvements agricoles introduits dans le modèle.....	153
Figure 103. Evolution des prélèvements industriels introduits dans le modèle .....	154
Figure 104. Moyennes pluviométriques annuelles utilisées pour le calcul de la recharge.....	155
Figure 105. Discrétisation spatiale des apports latéraux et des pertes.....	156
Figure 106. Discrétisation des Oueds et de la dérivation vers le barrage Sarno .....	157
Figure 107. Cartes piézométriques : simulée (régime permanent, 1971) et observée (Sourisseau, janvier 1971) .....	158
Figure 108. Ouvrages de calibration du modèle.....	160
Figure 109. Variation piézométrique simulée – observée dans la zone Nord .....	161
Figure 110. Variation piézométrique simulée – observée dans la zone Est .....	162
Figure 111. Variation piézométrique simulée – observée dans la zone centre.....	163
Figure 112. Variation piézométrique simulée – observée dans la zone Nord .....	164
Figure 113. Cartes piézométriques observée et simulée (Décembre 2014) .....	166
Figure 114. Variation spatiale des perméabilités du système aquifère plio-quaternaire .....	167
Figure 115. Variation spatiale des coefficients d’emménagement du système aquifère plio-quaternaire.....	168
Figure 116. Variation de la recharge entre 1971et 2014 .....	169
Figure 117. Variation des apports latéraux entre 1971et 2014.....	169
Figure 118. Variation de l’infiltration par les Oueds vers l’aquifère entre 1971 et 2014. ....	170
Figure 119. Evolution des volumes d’eau drainés par les Oueds de l’aquifère plio-quaternaire entre 1971et 2014. ....	171
Figure 120. Variation des prélèvements globaux entre 1971et 2014. ....	171
Figure 121. Variation des volumes transférés vers le barrage Sarno entre 1971et 2014. ....	172
Figure 122.. Variation interannuelle de la réserve de l’aquifère plio-quaternaire entre 1971 et 2014 .....	173
Figure 123. Bilan cumulatif ( $\sum$ entrées – $\sum$ sorties) de l’aquifère plio-quaternaire entre 1971 et 2014 .....	173
Figure 124. Evolution des prélèvements globaux retenus pour les scénarios 1 et 2 .....	175
Figure 125. Moyenne pluviométriques retenue pour les scénarios 1 et 2. ....	175
Figure 126. Evolution des prélèvements totaux pour les scénario 3. ....	176
Figure 127. Carte piézométrique de l’aquifère plio-quaternaire en 2030 (scénario 1).....	177
Figure 128. Evolution piézométrique de l’aquifère plio-quaternaire selon le scénario 1.....	178
Figure 129. Profondeur de la nappe en 2030, selon le scénario 1. ....	180
Figure 130. Rabattement de la nappe entre 2014 et 2030 selon le scénario 1.....	180
Figure 131. Déstockage de l’aquifère plio-quaternaire selon le scénario 1.....	181

Figure 132. Carte piézométrique de la nappe plio-quadernaire en 2030 (scénario 2).....	182
Figure 133. Evolution piézométrique de la nappe plio-quadernaire en zone Nord (scénarios 1 et 2).....	182
Figure 134. Evolution piézométrique de la nappe plio-quadernaire en zone Est (scénarios 1 et 2).....	183
Figure 135. Evolution piézométrique de la nappe plio-quadernaire en zone centre (scénarios 1 et 2).....	183
Figure 136. Evolution piézométrique de la nappe plio-quadernaire en zone Sud (scénarios 1 et 2).....	184
Figure 138. Dstockage de l'aquifère plio-quadernaire selon les scénarios 1 et 2 en 2030.....	185
Figure 137. Rabattement de la nappe plio-quadernaire entre les scénarios 1 et 2 en 2030.....	184
Figure 139. Allures piézométriques de l'aquifère plio-quadernaire en 2030 selon les scénarios 1 et 3.....	186
Figure 140. Evolution piézométrique dans la zone Nord (scénarios 1 et 3).....	187
Figure 141. Evolution piézométrique dans la zone Est (scénarios 1 et 3).....	187
Figure 142. Evolution piézométrique dans la zone centre (scénarios 1 et 3).....	188
Figure 143. Evolution piézométrique dans la zone Sud (scénarios 1 et 3).....	188
Figure 144. Rabattement en 2030 de la nappe plio-quadernaire entre les scénarios 1 et 3.....	189
Figure 145. Cartes piézométriques de l'aquifère plio-quadernaire en 2014 et 2030 (scénario 3).....	190
Figure 146. Profondeur du niveau de l'aquifère plio-quadernaire en 2014 et 2030 (scénario 3)	191
Figure 147. Evolution du déstockage annuel de l'aquifère plio-quadernaire de 2015 à 2030 selon les scénarios 1, 2 et 3.....	192
Figure 148. Evolution du déstockage cumulé de l'aquifère plio-quadernaire de 2015 à 2030 selon les scénarios 1, 2 et 3.....	193

### **Liste des tableaux**

Tableau 1. Caractéristiques morpho-métriques du bassin versant de l'Oued Mekerra.....	6
Tableau 2. Coordonnées et codes des stations pluviométriques de la plaine de SBA.....	11
Tableau 3. Moyennes pluviométriques annuelles.....	12
Tableau 4. Températures moyennes mensuelles de la plaine de SBA.....	15
Tableau 5. ETP mensuelle calculée sur la plaine de Sidi Bel Abbès.....	16
Tableau 6. Bilan hydrique selon Thornthwaite.....	17
Tableau 7. Vitesses moyennes mensuelles du vent.....	18

Tableau 8. Coordonnées et débits moyens de l'Oued Mekerra.....	18
Tableau 9. Estimation du retour des volumes extraits pour l'irrigation .....	20
Tableau 10. Paramètres hydrodynamiques des aquifères de la plaine de Bel Abbès.....	46
Tableau 11. Paramètres physiques des eaux de la nappe plio-quaternaire.....	50
Tableau 12. Classification des eaux de la nappe plio-quaternaire selon le résidu sec .....	51
Tableau 13. Palatabilité des eaux en fonction du résidu sec (directives de l'OMS pour les eaux potables).....	51
Tableau 14. Potabilité des eaux en fonction du résidu sec (Rodier, 2005).....	52
Tableau 16. Potabilité des eaux en fonction de la CE (petelon et Zysman, 1993).....	52
Tableau 15. Classification des eaux de la nappe plio-quaternaire en fonction de la CE (Rodier , 2005).....	52
Tableau 17. Paramètres chimiques des eaux de la nappe plio-quaternaire .....	54
Tableau 18. Normes OMS de potabilité des eaux .....	57
Tableau 19. Classification des eaux de la nappe plio-quaternaire selon le TH.....	57
Tableau 20. Statistique descriptive des eaux de la nappe plio-quaternaire .....	64
Tableau 23. Corrélation entre les variables et les facteurs .....	66
Tableau 22. Valeurs propres et variabilité en % des axes factoriels .....	66
Tableau 21. Matrice de corrélation des variables .....	65
Tableau 24. Classification des eaux de la nappe plio-quaternaire selon les résultats de l'ACP67	
Tableau 25. Effets de la salinité sur les cultures (Quality of Water for irrigation, Ayers R.S., 1977).....	80
Tableau 26. Adaptation des eaux de la nappe plio-quaternaire à l'irrigation (Richards, 1954 ; Vasanthanvigar, 2010).....	80
Tableau 27. Adaptation des eaux de la nappe plio-quaternaire à l'irrigation selon la classification FAO (1985) .....	81
Tableau 28. Recommandation d'utilisation des eaux pour l'irrigation (Bauder et al, 2010) ...	81
Tableau 29. Classification des eaux d'irrigation d'après Doneen (1962) .....	82
Tableau 30. Classification des eaux de la nappe plio-quaternaire selon le SAR (Todd, 1959 ; Richards, 1954, USSL).....	83
Tableau 31. Classification des eaux de la nappe plio-quaternaire selon le SARadju.....	84
Tableau 32. Répercussions de la variation du SAR et de la CE sur l'infiltration (Ayers et Westcot, 1994 .....	85
Tableau 33. Classification des eaux de la nappe plio-quaternaire selon le PSS (Todd, 1959)	86
Tableau 34. Effets de la CE et du SAR sur l'infiltration du sol (Ayers et Westcot, 1976; Oster et al. 1979) .....	89

Tableau 35. Paramètres de sodicité .....	90
Tableau 36. Volumes AEP mobilisés pour la ville de Bel Abbès en 1971 d'après Sourisseau .....	130
Tableau 37. Volumes AEP extraits des différents aquifères dans le secteur d'étude.....	131
Tableau 38. Evolutions des besoins AEP (1999 – 2014, Wilaya de Sidi Bel Abbès).....	131
Tableau 39: volumes journaliers AEP intra-Wilaya mobilisés en 2014 (Wilaya de Sidi Bel Abbès, 2014).....	131
Tableau 40. Volumes journaliers AEP extra -Wilaya mobilisés en 2014(Wilaya de Sidi Bel Abbès, 2014).....	132
Tableau 41. Evolution des besoins AEP de 1999 à 2014.....	132
Tableau 42. Volumes AEP retenus pour le modèle.....	134
Tableau 43. Industries majeures au niveau de la wilaya de Bel Abbès.....	135
Tableau 44. Superficies des zones industrielle et d'activités .....	135
Tableau 45. Prélèvements industriels retenus pour le modèle .....	136
Tableau 46. Superficies agricoles utiles et irriguées au niveau de la Wilaya de Bel Abbès 1999 – 2014 (DSA de Bel abbès) .....	140
Tableau 47. Superficies irriguées et récoltées sur le bassin de la Mekerra (SOGREAH, 1969).....	141
Tableau 48. Superficies irriguées par type de culture (2001 : RGAA, 2005 : DSA de Bel Abbès) .....	142
Tableau 49. Superficies irriguées par type de culture (DSA de Bel Abbès, 2013) .....	142
Tableau 50. Superficies irriguées et volumes d'eau utilisés selon le type d'alimentation (SOGREAH, 2006).....	142
Tableau 51. Prélèvements agricoles introduits dans le modèle.....	143
Tableau 52. Bilan des entrées et sorties en régime permanent du système aquifère plio- quaternaire .....	159
Tableau 53. Baisse du niveau de la nappe plio-quaternaire entre 1971 et 2014.....	165
Tableau 54. Baisse du niveau de la nappe selon le scénario 1. ....	179
Tableau 55. Bilans des entrées et sorties des scénarios 1, 2 et 3.....	193
Tableau 56. Moyennes annuelles pour toute la simulation (1971-2014) .....	194

## *Annexes*

Annexe 1 (1/2) : concentrations en mg/l des ions majeurs, du TSD et de la MINR et en  $\mu\text{S}/\text{cm}$  de la CE.

Echantillon	X (km)	Y (km)	Ca	Mg	Na	K	Cl
1	198	212	580	180	541	11	2061
2	203	203	240	111	345	13	965
3	193	209	295	115	275	16	815
4	199	212	530	225	481	10	1905
5	207	213	109	270	965	13	1909
6	195	213	420	160	425	9	1578
7	181	202.5	455	9	220	7	870
8	193	212.5	305	78	232	8	839
9	195.5	211	270	55	171	12	721
10	190	205	175	75	240	6	550
11	195	204.5	85	71	135	9	270
12	194.5	206	221	105	240	10	916
13	191.5	212	350	30	310	7	957
14	188.5	202	185	70	135	7	405
15	193.5	211	235	56	240	6	691
16	195	205	255	122	165	9	955
17	200	211	170	115	300	10	876
18	191	207	350	105	390	12	1132
19	188.5	203	160	45	110	15	295
20	205.5	212	149	210	506	8	1386
21	199	212	761	125	631	14	2325
22	195.5	208.5	320	180	310	11	1357
23	201	209.5	640	255	1035	20	2885
24	202	206	235	120	191	12	951
25	207	215	380	200	885	27	1936
26	205	213	109	305	990	13	1909
27	193.5	203	105	55	115	6	320
28	206	209	260	145	565	16	1234
29	183	204	320	25	220	4	625
30	199	213	1020	255	1150	18	3561
31	195.5	203	174	115	155	8	594
32	203	213	119	165	920	13	1520
33	185.5	207	780	72	575	17	2045
34	198	213.5	801	130	955	16	2427
35	190	209	205	55	185	6	475
36	196	214	430	159	470	9	1632
37	184	205	420	35	345	5	1050
38	208.5	213	100	160	631	14	1025
39	205.5	208	780	315	1035	16	3507
40	197	213	660	382	1840	12	3937
41	205	210	320	215	505	29	1737
42	185	205.5	355	25	270	5	880
43	207	206	320	141	370	12	1109
44	202	211.5	600	190	471	24	2040
45	207	211.5	340	205	507	13	1716
46	196	214	400	165	470	8	1600
47	182	202.5	359	25	210	7	645
48	192	211	260	70	220	6	654
49	188.5	204.5	130	60	60	9	190
50	196	207	360	170	415	12	1443

Suite Annexe 1 (2/2).

Echantillon	X	Y	SO <sub>4</sub>	NO <sub>3</sub>	HCO <sub>3</sub>	Min	TDS	Cond $\mu$ S/cm
1	198	212	145	67	252	3284	3837	4796
2	203	203	168	32	376	1920	2250	2812
3	193	209	190	195	340	1798	2241	2801
4	199	212	300	196	246	3101	3893	4866
5	207	213	290	45	367	3100	3968	4960
6	195	213	265	85	210	2728	3152	3940
7	181	202.5	160	90	350	1922	2161	2701
8	193	212.5	178	26	299	1674	1965	2456
9	195.5	211	191	96	233	1490	1749	2186
10	190	205	264	71	320	1490	1701	2126
11	195	204.5	35	19	426	802	1050	1312
12	194.5	206	43	54	295	1857	1884	2355
13	191.5	212	120	54	292	1984	2120	2650
14	188.5	202	190	55	411	1240	1458	1822
15	193.5	211	178	86	260	1675	1752	2190
16	195	205	20	42	260	1860	1828	2285
17	200	211	90	19	280	1800	1860	2325
18	191	207	120	105	235	2295	2449	3061
19	188.5	203	7	14	572	1055	1218	1522
20	205.5	212	168	51	320	2418	2798	3497
21	199	212	240	67	245	3471	4408	5510
22	195.5	208.5	95	60	190	2356	2523	3153
23	201	209.5	551	52	194	3965	5632	7040
24	202	206	51	39	220	1798	1819	2273
25	207	215	408	90	370	3162	4296	5370
26	205	213	264	87	550	3286	4227	5283
27	193.5	203	35	16	382	864	1034	1292
28	206	209	372	41	456	2356	3089	3861
29	183	204	144	61	370	1550	1769	2211
30	199	213	480	162	187	4835	6833	8541
31	195.5	203	58	63	395	1424	1562	1952
32	203	213	360	45	457	2790	3599	4498
33	185.5	207	410	98	159	3286	4156	5195
34	198	213.5	780	76	253	3720	5438	6797
35	190	209	226	46	409	1425	1607	2008
36	196	214	216	95	240	2665	3251	4063
37	184	205	168	45	375	2110	2443	3053
38	208.5	213	264	47	414	2170	2655	3318
39	205.5	208	624	169	360	4401	6806	8507
40	197	213	912	62	334	5208	8139	10173
41	205	210	276	29	310	2790	3421	4276
42	185	205.5	171	50	347	1920	2103	2628
43	207	206	142	25	344	2294	2463	3078
44	202	211.5	275	56	205	3099	3861	4826
45	207	211.5	264	70	304	2792	3419	4273
46	196	214	144	101	236	2912	3124	3905
47	182	202.5	161	62	400	1612	1869	2336
48	192	211	192	61	328	1613	1791	2238
49	188.5	204.5	25	13	548	804	1035	1293
50	196	207	96	81	208	2542	2785	3481

Annexe 2 : concentrations en meq/l des ions majeurs.

Echantillon	Ca[meq/L]	Mg[meq/L]	Na[meq/L]	K[meq/L]	HCO <sub>3</sub> [meq/L]	Cl[meq/L]	SO <sub>4</sub> [meq/L]	NO <sub>3</sub> [meq/L]
1	28.942	14.812	23.532	0.28134	4.13	58.133	3.019	1.0806
2	11.976	9.1339	15.007	0.3325	6.1622	27.219	3.4979	0.51609
3	14.721	9.4631	11.962	0.40922	5.5722	22.988	3.956	3.1449
4	26.447	18.515	20.922	0.25577	4.0317	53.733	6.2463	3.161
5	5.4391	22.218	41.975	0.3325	6.0147	53.846	6.038	0.72575
6	20.958	13.166	18.486	0.23019	3.4417	44.51	5.5175	1.3709
7	22.705	0.74059	9.5695	0.17904	5.7361	24.54	3.3313	1.4515
8	15.22	6.4184	10.091	0.20461	4.9003	23.665	3.7061	0.41932
9	13.473	4.5258	7.4381	0.30692	3.8186	20.337	3.9768	1.5483
10	8.7325	6.1716	10.439	0.15346	5.2444	15.513	5.4967	1.1451
11	4.2415	5.8424	5.8722	0.23019	6.9816	7.6157	0.72873	0.30643
12	11.028	8.6402	10.439	0.25577	4.8347	25.837	0.8953	0.8709
13	17.465	2.4686	13.484	0.17904	4.7855	26.993	2.4985	0.8709
14	9.2315	5.7601	5.8722	0.17904	6.7358	11.424	3.956	0.88703
15	11.727	4.6081	10.439	0.15346	4.2611	19.491	3.7061	1.387
16	12.725	10.039	7.1771	0.23019	4.2611	26.937	0.41642	0.67737
17	8.483	9.4631	13.049	0.25577	4.5889	24.709	1.8739	0.30643
18	17.465	8.6402	16.964	0.30692	3.8514	31.93	2.4985	1.6934
19	7.984	3.7029	4.7847	0.38365	9.3744	8.3209	0.14575	0.22579
20	7.4351	17.28	22.01	0.20461	5.2444	39.094	3.4979	0.82252
21	37.974	10.286	27.447	0.35807	4.0153	65.58	4.997	1.0806
22	15.968	14.812	13.484	0.28134	3.1139	38.276	1.978	0.96767
23	31.936	20.983	45.02	0.51153	3.1794	81.375	11.472	0.83864
24	11.727	9.8745	8.308	0.30692	3.6055	26.824	1.0619	0.62898
25	18.962	16.458	38.495	0.69057	6.0639	54.608	8.4949	1.4515
26	5.4391	25.098	43.063	0.3325	9.0139	53.846	5.4967	1.4031
27	5.2395	4.5258	5.0022	0.15346	6.2605	9.026	0.72873	0.25804
28	12.974	11.932	24.576	0.40922	7.4733	34.807	7.7454	0.66124
29	15.968	2.0572	9.5695	0.10231	6.0639	17.629	2.9982	0.98379
30	50.898	20.983	50.022	0.46038	3.0647	100.44	9.994	2.6127
31	8.6826	9.4631	6.7421	0.20461	6.4736	16.755	1.2076	1.016
32	5.9381	13.577	40.018	0.3325	7.4897	42.874	7.4955	0.72575
33	38.922	5.9247	25.011	0.4348	2.6058	57.682	8.5365	1.5805
34	39.97	10.697	41.54	0.40922	4.1464	68.457	16.24	1.2257
35	10.23	4.5258	8.0471	0.15346	6.703	13.398	4.7055	0.74188
36	21.457	13.084	20.444	0.23019	3.9333	46.033	4.4973	1.5321
37	20.958	2.8801	15.007	0.12788	6.1458	29.617	3.4979	0.72575
38	4.99	13.166	27.447	0.35807	6.785	28.912	5.4967	0.758
39	38.922	25.921	45.02	0.40922	5.9	98.92	12.992	2.7256
40	32.934	31.434	80.036	0.30692	5.4739	111.05	18.989	0.99992
41	15.968	17.692	21.966	0.74172	5.0805	48.994	5.7466	0.4677
42	17.715	2.0572	11.744	0.12788	5.6869	24.822	3.5604	0.80639
43	15.968	11.603	16.094	0.30692	5.6378	31.281	2.9566	0.40319
44	29.94	15.635	20.487	0.61384	3.3597	57.541	5.7257	0.90315
45	16.966	16.869	22.053	0.3325	4.9822	48.402	5.4967	1.1289
46	19.96	13.577	20.444	0.20461	3.8678	45.13	2.9982	1.6289
47	17.914	2.0572	9.1345	0.17904	6.5555	18.193	3.3522	0.99992
48	12.974	5.7601	9.5695	0.15346	5.3755	18.447	3.9976	0.98379
49	6.487	4.9373	2.6099	0.23019	8.9811	5.3592	0.52052	0.20966
50	17.964	13.989	18.052	0.30692	3.4089	40.702	1.9988	1.3063

### Annexe 3 : ratios

Echantillon	Cl/Cl+HCO <sub>3</sub>	Mg/Ca	Ca/Mg	Na/K	Ca+Mg	Na+K	Cl/Na	Ca+Mg-Na-I	HCO <sub>3</sub> +CO <sub>3</sub> -
1	0.9337	0.512	1.954	83.64	43.75	23.81	2.47	19.94	-57.022
2	0.8154	0.763	1.311	45.13	21.11	15.34	1.814	5.771	-24.555
3	0.8049	0.643	1.556	29.23	24.18	12.37	1.922	11.81	-21.372
4	0.9302	0.7	1.428	81.8	44.96	21.18	2.568	23.78	-55.948
5	0.8995	4.085	0.245	126.2	27.66	42.31	1.283	-14.651	-53.869
6	0.9282	0.628	1.592	80.31	34.12	18.72	2.408	15.41	-46.585
7	0.8105	0.033	30.66	53.45	23.45	9.749	2.564	13.7	-22.135
8	0.8285	0.422	2.371	49.32	21.64	10.3	2.345	11.34	-22.471
9	0.8419	0.336	2.977	24.23	18	7.745	2.734	10.25	-20.495
10	0.7474	0.707	1.415	68.03	14.9	10.59	1.486	4.311	-15.766
11	0.5217	1.377	0.726	25.51	10.08	6.102	1.297	3.982	-1.363
12	0.8424	0.783	1.276	40.82	19.67	10.7	2.475	8.973	-21.898
13	0.8494	0.141	7.075	75.32	19.93	13.66	2.002	6.27	-24.706
14	0.6291	0.624	1.603	32.8	14.99	6.051	1.945	8.94	-8.644
15	0.8206	0.393	2.545	68.03	16.33	10.59	1.867	5.742	-18.936
16	0.8634	0.789	1.268	31.18	22.76	7.407	3.753	15.36	-23.092
17	0.8434	1.116	0.896	51.02	17.95	13.31	1.893	4.641	-21.994
18	0.8924	0.495	2.021	55.27	26.11	17.27	1.882	8.834	-30.577
19	0.4702	0.464	2.156	12.47	11.69	5.168	1.739	6.519	0.908
20	0.8817	2.324	0.43	107.6	24.72	22.21	1.776	2.501	-37.347
21	0.9423	0.271	3.692	76.65	48.26	27.81	2.389	20.45	-66.562
22	0.9248	0.928	1.078	47.93	30.78	13.77	2.839	17.01	-37.14
23	0.9624	0.657	1.522	88.01	52.92	45.53	1.808	7.388	-89.668
24	0.8815	0.842	1.188	27.07	21.6	8.615	3.229	12.99	-24.281
25	0.9001	0.868	1.152	55.74	35.42	39.19	1.419	-3.766	-57.039
26	0.8566	4.614	0.217	129.5	30.54	43.4	1.25	-12.858	-50.329
27	0.5905	0.864	1.158	32.6	9.765	5.156	1.804	4.61	-3.494
28	0.8232	0.92	1.087	60.06	24.91	24.99	1.416	-0.08	-35.079
29	0.7441	0.129	7.762	93.54	18.03	9.672	1.842	8.353	-14.563
30	0.9704	0.412	2.426	108.7	71.88	50.48	2.008	21.4	-107.37
31	0.7213	1.09	0.918	32.95	18.15	6.947	2.485	11.2	-11.489
32	0.8513	2.286	0.437	120.4	19.52	40.35	1.071	-20.835	-42.879
33	0.9568	0.152	6.569	57.52	44.85	25.45	2.306	19.4	-63.613
34	0.9429	0.268	3.736	101.5	50.67	41.95	1.648	8.718	-80.551
35	0.6665	0.442	2.26	52.44	14.76	8.201	1.665	6.555	-11.4
36	0.9213	0.61	1.64	88.81	34.54	20.67	2.252	13.87	-46.597
37	0.8281	0.137	7.277	117.3	23.84	15.13	1.974	8.704	-26.969
38	0.8099	2.638	0.379	76.65	18.16	27.81	1.053	-9.649	-27.623
39	0.9437	0.666	1.502	110	64.84	45.43	2.197	19.41	-106.01
40	0.953	0.954	1.048	260.8	64.37	80.34	1.387	-15.975	-124.56
41	0.906	1.108	0.903	29.62	33.66	22.71	2.23	10.95	-49.66
42	0.8136	0.116	8.611	91.84	19.77		2.113	7.9	-22.695
43	0.8473	0.727	1.376	52.44	27.57		1.944	11.17	-28.6
44	0.9448	0.522	1.915	33.38	45.57		2.809	24.47	-59.907
45	0.9067	0.994	1.006	66.33	33.84		2.195	11.45	-48.917
46	0.9211	0.68	1.47	99.92	33.54		2.208	12.89	-44.261
47	0.7351	0.115	8.708	51.02	19.97		1.992	10.66	-14.99
48	0.7744	0.444	2.252	62.36	18.73		1.928	9.011	
49	0.3737	0.761	1.314	11.34	11.42		2.053	8.584	
50	0.9227	0.779	1.284	58.82	31.95		2.255	13.59	

Annexe 4 : paramètres conditionnant l'usage des eaux de la nappe plio-quaternaire pour l'irrigation.

Echantillon	SAR	SAR adju	Na%	SSP%	RSC	RSBC	PI%	KI	MR%
1	5.03112325	6.87201177	34.8274773	34.9730999	-39.624	-24.812	37.8352028	0.53782511	33.8529049
2	4.61918964	5.91958719	41.1721455	41.5511852	-14.9477	-5.8138	47.9826222	0.71089868	43.2683243
3	3.43996347	4.55664655	32.7230072	33.0934734	-18.6119	-9.1488	39.1804826	0.4946225	39.129428
4	4.41260838	5.67797259	31.6330099	31.7558132	-40.9303	-22.4153	34.6688677	0.46532628	41.179218
5	11.2876201	11.9543723	59.9946259	60.281106	-21.6424	0.5756	63.4999536	1.51769347	80.3338022
6	4.47536004	5.59847757	34.9847342	35.1378065	-30.6823	-17.5163	38.4956639	0.54173016	38.5828156
7	2.79494755	5.24776232	28.8288923	28.9852307	-17.70949	-16.9689	36.0440706	0.40815778	3.15876035
8	3.06786773	4.22695143	31.5995392	31.8033118	-16.7381	-10.3197	38.5315284	0.46634686	29.6620822
9	2.47944932	3.411793	28.8927595	29.2413777	-14.1802	-9.6544	36.4834117	0.41325533	25.1450097
10	3.82402759	4.73727397	40.9427782	41.1906988	-9.6597	-3.4881	49.9246389	0.7004113	41.4087399
11	2.61517991	3.03392862	36.2788508	36.8022261	-3.1023	2.7401	52.6029853	0.58233422	57.937901
12	3.32882978	4.23006154	34.3806946	34.6727693	-14.8335	-6.1933	41.6223944	0.53075523	43.9297953
13	4.27111114	6.58791539	40.1349659	40.3499952	-15.1481	-12.6795	46.6462675	0.6764458	12.3841153
14	2.1448249	2.85514447	27.905929	28.1454002	-8.2558	-2.4957	40.2395398	0.39169935	38.4221831
15	3.65269152	4.89438966	38.7669733	38.9891724	-12.074	-7.4659	46.4328859	0.63905333	28.2098059
16	2.12735372	2.66284651	23.787846	23.9707292	-18.5029	-8.4639	30.6295926	0.3152829	44.1003339
17	4.35619375	5.11762875	41.7556375	42.1002029	-13.3572	-3.8941	48.6103964	0.72712177	52.7306769
18	4.69547734	6.09360937	39.1090766	39.387776	-22.2538	-13.6136	43.6334518	0.64983222	33.0976204
19	1.97933838	2.86892427	28.3870011	29.0481799	-2.3125	1.3904	46.5520488	0.40940711	31.6841934
20	6.26114634	6.93938611	46.8999276	47.1053031	-19.4707	-2.1907	51.7797052	0.89054869	69.9167715
21	5.58748308	8.22046533	36.0835795	36.2542433	-44.2447	-33.9587	38.717931	0.56873187	21.3137174
22	3.43715751	4.09622917	30.2702819	30.4626785	-27.6661	-12.8541	34.2316943	0.43807667	48.1221572
23	8.75214842	9.95260474	45.7285502	45.9673879	-49.7396	-28.7566	47.5397006	0.85073414	39.651165
24	2.52795612	3.0484738	27.4949845	27.7771277	-17.996	-8.1215	33.7790361	0.38460292	45.7121033
25	9.14734467	11.546999	51.5980241	52.080092	-29.3561	-12.8981	54.8987143	1.08681536	46.4652739
26	11.0206037	11.7468333	58.2462946	58.5094314	-21.5232	3.5748	62.3071768	1.4101863	82.188551
27	2.26377498	2.79942214	33.5246526	33.873032	-3.5048	1.021	50.2936749	0.51224233	46.3457344
28	6.96424762	8.74319506	49.2591682	49.6665454	-17.4327	-5.5007	54.7385566	0.98675018	47.9081346
29	3.18760279	5.44954481	34.5506609	34.6787608	-11.9613	-9.9041	43.4415077	0.53089563	11.4129108
30	8.34389816	11.0584006	40.8798776	41.0342649	-68.8163	-47.8333	42.3105577	0.69590017	29.1913023
31	2.23832592	2.73393414	26.8690811	27.0899798	-11.6721	-2.209	37.0089084	0.37155359	52.1506473
32	12.8110577	14.2935103	66.8464026	67.2197483	-12.0254	1.5516	71.4178621	2.05061721	69.5717675
33	5.28178609	7.07492906	35.5813209	35.8027819	-42.2409	-36.3162	37.877795	0.5576999	13.2110055
34	8.25313397	12.328255	44.8517549	45.0508096	-46.5206	-35.8236	47.0503667	0.81986303	21.1123611
35	2.96259998	4.23361565	35.0539023	35.2898096	-8.0528	-3.527	46.3318891	0.54535166	30.6713292
36	4.9194145	6.43064802	37.026043	37.1810494	-30.6077	-17.5237	40.6179077	0.59187632	37.8796213
37	4.34683406	7.69837792	38.506165	38.6329292	-17.6923	-14.8122	44.867168	0.62953843	12.0819193
38	9.10961018	10.036959	59.7179308	60.1868298	-11.371	1.795	65.385343	1.51173166	72.5159727
39	7.9065849	10.6856315	40.8262389	40.9783093	-58.943	-33.022	43.0289619	0.69429237	39.9750166
40	14.1079972	17.5841728	55.3075055	55.4250575	-58.8941	-27.4601	56.9242713	1.24341288	48.8348248
41	5.35437669	6.45891226	38.9691121	39.4887283	-28.5795	-10.8875	42.9678484	0.65258467	52.5609031
42	3.73511126	6.14826978	37.112787	37.2633757	-14.0853	-12.0281	44.6488639	0.59396526	10.4045073
43	4.33463702	5.63350916	36.6006306	36.8578953	-21.9332	-10.3302	42.0004521	0.58372928	42.0840738
44	4.29170663	5.58050751	30.7262721	31.0117768	-42.2153	-26.5803	33.4753165	0.44952276	34.3060889
45	5.36166388	6.60302016	39.2259051	39.4592757	-28.8528	-11.9838	43.196137	0.6517807	49.8566573
46	4.99250795	6.35363524	37.7295743	37.8725848	-29.6692	-16.0922	41.3590847	0.60959537	40.4836449
47	2.89066456	5.20182529	31.1920133	31.383887	-13.4157	-11.3585	39.9350347	0.45738363	10.3008332
48	3.12671162	4.30768034	33.627859	33.8101867	-13.3586	-7.5985	41.7752658	0.5108065	30.7466065
49	1.09200359	1.43808695	18.2966114	18.5967137	-2.4432	2.4941	39.3059103	0.22845163	43.2175276
50	4.51631789	5.59110577	35.8801652	36.10039	-28.5441	-14.5551	39.5499132	0.56495478	43.7799268

## *Références bibliographiques*

**ABH** (Agence des bassins hydrographiques de l'Oranie). **2010**. Rapport publié par le Ministère des ressources hydriques sur les ressources en eau. 40p.

**Adams SS, Titus R, Pietersen K, Tredoux G, Harris C. 2001**. Hydrochemical characteristics of aquifers near Sutherland in Western Karoo, South Africa. *Journal of Hydrology*. v. 241, p. 91-103.

**ADE** (Algérienne Des Eaux) de Sidi Bel Abbès. **2011**. Rapport sur les données générales du secteur de l'eau dans la Wilaya de Bel Abbès: études et réalisation des projets.61p.

**Alley WM, Healy RW, LaBaugh JW, and Reilly TE. 2002**. Flow and storage in groundwater systems. *Science*. 296, 1985–1990. <https://doi.org/10.1126/science.1067123>.

**Alley WM, Leake SA. 2004**. The journey from safe yield to sustainability. *GroundWater*. 42 (1), 12–16. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2012.12.013>

**Al-Omran AM, Al-Harbi AR, Wahb-Allah MA, Nadeem M, Al-Eter A. 2014**. Impact of irrigation water quality, irrigation systems, irrigation rates and soil amendments on tomato production in sandy calcareous soil. *Turkish J For Agric*. 34, 59–73

**Asoka A, Gleeson T, Wada Y, Mishra V. Nat. 2017**. *Geosci*. 10, 109–117. <https://doi.org/10.1038/ngeo2869>

**Ayers RS, Westcot DW. 1979**. Water quality for agriculture. FAO irrigation and drainage paper 29 (rev 1).

**Bauder TA, Cardon GE, Waskam RM, Davis JG. 2004**. Irrigation water quality. Cooperative extension agriculture 506. Colorado State University, Colorado, USA.

**Bauder TA, Waskom RM, Davis JG. 2010**. Irrigation Water Quality Criteria. Colorado State University Extension, Colorado, USA.

**G, McGuire M, Moiler D. 2009**. Groundwater allocation using a groundwater level response management method—Gnangara groundwater system, Western Australia. *Water Resour. Manag*. 23, 1665–1683. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2004.tb02446.x>

**Bemmouat A. 2012**. Impact de l'activité agricole sur la qualité des eaux souterraines à travers le bassin de la Tafna. Mémoire de Magister, Université Abou Bekr Belkaïd. 156p.

**Benaouda Z. 1996**. Diagnostic phytoécologique et édaphique et établissement d'une relation sol-végétation dans les forêts de Tenira - Khodida – Touazizine (W. Sidi Bel Abbès). Mémoire de Magister, Université de Tlemcen. 116p.

**Bennabi F., Ghomari S., Bennabi L., Hamel L., Egharbi A., Toumi F. 2016**. Approche de gestion des ressources en eau : cas de la région de Sidi Bel Abbès. *Afrique Science*. Vol 12 (1), 205-213.

**Bensalem MB. 2008**. Contribution à l'étude de l'efficacité de l'épuration des eaux usées dans la ville de Sidi Bel Abbès. Mémoire de Magister, Université Djillali Liabes. 155 p.

**Berne F, Cordonnier J, 1991**. Traitement des eaux. Edition : Tec. P 6-14.

**Boisson A, Villesseche D, Baisset M, Perrin J, Viossanges M, Kloppmann W, Chandra S, Dewandel B, Picot-Colbeaux G, Rangarajan R, Maréchal J C, Ahmed S. 2014.** Environmental Earth Sciences.

<https://doi.org/10.1007/s12665-014-3229-2>

**Bouarfa S, Marlet S, Douaoui A, Hartani T, Mekki I, Ghazouani W, Ben Aissa I, Vincent B, Hassani F, Kuper M. 2009.** Salinity Patterns in Irrigation Systems, a Threat to be Demystified, a Constraint to be Managed: Field Evidence from Algeria and Tunisia. *Irrigation and Drainage*. 58, 273 – 284.

<https://doi.org/10.1002/ird.524>

**Boudjadja A, Messahel M, Pauc H.2003.** Ressources hydriques en Algérie du Nord (Water Resources in Northern Algeria). *Water Science Reviews*. 16 (3), 285-304.

**Bower CA. 1959.** Cation exchange equilibrium in soils affected by sodium salts. *Soil Sci*. 88, 32-35. <https://doi.org/10.1097/00010694-195907000-00006>.

**Buckman HO, Brady NC. 1984.** The nature and properties of soils. 9Rev Ed, New York: MacMillan. 526p.

<https://doi.org/10.1097/00010694-197512000-00004>.

**Bzioui M. 2005.** Subregional Report on Water Resources in North Africa. UN WATER- AFRICA Report.

**Candela L, Gomez M, Puga L, Rebollo L, Villarroya F. 1999.** Aquifer overexploitation. Tenerife, 1999, AIH, 15 580.

**Cherif EA, Errih M, Madani H. 2009.** Modélisation statistique du transport solide du bassin versant de l'Oued Mekerra (Algérie) en zone semi-aride méditerranéenne. *Hydrological Sciences Journal*. 54:2, 338-348.

**Cerling TE, Pederson BL, Damm KLV, 1989.** Sodium-Calcium ion exchange in the weathering shales. Implications for global weathering budgets. *Geology*. v. 17, p. 552-554.

**Drever, JI,1988.** The geochemistry of natural waters. Prentice Hall, Englewood cliffs, NJ. 437 p.

**Chadha DK,1999.** A proposed new diagram for geochemical classification of natural waters and interpretation of chemical data. *Hydrogeology Journal*. 7, 431-437.

**Chen Y, Banin A, Borochovitc A. 1983.** Effect of potassium on soil structure in relation to hydraulic conductivity. *Geoderma*. 30, 135-147.

[https://doi.org/10.1016/0016-7061\(83\)90061-7](https://doi.org/10.1016/0016-7061(83)90061-7).

**Christensen JH, Hewitson B, Busuioc A, Chen A, Gao X, Held I, Jones R, Kolli R K, Kwon WT, Laprise R, Magaña Rueda V, Mearns L, Menéndez CG, Räisänen J, Rinke A, Sarr A, and Whetton P. 2007.** Regional Climate Projections. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B Averyt, M. Tignor, H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007.

**Cirelli A.F., Miretzky P., 2004.** Ionic relations: a tool for studying hydrogeochemical processes in Pampean shallow lakes (Buenos Aires, Argentina). *Quatern. Int.* 114, 113–121.

**Custodio E. Hydrogeol J. 10, 2000a,** 254-277.  
<https://doi.org/10.1126/science.1151915>

**Custodio E. 2000b.**The complex concept of overexploited aquifer. *Papeles de la Fundación Marcelino Botín, Madrid.* 2, 1–45.

**Custodio E. 2002.** Aquifer overexploitation: what does it mean? *Hydrogeol. J.* 10, 254-277.  
[doi:10.1007/s10040-002-0188-6](https://doi.org/10.1007/s10040-002-0188-6)

**Davis SN, 1964.** The chemistry of saline waters. *Groundwater.* 2(1), p. 51.

**DHW (Direction de l'Hydraulique de la Wilaya) de Sidi Bel Abbès. 2013.** Perspective du développement durable dans l'Ouest Algérien, Office des Publications Universitaires. 70p.

**Dixon W, Chiswell B, 1992.** The use of hydrochemical sections to identify recharge areas and saline intrusions in alluvial aquifers, southeast Queensland, Australia, *J. Hydrol.* 135, 259–274.

**Doneen LD. 1954.** Salination of soil by salts in the irrigation water. *American Geophysical Union Transactions.* 35: 943–950.  
<https://doi.org/10.1029/TR035i006p00943>.

**Doneen LD. 1962.** The influence of crop and soil on percolating water. In *Proceedings of the Biennial Conference on Ground Water Recharge, 1962,* p156–163.

**Doneen LD. 1964.** Notes on water quality in agriculture. In *Water Science and Engineering.* Dept. of Water, Science and Engineering, Univ. of California, Davis, Paper 4001.

**Douaoui A, Hartani T, Lakehal M, 2006.** La salinisation dans la plaine du Bas-Cheliff : acquis et perspectives. ('Salinization in the Bas-Cheliff Plain: Achievements and Prospects') In: *Water Savings in Maghreb Irrigated Systems. Second Regional Workshop of the Sirma Project, Marrakech, Morocco, 29-31 Mai 2006.*

**DPSB (Direction de la Programmation et du Suivi Budgétaire). 2013.** Rapport sur les statistiques de la croissance démographique dans la région de Sidi Bel Abbès. 40p.

**DSA (direction des services agricoles). 2013.** Bilan des Productions Annuelles, direction des services agricoles + site officiel (1999 - 2014).

**DSASI. 2012.** (Direction des Statistiques Agricoles et des Systèmes d'Information). *Séries Agri. Stat,* Ministère de l'agriculture, Algérie, 2001/2012.

**Durov SA, 1948.** Classification des eaux naturelles et la représentation graphique de leur composition. *Doklady Akad. Nauk. S.S.S.R.* t. 59, No 1, 87-90.

**Eaton EM. 1950.** Significance of carbonate in irrigation water. *Soil Sci.* 69, 12–133.  
<https://doi.org/10.1097/00010694-195002000-00004>

**Ekwere A. S., 2010.** Hydrogeological and hydrogeochemical framework of the Oban Massif, south-eastern Nigeria. 2010. Ph.D Thesis - Dept. of Geology, University of Calabar, Calabar.

**Emerson WW, Bakker AC. 1973.** The comparative effects of exchangeable calcium, magnesium, and sodium on some physical properties of red-brown earth subsoils. The spontaneous dispersion of aggregates in water. *Australian Journal of Soil Research*. 11, 151-157. <https://doi.org/10.1071/SR9730151>.

**Ettazarini S, 2005.** Processes of water-rock interaction in the Turonian aquifer of Oum Er-Rabia Basin, Morocco. *Environmental Geology*. v. 49, p 293-299.

**Datta PS, Tyagi SK. 1996.** Major Ion Chemistry of Groundwater in Delhi Area: Chemical Weathering Processes and Groundwater Flow Regime. *Journal of Geological Society of India*. 47, 179-188.

**Famiglietti JS. 2014.** The global groundwater crisis. *Nat. Clim. Change*. 4, 945–948.

**Faraoun F, Benabdeli K. 2010.** Cartographie et caractérisation physico-chimique des sols de la plaine de Sidi Bel Abbés (Algérie occidentale). *Afrique Science*. 06(3), 18 – 26.

**Feth JH, Gibbs RJ, 1971.** Mechanisms controlling world water chemistry: evaporation–crystallization process. *Science*. 172 (3985), 870–872.

**Fisher RS, Mullican W.F. 1997.** Hydrochemical evolution of sodium-sulfate and sodium-chloride groundwater beneath the Northern Chihuahua Desert, Trans-Pecos, Texas, USA. *Hydrogeology Journal*. v. 5, n. 2, 4-16.

**Frenkel H, Goertzen JO, Rhoades JD. 1978.** Effect of clay type and content, exchangeable sodium percentage, and electrolyte concentration on clay dispersion and soil hydraulic conductivity. *Soil Science Society of America Journal*. 142, 32-39. <https://doi.org/10.2136/sssaj1978.03615995004200010008x>.

**Gain AK, Giupponi CA. 2015.** Dynamic assessment of water scarcity risk in the Lower Brahmaputra River Basin: An integrated approach. *Ecol. Indic*. 48, 120–131.

**Ghassemi F, Jakeman AJ, Nix HA. 1995.** Salinization of Land and Water Resources: Human Causes, Extent, Management and Case Studies. Sydney : NSW University Press, 526p.

**Gibbs R.J., 1970.** Mechanisms Controlling World’s water chemistry. *Science*. 170, No 10, 88-90.

**Giordano M. 2005.** *Water Polic*. 7, 613-626. <https://doi.org/10.2166/wp.2005.0037>

**Gleeson T, VanderSteen J, Sophocleous MA, Taniguchi M, Alley WM, Allen DM, Zhou Y. 2010.** *Nat. Geosci*. 3, 378–379. <https://doi.org/10.1038/ngeo881>

**Gleick PH. 2001.** Making every drop count. *Scientific American* 284, issue 2. Hani A, Lallahem S, Mania J, Djabri L (2006). On the use of finite-difference and neuralnetwork models to evaluate the impact of underground water overexploitation. *Hydrol Process* 20, 4381–4390

**Gregory JM, White NJ, Church JA, Bierkens MFP, Box JE, van den Broeke MR, Cogley GJ, Fettweis X, Hanna E, Huybrechts P, Konikow LF, Leclercq PW, Marzeion B, Oerlemans J, Tamisiea ME, Wada Y, Wake LM, and van de Wal RSW. 2013.** *J. Clim*. 26, 4476–4499. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00319.1>

- Guo HM, Wang YX. 2004.** Hydrogeochemical processes in shallow quaternary aquifers from the northern part of the Datong Basin, China. *Appl. Geochem.* 19, 19–27.
- Gupta SK. 1983.** Variations of water table in Yamuna drainage basin of Haryana-implications and management strategies. Paper presented at the Seminar on Strategies for Irrigation Water Management, Patna, 1983.
- Handa BK. 1979.** Groundwater pollution in India. In Proceedings of National Symposium on Hydrology. IAHS, Publ. Univ. Roorkee, India, 34–49.
- Hanson B, Grattan SR, Fulton A. 2006.** Agricultural Salinity and Drainage. University of California Irrigation Program. University of California, Davis: Division of agriculture and natural resources publication 3375, 180p.  
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1983.tb01063.x>.
- Hardy N, Shainberg I, Gal M, Keren R. 1983.** The effect of water quality and storm sequence upon infiltration rate and crust formation. *Journal of Soil Science.* 34, 665-676.  
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1983.tb01063.x>.
- Heath R.C., 1983.** Basic groundwater hydrology: U.S. Geological Survey Water Supply Paper 2220, 84p.
- Hem J.D., 1989.** Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water: U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2254, 263p.
- Hidalgo M.C., Cruz-Sanjulian J., 2001.** Groundwater composition, hydrochemical evolution and mass transfer in a regional detrital aquifer (Baza basin, southern Spain). *Appl. Geochem.* 16, 745–758.
- Hionidi M, Panagopoulos A, Koumantakis I, Voudouris K. 2001.** “Groundwater quality considerations related to artificial recharge application in the aquifer of the Korinthos Prefecture, Greece” Proc. Int. Conference "Groundwater Quality: Natural and Enhanced Restoration of Groundwater Pollution", Sheffield, International Association of Hydrological Sciences (IAHS), 2001, 275, 85-90.
- Horrich F J, and Besbes M. 2008.** Rationalization of the North Western Saharan Aquifer System Piezometric Network, *Sécheresse.* 19(3), 163-171.
- Hounslow AW. 1995.** Water quality data: Analysis and interpretation, 1st ed. Boca Raton: CRC Press, Lewis Publishers, 416p.
- Imerzoukene S, Walraevens K, and Feyen J. 1994.** Salinization of the coastal and eastern zones of the alluvial and unconfined aquifer of the Mitidja Plain (Algeria). In Proceedings of the 13th Salt Water Intrusion Meeting, Cagliari, Italy, 5–4 June 1994, 163–175.
- Jamagne M., Bétrémieux R., Bégon JC., Mori A., 1977.** Quelques données sur la variabilité dans le milieu naturel de la réserve en eau des sols. *Bulletin Technique d'Information.* 324-325, 627-641.

**Jankowski J., Acworth RI., 1997.** Impact of debris-flow deposits on hydrogeochemical processes and the development of dry land salinity in the Yass River catchment, New South Wales. Australia. *Hydrogeology Journal*. v. 5, n. 4, 71-88.

**Kalaliz S. 2011.** Les ressources en eau dans la région de Sidi Bel Abbes : entre disponibilité et usages pour un développement durable. Mémoire de Master, Université de Sidi Bel Abbès. 70p.

**Kelley WP. 1963.** Use of saline irrigation water. *Soil Sci.* 95, 355–391.  
<https://doi.org/10.1097/00010694-196306000-00003>.

**Konikow LF. (based on Konikow, 1996 & Konikow and Reilly, 1998).** Use of numerical models to simulate ground water flow and transport. 42p.

**Kovda VA. 1980.** Problem of combating salinization of irrigated soils. Moscow: Centre for International Projects, 274p.

**Langelier WF, Ludwig HF. 1942.** Graphical methods for indicating the mineral character of natural waters: *Am. Water Works Assoc.* v 34, 335-352.

**Lerolle Y. 1976.** Modèle mathématique de la nappe de la plaine de Sid Bel Abbes. Direction des études de milieu et de la recherche hydraulique – Sous-direction des ressources en eau, 1976.

**Li B, Rodell M, Famiglietti JS. 2015.** *J. Hydrol.* 525, 769–780.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.04.033>

**Llamas M, Martínez-Santos P. 2005.** Intensive Groundwater Use: Silent Revolution and Potential Source of Social Conflicts. *J. Water Resour. Plann. Manage.* 131(5), 337–341.  
[doi: 10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2005\)131:5\(337\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2005)131:5(337))

**Llamas MR. 2008.** The Groundwater Development Silent Revolution: Pros and Cons. Zaragoza Expo, 2008.

**Loucif N. 2003.** Les ressources en eau et leur utilisation dans le secteur agricole en Algérie (Water Resources and their Use in the Algerian Agriculture Sector). *Homme, Terre et Eaux Review.* 125, 2003.  
<https://doi.org/10.5194/hess-14-1863-2010>

**Madani K, and Dinar A. 2013.** *Water Resour. Econ.* 2 (3), 57–76.  
<https://doi.org/10.1007/s10040-002-0188-6>

**Magaritz M, Nadler A, Koyumdjisky H, Dan J, 1981.** The use of Na-Cl ratios to trace solute sources in a semi-arid zone. *Water Resour. Res.* 17, 602–608.

**Mamatha P, Sudhakar MR. 2010.** Geochemistry of fluoride rich groundwater in Kolar and Tumkur Districts of Karnataka. *Environ. Earth Sci.* 61 (1), 131–142.

**Mamou M, Besbes M, Abdous B, Latrech DJ, and Fezzani C. 2006.** North Western Sahara Aquifer System. Non-Renewable Groundwater Resources. UNESCO, Paris. (NWSAS. In S. Foster, D. Loucks, (Eds.).

**Margat J, van der Gun J. 2013.** Groundwater around the world: A geographic synopsis. London, U. K, CRC Press,348p.

**Maroc H, Ben Achour AY. 2013.** Contribution a l'étude hydrologique du bassin versant de la Mekerra à Sidi Bel Abbès. Mémoire d'Ingénieur, Université d'Oran 2. 91p

**Mass. 1990.** Crop salt tolerance. Agricultural Assessment and Management Manual. K.K. Tanji (ed.), New York: ASCE 262-304.

**Meireles ACM, Maia de Andrade E, Guerreiro Chaves LC, Frischkorn H, Crisostomo LA. 2010.** A new proposal of the classification of irrigation water. *Revista Ciencia Agronomica*. 41(03), 349-357. <https://doi.org/10.1590/S1806-66902010000300005>

**Meybeck M, 1987.** Global chemical weathering from surficial rocks estimated from river dissolved loads. *American Journal of Science* 287, 401–428.

**MH.** (Ministère de l'hydraulique et de la mise en valeur des terres et de l'environnement). **1974.** Carte hydrogéologique de la plaine de Sidi Bel Abbas au 1/100 000.

**Michael AM. 1978.** Irrigation theory and practices. New Delhi: Vikas Publishing . 808p

**Milly PC, Betancourt J, Falkenmark M, Hirsch RM, Kundzewicz ZW, Lettenmaier D. 2008.** *Science*. 319(5863), 573-574.  
<https://doi.org/10.1007/s11269-012-0083-4>

**Mirchi A, Madani K, Roos M, Watkins DW. 2013.** Climate change impacts on California's water resources. in *Drought in Arid and Semi-Arid Regions* (eds. Schwabe, K., Albiac, J., Connor, J. D., Hassan, R. M. & Meza González, L.) 301–319 (Springer Netherlands, 2013).

**Mostefa D. 1972.** Enquête sur les débits extraits de la nappe de Sidi Bel Abbas. Secrétariat d'état à l'hydraulique, Direction des études de milieu et de la recherche hydraulique, Sous-direction des ressources naturelles, Service hydrogéologie, Bureau d'inventaire des ressources hydrauliques de l'ouest algérien.

**Oster JD, Schroer W. 1979.** Infiltration as influenced by irrigation water quality. *Soil Science Society of America Journal*. 43, 444-447.  
<https://doi.org/10.2136/sssaj1979.03615995004300030004x>.

**Ostrom E, Burger J, Field CB, Norgaard RB, and Policansky D. 1999,** *Science*. 284, 278-282. <https://doi.org/10.1126/science.284.5412.278>

**Otmane A. 2015.** Predetermination of rain and extreme flood values in the Mekerra River catchment. Magister thesis, University of Oran 2.

**Panoras A, A. Panagopoulos P. Vafiades. 2004.** Groundwater artificial recharge of the Edessaos basin aquifer system, northern Greece, through irrigation wells. *Agricultural Engineering*. XLI (1), 47-52.

**Phillips FM, Bentley HW, Davis SN, Elmore D, Swanik G. 1986.** Chlorine 36 dating of very old ground waters, 2. Milk river aquifer, Alberta, Canada. *Water resource. Res.* V 22, no 16, 2003-2016.

**Piper A.M., 1944.** A graphical procedure in the geochemical interpretation of water analyses, *Amer. Geoph. Union Trans.* 25, 914-923.

**Potelon J.L., Zysman K., 1993.** Guide des analyses d'eau potable, 155 p.

**Puri S, and Aureli A. 2009.** Atlas of transboundary aquifers: Global maps, regional cooperation and local inventories, in ISARM Program. UNESCO-IHP, Paris, Puri S, and Aureli A (Eds.).

**Ragunath HM. 1987.** Groundwater. New Delhi: Wiley Eastern Ltd. 563p.

**Ramdani N. 2007.** Contribution à l'étude des boues urbaines de la station d'épuration des eaux usées résiduaires; effets sur la fertilité d'un sol sableux. Mémoire de Magister, Université d'Oran. 154p

**Rengasamy P, Greene RSB, Ford GW, Mehanni AH. 1984.** Identification of dispersive behaviour and the management of red-brown earths. Australian Journal of Soil Research. 22, 413-431. <https://doi.org/10.1071/SR9840413>.

**Rengasamy P, Greene RSB, Ford GW. 1986.** Influence of magnesium on aggregate stability in sodic redbrown earths. Australian Journal of Soil Research. 24, 229-237. <https://doi.org/10.1071/SR9860229>.

**Rengasamy P, Sumner ME. 1998.** Processes involved in sodic behavior. In Sumner ME, Naidu R (ed), Sodic Soils. Distribution, Properties, Management and Environmental Consequences, New York (USA): Oxford University Press, 35-50.

**Rengasamy P. 2002.** Clay dispersion. In McKenzie BM *et al* (ed), *Soil physical measurement and interpretation for land evaluation*. Collingwood (Australia): CSIRO Publishing, 200-210.

**Rengasamy P, Marchuk A. 2011.** Cation ratio of soil structural stability (CROSS). Soil Res 49: 280-285. <https://doi.org/10.1071/SR10105>.

**Revelle R. 1946.** Criteria for recognition of seawater. Transactions of the American Geophysical Union 22, 541-593.

**Rhoades JD. 1977.** Potential for using saline agricultural drainage waters for irrigation. Proceedings from Water Management for Irrigation and Drainage. American Society of Civil Engineers, Reno, Nevada, USA.

**Rhoades JD. 1997.** Sustainability of irrigation: an overview of salinity problems and control strategies. Annual conference of the canadian water resources association, footprints of humanity: reflections on fifty years of water resources developments. Lethbridge, Alberta, Canada. June 3-6, 1997, 1-40.

**Rhoades JD. 1998.** Use of saline and brackish waters for irrigation: implications and role in increasing food production, conserving water, sustaining irrigation and controlling soil and water degradation. In Ragab R and Pearce G (eds.) Proceedings of the International Workshop on "The use of saline and brackish water for irrigation - implications for the management of irrigation, drainage and crops", Bali, Indonesia. pp 23-24.

**Robinove CJ, Longfort RH, Brook JW. 1958.** Saline water resource of North Dakota US Geol. Surv. Water Supply Paper, 1428, 72p.

- Rodier J. 2005.** L'analyse de l'eau: Eaux naturelles, Eaux résiduares, Eau de mer. 8eme édition, Dunod, Paris.
- Ryzner, JW. 1944.** A New Index for Determining Amount of Calcium Carbonate Scale Formed by a Water. Journal of American Water Works Association, 36, 472-486.
- Saleh A, Al-Ruwaih F, Shehata M. 1999.** Hydrogeochemical processes operating within the main aquifers of Kuwait. J. Arid Environ 42: 195-209.  
<https://doi.org/10.1006/jare.1999.0511>.
- Sami K., 1992.** Recharge mechanisms and geochemical processes in a semiarid sedimentary basin, Eastern Cape, South-Africa, J. Hydrol. 139, 27–48.
- Sarkar D, Datta R, Hannigan R. 2007.** Concepts and Applications in Environmental Geochemistry. V 5, 1st Edition, 238-239.
- Sawyer GN, McCarthy DL. 1967.** Chemistry of sanitary Engineers, 2nd ed, McGraw Hill, New York, 518p.
- Schoeller H. 1934.** Sur la concentration des sels dissous dans les eaux souterraines. Comité Études eaux souterraines, Rabat, 46-54.
- Schoeller H. 1951.** Relation entre la concentration en chlore des eaux souterraines et les échanges de bases avec les terrains qui les renferment. C.R. Ac. Se, t. 232, p1432-4.
- Schoeller H. 1965.** Qualitative evaluation of ground water resources. In: Methods and techniques of groundwater investigation and development. Water Resour. Series. No 33, UNESCO, 44-52.
- Schwartz FW, Muehlenbachs K. 1979.** Isotope and ion geochemistry of ground waters in the Milk River aquifer, Alberta. Water resource. Res. V 15, no 2, 259-268.
- Scibek JA, Allen DM, Cannon AJ, Whitfield PH. (2007).** Groundwater–surface water interaction under scenarios of climate change using a high-resolution transient groundwater model. Journal of Hydrology. 333, 165– 181.
- Seckler D. 1996.** The new era of water resources management: From “dry” to “wet” water savings. Washington, D C: Consultative Group on International Agricultural Research.
- Sidiropoulos P, Mylopoulos N, Loukas AJ. 2013.** Water Resour. Manag. 27, 1635–1649.  
<https://doi.org/10.1007/s11269-008-9346-5>
- Siebert S, Burke J, Faures JM, Frenken K, Hoogeveen J, Doll P, Portmann FT. 2010.** Earth Syst. Sci. 14, 1863–1880. <https://doi.org/10.5194/hess-14-1863-2010>
- Sima S, and Tajrishy M. J. Gt. 2013.** Lakes Res. 39, 90–99.  
<https://doi.org/10.1016/j.wre.2013.08.001>
- Simmers I, Villarroya F, Rebollo L. 1991.** Selected papers on aquifer overexploitation. IAH, 392.

**Singh A K, Mondal GC, Singh PK, Singh S, Singh TB, Tewary B K. 2005.** Hydrochemistry of reservoirs of Damodar River Basin, India: weathering processes and water quality assessment. *Environmental Geology*. v. 48, 1014-1028.

**Smiles D, Smith C. 2004.** A survey of the cation content of piggery effluents and some consequences of their use to irrigate soil. *Australian Journal of Soil Research*. 42, 231-246.  
<https://doi.org/10.1071/SR03059>.

**Souline VA. 1946.** Eaux des gisements de pétrole dans le système des eaux naturelles. Moscou.

**Souline VA. 1948.** Hydrogéologie des gisements de pétrole. Moscou.

**Sourisseau B. 1971.** Alimentation en eau potable des agglomérations de la plaine de Sidi Bel Abbès : Enquête sur les potentialités en eau potable. Secrétariat d'état à l'hydraulique, Service des études scientifiques.

**Sourisseau B. 1972.** Etude quantitative des ressources en eaux souterraines et bilan de la nappe de la plaine de Sidi Bel Abbès. Secrétariat d'état à l'hydraulique, Direction de l'hydraulique de la wilaya d'Oran.

**Sourisseau B. 1973.** Etude hydrogéologique de la nappe de Sidi Bel Abbès. Direction des études de milieu et de la recherche hydraulique, Sous-direction des ressources en eau.

**Sourisseau B. 1973.** Etude géologique du bassin versant hydrogéologique de la plaine de Sidi Bel Abbès. Service hydrogéologie, Direction de l'hydraulique de la wilaya d'Oran.

**Steinschneider S, McCrary R, Mearns LO, Brown C. 2015.** The effects of climate model similarity on probabilistic climate projections and the implications for local, risk-based adaptation planning: intermodel correlation and risk. *Geophys. Res. Lett.* 42, 5014–5044 .

**Suarez DL. 1981.** Relation between pHs and Sodium Adsorption Ration (SAR) and alternate method of estimating SAR of soil or drainage waters. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 45, 469-475.  
<https://doi.org/10.2136/sssaj1981.03615995004500030005x>.

**Tanji KK. 1990.** Agricultural Salinity Assessment and Management. American Society of Civil Engineers.

**Taylor RG, Scanlon BR, Doell P, Rodell M. 2013.** *Nature Climate Change*. 3(4), 322– 329,  
<https://doi.org/10.1038/nclimate1744>

**Todd DK, Mays LW. 2005.** Groundwater hydrology. Third edition. Inc. NJ, USA John Wiley & Sons.

**UN Water. 2014.** Securing sustainable water for all. A Post-2015 Global Goal for Water: Synthesis of key findings and recommendations from UN-Water. Final approved by SPM meeting 27 January 2014.

**U.S. Salinity Laboratory (United States Department Of Agriculture Handbook). 1954.** Diagnosis and Improvement of Saline and Alkaline Soils. Washington, D.C, USA, 535.

**Vasanthavigar M, Srinivasamoorthy K, Rajiv Gantha R, Vijayaraghavan K, Sarma VS. 2010.** Characterization and quality assessment of groundwater with special emphasis on irrigation utility: Thirumanimuttar sub-basin, Tamil Nadu, India. Arab J Geosci 5, 245-258 <https://doi.org/10.1007/s12517-010-0190-6>.

**Vitosh ML. 1977.** Irrigation Scheduling for Field Crops and Vegetables. Michigan State Univ. Ext. Bull. E-1110

**Vörösmarty CJ, Green P, Salisbury J, Lammers R. 2000.** Global Water Resources: Vulnerability from Climate Change and Population Growth. Science. 289, 284–288.

**Vörösmarty CJ et al. 2010.** Global threats to human water security and river biodiversity. Nature . 468, 334–334.

**Wada Y, Van Beek LPH, Van Kempen CM, Reckman JWTM, Vasak S, Bierkens MFP. 2010.** Geophysical Research Letters. 37 (20), 1–5. <https://doi.org/10.1029/2010GL044571>.

**Wada Y, Bierkens MFP. 2014.** Sustainability of global water use: Past reconstruction and future projections. Environmental Research Letters. Vol. 9, no. 10, Article ID 104003.

**Wanty RB, Verplanck PL, SanJuan CA, Church SE, Schmidt TS, Fey DL, Dewitt EH, Klein TL. 2009.** Geochemistry of surface water in alpine catchments in central Colorado, USA: resolving host–rock effects at different spatial scales. Appl. Geochem. 24, 600–610.

**Welsh W D. 2007.** Groundwater balance modelling with Darcy’s law. PhD thesis. Australian National University.

**WHI (Waterloo Hydrogeologic Inc). 2006.** Visual Modflow, v4.2. User’s Manual. 654p

**Wilaya de SBA. 1999 – 2014.** Site Officiel de la Wilaya de Sidi Bel Abbes - Secteur Hydraulique.

**Wilcox LV. 1995.** Classification and use of irrigation waters. US Department of Agriculture, Washington DC, USA.

**World Bank. 2007.** People’s Democratic Republic of Algeria—A Public Expenditure Review. Assuring High Quality Public Investment; Report No. 36270; World Bank: Washington, DC, USA, 2007.

**Yousfi S. 2008.** Hydrodynamique et modélisation de la nappe alluviale de la plaine de Sidi Bel Abbès (Nord-ouest algérien ). Mémoire de Magister, Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen. 91p.

**Zheng C, and Liu J. 2013.** Science. 340, 810–810. <https://doi.org/10.1126/science.340.6134.810-a>

# جامعة وهران 2

محمد بن أحمد

Université d'Oran 2

Mohamed Ben Ahmed



## Résumé

La population de la ville de Sidi Bel Abbès est devenue au fil du temps dépendante des Wilayas de Tlemcen et de Mascara pour satisfaire ses besoins croissants en eau potable.

L'absence de grands barrages et la pluviométrie moyenne et irrégulière viennent se superposer à une pauvre connaissance du potentiel en eaux souterraines de la Wilaya de Sidi Bel Abbès. Nonobstant cela, l'aquifère des alluvions plio-quadernaires de la plaine de Bel Abbès peut être considéré comme une exception. Cet aquifère qui s'étend sur plus de 800 km<sup>2</sup>, porte une nappe libre drainée par l'Oued Mekerra et captée par un nombre assez impressionnant de puits et forages, destinés dans leur quasi majorité à l'irrigation des terres. L'importance stratégique de cette ressource en eau pour la Wilaya de Bel Abbès n'est donc pas à préciser et sa caractérisation (par modélisation) devient alors une nécessité.

La présente étude vise à identifier les potentialités en eaux souterraines de la plaine de Sid Bel Abbès, à caractériser les principaux paramètres les affectant à la fois qualitativement et quantitativement et à proposer des solutions et recommandations pratiques, permettant de les protéger contre la détérioration et la surexploitation.

Les résultats obtenus au terme de ce travail ont permis de mieux connaître les caractéristiques morphologiques, climatiques, géologiques et structurales générales de la zone d'étude. L'étude hydrochimique a mis l'accent sur les mécanismes et processus contrôlant la salinité des eaux de l'aquifère plio-quadernaire. Les résultats obtenus ont démontré la contamination des eaux de l'aquifère par les rejets; elles sont de ce fait dans leur majorité, impropres à la consommation humaine, inappropriées à l'irrigation d'un point de vue salinité et déconseillées en raison des teneurs en Cl les caractérisant, pour la majorité des plantes sensibles. La modélisation du système aquifère plio-quadernaire faite à l'aide du programme Visual Modflow a permis l'appréciation des conditions aux limites de l'aquifère, l'approximation des paramètres hydrodynamiques le caractérisant, l'estimation de son extension (latérale et verticale), sa recharge et son déstockage. Ainsi, la modélisation du système aquifère plio-quadernaire démontre clairement, sa surexploitation.

**Mots clés :** *Aquifère plio-quadernaire, Modélisation, Plaine de Sidi Bel Abbès, Surexploitation, Visual Modflow.*