



UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID – TLEMCEN



N° d'ordre :.....

FACULTE DES SCIENCES DE LA NATURE ET DE LA VIE ET DES SCIENCES DE LA
TERRE ET DE L'UNIVERS

DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS

LABORATOIRE DE PROMOTION DES RESSOURCES HYDRIQUES, MINIERES ET PEDOLOGIQUES :
CHOIX TECHNOLOGIQUE ET LEGISLATION DE L'ENVIRONNEMENT

Thèse

Présentée pour l'obtention du grade de
Doctorat en Sciences

Option : **Hydrogéologie**

Spécialité: Ressources en eau dans leurs environnements

par

Touhami MERZOUGUI

Structure et fonctionnement d'un système aquifère en zone hyperaride: Application à la haute vallée de la Saoura (Région de Béni -Abbès)

Soutenue le : .04/02./2021 devant la commission d'examen

Mr. BENSALAH Mustapha	Professeur, Université de Tlemcen (UABT)	Président
Mr. BOUANANI Abderrazak	Professeur, Université de Tlemcen (UABT)	Directeur de thèse
Mr .MANSOUR Hamidi	Professeur, Université d'Oran 02	Examineur
Mr. BOUDJEMAA Abderrazak	Maitre de Conférences, Université de Tlemcen	Examineur
Mr. KABOUR Abdesselam	Maitre de Conférences, Université de Mila(UABM)	Examineur
Mr. MEKKAOUI Abderhmane	Maitre de Conférences, Université de Bechar(UTMB)	Invité

UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID – TLEMCCEN

N° d'ordre :.....

FACULTE DES SCIENCES DE LA NATURE ET DE LA VIE ET DES SCIENCES DE LA
TERRE ET DE L'UNIVERS

DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS

LABORATOIRE DE PROMOTION DES RESSOURCES HYDRIQUES, MINIERES ET PEDOLOGIQUES :
CHOIX TECHNOLOGIQUES ET LEGISLATION DE L'ENVIRONNEMENT

Thèse

Présentée pour l'obtention du grade de

Doctorat en Sciences

Option : Hydrogéologie

**Structure et fonctionnement d'un système aquifère en zone
hyperaride: Application à la haute vallée de la Saoura(Région
de Béni -Abbès)**

Par

MERZOUGUI Touhami

Soutenue le :/2020 devant la commission d'examen

Mr. BENSALAH Mustapha	Professeur, Université de Tlemcen (UABT)	Président
Mr. BOUANANI Abderrazak	Professeur, Université de Tlemcen (UABT)	Directeur de thèse
Mr .MANSOUR Hamidi	Professeur, Université d'Oran 02	Examineur
Mr. BOUDJEMAA Abderrazak	Maitre de Conférences, Université de Tlemcen	Examineur
Mr. KABOUR Abdesselam	Maitre de Conférences, Université de Mila(UABM)	Examineur
Mr. MEKKAOUI Abderhmane	Maitre de Conférences, Université de Bechar(UTMB)	Invité

-Tlemcen, 2020-

AVANT – PROPOS

Mon histoire avec l'hydrogéologie de la Saoura, a commencé lors de la préparation de mon projet de fin d'étude de l'ingéniorat à l'université d'Es-Sénia Oran au département des sciences de la Terre en 1998.

Je vais résumer mon long voyage de plus de 20 ans dans le domaine des ressources en eau et leur environnement, en particulier mes études hydrogéologiques dans la haute vallée de la Saoura et en particulier à l'Oasis de Béni Abbes. Toutefois, il n'est guère facile ici de faire les choses dans un ordre logique quelconque.

J'ai choisi un sujet intitulé 'Valorisation des ressources en eau des inféro-flux de la haute vallée de la Saoura; entre Targhit et Kerzaz', ce titre ma été proposé par mon professeur Hamid Mansour et encadré par Pr. MEBROUK Naima. Lors des vacances de printemps 1996, j'ai commencé les campagnes d'inventaire des points d'eaux, de la piézométrie et des prélèvements en traversant les Oasis de la Saoura que mon destin s'est scellé avec l'hydrogéologie. La soutenance de mon ingéniorat, s'est déroulée le 03 juin 1998.

Après j'ai passé une petite expérience en faisant des études et des investigations sur les ressources en eau souterraines de l'Oasis de Béni Abbes. Dans le cadre d'un projet associatif financé par la Commission Européenne en 2002, et intitulé « réhabilitation de la palmeraie de Béni Abbes », j'étais recruté comme ingénieur d'étude et de suivi, au sein du projet, chapoter par l'association AREA- ED. Après deux ans, j'étais appelé par la compagnie allemande (GTZ ou GIZ), où j'étais recruté comme consultant longue durée dans le projet intitulée « gestion intégrée des eaux dans l'Oasis de Béni Abbes ».Ce projet de coopération internationale entre les deux états, l'Algérie et l'Allemagne (période du projet: 2004-2011).

Je réintègre le département des sciences de la terre et de l'univers à l'université de Tlemcen en 2007 pour suivre une formation de Magister. En parallèle, je suis recruté à l'agence nationale des ressources hydrauliques- Bechar (ANRH-Bechar), en tant qu'ingénieur en ressource en eau.

Le sujet de Magister, proposé par moi-même et dirigé par Le Pr. BOUANANI A. a porté sur la caractérisation et la modélisation hydrogéologique de l'aquifère alluviale de la

palmeraie de Béni Abbès. La soutenance a eu lieu après 04 années de mémoire, le 11 Décembre 2011.

Mon poste de chef secteur au niveau de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH-Bechar), m'a permis de renforcer mon expérience en hydrogéologie, géologie et d'améliorer les connaissances hydrogéologiques dans la Wilaya de Bechar à travers la proposition d'études géophysiques et des forages de reconnaissances. C'est ainsi que j'ai commencé mon travail de thèse de doctorat en sciences sur l'hydrogéologie de de la haute vallée de la Saoura principalement dans la région de Béni Abbès et l'aquifère du Mio - Pliocène de la nappe du grand erg occidental.

Après 06 années d'investigations sur le terrain (2012 – 2017), j'ai découvert la beauté et l'immensité du grand erg occidental, durant lesquelles j'ai assumé en parallèle la fonction de maitre-assistant et adjoint chef de département de génie civil et hydraulique à l'université de Bechar. J'ai rejoint le laboratoire de modélisation hydraulique et environnement au sein de l'école national des ingénieur en Tunis(ENIT) où j'ai été accueilli par le Professeur Bouhlila Farida Directrice du laboratoire et le Pr. Mustapha BESBES (membre de l'académie des sciences à Paris) et BABA Si Mohamado experts en modélisation à l' Observatoire Sahara Sahel (Tunis). J'ai ainsi pu m'initier aux techniques d'utilisation de logiciels ayant trait à la modélisation géologique, des écoulements souterrains et de traitement des analyses hydrochimiques.

Arrivé au terme de ce travail, il m'est difficile d'exprimer en quelques mots mes remerciements. Vous êtes nombreux à vous bousculer dans mon esprit afin d'entrer dans cette feuille, mais toujours est-il que vous devez ressentir, en lisant ces quelques lignes, que j'ai pensé à vous tous, même si vos noms n'y figurent pas.

Mes plus vifs remerciements s'adressent à Monsieur, Le Professeur BOUANANI Abderrazak Directeur de thèse, qui m'a dirigé et soutenu tout au long de ces années. Son optimisme, son amitié et la confiance qu'il m'a témoigné ont grandement contribué à la réussite de ce travail. Ses conseils, ses remarques et surtout son aide sans limites m'ont beaucoup stimulé au travail. Son appui ne m'a jamais fait défaut. Au-delà de ses connaissances scientifiques, j'ai beaucoup apprécié sa gentillesse et ses grandes qualités humaines. Merci infiniment pour tout ça.

Je remercie les membres de mon jury qui ont accepté de lire cette thèse et d'y apporter leurs remarques en ouvrant des discussions et des perspectives fort intéressantes sur le sujet ; Mr le Professeur BENSALAH Mustapha , Directeur du laboratoire des promotion des ressources hydriques et minier (labo 25) et Enseignant chercheur à l'université de Tlemcen , qui me fait l'honneur de présider mon jury de thèse, Mr le Professeur MANSOUR Hamidi, Enseignant à l'université d'Oran 02 , Dr. BOUDJEMAA Abderrazak. Maître de conférences à l'université de Tlemcen, Dr. KABOUR Abdesselam Maitre de conférences à l' Université de Mila et Dr. MEKKAOUI Abderhmane. Maitre de conférences à l'université de Bechar comme invité, qui ont bien voulu, en acceptant de juger ce travail, me faire bénéficier de leurs expériences et pour l'intérêt qu'ils ont bien voulu apporter à cette étude. Leurs critiques seront pour moi un encouragement à poursuivre mes travaux d'hydrogéologie. Je leur suis très reconnaissant de la confiance bienveillante qu'ils me témoignent.

A tous ces membres du Jury, j'adresse mes sincères remerciements.

En outre, Je remercie Dr. MEKKAOUI Abderrahmane, de me faire profiter de ces connaissances sur la géologie de la Saoura, pour les longues discussions fructueuses sur la géologie, la structure et l'hydrogéologie de la de la vallée de la Saoura et les nombreux échanges qui furent essentiels dans la compréhension du fonctionnement des systèmes aquifères dans la région du Sud-Ouest algérien, je lui exprime ma profonde reconnaissance.

Mes sincères remerciements à Mme Kamila BABA-HAMED Professeur à l'Université de Tlemcen de m'avoir prêté aide et conseils pour son soutien et ses encouragements.

J'exprime mes vifs remerciements à Dr. Kebour. A qui est toujours disponible pour me faire profiter de ses connaissances et son expérience en hydrogéologie de Bechar et pour les bons moments que nous avons passé ensemble soit sur le terrain soit au bureau.

Je remercie très sincèrement Madame Professeur BOUHLILA Rachida et Professeur BESBES Mustapha de l'université Tunis Manar, qui m'ont accueilli chaleureusement, leurs conseils, les orientations sur la problématique de ma thèse de doctorat et de m'avoir offert les meilleures conditions possibles dans leur laboratoire de modélisation hydraulique et environnement à Tunis(Tunisie). Je tiens à remercier également ; Dr. Nasrine Nasri, Dr. Marwa Bouteffaha , Dr. Fadoua Hamzaoui et Mr. Haytam, pour leurs conseils, leur professionnalisme et la bonne humeur dont ils ont fait preuve à mon égard durant mon

séjours scientifique à Tunis et qui m'ont permis d'approfondir mes connaissances dans le domaine de l'hydrogéochimie et la modélisation.

J'ai apprécié à chacun ses qualités scientifiques et humaines. Aussi, je remercie l'ensemble du personnel du LHME et surtout la secrétaire Souad.

Mes sincères remerciements à Mme. Lucila CARDELA Professeur à l'Université de Barcelone de m'avoir accueilli dans son laboratoire, prêté aide et conseils pour son soutien et ses encouragements. Les discussions que nous avons eu à mener m'ont été d'un grand intérêt;

Mes vifs remerciements s'adressent à mes amis : Mr. BENNKANDIL Abdeljalil, BENMOULOUD Abdessalem, RAHNAMNI Abderrahmane, Derdour Abdessamad, Rezzoug Cherif, FELLAH Ahmed, BENHAMZA Messaoud, SOLIMANI Sara, BENYOUCEF Madani, ADACI Mohamed, KHALFI Oussama, Salih LACHACAH, et SALIM Kebour pour l'aide inestimable qu'ils m'ont généreusement accordé, surtout pour la mise en forme des cartes et des planches.

Je ne saurais oublier les différents organismes d'état pour m'avoir facilité la tâche, particulièrement dans le domaine documentaire. Je citerais l'Agence Nationale de Ressources Hydrauliques (ANRH) d'Adrar, et le centre de recherche (Station de recherche Béni Abbés), l'Office de recherche géologique et minière Bechar et à la direction des ressources en eau (DRE) de la Wilaya de Béchar.

En plus, je tiens à remercier également le personnel administratif et technique de L'ANRH à Béchar et d'Adrar, notamment le directeur régional ANSARI Taha, BEN DIDA Abderrahmane, RABHI Lakhdar, BOUANINI Abdelaziz, FAIDI Hassane, MEKKAOUI Abdelhamid, SOLIMANI Sarah et AZIZI Slimane. Je saisis cette occasion pour remercier bien vivement le personnel du laboratoire régional de l'ANRH d'Adrar, M. NASRI Bahous, et madame SAHRAOUI Fatiha pour leur aide et leur gentillesse.

Je tiens à exprimer mes remerciements au groupe GTZ /AHT et surtout le Directeur Gomer Dieter. Chef de programme eau GTZ en Algérie, ainsi que Mme STACHE Anja chef de projet GIRE (Composante OBA Béni-Abbes) pour l'aide inestimable qu'ils m'ont généreusement accordé, surtout pour le financement de certaines actions sur le terrain et les différentes stages en Allemagne et en France.

J'ai beaucoup apprécié l'aide tant morale que scientifique de tous mes collègues lors de la rédaction et la mise en forme de ce manuscrit. Je citerai en particulier Mrs : Mekkaoui A, Benmouloud A, Rezzoug C, Pr. Makhloufi A et Kebour.S .

Je tiens à exprimer mes très vifs remerciements à tous mes enseignants du département des sciences de la terre et de l'univers de la Faculté des Sciences de la Nature et au département de l'hydraulique de la Facultés de Technologie de l'université de Tlemcen, auxquels je dois beaucoup pour ma formation de la poste graduation en hydrogéologie. A toutes les personnes du laboratoire 25, qui de près ou de loin ont contribué à l'aboutissement de ce travail.

Mes remerciements vont également à tous mes collègues et enseignants du département de biologie à la Faculté de la Nature et de la Vie et la faculté de technologie au du département de génie civil et hydraulique de l'université de Bechar(en particulier : Benmoussa, Belhadj, Makhloufi, Larbi, Boulenouar A., Moulay Ikermy, Abdeldjabar R., Yagobi, Hamani et Gnaia A.) et a tous les enseignants de l'université TAHRI Mohamed Bechar .

Je ne pourrai oublier de citer la gentillesse et la bonne humeur de mes amies accompagnateurs, Guides et chauffeurs de Béni Abbes lors de nos randonnées dans le Grand Erg Occidental et les Monts d'Ougarta. Je remercie en particulier : Hadj Loubi , Allal, Bendida A, Hassen, Lakhder, Azzizi Slimane, Halilo Abdellah, , Ami Djaloul et Moussa, Madjid, Lahcen, Mokhtar, Hamid, Smahi, Hanati et Brahim, sans oublier la chaude hospitalité des populations nomades.

Je remercie monsieur Monssef Houcine gérant d'un bureau d'étude d'hydrogéologie(BETACONSULT), pour son accord de mettre à ma disposition tous les moyens matériels de son bureau d'étude pour réaliser des sondages électriques géophysiques dans la vallée de la Saoura et à l'intérieur du grand erg occidental.

Je n'oublie pas mes proches, particulièrement mes parents qui ont été toujours présents tant d'un point de vue moral que financier. Ce travail leur appartient.

Par crainte d'avoir oublié quelqu'un, que tous ceux et toutes celles dont je suis redevable se voient ici vivement remerciés.

Je tiens à rendre hommage et ma vive gratitude à ma femme, à mon bébé en route, ma grand-mère, ma mère, mon père, mes beaux-parents, à mes oncles et Tantes à mes frères

(Houcine, Slimane et Othmane) et mes sœurs (Houda, Latifa, Atika, Assia, Ouahiba, Meryem, Layla et Ahlem) pour l'apport moral et leurs soutien durant toutes ces années. Je n'oublierai sans doute pas de remercier mes collègues et amis enseignants, administrateurs et travailleurs de la Faculté des Sciences de la terre, Faculté d'hydraulique à l'université de Tlemcen et à l'université de Bechar et tous ceux que je n'ai pas cité.

RESUME

Le système aquifère Mio-Plio-Quaternaire de la région de Béni Abbes constitue une réserve d'eau la plus importante de la haute vallée de la Saoura, contrée soumise à un climat hyperaride. Ce système a été étudié de point de vue géologique, structural, géophysique, hydrodynamique et hydrochimique. De même sa susceptibilité à la pollution. Cette région compte un soubassement du Dévonien inférieur plissé, constitué d'argiles rouges, surmonté par un remplissage Mio-Plio-Quaternaire, constitué de dalle calcaire, de Torba, de graviers, d'argile et de sable. Ce remplissage cumule une épaisseur variable de 30 m à 100 m, marqué par de passages latéraux. Il est fracturé et disloqué par deux systèmes de failles (NW-SE ; NE-SW). Ces terrains abritent des eaux souterraines, formant un système hydrogéologique complexe et interconnecté, compartimenté par l'oued Saoura en oriental et occidental. Il comprend localement : nappe phréatique du grand erg occidentale, nappe de Hamada de Guir, nappe de terrasses-inféro-flux et nappe du Cambro-Ordovicien. ce système aquifère se caractérise d'une Transmissivité de 6.10^{-4} m²/s à 4.10^{-2} m²/s et un coefficient d'emmagasinement de 1,3 à 6 %. Sa piézométrie fait ressortir un sens d'écoulement Nord - Sud, et un second E-W, sous un gradient hydraulique de 8.10^{-2} à 1.10^{-1} . Sur 40 ans, ce système est resté stationnaire, néanmoins les terrasses alluviales et inféro- flux affichent un rabattement est de 2 m. L'hydrochimie atteste des faciès variables, fonction entre autre de la lithologie de l'aquifère. La nappe du grand erg occidental est de bonne qualité, insensible au changement hydro chimique, occupant un faciès chlorurées sodiques et calciques parfois bicarbonatées calciques. Les eaux de la nappe des terrasses alluviales et inféro-flux présentent une salinité très élevé augmente de l'erg vers l'oued. Les isotopes montrent l'existence d'eaux récentes dans ces zones de recharge. En outre aux zones exutoire dans la Saoura, on peut voir des eaux de plus de 20000 à 40000 ans d'âge ancien. Les cartes de vulnérabilité intrinsèque du système aquifère de Béni-Abbes réalisées à partir des méthodes DRASTIC, GOD et SI révèlent une grande tendance de vulnérabilité moyenne à forte à la pollution.

Les principaux résultats de ces travaux ont permis de mieux visionner l'anatomie et le fonctionnement du système aquifère, soulignant que la nappe Mio-plio-quaternaire est dans un état inquiétant, d'où la nécessité d'entreprendre une gestion intégrée des ressources en eau dans cette localité, afin de garantir un développement durable.

Mots clés : Béni-Abbès, Saoura, structure, fonctionnement, Mio-plio-quaternaire, hydrogéologie, SIG, Vulnérabilité.

Abstract

The aquifer Mio-Pliocene-Quaternary system in the region of Beni Abbes constitutes the most important water reserve of the upper valley of the Saoura, a region subjected to a hyper-arid climate. This system has been studied from a geological, structural, geophysical, hydrodynamic and hydrochemical point of view. Similarly its susceptibility to pollution. This region counts a pleated lower Devonian base, made of red clay, surmounted by a Mio-Plio-Quaternary filling, made up of limestone slab, from Torba, gravel, clay and sand. This filling combines a variable thickness of 30 m to 100 m, marked by lateral passages. It is fractured and dislocated by two fault systems (NW-SE; NE-SW). These lands are home to groundwater, forming a complex and interconnected hydrogeological system, Compartmentalized by the Saoura wadi in eastern and western sides. It includes locally: water table of the great western erg, water table of Hamada of Guir, water table of infero-flow terraces and Cambro-Ordovician water table. this aquifer system is characterized by a Transmissivity of 6.10^{-4} m²/s to 4.10^{-2} m²/s and a storage coefficient of 1.3 to 6%. Its piezometry reveals a flow direction North - South, and a second East-West, under a hydraulic gradient from 8.10^{-2} to 1.10^{-1} . Over 40 years, this system has remained stationary; However, alluvial and infero-flow terraces show a drawdown is 2 m. Hydrochemistry attests variable facies, depending among other things on the lithology of the aquifer. The water table of the great western erg is of good quality, insensitive to hydro-chemical change, occupying a sodium and calcium chloride facies sometimes calcium bicarbonate. The groundwater of the alluvial and infero-flow terraces has a very high salinity increases from the erg to the wadi. Isotopes show the existence of recent waters in these recharge areas. In addition to the outlet areas in the Saoura, we can see waters of more than 20,000 to 40,000 years old. The intrinsic vulnerability maps of the Béni-Abbes aquifer system produced using the DRASTIC, GOD and SI methods reveal a great tendency of vulnerability from medium to high pollution.

The main results of this work allowed to better view the anatomy and functioning of the aquifer system, stressing that the Mio-plio-quaternary water table in an alarming state, hence the need to undertake an integrated management of water resources in that area, in order to ensure a sustainable development.

Keywords: Béni-Abbès, Saoura, structure, functioning, Mio-plio-quaternary, hydrogeology, GIS, Vulnerability.

المخلص

يشكل للجيب المائي الميوليو كواتيرنار للعرق الكبير الغربي في منطقة بني عباس أهم احتياطي لمخزون للمياه الجوفية لمنطقة وادي الساوره العليا ، وهي منطقة مناخها شديد الجفاف. من خلال هذه العمل تمت دراسة نظام طبقات المياه الجوفية ، من الجانب الجيولوجي وجيوفيزيائيا وهيدروديناميكا وهيدروكيميائيا مكننا ذلك من معرفة التركيب الهندسي لنظام الجيب المائي وكذا للتلوث. المنطقة تتكون جيولوجيا من طبقة غير نفوذة متمثلة في طبقة الديقونيا السفلي متعرج نسبيا ، متكون من الطين الأحمر ، يعلوه مباشرة الميوليو كواتيرنار ، المتكون من الحجر الجيري والحصى ، الحصى ، الطين والرمل. هذه الفرشة بسماكة متغيرة من 30 م إلى 100 م ، تتميز بنفاذية ضعيفة نوعا ما ، وكذ نفاذية كبيرة من خلال التشققات المحلية والجهورية المتمثلة الجانبية. يتم في نظامين للانكسارات (NW-SE ؛ NE-SW). المياه الجوفية في منطقة الدراسة تشكل نظاماً هيدروجيولوجياً معقداً ومتشابكاً ، يقسمه وادي الساوره الى قسمين واحد في الشرق و الاخر في الغرب. وهي تشمل مطلياً: فرشة المياه الجوفية للعرق الغربي الكبير ، فرشة حمادة دي غير ، فرشة المياه الجوفية للطبقات الحديثة الساوره - - فرشة المياه في كامبرو-أوردوفيسيا بمنطقة لوفارتة. يتميز نظام الخزان الجوفي بنفاذية تتراوح بين 10^{-6} - 10^{-4} متر مربع / ثانية إلى 10^{-2} - 10^{-1} متر مربع / ثانية ومعامل تخزين من 1.3 إلى 6 ٪. اتجاه جريان المياه من الشرق نحو الغرب ، تحت التدرج الهيدروليكي من 10^{-2} إلى 10^{-1} .

على مدار 40 عاماً ، ظل هذا النظام المائي ثابتاً ، ولكن على مستوى الجيوب المائية لطبقات الوادي الحديثة أظهرت انخفاضاً لمنسوب المياه بمقدار 2 متر.

انبتت الدراسة الكيمياء المائية على المستوى الزمني وكذ التوزيع الجغرافي ، وهي وظيفة من بين أشياء أخرى من التركيبية الجيولوجية للخزان الجوفي. إن منسوب المياه في العرق الغرب الكبير ذات النوعية الجيدة ، وغير معرضة للتغيرات الهيدروكيميائية ، ويحتل كلوريد الصوديوم وسحنات الكالسيوم ، وأحياناً بيكربونات الكالسيوم العناصر الأكثر تواجداً بالمياه. تتميز المياه الجوفية لطبقات الطمي والجريان السفلي للوادي بدرجة ملوحة عالية للغاية ، حيث تزداد باتجاه الوادي . اظهرت دراسة المياه الجوفية بالنظائر لمختلف الجيوب المائية ، وجود مياه حديثة في مناطق التغذية في الشمال العرق الغربي الكبير . بالإضافة إلى مناطق المنافذ الجيب المائي في الساوره ، يمكننا تمييز مياه يزيد عمرها عن 20.000 إلى 40.000 عام. كشفت دراسة هشاشة الجيوب المائية من خلال انجاز خرائط قابلية التأثر بالتلوث لنظام الخزان الجوفي للمياه ببني عباس الذي تم إنتاجه باستخدام عده طرق للدراسة منها: دراستيك و قود واس اي عن اتجاه كبير للتعرض للتلوث من متوسط إلى مرتفع.

مكنت النتائج الرئيسية لهذا العمل من الممكن رؤية عمل نظام الخزان الجوفي بشكل أفضل ، مما يبرز أن منسوب المياه الجوفية الميوليو كواتيرنار في حالة مقلقة ، ومن ثم الحاجة إلى إجراء إدارة متكاملة للموارد في المياه في هذه المنطقة ، من أجل ضمان التنمية المستدامة.

الكلمات المفتاحية: بني عباس ، الساوره ، الهيكل ، الأداء الميوليو كواتيرنار - ، الهيدروجيولوجيا ، نظم المعلومات الجغرافية ، الهشاشة.

LISTE DES FIGURES

CADRE GEOGRAPHIQUE, CLIMATOLOGIQUE ET HYDROLOGIE		CHAPITRE 01
Figure 1.1	Localisation de la vallée de la Saoura.....	7
Figure 1.2	Situation de la région d'étude.....	8
Figure 1.3	Variations moyennes périodiques des températures (maximal, moyenne et minimal) (1926-1950) (1961-2016).....	9
Figure 1.4	Variations moyennes périodiques des températures (maximal, moyenne et minimal) (1926-1950) (1961-1990) (1973-2016).....	10
Figure 1.5	Répartition mensuelle des précipitations (mm) de la station de Béni Abbès (1926-1950) et (1973-2018).....	11
Figure 1.6	Répartition des précipitations saisonnières à la station de Béni Abbès (1973-2018).....	12
Figure 1.7	Variations interannuelles des précipitations (station Béni Abbès, 1904-2018).....	13
Figure 1.8	Carte pluviométrique du Sud-ouest algérien période 1904-2018.....	14
Figure 1.9	Variation des roses des vents à Béni-Abbès exprimé en Degrés Beaufort.....	15
Figure 1.10	Rose des vents à Béni-Abbès (toutes vitesses confondues en fonction de la force du vent Période 1978-1988).....	15
Figure 1.11	Répartition mensuelle de l'humidité en pourcentage à la station de Béni-Abbès période (1973-2016).....	16
Figure 1.12	Le déficit d'écoulement d'après l'Abaque de Verdeil à Béni Abbès.....	18
Figure 1.13	Paramètre de climat à Béni –Abbès.....	20
Figure 1.14	Situation des différents Ergs dans le Sahara algérien.....	22
Figure 1.15	Vue par satellite de Béni Abbès.....	24
Figure 1.16	Hydrographie et pluviométrie du bassin de la Saoura et de la partie Ouest du Grand Erg Occidental.....	25
Figure 1.17	Bassins versant méridional de l'Atlas saharien.....	26
Figure 1.18	Situation du bassin versant de la Saoura.....	27
Figure 1.19	Situation du Bassins versants d'Oued Namous dans l'Atlas saharien.....	30
Figure 1.20	Débits et volumes écoulés du Guir à Djorf-Torba (Dubief, 1967) (1966-1967).....	31
Figure 1.21	Fréquences mensuelles des pluies et des crues dans le bassin de la Saoura.....	33
Figure 1.22	Principaux verrouillages des vallées au sud du Haut atlas-atlas saharien (Côte , 2002)..	35
Figure 1.23	Croissance démographie a Béni Abbès.....	37
Figure 1.24	Synthèse des contraintes du développement urbain et agricole.....	38
Figure 1.25	L'enjeu majeur de l'eau dans l'oasis de Béni Abbès.....	38
Figure 1.26	Bilan et usage d'eau à Béni Abbès.....	39
CONTEXTE GEOLOGIQUE		CHAPITRE 2
Figure 2.1	Travaux de recherche systématique dans les monts d'Ougarta.....	43
Figure 2.2	Couverture topographique à 1/200 000e (a) et à 1/500 000e (b).....	45
Figure 2.3	Cartes géologiques au 1/500 000e (coupures régulières et spéciales) et photos satellitaires couvrant les monts de l'Ougarta.....	46
Figure 2.4	Cartes géologiques à 1/200 000e, en coupures régulières (éditées & inédites).....	46
Figure 2.5	Photographie satellitaire des Monts de l'Ougarta, (Scènes Landsat NH30-25 & NH30-30).....	48
Figure.2.6	Carte géologique des monts d'Ougarta « Béni Abbès »	51
Figure 2.7	Coupe verticale de la série de la Saoura	56
Figure 2.8	Succession litho stratigraphique du Carbonifère dans le bassin de Béchar.....	58
Figure. 2.9	Le substratum de la Hamada du Guir.....	60
Figure.2.10	Coupe schématique de Gara Diba.....	62
Figure 2.11	Coupe schématique du Quaternaire.....	62

Figure 2.12a	Coupe à travers la vallée de la Saoura à Hemama, près de Beni Abbés Montrant les terrasses guiriennes	63
Figure 2.12.b	Coupe à travers la vallée de la Saoura à Hemama, près de Beni Abbés montrant les terrasses saouriennes de la rive gauche	63
Figure 2.13	Colonnes stratigraphiques du Néogène et du Quaternaire	64
Figure 2.14	Esquisse photo géologique de Béni Abbès.....	65
Figure 2.15	Schéma des axes des flexures des synclinaux et anticlinaux des Monts d'Ougarta.....	68
Figure 2.16	Esquisse tectonique des monts d'Ougarta	69
Figure 2.17	Schéma des axes des plis et des flexures des synclinaux et anticlinaux des monts de l'Ougarta.....	69
Figure 2.18	Schéma géologique et structural des chaînes d'Ougarta	71
Figure 2.19	Stations d'étude de la Fracturation dans la dalle calcaire du Mio- Pliocène de Béni Abbès.....	73
Figure 2.20	Diagramme polaire de la fissuration des calcaires de la dalle hamadienne à Béni – Abbès.....	73
Figure 2.21	<i>Vus panoramique de l'espacement entre les fractures (station 1)</i>	74
ETUDE GEOPHYSIQUE		CHAPITRE 3
Figure 3.1	Appareil de mesure géophysiques et mesure des anomalies sur le terrain.....	81
Figure 3.2	Positionnement des sondages électriques du plateau Néogène à Béni Abbès.....	82
Figure 3.3	Sondages électriques d'étalonnage.....	83
Figure 3.4	Coupe schématique de Gara Diba.....	84
Figure 3.5	Coupe des résistivités du plateau Néogène à Béni Abbès.....	85
Figure 3.6	Carte des résistivités du plateau Néogène à Béni Abbès.....	86
Figure 3.7	Carte du toit du niveau conducteur du plateau Néogène à Béni -Abbès.....	87
Figure 3.8	Situation et positionnement des sondages et profils.....	89
Figure 3.9	Etalonnage électrique de S1à l'aide du forage F3.....	90
Figure 3.10	Etalonnage du sondage électrique paramétrique P1.....	91
Figure 3.11	Etalonnage du sondage électrique paramétrique P2.....	92
Figure 3.12	Etalonnage du sondage électrique paramétrique P3.....	92
Figure 3.13	Carte des résistivités apparentes.....	97
Figure 3.14	Situation des SEV dans le Grand Erg Occidental et la Hamada de Guir	99
Figure 3.15	Sondage électrique vertical SEV A1.....	100
Figure 3.16	Sondage électrique vertical A2.....	101
Figure 3.17	Sondage électrique vertical SEV A3.....	101
Figure 3.18	Sondage électrique vertical SEV A4.....	102
Figure 3.19	Sondage électrique vertical SEV B2.....	103
Figure 3.20	Sondage électrique vertical SEV Gassi El Massha	104
Figure 3.21	Sondage électrique vertical SEV Hassi Rokna.....	104
Figure 3.22	Coupe géo-électrique à travers l'oued Saoura dans la palmeraie de Béni -Abbès.....	105
Figure 3.23	Carte structural synthétique de la région de Béni Abbès.....	107
HYDROGEOLOGIE		CHAPITRE 4
Figure 4.1	Principaux aquifères de la région de la Saoura.....	111
Figure 4.2	Coupe hydrogéologique au contact de l'Ordovicien et du Silurien.....	112
Figure 4.3	Piézométrie de la nappe du Cambro-ordovicien des monts d'Ougarta, Avril 2016.....	115
Figure 4.4	Unités hydrogéologiques des aquifères des monts d'Ougarta.....	116
Figure 4.5	Zonage des débits des nappes du Cambro-ordovicien.....	117
Figure 4.6	Carte piézométrique de référence du Continental Intercalaire.....	119

Figure 4.7	Carte piézométrique de la nappe du Continental Intercalaire et du Grand Erg Occidental.....	120
Figure 4.8	Corrélation entre les sondages de la hamada du Guir	121
Figure 4.9	Carte piézométrique de la nappe de la hamada du Guir	122
Figure 4.10	Carte hydrogéologique de la Hamada Sud Oranaise (Extrait de la carte hydrogéologique du Sahara Nord Occidental.....	124
Figure 4.11	Coupe géologique schématique Atlas Saharien – Hamada – Grand Erg Saoura.....	125
Figure 4.12	Esquisse hydrogéologique de la bordure du Grand Erg Occidental	126
Figure 4.13	Carte piézométrique de la nappe du grand erg occidental	127
Figure 4.14	Extrait de la carte piézométrique de la nappe du Grand Erg Occidental au droit de la Saoura entre le massif d'El Khella et Béni Abbes	128
Figure 4.15	Extrait de la Carte hydrogéologique de Bechar et la piézométrie de la nappe du Grand Erg Occidental.....	129
Figure 4.16	Carte de positionnement des points d'eau.....	133
Figure 4.17	Evolution de la profondeur de l'eau de la nappe de l'Erg de l'Est vers l'Ouest.....	133
Figure 4.18	Carte piézométrique de la nappe du grand erg occidental 2016.....	134
Figure 4.19	Variations de la profondeur des eaux typiques de l'Erg le long de la Saoura	137
Figure 4.20	Terrains perméable et imperméables.....	139
Figure 4.21	Condition et gisement des aquifère à Béni Abbes.....	140
Figure 4.22	Esquisse schématique du système aquifère de Béni Abbes.....	141
Figure 4.23	Coupe hydrogéologique dans la région de Béni Abbès, à travers la Saoura.....	141
Figure 4.24	Carte d'épaisseur du système aquifère à Béni- Abbès.....	143
Figure 4.25	Coupe hydrogéologique dans la région de Béni –Abbès.....	143
Figure 4.26	Evolution de la profondeur de l'eau des nappes.....	144
Figure 4.27	Carte de positionnement des points d'eau.....	145
Figure 4.28	Carte piézométrique et hydrogéologique de Béni -Abbès Avril 2016.....	146
Figure 4.29	Schéma de fonctionnement d'une foggara	148
Figure 4.30	Positionnement des foggaras à Béni -Abbès.....	152
Figure 4.31	photo satellite montre la position de la grande source.....	154
Figure 4.32	Schéma de l'exutoire naturel de la Grande Source de Sidi Othmane (Visite le 09/01/2010).....	156
Figure 4.33	Positionnement des puits affectés par des essais de pompages.....	158
Figure 4.34	Pompage d'essai de puits APC.....	160
Figure 4.35	Bilan estimatif du système aquifère.....	164
Figure 4.36	Schéma de fonctionnement permettant d'explique la différence entre les perméabilités et les débits observés.....	166
Figure 4.37	Schéma proposé du fonctionnement de l'aquifère système aquifère du Mio-Plio-Quaternaire à Béni -Abbès.....	166

HYDROCHIMIE

CHAPITRE 05

Figure 5.1	Balance ionique de l'ensemble des analyses.....	174
Figure 5.2	Synthèse des paramètres hydrochimiques des eaux de surfaces du bassin versant de la Saoura.....	175
Figure 5.3	Localisation de la zone d'étude et points d'eau prélevé.....	177
Figure 5.4	Diagramme de Scholler de la potabilité des eaux des nappes des Monts d'Ougarta.....	179
Figure 5.5	Représentation graphique selon Piper des eaux de l'aquifère Paléozoïque des Monts d'Ougarta.....	180
Figure 5.6	Positionnement des puits de la nappe du Grand Erg Occidental.....	181
Figure 5.7	diagramme de Piper des eaux de la nappe du Grand Erg à Béni Abbes (Analyses 2016).	185
Figure 5.8	Diagramme de Piper des eaux de la nappe du Grand Erg 1941.....	186

Figure 5.9	Diagramme de Schöeller des eaux de la nappe du Grand Erg 1941.....	187
Figure 5.10	Diagramme de Schoeller des eaux de la nappe du Grand Erg. (analyse 2016).....	188
Figure 5.11	L'évolution chimique des eaux de la Grande Source depuis 1941 jusqu'au 2016.....	191
Figure 5.12	Carte d'isoteneurs des eaux de la nappe de grand erg occidental.....	193
Figure 5.13	Diagramme de piper eaux de la nappe de la Hamada de Guir.....	195
Figure 5.14	Potabilité des eaux de la Hamada du Guir.....	196
Figure 5.15	Localisation des oasis de la vallée de la Saoura.....	197
Figure 5.16	Evolution des profondeurs classées et des températures des eaux de la Saoura.....	197
Figure.5.17	Evolution de la minéralisation des eaux du Nord au Sud de la Saoura (depuis Iqli jusqu'au Foum Lakhneg).....	198
Figure 5.18	Evolution du faciès chimique des eaux de la vallée de la Saoura.....	199
Figure 5.19	Histogramme de la TDS des eaux de Mio-Pliocène et de la Hamada du Guir en 1964 et 2004.....	200
Figure 5.20	Saturation des eaux des nappes vis-à-vis de certains minéraux.....	203
Figure 5.21	Variation des concentrations des éléments majeurs en fonction de la minéralisation....	205
Figure 5.22	Relation entre les éléments chimiques majeurs.....	206
Figure 5.23	Mise en évidence des échanges de bases avec les minéraux argileux.....	207
Figure 5.24	Localisation des points d'eaux du système aquifère de la région de Béni –Abbès.....	208
Figure 5.25	Profil d'évolution du Résidu sec de l'Erg vers l'Oued Saoura.....	212
Figure 5.26	Carte d'isoteneurs des eaux résidu sec.....	214
Figure 5.27	Répartition spatiale des cations et les anions du système aquifère à Béni-Abbès.....	220
Figure 5.28	Diagramme de Piper des eaux du système aquifère à Béni-Abbès(2016).....	222
Figure 5.29	Diagramme de Schöeller-Berkaloff des eaux des nappes à Béni- Abbès. (Campagne Avril, 2016).....	223
Figure 5.30	Diagramme du Scholler de la potabilité des eaux de la région de Béni Abbès (analyse 2016) -selon les normes algériennes.....	224
Figure 5.31	Diagramme de Stiff des eaux du système aquifère à Béni -Abbès.....	225
Figure 5.32	Rapports caractéristiques d'éléments chimiques des nappes de la région de Béni-Abbès.....	227
Figure 5.33	Evolution du chimisme d'eaux de la région de Béni-Abbès.....	230
Figure 5.34	Etat des eaux de la région de Béni-Abbès.....	231
Figure 5.35	Représentation graphique en ACP des eaux des de la palmeraie de Béni-Abbès.....	236
Figure5.36	Représentation graphique des Individus.....	236
Figure 5.37	Diagramme de Riverside de la nappe.....	243
Figure 5.38	Diagramme de Wilcox de la nappe.....	243
HYDROCHIMIE ISOTOPIQUE		CHAPITRE 06
Figure 6.1	Corrélation entre la composition isotopique de ^{18}O et ^2H	254
Figure 6.2	Subdivision isotopique, de la nappe du CI en trois domaines.....	257
Figure 6.3	Age des eaux du CI d'après la teneur en carbone 14.....	259
Figure 6.4	Carte des points d'eau de la nappe du Grand Erg Occidental.....	260
Figure 6.5	Teneur en Deutérium et en Oxygène-18 des précipitations à Béni Abbes.....	261
Figure 6.6	Corrélation entre les teneurs en ^{18}O et ^2H dans les eaux de la région du Grand Erg.....	262
Figure 6.7	Variation de la composition isotopique en fonction de la hauteur des Précipitations à Béni-Abbès.....	266
Figure 6.8	Relation $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$ dans les eaux de pluie.....	267
Figure 6.9	Tritium et hauteurs de pluie à Béni-Abbès.....	267
Figure 6.10	Relation $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^2\text{H}$ dans les eaux de la Saoura.....	268
Figure 6.11	Carte de répartition des moyennes isotopiques de l'eau dans le Sahara.....	271
Figure 6.12	Relation $\delta^{18}\text{O}$ -Conductivité des eaux d'élution d'un sondage à Béni-Abbès.....	273

Figure 6.13	Relation $\delta^{18}O$ - Cl des eaux de la Saoura.....	274
Figure 6.14	Variations des teneurs en $\delta^{18}O$ à la Grande Source et à la foggara de Béni-Abbès.....	275
Figure 6.15	Variations des teneurs en $\delta^{18}O$ à la Guelta de Gara Diba.....	276
Figure 6.16	Histogramme des fréquences des teneurs en tritium des eaux de la Saoura.....	278
Figure 6.17	Corrélation $\delta^{18}O$ - Tritium (Campagne II, Avril 2003).....	279
Figure 6.18	Relation Tritium- salinité des eaux de la Saoura	280
Figure 6.19	Inventaire des points d'eau de la nappe du Grand Erg Occidental	283
SIG ET VULNERABILITE		CHAPITRE 07
Figure 7.1	Méthodologie du travail adopté.....	292
Figure 7.2	Subdivision des bassins versants le réseau hydrographie de la Saoura (période 1904-2014).....	295
Figure 7.3	Carte géologique et structurale synthétique de la région de Béni –Abbès.....	297
Figure 7.4	Carte de distribution des points d'eau dans la région de Béni Abbès.....	298
Figure 7.5	Le système aquifère de la région de Béni Abbès.....	299
Figure 7.6	Carte piézométrique et hydrogéologique du système aquifère de la région de Béni-Abbès.....	301
Figure 7.7	Carte de distribution des débits de la région de Béni Abbès.....	302
Figure 7.8	Carte thématique de transmissivité.....	303
Figure 7.9	Carte thématique de la minéralisation de la région d'étude.....	304
Figure 7.10	Croissance démographie et besoin en eau.....	305
Figure 7.11	La palmeraie de Béni-Abbes et l'oued Saoura dans sa dernière crue (2014).....	306
Figure 7.12	Zone d'alimentation en eau potable de la ville de Béni –Abbès.....	309
Figure 7.13	Répartition d'usage d'eau par activités (Enquête GTZ, 2010).....	309
Figure 7.14	Consommation d'eau saisonnière et par activités à Béni -Abbès.....	310
Figure 7.15	Positionnement des foggaras à Béni -Abbès.....	312
Figure 7.16	Contraintes est problèmes de la dégradation de palmeraie à Béni-Abbès.....	313
Figure 7.17	Zone d'assainissement de la Ville de Béni-Abbès.....	314
Figure 7.18	Sortie de rejet 01 et infiltration d'eaux usées.....	315
Figure 7.19	Canevas du fonctionnement de l'approche participative.....	316
Figure 7.20	Schéma du cycle de la gestion intégrée des ressources en eau dans l'oasis de Béni-Abbès.....	319
Figure 7.21	La construction illicite d'habitations.....	321
Figure 7.22	L'installation de bergeries et de poulaillers autour du site de la source	321
Figure 7.23	Organigramme présentant les étapes de réalisation de la carte de vulnérabilité à partir de la méthode DRASTIC.....	325
Figure 7.24	Organigramme de la cartographie de vulnérabilité à partir de la méthode GOD	329
Figure 7.25	Organigramme de la cartographie de la vulnérabilité à partir de la Méthode SI.....	331
Figure 7.26	Carte de vulnérabilité du système aquifère de Béni-Abbes (DRASTIC).....	335
Figure 7.27	Carte de vulnérabilité de la région de Béni Abbés (GOD).....	336
Figure 7.28	Carte de vulnérabilité de la région de Béni Abbés (SI).....	337
Figure 7.29	Vulnérabilités de système aquifère de Béni Abbés.....	340
Figure 7.30	Carte des risques de pollution des eaux souterraines de palmeraie de Béni Abbés.....	340
Figure 7.31	Carte des sources potentielles de pollution.....	341
Figure 7.32	Carte de zonation des périmètres de protection de la région de Béni –Abbes.....	344

LISTE DES TABLEAUX

CADRE GEOGRAPHIQUE, CLIMATOLOGIQUE ET HYDROLOGIE		CHAPITRE 01
Tableau 1.1	Répartition mensuelle des moyennes (°C) de la station de Béni Abbès Périodes :(1926- 1950), (1961 -1990) et (1973-2016).....	10
Tableau 1.2	Répartition mensuelle des précipitations (mm) de la station de Béni Abbès (1926-1950) et (1973-2018).....	12
Tableau 1.3	Répartition saisonnière des précipitations (1973-2018).....	13
Tableau 1.4	Nombre de jours mensuels moyens de vents de sable (Période 1925- 1950).....	15
Tableau 1.5	Evaporation moyenne mensuelle en mm station de Béni Abbès.....	17
Tableau 1.6	Caractéristiques des sous bassins de la Saoura.....	28
CONTEXTE GEOLOGIQUE		CHAPITRE 02
Tableau 2.1	La classification (AFTES) des espacements, et la classification terminologie relative à l'ouverture des fissures.....	75
Tableau 2.2	Répartition de 180 fractures répertoriées.....	76
Tableau 2.3	schéma de multicouches et les aquifères à Béni Abbès.....	77
ETUDE GEOPHYSIQUE		CHAPITRE 03
Tableau 3.1	Echelle des résistivités adoptée.....	93
Tableau 3.2	Echelle des résistivités.....	100
HYDROGEOLOGIE		CHAPITRE 04
Tableau 4.1	inventaire des points d'eau dans la chaine d'Ougarta (2016).....	117
Tableau 4.2	Inventaire et positionnement des points du grand erg occidental, 2016. .	131
Tableau 4.3	Valeurs minimales et maximales des profondeurs de l'eau de la Saoura(2005).....	137
Tableau 4.4	paramètres hydrodynamiques des ressources de la vallée de la Saoura...	138
Tableau 4.5	Profondeurs et débit de quelques foggaras.....	149
Tableau 4.6	Variation des débits de sources de la Saoura.....	150
Tableau 4.7	Débit de quelques foggaras de Béni Abbès (1997-2016).....	151
Tableau 4.8	Mesures de débit de la grande source divers intervalles de temps.....	156
Tableau 4.9	Comparaison des valeurs de transmisivités de quelques puits dans la palmeraie 1991-2017.....	161
Tableau 4.10	Caractéristiques hydrodynamiques du système aquifère au niveau de Béni- Abbès.....	162
HYDROCHIMIE		CHAPITRE 05
Tableau 5.1	Synthèses des analyses physico chimiques des eaux de surfaces dans le bassin de la Saoura.....	175
Tableau 5.2	Intervalles de variation et médiane de différentes caractéristiques chimiques des eaux des Monts d'Ougarta (Roche, 1964).....	176
Tableau.5.3	Caractéristique et évolution hydrochimique des eaux des Monts d'Ougarta.	178
Tableau 5.4	Les formules caractéristiques pour les différentes zones d'intervention..	178
Tableau 5.5	Caractérisation hydrochimique des eaux de la nappe du Grand Erg Occidental.....	182
Tableau 5.6	Faciès chimique des eaux de la nappe du Grand Erg Occidental au niveau de Béni -Abbès.....	184
Tableau 5.7	Les rapports caractéristiques des eaux de la nappe Mio-Plio-Quaternaire (Erg).....	189
Tableau 5.8	Evolution et synthèse des paramètres physico-chimique des eaux de la Grande Source.....	192
Tableau 5.9	Evolution hydrochimique des eaux de la Hamada du Guir (les valeurs en mg/l).....	194
Tableau 5.10	Températures moyennes des eaux de la Saoura.....	208

Tableau 5.11	Evolution de la température en fonction de la profondeur dans la région de Béni-Abbès (Campagne -2015-2016).....	210
Tableau 5.12	Caractéristiques hydro chimiques des eaux u système aquifère à Béni – Abbès.....	215
Tableau 5.13	Potabilité des eaux en fonction de la dureté (OMS).....	219
Tableau 5.14	Faciès chimique des eaux des nappes du système aquifère	221
Tableau 5.15	synthèse caractéristiques Hydrochimiques des différentes nappes à Béni Abbès.....	229
Tableau 5.16	Caractéristiques statistiques des données analyses.....	233
Tableau 5.17	Caractéristiques statistiques des données analyses.....	233
Tableau.5.18	Matrice de corrélation des éléments chimiques.....	234
Tableau 5.19	Corrélations entre les variables et les facteurs.....	235
Tableau.5.20	L'indice de perméabilité des eaux étudiée	238
Tableau.5.21	Résultats de calcul du SAR.....	241
Tableau.5.22	Classification des eaux basée sur la concentration totale en sels, selon Ayers et Westcot (1976).....	244
Tableau.5.23	Classe d'alcalinité des eaux selon le SAR.....	245
Tableau.5.24	Classification des eaux d'irrigation (Méthode Richards) [28]	247
Tableau 5.25	Estimation de la recharge des nappes de la vallée de la Saoura.....	248
HYDROCHIMIE ISOTOPIQUE		CHAPITRE 06
Tableau 6.1	Relation activités – âges du ^{14}C des eaux de la région de Béni Abbés (Conrad et Fontes, 1972).....	257
Tableau6.2	Données isotopiques sur les eaux de la nappe du Grand erg occidental sur le front de déversement le long de la Saoura	263
Tableau 6.3	Teneurs isotopiques des eaux de la Hamada du Guir	265
Tableau 6.4	Résultats des analyses isotopiques des eaux de nappes de la Saoura	269
Tableau 6.5	Caractéristiques isotopiques des eaux de la Saoura (Avril 2003)	270
Tableau 6.6	Teneurs en Tritium et en $\delta^{18}\text{O}$ des eaux de nappes de Béni Abbes	276
Tableau 6.7	Teneurs en Tritium de la nappe du Grand Erg Occidental et de quelques valeurs de référence.....	282
Tableau 6.8	Teneurs en Tritium des différentes nappes du Sahara Occidental.....	285
Tableau 6.9	Teneurs en ^{13}C et ^{14}C de quelques eaux de la vallée de la Saoura et leurs caractéristiques physico-chimiques (Conrad et Fontes, 1972).....	287
SIG ET VULNERABILITE		CHAPITRE 07
Tableau 7.1	Type et usage des points d'eau.....	298
Tableau 7.2	Evolution des besoins en fonction des disponibilités et du déficit.....	308
Tableau 7.3	Poids des paramètres et des indices de vulnérabilité DRASTIC.....	324
Tableau 7.4	Classification des indices de vulnérabilité DRASTIC.....	325
Tableau 7.5	Poids GOD des paramètres de la vulnérabilité	327
Tableau 7.6	Intervalles des valeurs de l'indice GOD et classes de vulnérabilité	328
Tableau 7.7	Principales classes d'occupation des sols et valeurs de LU correspondantes.....	330
Tableau 7.8	Poids attribués aux paramètres SI (variant de 0 à 1, du moins au plus important).....	330
Tableau 7.9	Critères d'évaluation de la vulnérabilité dans la méthode SI	331
Tableau7.10	Notation et pondération de la nature du sol.....	333
Tableau 7.11	Notation et pondération du facteur de la pente	333
Tableau 7.12	Notation et pondération de la couche vadose	333
Tableau 7.13	Notation et pondération de la perméabilité	334
Tableau 7.14	Pourcentage des surfaces selon le degré de vulnérabilité	338

GLOSSAIRE

Lexique arabo-berbère utilisé dans le texte ou figuré sur les cartes.

Acheb:	Tapis végétal peu épais et à cycle végétatif rapide c'est un léger et éphémère duvet de verdure.
Ain (pluriel aioune):	Source.
Atchane :	Assoiffé.
Barkhane :	Petite dune en forme de croissant, à pointes effilées
Berda :	Trou dans le sable de 2 m de profondeur en général destiné à la culture des jeunes plantes de palmier.
Chaaba: Chabets	Ravin ou vallée encaissée. Un ensemble de thalweg d'un réseau hydrographique.
Chech :	Voile transparent dont les méharistes se couvrent le bas du visage.
Daia ou Dayas :	dépression en cuvette fermée, faiblement accentuée à la surface de la hammada, le fond est couvert d'un sol argileux dont profite la végétation.
Djebel :	montagne, mont, colline.
Dra (littéralement bras):	relief allongé, souvent crête anticlinale, également crete de sable dans l'erg (appelés aussi brasse de l'erg)
Erg :	Région de dunes, massif dunaires
Feidj:	Couloir dans l'erg, à fond sableux. Galerie souterraine qui draine l'eau de la nappe vers la surface du sol .C'est une construction hydraulique traditionnel, c'est un système ingénieux d'irrigation et de l'hydrotechnique traditionnel dans le Sahara algérien.
Foggaras :	Débouché d'une vallée de djebel sur le piémont; d'un couloir de l'erg sur la lisière de l'erg.
Foum : (bouche)	Couloir de l'erg, à fond rocheux.
Gassi :	Pluriel Gour, en rapport d'annexion garet, colline isolée à pente raide, le plus souvent à sommet tabulaire, morphologiquement la gara est une butte-témoin d'un plateau rocheux.
Gara	Une goutte: en rapport d'annexion Garet, colline isolée à pente raide, le plus souvent sommet tabulaire. Morphologiquement la gara est une butte témoin d'un plateau rocheux.
Gar:	Laisses d'eau généralement pérennes, établies sur fond rocheux, dans les gorges montagneuses, ou dans le lit des oueds, l'alimentation des gueltas se fait par un écoulement de surface ou par l'inféro-flux
Gueltat:	Plateau désertique dont la surface dénudée de dépôts meubles est formé par une rocheuse à nu, les aspects ruiniformes sont fréquent sur les bords de ces falaise, formé principalement de grés à ciment calcaire et d'argiles marneuses toujours couronnées par une dalle calcaire souvent riche en silice.
Hammada:	
Iguidi(en berbère)	Region des dunes

Hassi :	Puits
Kheneg :	(littéralement: étranglement):défile, cluse, vallée encaissée.
Kem - Kem :	A la Daoura, sont des dalles calcaires du Cénomano-Turonien, forment à l'ouest de la Hammada du Guir des plateaux profondément disséqués par un réseau complexe d'oueds.
Ksar : (Ksour en pluriel)	Village complètement construit en Tob (brique d'argile)
Moungar :	Petite gara, forment promontoire en avant du plateau auquel elle reste liée soit par un pédoncule de son entablement, soit simplement par sa base.
Nebka:	Ensemble des petite dunes, associées à la végétations qui a provoqué l'ensablement .
Oued:	Cours d'eau intermittent, alimenté par des crues plus souvent sans eau, au Sahara, mais à thalweg bien marqué.
Ras :	(pluriel rious) littéralement tête .
Raoui :≠	Atchane
Reg :	Plaine dénudée, au sol composé de gravier et de sable ou la marche est aisée
Rokna:	Coin ou angle
Sebkha:	Fond de dépression fermée, zone d'évaporation pour les eaux de ruissellement ou pour une nappe souterraine, caractérisée par la présence de dépôts salines et l'absence de végétation.
Seguia:	Canal d'irrigation
Tachengit	Sédiment sablo-argileux ou macro-sableuse blanc ou gris souvent durci en surface.
Sif :	(pluriel siouf) d'une allongée en forme de sabre.
Taouerta :	Butte rocheuse
Theira :	Dépression en forme de cuvette dans l'erg.
Torba:	Formation semi imperméable, composée de marne, grés argilo carbonaté, sable et argile.
khal:	Noir
Ogla :	Vasque rocheuse remplie d'eau plus au moins permanente

TABLE DES MATIERES

Résumé.....	i
Avant-propos.....	iv
Dédicaces.....	ix
Tableau des matières.....	x
Table des figures.....	xvii
Liste des tableaux.....	xxii
Glossaire.....	xxv
INTRODUCTION GENERALE.....	1
CADRE GEOGRAPHIQUE, CLIMATOLOGIQUE ET HYDROLOGIE	CHAPITRE 01
1. Introduction.....	7
2. Situation géographique.....	7
3. Conditions climatiques.....	8
3.1 Les températures.....	8
3.2 La pluviométrie.....	11
3.2.1 Précipitations mensuelles.....	11
3.2.2 Précipitations saisonnières.....	12
3.2.3 Précipitations annuelles.....	13
3.3 Le vent.....	14
3.4 Humidité relative.....	16
3.5 Evaporation.....	16
3.6 Le déficit d'écoulement ou Evapotranspiration réelle (ETR).....	17
3.7 Essai de Bilan hydrologique.....	18
3.8 Etude de climat.....	19
4. Les grands ensembles géomorphologiques.....	20
4.1 Monts d'Ougarta.....	20
4.1.2 Les Ergs.....	20
4.1.3 Les Regs.....	22
4.1.4 Les Hamadas.....	22
4.1.5 Les vallées et les sebkhas.....	23
4.1.6 Les Daïas.....	23
4.2 Morphologie de la région d'étude.....	23
4.2.1 Le plateau de la rive gauche.....	23
4.2.2 Le plateau de la rive droite.....	23
4.2.3 La vallée de la Saoura.....	24
5. Hydrographie et hydrologie.....	24
5.1 Réseau hydrographique et des divers bassins versants du Sahara septentrional.....	24
5.2 Bassin de la Saoura.....	26
5.2.1 Oued Saoura.....	28
5.2.2 Oued Guir.....	28
5.2.3 Oued Zouzfana.....	29
5.2.4 Oued Bechar.....	29
5.3 Bassin d'Oued Namous.....	29
6. Aperçu sur l'hydrologie quantitative de la Saoura.....	30

6.1	Apports du Guir à Djorf-Torba.....	30
6. 2.	L'oued Saoura à Béni Abbès.....	32
6. 3	La Zousfana.....	33
7.	Espace de la Saoura et hydraulique traditionnelle.....	34
7.1	Grande hydraulique et Verrouillage des vallées	34
7.2	Mutation du pays des foggaras et nouveaux périmètres.....	35
8.	Diagnostic et les enjeux de la gestion des eaux.....	36
8.1	Développement urbain et agricole.....	36
8.1.1	Ressources en eau limitées.....	37
8.1.2	Contraintes de développement et enjeux majeur	37
8.1.3	Bilan et usage d'eau.....	38
9.	Conclusion	40
CONTEXTE GEOLOGIQUE		CHAPITRE 02
1.	Introduction.....	42
2.	Historique des travaux géologiques.....	42
2. 1.	Les travaux de prospection minière modernes.....	43
2.2.	Principaux résultats	43
2.2.1.	Les travaux académiques.....	44
2.2.2.	Cartes et photographies disponibles.....	45
2.3.	La plate-forme saharienne.....	47
2.4.	Les Monts d'Ougarta.....	47
3.	Litho stratigraphie.....	49
3.1.	Précambrien.....	49
3.2.	Paléozoïque.....	49
3.2.1.	Cambrien(600-1200m).....	49
3.2.2.	L'Ordovicien.....	52
3.2.3.	Le Dévonien est très puissant.....	52
3.2.3.1.	Dévonien inférieur.....	53
3.2.3.3.	Dévonien supérieur.....	53
3.2.3.4.	Dévonien moyen.....	54
3.2.3.5.	Le silurien.....	54
3.2.3.6.	Carbonifère.....	54
3.3.	le Crétacé	58
3.4.	Le Néogène	58
3.4.1.	La Hamada du Guir.....	60
3.5.	Le Quaternaire.....	61
3.3.1.	Terrasses anciennes : (Pliocène - Villafranchien).....	62
3.3.2.	Terrasses moyennes (le Saourien).....	62
3.3.3.	Terrasses supérieures (Holocène ou Guirien).....	62
3.3.4.	Le Grand Erg occidental.....	64
4.	Tectonique et contexte structural.....	65
4.1.	Tectonique panafricaine.....	66
4.2.	Tectonique Hercynienne.....	67
5.	Approche structurale de la région d'étude.....	70
5.1.	Plissement.....	70
5.2.	Failles et Fractures.....	70
5.3.	Les fissure.....	71
5.4.	Plis et failles.....	72

5.5.	Diaclases et fractures.....	72
6.	Néotectonique.....	76
7.	Gisement et Condition de réservoir.....	77
8.	Conclusion.....	77
ETUDE GEOPHYSIQUE		CHAPITRE 03
1.	Introduction.....	80
2.	Généralités sur la géophysique de surface.....	80
3.	Etudes et travaux de géophysiques réalisées.....	81
3.1.	Campagne géophysique 1975.....	81
3.1.1.	Situation de la zone d'étude.....	83
3.1.2.	Les coupes de résistivité.....	84
3.1.3.	Carte de résistivité.....	85
3.1.4.	Carte du toit du niveau conducteur.....	86
3.2.	Campagne géophysique 2010(Zone plateau de la ville de Béni Abbés)....	88
3.3.	Etalonnage des données géophysiques	89
3.3.1.	Etalonnage du sondage électrique S1à l'aide du forage F3.....	89
3.3.2.	Etalonnage à l'aide du sondage électrique P1.....	90
3.3.3.	Etalonnage à l'aide du sondage électrique P1.....	91
3.3.4.	Etalonnage à l'aide du sondage électrique P2 et P3	91
3.4.	Résultats de la prospection électrique.....	93
3.4.1.	Interprétation des coupes géoélectriques.....	93
3.4.1.1.	Coupe géoélectrique A.....	93
3.4.1.2.	Coupe géoélectrique B.....	94
3.4.1.3.	Coupes géoélectriques C et D.....	94
3.4.1.4.	Coupes géoélectriques E, F, G et H.....	95
3.4.1.5.	Coupes géo électriques I, J et K	95
3.4.2.	Interprétation des différentes cartes.....	96
3.4.2.1.	Carte des résistivités apparentes en AB= 200 m.....	96
3.4.2.2.	Carte des résistivités apparentes AB = 400 m.....	96
3.4.2.3.	Carte des résistivités apparentes AB=1000 m et 2000 m.....	96
4.	Zones du Grand erg occidental et Hamada de Guir.....	98
4.1.	Interprétation des sondages électriques verticaux.....	99
4.1.1.	Echelle des résistivités adoptée.....	99
4.1.2.	Sondage électrique vertical SEV A1.....	100
4.1.3.	Sondage électrique vertical SEV A2.....	101
4.1.4.	Sondage électrique vertical SEV A3.....	101
4.1.5.	Sondage électrique vertical SEV A4.....	102
4.1.6.	Sondage électrique vertical SEV B2.....	103
4.1.7.	Sondage électrique vertical SEV Gassi El Massha.....	103
4.1.8.	Sondage électrique vertical SEV Hassi Fokra.....	104
5.	Résultats de la géophysique dans les alluvions de l'oued Saoura à Béni Abbes.	105
6.	Synthèse des études géophysiques.....	105
7.	Conclusion.....	107
HYDROGEOLOGIE		CHAPITRE 04
1.	Introduction.....	110
2.	Hydrogéologie des principaux aquifères de la région.....	111
2.1.	Aquifère du socle des Monts d'Ougarta	112
2.1.1.	Condition et gisement de l'aquifère du Cambro- Ordovicien.....	113

2.1.2	Comportements hydrodynamiques des réservoirs.....	113
2.3.	Écoulement des eaux, piézométrie et débit de la nappe.....	114
2.1.4.	Relation de l'aquifère du socle et la boutonnière de Sebka el Melah...	118
2.2.	Aquifère du Continentale intercalaire.....	118
2.2.1.	Piézométrie du Continental intercalaire.....	118
2.3.	Aquifères du Continental Terminal.....	120
2.3.1.	La nappe de la Hamada du Guir.....	120
2.3.2.	Hamada Sud Oranaise.....	123
2.3.3.	Aquifère du Mio-Pliocène (Grand Erg Occidental).....	125
2.3.3.1.	Réflexions sur la relation hydraulique entre la nappe du Mio - Pliocène (grand Erg Occidental) et le Continental Intercalaire.....	130
2.3.3.2.	Piézométrie de la nappe grand erg occidental 2016.....	131
2.4.	Nappes des terrasses et inféro- flux de la Vallée de la Saoura.....	136
2.4. 1.	Variations de la Profondeur de l'eau dans la vallée de la Saoura.....	136
2.4.2.	Evaluation des débits de la décharge au niveau de la vallée de la Saoura.....	137
3.	Hydrogéologie du Système aquifère de Béni Abbes.....	138
3.1.	Conditions et gisements.....	138
3.2.	Fonctionnement du système aquifère.....	140
3.2.1.	Géométrie de l'aquifère	142
3.3.	Écoulement et exutoires de la nappe.....	143
3.3.1.	Profondeur de l'eau des nappes à Béni - Abbès.....	144
3.3.2.	Piézométrie	144
3.3.3.	L'Alimentation de la nappe du Mio-Plio-Quaternaire.....	147
3.4.	Les Foggaras et sources.....	147
3.5.	La Grande Source de Béni-Abbès.....	152
3.6.	Etude hydrodynamique.....	157
3.6.1.	La transmissivité.....	160
3.6.2.	Coefficient d'emmagasinement.....	161
3.6.3.	Débit de la nappe.....	162
3.7.	Evaluation de la ressource et Bilan de la nappe.....	163
4.	Fonctionnement du système aquifère.....	164
5.	Conclusion.....	167
HYDROCHIMIE		CHAPITRE 05
1.	Introduction	169
2.	Prélèvement et méthodes d'analyse.....	169
2.1.	Prélèvement.....	170
2.2.	Matériels et Méthodes d'analyse.....	171
2.3.	Balance ionique.....	173
3.	Etude physico-chimique des eaux de la région de Béni –Abbès.....	174
3. 1.	Eaux de surface	174
3. 2.	Eaux souterraines.....	176
3. 2.1	Hydrochimie de la nappe du Cambro-ordovicien.....	176
3.2.2	Hydrochimie de la nappe du Grand Erg Occidental(Néogène).....	181
3.2.2.1	Paramètres physico –chimique.....	182
3.2.2.2.	Faciès chimiques et potabilités des eaux.....	184
3.2.2.3.	Etude des rapports caractéristiques.....	189
3.2.2.4.	Evolution de l'hydrochimie de la nappe du grand erg occidental.....	190

3.2.2.5.	Répartition spatiale des éléments chimiques.....	193
3.2.3.	Nappe de la Hamada du Guir.....	194
3.2.4.	Hydrochimie de la vallée de la Saoura.....	196
3.2.4.1.	Evolution de la minéralisation le long de la vallée de la Saoura.....	198
3.2.4.2.	Mécanismes et origines de la minéralisation des eaux souterraines...	200
3.2.4.2.1.	Indice de Saturation (Is).....	201
3.2.4.2.2	Saturation des eaux souterraines vis-à-vis de certains minéraux.....	201
3.4.2.3	Origine de la minéralisation.....	203
4.	Hydrochimie du système aquifère de Béni –Abbès.....	207
4.1.	Paramètres physiques.....	208
4.1.1.	La température	208
4.1.2	Le pH	212
4.1.3	La conductivité.....	212
4.1.4	Le résidu sec	212
4.2.	Paramètres chimiques	214
4.2.1.	Calcium Ca ⁺⁺	217
4.2.2.	Magnésium Mg ⁺⁺	217
4.2.3.	Sodium Na ⁺⁺	217
4.2.4.	Potassium k ⁺	217
4.2.5.	Chlorure Cl ⁻	217
4.2.6.	Les sulfates SO ₄ ⁻⁻	217
4.2.7.	Les bicarbonates HCO ₃ ⁻⁻	217
4.2.8.	Les Nitrates (NO ₃ -).....	218
4.2.9.	La minéralisation	218
4.2.10.	La dureté totale (TH)	218
4.2.11.	Titre d'Alcalimétrique (TA)	219
4.2.12.	Titre Alcalimétrique Complet(T.A.C)	219
4.3	Répartition spatiale des éléments chimiques.....	219
4.3.1.	Faciès chimiques et potabilités des eaux.....	221
4.3.2.	Etude des rapports caractéristiques.....	225
4.3.3.	Evolution hydro chimique des eaux à Béni –Abbès.....	228
4.3.3.1.	Evolution de la TDS à Béni –Abbès.....	228
4.3.4.	Etude de la qualité des eaux d'irrigation.....	232
4.3.4.1.	Traitement statistique des données hydrochimique et ACP.....	232
4.3.4.1.1.	Matrice de corrélation.....	233
4.3.4.1.2.	L'analyse de cercle de l'ACP.....	234
4.3.4.2.	Calcul des indices de l'eau en vue de leur utilisation agricole.....	237
4.3.4.3.	Les chlorures.....	239
4.3.4.4.	Magnésium Hazard absorption.....	239
4.3.4.5.	Pourcentage de sodium	240
4.3.4.6.	Sodium Absorption Ratio (SAR)	241
4.3.4.7.	Evaluation du risque de salinité	243
4.3.4.8.	Evaluation du risque d'alcalinité	244
4.3.4.9.	Classification des eaux d'irrigation selon le diagramme de Riverside....	246
4.4.	Estimation de la recharge par la méthode des isotopes stables.....	247
5.	Conclusion.....	249
HYDROCHIMIE ISOTOPIQUE		CHAPITRE 06
1.	Introduction	252

2.	Aperçu sur les isotopes.....	253
2.1.	Isotopes stables	253
2.2.	Isotopes radioactifs : Tritium, Carbone 1 et Chlore 36.....	255
3.	Résultats et discussion des données isotopiques.....	256
3.1.	La nappe du Continental intercalaire.....	256
3.2.	Nappe du grand Erg occidental.....	260
3.2.1.	Etude isotopique des eaux de la Grande Source.....	263
3.2.2.	Teneurs en Tritium des eaux de nappes.....	264
3.3.	Nappe de la Hamada du Guir.....	264
3.4.	Teneurs isotopiques des eaux de la région de Béni Abbès.....	266
3.4.1.	Relation entre $\delta^{18}O$ et δ^2H dans les eaux des précipitations à Béni-Abbès.....	266
3.4.2.	Teneur en Tritium des précipitations	267
3.4.3.	Relation entre $\delta^{18}O$ et δ^2H dans les eaux des nappes.....	268
3.4.4.	Relation $\delta^{18}O$ - Conductivité de l'eau d'élution d'un sondage à Béni-Abbès.....	272
3.4.5.	Relation $\delta^{18}O$ - Chlorures des eaux de la Saoura.....	273
3.4.6.	Variations de $\delta^{18}O$ des eaux à Béni-Abbès.....	274
3.4.7.	Les isotopes radioactifs dans les eaux des nappes.....	276
3.5.	Corrélation $\delta^{18}O$ - Tritium.....	278
3.6.	Corrélation tritium-salinité	279
3.7.	Synthèse des données Tritium mesurées entre 1964 et 1973	280
3.8.	Les isotopes du Carbone -13 et -14	286
4.	Conclusion.....	288

SIG ET VULNERABILITE

CHAPITRE 07

1.	Introduction	290
2.	Apport des SIG dans la gestion des ressources en eau.....	290
2.1.	Méthodologie de travail.....	291
2.1.1.	Inventaire de données des points d'eau.....	291
2.1.2.	Informatisations des données.....	291
2.1.3.	Importation des données.....	293
2.1.4.	Informatisation de la composante spatiale.....	293
2.2.	Elaboration des résultats.	294
2.2.1.	Réseau hydrographique.....	294
2.2.2.	Elaboration d'un modèle géologique de terrain.....	295
2.2.3.	Répartition des points d'eau.....	298
2.2.4.	Carte des aquifères.....	298
2.2.5.	Carte piézométrique globale.	299
2.2.6.	Carte des débits.....	302
2.2.7.	Carte de transmissivité.....	302
3.	Schéma de la gestion intégrée des ressources en eau de Béni-Abbès.....	304
3.1.	Les potentialités en eau.....	305
3.1.1.	Les ressources en eau superficielles	305
3.1.2.	Les ressources en eau souterraines.....	306
3.2.	Les disponibilités et les besoins en eau.....	307
3.2.1.	Alimentation en eau potable (AEP)	307
3.2.2.	Alimentation en eau d'irrigation et d'industrie(AEI).....	311
3.2.3.	Assainissement Et Evaluation Du Débit Des Eaux Usées.....	313

2.2.4.	Vision et stratégie de Gestion intégrée des ressources en eau à Béni - Abbès	314
3. 2.5.	Définition de l'approche de GIRE pour la région de Béni- Abbès	317
3.2.6.	La mise en ouvre d'un modèle de gestion intégrée des eaux.....	319
4.	Evaluation de la vulnérabilité du système aquifère de Béni- Abbès.....	320
4.1.	Condition et gisement de l'exécutoire	322
4.2.	Elaboration d'une carte de vulnérabilité	322
4.3.	Méthodes d'évaluation.....	323
4.3.1.	La méthode DRASTIC.....	323
4.3.2.	Méthode GOD.....	326
4.3.3.	Méthode SI.....	329
4.4.	Application au système aquifère de Béni-Abbès.....	332
4.4.1.	Profondeur de la nappe	332
4.4.2.	La recharge efficace	332
4.4.3.	Nature de la zone saturée	332
4.4.4.	La nature du sol.....	332
4.4.5.	La topographie (pente)	333
4.4.6.	Nature de la zone non saturée (vadose)	333
4.4.7.	La perméabilité.....	334
4.5.	Résultats et discussions d'évaluation de la vulnérabilité.....	334
4.5.1.	La méthode DRASTIC.....	334
4.5.2.	La méthode GOD.....	336
4.5.3.	La méthode SI.....	337
4.5.4.	Analyse comparative des résultats.....	337
4.6.	Cartographie de la vulnérabilité et le risque de pollution.....	338
4.6.1.	Pollution des nappes	339
4.7.	Quelles sont les réglementations qui peuvent s'appliquer sur mon territoire et avoir un impact sur la qualité de nos ressources ?.....	342
5.	Conclusion.....	344
	CONCLUSION GENERALE	345
	Références bibliographiques.....	346
	Annexes	
	Planches	
	Liste des photos	
	Mes publications	

INTRODUCTION GENERALE

L'eau souterraine cette composante invisible du cycle de l'eau, joue un rôle majeur pour l'homme et les milieux, surtout en zones arides et hyperarides. Elle représente la seule ressource hydrique pour les oasis de la vallée de la Saoura.

Les eaux souterraines forment un milieu encore mal connu, mais unique. A la frontière entre sous-sol et surface, les sources, puits, forages ont de tout temps exercé un vif attrait sur l'esprit humain. Ces eaux font partie de notre patrimoine et doivent être préservées. L'importance économique et environnementale des eaux souterraines fait de leur préservation un facteur de développement durable.

Quoique, dans le Sahara algérien, cette ressource est soumise à une répartition spatiale et saisonnière très déséquilibrée : saison sèche estivale longue et très forte variabilités des précipitations selon les années, se combinant à une demande en eau très forte, aussi bien pour l'agriculture, que pour les populations concertées, depuis toujours sur les oasis et quelques villes bien connues.

La Saoura désigne une remarquable entité bien connue dans le Sahara, au sud-ouest de l'Algérie. Son oued, véritable émissaire de 250 km de longueur, reçoit les crues de deux oueds présahariens, le Guir et la Zousfana, qui finissent dans l'immensité de la Sebkh el Melah, près de Kerzaz et exceptionnellement dans la dépression de Touat par le biais de l'Oued Messaoud. Cette vallée est ornée de chapelets oasiens, qui par ses aspects verdoyants contrastent avec les dunes spectaculaires du grand erg occidental à l'Est et le plateau rocailleux monotone de la Hamada de Guir, à l'Ouest.

Les études hydrogéologiques antérieures réalisées admettent que les connaissances sont très fragmentaires, sur les systèmes aquifères : Mio-Pliocène, paléozoïque et Quaternaire, sur la géométrie, les champs de potentiels hydrauliques, les paramètres physiques et hydrodynamiques, les conditions aux limites hydrogéologiques et enfin les éventuelles interactions entre les différents horizons aquifères. Les eaux souterraines au sein de cette entité ont suscité très tôt l'intérêt de nombreux auteurs, tel que : Schoeler 1942, Cornet 1964, Conrad 1964, Roche 1973, ANRH 1995, dont les travaux montrent un caractère régional, permettant l'acquisition des grands traits de caractérisation des eaux souterraines. En outre, des travaux récents ont été relâchés par Mabrouk et Mansour 2007.

Parmi les grands châteaux d'eau du Sahara Algérien, nous avons l'acquière du Grand Erg Occidental, attribué au Mio-Plio-Quaternaire. La nappe phréatique ne se localise pas uniquement sous les dunes de sables du Grand Erg Occidental, elle ne représente là qu'une partie d'un vaste système aquifères (A. Cornet, 1931).

L'étude de la recharge, paléorecharge et la décharge des nappes souterraine au Sahara occidentale s'inscrit dans une problématique scientifique qui n'a, à ce jour, pas encore été abordée dans son intégralité sur le domaine du Sahara occidentale.

En effet, ces eaux sont agencées en un système, se composant de la nappe phréatique du Grand Erg Occidental, la nappe de la hamada de Guir, les nappes paléozoïques et la nappes des terrasses et inféoflux de la Saoura (Merzougui, 2011). Ces nappes sont d'importance variable dont celle du grand Erg occidental est la plus ample. Elle montre un écoulement secondaire vers la vallée de la Saoura, où jaillissent de nombreuses sources, qui sont vraisemblablement l'origine des premières installations humaines. Aujourd'hui, ces ressources constituent un facteur limitant de tout développement, et elles sont l'origine de conflits d'aménagement et d'usages.

L'évolution démographique et socio-économique au sein des oasis de la Saoura, notamment dans l'oasis de Béni Abbès, engendre des besoins en eau grandissant. Au regard de cette pression croissante sur les eaux souterraines, il est primordial d'accroître nos connaissances de l'hydrogéologie locales et des potentiels d'exploitation pour une gestion durable. En effet certaines nappes sont soumises à une exploitation intensive, et d'autres connaissent une dégradation de leur qualité avec les rejets d'eau usées et la salinisation des sols irrigués.

Actuellement, le degré de connaissance des formations du sous-sol et de sub-surface dans l'oasis de Béni Abbès, est insuffisant pour caractériser la géométrie des structures des aquifères et les drains naturels régissant les écoulements souterrains, c'est ainsi que la caractérisation hydrogéologique s'impose donc comme une démarche essentielle pour atteindre une gestion rationnelle de la ressource en eau.

La problématique abordée dans le cadre de cette thèse se limite à l'espace de la région de Béni-Abbès, et se résume donc en quatre points.

Le premier aspect porte sur la question de la géométrie et la structure de l'aquifère Mio-Plio-Quaternaire du grand erg occidental et celui alluvial de la Saoura et leurs vulnérabilités.

Le second aspect est d'ordre hydrodynamique (décharge). Le troisième point se borne sur les caractéristiques et les indices de pollution. Le dernier point, porte sur l'utilisation du SIG comme un outil pour faciliter la prise de décision.

Les objectifs de cette thèse visent :

- à appréhender les caractéristiques géologiques, géophysique, et géochimique du système hydrogéologique de l'oasis de Béni Abbès.
- à atteindre une meilleure compréhension du fonctionnement hydrogéologique de ce système aquifère, afin d'optimiser, de sécuriser et de pérenniser son exploitation en égard à son importance stratégique pour l'alimentation en eau de cette Oasis
- à estimer et quantifier la décharge du grand château d'eau du grand erg occidental à cette localité.
- à élaborer un SIG, comme résultat pratique et comme outil d'aide à la décision.
- Proposer un modèle de gestion intégrée des ressources en eau souterraines, qui devient une nécessité pour la préservation de la ressource en eau.

Méthodologie de la recherche

Approches

Afin d'échafauder les éléments de réponse aux préoccupations suscitées, nous avons opté pour cinq (05) approches complémentaires : géologique, géophysique, hydrogéologique, hydrochimique et SIG.

- L'approche géologique se base sur des itinéraires de reconnaissance.

En effet, nombreux sont les missions de terrain qui ont porté sur la frange occidentale de l'erg occidental, entre Igli-El Ouata, et la vallée de la Saoura proprement dite (campagnes, 2014, 2015, 2016, 2017). Cette étape était au préalable anticipée par des observations et des interprétations des scènes "LandSat"

- L'approche géophysique :

Des campagnes géophysiques ont été mises en œuvre en collaboration avec l'ANRH, l'auscultation des terrains par les sondages électriques verticaux a été appliquée. Elle consiste en une application des dispositifs de Wenner et Schlumberger.

Les méthodes proposées dans ce travail sont l'analyse et les interprétations des sondages éclectiques verticaux afin d'obtenir une synthèse de l'ensemble des données de résistivités apparentes permettant d'avoir une vision globale des caractéristiques électriques moyennes des formations constituant le soubassement des dunes de sables et de l'erg.

- L'approche hydrogéologique, par l'analyse de la géométrie des aquifères, des cartes piézométriques et des coupes géologiques et hydrogéologiques. Nous essayons de déterminer les relations entre les différentes nappes ainsi que le mécanisme de fonctionnement du système aquifère de la vallée de la Saoura.

L'approche hydrochimique, consiste à un suivi spatio-temporel durant plusieurs périodes, des principaux paramètres d'évaluation de la qualité des eaux : Température, pH, salinité et les éléments majeurs et l'exploitation des données existantes, par l'utilisation d'outils géochimiques, l'hydrochimie isotopique et statistiques.

- La dernière approche, c'est l'utilisation et l'application d'un système d'information géographique, afin de reproduire des cartes thématiques ; hydrogéologiques et hydro chimiques, l'évaluation et la cartographie de la vulnérabilité et des risques de pollution des eaux souterraines par plusieurs méthodes, qui va nous permettre de prendre des décisions pour la préservation et une gestion raisonnée de la ressource en eau souterraine de la région de Béni -Abbès.

Pour pouvoir suivre toutes ces approches, nous avons réalisé, une série de campagne de terrain au cours des périodes 2014-2016 : inventaire des points d'eaux, des campagnes piézométriques, prélèvement d'échantillons d'eaux pour analyse, des essais de pompage et des mesures de débit septième chapitre d'eau des sources et foggaras, des sondages géophysiques électriques complémentaires et enquête auprès des usagers.

Structure du mémoire

Ce mémoire de thèse est structuré en sept chapitres :

Le premier chapitre est réservé à une synthèse bibliographique sur l'état des connaissances scientifiques qui décrivent le cadre général de la zone d'étude, sous différents aspects Physique, climatique et hydrologique.

Le deuxième chapitre sera consacré à la géologie et l'interprétation des campagnes, nous déterminons également la géométrie des formations du système aquifère.

Le troisième chapitre est réservé à l'étude géophysique par prospection électrique qui va nous permettre de visualiser l'anatomie du système aquifère de la région.

Le quatrième chapitre est consacré à une synthèse des données hydrogéologiques (géométrie du réservoir, exploitation, alimentation, écoulement, piézométrie) des trois nappes objet de ce travail.

Dans le cinquième chapitre sont présentées les différentes méthodes d'analyses des eaux et les outils hydrogéochimiques et statistiques utilisés pour l'interprétation des résultats, du suivi spatio-temporel des paramètres d'évaluation de la qualité des eaux.

Le sixième chapitre est réservé à l'hydrochimie isotopique, l'exploitation et réinterprétation des résultats des analyses isotopiques antérieures.

Le septième chapitre est réservée à l'application d'un SIG et l'évaluation de la vulnérabilité du système aquifère sur le territoire de la région de Béni -Abbès par la plusieurs méthodes d'évaluation de la vulnérabilité à la pollution.

Dans la Conclusion Générale, nous présentons une synthèse des principaux résultats de l'étude structurale, hydrogéologique, géochimique des eaux et la vulnérabilité du système aquifère de Béni-Abbès.

Chapitre 01

GENERALITES

CADRE GEOGRAPHIQUE, CLIMATOLOGIE ET HYDROLOGIE

1. Introduction

Allongée en forme de couloir orienté NW-SE, la vallée de la Saoura fait partie du Sahara Nord Occidental algérien, une des régions caractérisées par l'aridité de son climat et où les ressources en eau souterraine constituent le principal facteur de vie et de développement social des palmeraies.

Ce chapitre consiste en une mise au point sur le cadre géographique, climatique ainsi que sur l'hydrologie, un aperçu sur l'état de l'art et l'historique de la palmeraie et la grande source de Béni Abbès.

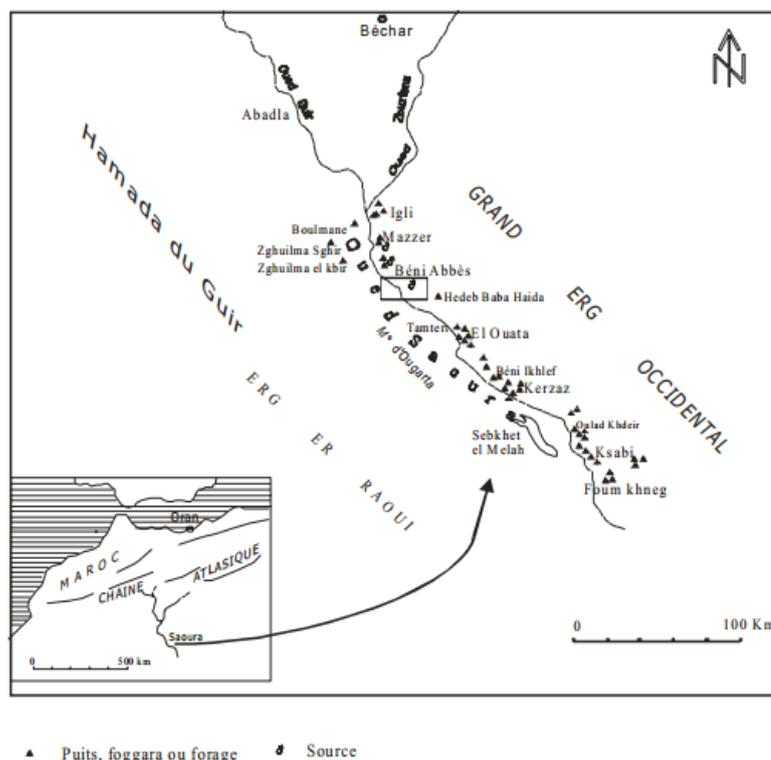


Figure 1.1 : Localisation de la vallée de la Saoura

2. Situation géographique

La vallée de la Saoura représente le principal cours d'eau du Sahara Nord Occidental de l'Algérie. Résultant de la jonction des oueds Guir et Zoufana. Elle est bordée à l'Est par le Grand Erg occidental, à l'ouest par la Hamada du Guir et la Petite Hamada. Au niveau de la basse Saoura, elle jouxte les monts de l'Ougarta (Fig. 1.1) (Alimen, 1957).

La région d'étude « Béni Abbès » fait partie de la wilaya de Bechar, elle se situerait approximativement entre 02°05' et 02°10' de longitude West et 30°10' et 30°05' de latitude Nord Elle est située à environ 240 km au Sud-ouest de Bechar et à 880 Km au Sud-ouest d'Alger (Fig.1.2.). Elle s'étend sur la rive gauche de la vallée de la Saoura, de 6 km de longueur et 5 km de largeur en moyenne, couvrant une superficie de 30 km², avec une population de 2000 en 1975 à 13000 habitants en 2016.

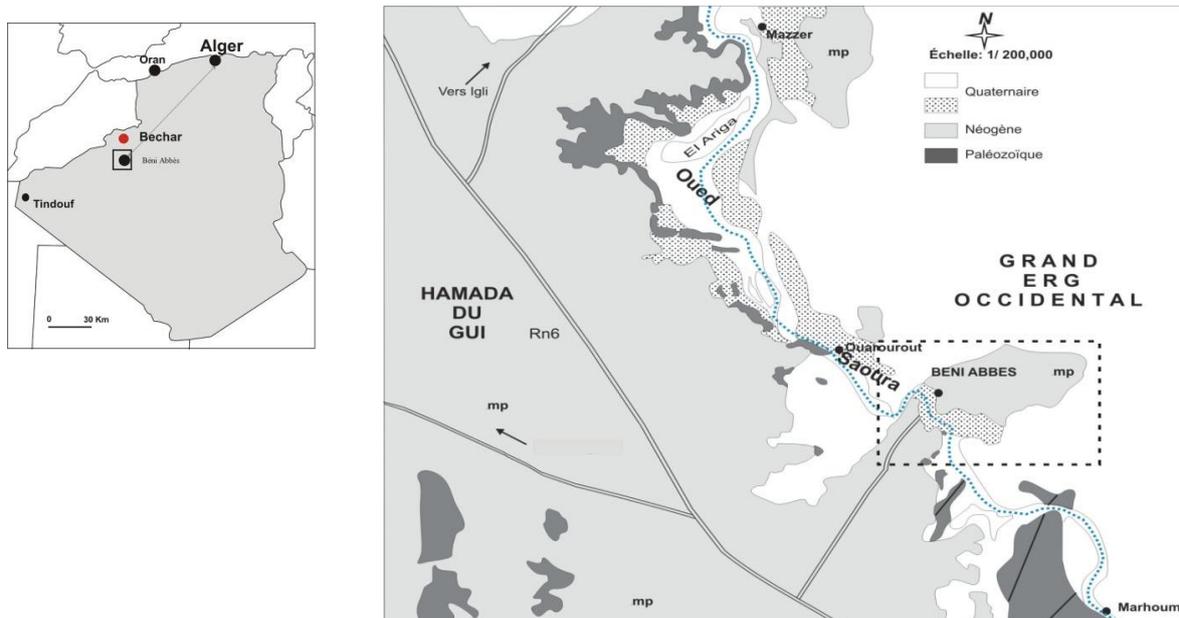


Figure 1.2: Situation de la région d'étude

3. Conditions climatiques

L'oasis de Béni Abbès est soumise à un climat hyperaride, caractérisée par une faible pluviosité et une sécheresse excessive. Avec un ciel clair, quasiment sans nébulosité, la région de la Saoura est avant tout "le pays du soleil", elle reçoit de 50 à 100 mm de pluie par an (Mekkidiche, 1998) Les vents desséchants érodent les roches jusqu'à les réduire en sable. Leurs effets se conjuguent avec ceux d'une insolation forte pour accroître l'intensité de l'évaporation.

Pour traiter le volet climatique, nous avons utilisé seulement les données de la station de Béni Abbès.

3.1. Les températures

La température de l'air est l'un des effets les plus importants de la radiation solaire, elle intervient dans un grand nombre de phénomènes.

La figure 1.3 ci-dessous présente la répartition des températures, moyenne minimale ($T^{\circ}\text{C min}$), moyenne ($T^{\circ}\text{C moy}$), ainsi que la moyenne maximale ($T^{\circ}\text{C max}$) pour deux périodes d'observation ; (1926-1950) (1961-2016) .

On remarque pour les minima que le minimum des températures est relevé au mois de janvier pour les deux périodes (3.5 et 4.6 $^{\circ}\text{C}$) tandis que le maximum apparaît au mois de juillet (27.3 et 27.6 $^{\circ}\text{C}$).

Pour les valeurs minima des températures, le minimum apparaît en Janvier (18.5 et 17.6) pour les deux périodes, le maximum en juillet (42 et 41.9 $^{\circ}\text{C}$).

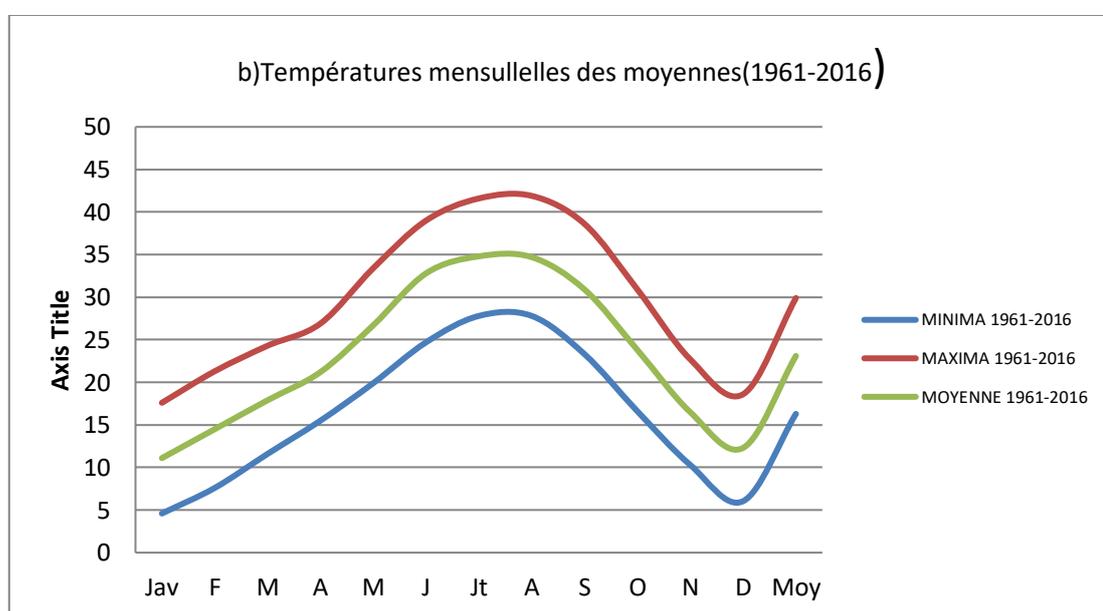
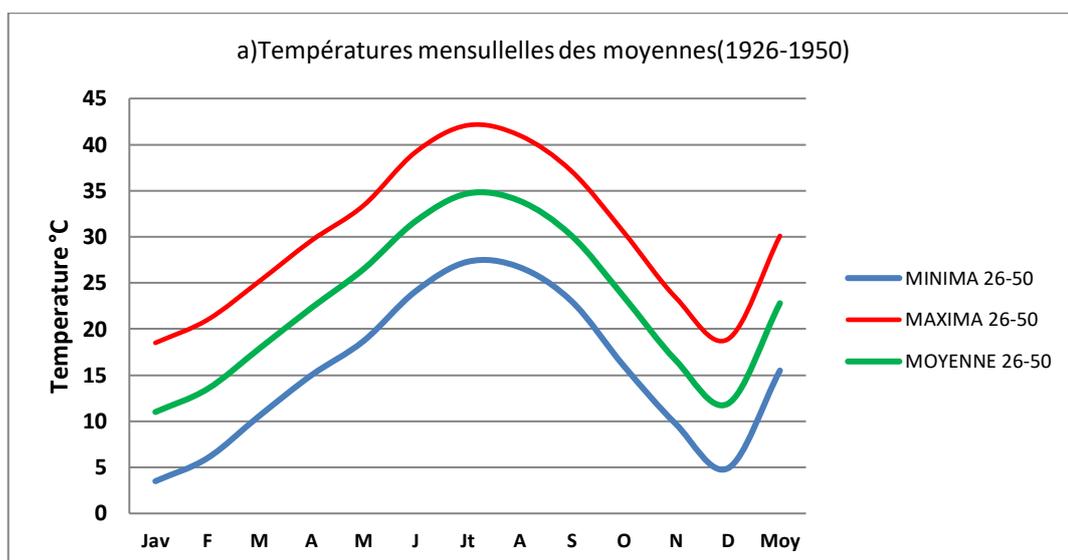


Figure 1.3 : Variations moyennes périodiques des températures (maximal, moyenne et minimal) (1926-1950) (1961-2016).

Les températures moyennes mensuelles (°C) relevées dans la station de Béni-Abbès durant deux périodes respectives (Dubief,1960) 1926-1950, (1961-2016) (ANRH) sont données dans le tableau 1.1.

Tableau 1.1: Répartition mensuelle des moyennes (°C) de la station de Béni- Abbès Périodes :(1926- 1950), (1961 -1990) et (1973-2016)

Mois	J	F	M	A	M	J	Jt	A	S	O	N	D	Moy
1926-1950	11	13.5	17.9	22.3	26.5	31.7	34.7	33.9	30.1	23.5	16.6	11.9	22.8
1961-2016	11.1	14.5	17.9	21.2	26.7	32.8	34.8	34.7	30.9	23.8	16.5	12.3	23.1
Ecart T°C	0.1	1	0	-1.1	0.2	1.1	0.1	0.8	0.8	0.3	-0.1	0.4	+ 0.3

Nous ne remarquons pas un changement notable de la température moyenne annuelle entre les trois périodes. Mensuellement, le mois le plus chaud reste Juillet et le plus froid Janvier.

L'analyse des données de la température moyenne mensuelle montre que le mois le plus chaud est le mois de juillet avec une température moyenne mensuelle de 34.7 °C et les mois les plus froids sont décembre et janvier avec une température moyenne mensuelle de 11°C. L'analyse des températures moyennes périodiques (Fig.1.4) montre que la dernière période récente (1961-2016) est plus chaude que la précédente.

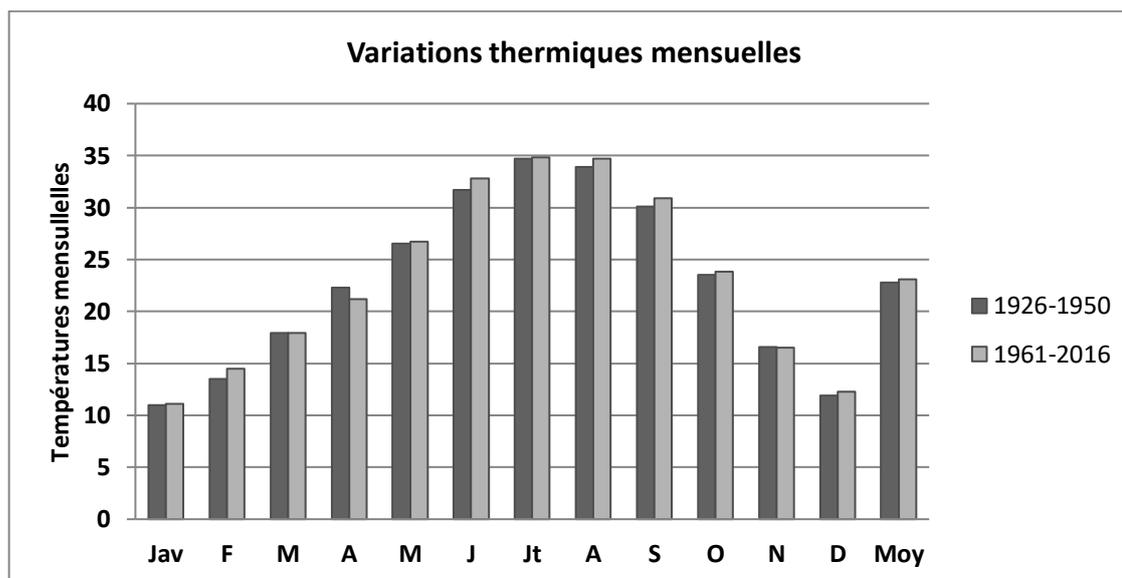


Figure 1.4 : Variations moyennes périodiques des températures (maximal, moyenne et minimal) (1926-1950) (1961-1990) (1973-2016).

L'analyse de l'histogramme des températures moyennes périodiques (Figure 1.3) montre que la dernière période est plus chaude que les précédentes.

Le calcul des écarts de température entre les deux périodes nous a permis de noter une augmentation de la température moyenne entre la période ancienne (1926-1950) et la période récente (1961-2016) d'environ 0.3°C. Ces températures élevées expliquent le déficit quasi-permanent de saturation de l'air. Il semble cependant que l'on puisse admettre un réchauffement significatif du climat à la station de Béni-Abbés.

L'étude statique des températures moyennes pour les deux séries en utilisant la méthode de Fischer pour tester l'homogénéité au deux échantillons, on peut conclure que les deux séries (échantillons) proviennent vraisemblablement de la même population dont la moyenne commune est de 29.95 C°.

De même la méthode de Fischer-Snédecor pour l'étude des écarts types, a confirmé que les deux séries (échantillons) proviennent vraisemblablement de la même population.

3.2. La pluviométrie

La faiblesse de la pluviosité est le caractère fondamental des régions sahariennes, et les pluies sont généralement produites par les dépressions sahariennes. Ces types de dépressions ne peuvent donner de la

pluie que si des masses d'air humide provenant des régions atlantiques ou méditerranéennes leur sont associées. Il ressort d'une façon générale que la pluviométrie décroît du Nord au Sud, elle suit dans l'ensemble les altitudes du bassin de la Saoura de 20 à 30 mm (Dubief, 1953). Effectivement, la région de Béni Abbès se trouve dans un intervalle de faible pluviométrie (entre 30 mm et 40 mm/an) (ANRH, 1995)

3.2.1. Précipitations mensuelles

En réalité, le régime pluviométrique est très irrégulier, la quantité annuelle tombe souvent en une seule fois, causant des crues et beaucoup de dégâts. Les mesures enregistrées durant l'ancienne période (1926-1950) et celle plus récente (1973-2018), sont présentées sur la figure ci-dessous.

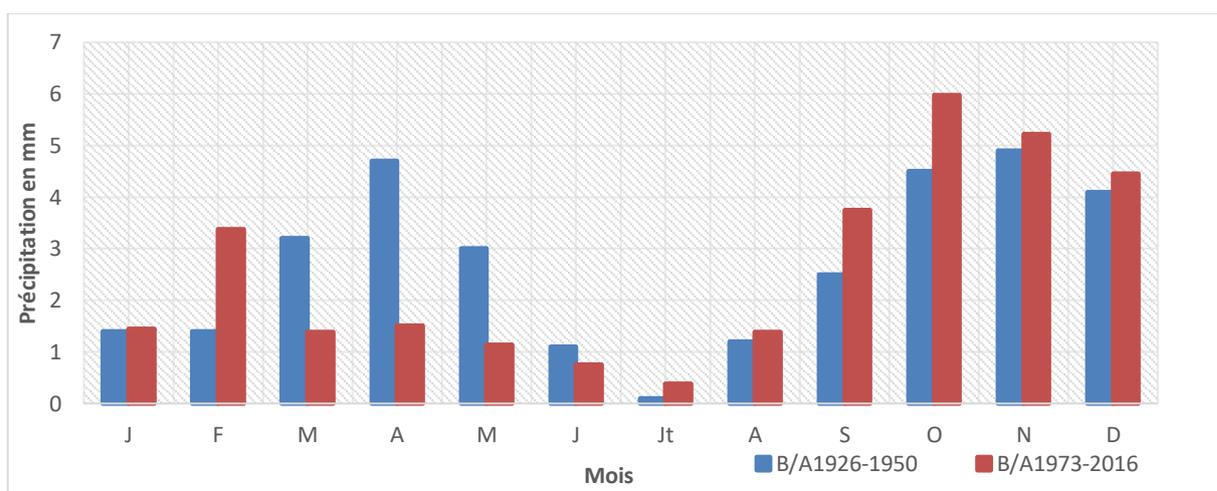


Figure 1.5: Répartition mensuelle des précipitations (mm) de la station de Béni Abbès (1926-1950) et (1973-2018)

Tableau 1.2: Répartition mensuelle des précipitations (mm) de la station de Béni Abbès (1926-1950) et (1973-2018)

	J	F	M	A	M	J	Jt	A	S	O	N	D	ANN
B/A1926-1950	1,4	1,4	3,2	4,7	3	1,1	0,1	1,2	2,5	4,5	4,9	4,1	32,1
B/A1973-2018	2.2	2.4	4.6	1.8	2	0.3	0.2	0.5	3.8	7.1	6.4	6.2	37.5

Pour les deux séries, On remarque une période relativement pluvieuse entre septembre et décembre, toutefois pour notre série (1926- 1950), les mois de Mars et Avril constituent aussi des mois relativement pluvieux (Fig.1.4). Au mois de Juillet, la pluviométrie est généralement nulle. La moyenne des précipitations annuelles pour la période (1973-2018) est de 38 mm.

3.2.2. Précipitations saisonnières

Le cumul par saison, nous permet de constater que la saison d'automne est la plus pluvieuse, avec 13.95 mm. En été, la pluviométrie est très faible (Tab. 1.2) et (Fig. 1.6)

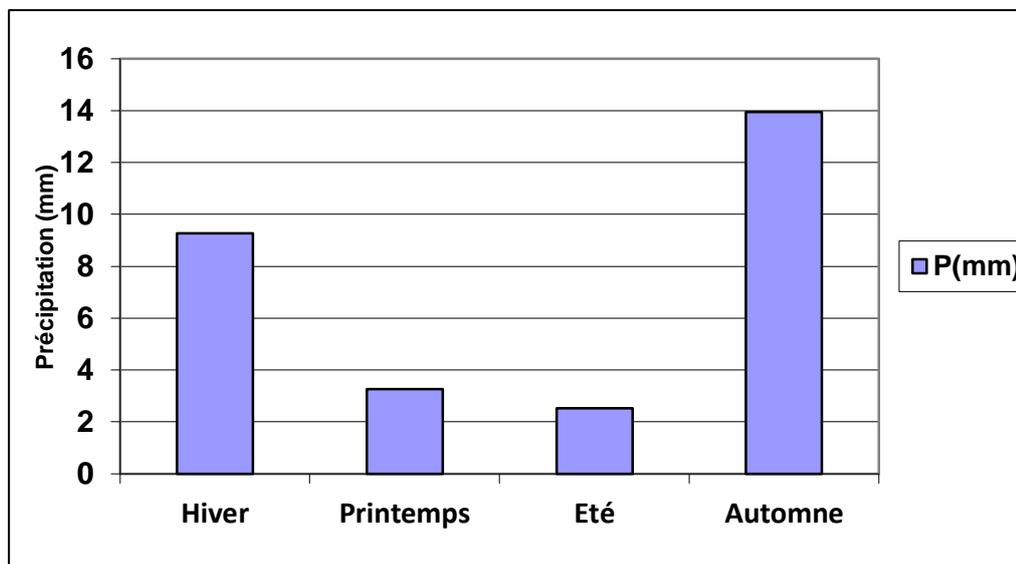


Figure 1.6: Répartition des précipitations saisonnières à la station de Béni Abbès (1973-2018).

Tableau 1.3 : Répartition saisonnière des précipitations (1973-2018).

	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N
	Hiver			Printemps			Eté			Automne		
Précipitation moy.	31,97%			11,26%			8,68%			48,07 %		
(mm)	9,28 mm			3,27 mm			2,52 mm			13,95 mm		

3.2.3. Précipitations annuelles

Pour l'étude des précipitations annuelles nous disposons d'une série relevée sur la période (1904-2018) à la station de Béni -Abbès.

Les variations pluviométriques interannuelles paraissent ainsi plus importantes. Une fluctuation autour de la moyenne interannuelle (37.5 mm) durant la plupart des années sauf les années les plus pluvieuses avec un maximum de 150 mm. La courbe de tendance montrée la baisse chronologique de la pluviométrie (Figure.1.7) comme provoque la fonction de la courbe.

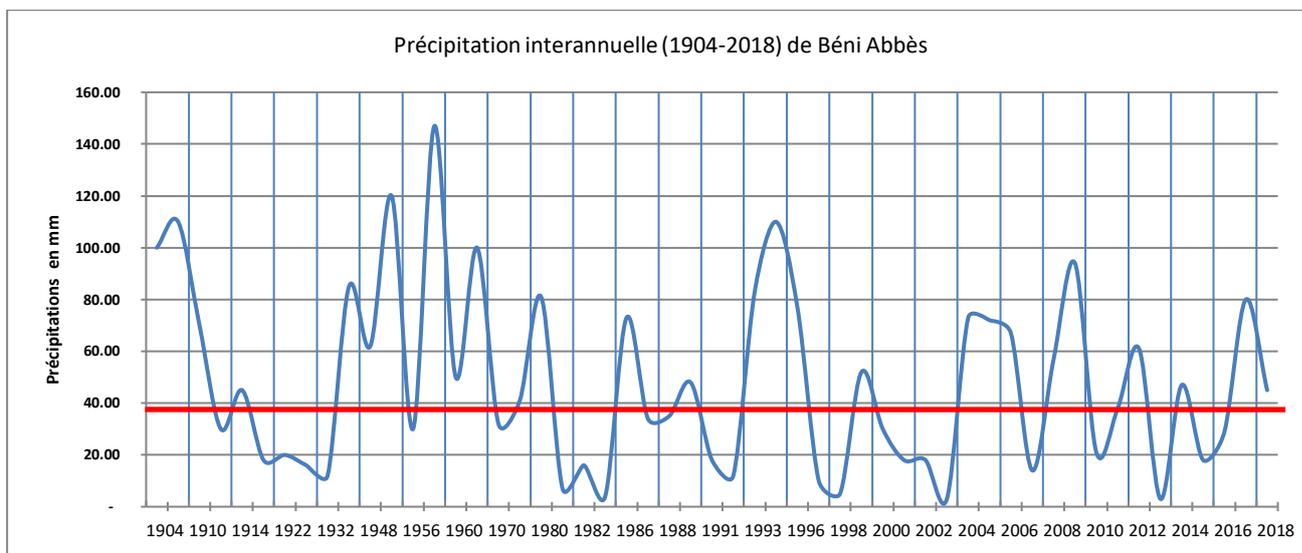


Figure 1.7: Variations interannuelles des précipitations (station Béni- Abbès, 1904-2018).

La répartition interannuelle des précipitations (Fig. 1.7), est très irrégulière. Ces précipitations varient entre une valeur minimale nulle et une maximale de presque 150 mm pour une moyenne de 37.5 mm. Une carte pluviométrique a été élaboré pour le sud-ouest De l'Algérie pour la période (1904-2018) Fig 1.8, monte une augmentation de la pluviométrie du sud vers le Nord.

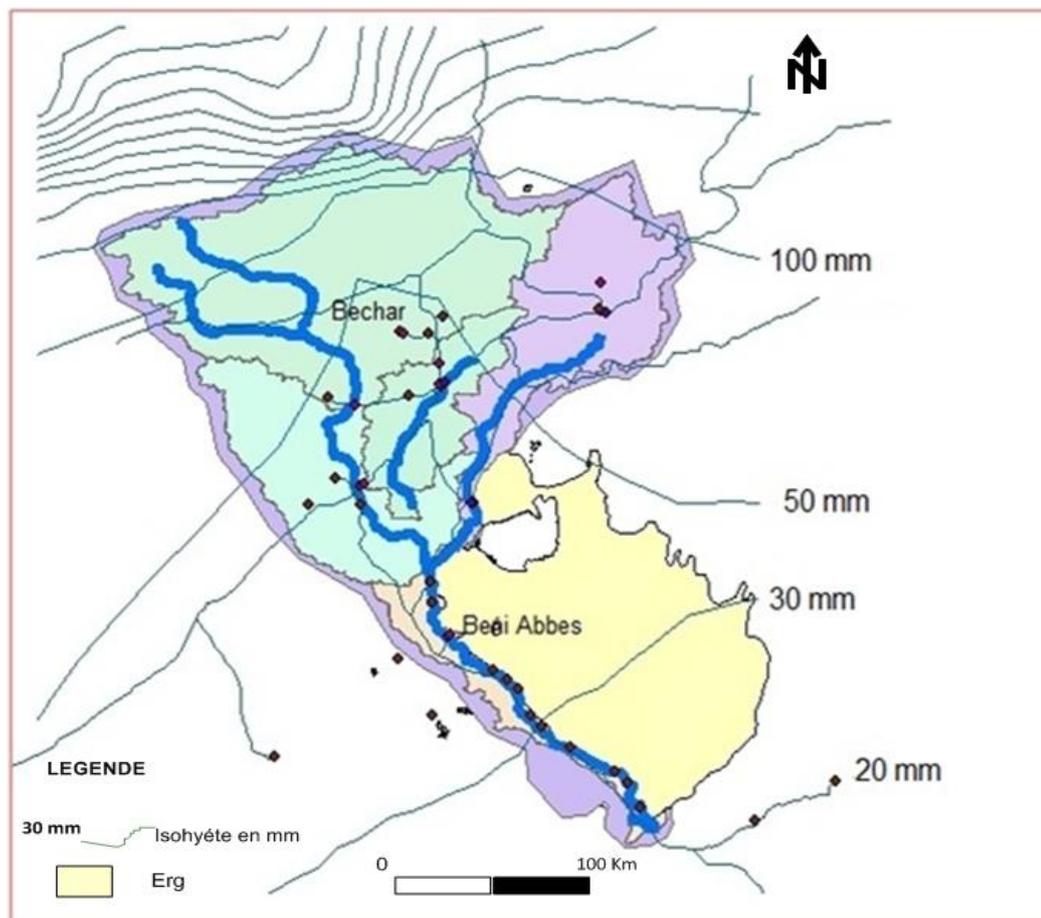


Figure 1.8 : Carte pluviométrique du Sud-ouest algérien période 1904-2018.

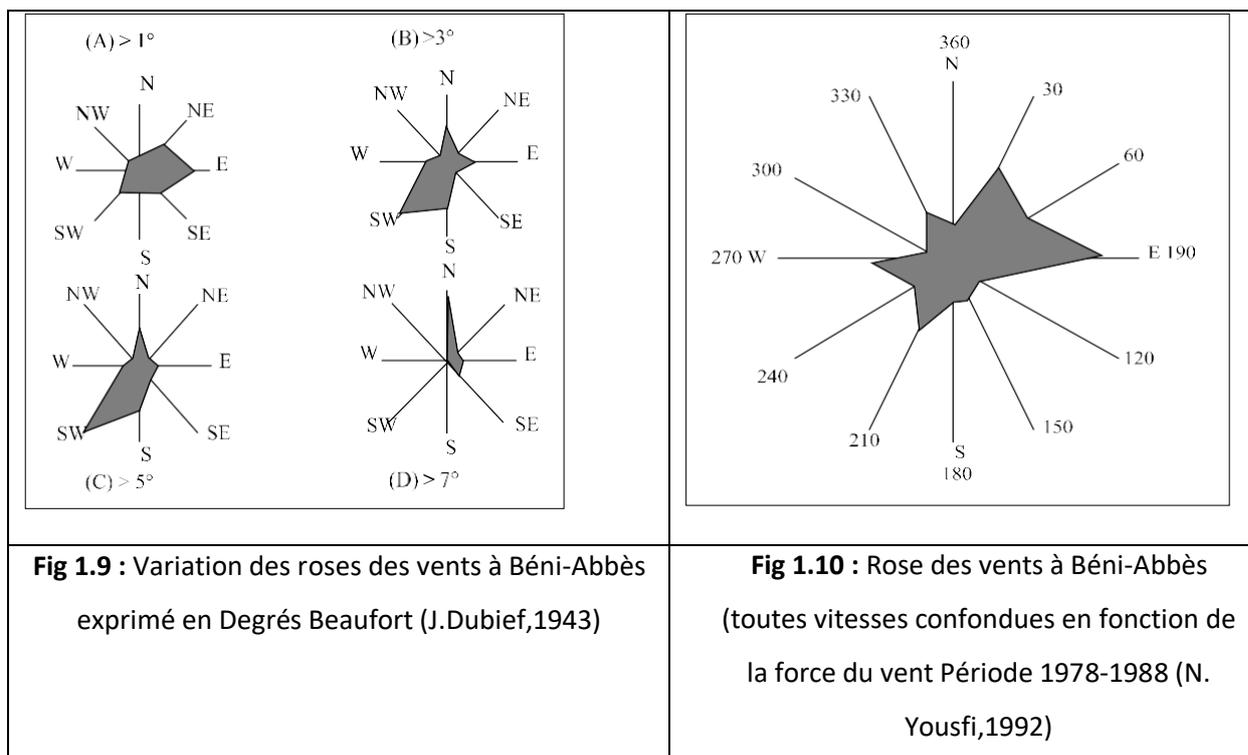
3.3. Le vent

C'est un élément climatique qui permet le déplacement du sable et d'autres particules fines et joue le rôle d'agent d'érosion, de transport et d'accumulation. Ce facteur est susceptible d'influencer les processus d'évaporation et d'évapotranspiration. La fréquence et la direction des vents varient en fonction des saisons; en hiver se sont les vents pluvieux du Nord-Ouest qui dominent et parfois le vent sec froid de direction Nord. En été le sirocco (vent sec et chaud) souffle du Sud et plus fréquemment au mois de Juillet et ramène parfois des pluies orageuses.

Le régime des vents est fortement lié à la circulation atmosphérique. En hiver, les vents soufflent régulièrement sur la partie méridionale des hautes pressions : c'est l'alizé, appelé "Harmattan" au Sud du Sahara, c'est un vent qui souffle du Nord au Nord Est. D'autre part, des "vents étésiens", saisonniers et secs se déplacent en été sur le Sahara, de direction globale Nord-Sud. Ils sont d'origine extra-africaine et ont un parcours méditerranéen ; ils déplacent un air tropical continental issu d'un prolongement européen de l'anticyclone des Açores (G. Conrad, 1969). Ces vents étésiens contiennent la mousson et limitent son action vers le nord (Dubief, 1951).

Dans la région de la Saoura, les vents sont très fréquents et ce, durant toute l'année. Dubief a tracé un ensemble de roses de vents exprimées en Degré Beaufort, à partir de données antérieures à 1952, récoltées dans la région de Béni-Abbès. Il y distingue 4 classes respectivement supérieures à 1°, 3°, 5° et 7° (Fig. 1.9) :

- La rose de vent (A) montre que, pour des vitesses de l'ordre de 1° Beaufort, les vents d'Est et Nord Est prédominent.
- Les roses de vent (B) et (C) montrent que, lorsque les vitesses augmentent, ce sont les vents de direction S W qui deviennent plus importants
- La rose de vent (D) montre que, pour des vents de l'ordre de 7° Beaufort, ce sont plutôt les vents du nord qui prédominent
- Nous disposons par ailleurs d'une série plus courte mais plus récente portant sur la période de 1978 à 1988 à Béni-Abbès (N. Yousfi, 1992). L'examen de la rose des vents tracée à partir de cette série (Fig.1.10.) montre que, globalement, ce sont les vents d'Est qui prédominent, suivis de ceux du Nord Est.



L'examen du tableau 1.5 montre que c'est aux mois de mars, avril, mai et septembre que la fréquence des vents est la plus importante. Ces vents sont intéressants car ils sont susceptibles de transporter du sable sur le terrain mouillé par les pluies tombées pendant la saison froide. Le sable sec pourra ainsi abriter de l'évaporation le sable humidifié.

Tableau 1.4 : Nombre de jours mensuels moyens de vents de sable (Période 1925-1950) (Dubief, 1962)

J	F	M	A	M	J	Jt	A	S	O	N	D	Année
1.5	2.1	3.2	4.6	3.5	2.1	1.1	1.9	2.4	1.3	0.9	0.6	25.2

3.4. Humidité relative

Est le rapport entre la quantité de vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère et la quantité maximale possible (saturante) à la température considérée. Elle s'exprime en % (inférieure ou égale 100%). La station de Béni-Abbes a marqué une des très faibles moyennes annuelles de l'humidité relative de 41,8 en 1938. (C. Rames 1940). La série de données considérées est relative à la période récente de (1970-1996). La répartition de l'humidité est l'inverse de la répartition de la température. La valeur maximale de l'humidité de l'air est obtenue en hiver (Décembre et Janvier) et la valeur minimale en été (Juin-Juillet-Aout) tel que présentée dans la Figure 1.11.

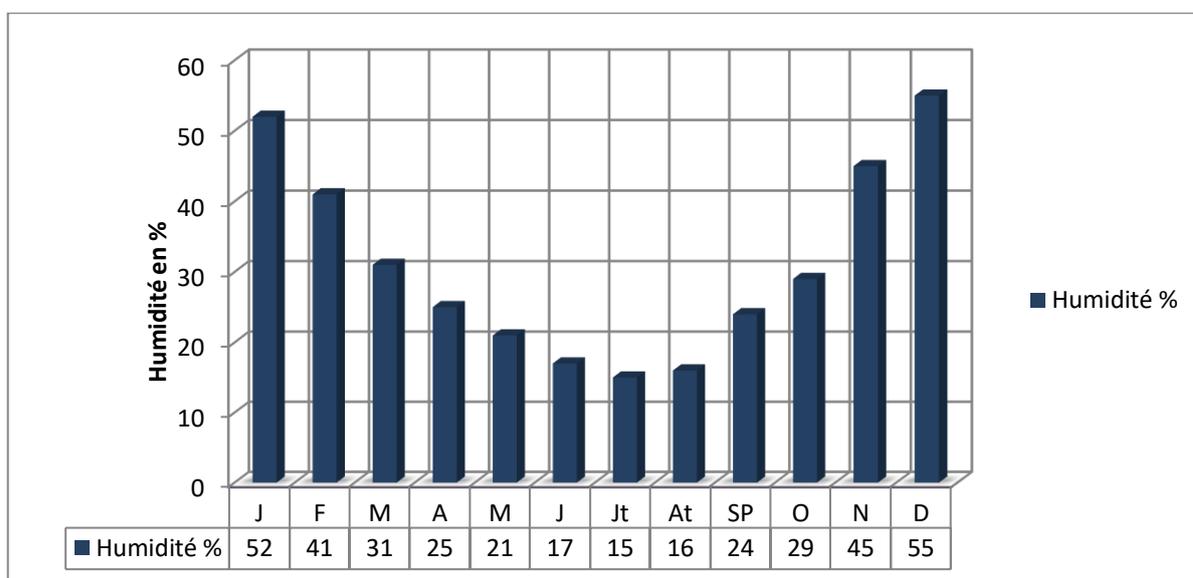


Figure 1.11 : Répartition mensuelle de l’humidité en pourcentage à la station de Béni-Abbès période (1973-2016)

3.5. Evaporation

L'évaporation est un élément climatique important à prendre en considération compte tenu de son rôle biologique (transpiration, respiration) ainsi que son influence sur les précipitations. Elle est exprimée en millimètre d'eau, évaporée et mesurée par un évaporomètre (Piche) à la station de Béni Abbès, on dispose des moyennes mensuelles pour la période récente 1961-2016 et une autre ancien (1926-1956) (Dubief, 1960), (Tab.6)

Au Sahara algérien annuellement l'évaporation est de 2.5 à 5m/an, cette hauteur n'est plus que de 1.5 à 2.3 m/an au Sahara atlantique (Dubief, 1960).

Tableau 1.5: Evaporation moyenne mensuelle en mm station de Béni Abbès.

Période	J	F	M	A	M	J	Jt	A	S	O	N	D	Total
1926-1950	192.2	221.2	313.1	423	524	603	688	617	552	329	192	152	4807
1973-2016	100,09	115,1	158,9	221,6	272,1	307,7	352,2	371,9	310,4	187,4	112,1	83	2592,5

Les données de la station de Béni- Abbès montrent que l'évaporation augmente progressivement pour atteindre le maximum aux mois de Juillet et Août, (371,94 mm) puis diminue jusqu'aux valeurs de 83 à 100 mm, durant les mois de Décembre et Janvier.

3.6. Le déficit d'écoulement ou Evapotranspiration réelle (ETR)

En se basant sur différentes méthodes (Coutagne, Turc, Wundt, Thornthwaite), le calcul du déficit d'écoulement s'avère inefficace, les méthodes sont inapplicables ou inadaptées (MEBROUK, 2007)

C'est un processus double d'évaporation physique de l'eau contenue dans le sol et de transpiration, correspondant à l'utilisation de l'eau atmosphérique et de l'eau du sol par les végétaux et au rejet de vapeur d'eau dans l'atmosphère. Dans les pays arides à semi-arides l'approche des quantités d'eau évapotranspirées est délicate. En effet, l'abaque de P. Verdeil, présente une valeur de 37mm de déficit d'écoulement (Fig.1.12)

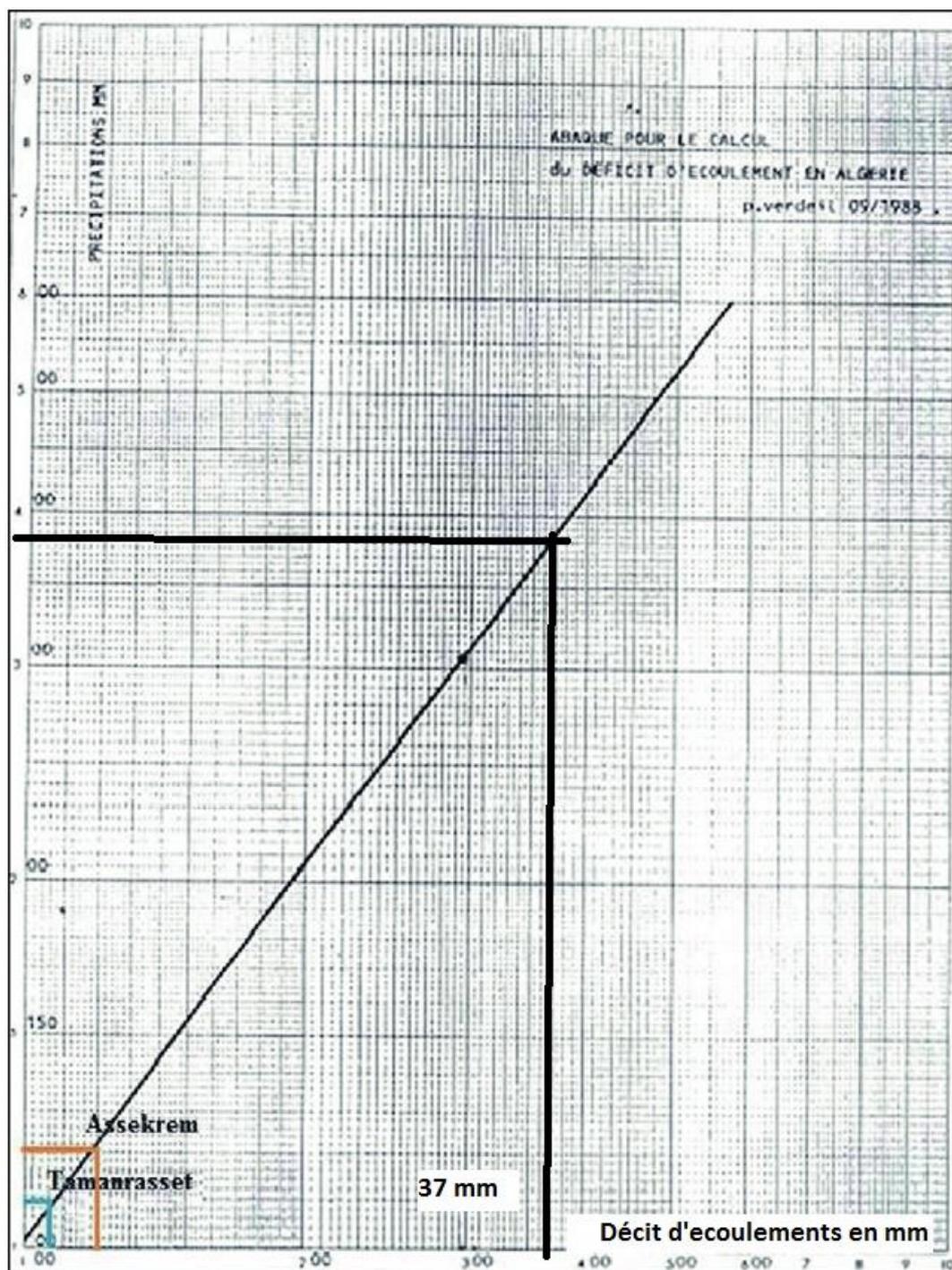


Figure 1.12 : Le déficit d'écoulement d'après l'Abaque de Verdeil à Béni Abbès.

3. Essai de Bilan hydrologique

Le bilan hydrologique est estimé par une formule très simple qui permet d'évaluer le ruissellement et l'infiltration :

$$P = ETR + R + I \pm SW$$

Avec: P : Précipitation moyenne annuelle en mm ; ETR : Evapotranspiration réelle en mm ; I : Infiltration en mm ; SW : Variation de la réserve en mm (cette grandeur est supposée négligeable).

Toutes les précipitations mensuelles pour la station de Béni Abbès étant inférieures à celles des évapotranspirations il nous est alors impossible de déterminer le bilan hydrologique.

3.8. Etude de climat

A l'échelle mensuelle les méthodes des courbes pluviométrique et Ombrothermiques définissant une période déficitaire qui s'étale sur toute l'année (Fig.1.13 C).

L'indice de Martonne ainsi que Moral montrent que la région de Béni-Abbès est soumise à un climat hyperaride, la méthode de L'Emerger et de Stewart qu'il s'agit d'un climat Saharien à hiver tempéré (Fig.1.13.A et Fig.1.13..B).

L'indice de continentalité de Kerner montre que Béni-Abbès est une station éloignée des influences martines.

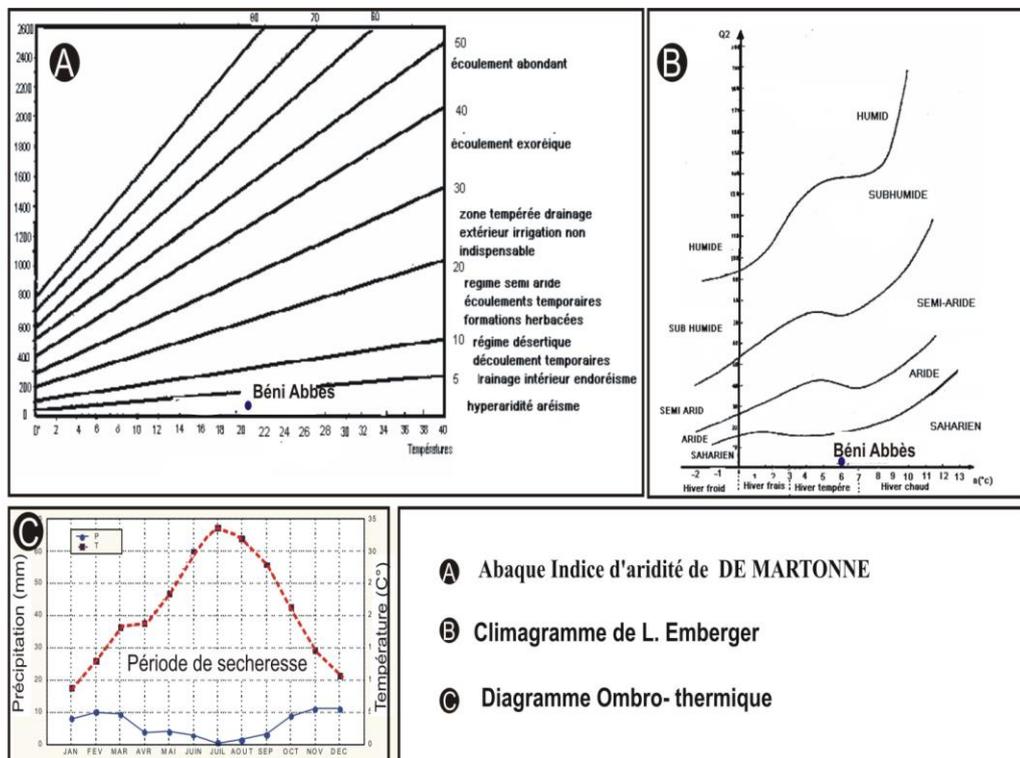


Figure 1.13 : Paramètre de climat à Béni -Abbès

4. Les grands ensembles géomorphologiques

4.1. Monts d'Ougarta

Le vaste territoire étudié par G. Conrad en 1969, s'étend depuis la zone subaride du piedmont atlasique jusqu'au Tanezrouft hyperaride, et il couvre une surface aux paysages variés, d'environ 500.000 km². Les Monts d'Ougarta et le Kahel de Tabelbala, reliefs hercyniens en partie arasés, représentent une unité géographique autonome.

4.1.1. Les Ergs

Le Sahara est considéré comme le fond d'une mer récemment asséchée. Les sables de l'Erg correspondraient à un ensemble d'appareils littoraux.

L'Erg résulterait de la désagrégation d'anciens grés sous un climat hyper aride ; les vents ont permis ensuite leur accumulation dans les dépressions où progressivement ils auraient constitué les systèmes dunaires.

La dernière hypothèse conduit à lier les systèmes dunaires à l'ancien réseau hydrographique. Pendant des milliers d'années, les puissants fleuves de la bordure Atlasique ont érodé leur bassin entraînant d'importantes masses de sable et créant de vastes cônes de déjection. Le climat évoluant vers l'aridité, les cours d'eau se sont asséchés et les vents ont pu entraîner les sables déposés dans les paléo talweg pour édifier les dunes vives constituant l'Erg.

L'énorme accumulation de sable que constitue l'Erg nous amène à nous interroger sur l'origine et le mécanisme de formation des dunes. Plusieurs hypothèses ont été avancées dans une étude réalisée par Glos-Arceuduc (1969) .

L'Erg résulte de la conjugaison des diverses hypothèses et ce serait le résultat d'une évolution polyphasée (Mebrouk, 2007). A la fin du Crétacé et au début du Tertiaire, les sables ont pu se constituer en systèmes dunaires littoraux qui ont été désagrégés sous climat hyper aride. Plus au Nord, les grés Atlasiques connaîtront le même sort. Il semble que le rôle essentiel ait été joué par les oueds, qui durant les pluviaux du Quaternaire, vont trouver un matériel pour alimenter leur débit solide. Lors des phases arides, les vents reprendront les sables ainsi dispersés pour former les systèmes dunaires constituant le grand Erg.

Les dunes massives sont constituées en ergs (Fig.1.14). Le Grand Erg Occidental est la forme d'accumulation sableuse la plus massive et la plus impénétrable (Conrad, 1969) ; les ergs Er-Raoui et Iguidi sont des édifices moins massifs, malgré une tendance encore marquée à la coalescence des cordons dunaires, ils ont une structure intermédiaire entre celle de l'Erg Chech, formé de cordons parallèles, séparés par des couloirs rocheux, et celles du Grand Erg Occidental, où le substratum apparaît rarement (Dubief, 1957).

Vers l'Est de la Saoura, un système magnifique et spectaculaire de dunes de sable appartenant au Grand Erg Occidental circonscrit la ville du côté, se particularise par ses dimensions. En effet, long de 500 km d'Ouest en Est, large de 120 à 200 km au Sud avec une superficie allant de 60.000 km² à 100.000 km².

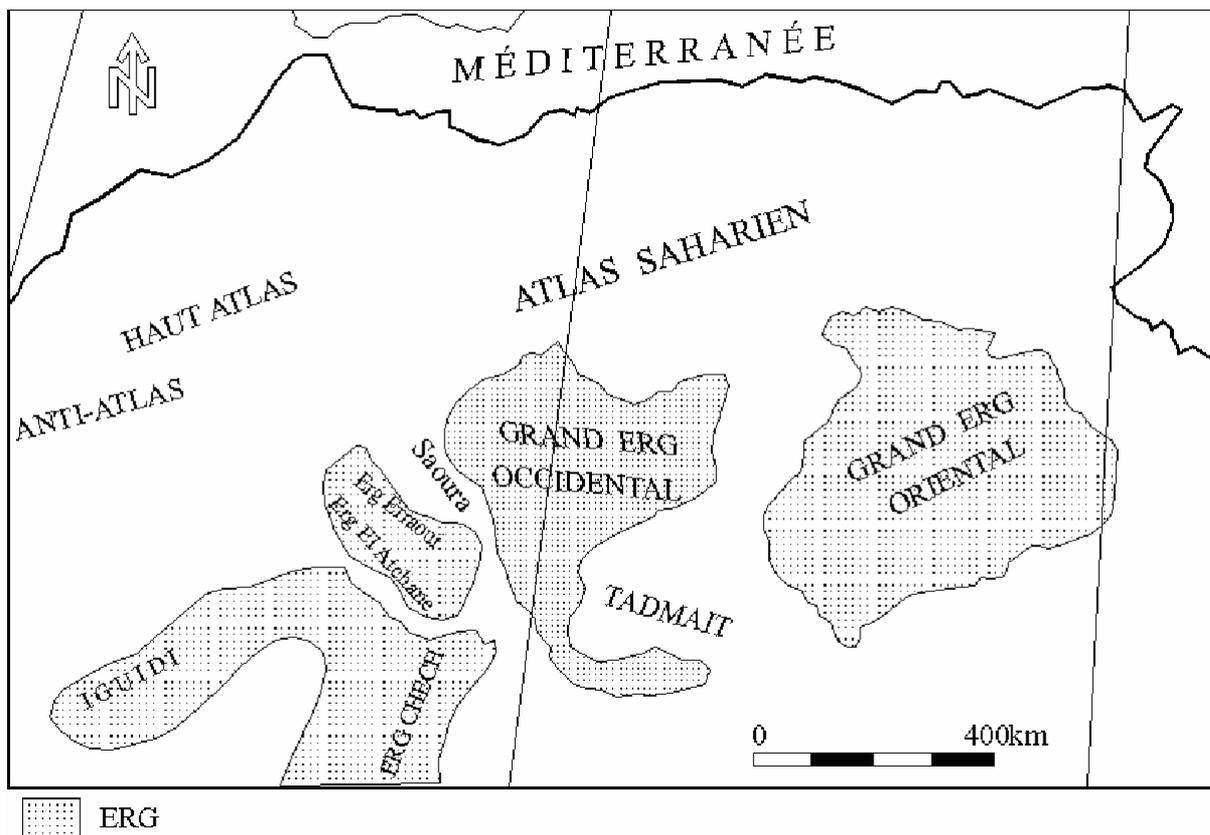


Figure 1.14 : Situation des différents Ergs dans le Sahara algérien (Conrad, 1969)

4.1.2. Les Regs

Les regs sont des surfaces sensiblement horizontales, recouvertes de débris généralement éolisés, à granulométrie variable. Le plus spectaculaire exemple de reg est certainement celui du Tanezrouft qui s'étend depuis le sud de Reggane jusqu'à l'Adrar des Iforas, jouxte l'Ahnet et le Hoggar à l'Est, et se confond avec les sables de l'Erg Chech à l'Ouest. Il existe également un peu partout des regs de dimensions plus modestes, sur les surfaces lithologiques variées à tel point que l'on peut considérer le reg comme le type morphologique le plus fréquent au Sahara ; les regs sont appelés "serirs" au Nord Est du Hoggar et au Nord du Tibesti (Conrad, 1969).

4.1.3. Les Hamadas

A la surface des hamadas tertiaires, calcaréo-gréseuses, du Sahara Nord Occidental, un paysage varié est colonisé par une végétation permanente, essentiellement concentrée dans les Daïas et le long des vallées sèches qui relient des dépressions. Une végétation éphémère, à large répartition, est liée, comme partout au Sahara, à l'existence de précipitations. Au Sud, le plateau du Tidikelt d'âge Crétacé Inférieur, ne présente pas ces caractères à cause de sa nature lithologique argileuse et plus gréseuse différente.

4.1.4. Les vallées et les sebkhas

Bien que rarement parcourues par les crues, les vallées des grands oueds et leurs oueds abritent, sauf dans les territoires très arides, une végétation permanente, due à la persistance d'un inféro-flux, au sein des alluvions. Les Sebkhas, qui jalonnent le réseau hydrographique, sont lieu d'élection d'une végétation qui peut se maintenir grâce à l'existence d'une nappe salée à faible profondeur. Ces grands couloirs de végétation, en particulier celui de la Saoura et le Messaoud ont dû jouer, à toutes les époques du Quaternaire, un rôle essentiel dans les déplacements humains.

4.1.5. Les Daïas

Les Daïas sont des formes karstiques, élaborées sur les plateaux calcaires des hamadas du Sahara septentrional, pendant les périodes pluviales plio-quaternaires. La morphologie des Daïas du Sahara Nord Occidental se révèle assez complexe dont le détail de cette complexité tient à deux séries de facteurs qui n'ont pas de lieu formel, d'une part la nature sédimentaire variée des assises constituant les plateaux calcaires sur lesquels se développent les Daïas, et d'autre part, la durée des actions karstiques qui se sont produites aux différentes époques qui ont cumulé leurs effets, de manière plus ou moins intense selon l'âge des surfaces. Il y a en effet des Daïas anciennes, qui ont évolués dès la fin de la sédimentation néogène, et de jeunes Daïas, établies sur la surface calcaire des petites Hamadas, dont l'histoire est postérieure au Villafranchien Supérieur

4.2. Morphologie de la région d'étude

Du point de vue morphologique, Béni Abbés est formée par quatre grands ensembles naturels qui sont (Fig.1.15) :

4.2.1. Le plateau de la rive gauche

Il fait partie de l'immense Hamada du Guir, d'une altitude de 600m.

4.2.2. Le plateau de la rive droite

D'une altitude de 500 m, sur lequel la ville est bâtie, il est légèrement incliné vers l'Ouest, c'est à dire vers la Saoura.

4.2.3. La vallée de la Saoura

Forme un vaste couloir serpenté entre les deux plateaux, où coule l'Oued de la Saoura. Les bords de cette vallée sont escarpés, avec un fond plat, occupé çà et là par des dunes de sable. La rive gauche de la vallée est occupée par des palmiers structurés en forme de scorpion, et contient au centre le "vieux ksar".

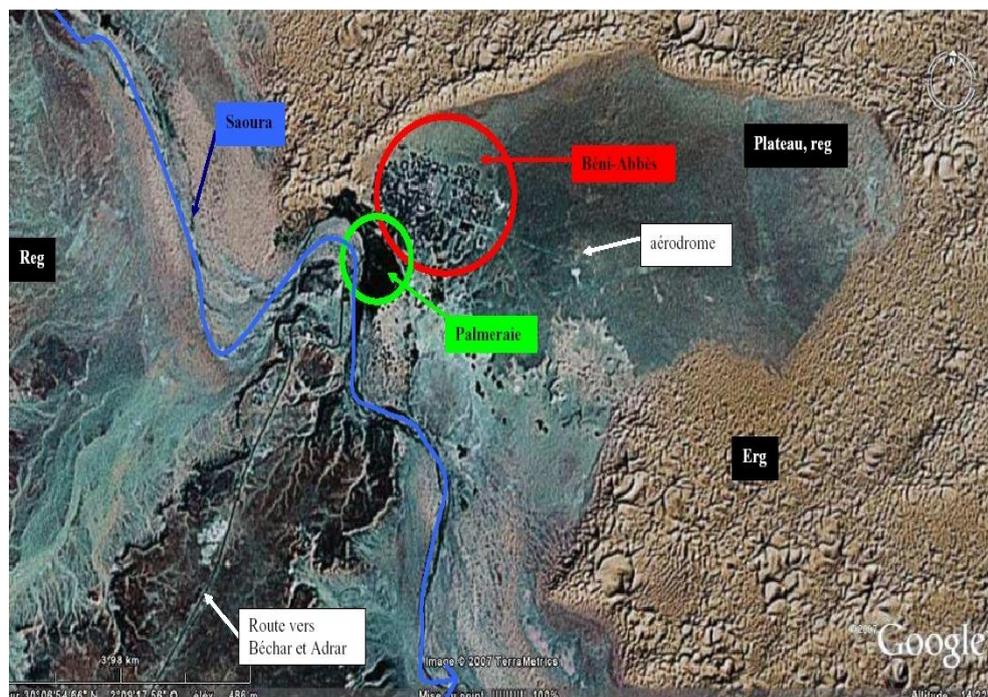


Figure 1.15 : Vue par satellite de Béni Abbés.

5. Hydrographie et hydrologie

L'ensemble des données synthétisées ou réinterprétées dans cette partie a été tiré principalement des travaux de Dubief, Conrad et Roche.

La région étudiée est située dans un secteur où les précipitations sont inférieures à 100 mm (Fig.15). Parallèlement, des pluies largement supérieures à ce volume tombent sur la bordure de l'Atlas, ruissellent et alimentent les crues des grands oueds qui traversent la région.

5.1. Réseau hydrographique et des divers bassins versants du Sahara septentrional

L'hydrographie du Sahara Nord Occidental est caractérisée essentiellement par son endoréisme, le réseau hydrographique se groupe dans plusieurs bassins autonomes : Daoura, Saoura, Namous, Rharbi, Seggeur (Conrad, 1969), portant le même nom que les oueds qui les traversent (Fig.1.16). Selon Gautier (1908) et le Capitaine Augieras (1919), la dégradation progressive du réseau hydrographique s'est produite pendant le Quaternaire moyen et récent, et elle est due probablement à la diminution ou au tarissement des écoulements pendant les périodes arides.

A quelques kilomètres au nord d'Igli, l'Oued Saoura prend son origine à la confluence des Oueds Guir et Zousfana. L'étude des profils de ces Oueds et des crues amène à considérer que le Guir et la Saoura sont les éléments d'un même axe fluvial, tandis que le Zousfana est plutôt un affluent. L'Oued Béchar, par contre, qui est compris entre le bassin du Guir et de la Zousfana est autonome, il se termine en s'ensablant dans les régions de Daïet Tiour à 40 km au Sud-Est d'Abadla et 40 km environ au nord de la confluence Guir-Zousfana (Mebrouk , 2007) .

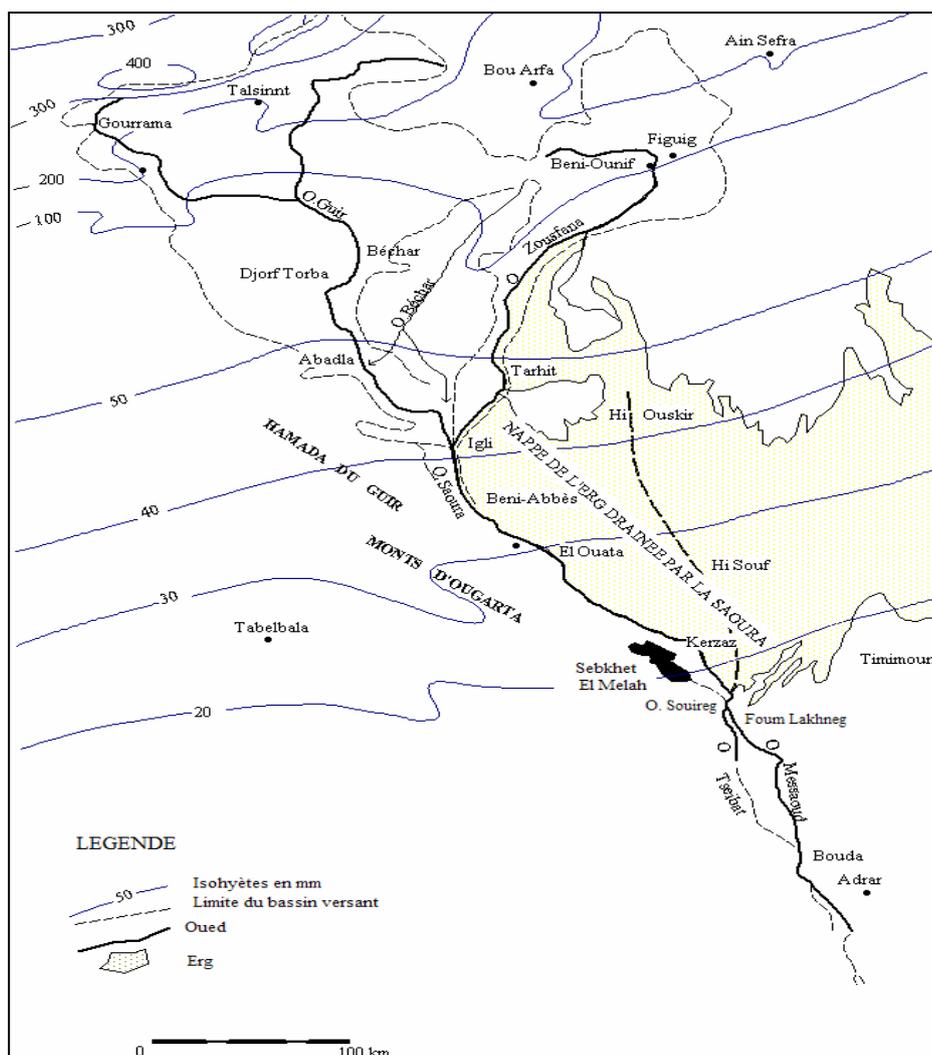


Figure 1.16: Hydrographie et pluviométrie du bassin de la Saoura et de la partie Ouest du Grand Erg Occidental (Dubief, 1953, modifiée)

Dans ce bassin très dégradé, nous avons réuni autour de la Saoura, prise comme artère maîtresse, tous les oueds qui se perdent, actuellement, dans le Grand Erg Occidental. On peut supposer, en effet, avec assez de vraisemblance, qu'ils ont été, jadis, des affluents de gauche de la Saoura ou de son prolongement, le Messaoud. Ce grand bassin a été subdivisé en (Figure 1.16) :

- **un versant méridional de l'Atlas saharien** dont les diverses artères, encore assez vivantes, seront étudiées dans l'ordre suivant : Oued Saoura et son affluent la Zousfana, Oued Béchar, Oued Namous, Oued Rharbi, Oued Seggeur et Oued Zergoun (fig 1.17).
- **un versant occidental du Tademaït** dont il ne sera dit que quelques mots, étant donné la dégradation très poussée de ses artères

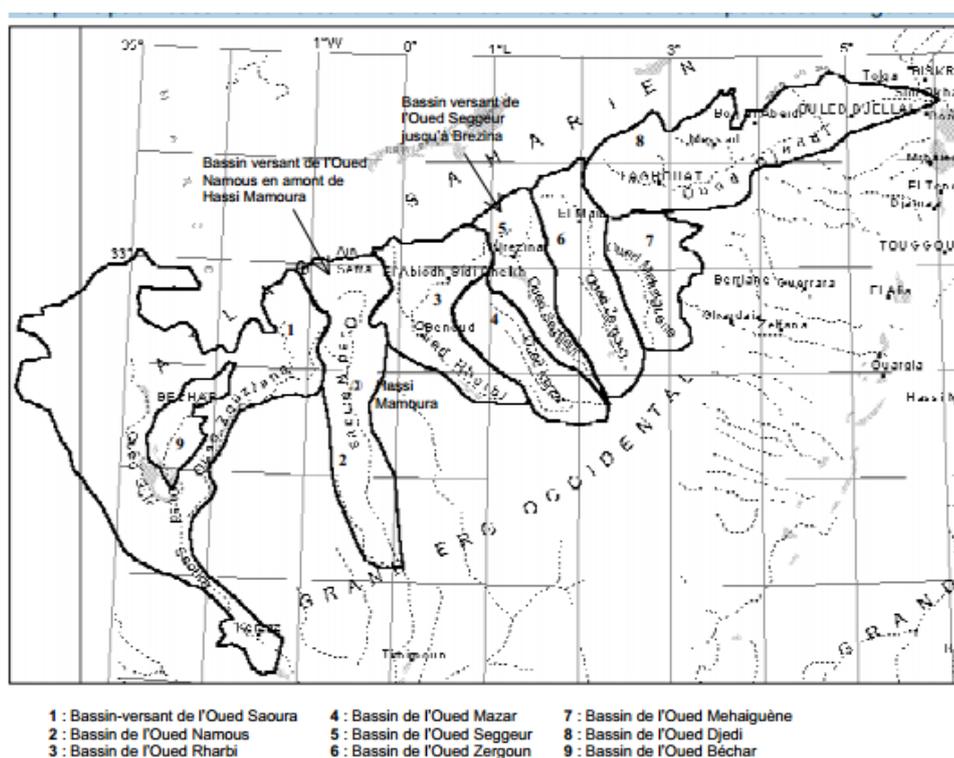


Figure 1.17 : Bassins versant méridional de l'Atlas saharien (Ouled Baba si, 2005)

5.2. Bassin de la Saoura

Le bassin de la Saoura, fait partie du grand bassin versant du Sahara. Il occupe une superficie de l'ordre 100 000Km², situé au Sud-Ouest du territoire algérien (fig.1.18). Il est composé de quatre sous bassins de taille variée. Ils sont drainés par des cours d'eau descendants de l'Atlas Marocain, de l'Atlas saharien et coulent du Nord vers le Sud. Le système hydrographique est composé de deux importants oueds, le Guire et le Zouzfana, alimentant le cours d'eau de la Saoura.

Né à Igli, de la confluence du Guir et de la Zousfana, l'oued Saoura s'enfonce rapidement vers le Sud sur plus de 500 km. Branche maîtresse du système, le Guir prend sa source au niveau du haut Atlas Marocain dans l'Aït Serhouchen, sur les flancs de Djebel Mesrouh à 2642 mètres d'altitude ; il reçoit en rive gauche l'oued Bouânane qui draine le djebel Meschakour (2121 m) et Mezimine (1742 m) puis s'enfonce rapidement vers le Sud où ses eaux seront régularisées au niveau du barrage construit dans les gorges du Djorf Torba à proximité de Kenadza.

L'oued Zousfana prend sa source dans la partie occidentale des monts des Ksour, sur le flanc Ouest du Djebel Amour (1883 m) et le revers méridional du Djebel Rhaïz (2160 m). Il prend à partir de Djenen Ed Dar une direction SSW, bordé par le Grand Erg Occidental sur sa rive gauche. En amont de Taghit, Gautier (1928) a montré que la Zousfana coulait dans un chenal Quaternaire bien individualisé par un système de terrasses.

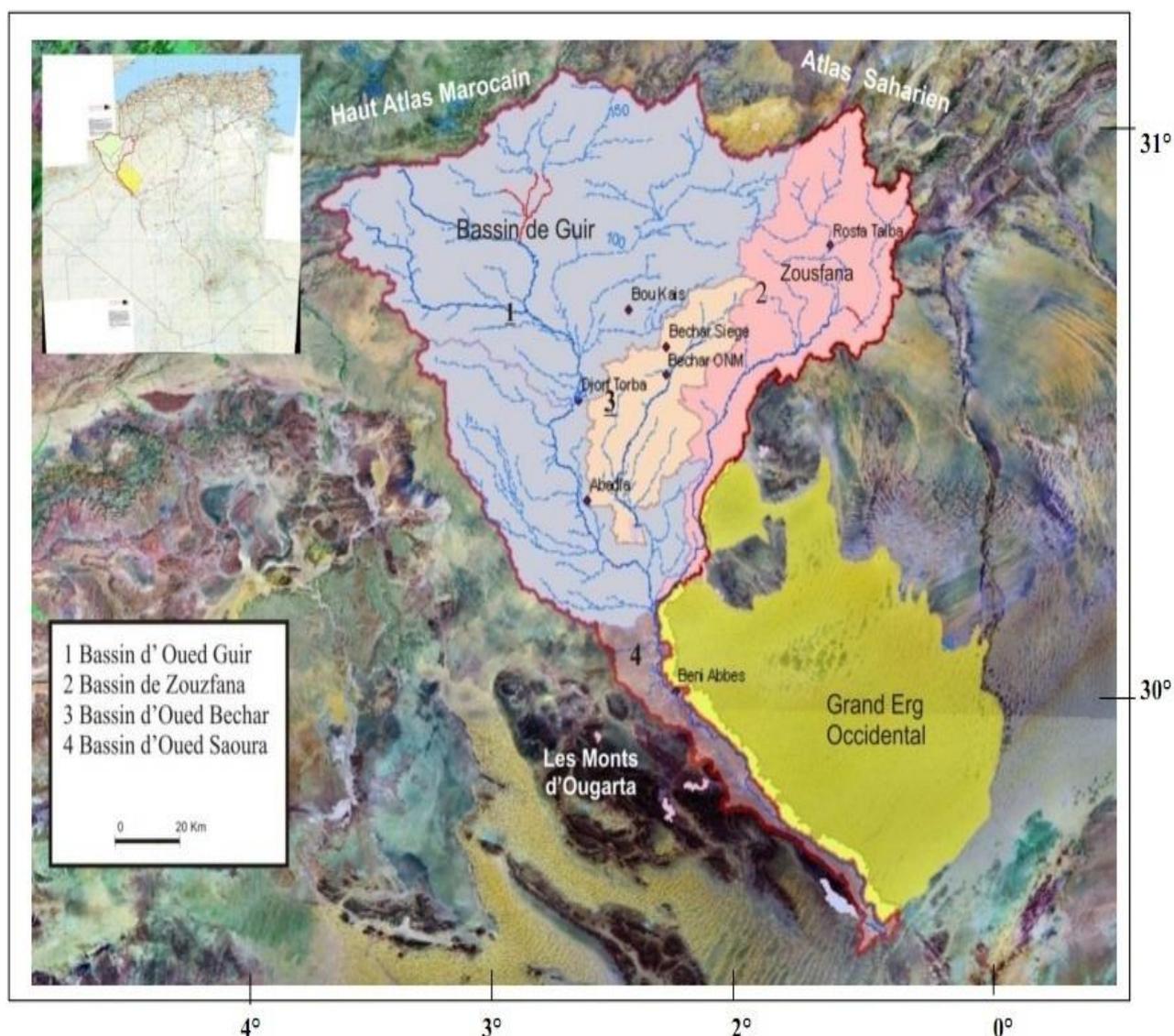


Figure 1.18: Situation du bassin versant de la Saoura.

Passé Igli et jusqu'aux gorges de Foug El Kheneg, le lit de la Saoura se limite à un chenal principal, parcouru sur des distances plus ou moins importantes par les crues venues du Guir ou la Zousfana. Retenons enfin que lors des crues, tout à fait exceptionnelles, la Saoura après avoir fait le plein de la Sebkhet el Maleh, emprunte le parcours de l'oued Messaoud en direction d'Adrar dans la région de Reggane.

Les paramètres morphométriques (Tabl. 1.6) conditionnent l'écoulement des eaux de surfaces dans le bassin de la Saoura.

5.2.1. Oued Saoura

L'oued Saoura débute à Igli au confluent du Guir, Bechar et de la Zousfana, descendus respectivement du Haut Atlas Marocain et de l'Atlas Saharien (fig.1.18). Les crues de l'oued Saoura favorisent la présence et le maintien de la qualité des eaux et des sols. Au niveau de Béni Abbés quelques chaabats rejoignent la Saoura.

Les écoulements provoqués généralement par les précipitations sur le haut bassin, déferlent plus ou moins loin en aval. Passant par la région de Béni Abbés ou le lit de l'oued devenu plus large termine dans une cuvette fermée appelée la Sebkhah el Mellah, par l'intermédiaire de l'oued Es Souireg qui descend vers le Nord-Ouest à la sortie du Fom el Kheneg. En fonction de sa puissance, la crue avance plus ou moins profondément dans la Saoura.

Tableau 1.6: caractéristiques des sous bassins de la Saoura

Bassins Versants	Oued Guir	Oued Bechar	Oued Zouzfana	Oued Saoura
Surface (km ²)	37000	6357	16 600	4400
Périmètre (km)	1305	350	1576	1100
Longueur (km)	450	150	250	450
Indice Gravéllius (kc)	1.9	2.74	3.45	1.47
Lame d'eau précipitée (mm/an)	89	100	60	40
Débits moyen annuel(m ³ /s)	6.32	0.056	0,218	6.00
Apport annuel (Hm ³ /an)	200	1.76	6,875	400

5.2.2. Oued Guir

Oued Guir est le plus important cours d'eau du bassin de la Saoura de 450 km de longueur.

Il prend naissance à 2200 m d'altitude dans le Djebel Aichi (versant méridionale de l'Atlas marocain). Le Guir draine un bassin dont la surface avoisine 27000 Km² les eaux sont totalement perdues dans les zones désertiques ou elles provoquent des inondations et parfois des dégâts aux palmeraies. Pour une meilleure gestion de ces eaux, et pour un but de développer le domaine agricole et industriel de la vallée de la Saoura, un barrage a été construit en 1969 à Djorf Torba à 50km, en amont d'Abadla. La capacité de ce barrage est d'environ 360 millions de m³.

5.2.3. Oued Zouzfana

Cet affluent du Guir descend de l'Atlas saharien d'où il prend sa source à 1600 m d'altitude à l'extrémité occidentale des monts des Ksour. Son bassin versant s'étend sur une surface de 16 600Km². L'Oued Zouzfana suit un parcours de 360 Km. Son principal affluent est l'oued Zoubia, à l'aval, le cours d'eau très dégradé fonctionne comme un canal de dérivation.

5.2.4. Oued Bechar

L'oued Bechar prend sa source vers 1600m d'altitude dans le Djebel Grouz. Il draine une surface de 5800Km² environ. Il est situé au pied du versant sud de l'Atlas Saharien. Cet Oued descend rapidement sur

la Hamada ou il reçoit de nombreux affluents venant des djebels Horriet et Bechar dont le plus important est l'oued Sfeiah. Après un parcours d'une centaine de km, il va se perdre dans la Dayet Tior.

5.3. Bassin d'Oued Namous

Le bassin effectif de l'oued Namous peut être limité à la hauteur de Hassi Mamoura, cette artère ne recevant plus d'affluents actifs en aval de ce point. Dans ces conditions, sa superficie atteint 8900 km². Oued Namous atteint le Grand Erg Occidental et se perd dans les sables à 370 km de son origine. Dans sa partie amont, sous le nom d'oued Sefra, à Ain Sefra, les mois de crue sur la période 1938- 1951 ont atteint en moyenne 2,6 mois par an (DUBIEF (1953). Dans le bas Namous, les crues ne s'observent plus que 7 années sur 13. Ces crues peuvent être d'une grande violence.

L'oued Namous prend sa source à 1900 mètres d'altitude dans les monts des Ksour (fig .1.19) Après une centaine de kilomètres d'un parcours montagneux durant lequel il reçoit des affluents importants (Sfissifa, Tiout, Moghrar), il débouche en région Saharienne en aval de Moghrar Tahtani, vers 800 m d'altitude. En amont de son confluent avec El Moghrar au niveau des piémonts Atlasiques, la pente diminue et l'oued s'étale (Oglet el Djedida). Légèrement en amont de Hassi Maâmoura, la pente augmente et l'oued coule dans une large vallée, creusée dans la Hamada où son lit s'ensable progressivement. L'oued Namous atteint le Grand Erg Occidental dans la région de Kheloua Sidi Brahim et se perd dans les sables vers Hassi Boukhelala, soit à 370 km de son origine.

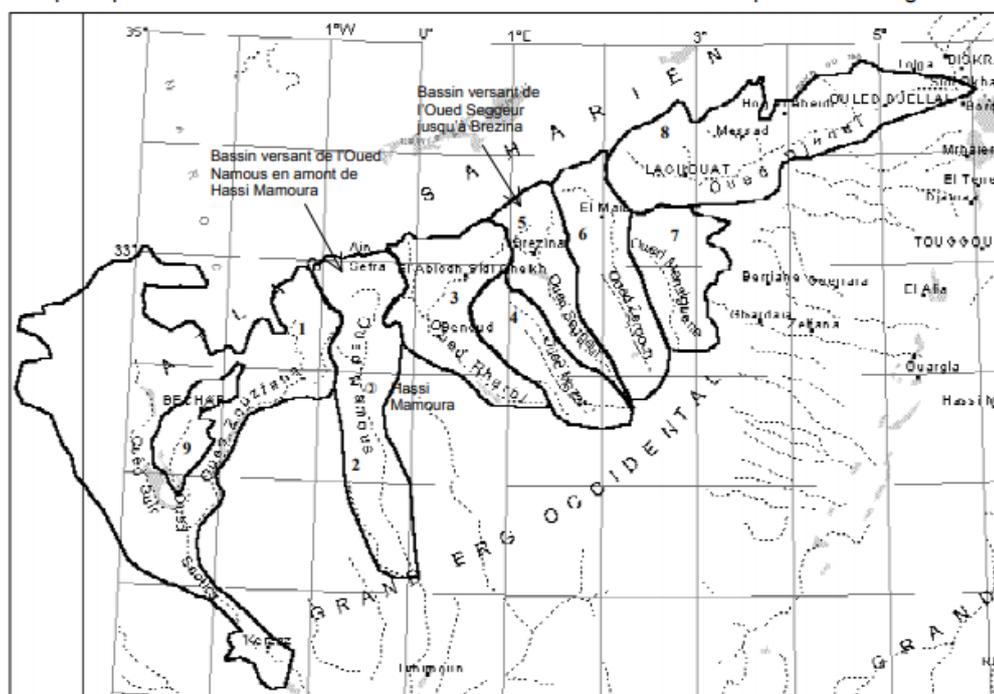


Fig.6-1 : Bassins du versant méridional de l'Atlas saharien

- | | | |
|-------------------------------------|------------------------------|---------------------------------|
| 1 : Bassin-versant de l'Oued Saoura | 4 : Bassin de l'Oued Mazar | 7 : Bassin de l'Oued Mehaiguène |
| 2 : Bassin de l'Oued Namous | 5 : Bassin de l'Oued Seggeur | 8 : Bassin de l'Oued Djedi |

Figure 1.19. Situation du Bassins versants d'Oued Namous dans l'Atlas saharien.

6. Aperçu sur l'hydrologie quantitative de la Saoura

Suite aux travaux de Dubief 1967, on va présenter une synthèse et une évaluation des apports liquides des principaux oueds du Bassin de la Saoura

6.1. Apports du Guir à Djorf-Torba

La superficie drainée de l'Oued Guir en amont du barrage de Djorf-Torba est d'environ 22.000 km². Les débits de crues ont été estimés à 1500 m³/s (crue annuelle), 2500 m³/s (crue décennale), 5000 m³/s (crue centennale) et 10.000 m³/s (crue exceptionnelle)(Dubief, 1967).

En 1966, trois crues en septembre, octobre et novembre ont été mesurées. La plus importante étant celle d'octobre avec 3114 m³/s, donnant un apport de 140 millions de m³. En 1967, six crues ont été dénombrées (mai, juin, septembre, octobre et novembre) avec un débit de pointe de 6400 m³/s en octobre, équivalent à un apport de 350 millions de mètres cubes (fig. 1.19). A partir de la relation entre les volumes écoulés (Millions m³) et les débits de pointe (m³/s), on peut constater aisément que les débits de pointe les plus élevés ne correspondent pas nécessairement aux volumes des crues les plus importants (fig. 1.20).

Ainsi pour un volume maximum de 481 millions m³, le débit de pointe serait de 1090 m³/s alors que pour le débit de pointe le plus élevé (3100 m³/s), le volume écoulé n'était que de 165 millions m³.

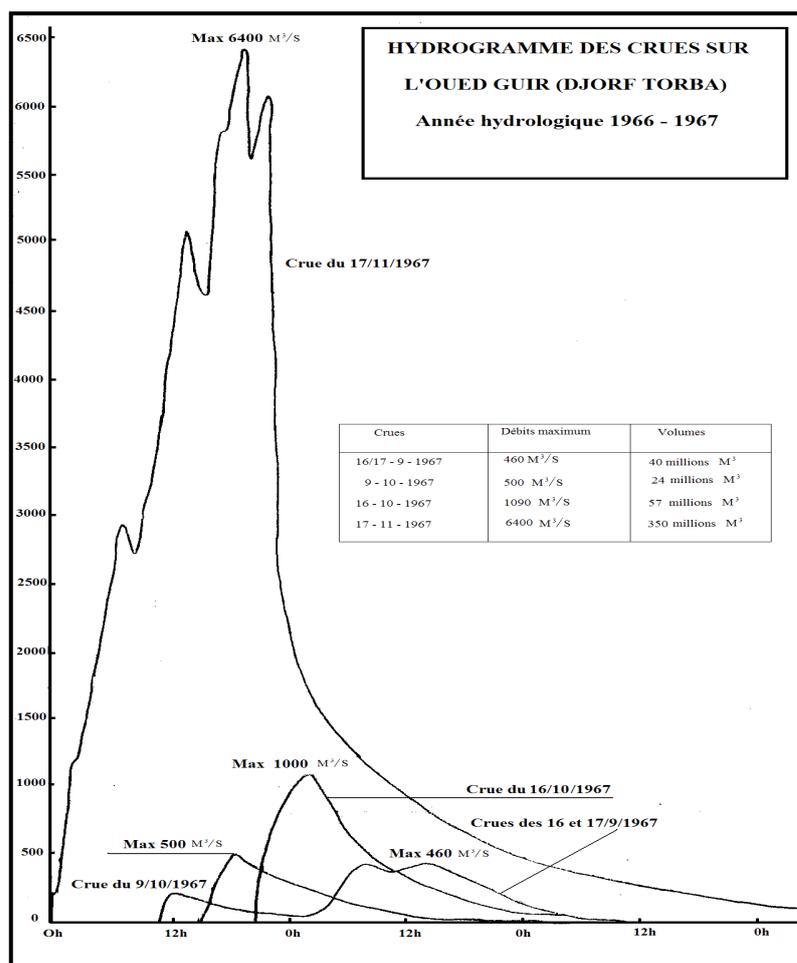


Figure 1.20: Débits et volumes écoulés du Guir à Djorf-Torba (Dubief, 1967)

Le barrage de Djorf Torba a été construit à la fin des années soixante sur le Guir non loin de la frontière marocaine. Il est destiné à l'irrigation de la plaine d'épandage d'Abadla et à l'alimentation en eau de la ville de Béchar démunie de ressources souterraines abondantes et de bonne qualité. L'oued Béchar, ancien affluent du Guir, ne rejoint plus son émissaire et se perd, à 10 km de la confluence, dans une cuvette argileuse. Avant la construction du barrage, l'essentiel des crues de la Saoura dépendait de l'oued Guir et non de la Zousfana, dont les débits sont moindres : une crue sur cinq ou six atteint la Saoura, les autres s'arrêtent bien avant Taghit. Dans son cours supérieur, d'Igli à Kerzaz, la Saoura maintient son tracé, encaissé depuis 2 ou 3 millions d'année dans la plate-forme hamadienne (BRL, 1998a).

- Apports du Guir à Abadla

Avant la construction du barrage, l'oued Guir était permanent jusqu'aux plaines d'Abadla où il s'infiltrait et disparaît dans les alluvions. Actuellement, le barrage retient la presque totalité des débits. Sa capacité est de 316.4 Mm³.

Durant la crue d'octobre 1979, le barrage a déversé un volume de 38.4 Mm³. Pour l'année 1989-1990, le déversement a été de 17 Mm³.

La crue d'octobre 1979 a continué en aval du barrage du 18/10/1979 au 07/11/1979. Le débit maximum a atteint 370 m³/s. Après un parcours de 400 km du barrage la crue se perd dans la Sebkhet El Melah, aux environs de Béni Abbes (Mekideche et al. 1995).

6. 2. L'oued Saoura à Béni Abbès

Seules les pluies intenses du printemps et de la fin d'automne sont capables de générer des crues importantes (fig. 1.21). En moyenne, les crues mettent 02 jours et demi pour franchir les 100 premiers kilomètres en aval d'Abadla, soit une vitesse de 1.6 km/h et 01 jour et demi pour les 50 kilomètres suivants, soit 1.3 km/h.

Roche, entre 1901 et 1907 a noté au moins 40 mois au cours desquels se sont produits dans la Saoura une ou plusieurs crues de forte importance (soit plus d'une fois tous les 02 ans). Il est cependant intéressant de noter que ces crues peuvent se manifester à n'importe quelle époque de l'année.

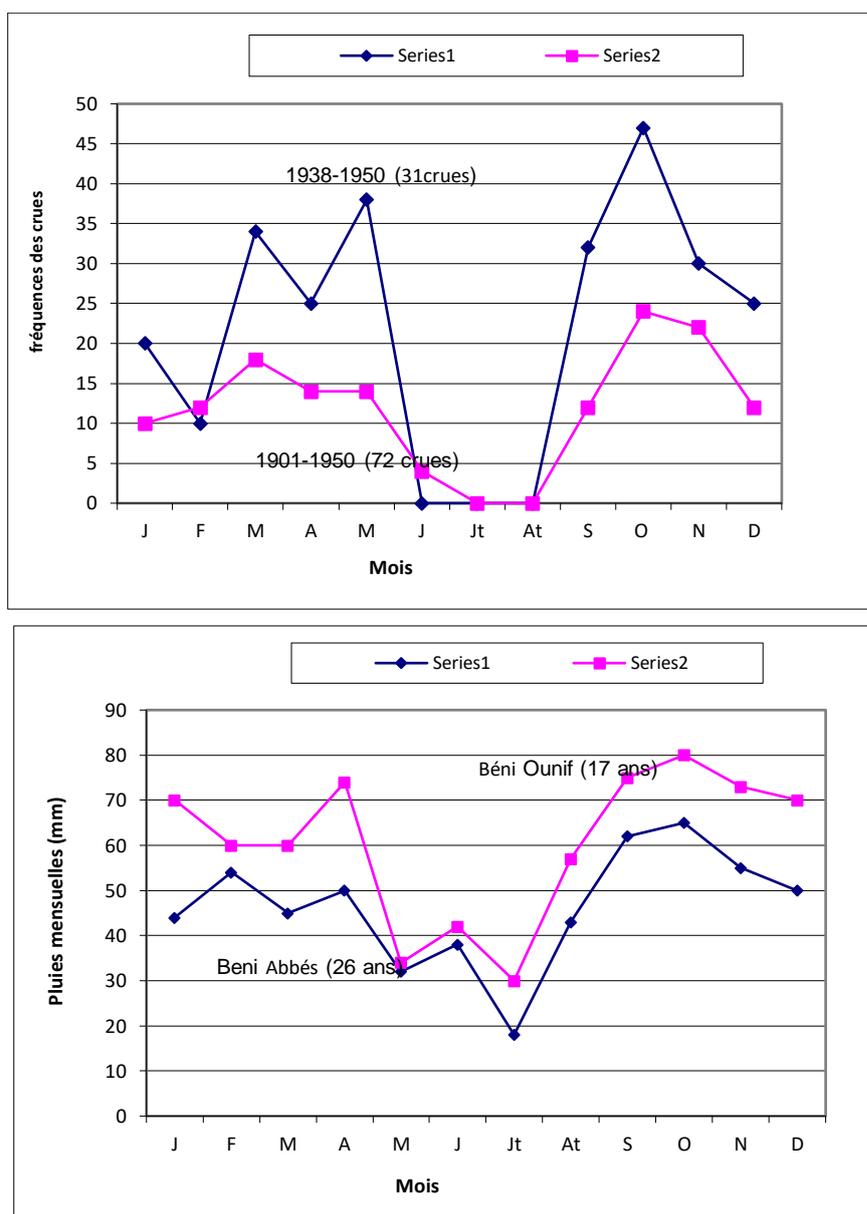


Figure 1.21: Fréquences mensuelles des pluies et des crues dans le bassin de la Saoura
(J. Dubief, 1953)

6. 3. La Zousfana

L'apport moyen annuel de la Zousfana est de 6 Mm³. Celui du Guir à hauteur du barrage de Djorf Torba est de 200 Mm³ (6,3 m³/s) (MEKIDECHE et al. 1995). Les crues de l'oued Guir surviennent en automne et au printemps. En octobre 1950, on a enregistré 3000 m³/s à Djorf Torba ; en 1959, le débit estimé au maximum de la crue à Abadla était de 4000 à 5000 m³/s et le total du volume d'eau écoulé était de l'ordre de 800 millions de m³. Il s'agit là de fortes crues exceptionnelles. Les débits sont en moyenne de 1500 m³/s. Les débits de crue décennale et centennale, évalués à Djorf Torba, donnent des valeurs de 2000 et 8830 m³/s.

A Djorf Torba, l'oued Guir aurait un débit minimum de 150 l/s, ce qui correspond à peu près à 4,5 Mm³ par an et paraît faible au regard de la capacité théorique du barrage :

360 Mm³ et des besoins d'irrigation des 6 000 ha de la plaine d'Abdala. A raison de 6 m³/s, il faudrait stocker et gérer 200 millions de m³ pour assurer chaque année le bon fonctionnement hydraulique du périmètre. Le système repose donc pour l'essentiel sur les crues : 30 jours en moyenne à 1500 m³/s offrent un volume total de près de 4 milliards de m³ qui, selon BRL (1998a) devrait, théoriquement, suffire. De 1980 à 1985, il a été impossible de remplir le barrage. Cette irrégularité peut être illustrée par le fait que la seule crue du 21 mars 1959 aurait fait déborder, en une semaine, le barrage et qu'une crue de cette importance peut survenir tous les 10 ans (BRL, 1998a).

7. Espace de la Saoura et hydraulique traditionnelle

Jadis, par ses crues très rapprochées, la Saoura était le siège permanent d'une ligne de mares pérennes (Guelta) et des lignes de flux superficiels à cours vifs (Reymond., 1951) dont les plus notables sont : le ruissellement d'Igli, stabilisé par un barrage établi entre 1946-1950 ; mare de Mazzer (200mx50mx5m) ; mare d'Ouarourout (50mx10mx4m) ; ligne de mares à Béni Abbès ; ligne de puits de Guerzim - El Ouata ; mare de Kerzaz et ruissellement vif de Ksabi. C'est ainsi que la Saoura connaissait un remarquable épanouissement de ses luxuriantes oasis.

Cette abondance d'eau était sollicitée par des moyens traditionnels et les besoins ont été très limités. Les dispositifs de captages et de mobilisation sont les foggaras, les puits à balancier et rarement des motopompes. Les résurgences sur la rive gauche de la vallée de la Saoura de la nappe phréatique du grand erg occidental ont été gérées par des règles coutumières de partage des eaux.

7.1. Grande hydraulique et Verrouillage des vallées

Dans cette portion occidentale, le relèvement du bouclier saharien assure une continuité topographique avec les reliefs du Nord et permet l'existence d'un vaste plan incliné, depuis les cimes de l'Atlas jusqu'au Sahara proprement dit, et par conséquent, cette région est parcourue par de grands cours d'eau descendant du Nord vers le Sud. Dans les territoires algérien et marocain, ces artères sont rénovées récemment par la technique des grands barrages, qui permettent de maîtriser les crues et de régulariser les apports (lâchers réguliers dans le lit de l'oued). Ainsi trois cours d'eau principaux sont équipés chacune d'un barrage (Fig 1.22) : celles du Draa à l'ouest, déroulant sur plus de 150 km son ruban de verdure ; celle du Ziz-Rheris au centre, arrosant la plaine du Tafilalt ; celle du Guir, en territoire algérien, arrosant le périmètre étatique d'Abadla (5 400 ha) et à l'aval les oasis de la Saoura.

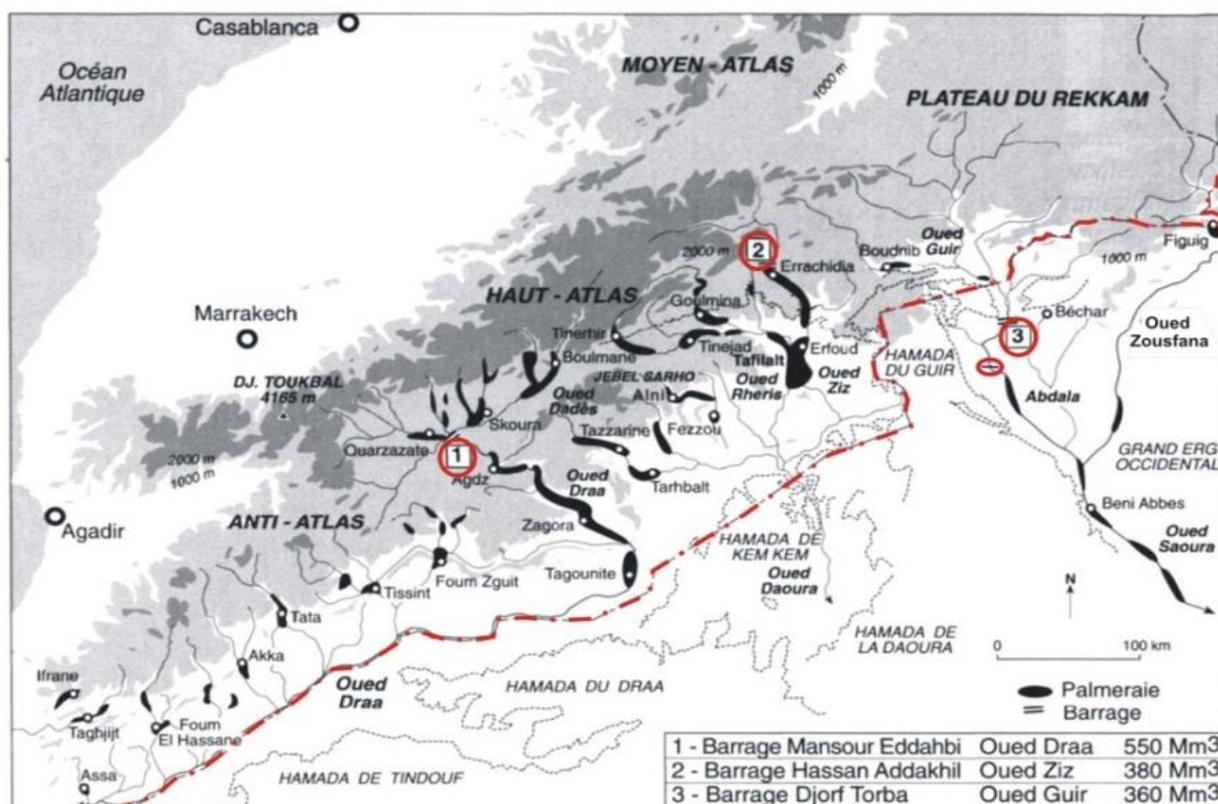


Figure 1.22 : Principaux verrouillages des vallées au sud du Haut atlas-atlas saharien (Côte, 2002).

Le verrouillage du cours de Guir a permis d'acquérir d'énormes avantages en amont, mais les régions aval, en occurrence la vallée de la Saoura, sont privées des apports du Guir et par la suite ne bénéficient que des apports modestes de la Zousfana (6 Hm³). C'est ainsi que la Saoura connaît une véritable pénurie d'eau. Au niveau d'Abadla, la construction du barrage de reprise donne un privilège au développement d'un périmètre agricole moderne dans la plaine d'Abadla, qui malheureusement ne jouissait pas de base paysanne et n'a donné que des résultats mitigés.

7.2. Mutation du pays des foggaras et nouveaux périmètres

Le monde de foggara (Saoura, Gourara, Touat et Tidikelt), mode ingénieux de captage et mobilisation d'eau, gouvernant au passé, est aujourd'hui à l'abandon, par le fait que cette technique ancestrale n'a plus sa place dans le monde actuel. La moitié des foggaras ne fonctionnent plus aujourd'hui. A titre d'exemple, la wilaya d'Adrar compte au total 1400 foggaras ; dont 907 foggaras sont pérennes (en service) et 493 foggaras ont fini par être taries (35 % de foggaras mortes (Senoussi et all 2011). Les techniques modernes permettent d'atteindre des nappes profondes, de mobiliser plus de quantité d'eau et les pivots assurent l'arrosage de grandes surfaces. Les foggaras dans la vallée de la Saoura sont aussi livrées à l'abandon. Les puits à balancier restent inanimés, témoignant d'un passé glorieux de l'effort physique.

Il est donc clair que cette technique est en régression à raison du manque d'entretien et réhabilitations, et c'est ainsi que l'oasis traditionnelle, longtemps célébrée, tombe petit à petit en déclin et la gestion

communautaire de l'eau efface de la culture oasienne. Les programmes nationaux de développement d'agriculture, visant à donner un second souffle à ces oasis, par des créations des nouveaux périmètres, affrontent des sérieux problèmes d'irrigation..

8. Diagnostique et les enjeux de la gestion des eaux.

8.1. Développement urbain et agricole.

L'oasis de Béni Abbes a connu un développement urbain et agricole, par une évolution démographique, suivi d'une augmentation du tissu urbain très importante. Aussi la création des nouveaux périmètres agricole d'une surface de 2800 ha (DPAT, 2015). Comme par ailleurs, dans l'Oasis de Béni Abbès, les besoins en eaux deviennent de plus en plus contraignants du point de vue qualité et quantité, liés essentiellement à quatre facteurs :

- Les besoins en eau potable pour les différents usagers ne cessent d'augmenter d'avantage (taux de développement 4%), ce qui nécessite une demande de plus en plus pour les générations futures (Fig.1.23).
- La diffusion de la salinité où on assiste à une propagation spectaculaire de la salinité (70 % des eaux de la nappe des terrasses alluviales).
- Les activités humaines qui semblent être orientées pour remédier aux points précédents, mais réellement elles contribuent efficacement à la détérioration des eaux souterraines.
- Les eaux usées déversées sans traitement préalable dans l'Oued Saoura, les rejets urbains risquent de polluer les ressources en eau, ce qui constitue une menace pour la santé publique, l'environnement et l'équilibre écologique.

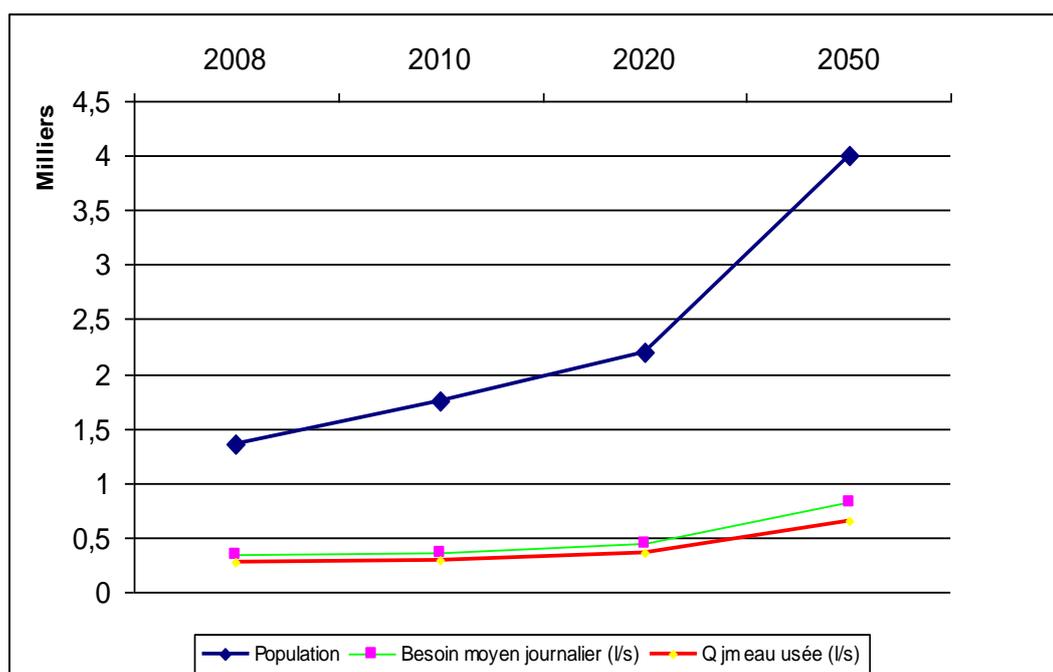


Figure 1.23 : Croissance démographique à Béni -Abbès.

8.1.1. Ressources en eau limitées

Au niveau de l'oasis de Béni Abbès, les ressources en eau souterraines de ce système aquifère et ses capacités de stockage sont mal connues. La Saoura, autrefois très active, ne reçoit actuellement qu'un apport hydrique négligeable, à cause d'une part, des sécheresses climatiques et d'autre part de la construction du barrage de Djorf Torba, sur le cours de Oued Guir.

A faut note, q' on peut constater que dans l'Oasis de Béni Abbès, les ressources en eau exploitables sont limitées :

- La Grande Source donne un débit : +/- 29 l/s (mesure 2016)
- Débit des Foggaras : +/- 4 l/s (mesure 2016)
- Débit des deux Forage : +/- 07 l/s (mesure 2016)
- débit de cinq (5) puits 2l/s chaqu'un (mesure 2016)
- Eau des puits chargés en sels (située dans la palmeraie) d'un débit de 2 l/s chacun (environ 50 puits, dont 35 sont non exploitables)

8.1.2. Contraintes de développement et enjeux majeur

Cette situation critique est la conséquence de plusieurs contraintes de développement urbaine et agricole à savoir (Fig.1.24) :

- Une rupture du lien de la population avec la palmeraie.
- Changement de comportement de la société vis-à-vis de l'usage de l'eau (gaspillage),
- Croissance démographique (évolution taux de croissance de 1.5 % à 4 %).
- Production d'eaux usées non recyclées et utilisées directement dans l'agriculture.

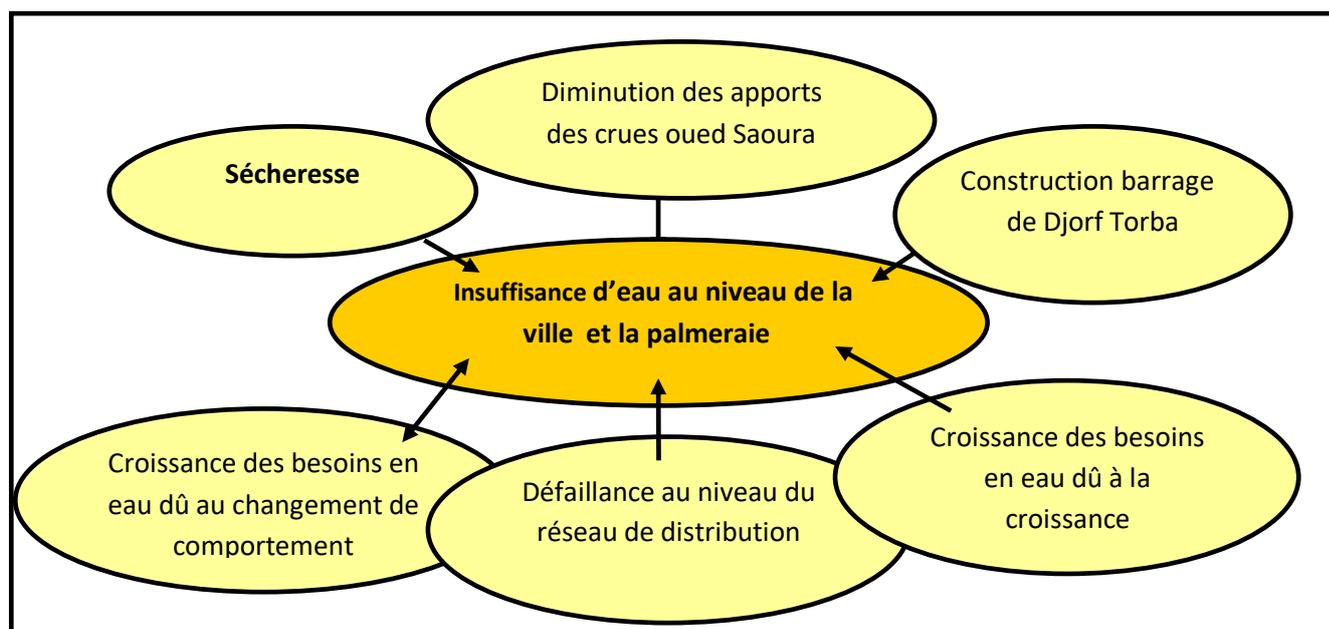


Figure 1.24 : Synthèse des contraintes du développement urbain et agricole (Merzougui 2007)

En conclusion : L'enjeu majeur de la gestion de l'eau c'est l'interaction des causes naturelles, les causes anthropiques et la mutation sociale (fig.1.25)

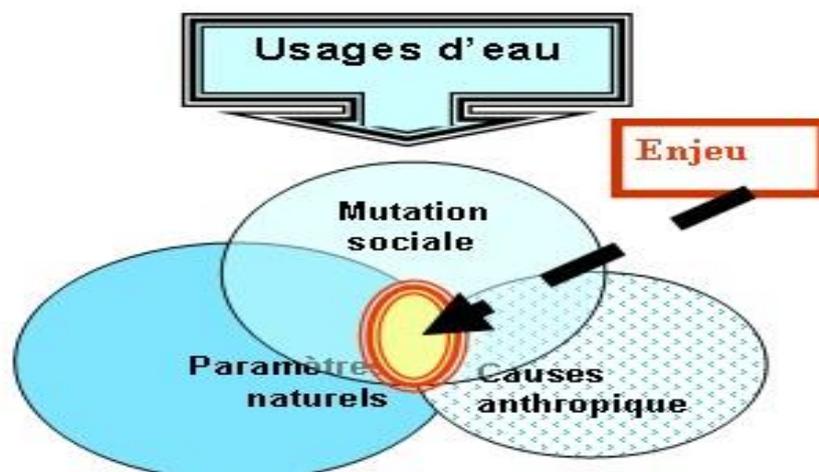


Figure 1.25 : L'enjeu majeur de l'eau dans l'oasis de Béni Abbès (MERZOUGUI, 2007)

8.1.3. Bilan et usage d'eau

La disponibilité en eau potable (2805,2 m³/j) des quatre forages et la grande source mobilisés pour la ville, dépasse les besoins (fig. 1.26), néanmoins, il est demandé d'aménager davantage les réseaux de distribution. En revanche, les besoins de la palmeraie ne sont satisfaits qu'à 6.28 %.

Cependant, la question de disponibilité et d'accès à l'eau est sans aucun doute, l'un des problèmes majeurs auquel est confrontée l'agglomération de Béni Abbès. Aujourd'hui une maison sur trois dans la ville n'a pas un accès à l'eau satisfaisant. L'eau de l'irrigation est également insuffisante dans la palmeraie.

La construction de barrage Djorf Torba a diminué les apports de crues de la Saoura.

La figure 1.26 montre un équilibre entre les besoins et les disponibilités en eau, par contre, au niveau de la palmeraie, la quantité d'eau disponible est inférieure à celle demandée.

En dépit de cela il est nécessaire d'aménager davantage les réseaux de distribution. En revanche, les besoins de la palmeraie : cependant, la question de disponibilité et d'accès à l'eau est sans aucun doute, l'un des problèmes majeurs auquel s'affronte l'agglomération de Béni - Abbès.

Au niveau de la palmeraie, l'irrigation enregistre également un sérieux déficit. La production d'eau potable s'élève à 32 millions de m³/an (grande source), pourra satisfaire les besoins de la population. Toutefois, il est nécessaire d'optimiser le réseau d'AEP et d'éviter une distribution intermittente. Cette dernière a provoqué un comportement gourmand chez les usagers.

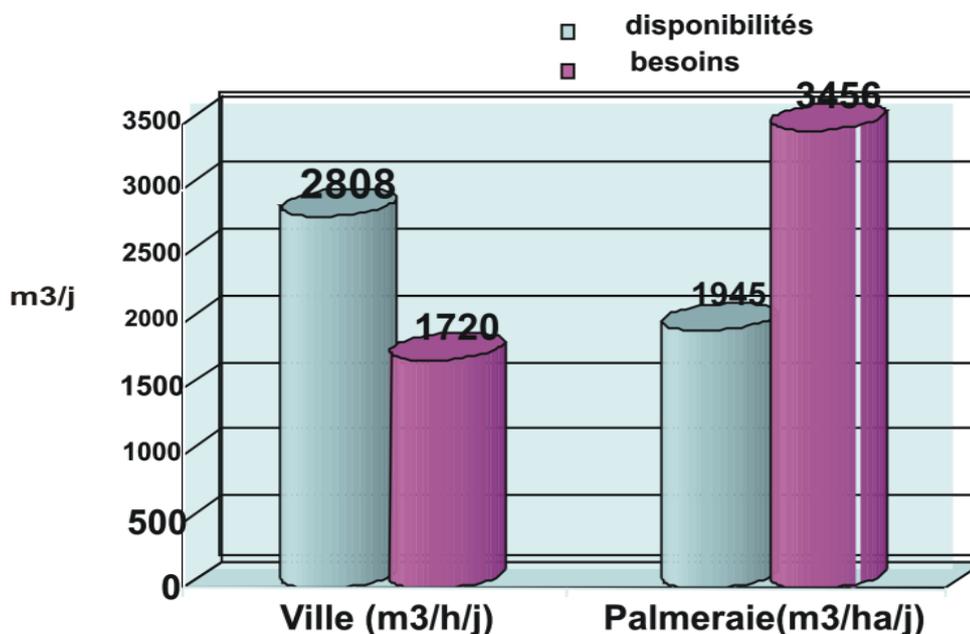


Figure : 1.26 : Bilan et usage d'eau à Béni Abbés

On peut constater que les ressources existantes ne peuvent pas satisfaire la totalité des besoins en eau potable de la ville, c'est pourquoi il faudra combler le déficit en eau par la mobilisation d'autres ressources, on essaye de projeter des nouveaux forages au niveau du même champ de captage.

Donc il est hautement recommandé de chercher des solutions par la réalisation d'autres ouvrages hydrauliques de captage, pour satisfaire les besoins.

9. Conclusion

Dans une région à climat aride comme le Sahara Nord Occidental, les écoulements sont extrêmement variables. Ils ont généralement lieu à l'occasion de fortes pluies tombées sur un court laps de temps. Le ruissellement n'existe qu'à la faveur de ces pluies. Selon l'intensité de ces dernières, il permet d'humecter suffisamment les sols profondément desséchés, s'infiltrer dans les lits d'oued ou s'étaler dans les régions d'épandage, les Sebkhass, Gueltas ou Daïas. Ces eaux contribuent alors à l'alimentation des nappes sahariennes tandis que la partie des crues qui va se perdre dans les sebkhass, gueltas ou daïas s'évaporer progressivement en augmentant leur concentration en sels. Les crues contribuent d'une manière quasi annuelle au relèvement du niveau piézométrique de la nappe phréatique, liée à l'oued. Les eaux de ces crues sont très peu minéralisées, elles sont d'autant plus pures qu'elles séjournent moins longtemps à la surface du sol, donc que l'écoulement est plus rapide. Sur la vallée de la Saoura a montré que les eaux se chargent progressivement en sels à la fin de la crue, car le sol a tendance à se minéraliser superficiellement en raison de la forte évaporation (Merzougui, 2007).

Conrad et al (1975) avaient déjà remarqué que la création de la retenue du Djorf Torba sur l'oued Guir pouvait perturber le mécanisme naturel de renouvellement des nappes phréatiques par les crues.

Actuellement, et suite à nos campagnes effectuées sur le terrain en 2002, 2003 et 2004, 2008,2010, 2015 et 2016 nous avons pu constater qu'effectivement, la création de ce barrage de régulation des crues a causé de graves dommages dans les palmeraies de la Saoura

Au terme de ce bilan, nous pouvons conclure que dans les zones arides, où les précipitations sont nettement inférieures à la capacité évaporatoire de l'atmosphère, les méthodes de calcul de bilan, basées sur des valeurs moyennes ne sont pas efficaces.

Chapitre 02

Géologie

CONTEXTE GEOLOGIQUE

1. Introduction

La vallée de la Saoura forme un couloir où sont implantées les palmeraies, qui traversent le Sahara entre les sables du Grand Erg Occidental à l'Est et la Hamada du Guir à l'Ouest.

La région de Béni Abbès fait partie de la Vallée de la Saoura et appartient à la Hamada du Guir. Géologiquement et à l'échelle régionale, la région d'étude se rattache à la chaîne des monts de l'Ougarta, constituée d'une gamme de terrains très variés, allant du Précambrien à l'actuel.

La chaîne de l'Ougarta est constituée des formations volcano-sédimentaires et magmatiques formant un substratum ou socle d'âge Précambrien supérieur et des terrains paléozoïques rapportés à une couverture, scellée par des sédiments crétacés ou plus récents, tertiaires et quaternaires.

La région d'étude est constituée d'un substratum d'âge paléozoïque, parfois antérieur, est recouvert par les terrains tertiaires et quaternaires. Le socle précambrien, affleurant à Sebkhât el Melah, est recouvert en discordance par le Primaire de l'Ougarta qui s'étale sur la rive droite de l'oued.

La région de Béni Abbès se rattache à la chaîne d'Ougarta. Cette dernière s'individualise nettement dans le Sahara algérien, et forme un relief allongé sur 400 Km de longueur et de 200 Km de largeur.

2. Historique des travaux géologiques

Au Nord-Ouest du Sahara algérien, les monts de l'Ougarta constituent une imposante entité géologique. Sous cette entité a suscité l'intérêt de plusieurs organismes pour les métaux de base. Les travaux de recherches systématiques (explorations géologiques et minières, travaux académiques) ont fourni une documentation de base. Les cartes géologiques au 1/200 000e sont des outils précieux, elles fournissent d'excellentes descriptions stratigraphiques

Les monts de l'Ougarta ont été étudiés par différents auteurs depuis environ moins d'un siècle.

A partir des années 20, plusieurs expéditions militaires, accompagnées de géologues pénétrèrent au Sud algérien. Effectivement, en 1903, E. F. Gautier entama des travaux dans la région d'Ougarta. En 1906, il présenta une carte géologique au 1/1 000 000e, sur laquelle apparaît nettement la direction NW-SE des axes des plis, et il apporta une première vision générale de la géologie de cette entité.

Entre 1925-1930, suite à une reconnaissance du groupe mobile méhariste, allant de Béni-Abbès vers Tindouf, Menchikoff signala des rhyolites à Boukbaïssat, à Bet Touaris et à Guettara.

En 1938, Nicolas Menchikoff a créé à Béni -Abbès, un laboratoire qui se transforma à partir de 1943 à un centre de recherches scientifiques. Il s'attacha à l'étude des déserts.

A partir des années 40, un groupe de géologues rattachés, pour la plupart aux services des mines, commencèrent les travaux de prospection (Martinovsky 1942 ; Deleau 1949).

En 1952, le service géologique d'Algérie édita la carte géologique du Hamada du Guir à 1/500 000e, (Meyendorff et Pouyeto). Sur cette carte apparaissent nettement les structures géologiques allongées dans

la direction NW-SE.

2. 1. Les travaux de prospection minière modernes

A partir de 1976, et avec le concours des coopérations soviétique et polonaise, la SONAREM, puis l'EREM ont entrepris des travaux de recherches systématiques dans la chaîne d'Ougarta, qui se sont prolongés jusqu'en 1987, (Fig.21).

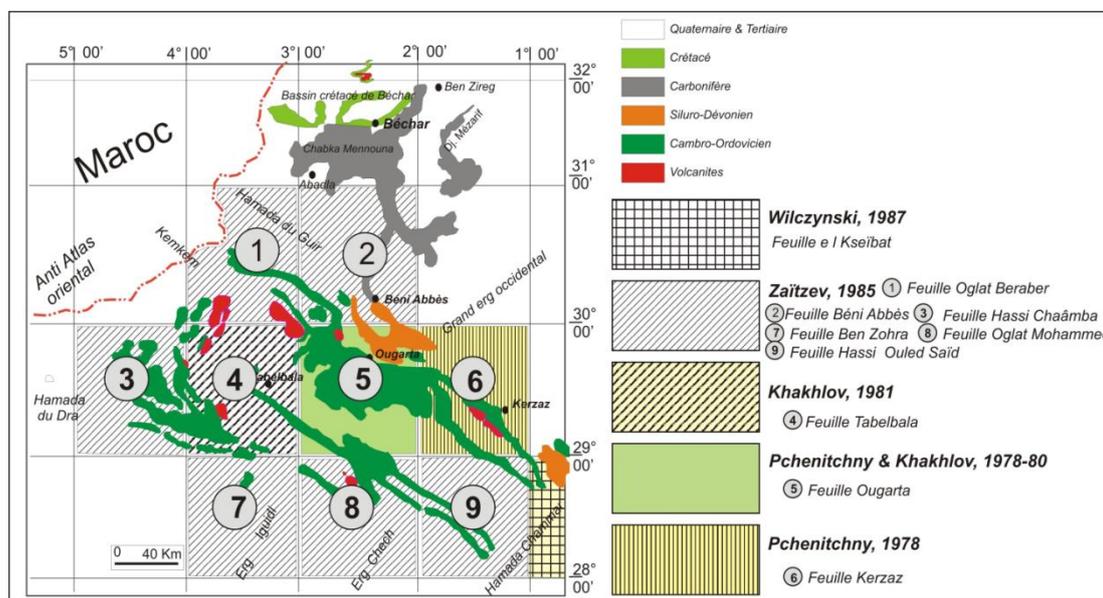


Figure 2.1 : Travaux de recherche systématique dans les monts d'Ougarta (Mekkaoui, 2015)

2.2. Principaux résultats

Levés des cartes géologiques à 1/200 000e, couvrant la chaîne entière.

- Etudes détaillées litho stratigraphiques et tectoniques.
- Inventaire de toutes les occurrences minérales métalliques et non métalliques.
- Estimation des potentialités minières, accompagnés par des recommandations de travaux futurs, cédant le champ aux prospections stratégiques et tactiques.

A cette étape, se sont succédés des travaux de prospection dans les secteurs jugés favorables, (fig.2.1).

A titre de connaissance, Riffault (1980) dirigea des travaux de prospection pour le cuivre sur la feuille de Hassi Chaâmba, et il constata l'abondance de la barytine filonienne. Il donna une estimation des pronostics de 6 Millions de tonnes de BaSO4.

Les éléments radioactifs ont fait l'objet d'une prospection tactique par Ivasko (1978-1979), Chempellev (1982) et Corev (1983). Ces éléments radioactifs correspondent au type classé de mauvaise qualité (U/Th<1), dans les niveaux de l'Ordovicien inférieur.

2.2.1. Les travaux académiques

De 1971 à 1974, un groupe de géologues de l'université d'Alger (Colomb et Donzeau, 1971, Chikhaoui, 1974) et Fabre, 1971/76, ont réalisé des levés géologiques au 1/200 000e des feuilles, de Tabelbala, d'Oglat Mohamed et de Ben Zohra, malheureusement, elles demeurent inédites.

En 1971, Donzeau fait l'étude du Paléozoïque inférieur du point de vue structural, dans le cadre d'une thèse de 3^{ème} cycle. Il a admis deux phases de plissements NE-SW et N-S responsables de la déformation.

En 1986, Bouima présenta une thèse sur les minéralisations stratiformes du Rahmani.

En 1987, Remichi étudia les minéralisations cuprifères du Précambrien du Damrane dans le cadre d'une thèse de 3^{ème} cycle. Il a proposé deux aspects génétiques des minéralisations : type de lac supérieur, lié au basalte alcalin et type andin, en relation avec le magmatisme calco-alcalin.

Les caractéristiques sédimentologiques du Cambro-Ordovicien ont été analysées par : Arbey (1962, 1966, 1968, 1971, 1979 et 1985), Gomez et al (1963), Aït Kaci (1990).

De même, le Silurien et le Dévonien ont fait l'objet de plusieurs recherches (Ouali, Abbache, 2012).

A compter de l'année 2000, de nouveaux géologues prennent le relais des travaux sur les monts de l'Ougarta.

En 2000, Cherfouh, étudia la structure de Sebka El Melah, dans le cadre d'un magister. Où Il souligna le cachet calco-alcalin des basaltes, existants au sein de cette structure. Ouali, Bouima 1986 et Mekkaoui, Graïne et Mekkaoui, Hamdidouche et Graïne 2006.

Plusieurs études ont été réservées au Quaternaire (Alimen, 1957 ; Chavaillon 1964 ; Conrad 1969 et travaux Beucher 1971). Il s'agit des dépôts des terrasses, des dépôts de Sebka et les dunes de sables.

2.2.2. Cartes et photographies disponibles.

De 1976 à 1987, avec le concours des coopérations soviétique et polonaise, la SONAREM puis l'EREM entreprennent des travaux de recherches systématiques dans la chaîne de l'Ougarta (fig 26). Ils se traduisent par des levés de cartes géologiques au 1/200 000e couvrant la chaîne entière, des études détaillées litho stratigraphiques et tectoniques, un inventaire de toutes les occurrences minérales métalliques et non métalliques et une estimation des potentialités minières accompagnés par des recommandations de travaux futurs, cédant le champ aux prospections stratégiques et tactiques. Les monts d'Ougarta sont couverts par un jeu de cartes topographiques au 1/500 000e, (fig.2.2.a). Ils s'étendent aussi d'une façon inégale sur douze cartes topographiques au 1/200 000e, (fig. 2.2.b).

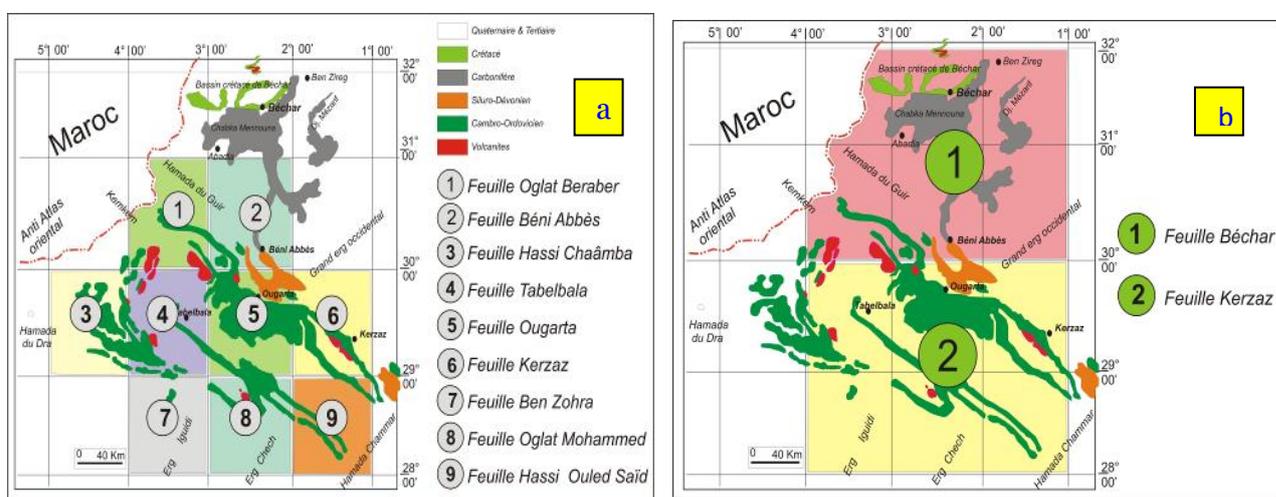


Figure 2.2 : Couverture topographique à 1/200 000e (a) et à 1/500 000e (b). (Mekkaoui, 2006)

Pour ce qui est de la couverture géologique, il existe d'anciennes cartes à 1/500 000e, qui couvrent plus ou moins toute la chaîne, dont les principales sont : feuille du Hamada du Guir, en coupure spéciale, éditée en 1950 par le Service Géologique du Maroc, et feuille de Kerzaz, dressait par Meyendorff et Pouyeto, sur la base des travaux d'autres auteurs (Gautier, de Lapparent, Menchikoff, Le Maître, Petter et Alimen). Elle est éditée en 1952, par le Service de la Carte Géologique de l'Algérie. Elle représente la partie méridionale des monts d'Ougarta, sur laquelle, on distingue nettement un socle rhyolitique infracambrien, affleurant au cœur des structures anticlinales ougartiennes, entourées par des formations cambriennes et ordoviciennes. La carte géologique du Sud oranais couvre l'extrémité nord de la chaîne, (fig. 2.3)

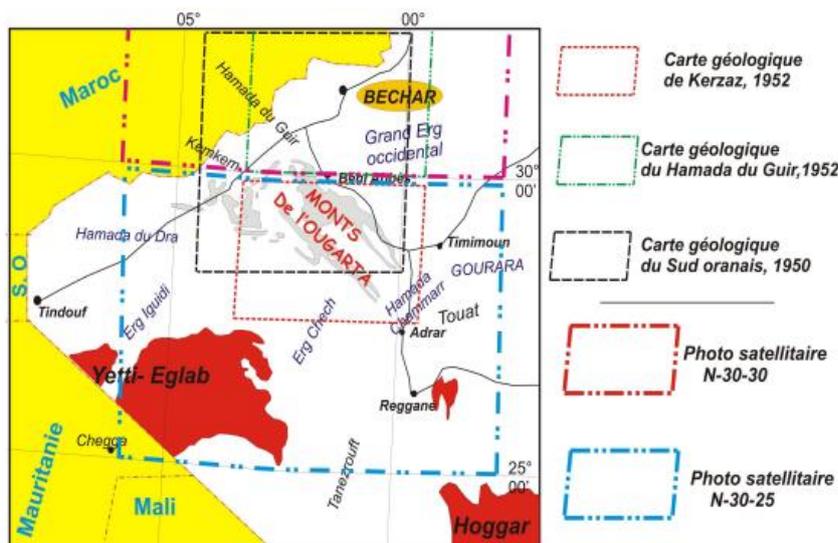


Figure 2.3 : Cartes géologiques au 1/500 000e (coupures régulières et spéciales) et photos satellitaires couvrant les monts de l'Ougarta (Mekkaoui, 2006)

Récemment, la SONAREM puis l'EREM ont entrepris des travaux de recherche systématique en réalisant des cartes géologiques en coupures régulières au 1/200 000e, couvrant toute la chaîne de l'Ougarta. Certaines de ces cartes ont été révisées et éditées par le Service Géologique d'Algérie (S.G. A), (Fig. 2.4).

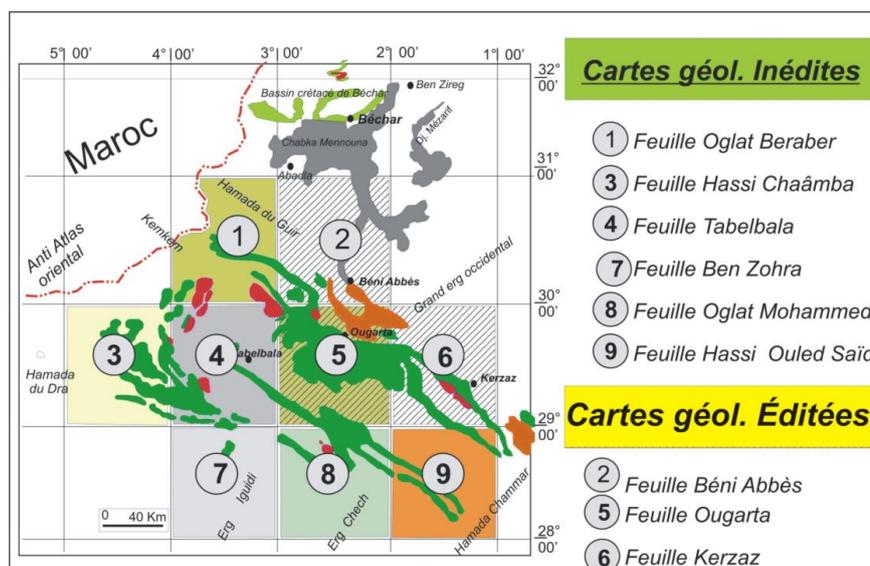


Figure 2.4 : Cartes géologiques à 1/200 000e, en coupures régulières (éditées & inédites) (Mekkaoui, 2015)

2.3. La plate-forme saharienne

Le soubassement panafricain subit des subsidences différentielles complexes pour donner des bassins paléozoïques au sein de la plate-forme saharienne. L'évolution structurale post-infracambrienne, pré-hercynienne de cette plate-forme est complexe et hétérogène (Fabre, 1976 et 2005). Elle était dominée par des processus de réactivation transpressive et transtensive locale, aboutissant à une interaction complexe entre champs de contraintes intraplaques et la géométrie des systèmes de faille préexistants. La collision continentale, entre le Gondwana et la Laurasia, au cours du Carbonifère terminal, était à l'origine d'un soulèvement majeur, de chevauchements dans la partie nord-ouest de la plate-forme nord-africaine et de plissement et d'inversion dans les régions intra plaques environnantes.

L'intensité de la déformation diminuait vers l'Est. Les plissements et érosions hercyniens au Nord-Ouest sont remplacés vers le Sud et vers l'Est par des inconformités et des discordances subtiles à faibles angles. Les corrélations géologiques sont relativement plus faciles entre les systèmes paléozoïques des différents affleurements et les données des forages.

2.4. Les Monts d'Ougarta

Dans la partie nord-ouest du Sahara algérien, entre les coordonnées : 0°30' – 5°00' des longitudes ouest et 28°30' – 31°00' des latitudes nord, sont situés les monts de l'Ougarta. Il s'agit d'une vaste zone de reliefs allongée NW – SE, sur une superficie de 400 x 200km². Les monts de l'Ougarta sont limités au Nord par la Hamada du Guir et le plateau du Kemkem, au Sud par la Hamada du Chammar et le Touat, à l'Est par un système spectaculaire de dunes du grand erg occidental et à l'Ouest par la Hamada du Draâ, les ergs Iguidi et Chech. Les monts de l'Ougarta se subdivisent en deux faisceaux sensiblement parallèles : le faisceau de la Saoura et celui de la Daoura, séparés par l'erg Er Raoui (**Fig. 2.5**).

Les monts de l'Ougarta sont constitués de roches volcano-sédimentaires et magmatiques formant un substratum d'âge précambrien supérieur et des terrains paléozoïques. Ces derniers sont scellés par des sédiments du Crétacé ou plus récents, à savoir le plateau crétacé du Kemkem au nord-ouest et la Hamada du Guirmio-pliocène à l'Est.

Les reliefs sont sculptés par différentes phases d'érosion du Permien au Jurassique supérieur (Conrad, 1969), ils ne dépassent pas 250m au-dessus des plaines environnantes. L'altitude moyenne est de 550m, avec deux culminations de 890m au djebel BetTouaris et 865m au djebel Ghannouma.

Les Monts de l'Ougarta sont constitués de roches volcano-sédimentaires et magmatiques formant un substratum ou socle d'âge Précambrien supérieur et des terrains paléozoïques rapportés à une couverture, scellés par des sédiments crétacés ou plus récents, tertiaires et quaternaires.

La chaîne d'Ougarta se compose d'un ensemble de formations volcaniques et volcano - détritiques, sur laquelle repose en discordance une couverture sédimentaire puissante de l'âge paléozoïque principalement Cambro - Ordovicien présentant à sa base un conglomérat polygénique avec un élément connu sous le nom de " conglomérat de Ben Tadjine " (Chikhaoui et Donzeau . 1972).

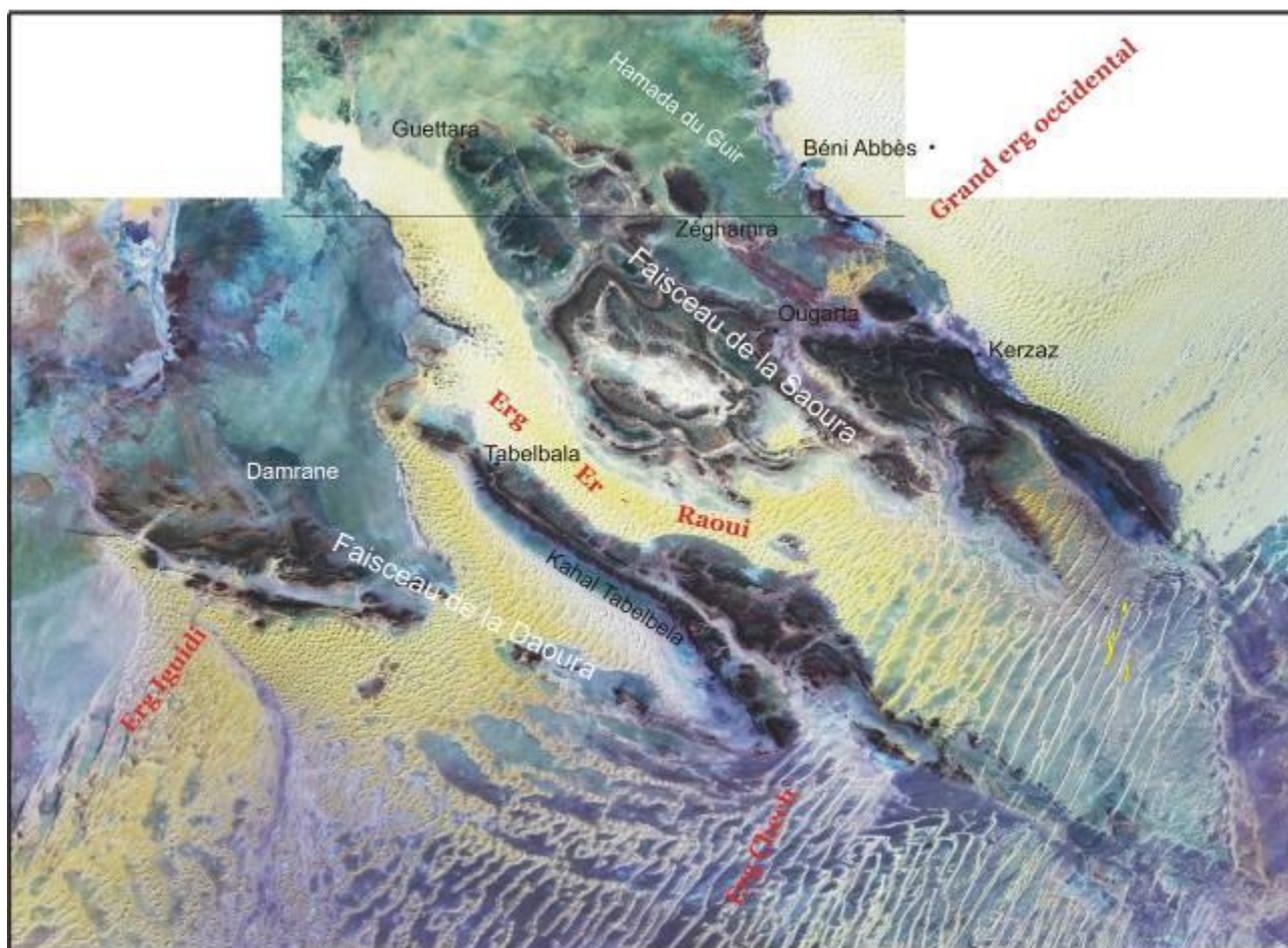


Figure 2.5: Photographie satellitaire des Monts de l'Ougarta,
(Scènes Landsat NH30-25 & NH30-30).

3. Lithostratigraphie

Du point de vue litho stratigraphique, les affleurements sont représentés au niveau de la zone étudiée principalement par des terrains du Quaternaires et du Mio-Pliocène qui recouvrent en discordance les formations dévoniennes représentées essentiellement par des schistes.

La chaîne d'Ougarta comprend les terrains suivants :

3.1. Précambrien

Les terrains Précambriens affleurent aux cœurs de quelques anticlinaux (Sebkha el Mellah, Boukbaissat, Guettara, Bettouaris, Damrane et KahalTabelbala). Il comprend des flyshs et des grauwakes recoupés par des roches magmatiques. L'ensemble est coiffée par des ignimbrites (Menchikoff, 1930 ; Chikkaoui, 1974 ; Zellouf et al 1974).

3.2. Paléozoïque

Les formations paléozoïques affleurent généralement en rive droite de la Saoura, festonnant ainsi le contour de la Hamada.

De nombreux travaux consacrés au Paléozoïque d'Ougarta (Menchikoff, 1930 ; Alimen et al 1952 ; Fabre 1976 ; Khakhlov, 1980 ; Zaitzev, 1983 ; Welzinsky, 1986, Aït Kaci A., 1990 ; Mekkaoui A. 1998 ; Ouali.M, 2003 ; Hamdidouche, 2010) ; (Ph.Legrand, 1961, 1962, 1964, 1970, 1977, 1981).

Le Paléozoïque correspond à une puissante série de plus de 7000 m d'épaisseur. Le Cambrien est silico clastique, l'Ordovicien est gréseux interrompu par des horizons argileux. Les deux étapes forment l'ossature de la chaîne. Le Silurien est argileux, le Dévonien et le Carbonifère tendre ne sont conservés que dans les structures synclinales.

Impressionnant par sa puissance, il atteint plus de 5km dans le nord- ouest de ce vaste territoire. Le Paléozoïque est ponctué par des événements géologiques important (eustatisme, magmatisme) évoqués en figure (Fig. 2.6).

En résumé la figure.31 synthétise la géologie et la litho stratigraphie du Paléozoïque.

3.2.1. Cambrien (600- 1200m) comprend les formations suivantes :

- Formation de Sebkha El Melah (350-400m) : il s'agit de grès arkosiques, peu indurés, à feldspaths abondants et à granulométrie homogène et moyenne.
- Formation d'Ain Néchéa (800m) : elle est constituée essentiellement par des grès quartzeux et des quartzites en dalles métriques à intercalations de grès argileux en plaquettes.

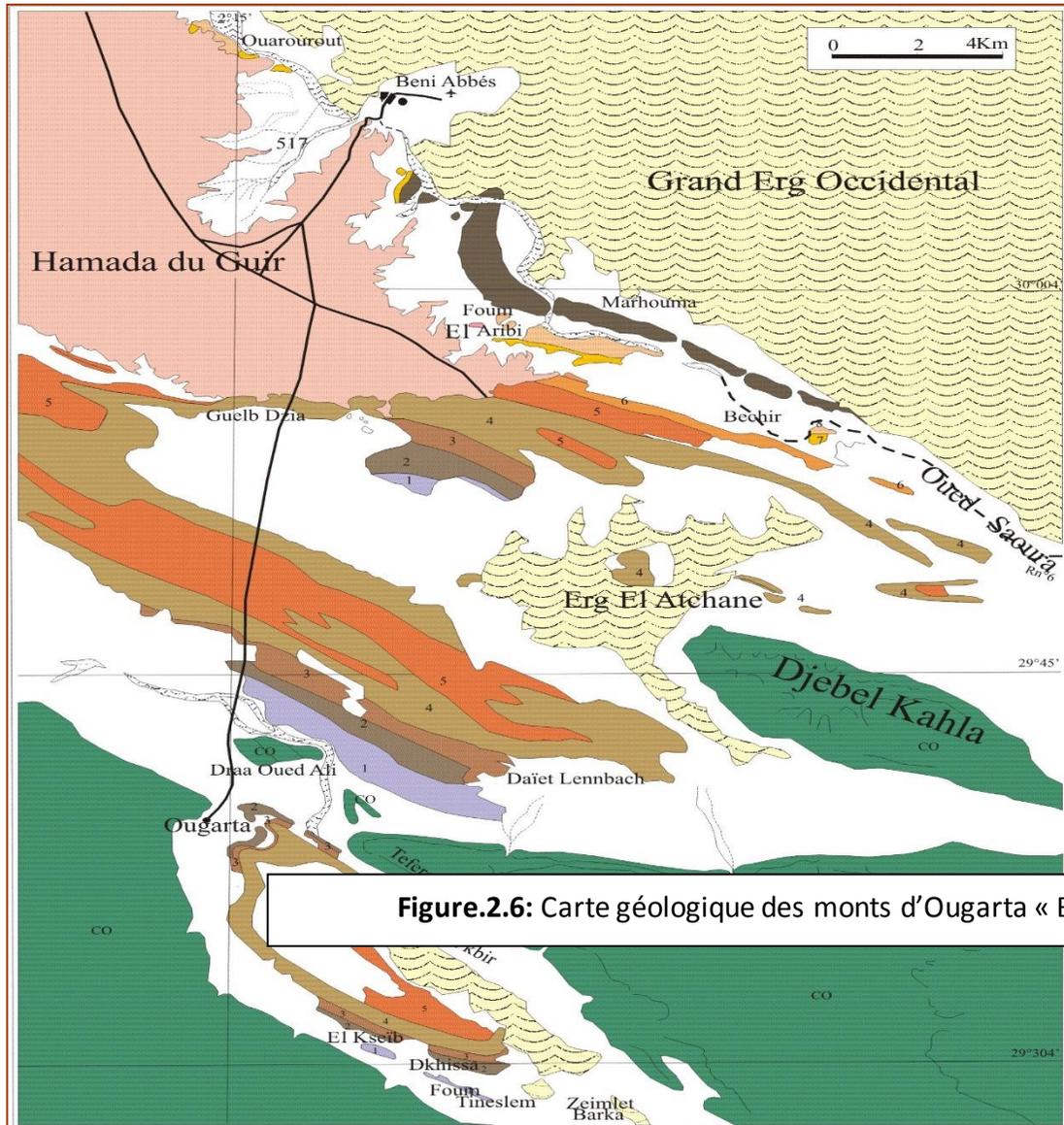
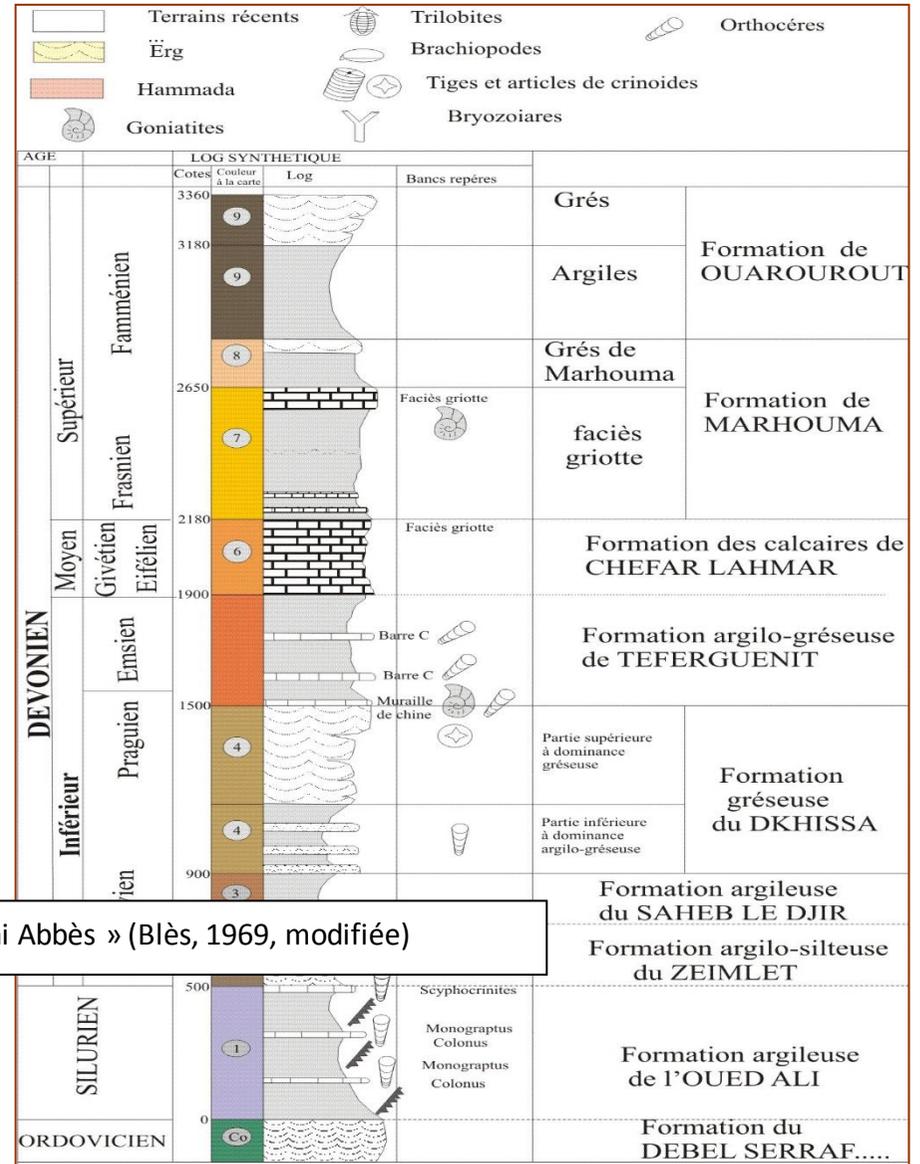


Figure.2.6: Carte géologique des monts d'Ougarta « Béni Abbès » (Blès, 1969, modifiée)



3.2.2. L'Ordovicien

Est connu sur la quasi-totalité de la superficie de la chaîne et il constitue l'ossature de la chaîne. Il demeure toujours détritique, il s'agit de dépôts silico-clastiques avec des occurrences carbonatées (900m). D'une puissance de (1150-1250m), se compose de cinq formations:

- Formation de Foug Tineslem (40-200m) : composée de grès glauconieux verdâtres en plaquettes, à intercalation de silstones, et des lentilles de calcaires gréseux.
- Formation de Kheneg El Aatène (40-300m) : constituée de grès quartzeux avec intercalations de passées argileuses.
- Formation de FougEzZeidya (30-300m) : ce sont des schistes, des grès quartzeux, des grès ferrugineux et des calcaires fossilifères.
- Formation de Bou M'haoud (10-220m) ; comprend des grès quartzeux en plaquettes intercalés d'aleurolites, des schistes et des calcaires lenticulaires.
- Formation de DjebelSerraf (10-200m) ; est argilo conglomératique.

3.2.3. Le Dévonien est très puissant (1700-2000 m), à la base il est argilo-silteux et carbonaté, puis il devient gréseux. Il est subdivisé en six formations

- Formation de Zemeilet argilo-silteuse.
- Formation de Saheb El Djir argileuse.
- Formation de Dkhissa argilo-grézeuse dans sa partie inférieure et grézeuse dans sa partie supérieure.
- Formation de l'Oued Tifergunit argilo-grézeuse.
- Formation de Chefar El Ahmar représentée par des calcaires.
- Formation de Merhouma argilo-grézeuse.

La coupe la plus complète, décrite par de nombreux géologues (Fabre, 1976 ; Legrand, 1977.), est connue entre le village Ougarta et le kilomètre 30, également des affleurements de moindre importance jalonnent l'oued de la Saoura, jusqu'au Ouarourout. Il s'agit de sept formations Cet étage correspond à une série plissée qui affleure le long de la rive droite de l'Oued Saoura entre Beni Abbes et Tamtert.

3.2.3.1. Dévonien inférieur :

a- Siégénien :

Il a une épaisseur qui varie entre 300 et 400 m, il comprend de la base au sommet :

- 1- Schistes et grès micacés alternant avec de petits bancs de calcaires.
- 2- Alternance de bancs de calcaires décimétriques et de grès noduleux ou en plaquettes.
- 3- Des bancs de calcaires gréseux alternant avec des grès noirs ou des schistes.

b- Emsien inférieur :

D'une épaisseur d'environ 200 m, l'Emsien inférieur est constitué par une alternance de barres de calcaires gris bleu Orthoceras renfermant des grès.

c- Emsien supérieur :

Il est représenté par une centaine de mètres de grès en plaquettes coupés de quelques petits bancs de calcaires gréseux.

3.2.3.2. Dévonien moyen :

a- Eifélien :

Il est formé par deux niveaux calcaires séparés par une vingtaine de mètres de schistes. L'épaisseur totale de cet étage est de l'ordre de 50 m.

b- Givétien :

Le Givétien est constitué à la base par une série schisteuse coupée en son milieu par un banc de calcaire massif, épais d'une dizaine de mètres. L'ensemble peut atteindre une épaisseur de 100 m. Cet étage se termine par une trentaine de mètres de schistes intercalés de bancs de calcaire tendre de plus en plus serrés vers le sommet.

3.2.3.3. Dévonien supérieur :

a- Frasnien :

Il est constitué par des niveaux peu épais de calcaires, séparés par des schistes à la base. Ces formations sont surmontées par une cinquantaine de mètres de schistes blanchâtres couronnés par un banc de calcaires griottes d'une épaisseur de 10 m. Au sommet, le Frasnien est représenté par une quarantaine de mètres de schistes intercalés par des petits bancs de calcaires de plus en plus rares et délités vers le haut.

b- Faménnien :

Le Faménnien est constitué par une série schisteuse comprenant quelques intercalations de bancs de calcaires, couronnée par des calcaires griottes.

Ces quatre formations constituent le Dévonien inférieur complet (le Maître, 1952 et Legrand, 1961, 1962, 1964, 1970, 1977, 1981).

3.2.3.4. Dévonien moyen

Formation de Cheffar El Ahmar : définit à la proximité du Km 30 au niveau du Cheffar El Ahmar, représentée essentiellement par des argiles et des calcaires griottes riche en trilobite, goniatites, brachiopodes, crinoïdes et bryozoaires, (Ph. Legrand, 1961, 1962, 1964, 1970, 1977, 1981).

Cette formation représente le Dévonien Moyen, (le Maître., 1952 et (Legrand, 1961, 1962, 1964, 1970, 1977, 1981)

- Formation de Cheffar El Ahmar ; représentée par des calcaires.

Dévonien sup.

- Formation de Merhouma; est argilo-gréseuse.

- Formation de Ouarourout, c'est une formation formée par une alternance d'argiles et de calcaires avec prédominances d'argiles

Ces deux formations constituent le Dévonien supérieur

(Le Maître, 1952 et Legrand, 1961, 1962, 1964, 1970, 1977, 1981).

3.2.3.5. Le Silurien (1000 à 1250m) est connu sous le nom de la formation de l'Oued Ali, il représente une épaisse série de black shales, constituant une importante roche mère en Afrique du nord (MacGregor, 1996 ; Boote et al., 1998).

3.2.3.6. Carbonifère

Le Carbonifère affleure le long de la vallée de la Saoura, depuis Igli jusqu'à Ouarourout, au Nord de Beni Abbès. Dans cette dernière le Tournaisien est représenté par des grès, des argiles et des calcaires rougeâtres à Goniatites. Ces affleurements sont connus sous le nom de la formation d'Ouarourout.

Carbonifère	Séries	Etages
	Supérieur	Stéphanien, Westphalien Namurien
	Inférieur (Dianantien)	Viséen Tournaisien

Les séries caractérisant cet étage ainsi que leurs faciès au niveau de la Saoura sont représentées sur la figure 2.7 et 2.8, sont synthétisés sur le tableau de la planche 1 pour l'ensemble du bassin de Béchar.

La série d'Hassi Zguilma (d1) : essentiellement argilo-gréseuse avec quelques bancs calcaires au-dessus.

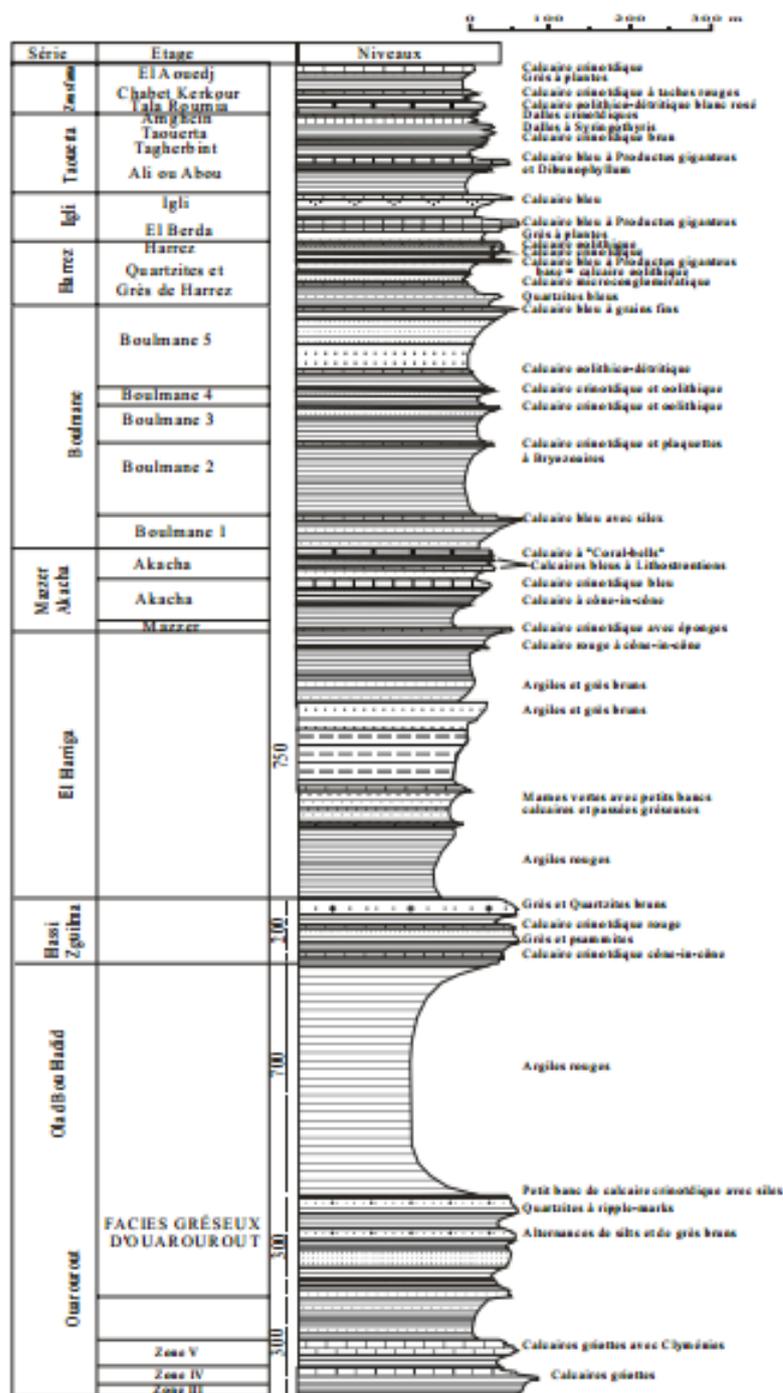


Figure 2.7 : Coupe verticale de la série de la Saoura (Pareyn, 1961)

- Série d’Akacha-Mazzer (d3) : essentiellement calcaire avec des grès
- Série de Boulmane (d4) : grès et calcaires avec des niveaux argileux
- Série de Harrez (d5) : débutant e par des grès marneux avec des intercalations de grès quartzitiques surmontée d'un niveau de calcaire micro conglomératique rouge
- Série d’Igli (d6) : formée essentiellement des calcaires d’El Berda et des calcaires
- Série de Taouerta (d7) : série essentiellement calcaire
- Série de la Zousfana (d8) : grès, calcaires et argiles
- Série d’El Guelmouna (d9) : calcaires, dolomies et argiles

- Série de Djenien (d10) : constituée de deux niveaux essentiellement calcaires- Série des calcaires détritiques du Djebel Béchar : cette série débute au toit du niveau repère des calcaires dolomités à Gigantoproductus (Pareyn, 1961) et se termine avec les calcaires de Djenien (Deleau,1951).

Au-dessus des calcaires bleus du Djenien, le régime marin persiste encore. P. Deleau (1951) décrit une succession de grès à stratifications obliques d'argile à faune marine et de calcaires bioclastiques (étage local) « Kénadzien».

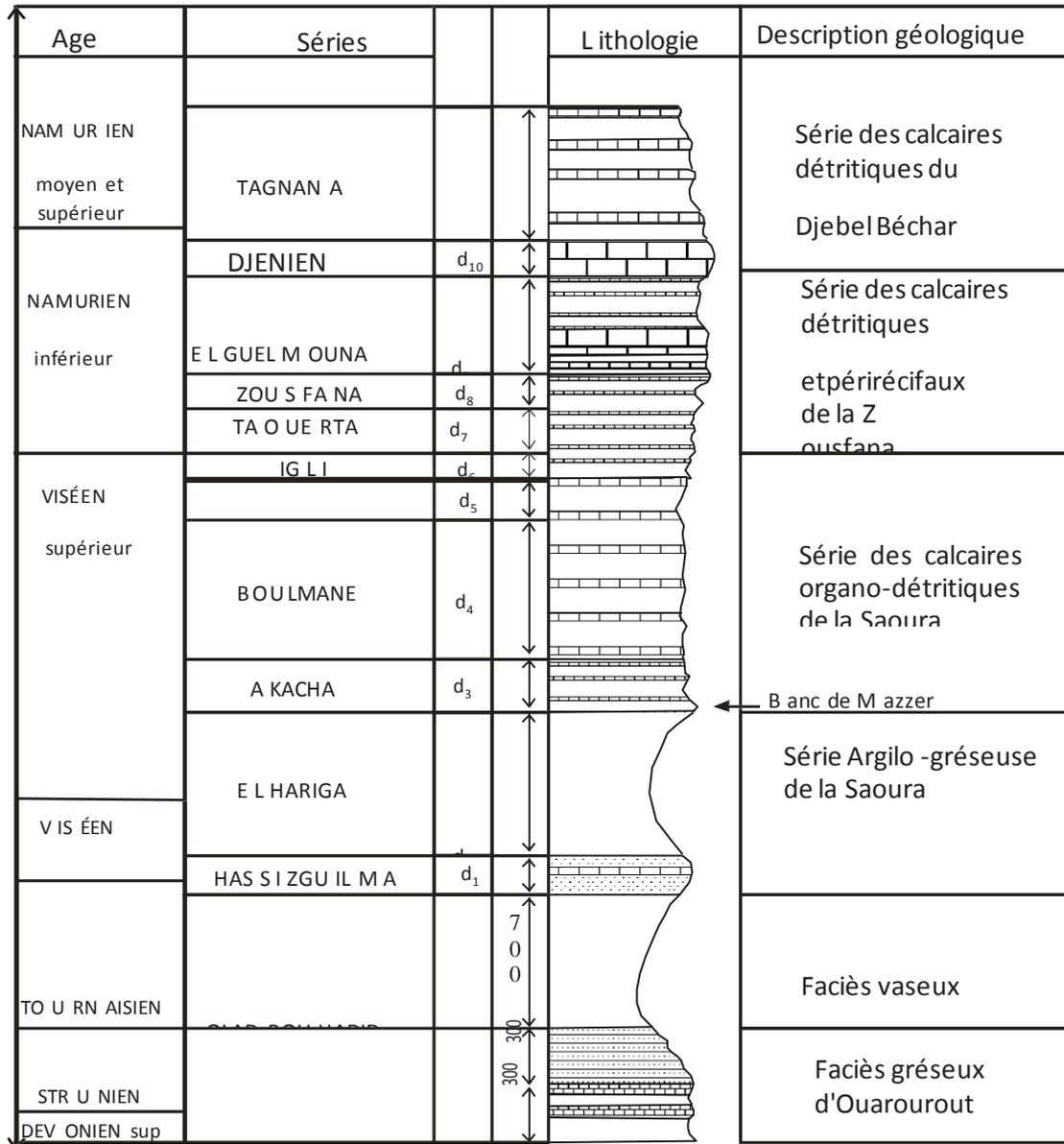


Figure 2.8 : Succession lithostratigraphique du Carbonifère dans le bassin de Béchar

(Pareyn, 1961)

3.3. Le Crétacé (20 à 40m) il s'agit des grès argileux, des calcaires sableux et des calcaires Dolomitiques. Il est connu dans la partie nord-ouest de la chaîne, au niveau de Tadaout El-Beghile, qui est une partie de Kem, il s'agit de grès, d'argile et de calcaire, cumulant une épaisseur de 40m.

3.4. Le Néogène (Tertiaire) (10-40m).

Forme les dépôts de la hamada du Guir, discordants sur les différents termes du Paléozoïque. Il se compose de dépôts fluvio-lacustres couronnés d'une carapace silico-carbonatée (Lavocat, 1972 et Roche, 1973) (fig. 2.9).

La Hamada du Guir répond à toutes ces caractéristiques et se présente donc comme une vaste surface structurale décalée au piedmont de la chaîne atlasique par l'oued Guir, en continuité au Sud-Ouest avec la Hamada du Draa l'intermédiaire de la Hamada de la Daoura (Gevin et al. 1975).

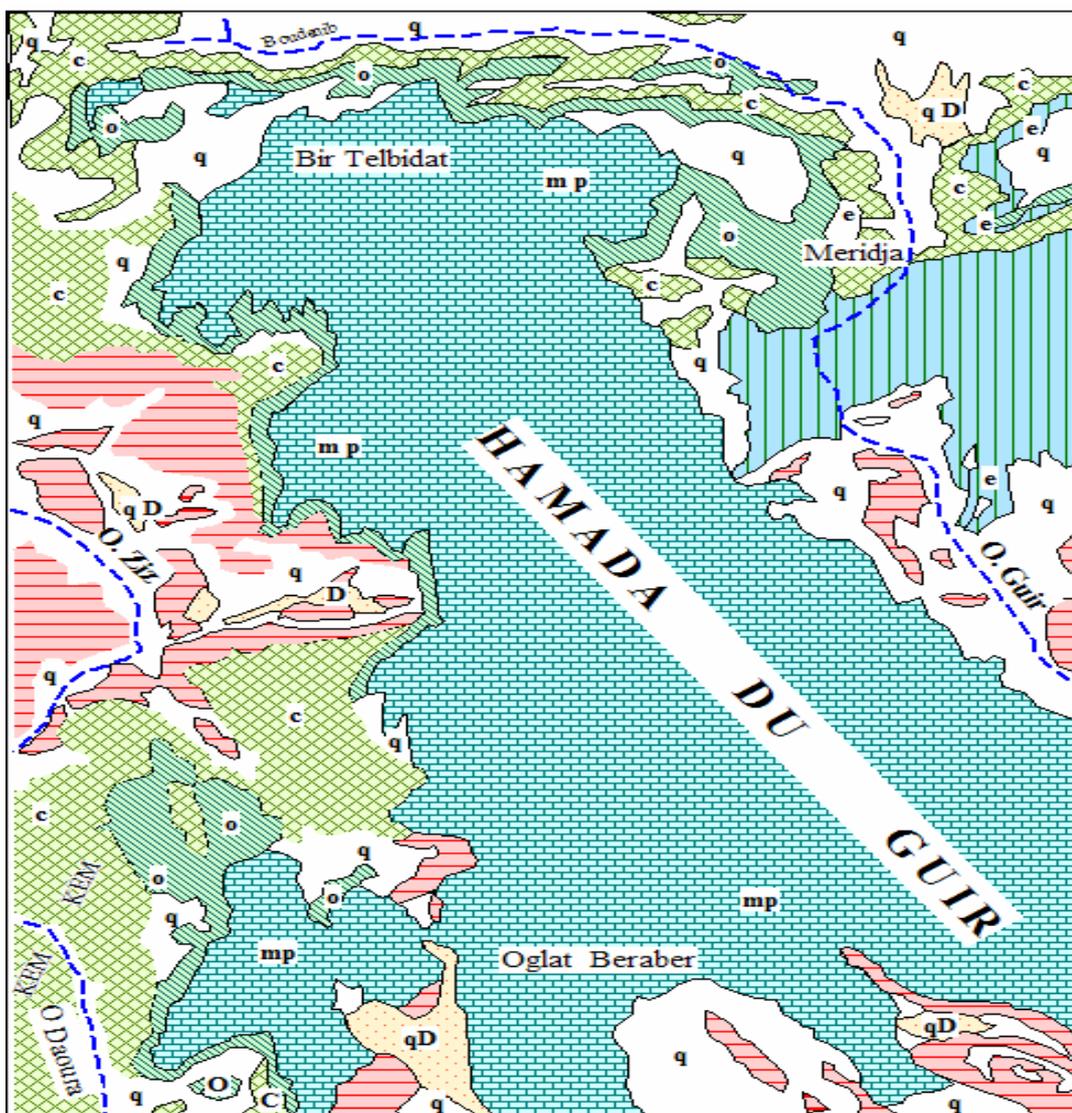
Elle est représentée par des terrains tabulaires discordant sur le substratum, qui constitue le plateau de la rive gauche et celui de la ville. En réalité ces affleurements ne sont qu'une petite portion du vaste Hamada du Guir. Cette dernière est constituée d'argiles gréseuses (Torba) et des calcaires lacustres. L'âge de ces formations est néogène, (Conrad, 1969 ; Roche, 1970 et Ben youcef, 2002). Elle occupe une vaste surface, située entre le piedmont de la chaîne atlasique et le grand erg occidental. Ces terrains font partie des immenses étendues "lacustres" qui s'étalent presque sans interruption depuis le Sahara Occidental jusqu' au Sud algérien. Ils atteignent le bord nord du massif du Yetti en formant une ceinture lacustre de 2000 km de longueur et 250 km de largeur.

Un complexe détritique formé de sable argileux blanc ou rose pouvant renfermer des lentilles argileuses et des niveaux sableux et parfois des conglomérats. Ces formations sont désignées sous le nom de « Torba ».

Une dalle hamadienne constituée de calcaires gréseux meulièrement et lits gréseux.

Pour la zone de Béni Abbès, la coupe de Gara Diba située à côté de la station d'essence est la plus complète, et de point de vue lithologique, cette coupe demeure la plus représentative décrite, de bas vers le haut (Figure. 2.10) : Elle comprend de bas en haut:

- des argiles dévoniennes altérées de couleur marron.
- une lentille de grès durs conglomératiques.
- des sables à stratifications entrecroisées.
- Une dizaine de mètres de «Torba »
- Trois bancs calcaires silicifiés, séparés par deux bancs de grès calcaires. L'ensemble de ces bancs forme la dalle hamadienne inférieure



Echelle approximative : 1/1500 000



Figure. 2.9 : Le substratum de la Hamada du Guir (Lavocat, 1954, modifiée par Mebrouk 2007)

3.4.1. La Hamada du Guir

La Hamada du Guir est limitée au Nord par l’Atlas Saharien (Monts des Ksour), au Sud par le faisceau de la Saoura, le faisceau de la Daoura et Erg er-Raoui, à l’Ouest par le plateau de Kem-Kem et l’anti-atlas marocain et enfin à l’Est par le bassin de Béchar et le Grand Erg Occidental (Fig. 2.9). Les formations tertiaires hamadiennes font partie des immenses étendues «lacustres» qui s’étalent

presque sans interruption depuis le Sahara Occidental jusqu'au Sud Algérien. Elles atteignent le bord Nord du massif du Yetti en formant une ceinture lacustre de 2000 km de longueur et 250 km de largeur (Choubert, 1952). Ces formations reposent en discordance sur le Paléozoïque de l'Anti-Atlas et le plateau Crétacé à l'Ouest. Au Sud, elle repose en discordance angulaire bien marquée sur le Paléozoïque des Monts d'Ougarta.

En 1952 et en 1957, Alimen décrit les terrains hamadiens de Béni-Abbès puis précisa leur âge, attribuant les formations inférieures au Mio-pliocène.

3.5. Le Quaternaire, le cycle érosion-sédimentation régi par des variations climatiques pluviales arides se développent durant le Quaternaire. Ce cycle a donné, en contrebas de la Hamada du Guir, des formations quaternaires accumulées par le cours de la Saoura, Alimen, 1952 et Chavaillon, 1972, ont distingué :

- Des terrasses anciennes (Pliocène - Villafranchien) formées d'une série détritique surmontée de conglomérats et de sables,
- Des terrasses moyennes (Pléistocène) (saourien) formées d'une série d'encroûtement surmontée par des sables fluvio-éoliens avec des passées marneuses qui correspondent à une sédimentation lacustre,
- Des terrasses supérieures (Holocène) composées d'une alternance de sable et de graviers à stratification entrecroisée avec présence de sables alluvionnaires.

Plusieurs études ont été réservées au Quaternaire (Alimen, 1957 ; Chavaillon, 1964 ; Conrad, 1969 et Beucher, 1971).

Les Formations quaternaires sont formées de l'encroûtement des calcaires de la petite Hamada, des dunes de sable, des alluvions de l'Oued Saoura et des dépôts de sebkha. Les formations quaternaires occupent de très grandes surfaces ; elles constituent principalement le sommet de la Petite Hamada, des terrasses alluviales étagées, des encroûtements calcaires plus ou moins silicifiés des Ergs, des alluvions récentes d'oueds et de Sebkhas (fig.2.11)

Les formations quaternaires sont assez limitées dans l'espace, mais elles sont variées. Le quaternaire correspond, vraisemblablement à une alternance irrégulière de sables plus ou moins grossiers et des marnes, formant deux principaux cycles; le Guirien et le Saourien. (Figure.2.11.). L'ensemble de ces terrains s'organisent en terrasses anciennes (terrasses 1), terrasses moyennes (terrasses 2) et terrasses supérieures (terrasses 3). En dehors des accumulations éoliennes du grand erg occidental. En détail le Quaternaire comprend (Figure. 36) :

3.3.1. Terrasses anciennes : (Pliocène - Villafranchien)

Elles sont formées d'une série détritique surmontée de conglomérats et sables.

3.3.2. Terrasses moyennes (le Saourien)

Elles contiennent le Pleistocène moyen et le Pleistocène supérieur (ou Souarien), après le Pleistocène moyen s’instaure un climat aride, voir hyper aride, interrompu au Saourien. Les deux couches sont formées d'une série d'encroûtement surmontée par des sables fluvi-éoliens avec c des passées marneuses, c'est une sédimentation lacustre.

3.3.3. Terrasses supérieures (Holocène ou Guirien)

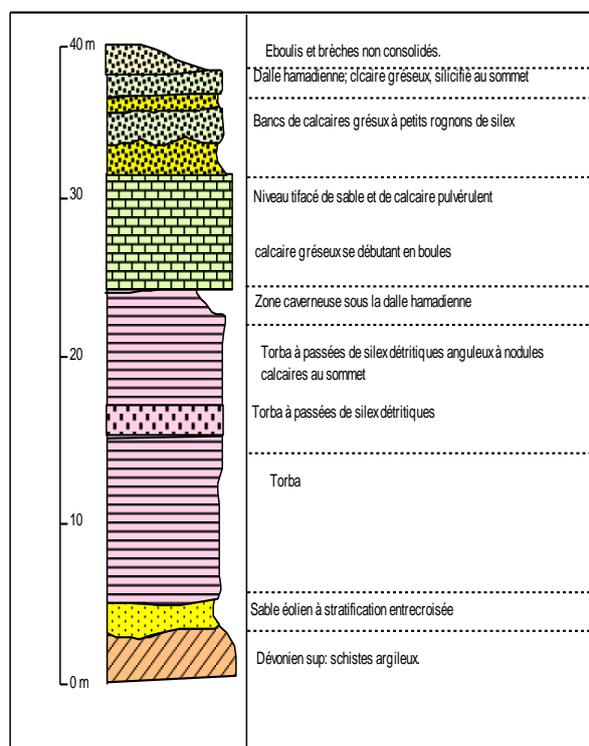


Figure 2.10 : Coupe schématique de Gara Diba (Roche, 1973)

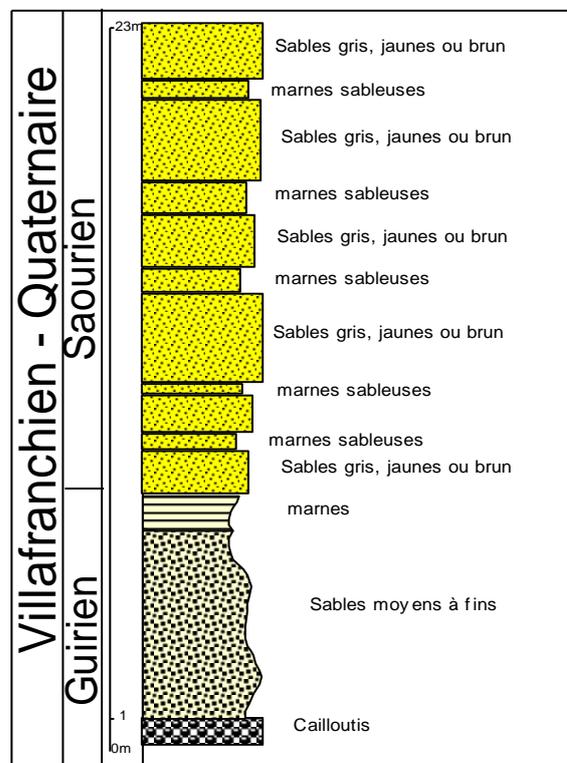


Figure 2.11 : Coupe schématique du Quaternaire (Chavaillon, 1964)

Il s’agit d’une alternance de sables et graviers à stratifications entrecroisées avec présence de sables fins. La terrasse Guirienne apparaît comme une très basse terrasse : ses alluvions sableuses et marneuses, rarement consolidées furent très vulnérables et le plus souvent ont été détruites par l'érosion éolienne et fluviale. Les sédiments Guiriens se différencient des sédiments saouriens par deux caractères: la coloration systématique des sables et marnes en brun, brun-rouge et orangé, et la faible puissance de ces dépôts (5 à 6 m en moyenne et 8 à 9 m exceptionnellement) (Figure. 2.12 a et b). Dans l’espace, les dépôts guiriens se localisent dans le lit mineur de la Saoura par contre le Saourien occupe le reste des surfaces sur le lit majeur.

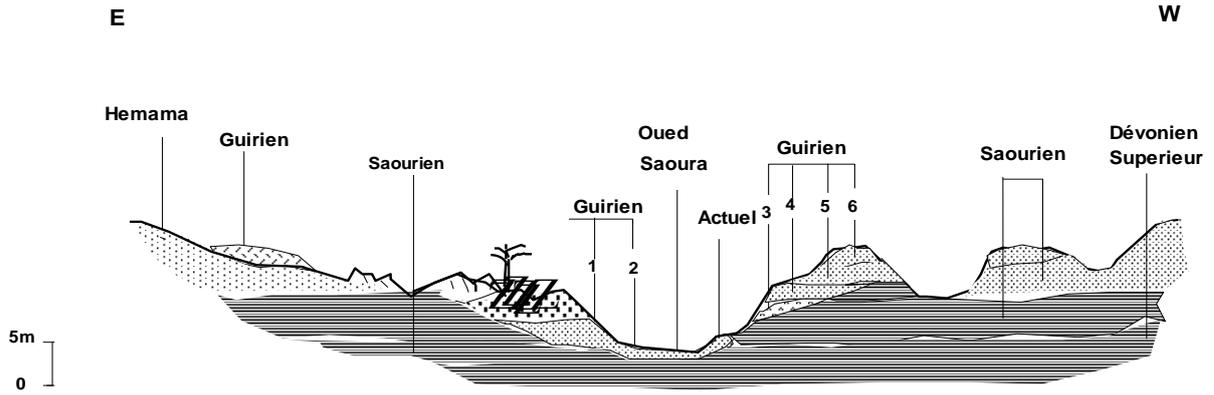
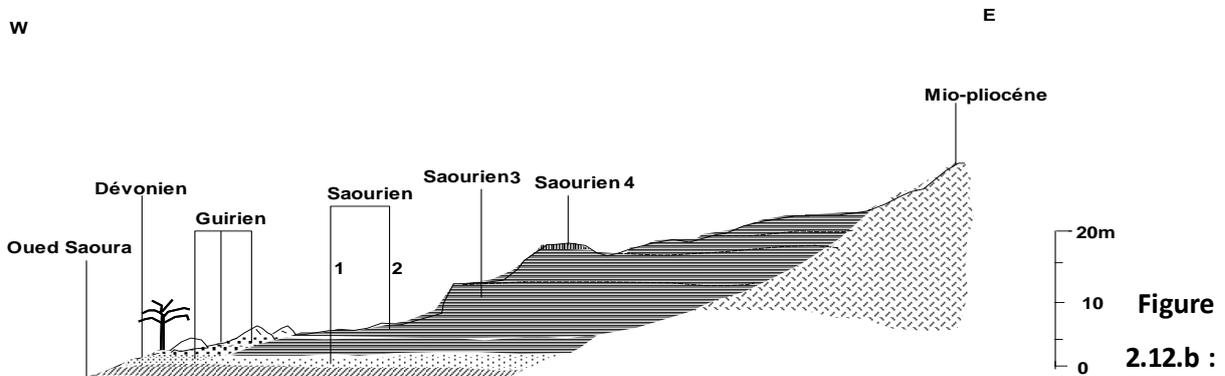


Figure 2.12 a : Coupe à travers la vallée de la Saoura à Hemama, près de Beni Abbés montrant les terrasses guiriennes (Chavaillon, 1964)



Coupe à travers la vallée de la Saoura à Hemama, près de Beni Abbés montrant les saouriennes de la rive gauche (Chavaillon, 1964).

Le cycle érosion-sédimentation régi par des variations climatiques pluviales arides se développent durant le Quaternaire. Ce cycle a donné, en contrebas de la Hamada du Guir, des formations quaternaires accumulées par le cours de la Saoura (Fig.2.13).

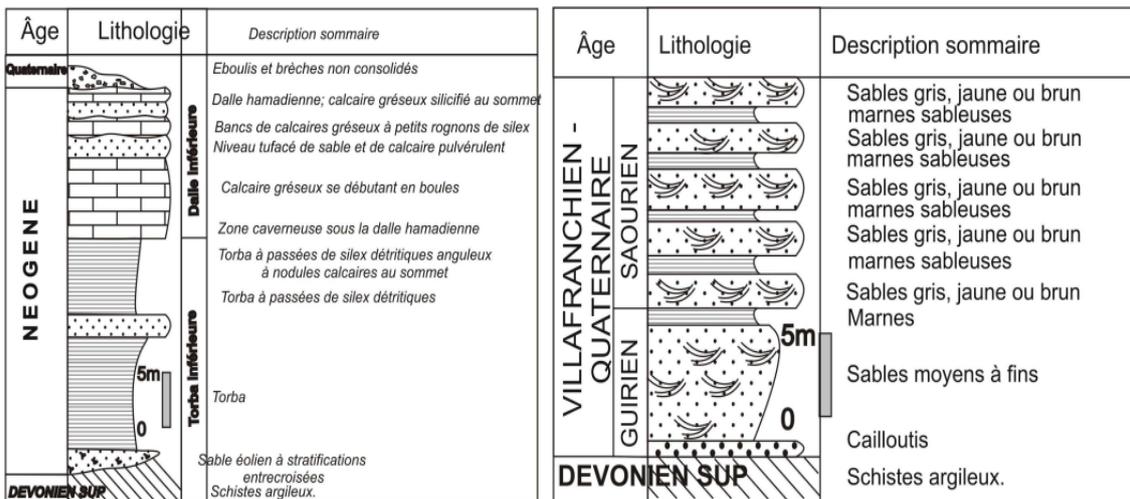


Figure.2.13 : Colonnes stratigraphiques du Néogène et du Quaternaire (Mekkaoui, 2015)

3.3.4. Le Grand Erg occidental

La formation du Grand Erg occidental serait ainsi postérieure au Mazzérien, et plus précisément l'erg serait développé au cours des cycles Ougartien, Saourien et Guirien. Les dunes du Grand Erg recouvrent actuellement la majeure partie des terrains fluviaux lacustres mazzériens, leur étude granulométrique a révélé que les sables des parties hautes dérivent graduellement du sable de la base par remaniement éolien. La mise en place de l'erg occidental ayant débutée au cours de l'aride post-villafranchien.

Le Grand Erg occidental

La formation du Grand Erg occidental serait ainsi postérieure au Mazzérien, et plus précisément l'erg serait développé au cours des cycles Ougartien, Saourien et Guirien. Les dunes du Grand Erg recouvrent actuellement la majeure partie des terrains fluviaux lacustres mazzériens, leur étude granulométrique a révélé que les sables des parties hautes dérivent graduellement des sables de la base par remaniement éolien. La mise en place de l'erg occidental ayant débutée au cours de l'aride post-villafranchien.

Enfin les itinéraires de reconnaissance aux limites de l'oasis de Béni Abbès, nous ont permis de lever une carte géologique simplifiée (Fig.2.14), et constater la succession des formations suivantes :

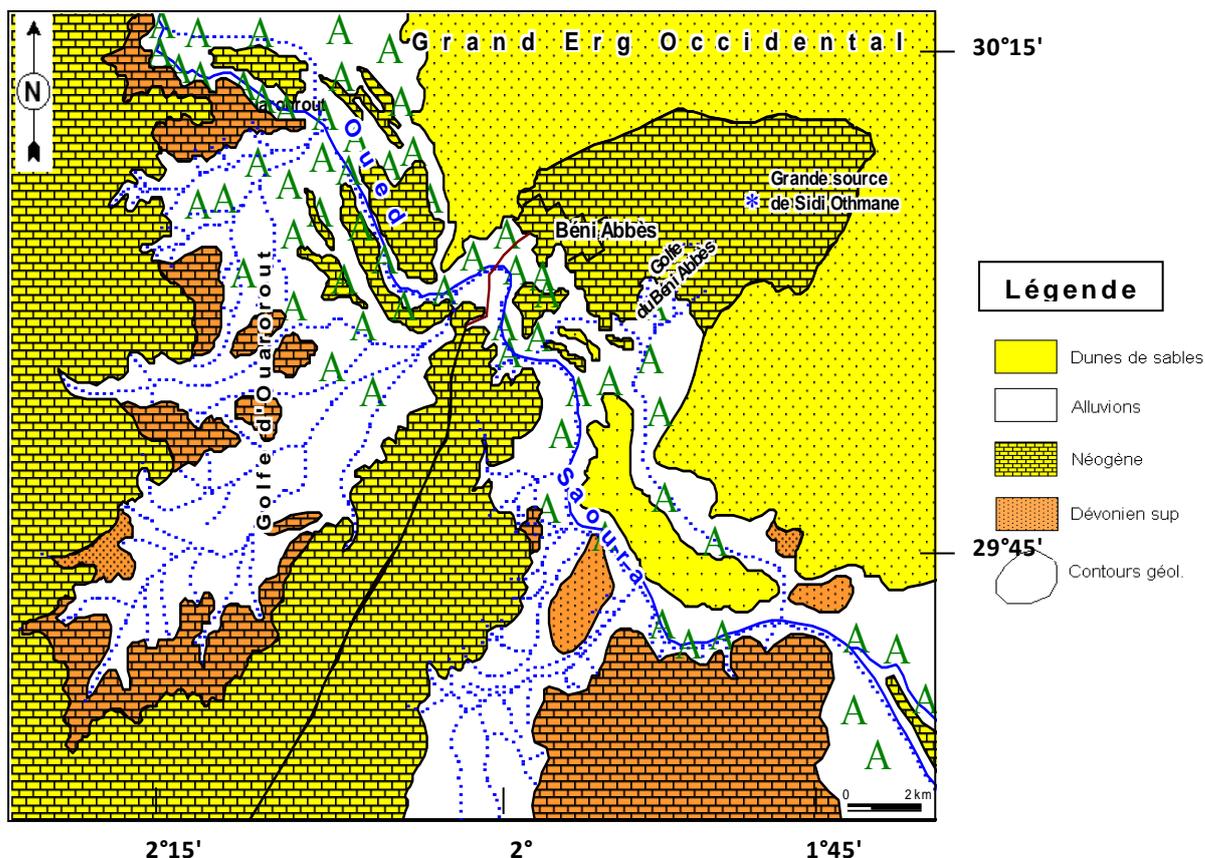


Figure 2.14 : Esquisse photo géologique de Béni Abbès (Merzougui et al, 2007)

En conclusion, ces différentes formations présentent des conditions de réservoir par excellence. Les terrains primaires pourront contenir une superposition d'aquifères.

4. Tectonique et contexte structural

Les monts de l'Ougarta forment une succession d'anticlinaux serrés et de synclinaux larges, de direction NW- SE et parfois recoupés par des accidents de même direction, ainsi que par des accidents de direction NE-SO et E-O.

La tectonique des monts d'Ougarta telle qu'elle se présente aujourd'hui est très complexe, elle cumule sûrement plusieurs pauses tectoniques panafricaines et hercyniens (Donzeau 1971).

La chaîne d'Ougarta est considérée comme une zone mobile subsidente à la jonction du craton Ouest-Africain et du domaine africain proprement dit (panafricain). Les cartes aéromagnétiques suggèrent qu'il est limité par de grandes fractures :

Au Sud-Ouest, entre les chaînes d'Ougarta et le craton ouest-africain par la faille dite Sud-ougartienne (F.S.O) (fig.2.15) ;

Au Nord-Est, entre les chaînes d'Ougarta et la plateforme africaine par une hypothétique faille Nord-ougartienne (F.N.O), qui suivrait la rive droite de l'oued Saoura.

Dans les chaînes d'Ougarta se manifestent donc les tectogenèses panafricaines et hercyniennes et dans une moindre mesure des événements alpins et récents.

4 .1. Tectonique panafricaine

A- Une tectonique souple :

Des structures plicatives affectent les séries volcano-sédimentaires du Protérozoïque supérieure. Ces structures sont orientées en général SE-NW, et sont surtout visibles à Sebkhath el Mellah.

B- Une tectonique cassante :

Deux types de failles sont repérés par aéromagnétisme. Le premier type concerne des failles anciennes, de direction NW qui mettraient en contact des compartiments de socle de composition différente (in Bouima, 1986). Ces failles seraient liées au développement de la dépression marginale du craton car elles s'allongent parallèlement à la bordure de celui-ci. Elles découpent les formations précambriennes en blocs affaissés et élevés, avec des jeux verticaux considérables. Ces failles sont formées probablement dans un régime tectonique distensif. Les variations rapides d'épaisseur des accumulations conglomératiques, sont des arguments à la faveur de cette conclusion.

Le second type concernent des failles de socle transversales (NE) par rapport aux précédentes et dont la naissance a pu être déterminée par la courbure du bord du craton et donc du sillon marginal dans cette région (in Bouima; 1986).

Aux phases cassantes de la tectogenèse panafricaine, peut être attribuée la mise en première approximation des dykes, réparties en deux familles :

Les dykes de basalte à olivine et des microdiorites qui seraient liés au volcanisme basique et intermédiaire pénécotemporain aux dépôts des gres wackesturbiditiques de la Sebkhath el Mellah ;

Les dykes rhyolitiques et andésitiques contemporains de la phase de distension tardive et accompagnés d'une bréchification des formations encaissantes.

4.2. Tectonique Hercynienne

Elle est responsable de la structuration actuelle de la chaîne et se manifeste par des déformations plicatives et cassantes.

A – Tectonique souple (fig.41) :

Elle est responsable de l'existence de trois anticlinorium de direction NW-SE qui sont limités par de grandes failles de socle de même direction.

1/ L'anticlinorium du Kahal Tabelbala :

Il comporte l'anticlinal de Ben Zohra, Erg El Atinim, le synclinal du Kahal Tabelbala, l'anticlinal et synclinal des Oglats Mohamed, le synclinal de Ben Tadjine, et anticlinal de l'Oued Demran.

2/ L'anticlinorium Ougartien (ou central) :

Sur le plan structural, il se caractérise par des plis larges aux flancs raides avec un pendage de 30° à 35° (M, Donzeau, 1971). Les résultats aéromagnétiques montrent que cet anticlinorium correspond à un bombement de socle.

Ce système est compliqué par des plis transverses E-W à ENE-WSW. Le résultat est un système de brachy-anticlinaux et de brachy-synclinaux (Menchikoff, 1952). Les axes des plis NW-SE montrent des plongements de 5° vers le NW.

Les axes les plus transverses sont horizontaux (Donzeau, 1971). En 1983 Donzeau propose deux modèles d'évaluation afin d'expliquer cette structuration. Le premier est une conséquence d'un serrage NE-SW, donnant des plis Ougartiens. Quant au second, il correspond à un serrage N-S responsable des plis transverses. Ce modèle exige la succession de deux phases de compression, chose difficile à argumenter.

M. Donzeau (1983) et Khokhlov, 1980 ont envisagé un autre modèle où la déformation se produit en une seule phase. Les deux directions reflètent un jeu des blocs du socle, liés à un grand décrochement senestre. La contrainte, pour ces auteurs, passerait de 50° dans une première phase et à 90° à la fin de l'Hercynien.

3/ L'anticlinorium de Kerzaz :

Il comporte les anticlinaux de la Sebkhata el Mellah, du Djebel Kahla et Djebel Zeghamra. Les plis NW-SE sont serrés, et limités au NE par la grande faille bordière, séparant la chaîne de la plateforme, créée par l'orogénèse Panafricaine.

Dans l'ensemble Ougarta-Daoura, le serrage responsable des plis ougartiens a été suffisant pour faire apparaître localement, dans les rhyolites de Betouaris, ou Bou Kbaïssat, une schistosité de fracture, très grossière, verticale.

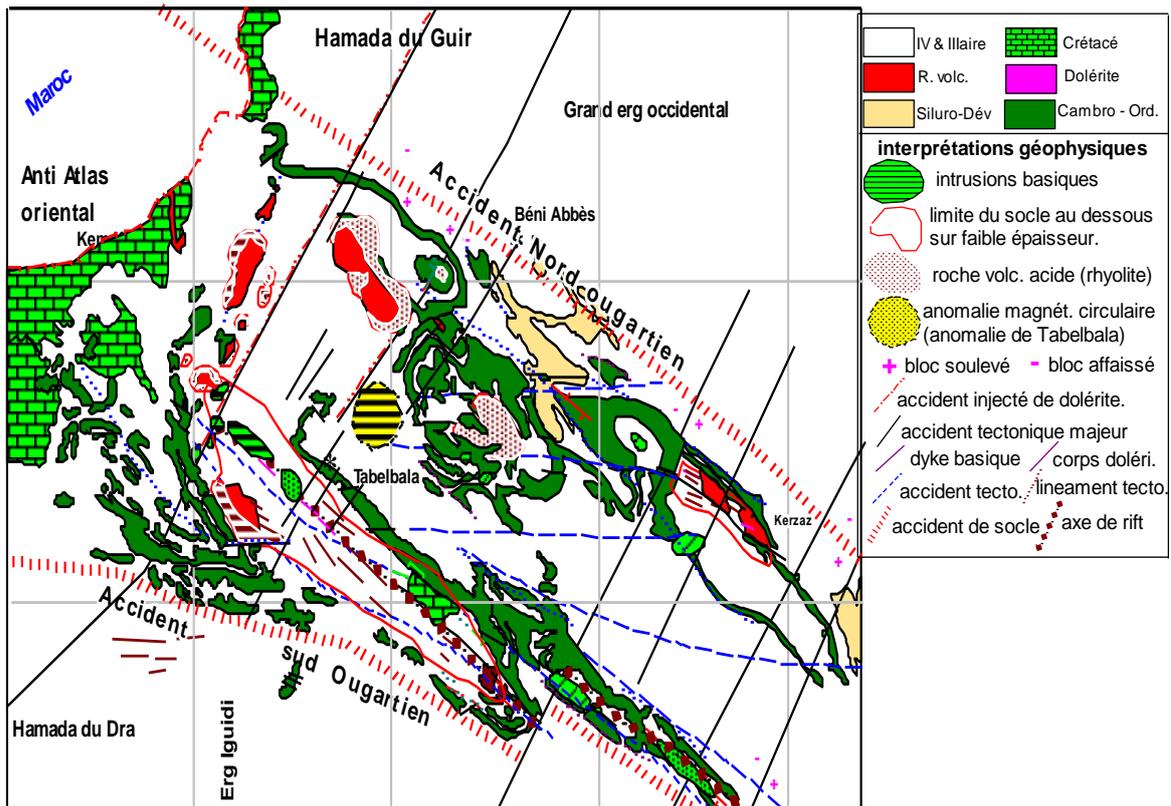


Figure 2.15 : Schéma des axes des flexures des synclinaux et anticlinaux des Monts d’Ougarta
(Donzeau, 1971 et 1972)

B- Tectonique cassante (fig.2.162.17) :

Trois types de failles se distinguent par leurs directions et leur âge relatif :

1/ Les failles NW (N140): Elles sont plus anciennes (Protérozoïque supérieure), et sub-parallèles à la zone de bordure du craton Ouest-africain. Ces failles sont rajeunies à l’Hercynien avec formation de brèches (ferruginisation et silicification donnant des filons de quartz : in Bouïma 1986).

2/ Les failles NE (N45): Représentent les fractures du socle Précambrien. Elles se présentent parfois sous forme de zones de fractures parallèles. Leur rejeu est Hercynien et s’accompagne par une ferruginisation, une bréchification intense et une minéralisation en manganèse.

3/ les failles (N90) : Elles sont tardives et représentent la résultante géométrique des grandes fractures du socle NW et NE. Les failles de Shab El Rhsal, de Bou M’haoud et Nif el Khaouifi ont un jeu important. Les failles de Shab el Rhsal mettent en contact le Précambrien et l’Ordovicien supérieur (in Bouïma 1986). A Bou M’haoud, le jeu est horizontal et est de 500 à 600 m.

Des faisceaux de fractures moins importantes parallèles aux grandes failles présentent des remplissages quartzeux à minéralisation poly métallique (Cu, Pb, Zn, Ba, etc...).

Collomb et Donzeau; 1974, ont décrit des kinks-bands décimétriques affectant la couverture Cambro-Ordovicienne à l’aplomb des trois grandes types de failles.

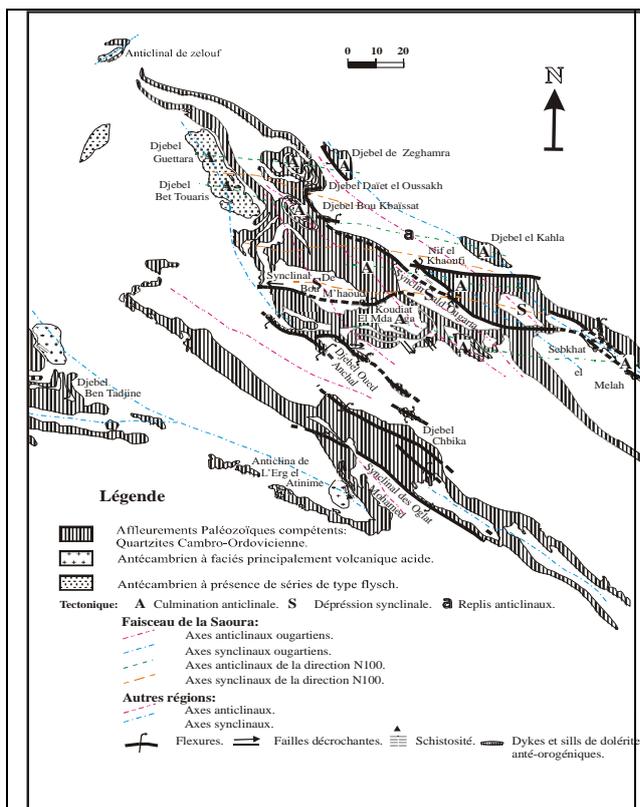


Figure 2.16: Esquisse tectonique des monts d'Ougarta (Donzeau, 1971)

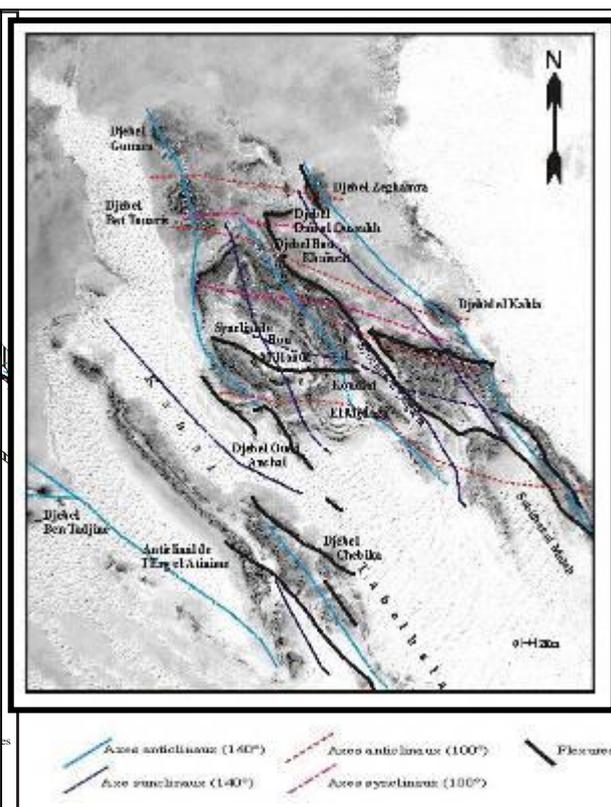


Figure 2.17: Schéma des axes des plis et des flexures des synclinaux et anticlinaux des monts de l'Ougarta. (Donzeau. 1971&1972).

Dans l'ensemble de la chaîne nous avons révélé 408 fractures qui sont réparties dans la couverture sédimentaire et le socle.

5. Approche structurale de la région d'étude

Peu de données sont consacrées à la tectonique locale, néanmoins, on signale que le substratum dévonien est plissé, à l'échelle de la chaîne et on le retrouve à différentes profondeurs dans les puits de la palmeraie.

En plus au plissement, les terrains paléozoïques sont affectés par des failles, dont la direction NE-SW sont les plus visibles (Figure 44). Ces dernières sont réactivées pendant la néotectonique, elles interrompent et disloquent les continuités des dépôts néogènes ce constat a été signalé dans le massif de Guettara et dans la Hamada de Guir.

5.1. Plissement

Le plissement du substratum dévonien représenté par les argiles et schistes rouges, est nettement visible dans quelque puits creusé dans la palmeraie. Localement, on observe des effets de la microtectonique affectant la couverture tertiaire, dictée par les accidents de l'héritage paléozoïque.

5.2. Failles et Fractures(Fig.2.18)

Deux types de failles sont repérés par l'aéromagnétisme. Le premier type concerne des failles anciennes, de direction NW qui mettraient en contact des compartiments de socle de composition

différente (in Bouïma, 1986). Ces failles seraient liées au développement de la dépression marginale du craton. Sur le plan structural, la région de Béni Abbès appartient à l'anticlinorium central d'Ougarta (Blès, 1969 ; Donzeau, 1972 et Khakhlov, 1981). Ce système est compliqué par des failles plus transverses E-W, NW-SE et NE-SW. Ces différentes formations primaires sont affectées par des fractures diversement orientées. Les principales orientations des plans de fractures relevées sont classées par ordre décroissant d'importance (Mekkaoui, 1998). A partir des différentes relations existantes entre les quatre (4) familles de failles déterminées sur l'image satellitale, nous avons pu reconstituer leur chronologie.

- Familles de fractures N 110° - 140°
- Familles de fractures : N 000° - 020° ;
- Familles de fractures : N 080° - 100° ;
- Familles de fractures : N 030° - 070° ;

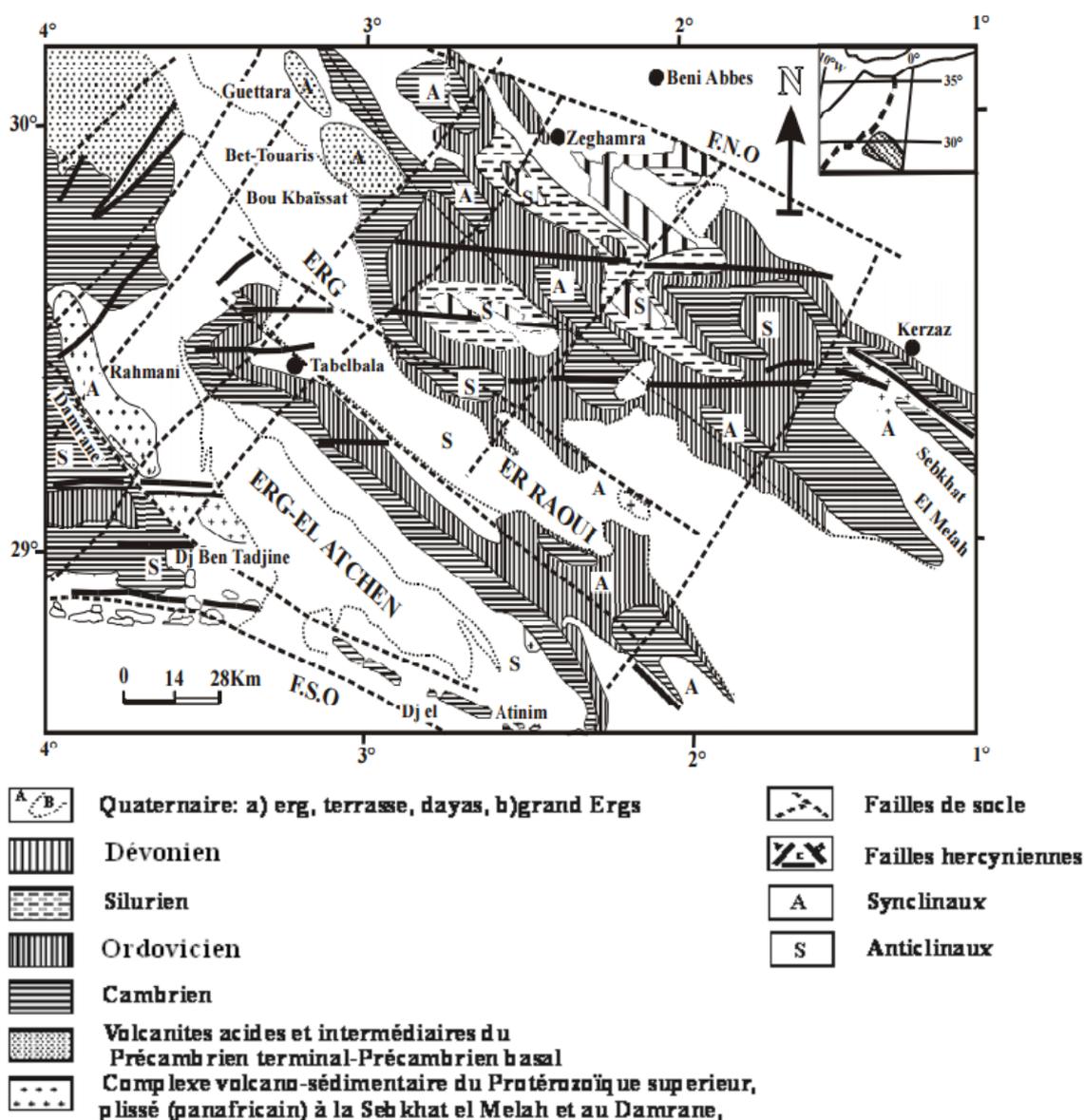


Figure 2.18: Schéma géologique et structural des chaînes d'Ougarta (In Bouïma, 1986)

5.3. Les fissure

Les fissures et les diaclases observées dans la dalle hamadienne et la formation de Torba sur le plateau de la rive droite de la palmeraie sont le résultat de la néotectonique, la dissolution des calcaires par l'effet hydrique et la charge, que subissent les formations indurées. Sur le plan hydrogéologique elles jouent un grand rôle car elles facilitent l'infiltration de l'eau en direction des nappes, participant à leur alimentation. Un système de fractures et fissures est bien visible dans la dalle calcaire du Néogène, dans les niveaux de la Torba.

Des systèmes conjuguées de fractures moyennes N150°E et N175°E, déterminent un « coin enfoncé » mineur d'ordre métrique sur le flanc Sud du pli secondaire de l'Ougarta, orienté N75°E 16°SW. C'est le mode de distribution des micro failles dans la dalle calcaire du Mio-Pliocène Est – Ouest de Beni Abbes.

Les fractures préexistantes peuvent être reprises par des manifestations régionales ou locales. L'ensemble montre que le passage des accidents donne un certain nombre de distribution de la fracturation et que les torsions entraînent la déformation de certaines familles de fractures.

Ainsi la torsion de l'axe du pli de N30°E à N10°E se traduit par la modification des familles de fractures axiales du diagramme **A** par rapport à celles des diagrammes **B** et **C** (Fig.2.20). Cette torsion ne semble affecter que les fractures parallèles à l'axe du pli. L'influence de l'accident N160°E (diagramme **B**) se traduit par l'apparition d'une famille de fractures parallèles à la direction de l'accident majeur, l'augmentation du réseau de fracturation et une désorganisation avec multiplication des réseaux en plusieurs familles :

En plus aux données lithologiques, il est nécessaire de recueillir les données géométriques et structurales. Il est à noter que la région de Beni Abbes appartient au monts d'Ougarta, elle se caractérise par une structure tectonique plissée et faillée.

En terre de tectonique cassante (disjonctive) le structure d'étude est affecté par un système des feuilles, sont les plus remarquables :

- Familles de fractures N 110° - 140° ;
- Familles de fractures : N 000° - 020° ;
- Familles de fractures : N 080° - 100° ;
- Familles de fractures : N 030° - 070

5.4. Plis et failles

A l'échelle de l'affleurement de la dalle hamadienne, les niveaux compétents sont affectés de diaclase et de fracture afin de mieux caractériser ces diaclases, sur le plan fréquences et orienté, **4 stations** ont faits l'objet de mesure (Figure 2.19).

5.5. Diaclases et fractures

Pour recueillir ces données, nous avons tout d'abord choisi deux stations où les affleurements sont bien exposés et représentatifs de la région d'étude pour faire les mesures.

La méthode utilisée, consiste quant à elle, à mesurer le plus grand nombre possible de fractures, peu importe leur orientation ou leur dimension, à une même station. Étant donné la grande quantité de données obtenues à l'aide de cette méthode, il est possible de distinguer les principales familles de fractures.

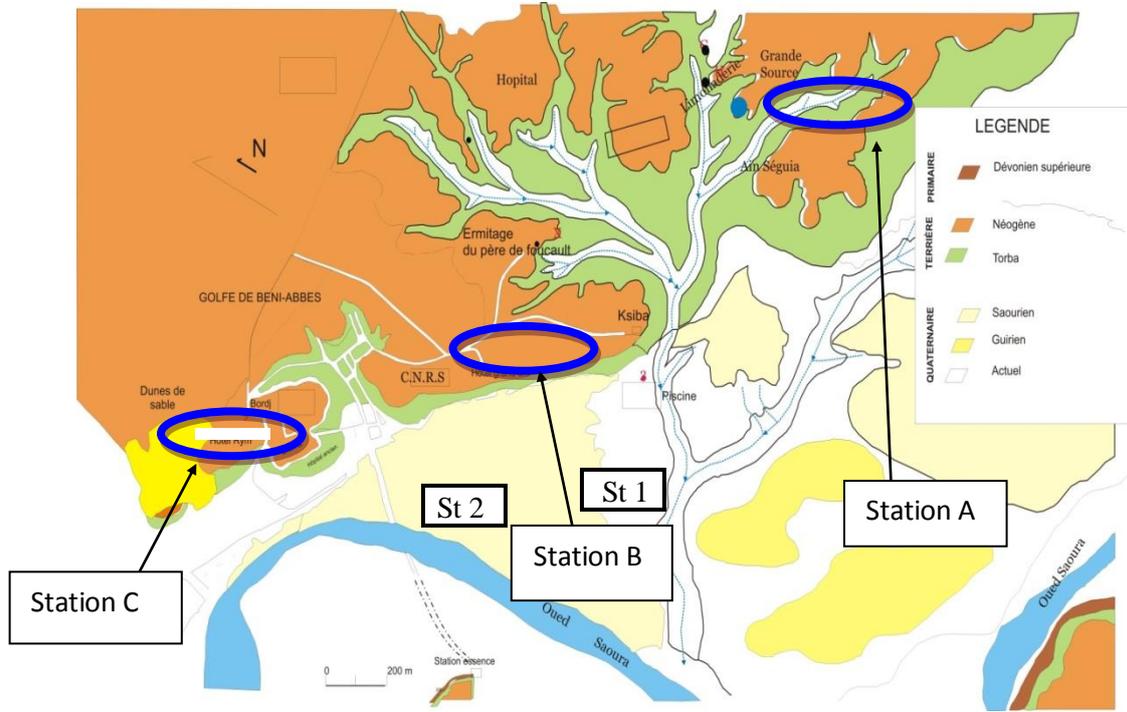


Figure 2.19: Stations d'étude de la Fracturation dans le dalle calcaire du Mio- Pliocène de Béni Abbès

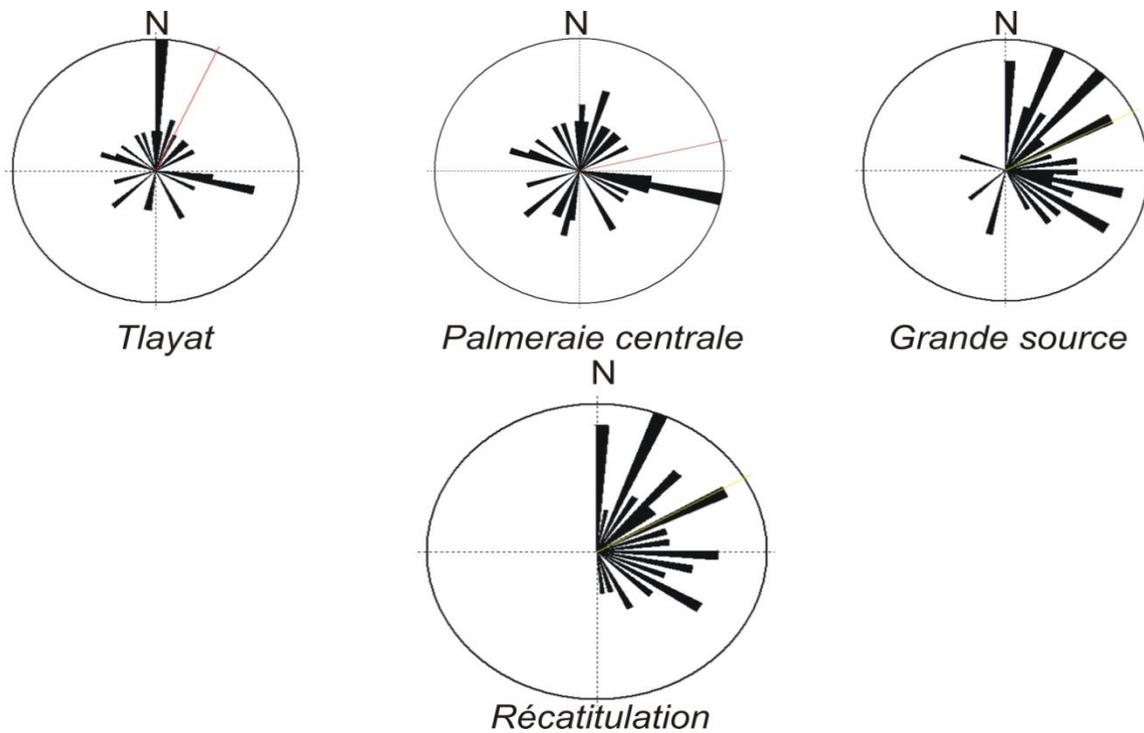


Figure 2.20 : Diagramme polaire de la fissuration des calcaires de la dalle hamadienne à Béni-Abbès. Le traitement des données (annexes N° 1) de fracturation permet de regrouper les fractures en familles ayant des caractéristiques semblables. Un regroupement en fonction de l'orientation est le

plus couramment utilisé pour les études d'aquifères fracturés, car cette méthode permet d'étudier plus facilement l'espacement entre les fractures. Dans la région, les fractures se distinguent en **quatre groupes** principales (Fig.2.20); le premier groupe orienté ESE le deuxième groupe d'une direction WSW, le troisième et le quatrième des directions ENE.

L'espacement entre les fractures est une autre caractéristique importante à mettre en relation pour mieux comprendre l'écoulement des eaux souterraines dans un aquifère fracturé. Plus les fractures sont nombreuses, plus il y aura des fractures qui pourront contribuer à l'écoulement (Fig.2.21). Une quantité importante de fractures permet également une meilleure connectivité du réseau fracturé.



Figure 2.21 : Vue panoramique de l'espacement entre les fractures (station 01)

L'analyse d'un champ de fracture aux niveaux des stations 1, 2, et 3 permet d'obtenir les résultats **d'annexe N° 2**

Selon la classification Association Française de travaux en souterrain (AFTES) des espacements, et la classification terminologie relative à l'ouverture des fissures, on peut déterminer les caractéristiques des massifs fracturés des stations précédentes (tableau 2.1) :

Tableau 2.1. La classification (AFTES) des espacements, et la classification terminologie relative à l'ouverture des fissures.

Station	Espacement	Ouverture
Station1	Très faible 10-100 cm	Très large 0.5-3.5 mm
Station2	Très faible	large
Station3	faible	Très large

D'après le tableau ci-dessus on remarque que les espacements mesurés dans toutes les stations sont faibles à très faibles avec des ouvertures larges ou très larges.

Influence de l'accident N 160° E et de la torsion de l'axe du pli de N 30° E à N 10°

- N110°E à N120°E
- N120°E à N130°E
- N140°E à N150°E
- N150°E à N160°E
- N170°E à N180°E

Donc la disposition des fractures est aussi bien parallèle qu'oblique à la direction des accidents majeurs. Un ensemble de mesures ont été réalisées sur des affleurements des calcaires du Néogène (Mio-Pliocène) à partir de quatre stations regroupant 180 fractures répertoriées au tableau 2.2.

Tableau 2.2 : Répartition de 180 fractures répertoriées

Classes et nombres	Effectifs	Fréquences (%)
0 - 20	26	14.44
20 - 40	26	14.44
40 - 60	30	16.66
60 - 80	18	10.00
80 - 100	28	15.55
100 - 120	02	01.11
120 - 140	16	08.88
140 - 160	12	06.66
160 - 180	14	07.77
180 - 200	08	04.44
TOTAL	200	100 %

Le dépouillement de ces mesures, repris sur un diagramme polaire a permis de faire ressortir 04 orientations principales :

- N 0°E à N20°E
- N20°E à N40°E
- N40°E à N60°E
- N80°E à N100°E

la grande source sorte à travers un joint probablement avec une discontinuité mécanique

Les failles NE (N45) : reflètent les fractures du socle Précambrien. Elles se présentent comme une conduite souterraine qui ramène l'eau vers l'exutoire de la source.

6. Néotectonique

La néotectonique des formations calcaires du Mio-Pliocène de la Hamada du Guir et le plateau de Béni Abbas est dictée par la tectonique ancienne existante, à cet effet, les différentes fracturations

et failles favorisent généralement des sources ou Foggaras au niveau de l’Oasis de Béni Abbès, telle que la grande source. La néotectonique, c’est la réactivation des failles anciennes pendant le Tertiaire (Waisprych et al, 1988).

7. Gisement et Condition de réservoir

Les formations présentes aux limites de la région de Béni Abbes, conditionnent l’existence de plusieurs aquifères et des nappes dans le tableau ci-dessous (Tab.2.3):

Tableau 2.3 : schéma de multicouches et les aquifères à Béni- Abbès

Unité stratigraphique	Formation	Lithologie	Aquifères et Auitards	Nappes et Aquifères	
Quaternaire	Saurien	Alluvions anciennes et récentes	Perméable	Nappes des terrasses et Inféro- Flux	
	Guirien				
Tertiaire	Néogène	Torba	Semi imperméable	Nappe du grand Erg Occidental et la Hamada de Guir	
		Calcaire	Perméable		
Primaire	Carbonifère	Ouaraourout	Schistes, calcaires et grès	Toit imperméable	Aquifères du Paléozoïque
	Dévonien	Marhouma	Argiles rouges et Calcaire Fossilifères	Semi imperméable	
		Chefar el Ahmar	Grès de Marhouma	Perméable	
		Tiferguent	Argiles Armées de Bancs Calcaire	Semi imperméable	
		Drisa	Calcaires Griottes	Perméable	
		Saheb el Djir	Fossilifères		
		Zemilet	Muraille Argiles et Calcaires		
	Silurien	Oued Ali	Schistes noirs, Argiles à intercalations calcaires.	Toit imperméable	
		Dj. Serraf	Quartzites	Perméable	
		Bou M’Haoud	Argiles et Quartzites	Semi imperméable	
	Ordovicien	Foum Ez Zeidy	Quartzites	Perméable	
		Kheneq El Aâthène	Grès et Argiles	Semi perméable	
		Foum Tinslèm	Argile et Grès	Semi imperméable	
		Ain Néchéa	Quartzites	Perméable	
	Cambrien	Sebka el Melah	Arkoses, grès -feldspath	Perméable	

8. Conclusion

L'étude géologique et structurale à confirmer l'existence des horizons susceptibles d'être aquifères. La géologie de la région de Béni Abbès est formée essentiellement d'un substratum constitué d'assises paléozoïques allant du Précambrien au Viséen, surmontées par les formations Néogène et Quaternaire. Par sa géologie particulière, la région de Béni Abbès comporte quatre principaux aquifères qui sont : L'aquifère du Grand Erg occidental, c'est une nappe phréatique de grande ampleur. L'aquifère de la Hamada du Guir emmagasiné dans les terrains tertiaires. Les aquifères importants des terrasses alluviales appartenant au Quaternaire, sont limités dans les talweg des oueds. Les aquifères du Paléozoïque, il s'agit vraisemblablement d'un système multicouche, dont le détail est mal connu. Les failles de direction N 140° E et N 50° et N 70° E, jouent un rôle de drain ou d'alimentation, en fonction des formations qu'elles mettent en contact anormal. Selon l'épaisseur des formations, le Paléozoïque potentiellement important de point de vue hydrogéologique en revanche le Tertiaire et le Quaternaire présentent de faibles épaisseurs et par conséquent, leurs potentialités hydriques demeurent limitées.

Chapitre 3

GEOPHYSIQUE

ETUDE GEOPHYSIQUE

1. Introduction

La connaissance des paramètres pétrophysiques et hydrauliques est indispensable à toute étude portant sur les eaux souterraines et ayant pour objet de localiser, de caractériser et de protéger les ressources en eau.

La géométrie et la structure d'un aquifère peuvent être déterminées à l'aide de la géophysique de surface en utilisant plus particulièrement les méthodes électriques.

L'apport de la géophysique à la recherche d'eau en sous-sol, devient une technique incontournable pour la validation et le positionnement des fractures au sol, mais aussi sur leurs caractéristiques (largeur, épaisseur du recouvrement, profondeur, ...).

Le but de ce travail consiste à appliquer les méthodes géoélectriques de surface et intégrer les méthodes hydrogéologiques afin de comprendre la dynamique des écoulements. L'objectif final de ce travail est une modélisation 2D, intégrant l'ensemble des caractéristiques géométriques, lithologique et hydrauliques. Il s'agit en particulier de:

1. Caractériser l'aquifère au niveau des sites étudiés en déterminant tout d'abord sa géométrie et ensuite sa structure.(profondeur, aquicludes, épaisseurs, monocouche)
2. Déterminer ses caractéristiques lithologiques et hydrauliques.

Les études géophysiques qui seront présentées dans ce chapitre, ont permis de nous donner des informations géométriques sur le sous-sol de la zones d'étude à une profondeur d'investigation théoriquement comprise entre 300 et 400 mètres à l'aide de sondages électriques en ligne AB=2000m.

2. Généralités sur la géophysique de surface

La géophysique de surface comprend nombre de méthodes qui, à partir de la mesure d'un ou de plusieurs paramètres physiques (densité, résistivité électrique, ...), permet d'imager le sous-sol.

Dans ce travail et en fonction des conditions locales de terrain, seules les méthodes géoélectriques à courant continu ont été utilisées. Les méthodes géoélectriques ont été abondamment décrites dans nombre d'ouvrages et de publications : Telford et al. (1990) ; Meyer De Stadelhofen (1991) ; Reynolds (1997) ou encore Mari et al (1999). Nous nous bornerons à en donner un bref aperçu. Ces méthodes sont basées sur la mesure d'un paramètre physique : la résistivité électrique, qui permet dans les cas favorables de caractériser les formations géologiques et de connaître leur disposition dans le sous-sol. Ces méthodes s'appliquent particulièrement bien aux sous-sols constitués de couches stratifiées présentant un bon contraste de résistivité entreelles.



Figure 3.1 : Appareil de mesure géophysiques et mesure des anomalies sur le terrain.

3. Etudes et travaux de géophysiques réalisées

Deux campagnes géophysiques réalisées en trois zones séparées, la première sur le plateau de la rive droite de Béni Abbès, la deuxième zone située dans les dunes de sable du grand erg occidental dans les Tairat et les Gassi(zone d'infiltration et de recharge) et la troisième dans l'aquifère alluviale de la palmeraie. Les différentes campagnes ont été réalisées en collaboration étroite avec l'ANRH(2010), Aquasol(2010) et BETA-Consults(2015).

Une exploitation et interprétation d'une étude ancienne a été réalisée en 1975 dans la région de Béni Abbès. Les différentes études géophysiques réalisées relatives aux zones prospectées (Fig .3.2), devraient permettre une profondeur d'investigation théoriquement comprise entre 300 et 400 mètres à l'aide de sondages électriques en ligne AB=200m. comme suite :

3.1 Campagne géophysique 1975

Cette étude avait pour but d'étudier la dalle hamadienne et d'en déterminer le mur. Les travaux effectués se sont déroulés du 27 juillet au 02 janvier 1975. A Béni Abbès (Yousfi, 1991), 109 sondages électriques furent réalisés sur des profils perpendiculaires à l'Oued Saoura, selon une maille carrée de 500 m de côté (Fig.3.2). Seuls font l'exception les profils L et M.

L'étalonnage fait seulement par un sondage paramétrique E18 réalisé au pied de Gra Diba à Béni Abbès a permis une évaluation des résistivités des schistes du Primaire (Dévonien supérieur).Le diagramme obtenu montre un terrain superficiel légèrement résistant (30 ohm m ou puis un terrain conducteur(10 ohm m) (Fig. 3.3)

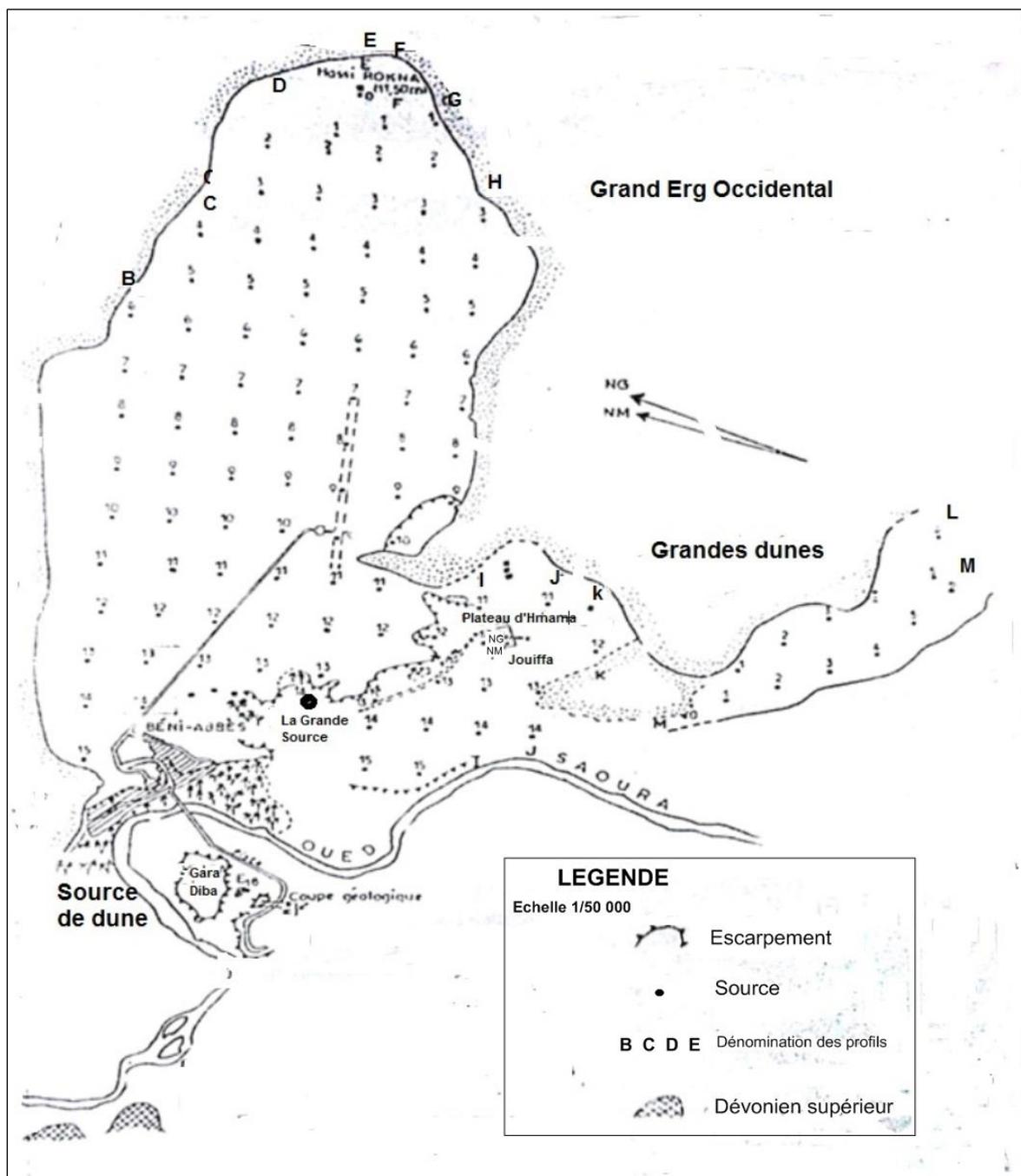
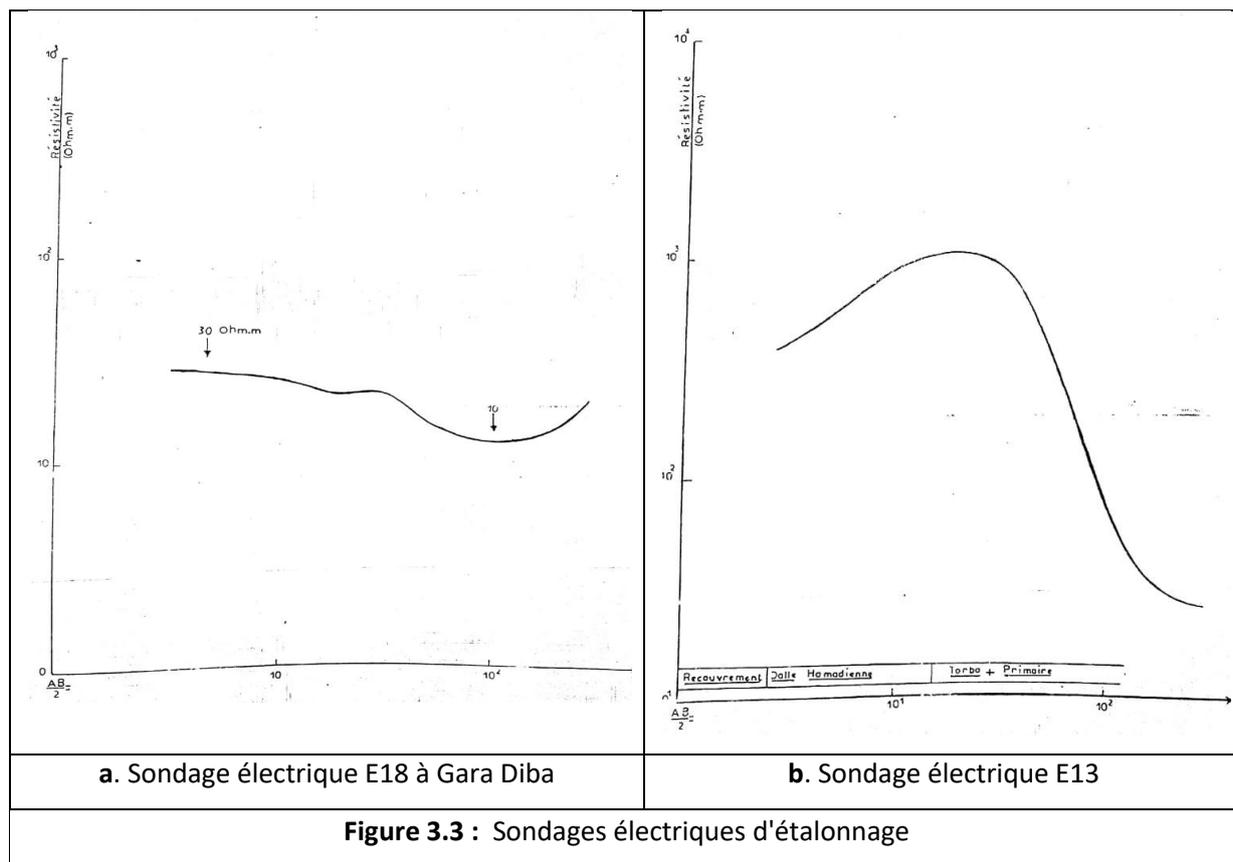


Figure 3.2 : Positionnement des sondages électriques du plateau Néogène à Béni-Abbès

Le sondage E18 réalisé sur le Néogène en bordure du plateau (Fig.3.3) montre que la résistivité de la dalle calcaire hamadienne peut atteindre des valeurs supérieures à 1000Ω.m. L'important conducteur qui lui fait suite tend vers une résistivité de 25 Ω.m se traduisant par la présence de la Troba à dominante argileuse et des schistes du Dévonien, sans qu'il soit possible de distinguer ces formations l'une de l'autre.



3.1.1 Situation de la zone d'étude

La Figure 3.3 donne la position de chaque sondage, tous les sondages des profils B à H se situent sur le Golfe de Béni Abbés à l'exception des sondages G13 et H12.

Par contre les sondages électriques réalisés sur le plateau de Hemama, comme ceux des profils L et M se situent sur le recouvrement Quaternaire.

La coupe du Néogène est très visible à Gara Diba (Chapitre géologie) où on peut distinguer (Fig.3.4):

- La dalle hammadienne inférieure, constituée de calcaire gréseux largement silicifié, sur une épaisseur de 5 à 15 mètres à la base des chenaux sont très visibles, ils se poursuivent jusqu' aux premiers mètres de la "Torba".
- La " Torba, riche en fragments de silex de couleur claire contenant parfois des éléments gypseux, occupe une vingtaine de mètres,
- Un passage sableux et conglomératique variant de 1 à 3 mètres.
- Le primaire sur lequel repose le Néogène constitué de schistes argileux du Dévonien supérieur.



Figure 3.4 : Coupe schématique de Gara Diba (Conrad, 1969)

3.1.2 Les coupes de résistivité (Fig.3.5) :

A partir des données de divers sondages électriques, des coupes de résistivité ont pu être établies.

Au profil K, les coupes sont orientées ENE – WSW, pour les profils L et M, les coupes sont orientées SSE – NNW.

Ces coupes font apparaître les niveaux résistants de valeur très élevées qu'il semble logique d'attribuer aux calcaires hamadiens. Ces niveaux se scindent souvent en deux, et le niveau inférieur présent alors de grandes épaisseurs notamment sur les profils D, E et F. Nous devons cependant noter que les résistivités étant très mal définies il ya des possibilités d'erreurs importantes pour ce qui concerne l'épaisseur de ces niveaux calcaires.

Les profils C, D, E, F, G présentent des résistivités variant entre 40 et 150 Ω m. peut-être s'agit – il de formations contenant de l'eau douce ?

Pour ce qui concerne les autres niveaux conducteurs profonds, leur résistivité est comprise entre 10 et 40 Ω .m. Ces valeurs correspondent à des formations argilo- sableuses de la "Torba" et les schistes rouges.

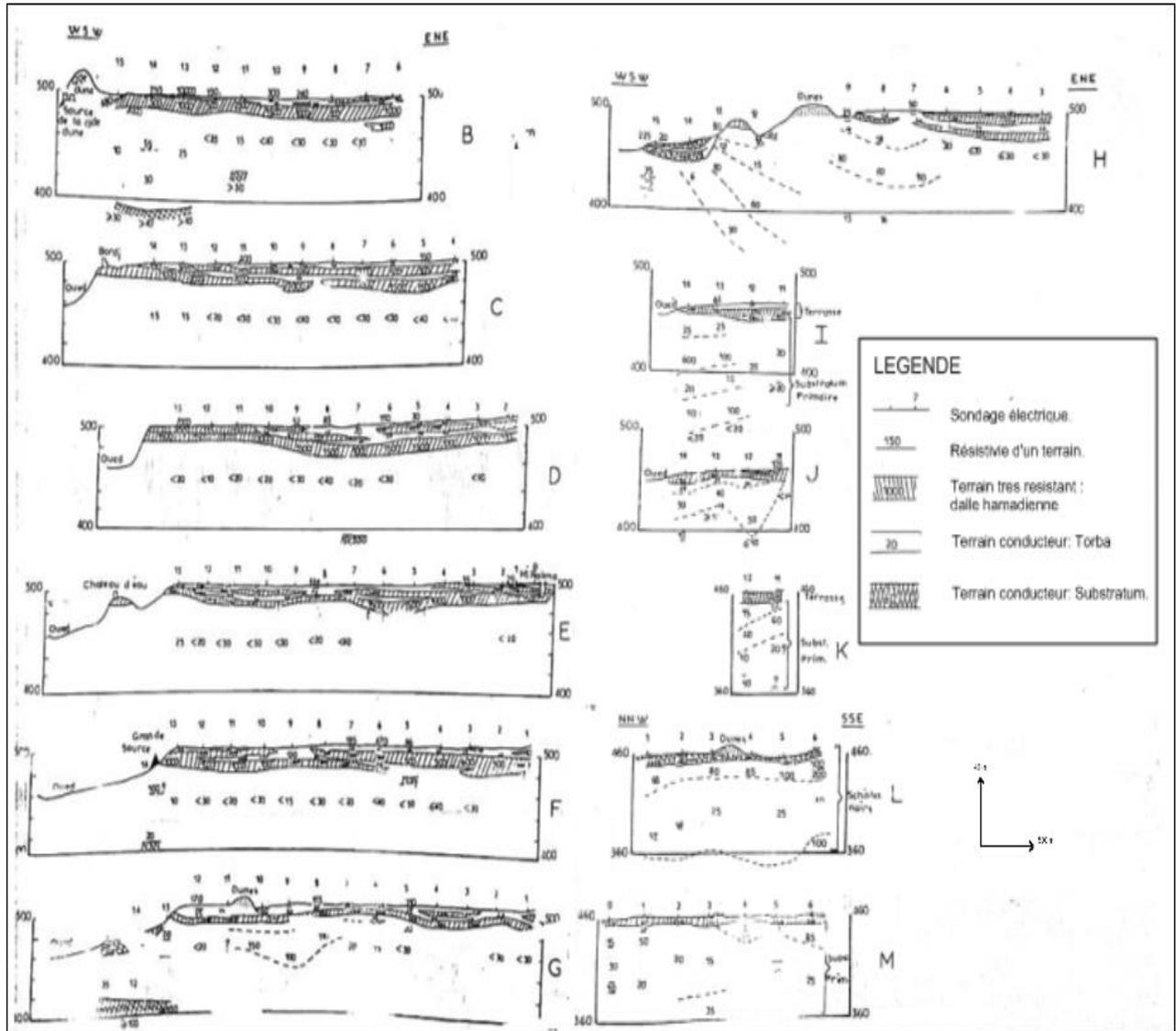


Figure 3.5 : Coupe des résistivités du plateau Néogène à Béni Abbès

Les coupes des profils I.J.K du plateau de Hemama, les limites ouest des profils G et H ainsi que les profils L et M ne montrent plus la dalle hamadienne, mais l'existence de terrains Quaternaires où dominent les sables et les marnes sableuses. Sur Ces dernières coupes le substratum Primaire apparait proche de la surface, à une dizaine de mètres, avec des niveaux moins résistants, cette formation est peut-être aquifère au niveau de Hemama.

3.1.3. Carte de résistivité (Fig. 3.6)

Cette carte est destinée pour une longueur de ligne d'environ 200 m. Elle fait ressortir une plage très résistante au centre de "Golfe de Béni Abbès" aboutissant à la grande source de Béni Abbès, une autre zone résistante apparait en tête des profils D, E et F aux environs de Hassi Rokna. Cette carte précise l'existence de niveaux résistants correspondants probablement au secteur silicifié de cette dalle calcaire, plus ou moins épaisse dans son ensemble.

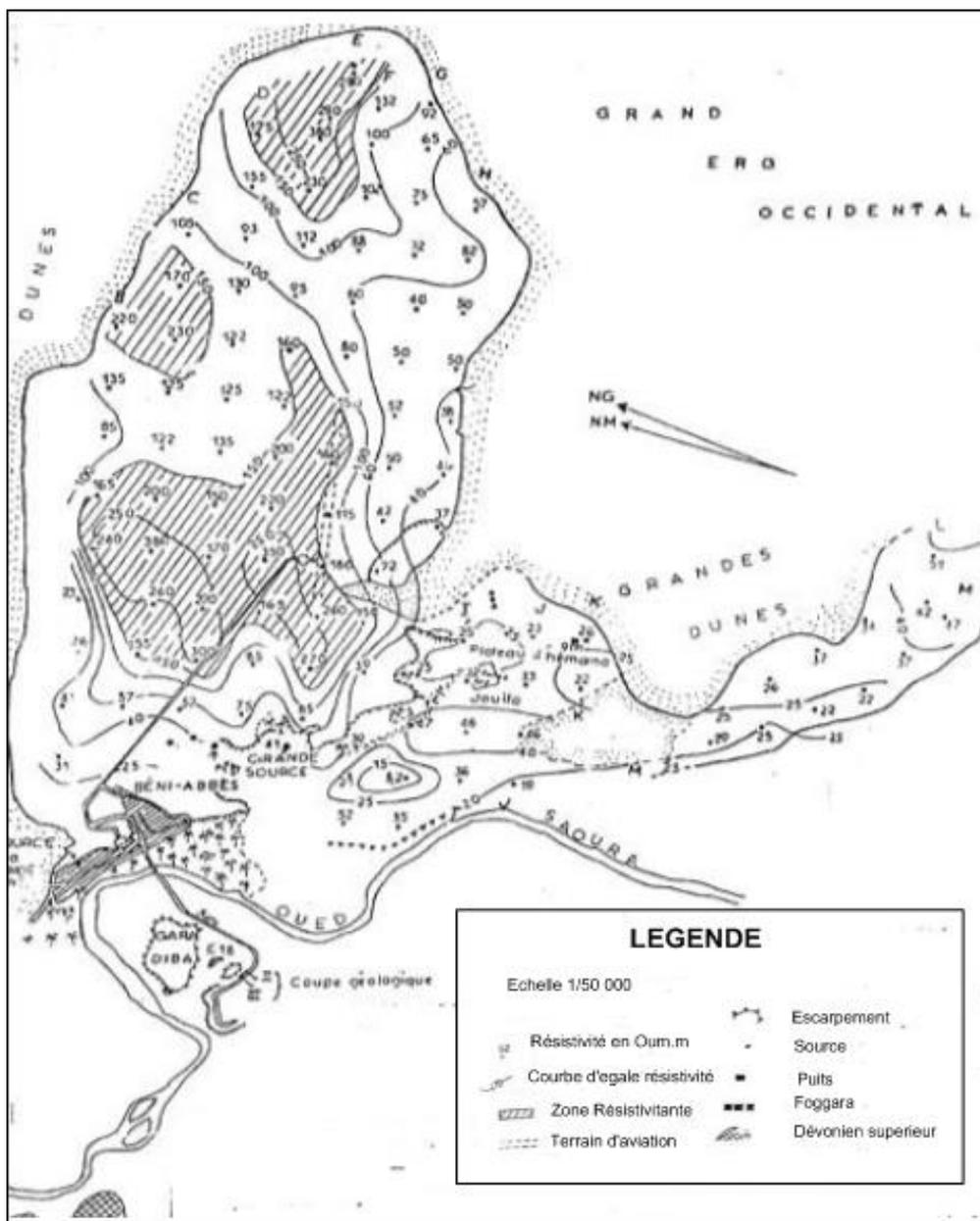


Figure 3.6 : Carte des résistivités du plateau Néogène à Béni Abbès

3.1.4 Carte du toit du niveau conducteur (Fig. 3.7)

Cette carte met en évidence le mur présumé des calcaires hamadiens, il semble une zone profonde qui débiterait vers Hassi Rokna pour aboutir à la grande source.

Au niveau du sondage E₈ un second axe profond s'amorce en direction du sondage électrique C₁₁.

A l'extrémité Ouest des profils G et H, il est difficile d'arriver à une interprétation. Ceci peut être dû à la remonté du substratum primaire.

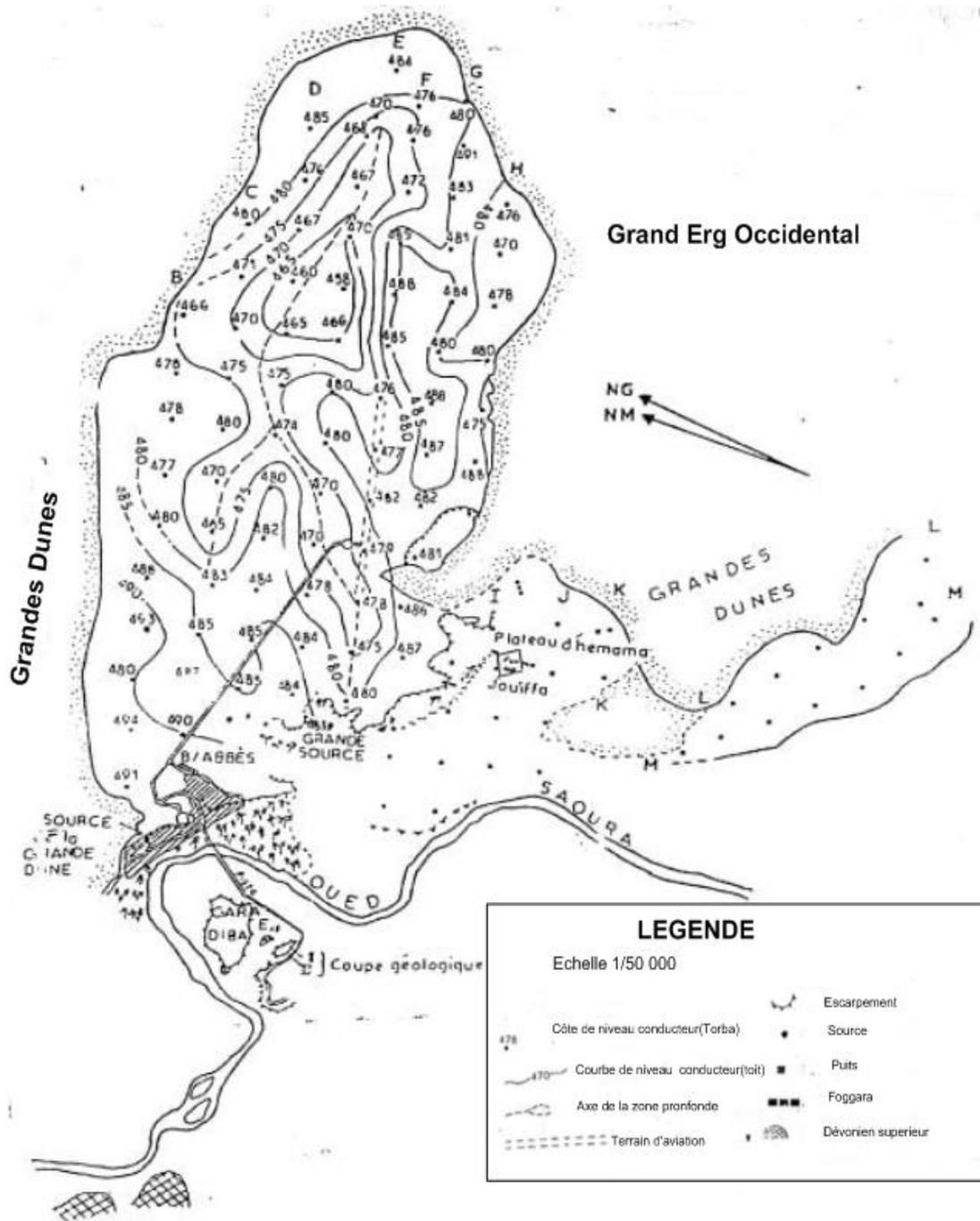


Figure 3.7 : Carte du toit du niveau conducteur du plateau Néogène à Béni -Abbès.

Les résultats obtenus de cette étude montrent que la dalle hamadienne peut être par endroit épaisse (soit que le niveau calcaire s'épaissit soit que d'autres calcaires sous-jacents existent en profondeur). C'est probablement dans ces zones de plus fortes épaisseurs que s'effectuent les écoulements de la nappe qui aboutissent à la grande source.

Les zones résistantes et les zones profondes se situent face à la Grande source. Ceci semble indiquer l'existence d'un parcours perpendiculaire à l'oued. Qui conduit l'eau en profondeur, plutôt que l'existence d'une vaste nappe souterraine au moins en ce qui concerne le plateau étudié

Un point qui nous semble important est que la géophysique nous a permis de mettre en évidence la remontée du substratum primaire au niveau de la grande source de Béni Abbès, phénomène que pourrait permettre d'expliquer la sortie des eaux à ce niveau.

3.2 Campagne géophysique 2010 (Zone plateau de la ville de Béni Abbès)

Dans le cadre de cette campagne l'ANRH de Bechar a réalisé une campagne géophysique par la méthode électrique qui comprend 74 sondages électriques verticaux. Ces sondages ont été réalisés perpendiculairement à la structure générale du secteur étudié.

La présente rubrique expose les résultats de la campagne géophysique réalisée par le bureau d'étude hydrosol pour le compte de l'ANRH dans la région de Béni- Abbès durant la période Avril Mars 2010.

La méthode employée est celle des sondages électriques verticaux selon le dispositif de Schlumberger avec une ligne d'émission de courant AB=2000m soit une profondeur d'investigation inférieure à 500m (Fig.3.8).

Les différents sondages électriques ont été répartis sur 11 profils, (Fig.3.8), tous espacés d'environ 1Km.

La zone du plateau étudiée, est située dans les environs immédiats à l'Est de la ville de Béni Abbès (Fig. 54). Elle est entièrement entourée par les dunes de sable du grand Erg occidental, et peut être délimitée par les coordonnées UTM suivantes :

- Au Nord par la latitude UTM 3336000 m.
- Au Sud par les Latitudes UTM 3330000 m.
- A l'Est par les longitudes UTM 588000 m.
- A l'Ouest par La longitude UTM 582000 m.

Elle est bordée à l'Est par le Grand Erg occidental, à l'ouest par le plateau de la Hamada du Guir (Mio-Pliocène) et l'oued Saoura.

La zone 1, c'est la zone la plus importante dans notre projet scientifique, d'une superficie de 30km², a fait l'objet d'une campagne de mesures qui a été menée durant le mois de Mai 2010. Etant en présence d'un type lithostratigraphique très spécifique à la région, avec le manque de sondage(s) profond(s) (300 à 500 m), la tâche est rendue plus ardue par la succession répétitive de niveaux argilo-sableux. Dans ce type de formations grésio-argileuses, les terrains sont relativement faciles au fonçage et les niveaux de la nappe sont peu profonds.

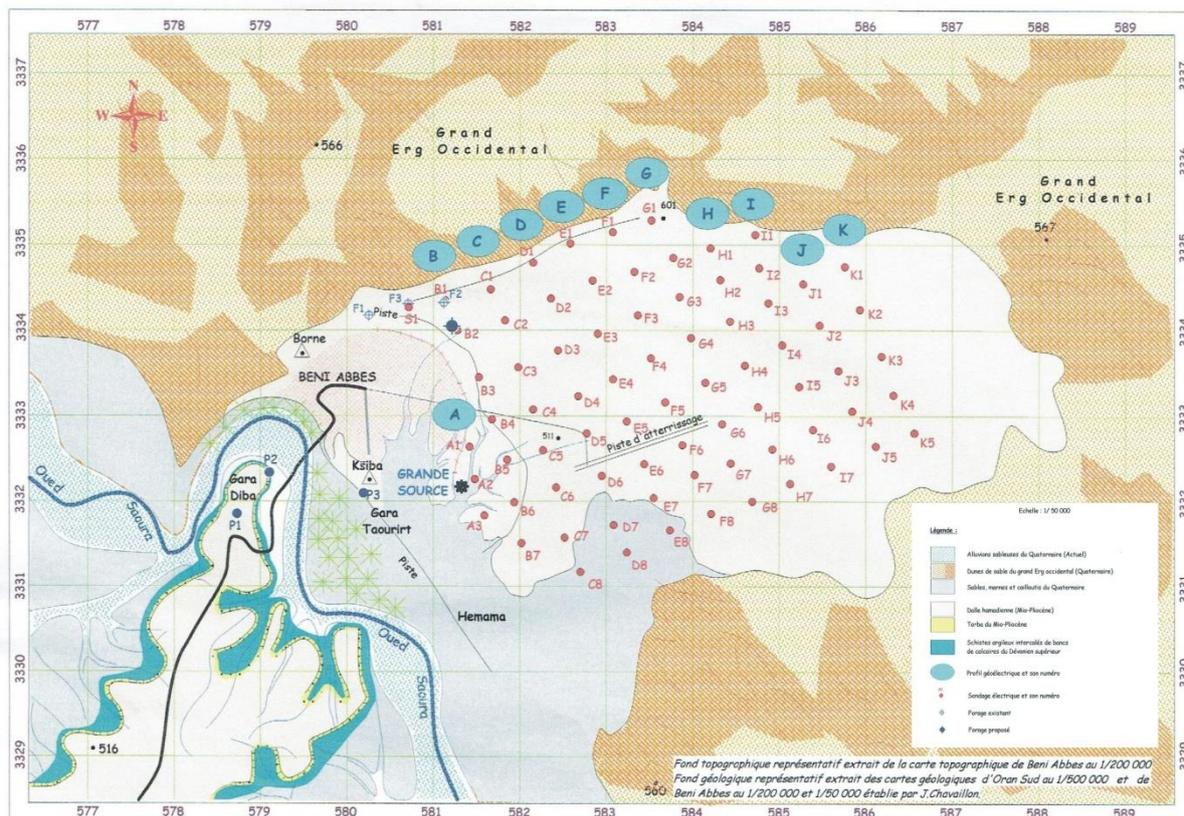


Figure 3.8 : Situation et positionnement des sondages et profils.

3.3 Etalonnage des données géophysiques

L'attribution des valeurs de résistivités aux différentes formations géologiques, a été établie d'après les données relatives aux sondages paramétriques exécutés directement sur, ou à proximité des formations et l'étalonnage des sondages électriques B1 et S1 réalisés auprès de deux forages situés au Nord de Béni-Abbès près de l'Erg.

3.3.1 Etalonnage du sondage électrique S1 à l'aide du forage F3

Le sondage électrique B1 montre l'existence de trois niveaux:

- Un premier horizon résistant avec une résistivité apparente de 700 Ohm. m et une résistance transversale $R_t = 4900 \text{ Ohm. m}^2$, correspondant aux calcaires blancs de la dalle hamadienne dont l'épaisseur recoupée au niveau du forage F3 est de 16m, soit une résistivité réelle $\rho = 306 \text{ Ohm. m}$.
- Un second horizon moins résistant avec une résistivité de 70 Ohm.m, est représenté par des sables argileux et des calcaires appartenant aux formations de la « Torba » d'âge Mio-Pliocène.
- Le troisième terrain a une résistivité de 20 Ohm.m caractéristique des argiles et des argiles schisteuses attribuées au Dévonien.

- Le quatrième horizon résistant dont le toit présente une résistivité de 50 Ohm.m, correspond aux formations à dominance schisteuses du Dévonien supérieur.

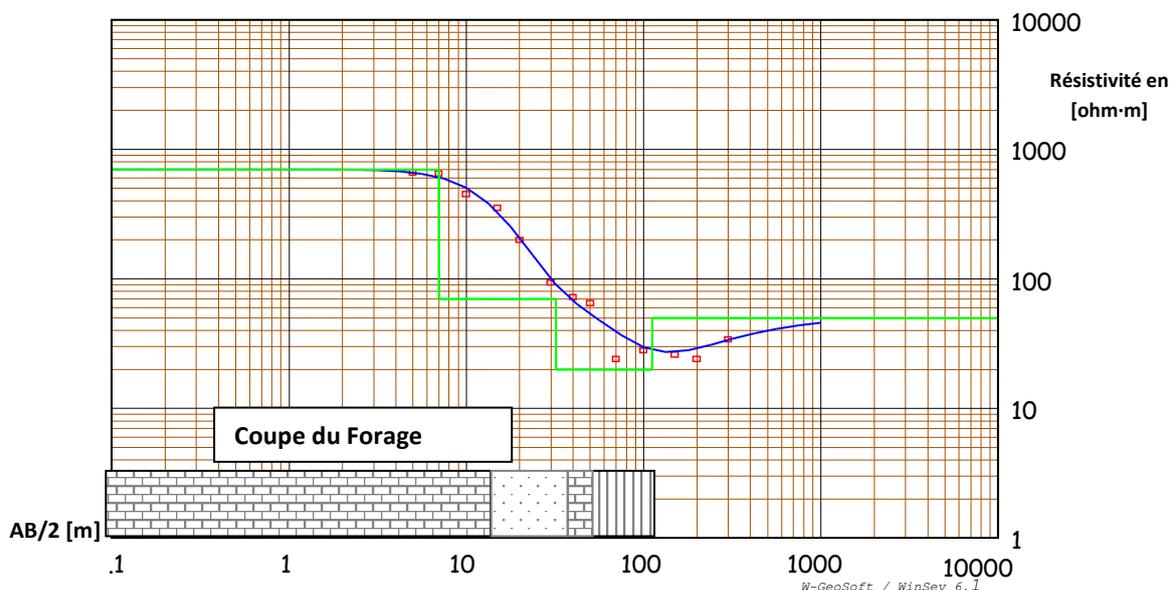


Figure 3.9 : Etalonnage électrique de S1 à l'aide du forage F3

3.3.2 Etalonnage à l'aide du sondage électrique P1

Ce sondage a été effectué directement sur les formations mio-pliocènes au niveau de Gara Diba. Il montre (Fig.3.9) l'existence de deux terrains superposés, dont les résistivités respectives sont de 1500 et 1200 Ohm.m. L'ensemble constitue la dalle hamadienne qui repose sur des bancs de calcaire gréseux silicifiés. La RT de ces formations est de 46500 Ohm.m², et leur épaisseur réelle est de 17m, ce qui donne pour la résistivité réelle $\rho = 2735$ Ohm.m.

Le troisième terrain est conducteur, il a une résistivité apparente de 18 Ohm.m et une résistance transversale $R_t = 1260$ Ohm.m² caractéristique des formations de la Torba. L'épaisseur de celle-ci sur la coupe est de 20m, et la résistivité réelle égale à $\rho = 63$ Ohm.m.

Le dernier horizon recoupé a une résistivité de 65 Ohm.m représentative des schistes argileux altérés.

3.3.3 Etalonnage à l'aide du sondage électrique P1(Fig.3.10)

Le sondage électrique P2 réalisé directement sur les schistes argileux dévoniens de Gara Diba, permet de leur attribuer d'après le modèle, une résistivité de 25 à 120 Ohm.m.

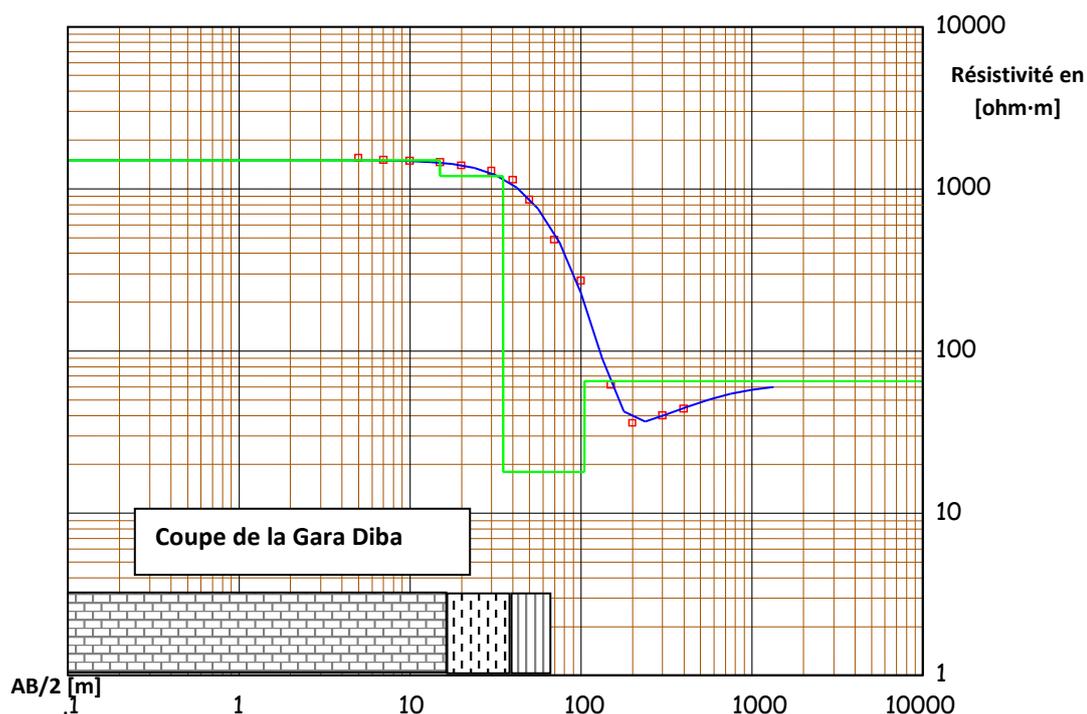


Figure 3.10 : Etalonnage du sondage électrique paramétrique P1.

3.3. Etalonnage à l'aide du sondage électrique P2 et P3 (Fig 3.11 -3.12)

Le sondage électrique P2 réalisé directement sur les schistes argileux dévoniens de Gara Diba, permet de leur attribuer d'après le modèle, une résistivité de 25 à 120 Ohm.m.

Le sondage électrique P3 montre sous un faible recouvrement résistant correspondant aux argiles caillouteuses et sableuses constituant la piste, un horizon conducteur appartenant aux marnes mio-pliocènes de résistivité égale à 10 Ohm.m. Les marnes surmontent à cet endroit un niveau plus résistant (60 Ohm.m), qui correspond probablement à du sable et des conglomérats de la base de la série « Torba ».

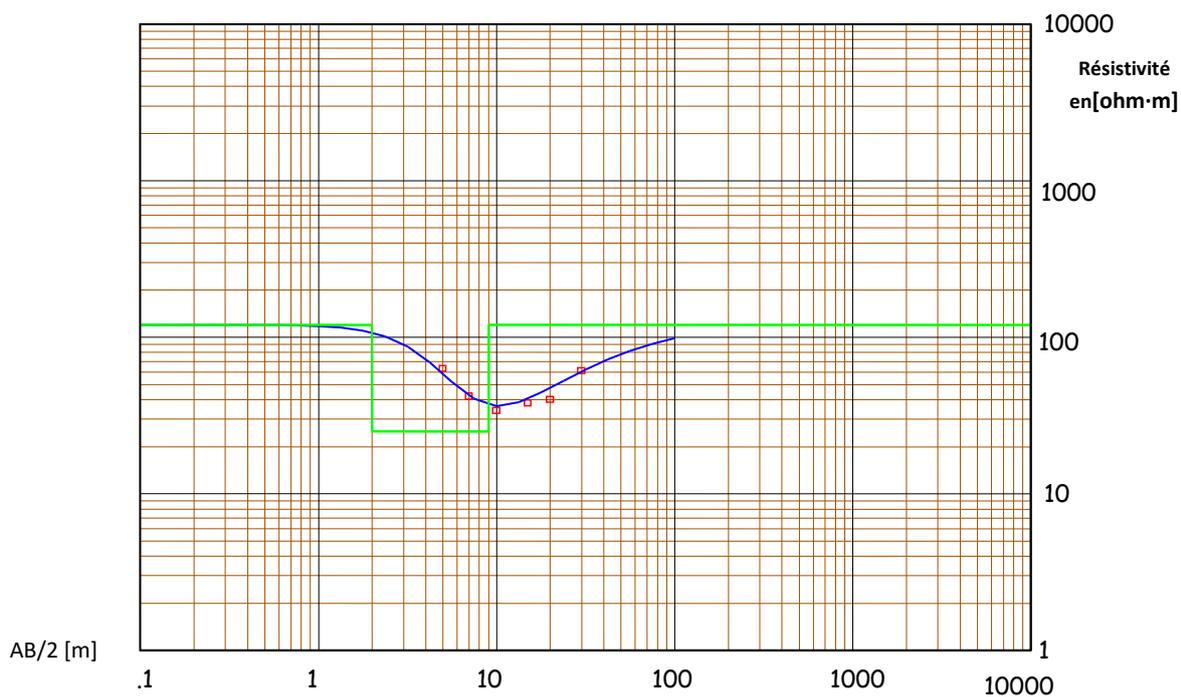


Figure 3.11 : Etalonnage du sondage électrique paramétrique P2.

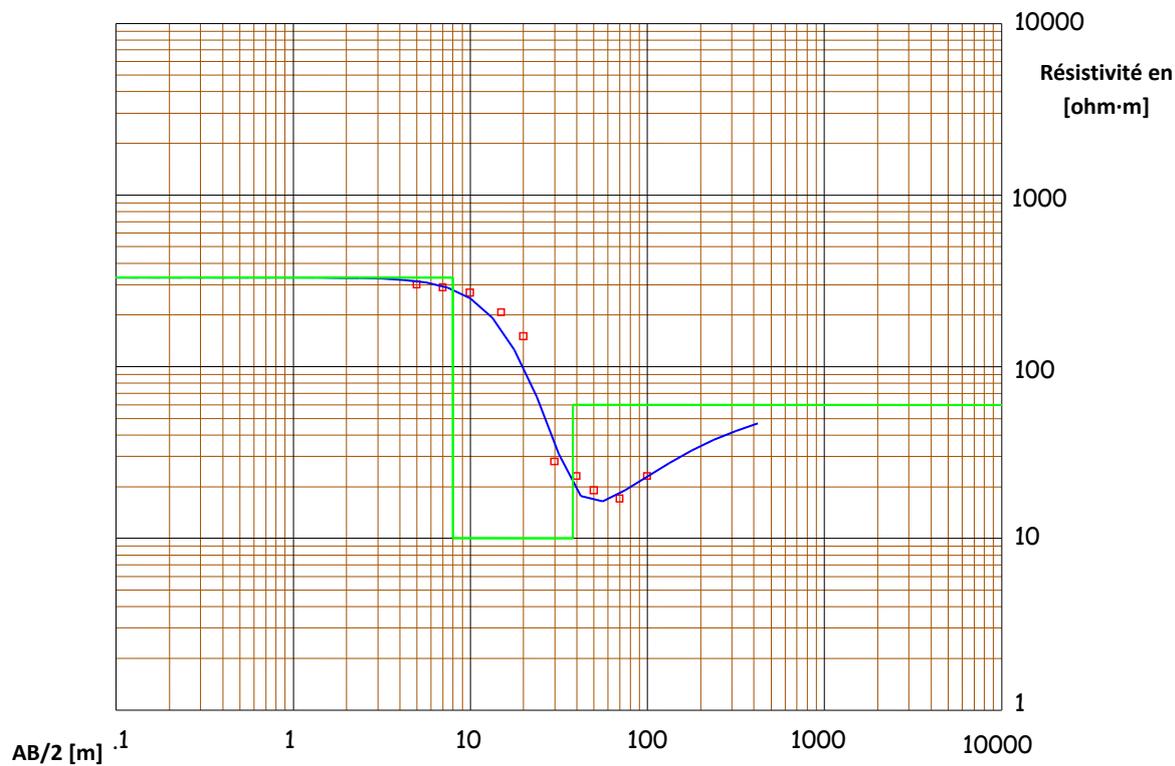


Figure 3.12 : Etalonnage du sondage électrique paramétrique P3.

L'analyse des différents sondages électriques, l'étalonnage des sondages B1 et P1, ont permis par conséquent d'adopter pour les différentes formations, les résistivités mentionnées dans le tableau N°01 ci-dessous :

Tableau 3.1 : Echelle des résistivités adoptée.

Formation Géologique	Age	Sondage électrique	Résistivité en Ohm.m.
Croûte calcaire	MIO-PLIO- QUATERNAIRE		≥ 180
Recouvrement sablo-argileux		H5 – E4	40 - 160
Dalle hamadienne		F2 – B4	100 – 2500
Torba Argilo-sableuse		H7 – B1	17 - 70
Torba sableuse, graveleuse et conglomératique.		F4 – E5	100 - 900
Argiles et schiste argileux	DEVONIEN	H6– C4	10 – 70
Schiste argileux avec intercalation de bancs calcaire		F1 – J2	80 - 250

3.4. Résultats de la prospection électrique

3.4.1. Interprétation des coupes géoélectriques (Annexe 2)

Avant toute interprétation qualitative, nous tenons à signaler que les formations tabulaires du Mio-Pliocène, présentent un certain pendage relativement exagéré dans les coupes, et ce dans le but de faire une approche concernant la circulation des eaux dans ces terrains.

3.4.1.1 Coupe géoélectrique A

La coupe A d'orientation NO-SE est réalisée à l'extrémité Sud-ouest du secteur étudié à environ 300 m du captage de la grande source. Elle montre sous un encroûtement calcaire résistant de faible épaisseur, des terrains d'une résistivité ne dépassant pas 50 Ohm.m Ces derniers correspondent des formations argileuses de la Torba reposant sur des argiles et schistes argileux d'âge Dévonien supérieur.

3.4.1.2. Coupe géoélectrique B

La coupe géoélectrique montre les formations du Dévonien plissées surmontées par d'autres formations relativement tabulaires d'âge Mio-Pliocène. Ces formations sont représentées de bas en haut par :

- Des argiles et schistes argileux plissés, ayant un pendage vers le Nord. Les résistivités de ces formations sont comprises entre 35 Ohm.m (B2) et 65 Ohm. m (B3).
- Une Torba essentiellement argileuse avec des résistivités qui varie de 20 Ohm.m (B1) à 70 Ohm.m (B6).
- Une dalle hamadienne constituée de calcaires gréseux dont la résistivité peut atteindre 2500 Ohm.m au niveau du sondage électrique B4.
- Une croûte calcaire résistante, recouverte par une pellicule sableuse.

La coupe montre aussi, une faille probable de faible rejet affectant les formations résistantes du Mio-Pliocène et passant entre les sondages électriques B5 et B6.

3.4.1.3. Coupes géoélectriques C et D

Ces coupes ont des orientations et des structures semblables à celles des coupes précédentes. Elles mettent en évidence de haut en bas :

- Un recouvrement hamadien constitué en certains endroits, de sables argileux ayant des résistivités comprises entre 50 et 160 Ohm.m, et en d'autres endroits, d'une croûte calcaire qui peut avoir une résistivité de 1500 Ohm.m.
- Une Torba résistante dont la résistivité peut atteindre 500 Ohm.m au sondage C4. Celle-ci est localisée dans la partie centrale des coupes, tandis que vers les extrémités, elle devient conductrice suite à un changement de faciès.
- Des schistes argileux et argiles du Dévonien très épais d'une résistivité comprise entre 14 Ohm.m (D8) et 70 Ohm.m (C2 et C4). Les résistivités qui varient entre 100 et 180 Ohm.m mesurées au niveau des sondages électriques C3, D2, D3 et D4 correspondent probablement à des intercalations de bancs de calcaires.

Tectoniquement, les coupes montrent une faille ou une fracture probable passant entre les sondages C3 et C4, D3 et D4.

3.4.1.4. Coupes géoélectriques E, F, G et H

Les coupes géoélectriques en question, montrent en général, un recouvrement constitué, tantôt par des sables argileux, tantôt par une croûte calcaire. Au niveau de la partie centrale de la coupe F, un niveau relativement épais (15m) apparaît sous le recouvrement, il correspond à un remplissage argilo-sableux causé par un effondrement des formations mio-pliocènes résistantes.

Vers le nord-ouest des coupes, apparait un horizon de résistivité comprise entre 100 et 900 Ohm.m. Il est représenté par une Torba sableuse, graveleuse et conglomératique surmontée par une dalle calcaire hamadienne probablement caverneuse à la base.

Vers le sud -est, un changement de faciès des formations de la Torba à probablement fait chuté la résistivité jusqu'à 17 Ohm.m au sondage H7. La Torba est essentiellement argileuse dans ces endroits.

Les formations suscitées surmontent en profondeur, des terrains conducteurs (10 à 70 Ohm.m) et résistants (100 à 220 Ohm.m) correspondant respectivement à des argiles et schistes argileux, ainsi qu'à des schistes argileux alternés de bancs de calcaires du Dévonien.

Sur le plan tectonique, les coupes montrent une faille probable d'un rejet faible qui passe entre les sondages E5-E6, F5-F6, G5-G6 et H3-H4 et semble constituer un chenal dans les formations néogènes.

3.4.1.4. Coupes géo électriques I, J et K

Ces coupes ont été effectuées à l'extrémité orientale du secteur étudié. Elles nous permettent de suivre l'évolution du remplissage argilo-sableux qui semble avoir une épaisseur maximale près des sondages électriques I4, J3 et K3. Ceci nous laisse supposer une fracture passant entre ces sondages qui a été creusée probablement par les eaux de ruissellement.

Sous les terrains de recouvrement, les coupes mettent en évidence une Torba résistante essentiellement sablo-graveleuse et conglomératique, surmontée par une dalle de calcaire gréseux hamadienne et une Torba conductrice constituée principalement par des argiles.

3.4.2. Interprétation des différentes cartes

3.4.2.1 .Carte des résistivités apparentes en AB= 200 m (annexe) :

La carte d'égalité des résistivités apparentes en AB = 200 m, permet de mettre en évidence avant toute interprétation les horizons situés à une profondeur comprise entre 20 et 50 m.

Elle montre de larges plages résistantes ayant une résistivité généralement supérieure à 70 Ohm.m. Ces plages localisées au centre et au Nord-est du secteur étudié sont représentatives sans doute du toit de la Torba influencée par la dalle hamadienne résistante.

Les plages conductrices observées au Sud et au Nord-ouest sont attribuées aux formations conductrices de la Torba représentée essentiellement par des argiles.

3.4.2.2. Carte des résistivités apparentes AB = 400 m (AnnexeN°4) :

La carte en AB = 400 m, dont la profondeur d'investigation moyenne est inférieure à 100 m montre que :

Les plages résistantes (supérieure à 70 Ohm.m) sont devenues plus resserrées par rapport à la carte précédente, elles sont essentiellement localisées au Nord-est du secteur étudié et au niveau des sondages électriques C3, C4, D4, E4 et E5. Ces plages correspondent à la base d'une Torba sablo-graveleuse et conglomératique influencée par endroit par les bancs de calcaires alternés dans les schistes argileux dévoniens.

Les plages conductrices prennent de l'importance du Sud vers le nord et du Nord-Ouest vers le centre, ceci s'explique par une remontée des formations conductrices dévoniennes constituées essentiellement par des argiles et des schistes argileux.

3.4.2.3..Carte des résistivités apparentes AB=1000 m et 2000 m

La carte (Fig. 3.12) montre que pour l'ensemble du secteur étudié, les résistivités apparentes sont caractéristiques des formations dévoniennes constituées d'argiles et de schistes argileux.

L'accroissement de la résistivité au niveau des sondages électriques G5, H5 et I4 (carte de AB = 1000 m) et H4, I4 (Carte de AB = 1500 m) est dû principalement aux intercalations des bancs de calcaires à ces endroits

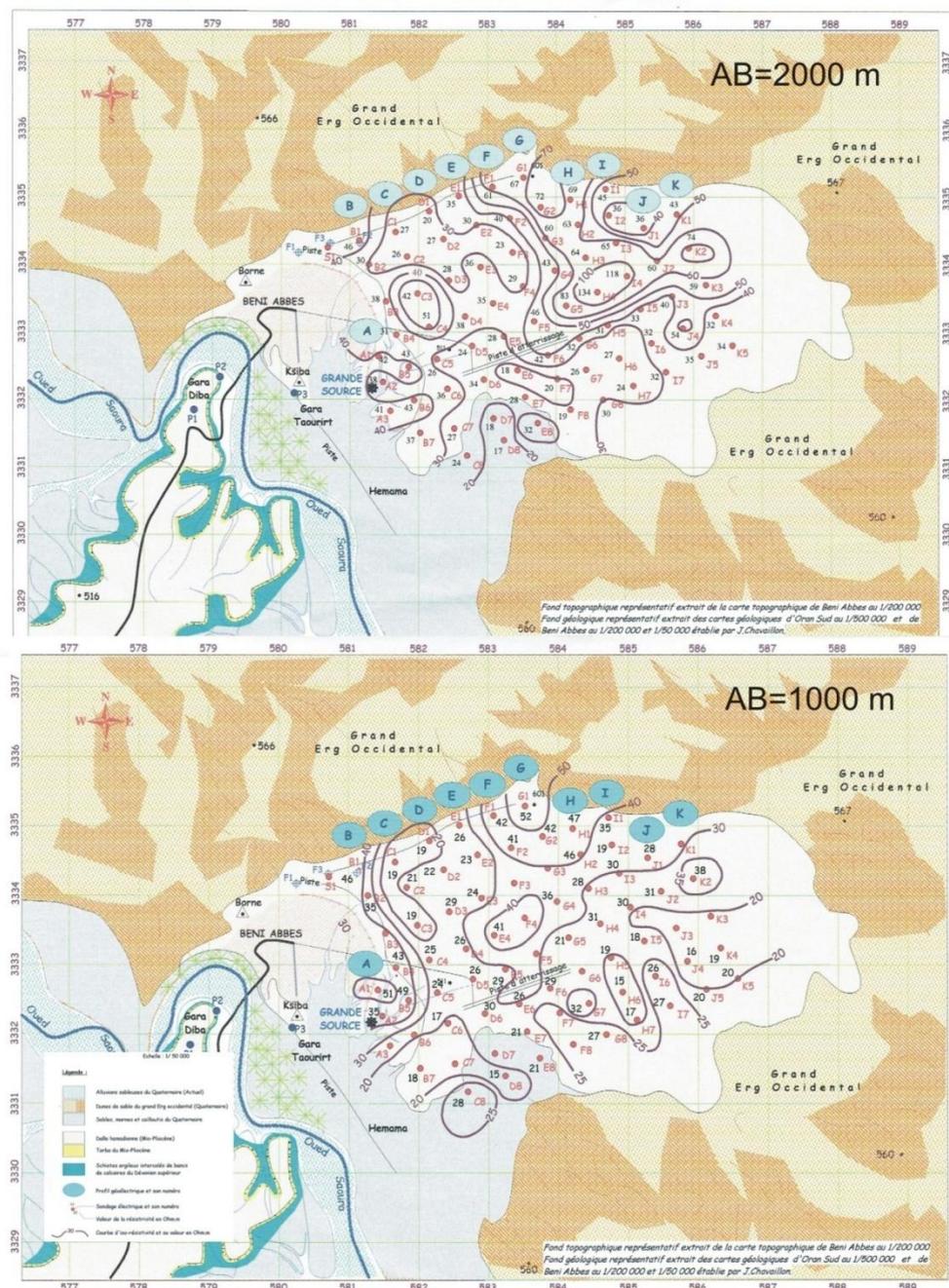


Figure 3.13 : Cartes des résistivités apparentes

4. Zones du Grand erg occidental et Hamada de Guir

Pour plus d'information et dans l'objectif d'améliorer les connaissances de gisement de réservoir du système aquifère dans la région d'étude, une campagne de prospection par des sondages électriques fragmentaires ont été réalisés.

Cette campagne est réservée à deux zones, la première zone se trouve à environ 70 km à l'est de Béni-Abbès à l'intérieur du grand erg occidental et une deuxième sur le plateau hamadienne à

l'ouest de Béni Abbés. Des sondages fragmentaires ont été réalisés dans le grand erg occidental (Fig 3.14). En outre Huit (08) sondages électriques de longueur (AB=2000m), ont été réalisés et répartis selon 3 sites dans le grand erg occidental dans les zones de plateau dans le grand Erg occidental (Hassi Fokra, hassi Tikhssain et hassi Lahmara)et cinq sites sur le plateaux de la hamada de Guir de la région Béni Abbés. Cette prospection géophysique devrait permettre une profondeur d'investigation théoriquement comprise entre 400 et 450 mètres à l'aide de sondages électriques en ligne AB=2000m.

Deux difficultés majeures ont été rencontrées sur le terrain :

- D'abord ; un problème d'implantation de points de sondages électriques en raison de l'inaccessibilité aux sites (Grand erg occidental) ;
- Ensuite ; un problème d'injection de courant en raison de la nature très résistante du recouvrement empêchant ainsi le courant de passer .

4.1 Interprétation des sondages électriques verticaux

4.1.1. Echelle des résistivités adoptée

Dans la région d'étude, il n'existe aucun forage pour l'étalonnage des sondages électriques. Pour l'attribution d'une échelle des résistivités des différentes formations rencontrées au niveau des zones d'études, nous nous sommes basés sur la description géologique de la région et sur les gammes de résistivité décrites dans la littérature. Le Paléozoïque est représenté par le Dévonien, il affleure par endroit dans la zone d'étude (voir carte géologique). Le Dévonien est constitué essentiellement par des terrains argileux, argilo-gréseux, des grès et des calcaires.

Les valeurs de résistivité obtenues par le traitement des SEV sont attribuées aux formations géologiques comme suit:

Tableau 3.2 : Echelle des résistivités

Formation	Résistivités en ohm m	
Quaternaire récent	100 - 300	
calcaires	> 350	
Grès	100	à 270
Grès argileux	36	à 80
Argiles	6 à 18	

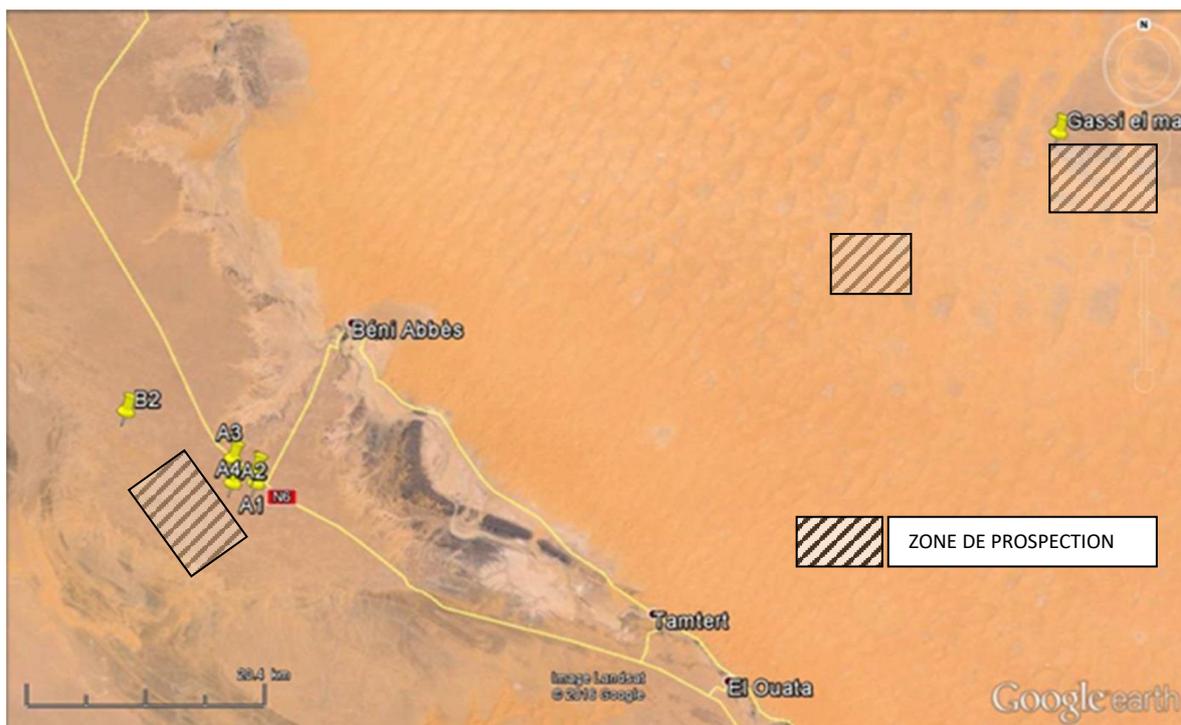


Figure 3.14: Situation des SEV dans le Grand Erg Occidental et la Hamada de G

3.2.2.2. Sondage électrique vertical SEV A1 (Fig.3.15)

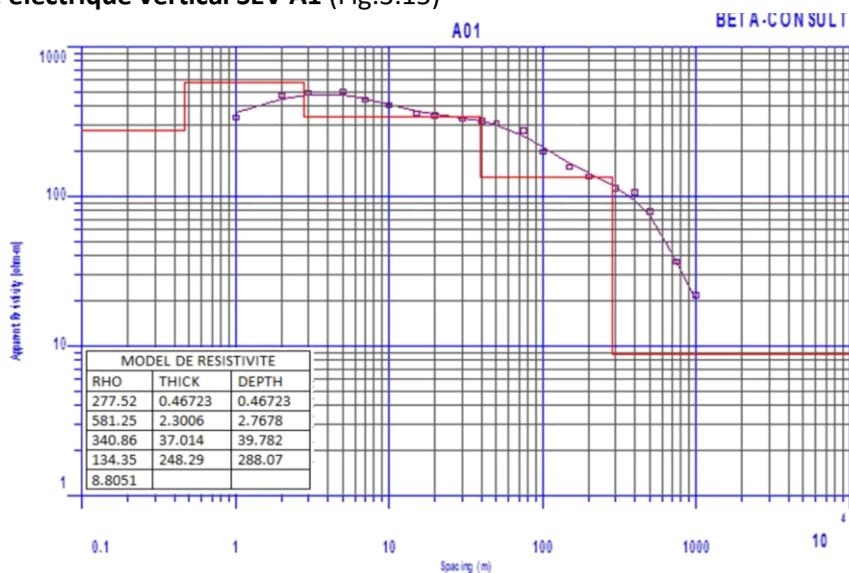


Figure 3.15 .Sondage électrique vertical SEV A1

La coupe lithologique type en corrélation avec le modèle obtenu du SEV1 serait du sommet à la base :

- 0 à 40m : recouvrement calcaire avec une résistivité variable (600 ohm.m),
- 40m à 300m : alternance grès (90 à 220 ohm.m) et grès argileux (37 ohm.m)
- 300m et plus : substratum argileux (8 ohm.m).

4.1.2 .Sondage électrique vertical SEV A2 (Fig.3.16):

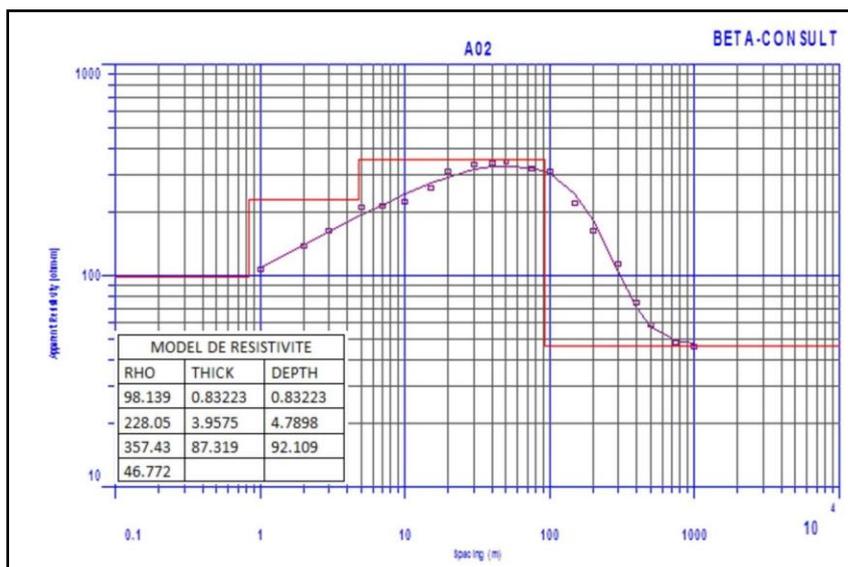


Figure 3.16: .Sondage électrique vertical A2

La coupe lithologique type en corrélation avec le modèle obtenu du SEV2 serait du sommet à la base :

- 0 à 45m : recouvrement calcaire avec une résistivité variable (500 ohm.m),
- 40m à 230m : alternance grès (120 à 230 ohm.m) et grès argileux (50 ohm.m)
- 230m et plus : substratum argileux

4.1.3. Sondage électrique vertical SEV A3 (Fig.3.17)

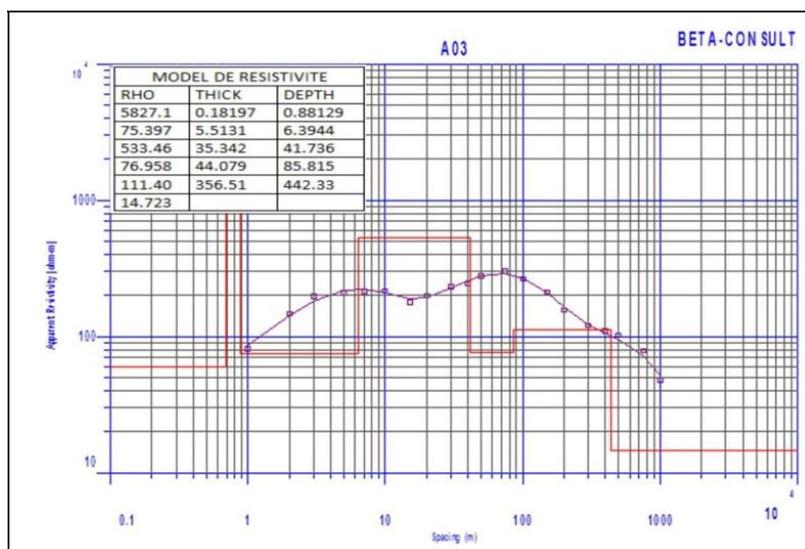


Figure 3.17 : Sondage électrique vertical SEV A3

La coupe lithologique type en corrélation avec le modèle obtenu du SEV3 serait du sommet à la base :

- 0 à 48m : recouvrement calcaire avec une résistivité variable (517 ohm.m),
- 48m à 330m : alternance grès (100 à 140 ohm.m) et grès argileux (36 ohm.m)
- 330m et plus : substratum argileux

4.1.4. Sondage électrique vertical SEV A4 (Fig.3.18)

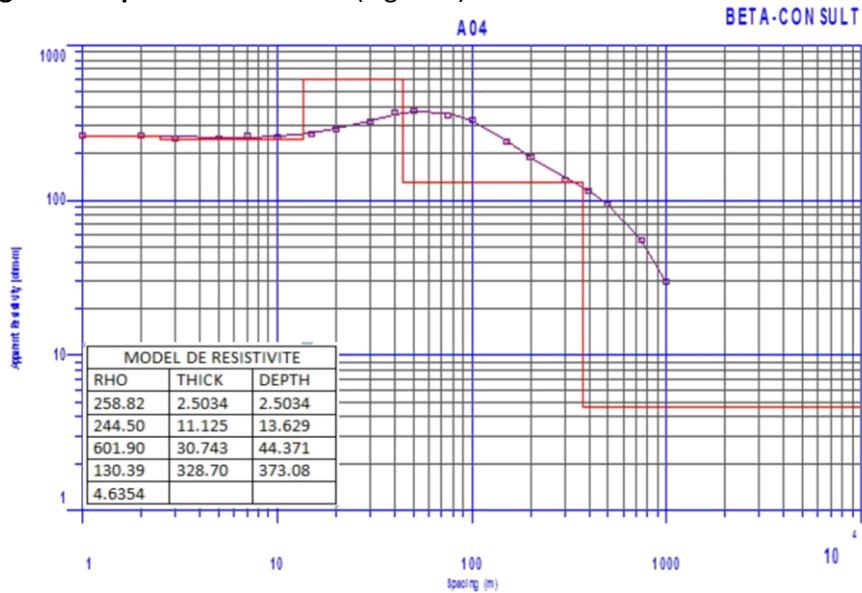


Figure 3.18 : Sondage électrique vertical SEV A4

La coupe lithologique type en corrélation avec le modèle obtenu du SEV4 serait du sommet à la base :

- 0 à 45m : recouvrement calcaire avec une résistivité variable (700 ohm.m),
- 45m à 320m : alternance grès (90 à 217 ohm.m) et grès argileux (37 ohm.m)
- 320m et plus : substratum argileux (11 ohm.m)

4.1.5. Sondage électrique vertical SEV B2.

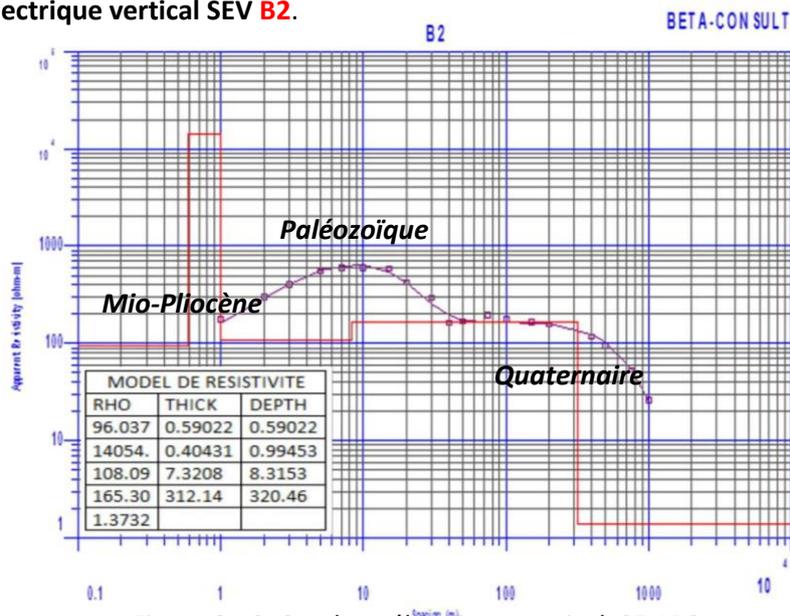


Figure 3.19: Sondage électrique vertical SEV B2

La coupe lithologique type en corrélation avec le modèle obtenu du SEVB2 (Fig.3.19) serait du sommet à la base :

- 0 à 40m : recouvrement calcaire avec une résistivité variable (500 ohm.m),
- 40m à 310m : alternance grès (138 à 270 ohm.m) et grès argileux (55 ohm.m)
- 310m et plus : substratum argileux (6 ohm.m).

4.1.6. Sondage électrique vertical SEV Gassi El Massha(Fig.3.20)

La coupe lithologique type en corrélation avec le modèle obtenu du SEV Gassi El Massha serait du sommet à la base :

- 0 à 30m : recouvrement calcaire avec une résistivité variable (900 ohm.m),
- 30m à 320m : alternance grès (102 à 235 ohm.m) et grès argileux (37 ohm.m)
- 320m et plus : substratum argileux (15 ohm.m).

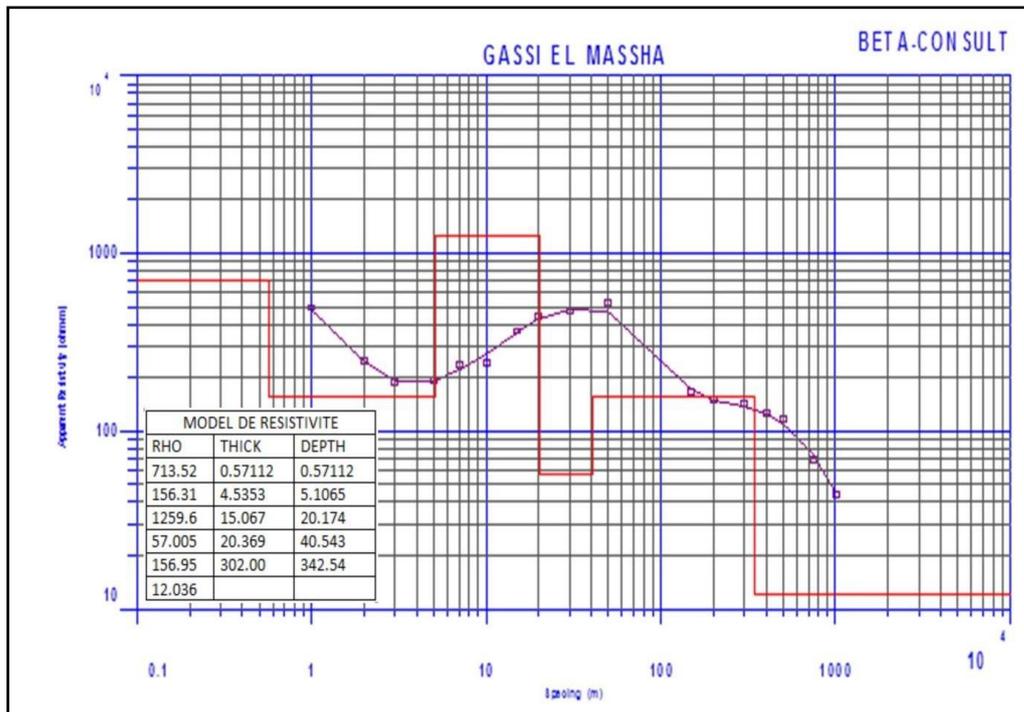


Figure 3.20 : Sondage électrique vertical SEV Gassi El Massha

4.1.7. Sondage électrique vertical SEV Hassi Fokra(Fig.3.21)

- 0 à 30m : recouvrement calcaire avec une résistivité variable (900 ohm.m),
- 30m à 300m : alternance grès (102 à 235 ohm.m) et grès argileux (37 ohm.m)
- 300m et plus : substratum argileux (15 ohm.m).

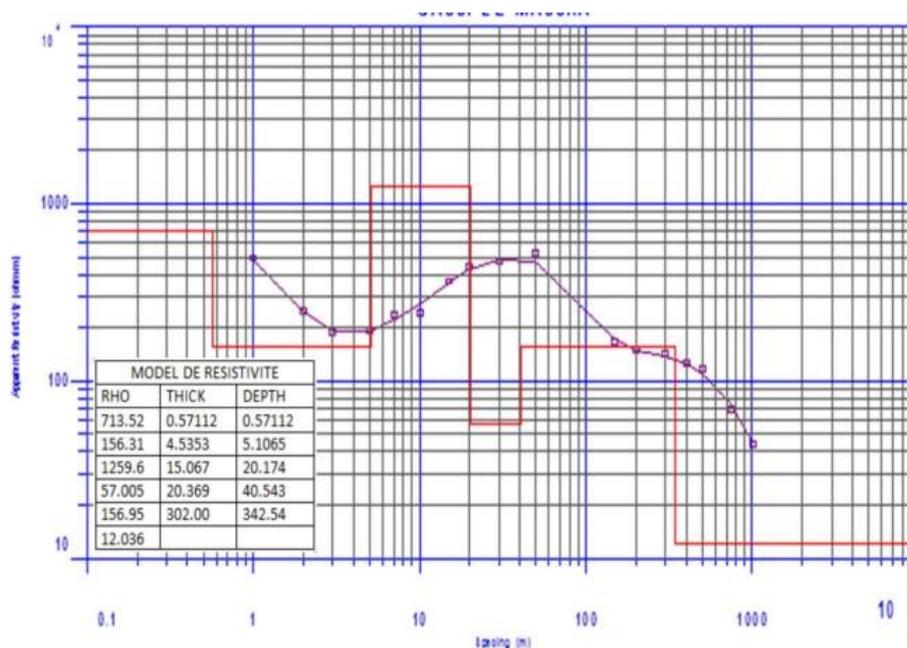


Figure 3.21 : Sondage électrique vertical SEV Hassi Rokna

5. Résultats de la géophysique dans les alluvions de l'oued Saoura à Béni Abbès

Les terrasses alluviales étendues dans la palmeraie et l'oued Saoura, contiennent des sables argileux et du gravier et constituent l'aquifère alluvial de la palmeraie. La stratigraphie de quelques puits dans la palmeraie indique la variation de l'épaisseur (7-15m) des terrasses (formations plus ou moins homogène dans l'ensemble), où elle peut atteindre le substratum dévonien à 20 mètres dans le lit mineur de l'oued Saoura qui représente le centre du remplissage alluvionnaire. Ces données sont confirmées par une campagne géophysique de quelques profils réalisées dans les terrasses. Les résultats de cette campagne réalisée en Mai 2010 nous ont permis de tracer la coupe géoélectrique (Fig.3.22).

Par ailleurs, une enquête sur terrain et l'analyse des déblais extraits des puits au moment de leur creusement, ont permis une identification et un dimensionnement des différents horizons lithologiques.

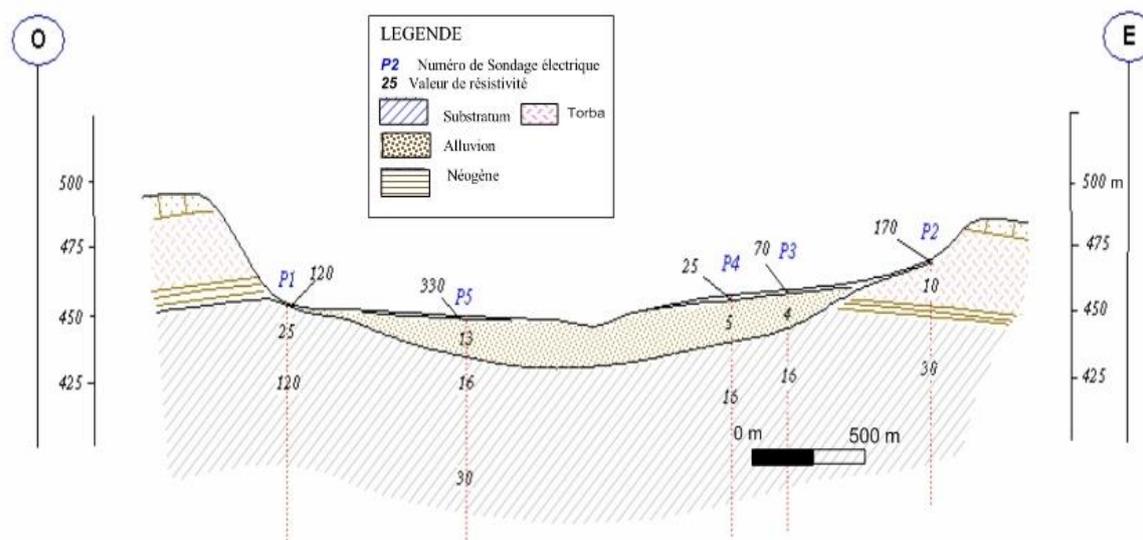


Figure 3.22 : Coupe géo-électrique à travers l'oued Saoura dans la palmeraie de Béni-Abbès.

6. Synthèse des études géophysiques

Au terme de cette étude géophysique, et la compilation des données nous avons fait ressortir la carte structurale du plateau de Béni Abbès (Fig.3.23).

La prospection électrique réalisée dans la région de Béni-Abbès a permis de déceler une plage résistante, qui s'étend du Nord-est jusqu'à la partie centrale du secteur étudié. Cette zone est circonscrite par la courbe d'égalité de résistivité apparente 80 Ohm.m (Carte AB = 400 m) et les résistivités mesurées au niveau des différents sondages généralement supérieures à 80 Ohm.m et correspondent aux formations tabulaires du Mio-Pliocène reposant sur des schistes argileux alternés par endroit par des bancs de calcaires.

Les coupes géoélectriques indiquent une faille (ou une fracture) suivie d'un changement de faciès passant pour la majorité des coupes dans leur partie sud. La fracture permet le drainage des eaux vers l'exutoire principal représenté par la « grande source ». La Torba argileuse qui repose sur des argiles et schistes argileux constitue une barrière étanche aux écoulements des eaux.

La nappe du Néogène est exploitée actuellement par deux forages situés au Nord de la ville près des dunes de sable. Ces forages d'une profondeur de l'ordre de 100 m ont été réalisés par battage (F1 et F2 sur carte), et fournissent un débit de 3 l/s. Un troisième forage (F3) situé entre les deux premiers (d'une profondeur de 122 m) a été abandonné du fait qu'il est stérile.

Il est à noter que presque toutes les sources sont situées sur la rive gauche de l'Oued qui est recouverte par les immenses dunes du grand Erg occidental. Sur la rive droite par contre, les sources sont rares et de faible importance.

Cette inégalité de répartition des eaux, peut s'expliquer par le très grand pouvoir absorbant du sable des dunes. Quand il pleut, toute l'eau est absorbée et le ruissellement est nul. Les sables cèdent les eaux ainsi accumulées à travers la dalle hamadienne sous-jacente au niveau aquifère existant par endroits, au-dessus de la Torba imperméable, et par d'autres, au-dessus des schistes argileux dévoniens lorsque la Torba est semi perméable.

Parmi les nombreuses sources existantes, on peut citer « la grande source », située à environ 2 km au Sud-est de l'agglomération. Son débit relativement important (de l'ordre de 30 l/s) couvre une grande partie des besoins en eau potable de l'oasis.

A travers ces investigations on peut confirmer que le bassin versant de la source au niveau Béni - Abbès est constitué par une vaste cuvette avec une liaison hydraulique étroite avec le l'aquifère du Grand Erg occidental, située à l'Est de la ville et qui peut se prolonger même sous l'Erg Occidental.

Les résultats obtenus suite à la prospection géophysique, nous ont permis de tracer une carte structurale synthétique (Fig.3.23). Celle-ci montre la limite probable du bassin versant de la source qui coïncide avec celle de la Torba conductrice imperméable. Elle montre également la présence de failles ou fractures probables susceptibles de constituer des chenaux d'alimentation de la source.

D'autre part, l'interprétation des données donne à penser que l'émergence naturelle de la source est probablement située aux environs des sondages B4 et B5.

Concernant les schistes argileux alternés parfois par des bancs de calcaires du Dévonien, le forage de reconnaissance réalisé au pied de la Gara Dibaa montré que ces formations ne constituent pas un aquifère intéressant.

7. Conclusion

La prospection électrique réalisée dans la région a permis de déceler une plage résistante qui s'étend du Nord-est jusqu'à la partie centrale du secteur étudié. Les coupes géo-électriques indiquent une faille (ou une fracture) permettant le drainage des eaux vers l'exutoire principal représenté par la « grande source ». La Torba argileuse qui repose sur des argiles et schistes argileux constitue une barrière étanche aux écoulements des eaux souterraines vers le Sud.

Les résultats acquis par cette prospection géophysique de la région de Béni Abbès montrent la possibilité d'effectuer un suivi lithologique aquifère ou non en terrain sédimentaire aussi complexe et de préciser l'épaisseur des formations ainsi que leur hétérogénéité lithologique. La géométrie a été dessinée à travers l'interprétation des différentes coupes géoélectriques établies. Les renseignements tirés de cette étude constituent, de ce fait, des éléments intéressants et précieux pour l'hydrologue, hydrogéologue et géologue dans leur essai de modélisation des nappes de la région.

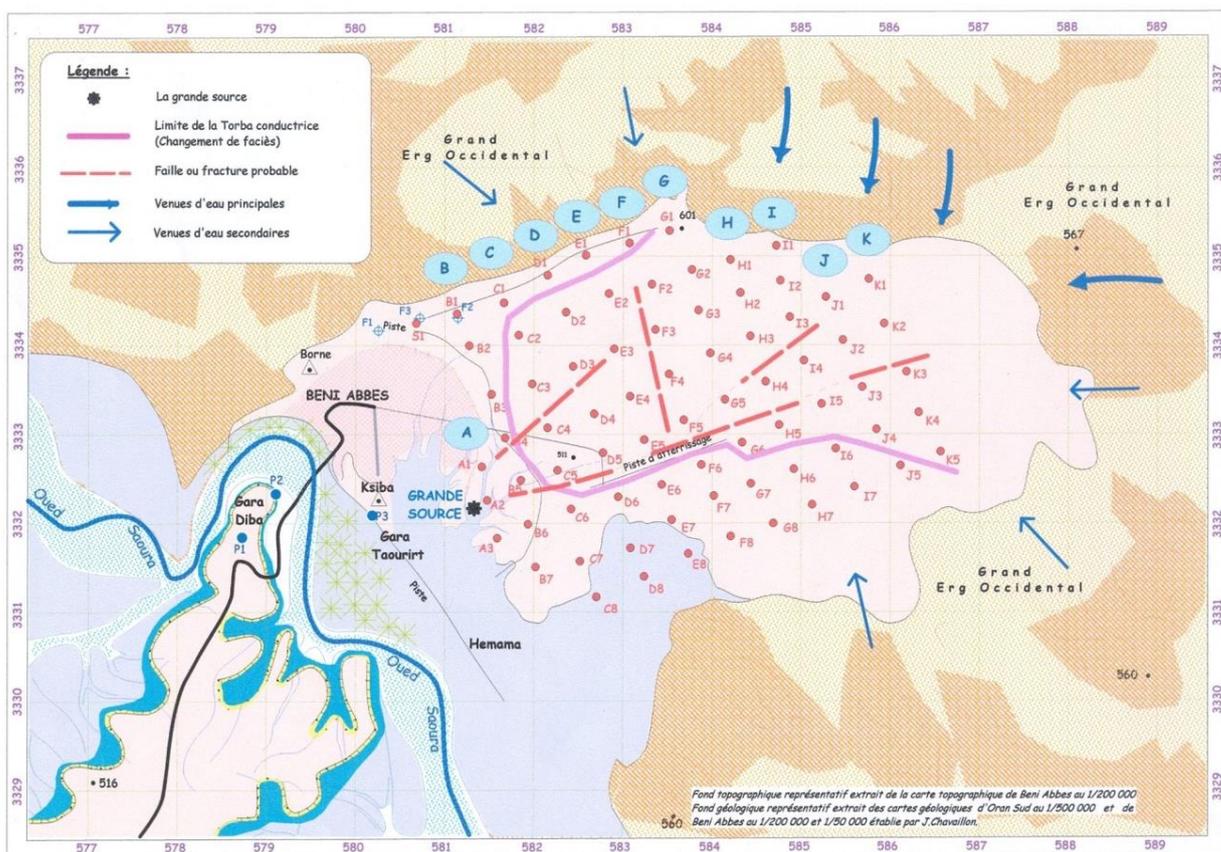


Figure 3.23 : Carte structural synthétique de la région de Béni -Abbès

C'est un bassin subsident à remplissage néogène et quaternaire (Mio-Plio -Quaternaire). Il est recouvert en discordance par des formations paléozoïques.

La profondeur moyenne de l'aquifère alluviale sur le lit majeur d'oued Saoura capté varie entre 30 m au centre de la vallée, il devient faible jusqu'à 10 m à la lisière de l'erg et 0 m à l'ouest de Béni -Abbès vers le plateau hamadien(Gara Diba).

L'épaisseur de ce continental Terminal ou bien le Mio-Pliocène (nappe de l'erg occidental) est variable de 50 à 100 m sur le plateau de la ville, plus à l'Est à environ 40 km de Béni -Abbès elle atteint 100 à 300 m de Béni- Abbès (probablement la frontière nappe Mio-pliocène- Continental Intercalaire).

Chapitre 04

HYDROGEOLOGIE

ETUDE HYDROGEOLOGIQUE

Introduction

La région de la Saoura a fait l'objet de plusieurs études hydrogéologiques fragmentaires par différents auteurs : Schoeller (1945), Cornet (1952), Conrad (1964), Roche (1973), à partir de la région d'Igli jusqu'à son exutoire de la vallée de la Saoura à Foulkhneg.

Les eaux souterraines représentent l'unique ressource d'approvisionnement d'eau pour la région de Béni-Abbes. Le sous-sol de Béni-Abbes est bien pourvu en ressource d'eau souterraine, sachant bien que toutes les nappes ne représentent pas la capacité d'exploitations intéressantes nous résumons ces ressources ainsi : La nappe du Mio-Pliocène (Grand Erg Occidental) est alimentée principalement par l'Oued Namous quant à celle de la hamada du Guir elle se renouvelle par les eaux pluviales. Les nappes des formations paléozoïques au niveau des villages de Zéghamra et Ougarta sont alimentées partiellement par les eaux météoriques et celles de l'oued Saoura. Les nappes des terrasses alluviales et d'inféro-flux, constituent un type particulier de nappes, formées par les grands épandages de sables et graviers (terrasses alluviales) étagées de la Saoura, connus sous les noms du Saourien (Pléistocène Supérieur) et du Guirien (Holocène). Ces différentes nappes (Fig.4.1) sont mal connues et mal exploitées, communiquent plus ou moins entre elles et forment un système aquifère complexe, géré par la combinaison naturelle de ces nappes contenues dans des terrains de propriétés diverses.

Dans un premier temps, nous avons d'abord synthétisé les connaissances acquises sur la base des données et travaux antérieures. Par la suite, nous avons exploité et interprété nos données collectées pendant les différentes campagnes de mesure sur le terrain.

Une série de campagnes d'échantillonnage et de mesures a été réalisée (20 points d'eau) localement dans la région de Béni Abbes et à l'échelle régionale avec une dizaine de points d'eau éparpillés dans le grand erg occidental entre 2014 et 2017. Des points représentatifs ont été prélevés au niveau de l'Oasis de Béni Abbes et dans le grand erg. A chaque campagne, des prélèvements d'échantillons pour analyse, la piézométrie, la conductivité de la nappe, et des reconnaissances lithologiques au niveau des puits creusés, essais de pompage dans certains puits et des sondages électriques ont été effectués.

Dans ce chapitre, nous serons amenés à examiner tour à tour les aquifères liés aux différentes formations.

2. Hydrogéologie des principaux aquifères de la région

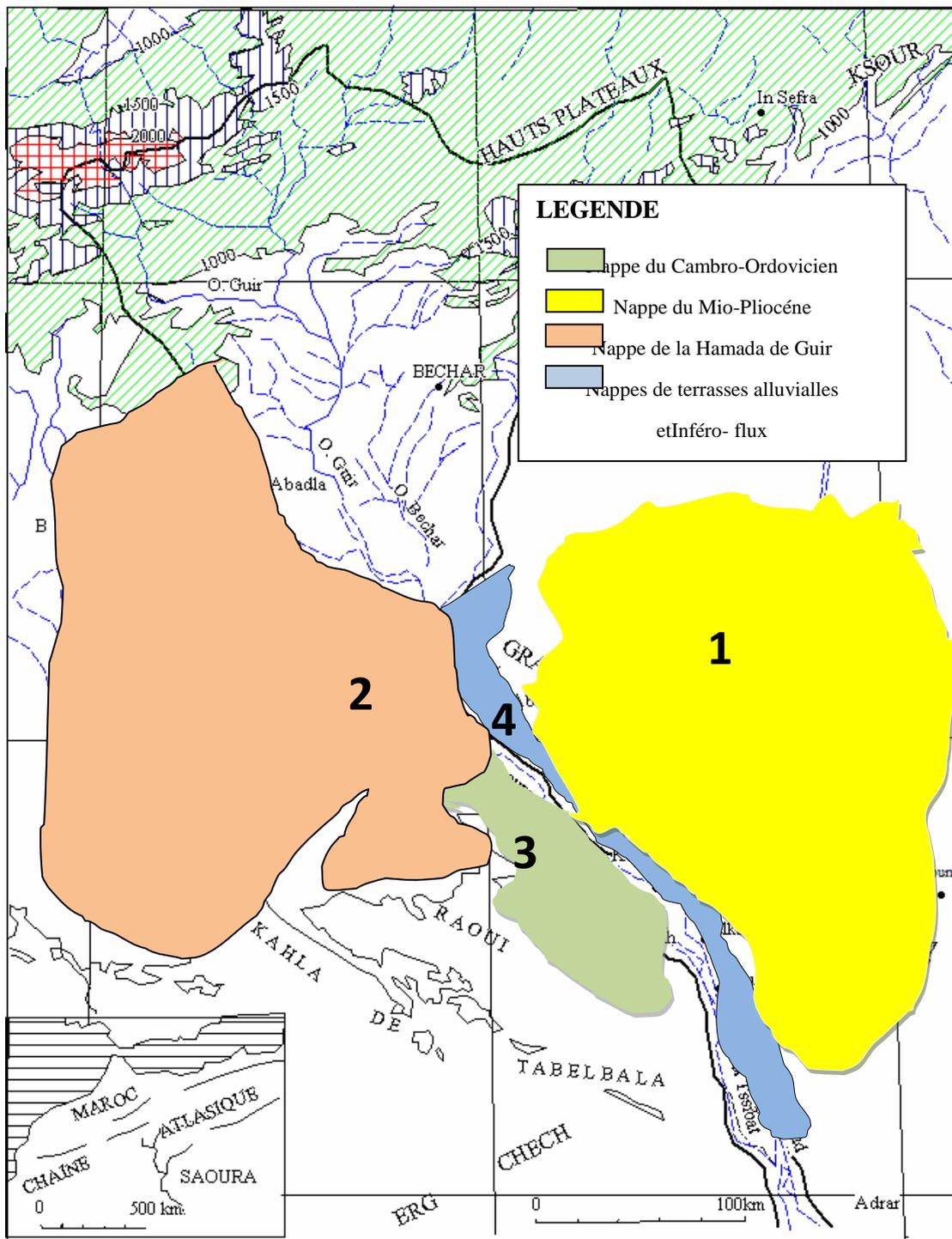


Figure 4.1 : Principaux aquifères de la région de la Saoura.

Le sous-sol contient des ressources en eau souterraines non négligeables, il referme un système interconnecté dont la vallée de la Saoura est considérée comme étant le cordon ombilical (Merzougui, 2007).

A l'échelle régionale, les principaux aquifères ou châteaux d'eau souterrains présent dans la Saoura sont :

2.1 Aquifère du socle des Monts d'Ougarta (Fig. 4.2)

Les formations paléozoïques sont bien représentées dans les Monts d'Ougarta où l'on distingue les séries les plus anciennes, formées de rhyolites, présumées infracambriennes. Ces dernières sont surmontées par des grès et quartzites intercalés de niveaux schisteux qui servent de toit ou de mur à de petites nappes nettement individualisées.

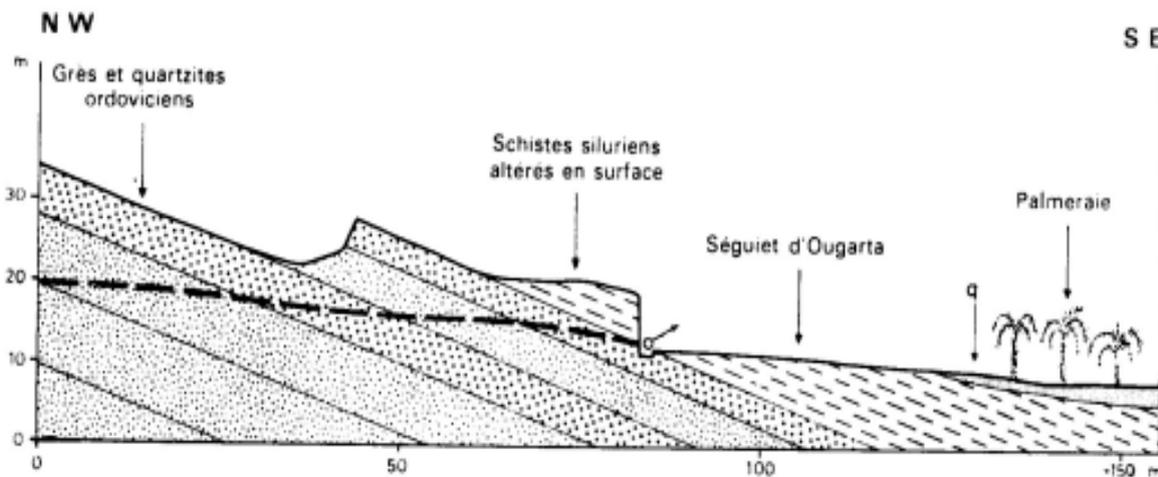


Figure. 4.2 : Coupe hydrogéologique au contact de l'Ordovicien et du Silurien (Roche, 1973)

Au niveau des Monts d'Ougarta, les nappes sont mal définies, toutefois les différents captages réalisés au niveau des villages Zéghamra et Ougarta (sources, puits, forages) plaident en faveur de l'existence de plusieurs nappes du socle paléozoïques. Il s'agit vraisemblablement d'une superposition de nappes fossiles alimentées lors des périodes quaternaires humides. Les aquifères du socle Paléozoïques, il s'agit vraisemblablement d'un système multicouche, dont le détail est mal connu.

L'extension importante des affleurements de roches volcanique et métamorphiques, Conjointe avec le climat aride ne permet pas de mettre ces aquifère en saturation. Il semble donc nécessaire d'identifier l'aquifère du Cambro-Ordovicien et déterminer son mode de fonctionnement hydrogéologique et son mode de recharge.

Selon l'épaisseur des formations, le Paléozoïque potentiellement important de point de vue hydrogéologique en revanche le Tertiaire et le Quaternaire présente de faibles épaisseurs et par conséquent, leurs potentialités hydriques demeurent limitées.

L'hydrogéologie du Paléozoïque des terrains fissurés du Monts d'Ougarta forme essentiellement trois ensembles ou unités hydrogéologiques de différentes caractéristiques.

2.1 .1. Condition et gisement de l'aquifère du Cambro-Ordovicien

C'est une succession de couches monoclinale de schistes, grès et quartzites qui reposent sur un substratum infracambrien. L'aquifère est composé des grès et quartzites dont, l'épaisseur est de 300 à 500 m. Les nappes d'eaux dans les Monts d'Ougarta se répartissent en trois assises gréseuses et quartzites isolées par des couches schisteuses (Roches, 1973). Les nappes sont ainsi en partie libres et en partie captives sous les schistes imperméables.

Du point de vue de l'hydrogéologie ce sont celles du Cambro- Ordovicien appelées aussi l'aquifère de socle. Son alimentation se fait par les apports des eaux d'infiltration des eaux de ruissèlement sur les reliefs à la bordure des Monts d'Ougarta, paléorecharge par les infiltrations directes des eaux de précipitations et par les eaux de la nappe de la Hamada de Guir qui drainent l'aquifère du Cambro- ordovicien.

2.1.2 Comportements hydrodynamiques des réservoirs

La compilation et l'interprétation des essais de pompages réalisés par la Direction des ressources en eau et l'ANRH (1990-1995) et ceux effectués par nous-mêmes en septembre 2016 sur deux puits (Ougarta et Ain El Dhob) ont révélé les résultats suivants (Tableau 4.1):

Vu l'hétérogénéité les paramètres hydrodynamiques varient d'une zone à l'autre suivant les types de formations géologiques (terrains fissurés) qui prédominent. La perméabilité des terrains aquifères est soit d'interstice (grès) soit de fissures (grès et quartzites). Les valeurs de transmissivité et de Perméabilité calculées font ressortir le comportement des couches de l'aquifère. Elles sont respectivement de l'ordre de $T = 10^{-4}$ à 10^{-5} m²/s pour l'aquifère Cambro-ordovicien au niveau de la région de Zeghamra et $T = 10^{-2}$ à 10^{-3} m²/s pour la région d'Ougarta.

La nappe du Cambro-Ordovicien au niveau de "Zeghamra", libre en bordure, captive vers le centre du bassin, se caractérise par une transmissivité «T» variant de 10^{-3} à 4×10^{-4} m²/s et une perméabilité «K» de l'ordre de 3×10^{-3} à 4.5×10^{-5} m/s, toutefois une polarité se dessine de l'Est vers l'Ouest due à la nature lithologique et à la fracturation de l'aquifère du Cambro-Ordovicien.

2.3.Écoulement des eaux, piézométrie et débit de la nappe

La nappe des «Grès d'Ougarta» s'écoule vers le sud-est dans le sens de la pente générale. La nappe de la Hamada du Guir semble être drainée par les assises paléozoïques perméables, en relief dans le Mio-Pliocène, tandis que celle du Grand Erg bénéficierait d'un mur imperméable plus efficace mais surtout d'un exutoire mieux défini puisqu'il est limité au flanc Est de la vallée de la Saoura. On doit également prendre en considération la superficie d'alimentation par les pluies. Elle est plus difficile à préciser dans le cas de la Hamada que dans celui de l'Erg.

Il faut noter que c'est la première cartepiézométrique de la nappe du cambro -Ordovicien réalisée en 2016. Elle présente un écoulement général Nord-Ouest -Sud Est. Le gradient hydraulique dans la partie Nord de la chaîne d'Ougarta présente une valeur forte de 0,04, il devient faible 0,004 à 0,005 dans la partie Sud près de Sebket El Mellah (Fig.4.3).

Les axes d'écoulement des eaux de la nappe aquifère du Cambro-ordovicien sont généralement de direction Nord Est-Sud-Ouest. Le niveau statique de la nappe aquifère du Paléozoïque oscille entre 06 à 31 m par rapport à la cote du sol.

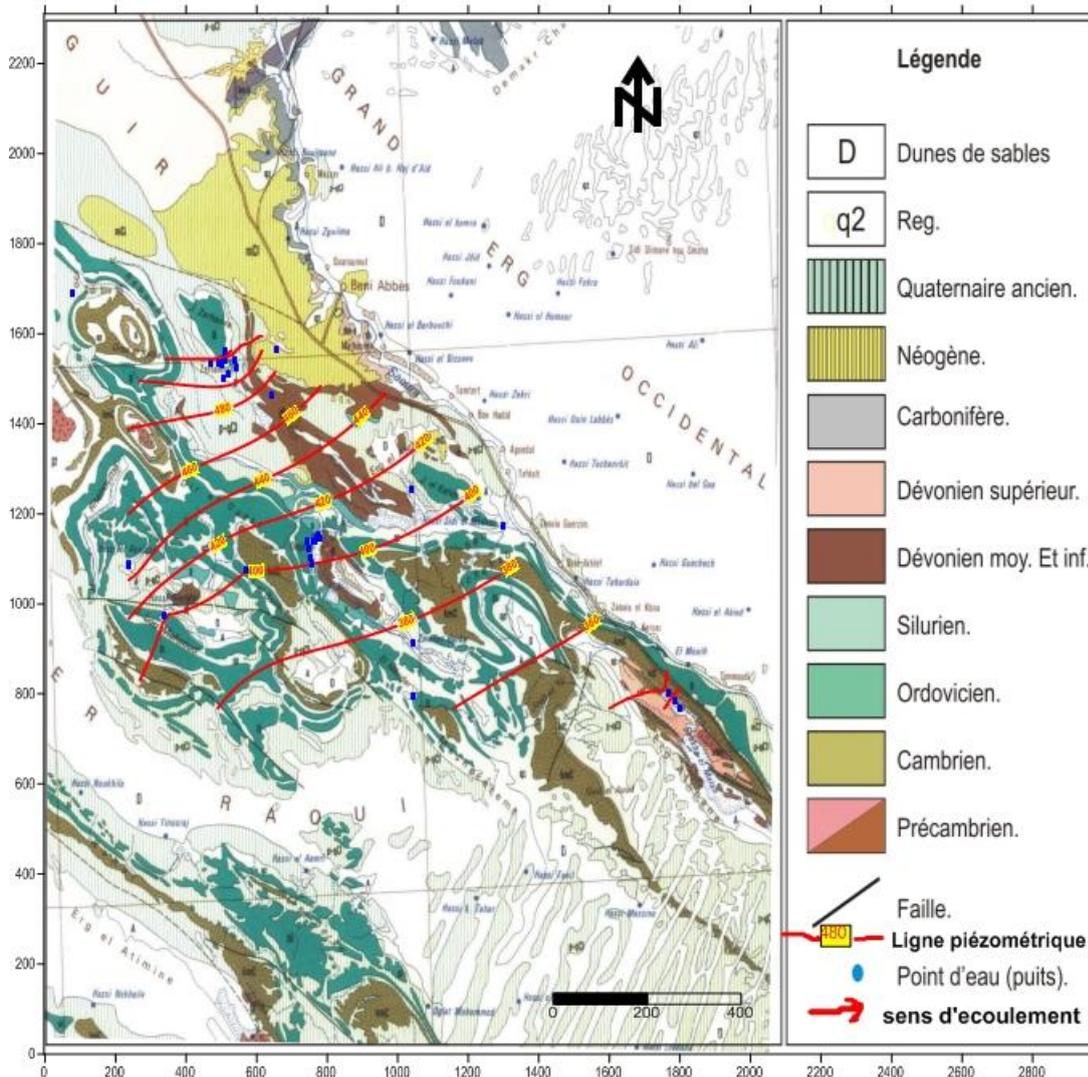


Figure 4.3 : Piézométrie de la nappe du Cambro-ordovicien des monts d'Ougarta, Avril 2016

Les nappes d'eau se répartissent dans deux assises gréseuses et quartzitiques constituant deux unités hydrogéologiques isolées par les couches schisteuses. Les nappes sont ainsi en partie libres et en partie captives sous les schistes et les argiles imperméables. Dans les synclinaux, tel celui que couvre en partie l'Erg el Djemal, les réservoirs doivent être importants. Les points d'eau exploitant actuellement ces nappes se situent généralement au contact des grès et des schistes.

Les données d'investigation de l'hydrogéologie du Paléozoïque des monts d'Ougarta, nous ont permis de constater trois unités hydrogéologiques avec des capacités différentes la plus importantes se trouvent au niveau des villages Zeghamra et l'Ougarta (Fig.4.3)

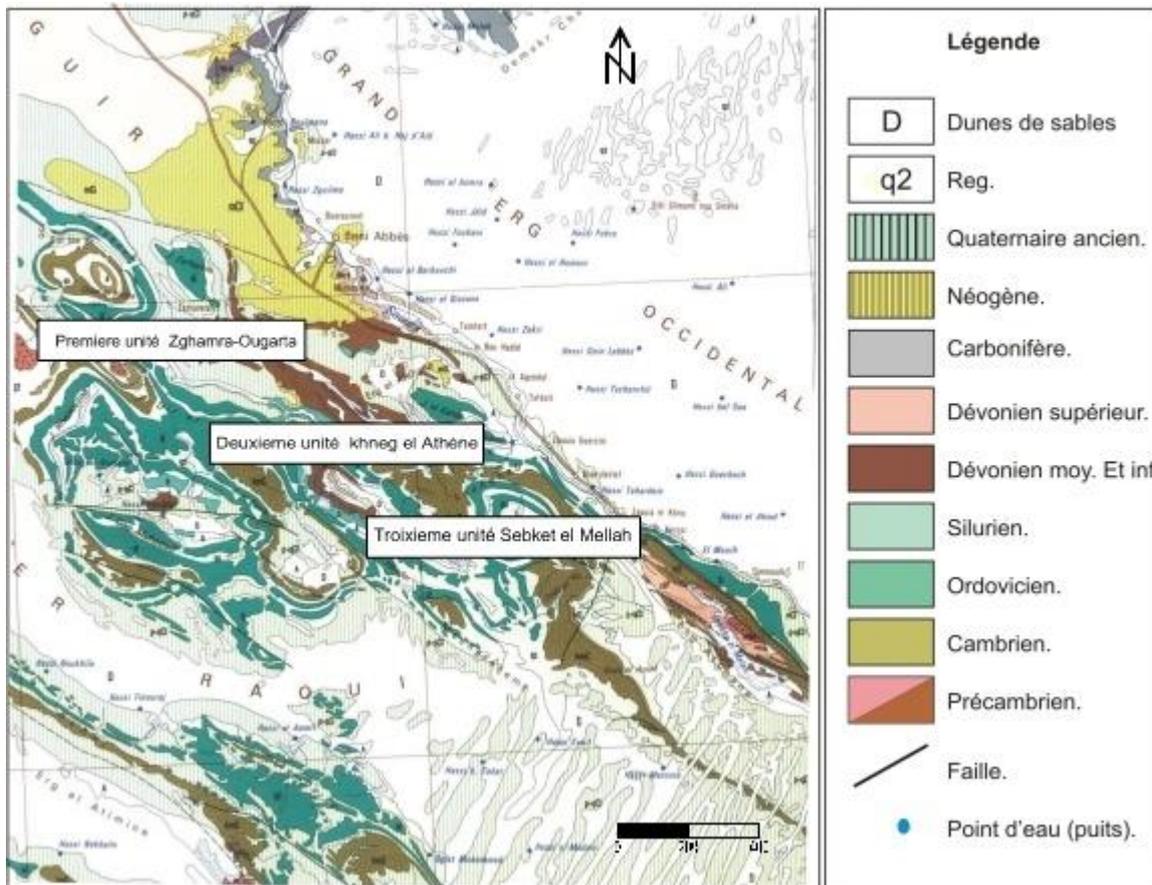


Figure 4.3 : Unités hydrogéologiques des aquifères des monts d'Ougarta.

La première unité se localise au niveau du Zeghamra, donne des débits plus ou moins importants oscillant entre 10 et 60 l/s. Un forage a été réalisé en 1995 par la Direction des ressources en eau, a donné un débit de 60 l/s, aussi des exurgences se localisent à la sortie du contact ordovicien-silurien, cette unité se trouve dans la partie nord des monts d'Ougarta (Zeghamra + Ougarta + Bou M'haoued) (Fig.4.4). Une deuxième unité à khneg el Athène (Hassi Aluoine). La troisième unité hydrogéologique se trouve dans la région de Ain El Djob et Ain Néchea ; jusqu'à la bordure de Sebket el Melah, fournit des débits très faibles avec une qualité médiocre (0.1-1.5 l/s) (Fig. 4.4).

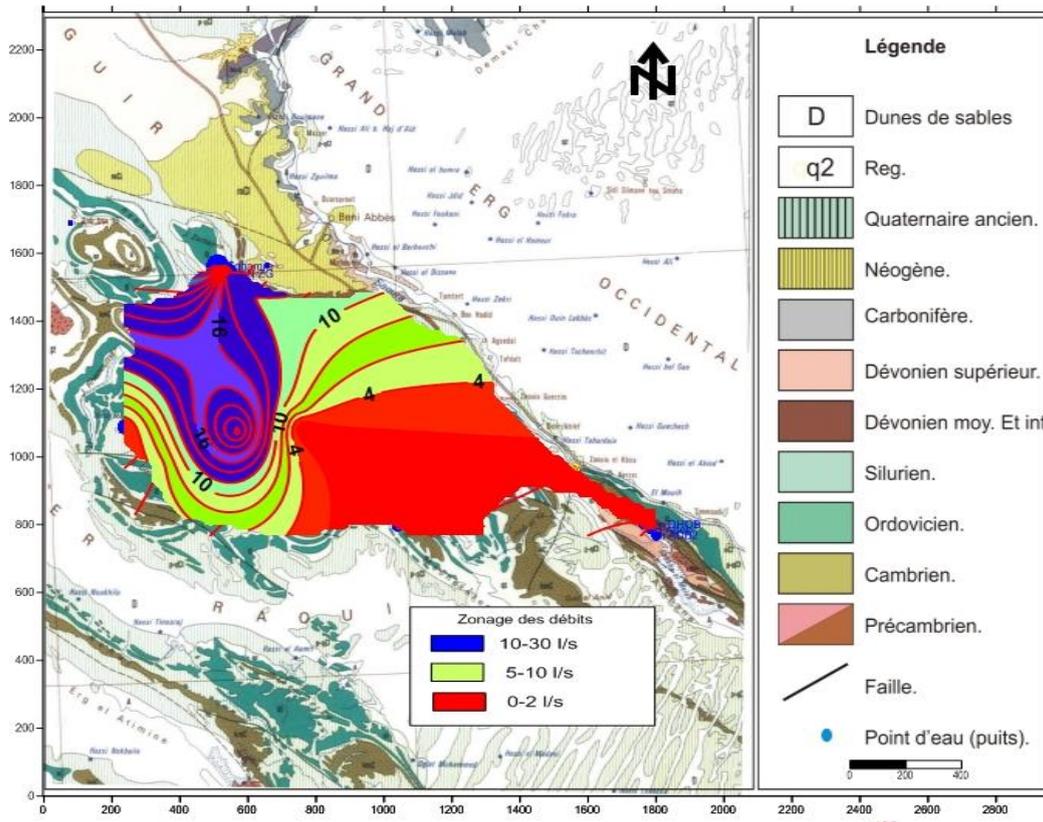


Figure 4.4: Zonage des débits des nappes du Cambro-ordovicien.

Tableau 4.1 : inventaire des points d'eau dans la chaîne d'Ougarta (2016).

N°	Nom	X	Y	Type	NP	Q
P1	Source Zeghamra	584255	3228747	Source	500	0
P2	Zeghamra F1	583259	3231985	Forage	513	12
P3	Zeghamra F3	583050	3231980	Forage	502	10
P4	Zeghamra F2	581888	3228747	Forage	503	60
P5	Hi Bou M'hawed	568042	3173808	Puits	400	5
P6	Hi Alouisa	557730	3188400	Puits	450	2
P7	F1 Ougrata	606160	3194250	Forage	400	12
P8	Ougarta S	606172	3194253	Source	400	0
P9	Ougarta F1 AEP	604414	3192634	Forage	411	0,5
P10	Ougarta F2	606162	3194221	Forage	400	10
P11	Ougarta P1	604324	3189900	Puits	407	5
P12	Source Ain Dhob	686244	3170717	Source	340	0,04
P13	Ain Elkseib	606296	3187528	Source	400	0,12
P14	Hi Dhob 1	689855	3167230	Puits	305	2
P15	Hi Dhob 2	688236	3167220	Puits	300	1
P16	Hi KhengAlaten	635631	3207453	Puits	477	5

2.1.4 Relation de l'aquifère du socle et la boutonnière de Sebkh el Melah

La sebkh el Melah, vaste boutonnière dans le faisceau de la Saoura, occupe une surface approximative de 350km². Elle se situe près de Kerzaz, son cœur constitue une véritable dépression. Elle reçoit les eaux de l'oued es Souirek, qui est une déviation de la vallée de la Saoura. Tenant compte des conditions climatiques qui règnent dans la région, au sein de cette large dépression, se sont développés des dépôts de sels et gypses où l'exploitation artisanale est largement exercée par les autochtones.

Le groupe de sebkh El melah sont considérés comme l'équivalent de la série verte du bouclier Targui (Caby, 1971 ; Caby, 1983 ; Black et al, 1979), et des séries flyschoides de Bled El Mass et d'Adrar (Caby, 1983 ; Fabre et al, 1983). Les descriptions données par nos prédécesseurs s'accordent sur un caractère volcano-sédimentaire de ce groupe (Dostal et al, 2002 ; Cherfouh, 2002 ; Hamdidouche, 2009 et Caby, 2010).

2.2 Aquifère du Continental intercalaire

2.2.1 Piézométrie du Continental intercalaire

Les études de CORNET (1964), ERESS (1972b), PALLAS (1978b), GEOMAT(1994), ont ainsi été mises à contribution pour l'élaboration de la carte piézométrique du Continental intercalaire (fig.72). Cette carte définit les écoulements de la nappe du Continental Intercalaire à l'état « naturel », peu ou pas influencé par les pompages. L'examen de la carte piézométrique de référence du CI (Fig.4.5) met en évidence les zones d'alimentation, indiquées par les directions d'écoulement. Il s'agit :

- du Djebel Hassawna où la piézométrie du Kikla se raccorde parfaitement à la piézométrie de la nappe du Cambro-Ordovicien qui présente, sur le Djebel Hassawna, un dôme à la cote 350 m drainé vers le Sud, par le Wadi ashShati et vers le nord par la nappe du Continental Intercalaire.

Les zones exutoires, suggérées par les points d'aboutissement des lignes de courant dessinées par la carte piézométrique sont :

- le Touat-Gourara et le Tidikelt,
- l'exutoire tunisien marqué par la faille d'El Hamma,
- l'exutoire libyen au niveau de Ain Tawargha.

L'anomalie piézométrique, sur la dorsale d'Amguid, ne peut être expliquée que par une drainance verticale vers le Complexe Terminal, à travers les failles de cette zone (Baba sy M., 2005).

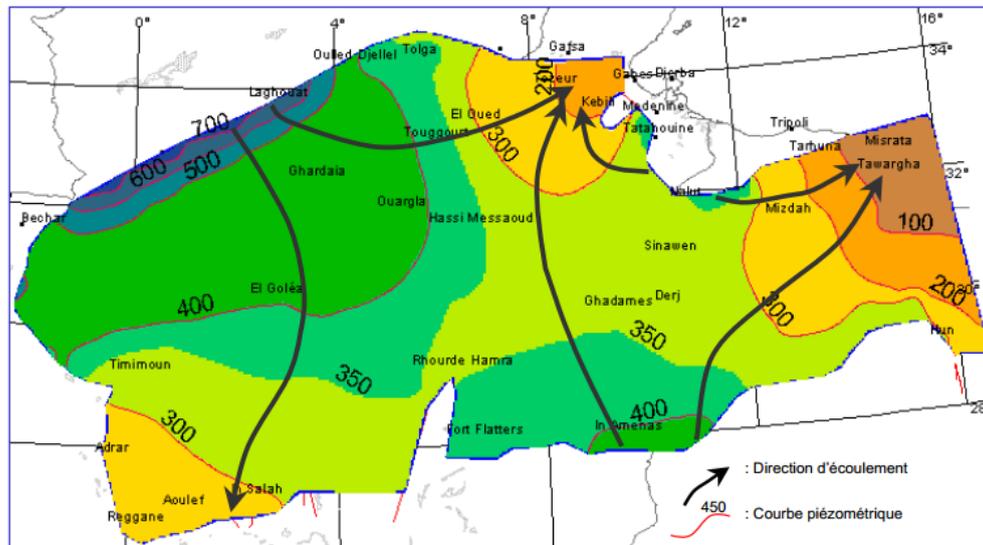


Figure 4.5: Carte piézométrique de référence du Continental Intercalaire (OSS, 2003 a et b)

Communément connue sous le nom de Continental Intercalaire, la nappe contenue dans ces formations se rencontre sous le Grand Erg Occidental et la Hamada Sud Oranaise où elle est libre. Sa limite occidentale est parallèle à l'Oued Saoura, à environ 20 Km de la vallée. Les formations du Continental Intercalaire réapparaissent plus à l'Est, dans l'axe El Goléa, Timimoun, Adrar, Reggane.

En se basant sur les travaux du BURGEAP et de Cornet, Roche (1973) trace une limite hypothétique (Fig.4.6). Le niveau piézométrique de la nappe du Continental Intercalaire est nettement inférieur à celui de la nappe de l'Erg. Cette dernière ne peut donc pas être alimentée par la première, mais au contraire, des pertes de la nappe de l'Erg au profit de celle du C.I. pourraient se produire (Roche, 1973). Ces débits n'ont jamais été estimés de façon quantitative. Les eaux du C.I. s'écoulent vers le Sud-Ouest, en direction du Touat et du Gourara. Sous la Hamada Sud Oranaise, elles sont faiblement minéralisées (1000 à 2000 mg/l), alors qu'elles sont légèrement plus minéralisées ailleurs, sous le Grand Erg Septentrional (2000 à 6000 $\mu\text{s/cm}$) (Edmunds et *al.*, 2003), ce qui pourrait nous confirmer l'hypothèse de son alimentation par la nappe du Grand Erg Occidental qui, elle, est très peu chargée en sels.

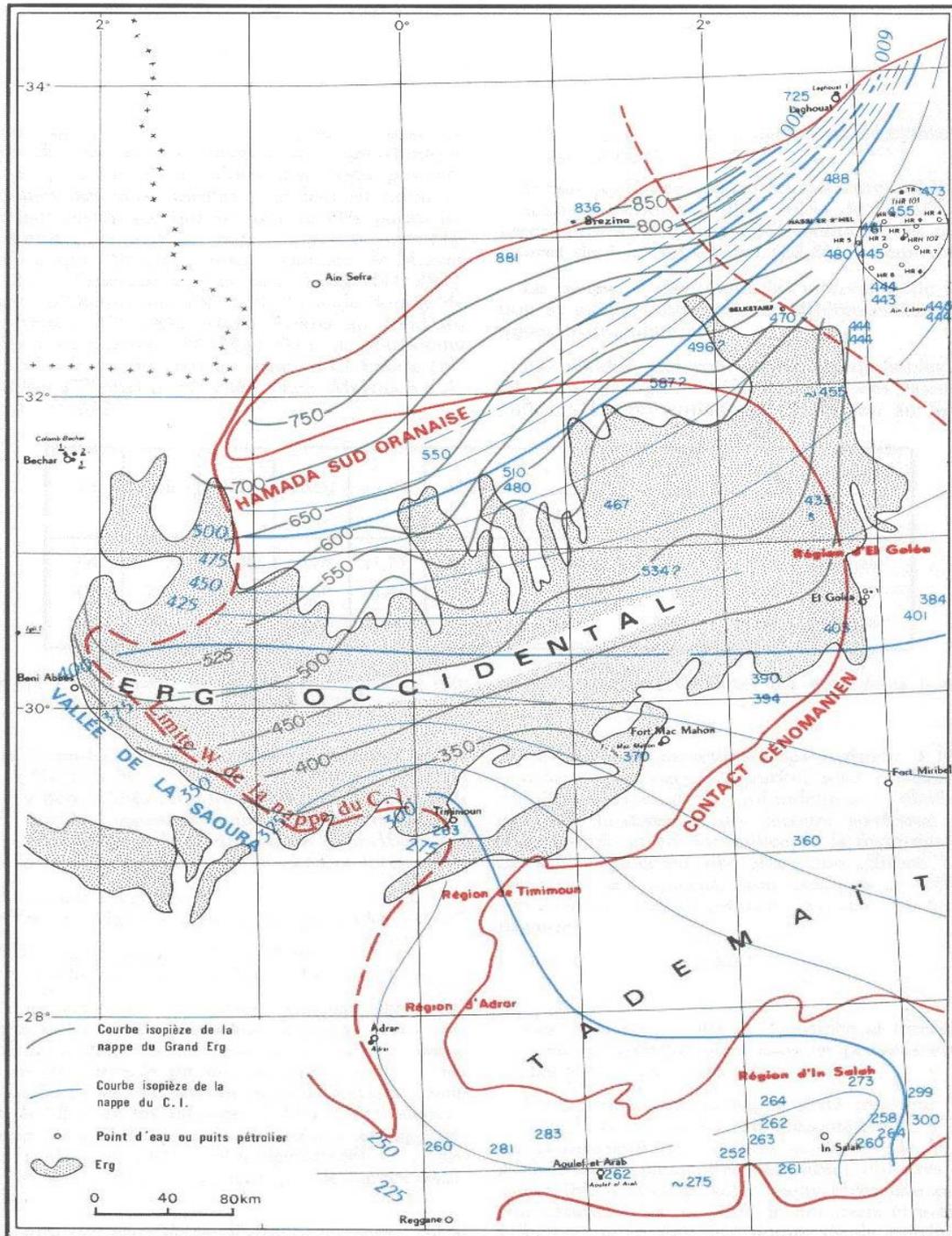


Figure 4.6. Carte piézométrique de la nappe du Continental Intercalaire et du Grand Erg Occidental (Burgeap, A. Cornet et M. A. Roche, 1973)

2.3 Aquifères du Continental Terminal

2.3.1 La nappe de la Hamada du Guir

La Hamada se situe sur la rive droite de la vallée de la Saoura, c'est un plateau faiblement incliné, depuis Boudenibe (1150 m) jusqu'aux chaînes d'Ougarta (650 m) avec une largeur de 110 km et une longueur de 200 km. Le plateau est orienté NW-SE, les calcaires constituent l'aquifère, dont la recharge est complexe, assurée d'une part, par les périodes humides du quaternaires, d'autre part, par

un système des oueds (Oued aicha, Oued El Abiod, Oued Alarfedj) (fig. 4.7). Cette nappe montre un écoulement dans l'ensemble suivant l'allongement de la Hamada NW-SE. (Combes ,1966), (fig.4.8).

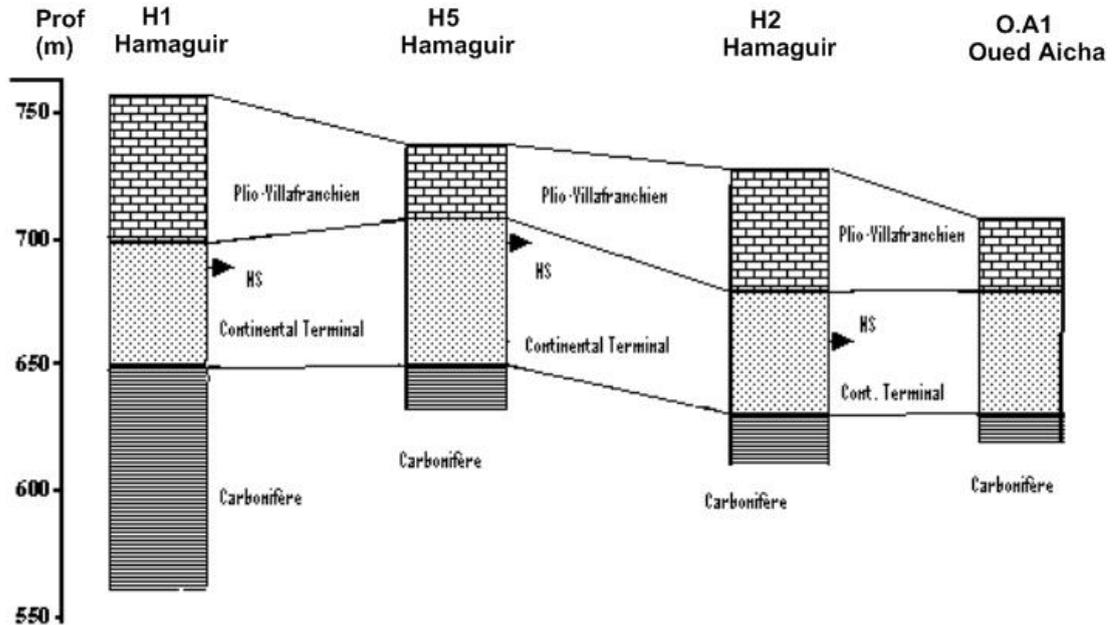


Figure. 4.7 : Corrélation entre les sondages de la hamada du Guir

Roche (1973) admet :

- Au Sud Est, la nappe aurait comme exutoires naturels les 'puits sources' de Zguilma; le sondage d'Igli n° 01 montrera qu'il y a également des apports depuis les calcaires gris bleus à entroques du Viséen. Les eaux qui émergent à la base de la Hamada sont en partie drainées par la Saoura.

- Au Sud, l'écoulement des eaux de la Hamada se trouverait bloqué par la présence de formations Primaires. Combes (1966) admet alors une accumulation des eaux dans les petites structures synclinales, sujettes à une forte évaporation (HassiMagsem El Abiod avec un résidu sec de 9.7 g/l). Parallèlement, les eaux ruisselant sur les formations Primaires suralimentent l'aquifère de la Hamada ; Le Hassi BRMA creusé sur les piémonts du Djebel Guettara présente un résidu sec de 0.77 g/l.

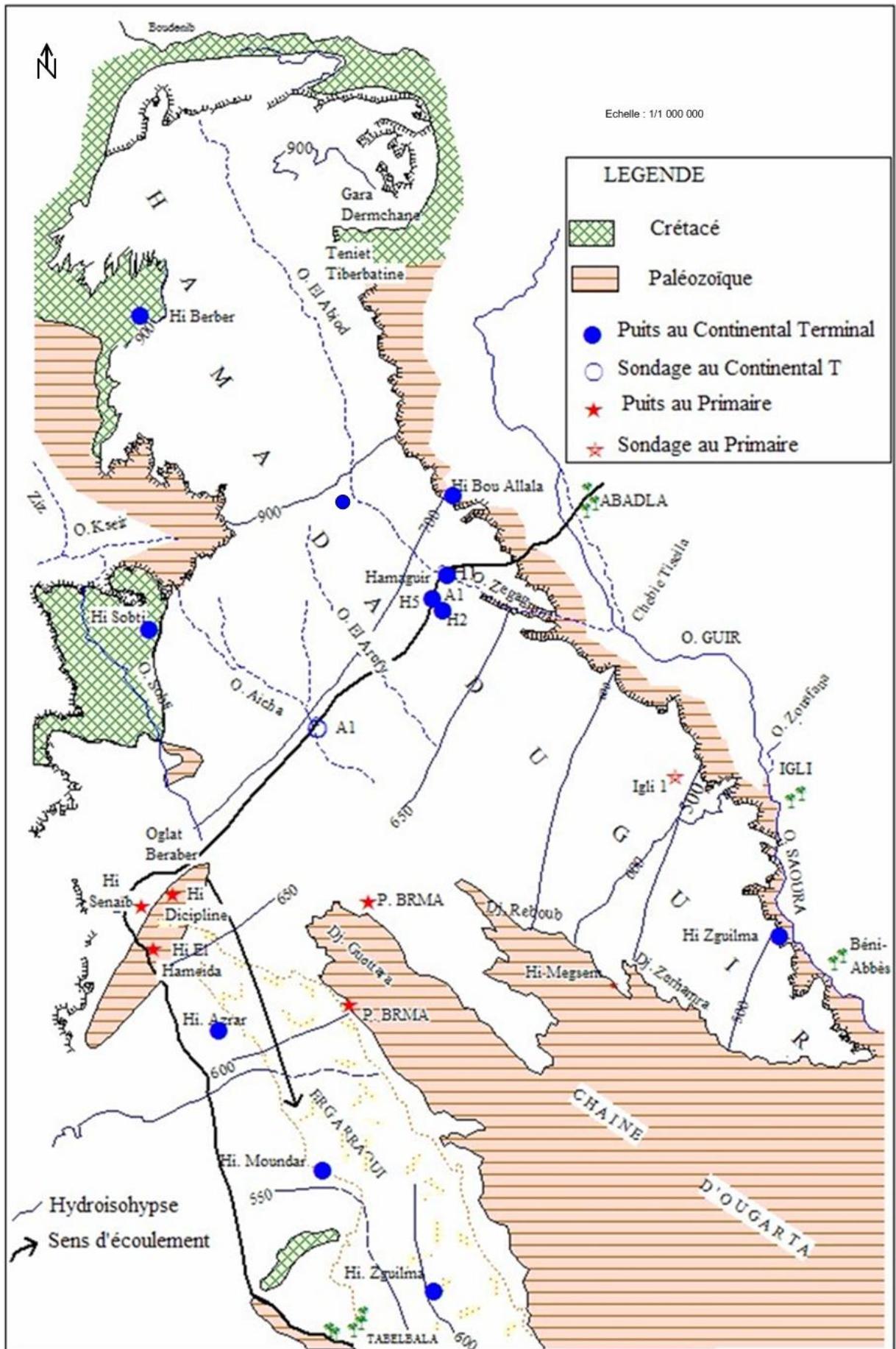


Figure 4.8 : Carte piézométrique de la nappe de la hamada du Guir (Combes, 1966)

- Au Sud-Ouest, la présence de l'oued Berraber dont les eaux de crue s'infiltrent sous les sables de l'erg Er Raoui, justifient les ressources disponibles plus au Sud dans la région de Tabelbala qui serait alimentée à la fois par la chaîne de l'Ougarta et les formations Hamadiennes. La dalle Hamadienne peut constituer un karst parsemé de dayas qui joueraient le rôle de dolines. Les eaux de pluie ruissellent sur la Hamada et viennent s'accumuler dans les dayas où une grande partie s'évaporerait, le reste s'infiltrerait.

Nous n'aurons donc pas une nappe continue mais un ensemble de réseaux karstiques pouvant évoluer séparément. Le point d'eau *HassiZguilma es Sghir* (puits-source) est creusé dans les couches inférieures du Mio-Pliocène de la hamada du Guir (Mansor, 2005).

2.3.2 Hamada Sud Oranaise (fig.4.9)

Recouvrant la plateforme saharienne, la hamada sud oranaise s'étire de Figuig au Nord Est de Laghouat, jusqu'au plateau de Tadmait au Sud. Cet aquifère est constitué par des formations grossières, fortement redressées au pied des monts des Ksour, et des sables et argiles rouges qui atteignent de grandes épaisseurs au Nord, en raison de l'abaissement de la plateforme Saharienne au contact de l'accident Sud Atlasique.

Les limites occidentales et méridionales du *Continental Intercalaire* étant mal connues, nous ne pouvons savoir à quel niveau les formations primaires plissées jouent le rôle de substratum pour le Néogène.

Par contre, un élément important est à retenir, étant qu'à l'aval de la Hamada, sable et argiles rouges ont fait place à une formation marneuse blanche appelée Torba.

A Béni Abbas, la dalle des calcaires lacustres Pliocènes surmonte cette Torba qui repose elle-même sur le Dévonien plissé. Sur ces calcaires, viennent des niveaux sablonneux dans lesquels s'intercalent des argiles rouges nommées Tachenrit. La dalle des calcaires Pliocènes a pour mur la Torba et pour toit le Tachenrit. Elle constitue ainsi la seule conduite hydraulique possible pour les eaux de la nappe du grand Erg.

L'ensemble Hamadien a été largement disséqué par les oueds Quaternaires (Zousfana, Namous, Gharbi et Seggueur) qui dévalent à partir des piémonts Atlasiques. Par la suite, l'instauration du climat désertique en permettant la mobilisation par les vents de sables entraînés au Sud lors des phases pluviales, va permettre la formation du Grand Erg Occidental qui fossilisera par la suite les lits des paléo oueds. La Hamada elle-même disparaissant sous l'épais manteau sableux.

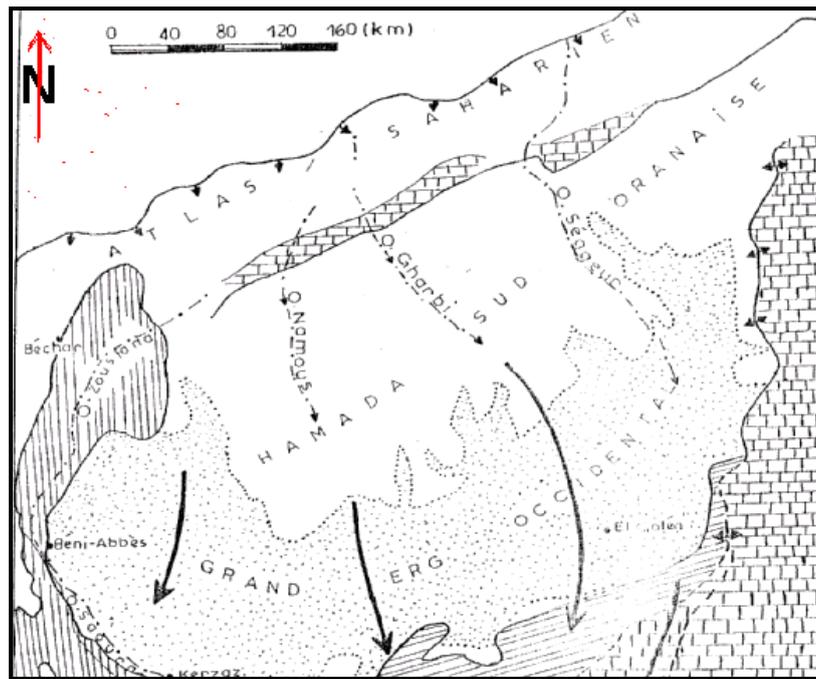
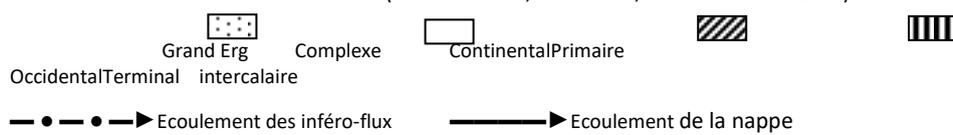


Figure.4.9 : Carte hydrogéologique de la Hamada Sud Oranaise
 (Extrait de la carte hydrogéologique du Sahara Nord Occidental.
 (R. Gonfiantini, G. Conrad, J. CH. Fontes – 1974)



La coupe schématique établie entre l'Atlas des Monts des Ksour et la vallée de la Saoura (Fig.4.10) permet de faire ressortir la complexité du système hydrogéologique du Nord-Ouest Saharien. En effet, l'entablement des calcaires Pliocènes joue un rôle de relais, permettant de drainer les eaux souterraines, issues de la Hamada et la nappe sous l'Erg vers la vallée de la Saoura.

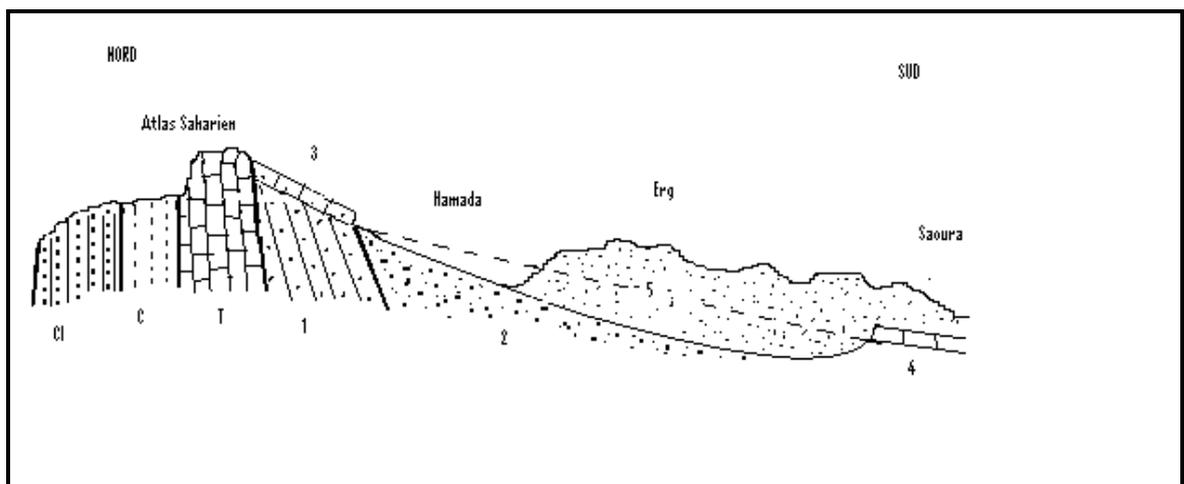


Fig. 4.10 : Coupe géologique schématique Atlas Saharien – Hamada – Grand Erg Saoura
 (Mansour, 2005)

T : Barre de calcaires Turonien de la bordure Atlasique, C : Cénomaniens, Ci : Continental Intercalaires
 1 : Formations détritiques grossières à la base et la série, 2 : Sables et argiles rouges, 3 : Poudingues de carapace calcaire, 4 : Entablement calcaire, 5 : Grand Erg

Au Nord, la limite de l'aquifère est indissociable des contreforts de l'Atlas et des apports du *Continental Intercalaire* (liaison hydrodynamique). Les inféro-flux de (Zousfana et Namous) quant à eux qui drainent le versant méridional de l'Atlas, interviennent principalement par voie aérienne (crues de printemps) et écoulement hypodermique.

La limite occidentale du système est intimement liée à la présence des formations Carbonifères du bassin Taghit – Béchar, qui à leur tour peuvent intervenir pour suralimenter l'aquifère de la hamada Sud Oranaise.

2.3.3 Aquifère du Mio-Pliocène (Grand Erg Occidental)

L'appellation de la nappe du grand erg occidental nous paraît impropre. Ce n'est pas dans les sables de l'erg que circulent les eaux mais bien dans les formations Mio-Pliocène qu'il recouvre. La dalle silico-calcaire hamadienne constitue un milieu préférentiel pour la circulation des eaux.

La grande source de Béni Abbes se trouvant elle-même liée à ce milieu, des conditions litho stratigraphiques et structurales particulières qui ont été définies par l'étude géophysique (chapitre 03) ont commandé un rassemblement des eaux à son niveau.

En outre, cet aquifère est le plus important et la plus vaste réserve aquifère de la vallée de la Saoura limitée au Nord par la flexure Sud atlasique. Elle se prolonge au Nord – Est jusqu'au pays des Daïas (Nord de Ghardaïa)

L'état de connaissance initiale a été défini par Schoeller (1945) qui, étudiant l'hydrogéologie de la région de Béni Abbes emploiera pour la première fois, en se fondant sur l'étude piézométrique, l'appellation de Nappe du Grand Erg Occidental (Fig.4.11). La carte piézométrique montre des écoulements vers la Saoura, et vers le Sud (Schoeller, 1945 et Cornet, 1964) (Fig.4.12). Cette nappe est alimentée essentiellement par les oueds septentrionaux auxquels s'ajoutent les infiltrations des eaux météoriques dans les sables et les crues au niveau du djebel El Kehla (Schoeller, 1962 et Roche, 1973).

Roche (1973) a publié une carte très semblable où chaque puits comporte la cote du sol et le niveau piézométrique (fig. 4.13). La grande source de Béni Abbés constitue l'exutoire par excellence de la nappe de l'Erg au droit de Béni -Abbés.

La dernière carte a été établie par l'Agence Nationale des Ressources Hydraulique en 1995 (Fig 82). La carte piézométrique montre des écoulements Nord- Est Sud -Ouest semblables à ceux des cartes réalisées précédemment avec une alimentation à partir de l'air de Djebel khehla.

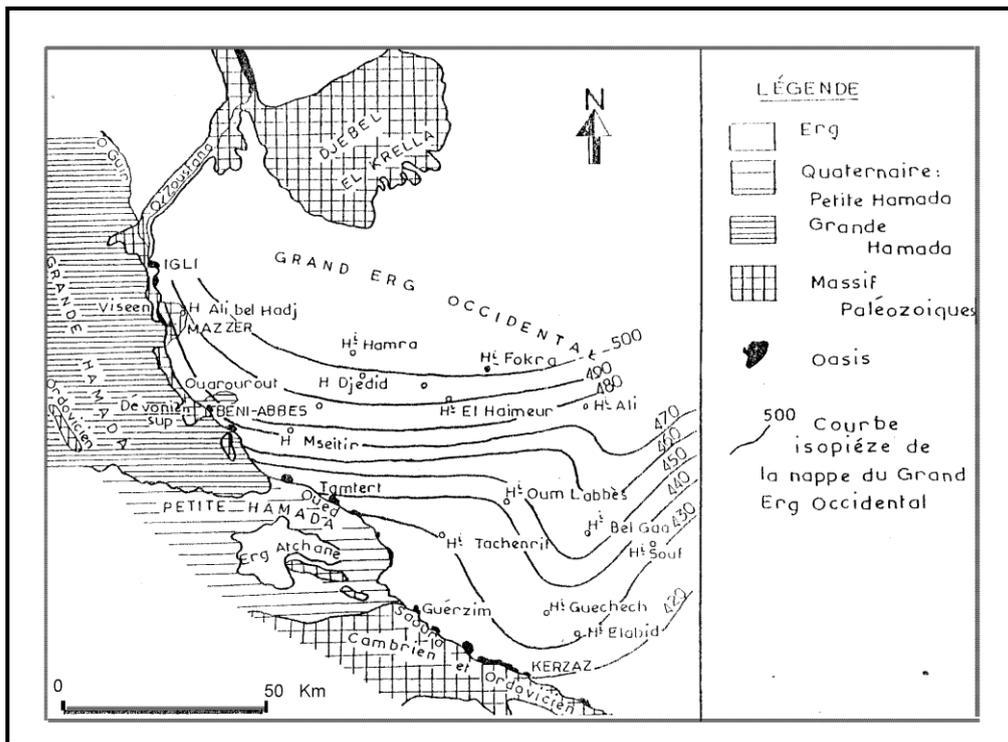


Figure .4.11: Esquisse hydrogéologique de la bordure du Grand Erg Occidental (Scholler, 1945)

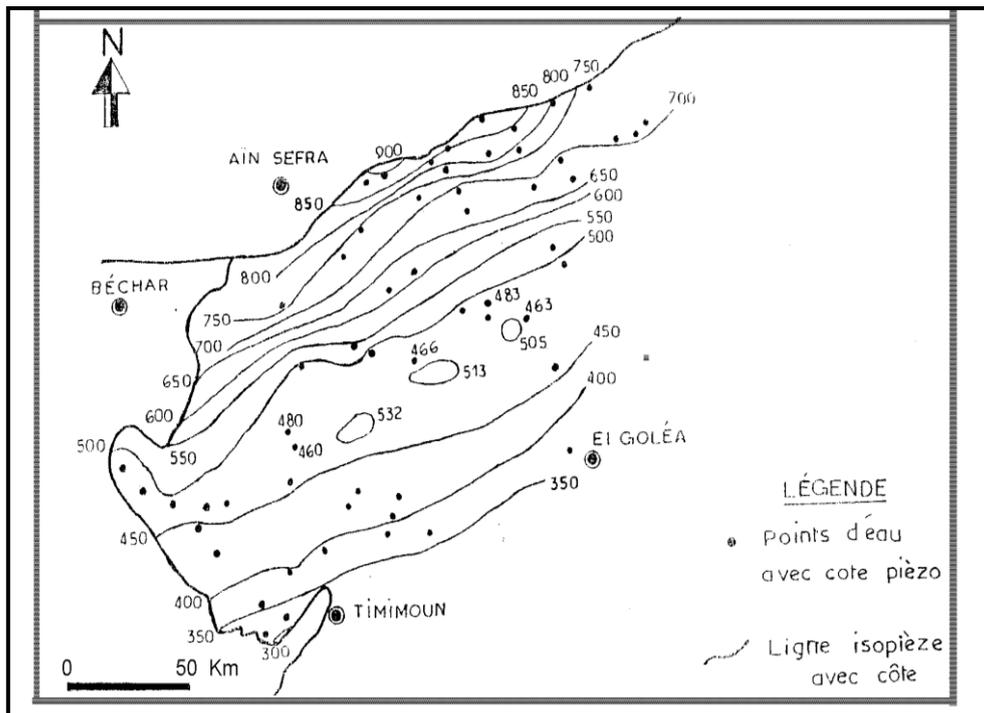


Figure 4.12 : Carte piézométrique de la nappe du grand erg occidental (Cornet, 1964)

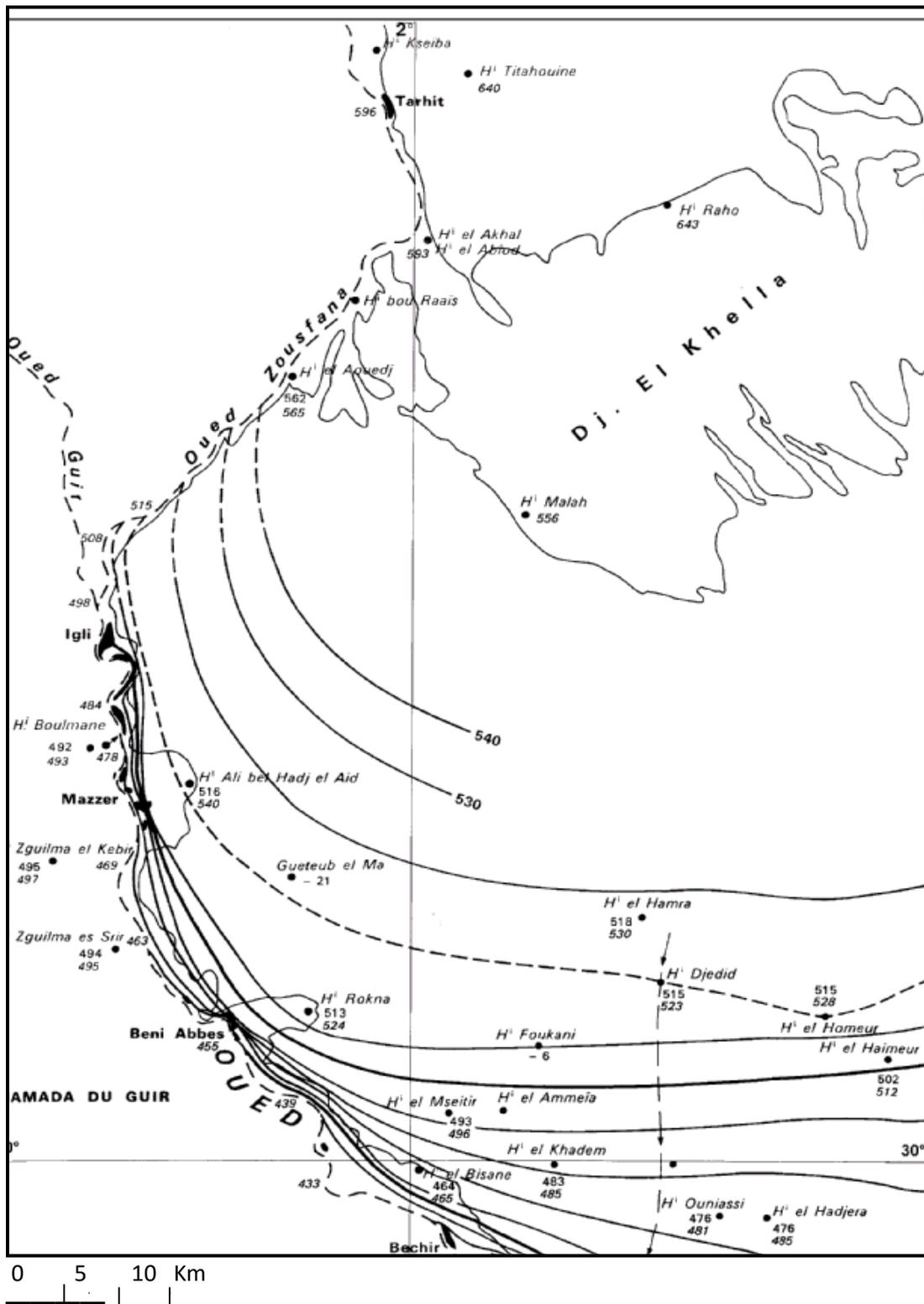


Fig. 4.13 : Extrait de la carte piézométrique de la nappe du Grand Erg Occidental au droit de la Saoura entre le massif d'El Khella et Béni Abbas (Roche, 1973)

- Puits avec côte piézométrique (haut) et côte du sol (bas)
- 440— Courbes izopièzes
- ▶▶▶ Ligne de courant de la nappe
- almeraias

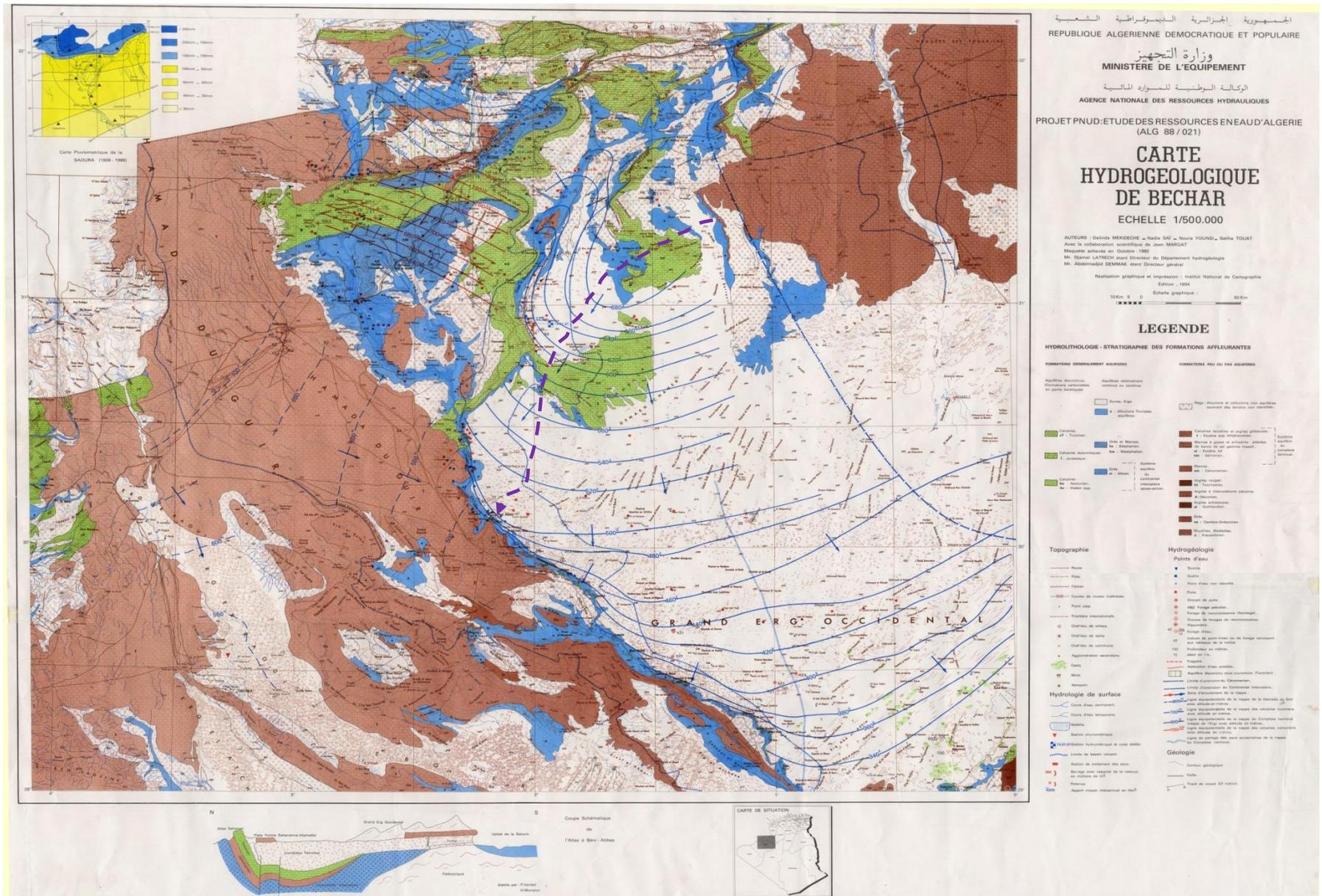


Figure 4.14. Extrait de la Carte hydrogéologique de Bechar et la piézométrique de la nappe du Grand Erg Occidental (ANRH, 1995)

2.3.3.1 Réflexions sur la relation hydraulique entre la nappe du Mio -Pliocène (grand Erg Occidental) et le Continental Intercalaire

La nappe du *Continental Intercalaire* se rencontre sous le Grand Erg et la Hamada Sud oranaise. Elle s'écoule vers le Sud Est dans la partie Ouest du Grand Erg. La limite occidentale de la nappe se situe parallèlement à l'Oued Saoura, à une vingtaine de kilomètres de la vallée.

Le niveau piézométrique est nettement inférieur à celui de la nappe de l'Erg (fig.4.13). On observera ainsi au droit d'Igli une cote de 425 m qui s'abaisse à 395 m au droit de Béni Abbés et à 325 m au droit de Ksabi. Aux mêmes points, le niveau piézométrique de la nappe de l'Erg se situe respectivement à 135 m, 105 m, et 20 m plus haut. Ainsi l'hypothèse de l'alimentation de la nappe de l'Erg par celle du *Continental Intercalaire* reste très hypothétique ; par contre des pertes de la 1^{ère} au profit de la 2^{ème} pourrait se produire. Rognon (1964) estime les débits d'infiltration sur la Hamada Sud oranaise et le Grand Erg à 4 m³/s sur tout l'ensemble de la nappe.

La distribution des courbes isopièzes autour du massif d'El Khella confirme son rôle dans l'alimentation de la nappe de l'Erg (fig. 4.13).

Les pertes observées sur l'oued Zousfana en amont de Taghit, traduisent l'existence de réseaux karstiques dans les calcaires Carbonifères. Etant donné l'importance des pluviaux Quaternaires, il est évident que ces réseaux karstiques peuvent être très développés.

A la lisière septentrionale du grand Erg, trois dômes piézométriques qui correspondent exactement aux secteurs où les oueds Namous, Gharbi et Seggueur perdent leur tracé linéaire pour s'épandre à la surface de la Hamada. La recharge de la nappe sur ces trois points nous paraît tout à fait évidente.

Notre hypothèse est que la limite du CI, se trouve à 100 km de la frontière de la vallée de la Saoura. Aussi la nappe du Mio-Pliocène de l'erg occidental, est renfermée dans un bassin hydrogéologique et que l'alimentation de cette nappe de CI ce fait au sud vers le Touat et Gourara.

Exutoires

Comme nous l'avons déjà mentionné précédemment, des pertes ont probablement lieu au profit du Continental Intercalaire sous-jacent au Grand Erg. Vers le Sud Est, les eaux s'équilibrent avec celles du Continental Intercalaire, tandis que vers le Sud-Ouest, les eaux s'écoulent en direction des terrasses tertiaires et quaternaires de la vallée de la Saoura, puis de l'Inféro-flux de l'Oued. C'est cette zone, correspondant à l'exutoire de la nappe du grand Erg que nous avons étudiée en détail par la suite.

2.3.3.2 Piézométrie de la nappe grand erg occidental 2016.

Les campagnes piézométriques Mars et avril 2014- 2015 et 2016, nous ont permis de tracer la carte piézométrique de la nappe du grand erg occidental, l'inventaire des points d'eau est reporté sur le tableau 4.2.

Tableau 4.2: Inventaire et positionnement des points du grand erg occidental, 2016.

N°	Identification (nom)	X	Y	Z (m)	TYPE	NS (m)	NP (m)
1	HASSI FEDJ BOUNOUARA	537540	3349844	502	Puits	13	489
2	HASSI EL ROKNA	586967	3334499	533	Puits	12.5	522
3	HASSI ALI	584801	3358382	603	Puits	12	591
4	HASSI JDIDA	383150	3336895	521.2	Puits	11.1	510.1
5	HASSI PIEZO	581620	3334223	498	Puits	0	498
6	HASSI LA HAMARA	616631	3343319	561	Puits	13.3	547.7
7	HASSI LEMASSSHA	640336	3348613	562	Puits	13	594
8	HASSI FOKRA	651520	3337625	536	Puits	27.45	508.55
10	HASSI BAGRA	630152	3375027	622	Puits	24	598
11	HASSI DIBONI	730403	3335328	505	Puits	43.8	461.2
12	HASSI HOMEUR	633931	3343635	520.8	Puits	13.5	507.3
13	HASSI KTOB MAA	594100.	3343225.	550	Puits	16	534
14	HASSI MARHOUMA	593280.	3319770.	448	Puits	2.4	445.6
15	GRAND SOURCE	580912	3332346	494	Source	0	494
16	HASSI TIKHSSAGIME	605699	3324284	520	Puits	12.09	567.91
18	HASSI TAGHIT	596285	3328637	655	Puits	12.7	655
19	HASSI IGLI	595265	3358835.	500	Puits	11.1	488.9
20	HASSI KRZAZ	645778.	3262794.	328	Puits	10.2	317.8
21	HASSI EL GSABI	783921.	3211687.	360	Puits	12.1	347.9
22	HASSI BENT CHARK	717261.	3294235.	360	Puits	15.9	344.1
23	HASSI TIMOUDI	685528.	3248347.	369	Puits	11	358
24	HASSI HUISSI	59254	3319342	470	Puits	6	464
25	HASSI EL OUATA	614066.	3304536.	435	Puits	7.6	427.4
26	HASSI TAMTERT	954837	3319412	475	Puits	6.5	468.5

a. Profondeur de la surface piézométrique

Ne disposant pas de points de mesures, nous avons été amené à utiliser les niveaux statiques reportés sur les cartes géologiques au 1/500 000e de Kerzaz et de Béchar. La piézométrie a été calculée à partir d'un MNT (modèle numérique du terrain). Nous portons sur la figure 4.17 ci-dessous l'allure des courbes piézométriques.

Une campagne d'inventaire des points d'eau a été effectuée durant l'année hydrologique 2015-2016. La figure 4.15 montre la position des point d'eau prélevés et inventoriés. Dans la zone de la: nappe drainée par la Saoura, la côte de la surface piézométrique semble être le plus fréquemment de 328 à 622 mètres, spécialement au voisinage de la lisière de l'Erg ou dans la zone voisine de Béni-Abbès.

La côte piézométrique maximale observée est de 533 mètres à HassiFokra: et HassiRokna à 533m. La profondeur de la surface piézométrique dans les puits varient entre 03 à 27 m . la profondeur de l'eau reste stable pendant 4 ans dans presque tous les puits suivi (du 2014 au 2016) (Fig 4.16). Il faut souligner que les puits sont toujours creusés dans le Plio-Villafranchien ou le Quaternaire de Gassis particulièrement déprimés. Les sommets de certaines dunes peuvent atteindre 100 à 130 mètres au-dessus de ces creux et il va de soi que

ces profondeurs, données par rapport au sol des Gassis, ne sont pas applicables à l'étude de certains phénomènes.

La carte de la surface piézométrique présente un écoulement du nord vers le sud c'est-à-dire de l'Atlas saharien vers la Saoura et le Gourara, en décroissant du nord au sud et de l'est vers la vallée de la Saoura.

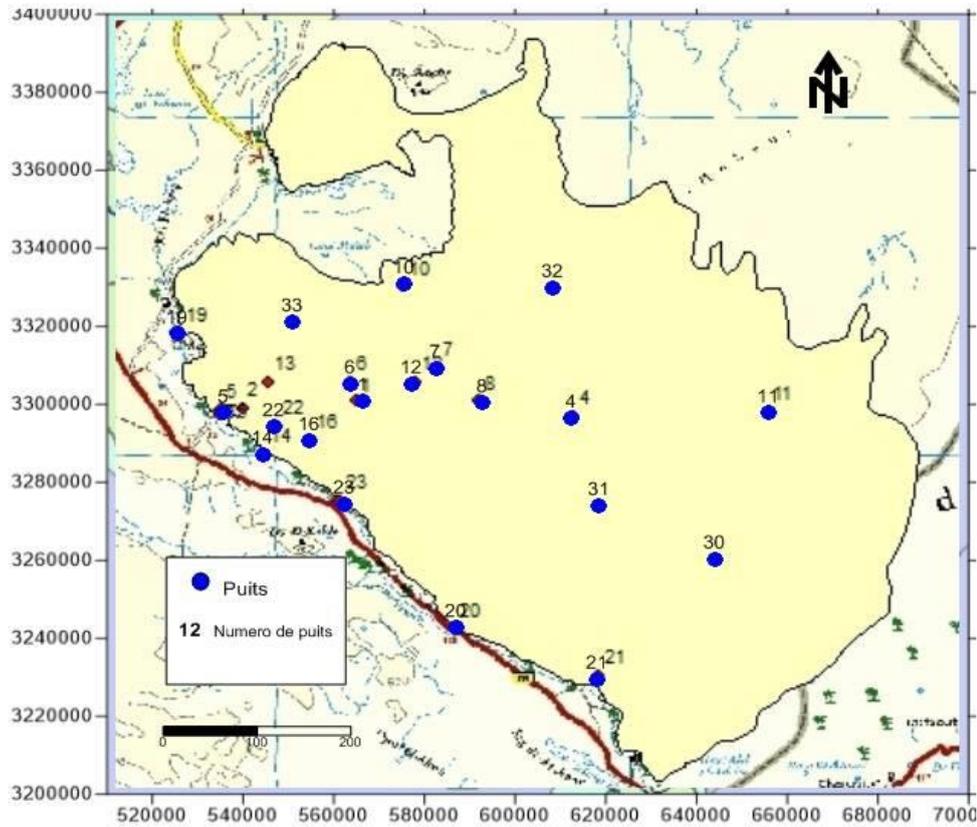


Figure 4.15 : Carte de positionnement des points d'eau

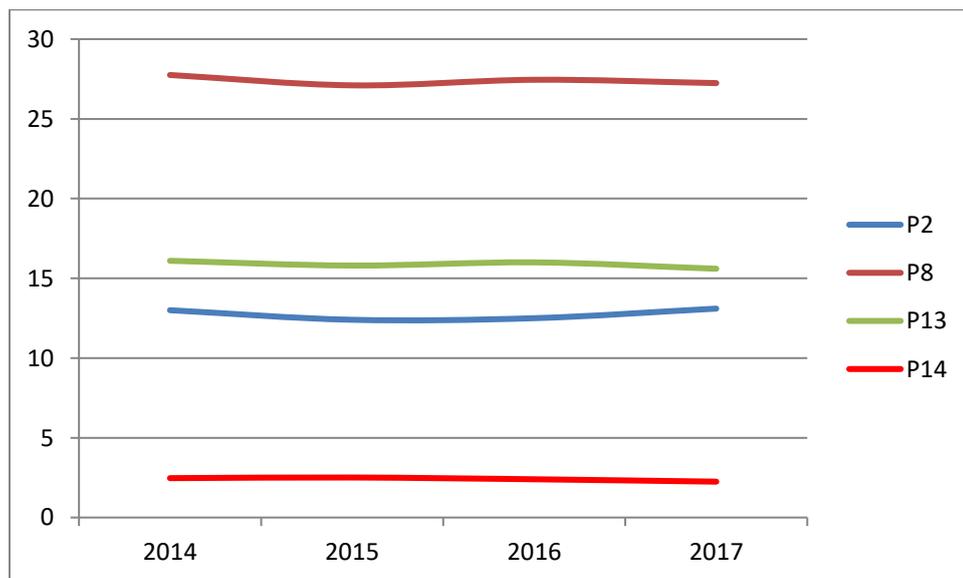


Figure. 4.16 Evolution de la profondeur de l'eau de la nappe de l'Erg de l'Est vers l'Ouest

Les eaux d'infiltration transitent par la Saoura à travers les émergences de la Saoura vers le Sud Est et le Gourara, Touat et Tidikelt avant de se perdre ou être collectées aux exutoires constitués par les Foggaras. Pour caractériser l'hydrodynamique de ces zones, nous nous proposons de calculer les flux de transit de l'Atlas saharien vers l'Erg occidental, à travers la section A et B de front Nord (Fig.4.17)

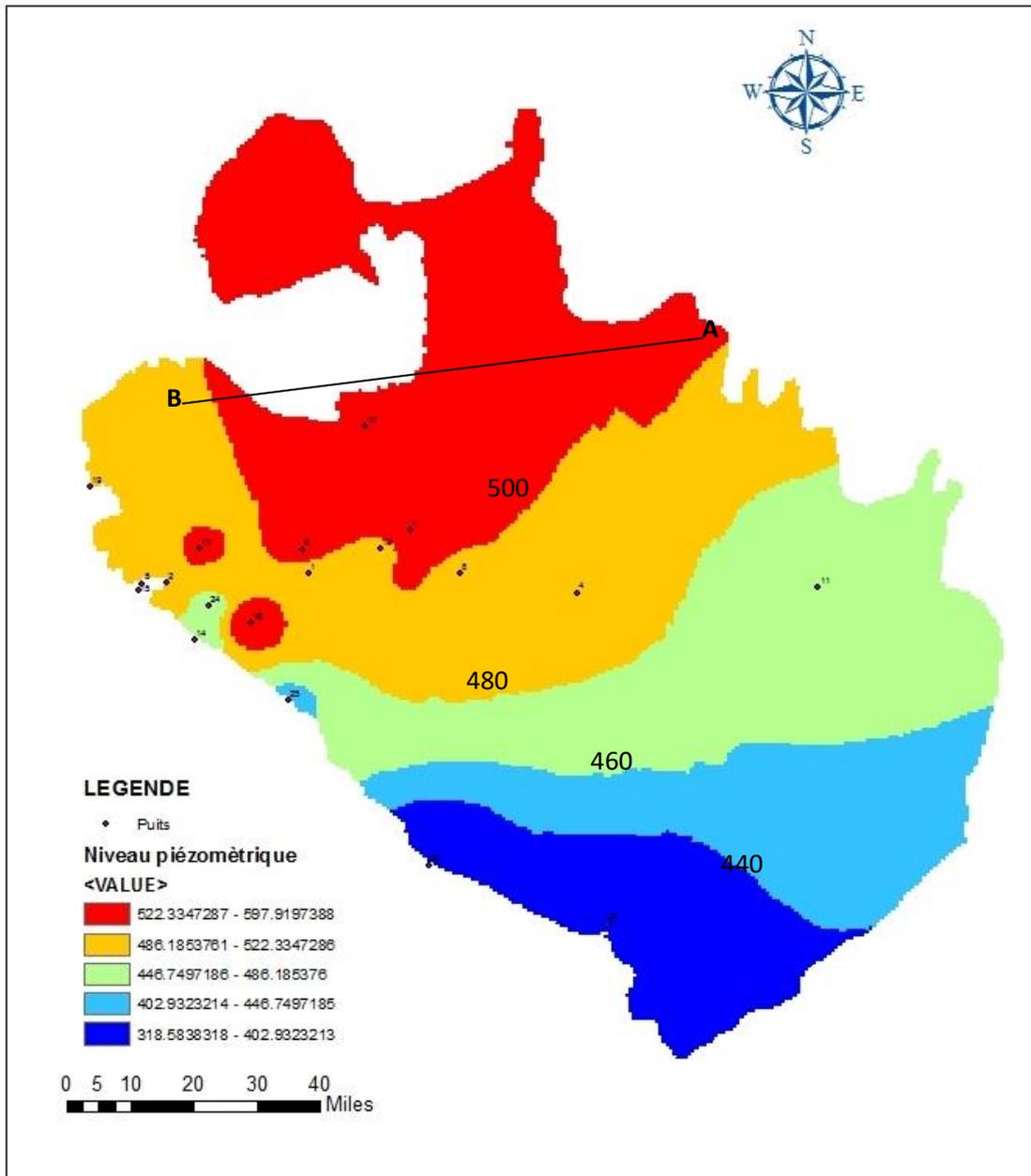


Figure.4.17 . Carte piézométrique de la nappe du grand erg occidental 2016.

b. Hydrodynamique de la nappe du Mio-Pliocène (Nappe de l'erg Occidental)

b.1 .Perméabilité

La base du calcul de la quantité d'eau souterrain ou débit d'une nappe, par l'hydrodynamique souterraine, est la loi expérimentale de Darcy (Darcy, 1856). (in Castany 1982).

$$Q_{(m^3/s)} = K_{(m/s)} \times A_{(m^2)} \times h/l$$

b.2 Gradient hydraulique

Les gradients élevés de la bordure Atlasique décroissent rapidement pour n'être plus que de 0.8 à 0.5 ‰ à une centaine de kilomètres, à l'emplacement des dômes piézométriques. C'est également là que le *Continental Intercalaire* passe au contact direct du *Tertiaire Continental*, l'un réalimentant l'autre.

Le gradient hydraulique varie entre $2 \cdot 10^{-2}$ ou $5 \cdot 10^{-2}$. Avec une moyenne de $3,3 \cdot 10^{-2}$ pour la zone étudiée.

b.3 .Transmissivité

La transmissivité est un paramètre hydrodynamique essentiel dans l'étude de la nappe libre du grand erg occidental.

b.4 Coefficient d'emménagement (porosité efficace)

L'interprétation des données des essais de pompage ont permis de déterminer des valeurs de coefficients d'emménagement. Les fortes valeurs des coefficients d'emménagement correspondent aux zones de bonne transmissivité. Au niveau de la nappe du grand erg occidental on trouve des valeurs de 0.02 et 0.059 au Nord, au Sud les valeurs s'échelonnent entre 0.014, 0.038 et 0.0011.

c. Alimentation

L'alimentation de l'aquifère du grand erg occidental s'effectue à partir des oueds de l'atlas saharien (Oued Namous et Oued Gharbi)

Nous sommes aujourd'hui en 2016 et soixante-quinze ans après les premières recherches de Schoeller en 194, force nous est de constater que nos connaissances sur la physique de la nappe de la hamada Sud oranaise n'ont guère progressé.

c .Flux de transit aux zones de recharge du Grand Erg Occidental

Le flux de transit est donné par l'équation de Darcy qui s'écrit : $Q = T * i * L$

Avec :

Q : le débit

T : la transmissivité de la formation aquifère

L : la largeur du front de la nappe

$i = \Delta h/l$: est le gradient hydraulique où Δh est la différence de charge hydraulique

entre deux points situés sur la même direction d'écoulement et distants d'une longueur l.

Il n'y a pas eu d'essai permettant de mesurer la transmissivité dans l'Erg Occidental. Tout au plus sait-on que 3 sondages ont permis d'obtenir une dizaine de l/s pour un rabattement de l'ordre du mètre, mais pour une pénétration variable dans l'aquifère (Hal HI - GK101 -Hassilukhal). La transmissivité correspondante serait de l'ordre de quelque 10^{-2} m²/s (SOGREAH, 1970). Le débit calculé, à travers la section AB :

$$Q = 1 \cdot 10^{-2} \times 0.02 \times 80000 = 16 \text{ m}^3/\text{s}$$

Il ressort de ces calculs que 16 m³/s, provenant de l'Atlas saharien, rentrent dans la lisière de l'Erg occidental.

2.4 Nappes des terrasses et inféro- flux de la Vallée de la Saoura.

L'inféro - flux de la vallée de la Saoura constitue le niveau de base d'eaux souterraines. Ce niveau est alimenté par les crues de l'oued Saoura, qui s'infiltré dans les sables de son lit, le long de la vallée de la Saoura. La profondeur du niveau piézométrique varie généralement de zéro (Guelta) à trois mètres au-dessous du sol. Le gradient hydraulique de l'inféro-flux peut être assimilé à petite échelle à la pente du profil longitudinal de la vallée de la Saoura., il est de 0.65 /1000 de Marhouma à Sebkha el Melah (Roche, 1973).

Vu l'immensité de la surface du terrain étudié et les difficultés d'accès à certaines zones, il ne nous a pas été possible de recenser tous les points d'eaux de la région. Seuls, des points représentatifs ont été considérés au niveau de chaque palmeraie. La palmeraie de Béni-Abbès, étant la plus importante, Mebrouk N., 2007 a effectué un maximum de mesures et de prélèvements.

Au terme de cette étude hydrogéologique synthétique et globale, les principaux aquifères de la région ont été mis en évidence. A l'Est de l'Oued Saoura, la nappe phréatique du Grand Erg Occidental représente les ressources souterraines les plus importantes et semble indissociée de celle de la nappe des terrasses qui longent la Saoura.

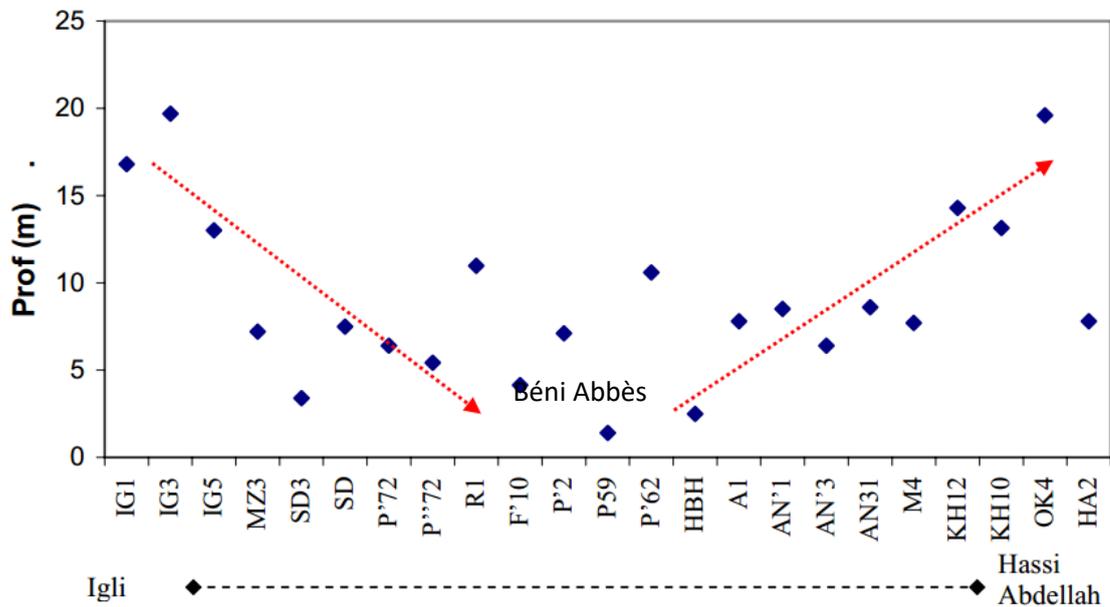
2.4. 1. Variations de la Profondeur de l'eau dans la vallée de la Saoura :

D'après les travaux de Mebrouk 2007, un suivi des variations de la profondeur de l'eau de la nappe durant les campagnes entre 2002 et 2004 a été effectué. Ce sont généralement les puits localisés au niveau des palmeraies, donc les plus proches de l'oued, qui présentent les variations les plus importantes de la profondeur ainsi que les puits destinés à l'alimentation en eau potable l'A.E.P, A.E.I et l'irrigation qui seraient encore influencés par le pompage au moment des mesures. Sur l'ensemble des points mesurés, la profondeur varie entre 0.7 et 24.5m (tab.4.3).

Tableau 4.3 : Valeurs minimales et maximales des profondeurs de l'eau de la Saoura (Mebrouk, 2005)

	CI (Oct/Nov. 2002)	CII (Avril 2003)	CIII (Fev. 2003)	CIV (Mai 2004)
Prof. Min. (m)	1.11 (P59)	1.05 (P59)	0.70(Z6)	1.4 (P59)
Prof. Max. (m)	14.5 (H1)	24.5 (KH7)	22.0 (KH32)	24.83 (AN1)

Par ailleurs, nous avons représenté les variations de la profondeur des eaux typiques de l'Erg le long de la vallée de la Saoura, de l'amont (Igli) vers l'aval (Hassi Abdallah) (Fig. 85). On remarque que la profondeur diminue de l'amont vers la moyenne Saoura et augmente à nouveau vers l'aval, à la basse Saoura (Mebrouk



2007).

Figure.4.18 : Variations de la profondeur des eaux typiques de l'Erg le long de la Saoura (Mebrouk,2007)

2.4.1 Evaluation des débits de la décharge au niveau de la vallée de la Saoura

La compilation des données hydrodynamique nous a permis d'effectuer une évaluation de la ressource en eau au niveau des fronts de la vallée de la Saoura à partir de la région d'Igli jusqu'à Agdal au niveau de la région d'El Outa (tableau 4.4).

Tableau 4.4 : paramètres hydrodynamiques des ressources de la vallée de la Saoura :

	Front	T (10 ⁻³ m/ s)	I	Q = T*I*F (m ³ / s)	Débit (m ³ / j)
Igli	5	0.12	1.3	0.0156	1347.8
Mazzer	7	0.06	6	0.0360	3110.4
Béni _ Abbés	5	2	3	0.6	51840
Marhouma	4	0.4	2.3	0.92	79488
Tamtert	5	0.36	4.6	0.16	1384
Elouata	5	2.6	6.4	0.1014	8761
Anfid _ Agdal	5	2.5	3	0.33	29116.8

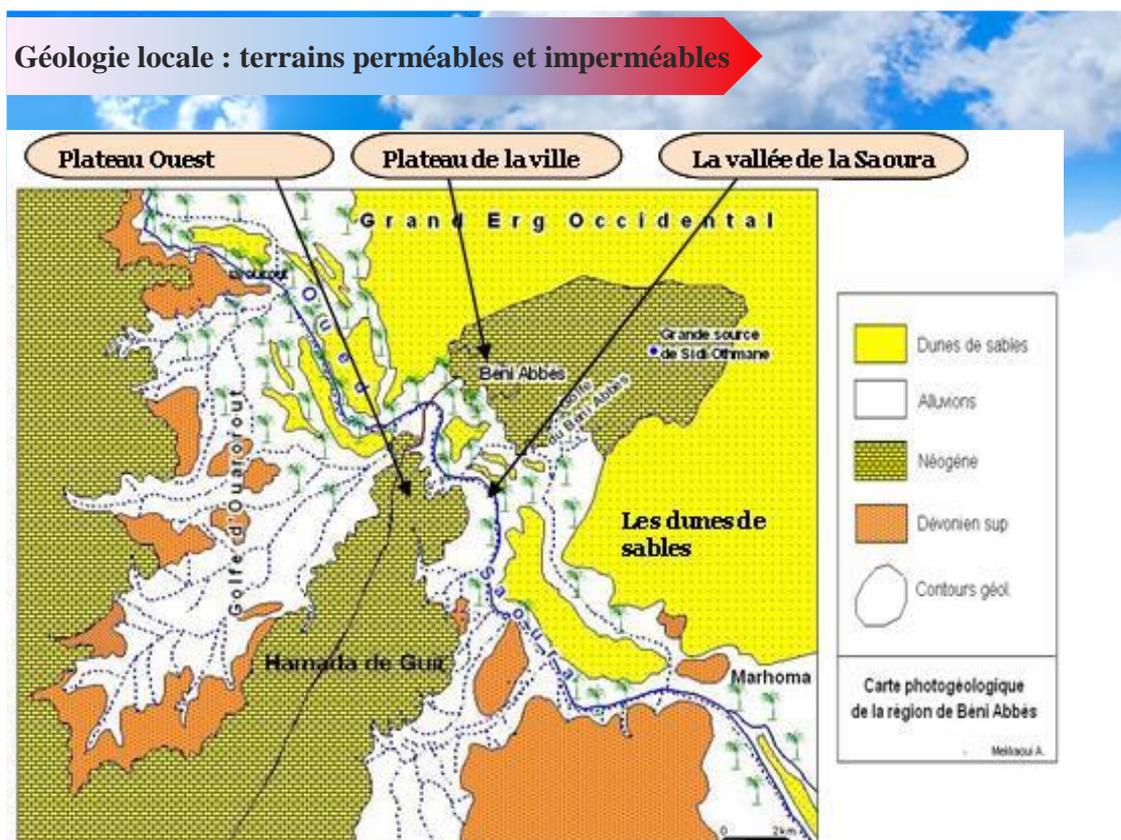
3. Hydrogéologie du Système aquifère de Béni Abbès

3.1 Conditions et gisements

La géologie de la région de Béni -Abbès est formée essentiellement d'un substrat constitué d'assises paléozoïques allant du Précambrien au Viséen. Le Mio-Pliocène recouvre par du Plio-Villafranchien constitue la Hamada du Guir. La partie supérieure étant du Villafranchien supérieur repose en discordance sur le Primaire dont, ils comblent les vallées paléogènes et sont recouverts par le grand erg occidental de la Saoura (Fig. 4.19).

Les formations quaternaires occupent de très grandes surfaces. Le Quaternaire est marqué par l'existence des terrasses alluviales entre autres les terrasses anciennes villafranchiennes, les terrasses saouriennes, ainsi que les terrasses guiriennes.

Les formations présentes aux limites de la région de Béni -Abbès, conditionnent l'existence de plusieurs aquifères et des nappes. Ce système aquifère local le plus important de la haute vallée de la Saoura est alimenté par les eaux de l'atlas Saharien traversant la plateforme saharienne (Fig.4.20)



Dévonien sup: schiste rouge **Néogène:** calcaire, argile et sable **Alluvions:** sable grés et argile

Figure 4.19. terrains perméable et imperméables

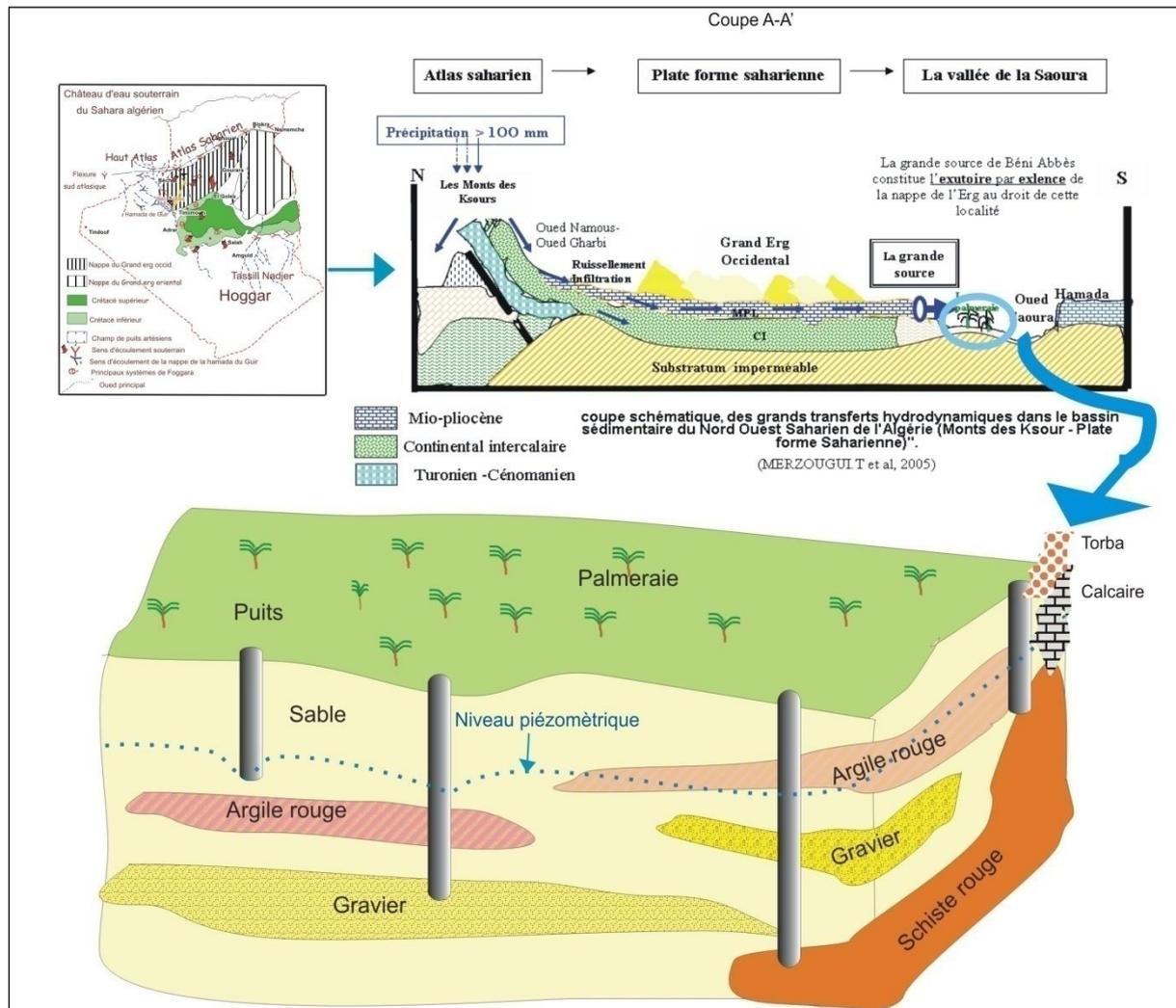


Figure 20. Condition et gisement des aquifère à Béni Abbas (Merzougui, 2011)

3.2. Fonctionnement du système aquifère

Les différentes nappes à Béni Abbas s'organisent selon un système aquifère complexe et interconnecté (Fig.4.21).

La vallée de la Saoura départage ce système en deux compartiments ; occidental et oriental. L'occidental est passif et comprend la nappe de la Hamada de Guir, qui communique par endroit avec les nappes du Paléozoïque supérieur.

En revanche, le compartiment oriental est actif : C'est un drain naturel assurant l'écoulement des eaux de la nappe du grand erg occidental vers les nappes des terrasses et d'inféro-flux. Ces derniers pourront communiquer par endroit avec les nappes du Paléozoïque .

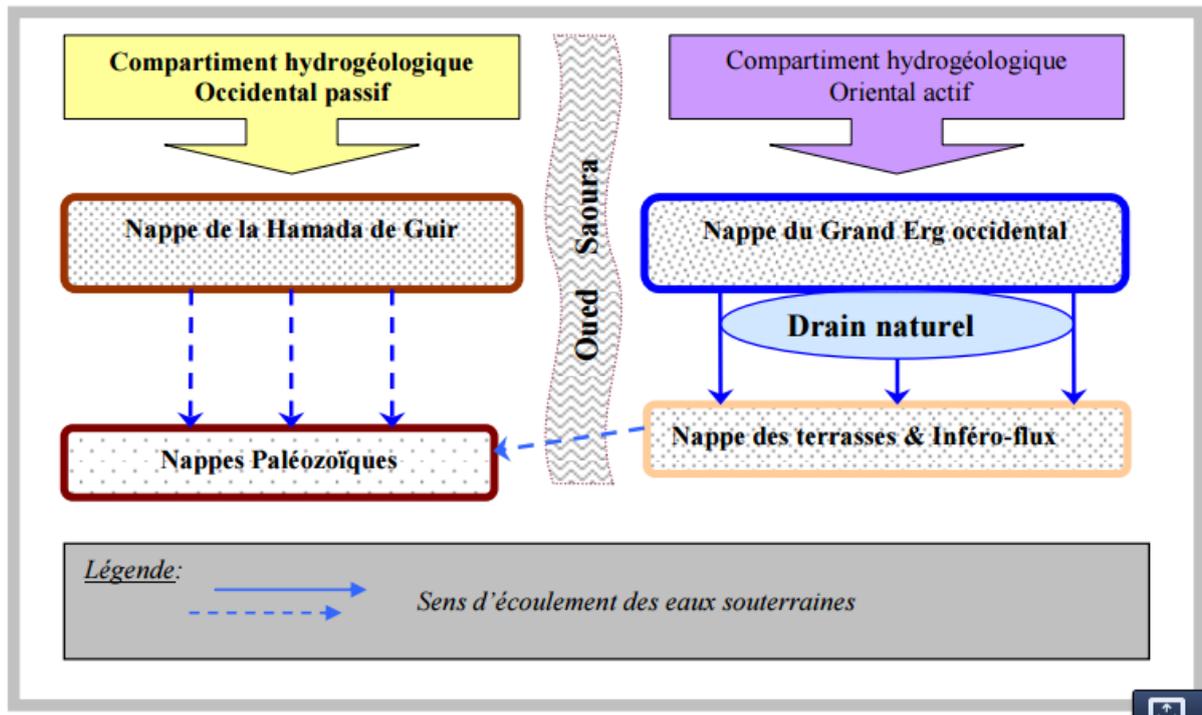


Figure 4.21: Esquisse schématique du système aquifère de Béni Abbes (Merzougui, 2007).

La coupe géologique (Fig.4.22) ci-dessous, passant par la vallée de la Saoura, reflète l'architecture du sous-sol de la région de Béni Abbes et les interactions entre les nappes du compartiment oriental : le Dévonien supérieur caractérisé par des plis de grands rayons de courbure, constitue le substratum imperméable, sur lequel reposent en discordance angulaire des terrains néogènes.

La vallée de la Saoura comprend des terrasses étagées. La lithologie de terrains néogènes permet la circulation des eaux du point haut vers celui le plus bas. Ceci explique l'existence d'un drain naturel entre la nappe du grand erg occidental et les nappes des terrasses et d'inféro-flux. Sur ce drain, des captages par ligne de puits ont été réalisés.

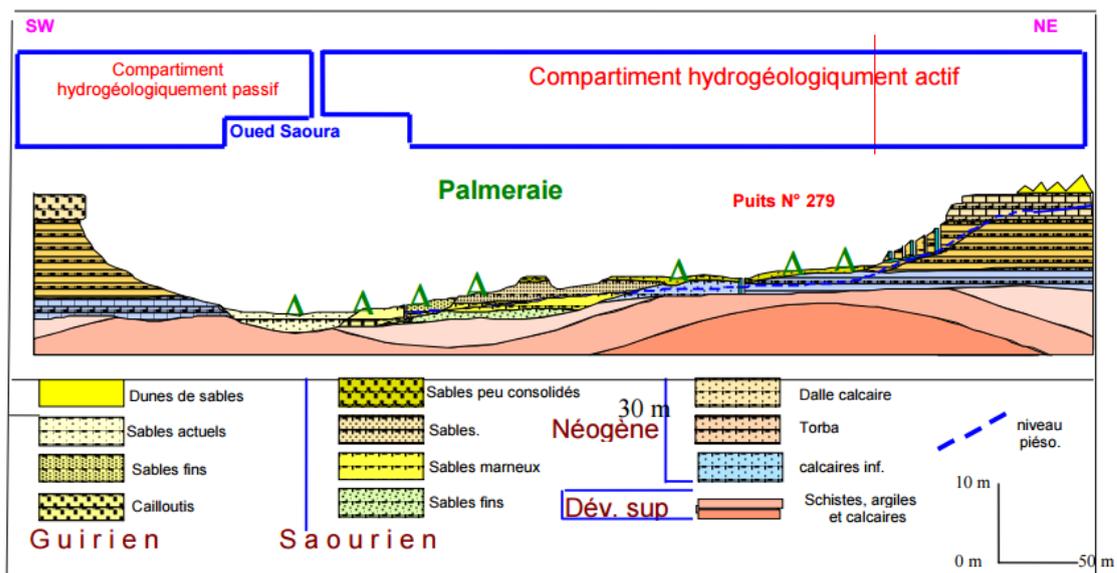


Figure 4.22 : Coupe hydrogéologique dans la région de Béni Abbès, à travers la Saoura (Rohe1973, ModifiéMerzougui, 2007)

3.2.1 Géométrie de l'aquifère

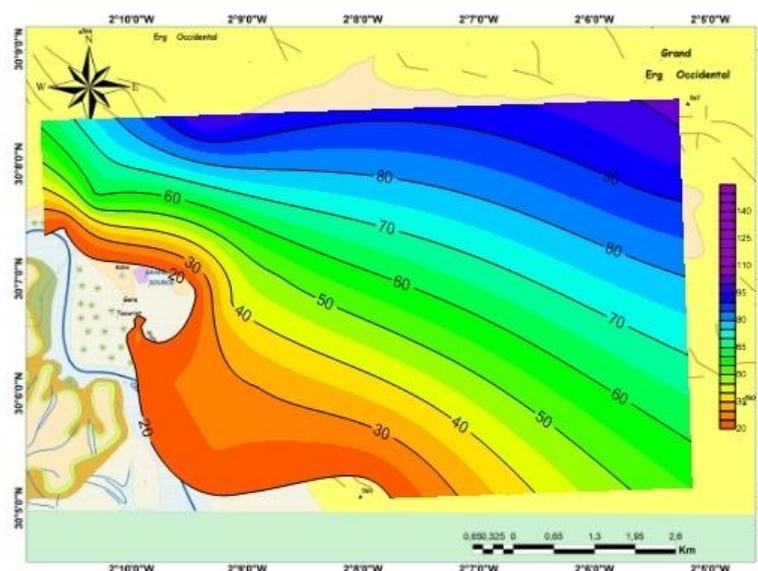
Nous nous sommes efforcés de reconstituer la morphologie générale du mur du terrain du Mio-Pliocène des terrasses quaternaires, afin d'estimer l'épaisseur système aquifère au niveau de Béni -Abbès (plateau de la ville et les terrasses alluvionnaires. Le Dévonien schisteux est le niveau lithologique le plus vraisemblable pour représenter le substratum des nappes.

Le mur imperméable des différentes nappes sont constitués par les schistes rouges du Dévonien. Ceci est observé au niveau de plusieurs puits, forages et sondages électriques .La surface du mur montre un pendage du plateau de la ville vers l'oued de l'Est vers l'Ouest, extrêmement fort, d'environ 15°.

Mio-Plio-Quaternaires dans la région de Béni -Abbès, contiennent de la dalle calcaire et Torba (Tertiaire), et des sables argileux et du gravier constituent l'aquifère alluvial. l'ensemble repose sur substratum les schisteux et argiles du Dévonien inférieur.

La stratigraphie de quelques puits dans la palmeraie indique la variation de l'épaisseur (7-15m) des terrasses (formations plus ou moins homogène dans l'ensemble), où elle peut atteindre le substratum dévonien à 30 mètres dans le lit mineur de l'oued Saoura qui représente le centre du remplissage alluvionnaire. du plateau de la ville l'épaisseur varie entre 30 à 100 m vers l'Ouest (Fig.4.23) . Ces données sont confirmées par les différentes campagnes géophysiques de quelques profils réalisées dans la zone d'étude voir (chapitre 3).

Par ailleurs, une enquête sur terrain, les données des 03 forages réalisés pour assurer l'AEP sur le plateau de Béni- Abbès et l'analyse des déblais extraits des puits au moment de leur creusement, ont permis une identification et un dimensionnement des différents horizons lithologiques la compilation des données géologiques et géophysiques nous ont permis de tracer la coupe hydrogéologique schématiques



(Fig.4.24).

Figure 4.24 : Carte d'épaisseur du système aquifère à Béni- Abbès

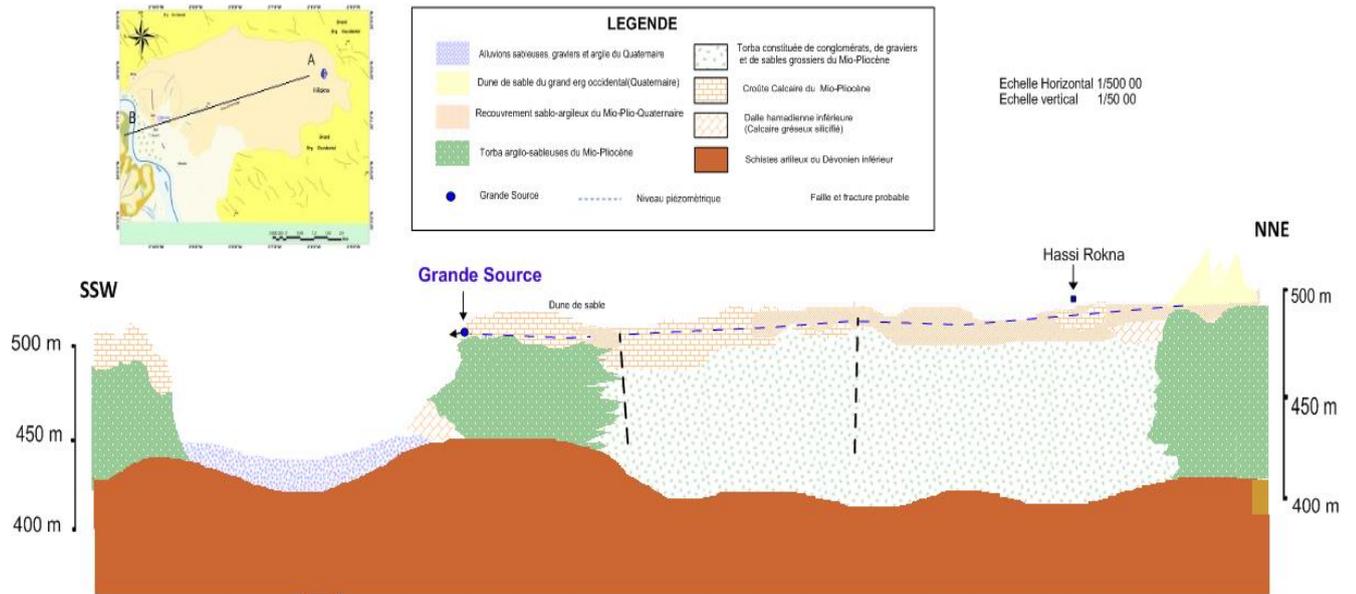


Figure 4.23: Coupe hydrogéologique dans la région de Béni -Abbès

3.3 Ecoulement et exutoires de la nappe

Les cartes piézométriques permettent de définir le sens d'écoulement souterrain, les principales zones de circulation des eaux, l'alimentation des nappes du système aquifère, ainsi d'y prévoir un schéma d'exploitation pour la gestion des ressources souterraines

3.1 Profondeur de l'eau des nappes à Béni- Abbès

La profondeur moyenne du plan d'eau par rapport au sol est de l'ordre de 2 à 18 mètres, dans toutes les nappes (nappe du Mio-Pliocène et nappes des terrasses alluvionnaire . le suivi l'évolution temporel du niveau d'eau dans quelques point d'observation a montré un abaissement du plan d'eau de 1 à 2 m (Fig 4.25)

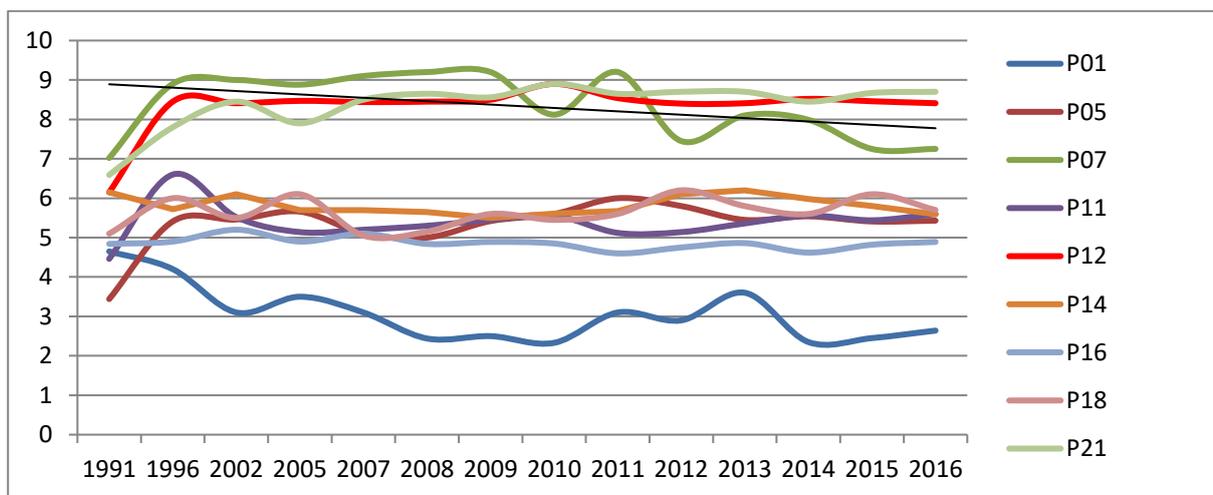


Figure 4.25 : Evolution de la profondeur de l'eau des nappes

3.3.1 Piézométrie

Afin de définir le sens d'écoulement souterrain, les principales zones de circulation des eaux, l'alimentation de la nappe, quelques mesures du niveau statique des différents points d'eau au niveau du système aquifère de Béni-Abbes ont été effectuées (2015-2016).

Pour ce faire et pour réaliser une campagne piézométrique pendant toute l'année 2015-2016, nous avons installé un réseau de points d'observation bien répartis dans l'espace de la zone d'étude, nous avons réalisés des relevés piézométriques saisonniers et une campagne le mois d'avril 2016. Les mesures du niveau statique sont effectuées qui captent les eaux des nappes du système aquifère à l'aide d'un GPS Magiclance (Précisions : 05 m pour les coordonnées X, Y et 15m pour l'altitude) et une sonde électrique.

Les mesures de la profondeur de l'eau par rapport au sol, effectuées dans tous les puits, Forages, Foggaras et source, en 2015-2016, ont permis de tracer la carte piézométrique (Fig.4.26).

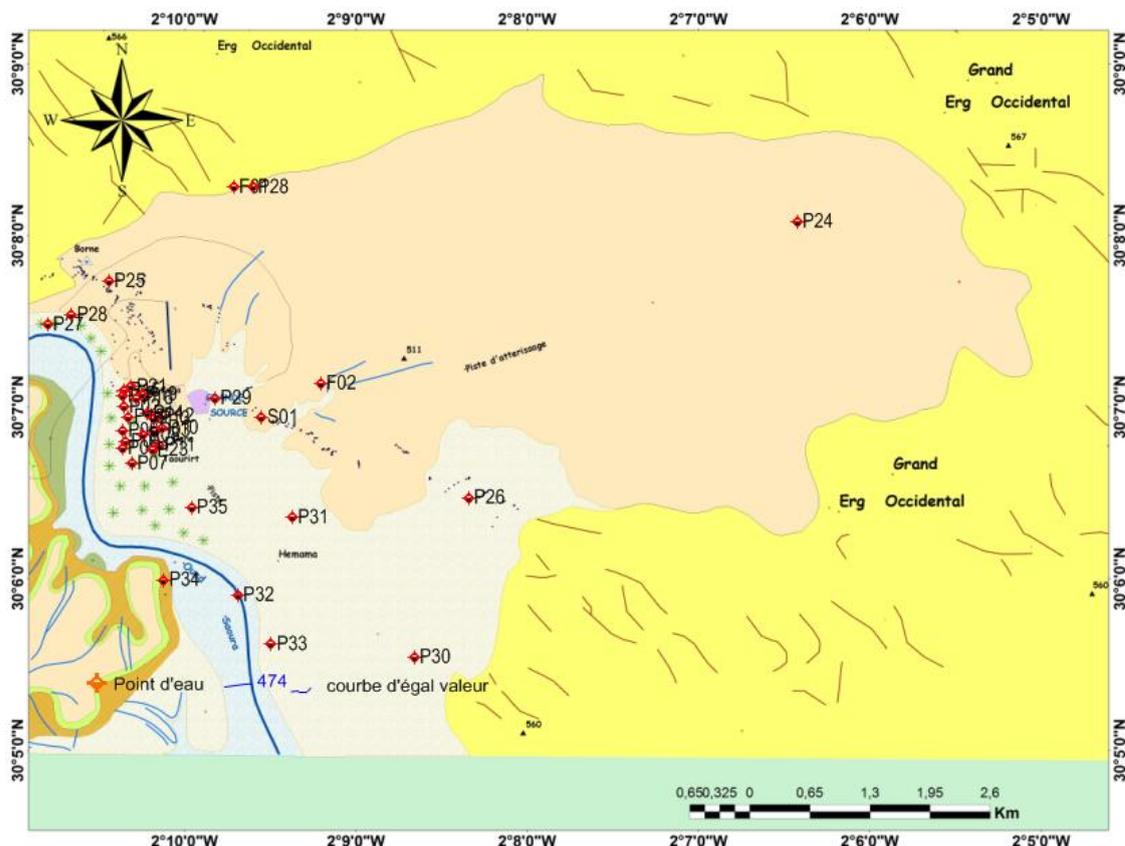
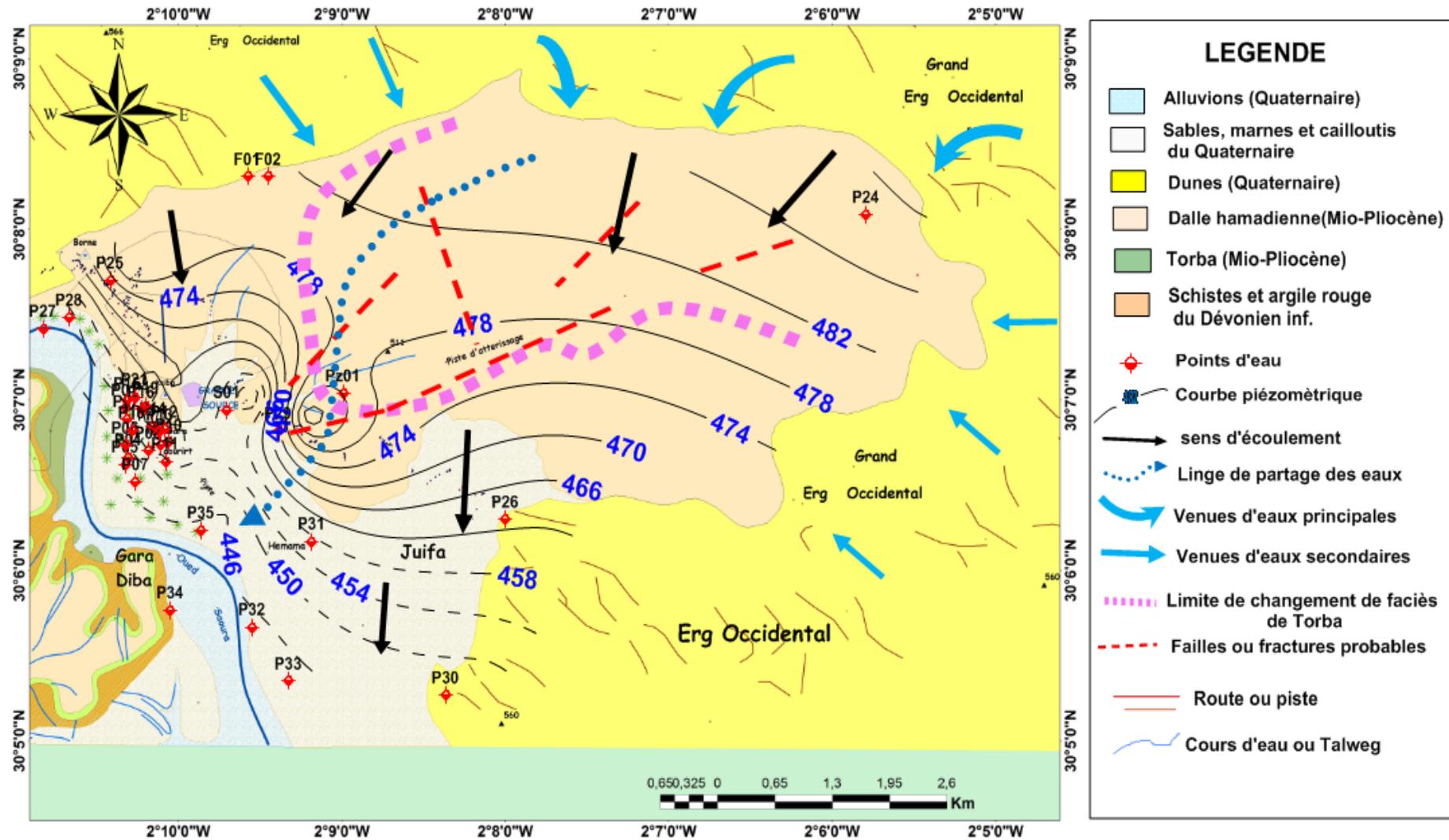


Figure 4.26 : Carte de positionnement des points d'eau.

L'interprétation de la carte en courbes isopièzes établie en 2016 (Fig. 2.27), montre un écoulement général de l'Est vers l'Ouest, dans le sens du plateau de la ville vers l'oued. L'existence d'un axe de drainage de direction Nord- Est, Sud- Ouest, avec une valeur de gradient hydraulique s'échelonne entre 2.10^{-2} et 8.10^{-2} .

- Dans le cas de la nappe du grand erg occidental le gradient varie entre 8.10^{-2} et 1.10^{-1} .
- Dans le cas de la nappe de la palmeraie le gradient hydraulique varie entre 2.10^{-2} ou 5.10^{-2} . Avec une moyenne de 3, 3.10^{-2} .



Le golf de Béni Abbès présente un bassin hydrogéologique d'accumulation des eaux qui viennent du réservoir de l'aquifère de l'erg. D'après la carte piézométrique on a constaté l'arrivée des venues d'eau principal, s'effectue de la direction Nord et Nord -Est et des venues d'eau secondaires sont effectués à partir de l'entrée Est et Sud -Est.

3.3.2. L'Alimentation de la nappe du Mio-Plio-Quaternaire

Les nappes peuvent avoir plusieurs modes d'alimentation :

- par infiltration directe des précipitations lorsque l'aquifère est l'affleurement,
- par drainage d'un cours d'eau de surface,
- par déversement d'une nappe sus-jacente,
- par drainance à travers des terrains semi-perméable lorsque deux nappes ne sont pas en équilibre.

Dans le cas de la nappe du grand erg occidental la zone de recharge des eaux dans tout le front Nord de région d'étude : l'écoulement de la nappe provenant des formations Mio-Plio-Quaternaires alimentent les terrasses alluviales par un drain naturel à partir des eaux de la nappe de l'Erg.

3.4 Les Foggaras et sources

Le terme de foggara désigne une canalisation d'eau souterraine, simple ou à aqueduc dans certains pays ; elle représente au Sahara algérien tout un système de drainage des nappes d'eau souterraines.

La foggara des oasis algériennes est constituée par une galerie souterraine qui amène l'eau d'une nappe aquifère sur le terrain à irriguer grâce à une pente appropriée. L'eau est donc drainée et assure l'arrosage par simple gravité (Fig. 2.28).

Le système de foggara est intéressant dans la mesure où il constitue depuis longtemps le fondement de l'organisation socio-économique et continue à modeler l'espace et la vie dans le Sahara algérien et dans les régions arides de façon générale.

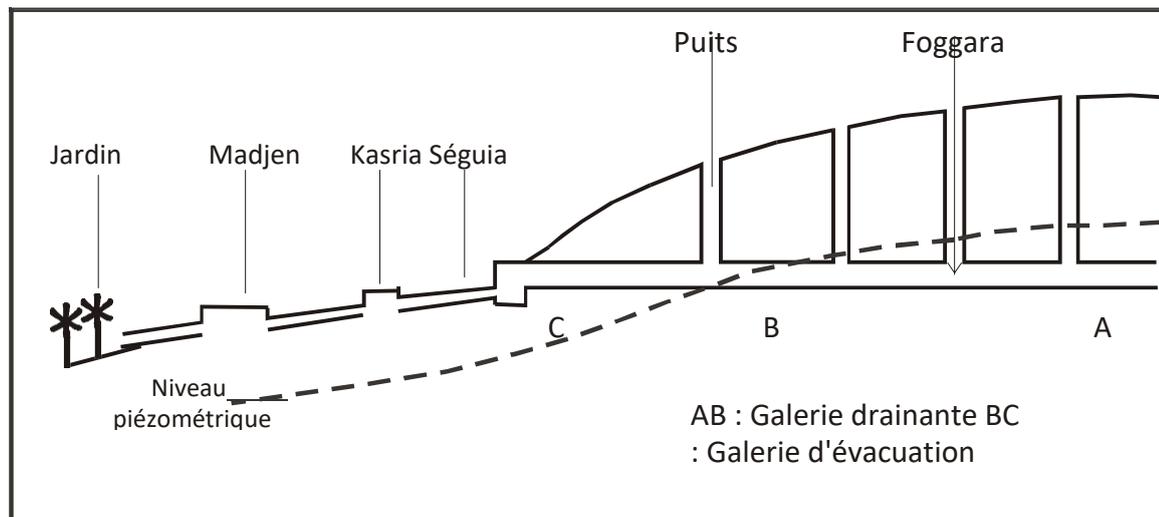


Figure. 4.28: Schéma de fonctionnement d'une foggara (A. Cornet, 1962)

La galerie AB passe sous la surface piézométrique et draine la partie haute de la nappe, c'est la section active de la foggara. La partie d'évacuation BC présente une légère pente de l'amont vers l'aval permettant l'écoulement de l'eau vers l'extérieur en direction des séguis.

La majorité des foggaras sont malheureusement inutilisables en raison du manque d'entretien et de leur curage. Nous n'avons pas mesuré leur débit, sauf celle de l'ermitage où il nous a été possible d'accéder au fond de la galerie (tableau 4.5). Leur débit est généralement faible mais régulier dans le temps. Dans son travail, Roche avait donné les directions et débits de quelques foggaras recensées en 1963 à Béni-Abbès. Il est intéressant de noter que l'on retrouve dans ces galeries artificielles la direction N 50° E déjà observée dans les silexites de la Grande Source.

Tableau 4.5 . Profondeurs et débit de quelques foggaras (Mebrouk.2007)

N° de Foggaras	Localisation et/ou propriétaire	Latitude		Longitude		Q (l/s) Mai 2004	Profondeur du niveau de l'eau (m) (Mai 2004)	Q (l/s) Avril 2015	Le tableau 4.5
		X	Y	X	Y				
P'61	Ermitage (Sœurs)	30° 07' 37 N	02° 09' 57 W	0.09	4.12	0.05	résumé les sources et foggara au cours de deux campagnes de terrain. Elles sont toutes		
Fg'10	Foggara Juiffa	30° 06' 46 N	02° 08' 46 W	/	4.14	0.08			
Fst	Centre de Recherche sur les Zones Arides	30° 07' 43 N	02° 10' 30 W	/	8.50				
Fg11	Touhami Bachir	30° 07' 09 N	02° 09' 41 W	/	5.80				
SD4	Ouarourout (Sedra) Zghamri A.	30°10'07 N	02°13'32 W	/					
SD3	Ouarourout (Sedra) Kaddouri	30°11'44 N	02°14'28 W	/	3.4				
SD	Ouarourout (Sedra) Djelloul H.	30°11'57 N	02°14'37 W	/	7.5				
P'72	Ouarourout Foggara Martouma	30°09'56 N	02°13'25 W	/	6.4				

situées en rive gauche de la Saoura et sont presque toutes captées. Elles se présentent sous forme de boyaux de dissolution, parfois agrandis par les villageois. La plus importante sources étant celle de Béni-Abbès, elle alimente la piscine et la population.

Tableau 4.6 : Variation des débits de sources de la Saoura (Mebrouk, 2007)

Région et nom de la Source	Q (l/s) 1941	Q (l/s) 1963	Q (l/s) 1964	Q (l/s) 1996	Q (l/s) 2004
S3 : Hemama	/	/	/	/	0.2
S'2 : Juiffa	/	/	/	/	0.12
S1: La Grande Source, Béni-Abbès	/	/	28	25	/
Sg4: Seguia Djdidia, Ouarourout	/	/	/	/	0.6
MZS4: Ain el Hemmam, Mazzer	1 à 1.5	0.67	0.64	/	1.0
MZS5: Ain er-Rmel, Mazzer	/	0.6	0.54	/	0.429

Les mesures ont été effectuées, grâce au chronomètre, par remplissage d'un sceau. On observe une

diminution des débits de la grande source et celle d'Ain er Rmel (Tableau.4.6). Toutefois, ces mesures étant effectuées à des saisons différentes de l'année, cette conclusion reste à vérifier par de plus nombreuses mesures dans le temps. Le débit de la source de Ain el Hemmam a, lui, augmenté en 2004.

La foggara nécessite un nettoyage et entretien périodique de la galerie, cette opération se fait chaque année ou lorsqu'un événement se produit (crue, éboulement), elle fait appel à tous les copropriétaires pour la participation dans cette opération, le montant de la participation se fait selon le débit reçu, par un travail au jour ou paiement de la main d'œuvre salariée. Elle consiste au curage de la galerie par l'enlèvement de sables et déblais, ainsi que l'approfondissement de la galerie en cas de chute du débit.

Actuellement il est rare qu'une foggara subisse une extension, vue la quantité des travaux à réaliser, c'est à dire que, pour augmenter la longueur d'une foggara de 10 m, il faut forer un puits de 20 à 30 m verticalement et de creuser un tunnel horizontalement de 10 m de longueur et de 02 m de diamètre. Ceci montre la réalisation faraounique des foggaras.

Les systèmes de foggaras à Béni-Abbès

Il ya environ 20 système de foggaras qui sont également alimentés par l'aquifère Grand Erg Occidental (Fig.2.29) Ces systèmes drainent en direction de l'Oued Saoura, la productivité totale est estimée à environ d'un débit de 10l/s. l'écoulement n'est actuellement que partiellement utilisé pour l'irrigation des jardins privés et de palmiers; les foggaras sont en majorité à réhabiliter.

Une Campagne d 'inventaire et un lève complet des système existants, tenant compte leurs emplacement, coordonnées par GPS ainsi que leur tracé des foggaras , puits de foggaras pour les intégrer dans un système SIG.

Actuellement en 2016 à Béni-Abbes, il existe neuf foggaras qui fonctionne ; leurs débit est très faible et permet à peine l'irrigation de quelques jardins (Tableau 4.7).

- Une petite source captée sous le calcaire pliocène, au nord du Bordj, au pied de la grande dune (1/10 de litre/seconde environ)

Tableau 4.7 : Débit de quelques foggaras de Béni Abbès (1997-2016).

Nom de foggara	Débit l/s 1997	Débit l/s 2016
Foggara de OUAROUROUT 1	8/10	8/10
Foggara de OUAROUROUT 2	6/10	0
Foggara de Bouhadda	1,33	0.9

Foggara de (C.N.R.S)	0,03	0,03
Foggara de HERMITAGE	0.04	0.03
Foggara de HMAMA	0.04	0.04
Foggara de KHALFI	0,008	0,008
Foggara jardin (Amphi théâtre)	0.05	0.05
Foggara Benfatah	0.01	0.01
Foggara Benali(palmeraie)	0.04	0.06
Total	1.58	1.69

Actuellement la plupart des foggaras sont tarées et inutilisable à cause d'effondrement des terrains et de l'absence du curage. Aussi le problème d'héritage est un problème capitale pour la réhabilitation des foggaras

Curage : le curage est une opération périodique qui se déroule généralement en été pour augmenter, ou du moins maintenir le débit de foggara. Le curage s'effectue différemment d'aval en amont, c'est un travail de dessablement de la foggara.

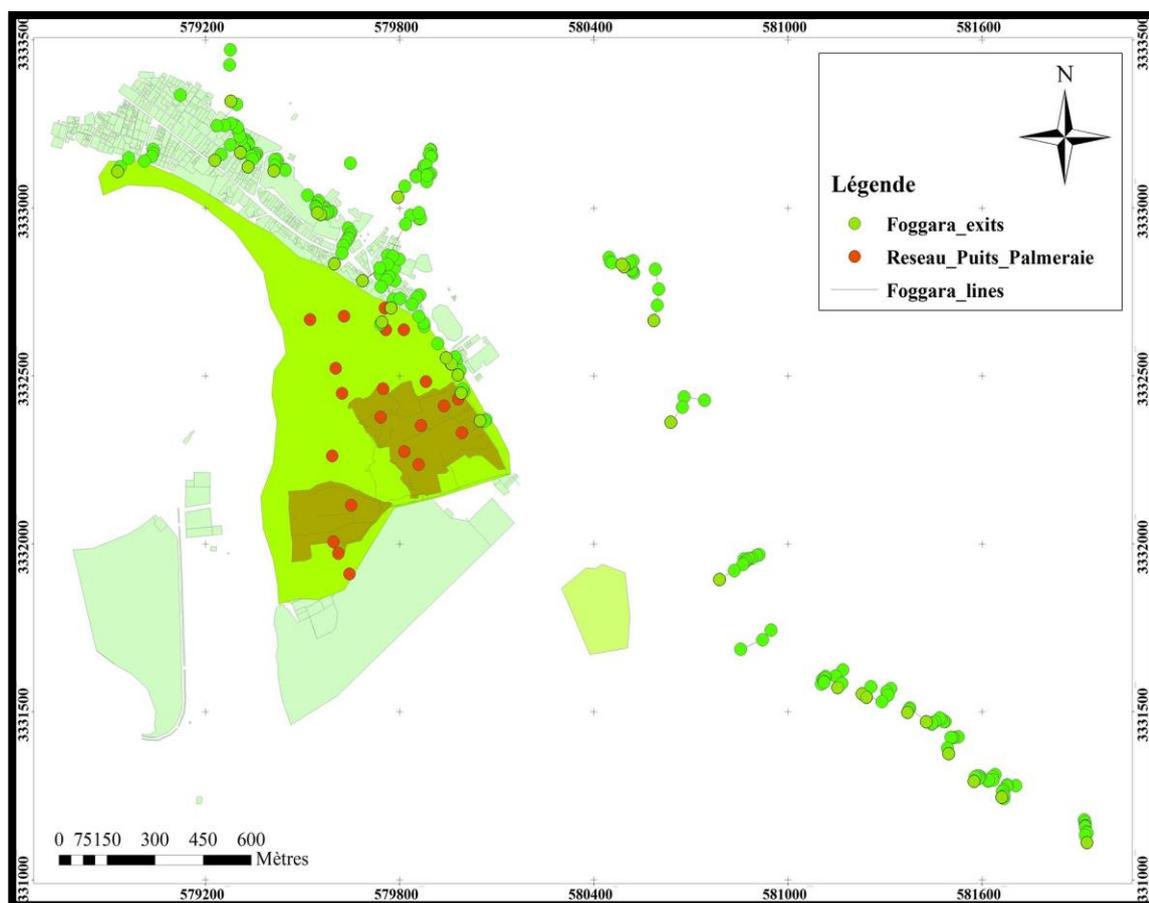


Figure 4.29. Positionnement des foggaras à Béni -Abbès.

3.5 La Grande Source de Béni-Abbès

Le captage est représenté par une galerie naturelle ouverte dans des silexites, pénétrable sur quelques mètres. La source émerge à quelques mètres en dessous de la dalle hamadienne très silicifiée, au contact avec les marnes. Son origine est due probablement à un développement exceptionnel du réseau de type karstique. Ainsi l'importance du débit de la source peut être expliquée par le fait de l'existence d'un barrage souterrain naturel (relèvement du substratum Paléozoïque), qui sans arrêter l'écoulement surélèverait le niveau de la nappe, constituant un trop plein débitant sur la vallée.

L'étude par prospection électrique montre que la dalle Hamadienne à cet endroit, est très épaisse. C'est dans ces niveaux de forte épaisseur que s'effectuent probablement les écoulements de la nappe qui aboutissent à la grande source. Les zones résistantes semblent indiquer l'existence d'un parcours préférentiel perpendiculaire à la vallée, plutôt qu'une vaste nappe souterraine, du moins en ce qui concerne le périmètre à moyenne distance de la grande source. Ainsi, la sortie des eaux peut être expliquée par la mise en évidence de la remontée du substratum Primaire au niveau de la grande source de Béni -Abbès.

Elle représente l'exutoire par excellence d'un vaste aquifère (nappe du Grand Erg Occidental) avec une eau de bonne qualité qui ne nécessite pas de traitements spécifiques et coûteux, de sorte qu'en règle générale elles peuvent être utilisées directement comme eau potable.

Notre déplacement en équipe sur le site de l'exutoire de la grande source ; nous a permis de réaliser les observations sur le lieu ainsi que la collecte de plusieurs informations.

La grande source de Béni-Abbes appelée aussi « source de Sidi Othmane » se situe à environ 2km au Sud-Sud-Est du centre-ville à 491mètres d'altitude(fig .2.30). Le captage est à 600 mètres au sud-est de l'Ermitage du Père de Foucault, et à 600 mètres à la palmeraie, au fond d'un puits fermé de façon très précaire, le puits d'accès est comblé par des dépôts de pente.

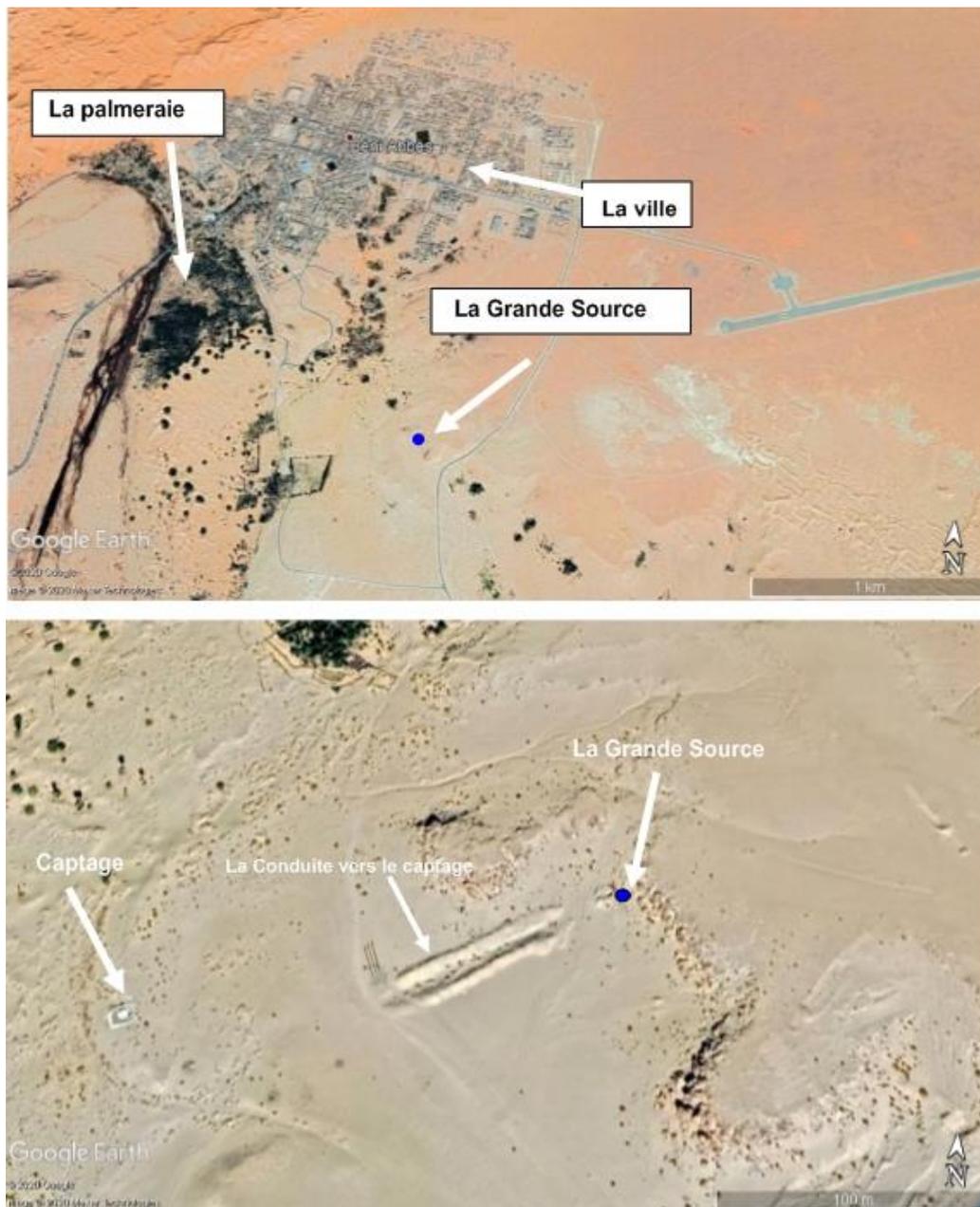


Figure 4.30 : photo satellite montre la position de la grande source.

Comme l'ensemble des palmeraies de la Saoura, Béni-Abbés s'étend en rive gauche sur le Saourien et le Guirien, en contrebas de la falaise Mio-Pliocène. A l'origine, le village doit probablement son importance à l'existence de la Grande Source, qui irrigue à elle seule, la palmeraie principale et alimente en partie la population en eau potable.

L'intérieur de la cavité, l'eau peut atteindre une profondeur de 1 mètre. Le débit moyen de la source mesuré à différentes périodes est de 28 ± 1 l/s.

La grande source de Sidi Othmane, capte les eaux souterraines la nappe du Grand Erg occidental. Par son débit de 26 l/s à 33 l/s (Roche, 1973 ; GTZ, 2005). La grande Source de Sidi Othmane assure un

rôle important dans l'alimentation en eau potable de la ville et l'irrigation de la palmeraie et constitue un exutoire par excellence de cette nappe, avec un débit de 29 l/s(2016). Elle représente à cette localité un exutoire par excellence de cette nappe.

Les coordonnées de la grande source par GPS :

	latitude	longitude	Altitude
La grande source	30°07'10''	2°09'35''	491 m

Après notre visite au niveau du captage, Il nous semble nécessaire de procéder à un aménagement avec un équipement de mesure et de contrôle plus adéquat du captage de la grande source et d'élaborer un périmètre de protection. En outre, nous avons réalisé un jaugeage sur une section où nous avons obtenus les valeurs de 28,3 l/s, 26l/s, 29 l/s.

L'eau sort entre des affleurements des calcaires silicifiés, séparés par deux bancs de grès calcaires. L'ensemble de ces bancs forme la dalle hamadienne inférieure, d'une fissure horizontale de 70 cm, où des stalactites et stalagmites se sont formées dans cette grotte triangulaire. Pour ce qui est des écoulements souterrains, ils suivent la direction des pendages des formations géologiques, dans le cas de notre région de Beni Abbés, ils sont d'orientation Nord Est -Sud-Ouest.

L'accumulation des eaux de quatre griffons se fait dans un bassin d'une surface amorphe plus au moins triangulaire de 2 m² approximativement, ensuite l'eau se dirige vers une section étroite de 0,45 m de largeur avec une lame d'eau de 0,40 m de profondeur, enfin l'eau rejoint une section large d'une forme plus ou moins triangulaire vers un tuyau (Φ 300) vers le captage (chambre) déjà existant à 90 m de l'exutoire (Fig. 2.31).

Des mesures de débit de la grande source ont été effectuées à divers intervalles de temps, Les résultats sont présentés dans le tableau suivant (tableau 4.8):

Tableau 4.8: Mesures de débit de la grande source divers intervalles de temps.

Inscription dans les collèges locaux, 2005

Auteur	La date de la mesure	Le débit (l /s)	Méthode de mesure
E.F. Gauthier	1908	18 l/s	volumétrique
H. Schoeller	1945	18 à 25 l/s	volumétrique
M.A.Roche	Le 09/01/1964	27,8 l/s	volumétrique
DRE	Du 12 au 22	29,3 l/s	volumétrique

	décembre 1961		
Gtz/AHT	Le 28 Décembre 2010	36 l/s	Débitmètre (ADE Tlemcen)
	Juin 2010	31.1	Moyen 33 l/s
Merzougui .T	Janvier 2012	28.30	Jaugeage
Merzougui .T	Janvier 2016	29.0	Jaugeage

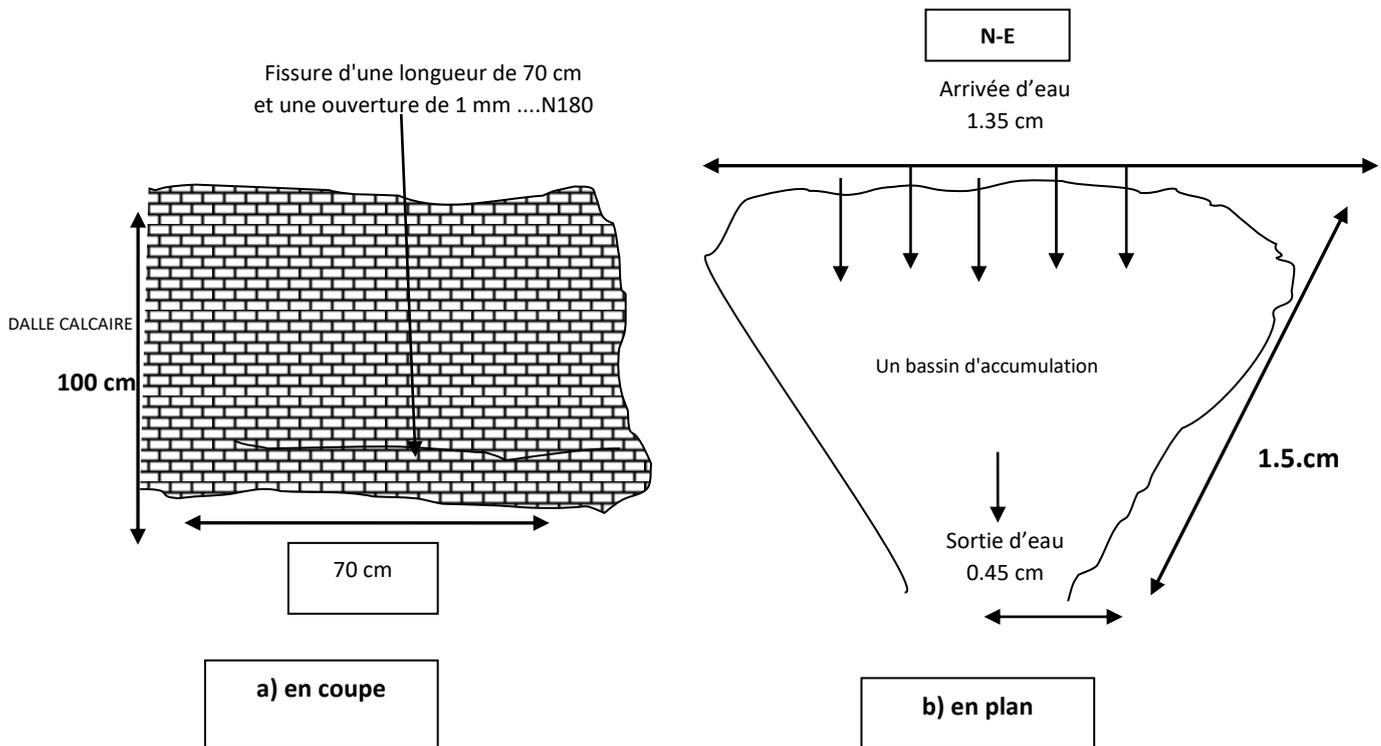


Figure 4.31: Schéma de l'exutoire naturel de la Grande Source de Sidi Othmane (Visite le 09/01/2010)

Il y'a lieu de mentionner qu'une partie des eaux est difficile à cerner en raison des aménagements anciens effectués au niveau de la source.

Durant la mission effectuée sur le terrain en date du 09 janvier 2010, deux échantillons d'eau ont été prélevés de la Grande source «Sidi Othamane » pour analyse physico-chimique et microbiologique.

L'origine de l'émergence de la source de Sidi Othmane

Depuis le temps, aucun changement au niveau du débit de l'émergence de la source n'a été constaté d'où le fait que la source est pérenne.

Sur le plan hydrogéologique, à proximité de l'exutoire de la grande source, la nappe des calcaires est déprimée : on appelle rabattement cette dépression qui correspond à un accroissement de la vitesse de l'eau dans l'aquifère et qui se matérialise par une incurvation de la surface piézométrique vers l'exutoire.

Dans le cas de notre émergence, le débit dépend de la perméabilité de l'aquifère (perméabilité en grand = karst) ainsi que de la pente de la surface piézométrique (ou gradient hydraulique).

Certains milieux doivent prioritairement faire l'objet de mises à niveau des informations :

- L'émergence de la Grande Source (débit, hétérogénéité, alimentation, exploitabilité ...),
- Le système aquifère local (limites, mécanismes, fonctionnement, qualité de l'eau ...),
-

3.6 Etude hydrodynamique

L'interprétation des courbes des essais de pompages par l'approximation logarithmique de Jacob (Jacob 1947) a servi pour calculer la transmissivité " T".

$$T = \frac{0.183 \times Q}{C} \dots\dots\dots(1)$$

- le coefficient d'emmagasinement "S":

$$X = 2.25 \frac{2.25 \times T \times t_0}{X^2} \dots\dots\dots(2)$$

- et la perméabilité "K"

$$T = K.e(m^2/sec), K = T/e \dots\dots\dots(3)$$

Où :

T : Transmissivité (m²/s)

S: Coefficient d'emmagasinement

K : Perméabilité (m/s)

Q : Débit de pompage (m³/s)

e: Epaisseur de l'aquifère (m)

t₀: Temps fictif à l'origine (s)

X²: Distance entre le forage et le piézomètre d'observation (m)

C :

désigne la pente de la droite représentative, déterminé comme suit :

Pour la courbe de descente, « C » est donnée par :

$$C = \Delta S / \Delta \text{Log } t = (S_2 - S_1) \Delta \text{Log } t.$$

Pour la courbe de remontée, « C » est donnée par :

$$C = \Delta S / \Delta \text{Log } [t + t'] = (S_2 - S_1) / \Delta \text{Log } [t + t' / t'].$$

Où :

t : désigne la durée de pompage, en seconde ;

t' : désigne le temps écoulé depuis l'arrêt de pompage ; en seconde ;

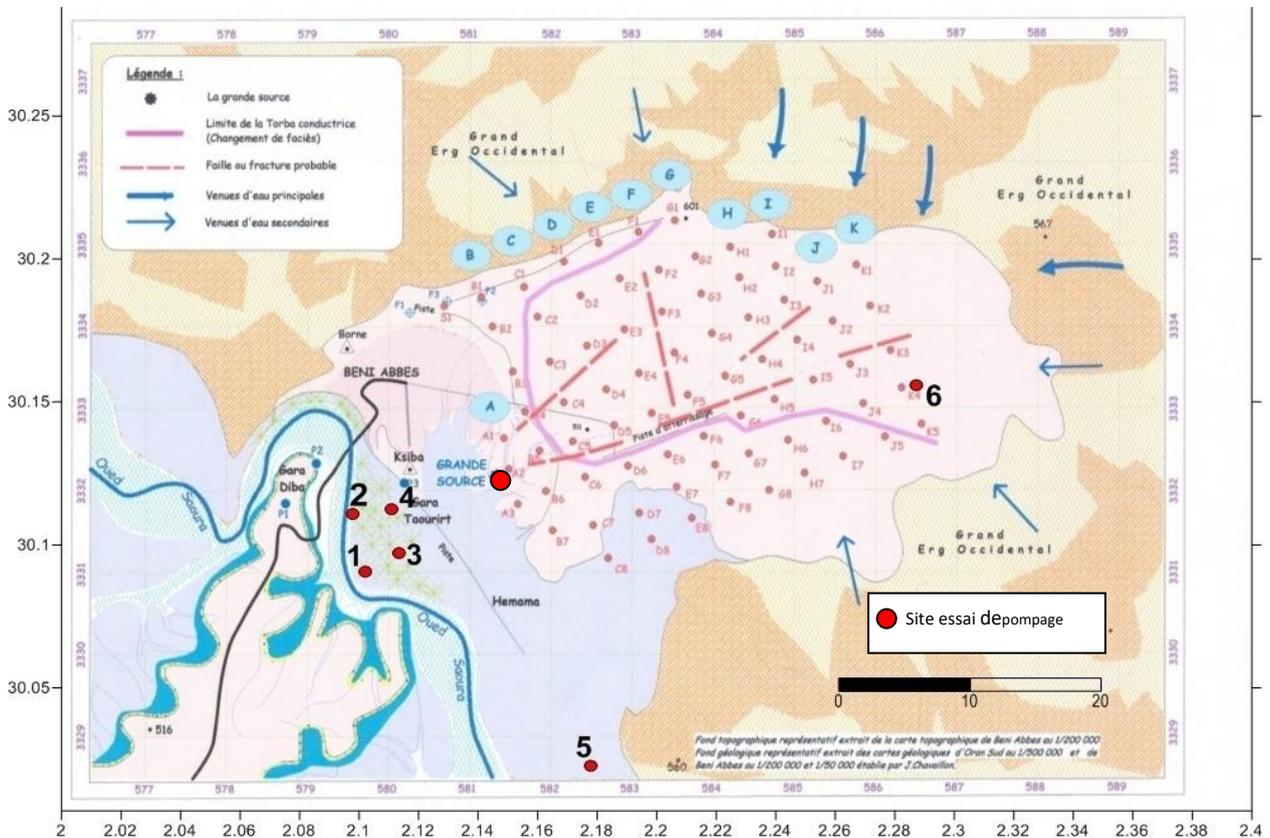


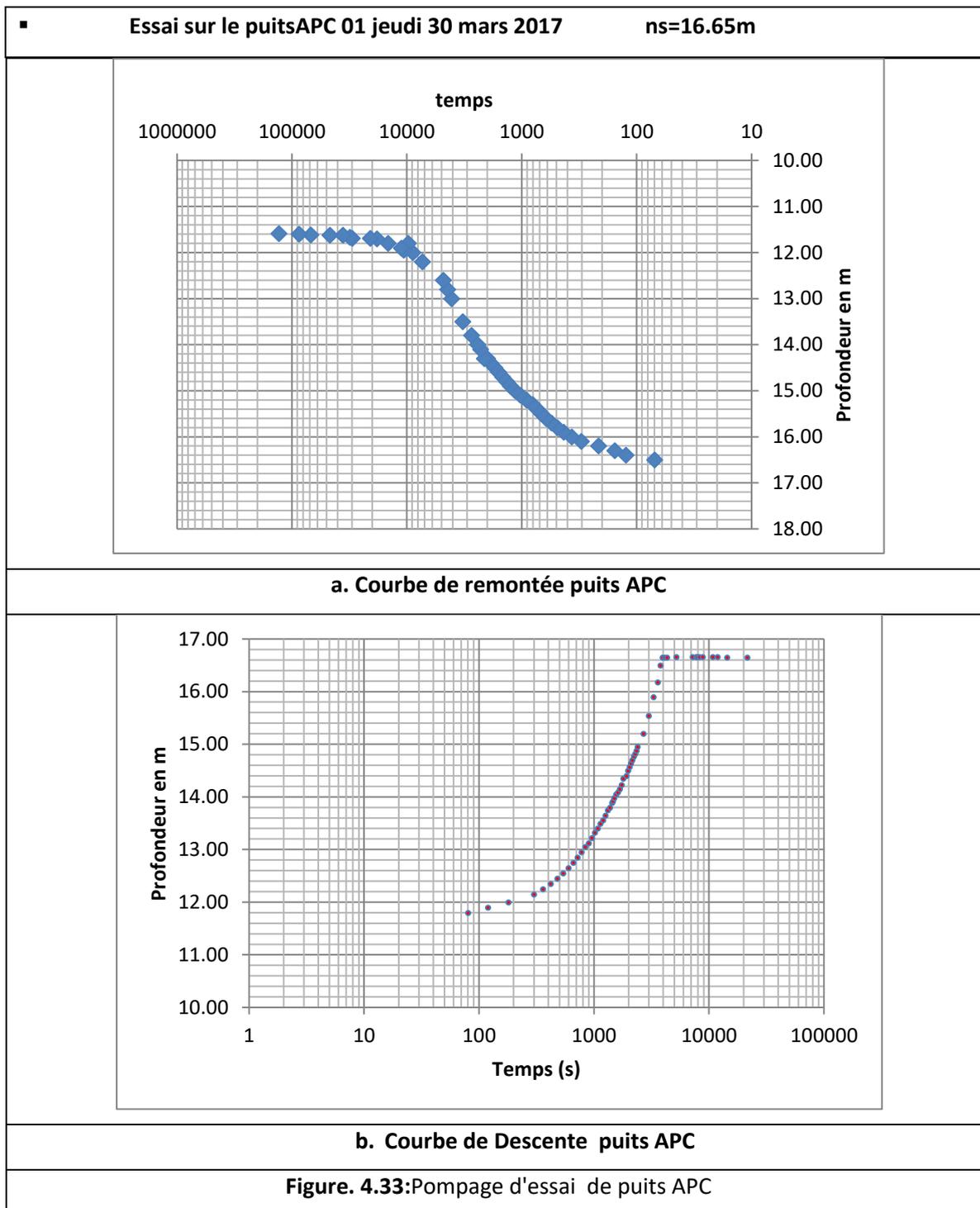
Figure. 4.32: Positionnement des puits affectés par des essais de pompages

Les pompages d'essai de ont été effectués sur les puits (p1 p2,p3, p4.)(Fig.3.2), ont fait l'objet d'une interprétation selon l'approximation de Jacob. L'application des équation 1,2 et 3 permet d'obtenir les résultats (Fig.4.33)

On remarque sur la courbe que les rabattements diminuent et le régime d'écoulement devient quasi permanent, ce qui laisse supposer l'existence d'une limite d'alimentation, ou une alimentation par les réserves de la nappe même ou avec drainance.

Dés arrêt du pompage, le plan d'eau dans les puits APC remonte d'une façon plus ou moins rapide..

L'observation de la remontée a été faite avec autant de soin que pour la descente, car l'observation de la remontée offre en général, une valeur plus fiable de la transmissivité que la descente.



3.6.1. La transmissivité

La transmissivité est un paramètre hydrodynamique essentielle dans l'étude de la nappe libre de la palmeraie ainsi que la nappe Néogène(nappe du Grand Erg Occidental) , les résultats des essais de pompage sont donnés (Tableau 4.9) :

Tableau 4.9 : Comparaison des valeurs de transmissivités de quelques puits dans la palmeraie 1991-2017 (Yousfi et Ait Ahmed, 1991)

Ouvrage	Année	Descente T (m ² /s)	Remonté T (m ² /s)
Puits APC	1991	-	-
Puits (p3) Ben Aissa	2017	4.22×10^{-4}	1.65×10^{-4}
	1991	2×10^{-4}	12×10^{-4}
Puits Piscine(p22)	2017	1.7×10^{-4}	1.12×10^{-4}
	1991	$4. \times 10^{-2}$	-
Piézomètre(p22)	2017	-	-
	1991	12×10^{-2}	11×10^{-2}
Puits Mansouri (p4)	2017	5.8×10^{-4}	8.8×10^{-4}
Puits Ben Tayeb (p11)	2017	1.65×10^{-4}	1.73×10^{-4}
Puits Boussouri (P8)	2017	4.22×10^{-5}	2.27×10^{-5}
HassiRokna	2017	1.8×10^{-4}	1.65×10^{-4}

3.6.2 . Coefficient d'emmagasinement

Le coefficient d'emmagasinement (Storage coefficient) S, est le rapport du volume d'eau libéré ou emmagasiné, par unité de surface de l'aquifère un m² à la variation de charge hydraulique h correspondante (**Gilbert Castany, 1982**). Dans notre cas on ne peut pas calculer S, par manque d'un piézomètre d'observation.

Mais d'après l'étude effectuée en 2011 (MERZOUGUI,2011) Les fortes valeurs des coefficients d'emmagasinement correspondent aux zones de bonne transmissivité. Au niveau de la nappe de la palmeraie on trouve des valeurs de 0.02 et 0.059 au Nord, au Sud les valeurs s'échelonnent entre 0.014, 0.038 et 0.0011.

Le tableau 4.10 résume des résultats des paramètres hydrodynamique au niveau du système aquifère de la région de Béni -Abbès.

Tableau 4.10 : Caractéristiques hydrodynamiques du système aquifère au niveau de Béni-Abbès.

Nom du puits	X (m E)	Y (m E)	Z	NP	Débit m ³ /s	T m ² /s	K mis	S	Q l/s	E m
HASI ROKNA	586967.29	3334498.07	513	491	0.00125	0.00016	0.00184		1.25	100
GS	581023.03	3332613.13	489	458	0.0023				23	16
forage1	580710.94	3334829.88	511	480.1	0.003	* 0.02			3	55
forage2	580920.65	3334830.49	511	482.5	0.003	* 0.03			3	55
PAPC	582715.89	3330304.31	463	448.3	0.002	0.002			2	16
BENAISSA	579494.73	3332871.5	464.6	464.6	0.0018	0.12	0.012	0.059	1.8	10
PUIT Piscine	579826	3332485	458	452	0.008	0.04	0.0027	0.002	8	16
P7	579931.51	3331047.6	502	445	0.002				2	20
P22	580240.39	3331745.76	502	445.5	0.0025				2.5	25

* valeur bibliographique

(Q_{es}, débit d'essai ; e, épaisseur ; T_d, transmissivité en descente ; K, perméabilité; S_{coeff}, coefficient d'emmagasinement)

3.6.3. Débit de la nappe

La palmeraie principale, est irriguée par les eaux de la grande source de sidi Othmaneet le prélèvement des puits creusés dans l'aquifère alluvial. Le débit déversé en continu est voisin de 8 l/s (jaugeage 2008), présentant le 1/3 de la quantité déversée pendant les années soixante, soit 0,22 l/s/ha ou une hauteur d'eau irriguée de 683,35 mm/an.

Actuellement la totalité de débit de la source est réservé pour l'alimentation en potable de la ville.

a. Débit maximal évalué

Les sources et foggara drainant l'eau dans le talus néogène fournissant au total un débit inférieur à 3 m³/h, l'autre débit qui passent par les assises inférieures du Mio-Pliocène puis dans les terrasses quaternaires (80l/s), ce qui nous donne un débit total de 88,5 l/s.

Les activités agricoles dominant (palmier dattier, cultures maraîchères, arboriculture et élevage), demandant des quantités plus ou moins importantes d'eau, fournies essentiellement par la nappe alluviale et les eaux de la grande source.

b. Débit de la nappe et exploitation

Le système aquifère est exploité par 40 puits, dont la plus part sont équipés de pompes. Si les ressources totales qui alimentent l'aquifère alluvial sont de l'ordre 80 l/s, les prélèvements sont évalués à 52 l/s. Le débit de vidange de la nappe vers l'oued est évalué à 20 l/s et on estime aussi une quantité de 20 l/s qui s'évapore ce qui nous donne un déficit de l'ordre de 12 l/s qui se ré-infiltre vraisemblablement au niveau de la palmeraie. Ceci traduit la surexploitation intense de la réserve régulatrice annuelle, ce qui se marque par la baisse continue du niveau piézométrique et l'intrusion du biseau salé le long de l'oued Saoura (inféro-flux).

La transmissivité des formations quaternaires, calculée sur deux piézomètres un situé à 200 m au nord du ksar et l'autre près de la piscine, est égale $2 \cdot 10^{-4}$ et $4.4 \cdot 10^{-4}$ m²/s.

Vingt et un puits bien répartis dans toute la palmeraie ont été suivis afin de tenter une surveillance de l'écoulement souterrain de l'erg vers l'oued.

3.7 Evaluation de la ressource et Bilan de la nappe

L'évaluation de la ressource repose sur le comportement hydrodynamique. L'aquifère du Grand Erg occidental très important et potentiellement utilisable offre un flux estimé à 50 millions m³/an au niveau de la région de Béni Abbès. La productivité de cette nappe est estimée à 32 millions de m³/an, dont 25 millions proviennent de la Grande Source ; le reste correspond à la productivité de deux forages creusés dans le Mio- Pliocène (7 millions de m³/an). En outre, les nappes des terrasses alluviales et l'inféro-flux cumulent une capacité approximative de 80000 m³, alimentée essentiellement par le drain naturel d'une part et les eaux de l'oued Saoura d'autre part par infiltration. On estime les masses d'eau souterraines des terrasses contaminées par la salinité à 70 % du volume total d'eau, avec un risque d'augmentation (Fig.4.34) Les caractéristiques

hydrodynamiques ($T = 6.10^{-4}m^2/s$ à $4.10^{-2}m^2/s$ et $S = 1,3$ à 6%), au niveau des nappes des terrasses alluviales, nous ont permis de calculer le débit d'exploitation au niveau de la palmeraie, qui est de l'ordre 140 millions de m^3/an (Merzougui, 2007). L'évaluation de la ressource en eau sur un front de 5 km a été estimée $0.3 m^3/s$ (BouhoucheetGhazi, 1993).

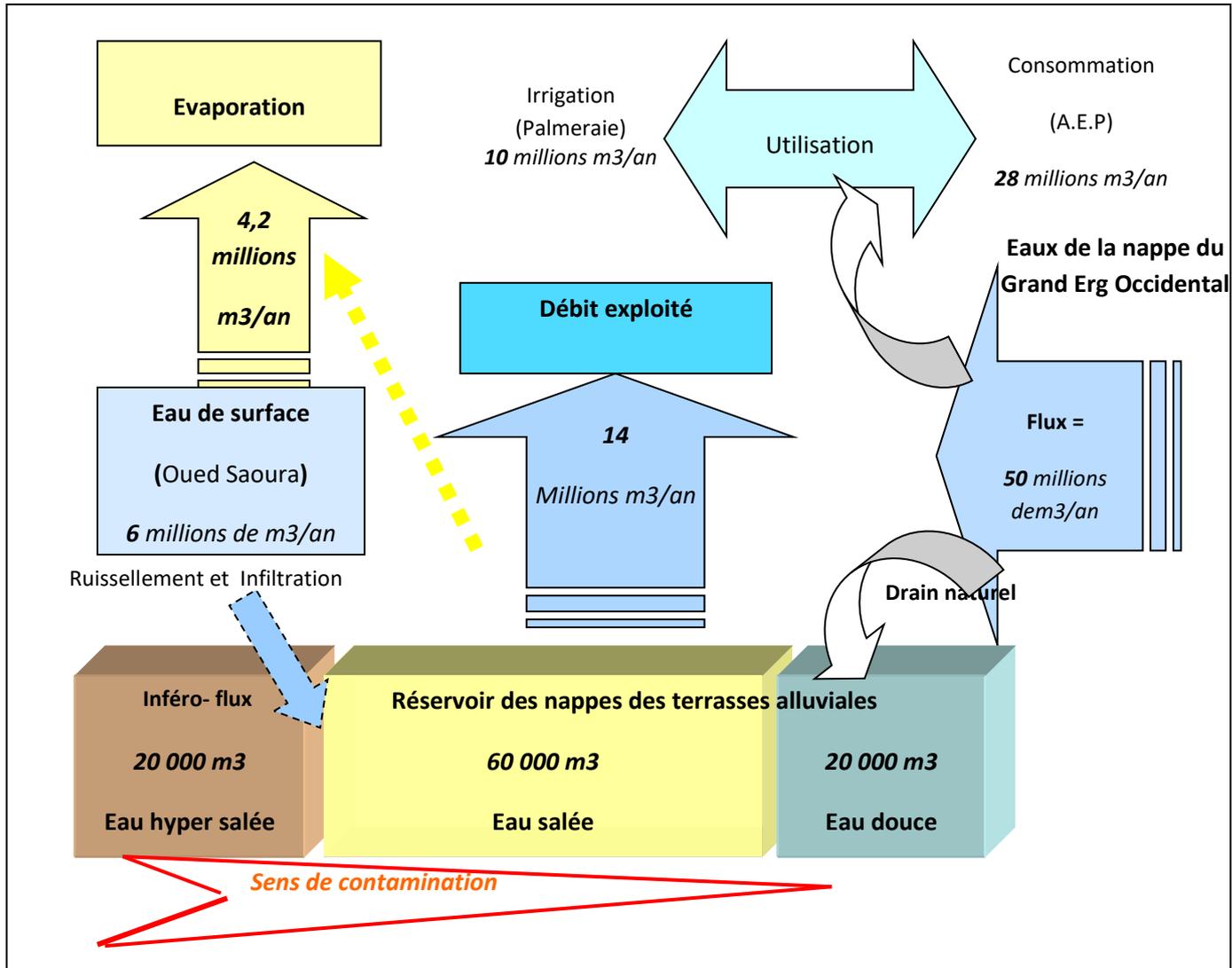


Figure 4.34: Bilan estimatif du système aquifère.

4. Fonctionnement du système aquifère

A l'issue des données des conditions des gisements et Les caractéristiques hydrodynamique du réservoir, nous avons confirmé la discontinuité sédimentaire du bassin hydrogéologique de l'aquifères aquifère structurale. Il faut donc admettre que pour l'aquifère Mio-Plio-Quaternaire au niveau de Béni-Abbès , quant à elle était principalement drainée par les venues d'eau de la nappe du Grand Erg occidental. le changement du factices et la variabilités de la formation *Torba*, d'ou la piézométrie est dictée principalement par les difficultés d'écoulement par drainance et les vitesses hydrauliques. De ce fait, une forte discontinuité hydrodynamique existait entre le centre du bassin avec des gradients hydrauliques élevés au centre du bassin versant et des valeurs faible au niveau la zone située au front de la dalle hamadienne vers la vallée de la Saoura, avec un décharge de la

nappe avec des débits très faible (Foggaras et petites source) sauf l'émergence de la Grande Source qui fait l'exception avec un débit très important de 29 l/s, cette dernière présente un exutoire par excellent de l'aquifère du Mio-Plio-Quaternaire du Grand Erg Occidental. Le forte débit mesurées de la source laissent soupçonner des venues d'eau important à proximité des failles situées dans le remplissage Tertiaire(dalle calcaire et Torba). il faut note que la Grande sources de Béni Abbes et de type de sources de débordement situées au contact Miocène/Dévonien. La figure 4.35 peuvent explique la repartions des perméabilités dans le bassin hydrogéologique et de justifies le débits important de la grande source part apport aux exurgences qui offres des débits faible à tres faibles.

La figure 4.36 résume et rassemble les principales informations que nous avons obtenues au cours de cette étude hydrogéologique sur le fonctionnement de l'aquifère. Celle-ci représente une section d'aquifère orientée Est-Ouest de l'Erg vers la vallée de la Saoura.. Il est possible de résumer nos travaux par le biais d'un bilan faisant état, à l'échelle du système aquifère, des entrées et des sorties.

Les entrées : – les venues d'eau de la nappe du Grand Erg Occidental constituent l'entrée principale du système. Il a été possible de la définir et de localiser les zones de recharge au niveau de l'Atlas Saharien. L'alimentation de l'aquifère du Mio-Plio-Quaternaire est complexe et il est possible de distinguer deux zones d'alimentation par l'infiltration des eaux superficielles. Une zone d'alimentation principale inclut la massif Dejebelkehla au Nord de la région de Taghit au sens large. Une seconde zone le paiement de l'Atlas Saharien principalement par l'oued Namous.

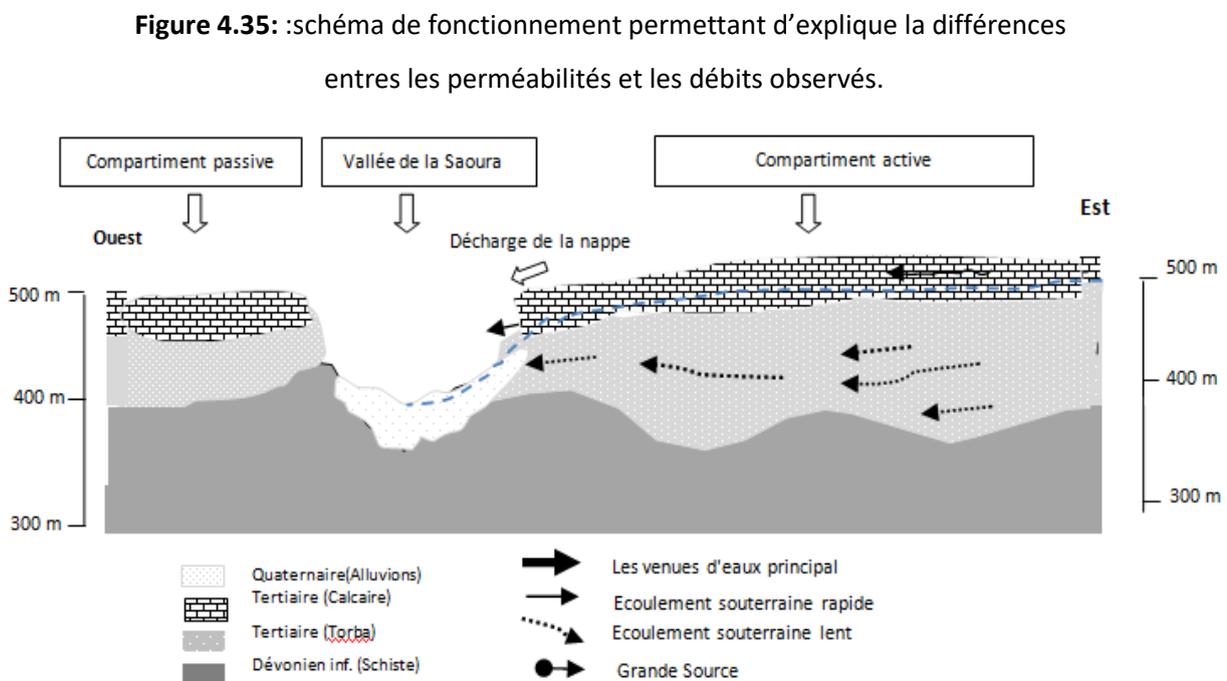
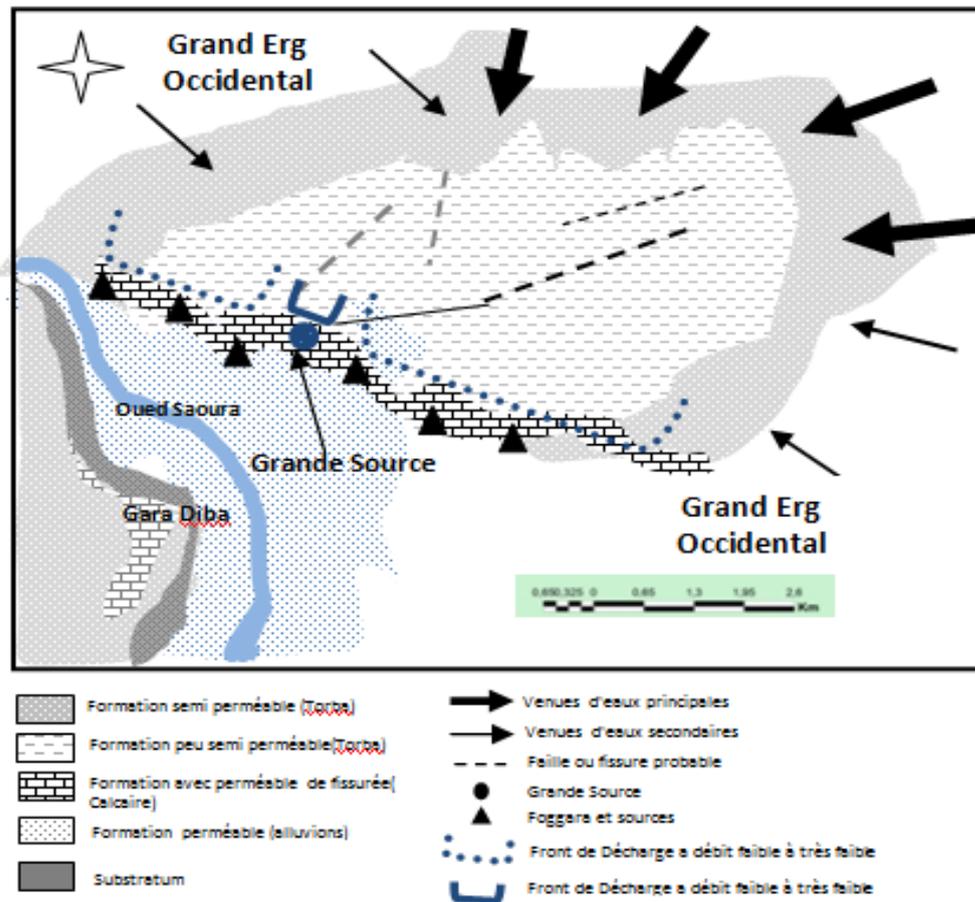
Les sorties : L'exutoire de l'aquifère est complexe et plusieurs composantes peuvent être identifiées. Il est en effet nécessaire de tenir compte du fonctionnement passé et actuel de l'aquifère, mais aussi de l'influence anthropique toujours grandissante, sur l'organisation des écoulements.

– Un drainage naturel des aquifères alluvionnaires de la vallée de la Saoura

Une drainage superficiel est également réalisé par des sources de débordement et les foggaras à l'interface Miocène / argiles Dévonien. Comme dans le cas précédent, la baisse de la piézométrie limite de nos jours ce phénomène.

une exploitation et des prélèvements par le bais des forages captant les eaux du Mio-Pliocène et plusieurs puits captant les eau des terrasse alluviales

– Enfin, l'exutoire le plus évident à l'heure actuelle est constitué par l'exploitation de la Grande Source qui confirme que pendant un siècle une stabilité du niveau piézométrique de la nappe du grand erg occidental.



5. Conclusion

L'étude lithostratigraphique et structurale montre que dans la région étudiée les formations susceptibles d'être aquifères et présentant un intérêt hydrogéologique sont représentées essentiellement par les calcaires, argiles, grès et sable du Quaternaire et du Continental Terminal qui peuvent accumuler des réserves considérables en eaux souterraines.

Dans la région d'étude on distingue deux types d'exploitations des ressources en eau, l'une par l'implantation de puits à faible profondeur (9 à 30 m), pour capter les eaux des nappes des terrasses alluviales et l'inférox-flux phréatiques, l'autre type, par l'exécution des forages profonds (100 et 300m) pour capter les eaux des niveaux aquifères Mio-Pliocène (nappe de l'Erg) ainsi que les aquifères du Cambro-Ordovicien du paléozoïque. Notre étude a été consacrée plus spécialement à l'étude hydrogéologique du système aquifère de la région de Béni-Abbès dont la structure lithologique est variée. Cette structure est caractérisée par une superposition de haut en bas des cailloutis de calcaires, galets, grès et sables, graviers et argiles qui affleurent dans toute la zone.

D'après l'étude géologique et géophysique les terrains traversés par les forages localisés au niveau de cette zone et à partir des logs stratigraphiques des forages de la zone d'étude, nous pouvons signaler la présence de deux types aquifères :

- Le premier type, caractérisé par une perméabilité de fissures formées par les calcaires du Mio-Pliocène d'une épaisseur de 50 à 300 m
- Le deuxième type, caractérisé par une perméabilité d'interstices composés essentiellement par des cailloutis de grès, sable et argiles d'une épaisseur de 30 m.

Le système aquifère de Béni-Abbès se caractérise par une piézométrie homogène et d'un écoulement Nord Est sud- Ouest avec un gradient hydraulique variant entre 8.10^{-2} et 1.10^{-1} au niveau de la nappe du grand Erg et entre 2.10^{-2} ou 5.10^{-2} au niveau de la nappe des terrasses alluviales. Les débits d'exploitations s'échelonnent entre de 2 à 30 l/s.

Cette nappe est alimentée par les eaux superficielles de l'oued Saoura et surtout les eaux de la nappe de l'erg qui sont connues par leur bonne qualité chimique et par l'alimentation d'un drain naturel par infiltration. Elle représente aussi une unité à écoulement convergent vers l'oued caractérisé par une piézométrie relativement homogène.

Chapitre 05

HYDROCHIMIE

ETUDE HYDROCHIMIQUE

1. Introduction

L'étude des propriétés physico-chimique des eaux d'une nappe permet, non seulement de juger la salubrité des eaux vis-à-vis de l'usage domestique et agricole mais elle constitue un complément très utile pour l'étude hydrogéologique. Elle permet d'apprécier la qualité chimique des eaux souterraines, leur potabilité, et montre la relation qui existe avec les formations géologiques qu'elle traverse.

Dans le présent chapitre on va traiter la qualité physico-chimique des eaux souterraines de la région d'étude, donc il est nécessaire d'étudier les influences lithologiques sur la minéralisation. Pour ces campagnes d'échantillonnage et de mesures sur le terrain ont été réalisées d'un réseau des points d'eaux au niveau de la région de Béni Abbès, à l'intérieure des dunes de sable du Grand Erg Occidental, la quelques puits de la Hamada de Guir et un inventaire dans la chaîne d'Ougarta entre 2015 et 2016. Nos prélèvements concernent principalement la nappe du Grand Erg Occidental et des terrasses quaternaires, également celle de la Hamada du Guiret des Monts d'Ougarta. L'échantillonnage a porté sur les puits, forages, sources et foggaras.

L'étude des propriétés physico-chimiques des eaux d'une nappe permet, non seulement de juger la qualité des eaux vis-à-vis de l'usage domestique et agricole mais elle constitue aussi un complément nécessaire pour l'étude hydrogéologique. Elle permet d'apprécier la qualité chimique des eaux souterraines, leur potabilité, et d'identifier la relation qui existe avec les formations géologiques qu'elle traverse.

Les analyses d'eau permettront de caractériser, classer les familles d'eaux des nappes et de cerner les secteurs les plus pollués et arranger les différentes eaux dans la région.

Les chapitres précédents ont montré d'une part la complexité de la ressource en eau dans la région de Béni-Abbès et d'autre part l'inexistence d'informations sur son fonctionnement hydro chimique. Afin de mieux cerner cet aquifère, ce chapitre sera consacré à l'utilisation des outils d'hydrochimie et des interprétations isotopiques.

2. Prélèvement et méthodes d'analyse

Pour réaliser l'étude physico-chimique des eaux de la région d'étude des campagnes de prélèvements et d'analyses des points d'eau ont été effectuées durant l'année 2014-2015-2016. Pour avoir étudié son évolution temporelle, une compilation et exploitations des données hydrochimiques des différents intervalles de temps (1941, 1963, 1990, 2002, 2004 et 2008). Les résultats obtenus sont mentionnés dans les tableaux annexes 3 et 4.

Des flacons doublés d'1/2 l et 1,5 l d'eau ont été prélevés à chaque campagne pour les analyses chimiques des éléments majeurs ou complètes. Les échantillons destinés à l'analyse des cations ont été acidifiés avec HNO_3 pur sur place. Les analyses chimiques ont été réalisées au laboratoire de chimie des eaux et des sols de l'ANRH (Agence Nationale des Ressources Hydrauliques) d'Adrar.

Faute de temps, nous n'avons pas pu faire le dosage de l'alcalinité et des chlorures de tous les échantillons sur le terrain. Les quelques échantillons dosés nous ont permis de comparer avec les teneurs mesurées en laboratoire. La conservativité de l'élément chlorure, élément essentiel dans la composition chimique de nos eaux, a bien été vérifiée. Afin d'avoir des valeurs homogènes, seuls les résultats des analyses chimiques réalisées en laboratoire ont été pris en compte

2.1. Prélèvement

Parallèlement aux différentes campagnes de reconnaissance, quelques points d'eau (Forage, puits, source et foggara) ont fait l'objet de prélèvement destinés aux analyses chimiques. Ces échantillons ont été prélevés dans des bouteilles en plastique. Leurs analyses hydrochimiques se sont déroulées au niveau du laboratoire régional de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH), selon les standards (Rodier J., et al. 2009).

Lors des campagnes de terrain, nous avons mesuré in situ :

- la conductivité, le pH, et la température : à l'aide d'un Multiparamètres de type P4.

Au niveau du laboratoire l'appareillage des analyses chimiques utilisera :

- un Spectrophotomètre à UV-VIS ;
- Conductimètre,
- Multi paramètre (pH mètre...);
- photomètre à flamme.

2.2. Matériels et Méthodes d'analyse

Les méthodes d'analyse s'appuient sur les mesures des grandeurs physiques, ou des réactions chimiques (dosage). Certains paramètres physiques ont été mesurés in situ, tel que le pH, la conductivité électrique (CE) et la température (T°), à l'aide des appareils portatifs (pH-mètre, conductimètre, thermomètre).

Les analyses chimiques se basent sur les principales méthodes suivantes :

Les ions de calcium et de magnésium ont été analysés par complexométrie, le sodium et potassium par la méthode spectroflamme, le chlorure et les sulfates et les nitrates par spectrophotométrie. Les Matières Organiques ont été analysées par la technique d'oxydoréduction, d'autre part, les bicarbonates ont été mesurés par la méthode potentiométrique.

La température de l'eau est un paramètre d'une grande utilité en ce qui concerne les études hydrogéologiques. Elle est nécessaire pour déterminer les équilibres chimiques entre les diverses espèces en présence. La concentration de certains éléments dissous ou les rapports des concentrations d'éléments entre eux, sont l'image des conditions d'équilibre et qui sont en fonction de la température atteinte par l'eau souterraine. On peut en déduire des informations sur la profondeur de l'écoulement souterrain, le temps de résidence de l'eau dans l'aquifère (les eaux souterraines sont influencées par les propriétés thermiques de la roche), ainsi que son origine. Habituellement, on mesure également la

température de l'air (ou mieux encore, on donne une indication de la température moyenne du jour de mesure) qui permet de vérifier, les conditions climatiques dans lesquelles l'échantillonnage s'est déroulé et d'expliquer d'éventuelles anomalies dans les résultats des analyses géochimiques.

Le pH de l'eau est un paramètre qui conditionne les équilibres physico-chimiques et détermine l'acidité ou l'alcalinité. Il dépend de l'origine des eaux, de la nature géologique du substrat et du bassin versant traversé

Le résidu sec est la quantité des sels dissous et la matière organique contenue dans l'eau obtenue par dessiccation de l'eau à 110°C, il correspond à la totalité des sels dissous et donne donc une idée sur le degré de minéralisation des eaux.

La conductivité traduit une aptitude de l'eau à laisser passer le courant électrique ; c'est une mesure rapide de la teneur globale en électrolytes d'une solution ; et elle est liée directement à la quantité d'ions présents, et leur mobilité. L'unité de la conductivité est le Siemens par mètre (S/m) : $1\text{ S/m} = 10^4\ \mu\text{S/cm} = 10^3\ \text{S/m}$. C'est un outil nécessaire à l'estimation de la minéralisation. La minéralisation globale (g/l), est approximativement égale au produit de la conductivité électrique à 25°C par un coefficient compris entre 0.55 et 0.75 pour la majorité des eaux souterraines (Freeze et Cherry, 1979). La conductivité augmente lorsque la température s'accroît, de ce fait on possède toujours à une correction par rapport à une température de référence (20°C ou 25°C).

Le magnésium est un élément très abondant, Il est souvent présent dans les roches évaporitiques (sel de Mg), la carnallite ($\text{KMgCl}_3, 6\text{H}_2\text{O}$), la kiesérite ($\text{MgSO}_4, \text{H}_2\text{O}$), et carbonatés, la dolomie $[(\text{Ca}, \text{Mg})\text{CO}_3]$. Le magnésium est un élément très abondant, Il est souvent présent dans les roches évaporitiques (sel de Mg), la carnallite ($\text{KMgCl}_3, 6\text{H}_2\text{O}$), la kiesérite ($\text{MgSO}_4, \text{H}_2\text{O}$), et carbonatés, la dolomie $[(\text{Ca}, \text{Mg})\text{CO}_3]$. L'origine de cet élément est liée principalement à la dissolution des formations salifères très solubles telles que l'halite (NaCl).

L'origine **Sodium Na^{++}** est liée principalement à la dissolution des formations salifères très solubles telles que l'halite (NaCl).

Le chlorure (Cl^-) est un ion négatif du chlore (Cl) ; Il est présent dans l'eau, le sol, les roches, ainsi que dans de nombreux aliments. Dans l'eau, le chlorure n'a ni odeur, ni couleur, mais peut procurer un goût salé. Il est très soluble et très stable difficile à s'éliminer. Les chlorures ont une origine géologique liée au lessivage des formations alluviales quaternaires, argileuses et marneuses.

Les sulfates sont des éléments très solubles et aussi très stables, proviennent du ruissellement ou d'infiltration dans les terrains à gypse.

Les ions **bicarbonates** se forment à partir de la dissolution des minéraux carbonatés par des eaux chargées en gaz carbonique lors de son infiltration dans le sous-sol.

L'ion **nitrate** est la forme oxydée de l'azote, les sources naturelles de nitrate sont principalement la pluie et les interactions avec le sol et la végétation, l'origine artificielle des nitrates sont les contaminations

par des engrais et les rejets domestiques. L'essentiel des nitrates NO_3 peut provenir de la nitrification du sol, de la décomposition de la matière organique (oxydation) soit en grande quantité à partir des fertilisants agricoles azotés ou bien en petite proportion à partir des minéraux azotés. Il s'agit d'un ion relativement stable, très soluble dans l'eau, qui dans un milieu réducteur peut passer en nitrites ou en ammonium.

Pour la caractérisation des eaux des différentes nappes étudiées dans la région, les principaux diagrammes utilisés pour la représentation d'une eau sont :

- Le diagramme en losange ou diagramme Piper.
- Le diagramme semi-logarithmique Schoeller-Berkaloff.
- Le diagramme de Stiff, ou modèle de Stiff.

Vu le nombre restreint de points d'eau analysés, on ne peut pas se prononcer sur l'origine de la minéralisation. Néanmoins on peut évoquer certaines hypothèses pouvant expliquer la variation des sulfates qui proviennent fondamentalement de :

- La dissolution des sels évaporitiques (gypse, anhydrite, etc.) ;
- L'origine marine du terrain (calcaires et dolomies marins) ;
- L'oxydation des sulfures des roches ignées, métamorphiques ou sédimentaires ;
- Activités agricoles

2.3. Balance ionique

L'analyse physico-chimique d'une eau comporte obligatoirement les éléments nécessaires à l'établissement de sa balance ionique, on vérifie alors que la somme des cations est égale à celle des anions, pour ses ions majeurs : calcium, magnésium, sodium et potassium pour les cations ; chlorures, sulfates, nitrates et bicarbonates pour les anions. On admet qu'une différence peut exister entre la somme des anions et celle des cations, mais elle ne doit pas excéder 2% (sommés exprimés en milliequivalent par litre). Dans le cas contraire, on peut suspecter des erreurs de manipulation ou de mesure. Il est alors nécessaire de refaire l'analyse dans sa totalité.

Dans les directives des analyses chimiques des eaux, le calcul de la balance ionique est donc primordial pour tout traitement hydrochimique. En effet, le test de nos analyses a été fait à l'aide d'un programme initié sur Excel, attestant les fiabilités de nos analyses (fig.5.1).

3. Etude physico-chimique des eaux de la région de Béni -Abbés

Notre échantillonnage a porté sur 63 points d'eau, les prélèvements ont été effectués au mois de Mars et Avril 2015-2016 et les analyses ont été réalisées aux laboratoires de l'ANRH D'Adrar. Les analyses ont porté sur la minéralisation globale, les paramètres physico-chimiques ainsi que les paramètres de pollution (NO_2^- , NO_3^-). Les résultats sont présentés en annexe (Tableau 24)

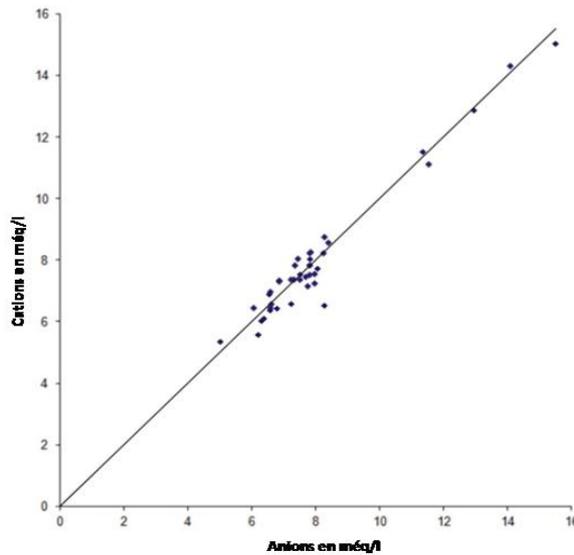


Figure 5.1. : Balance ionique de l'ensemble des analyses.

3. 1. Eaux de surface

Le tableau 5.1 ci-dessous donne pour les périodes 2008-2014, une synthèse des caractéristiques hydrochimiques du bassin versant de la Saoura dans différentes stations.

Tableau 5.1 : Synthèses des analyses physico chimiques des eaux de surfaces dans le bassin de la Saoura.

Eau de surface	pH	CE ms/cm	RS mg/l	Ca ⁺⁺ mg/l	Mg ⁺⁺ mg/l	Na ⁺ mg/l	K ⁺ mg/l	Cl ⁻ mg/l	NO ₂ ⁻ mg/l	MIN mg/l	Ca ⁺⁺ mg/l
Oued ZOUFANA TAGHIT	7,62	7,03	4200	57	427	750	34,5	1800	-	4358,6	57
Oued ZOUFANA TAGHIT 2	7,51	8,31	4950	270	348	900	75,5	2030	0,002	5152,2	270
Oued SAOURA IGLI	7,21	7,33	4700	168	263	875	225	1400	0	4544,6	168
Oued GUIR BARRAGE	7,27	4,17	2600	215	96	500	14,5	807,5	0,001	2585,4	215
Oued SAOURA BENI ABBES	8,03	3,28	5360	267	300	850	55	1680	-	5033,6	267

Ces échantillons sont évidemment insuffisants pour estimer la salinité, mais nous renseignent déjà sur la forte concentration des sels dans les eaux de surfaces de la région de Béni Abbès (fig. 5.2).

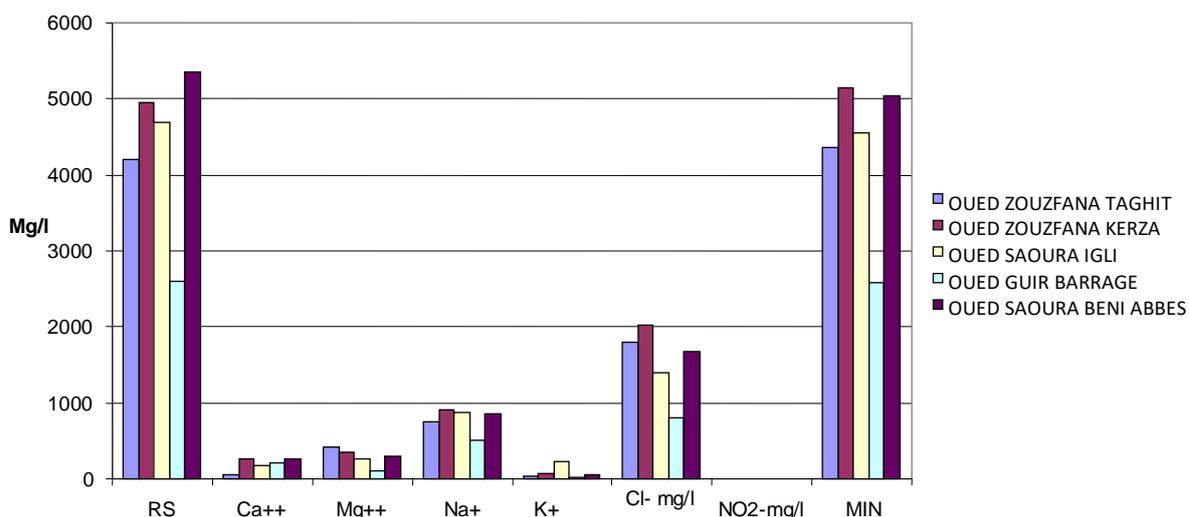


Figure 5.2 : Synthèse des paramètres hydrochimiques des eaux de surfaces du bassin versant de la Saoura

3. 2. Eaux souterraines

3. 2.1 Hydrochimie de la nappe du Cambro-ordovicien

L'étude de la qualité des eaux souterraines de la région d'Ougarta, a été effectuée sur des points d'eau dans les différentes zones (Fig.5.3).

Les analyses de qualité des eaux d'après les travaux de Roche 1973, ont montré des caractéristiques variables pour les trois régions Zeghamra, Ougarta et Kheneg El Aatène. Etant donné que les températures sont élevées, 34° est de beaucoup supérieure à la température moyenne annuelle de l'air. Ces eaux peuvent être qualifiées de thermales au sens propre du mot ; elles ont dû passer à des profondeurs assez importantes. Avec des résidus secs échelonnés de 795 à 1255 mg/l, elles n'apparaissent pas très chargées. Les puits offrent les eaux les plus douces. La majorité des analyses des eaux effectuées en 1964, montre la similitude du faciès chimique de ces eaux pour les trois zones comme suit (Tableau 5.2):

Tableau 5.2 : Intervalles de variation et médiane de différentes caractéristiques chimiques des eaux des Monts d'Ougarta (Roche, 1964)

Region	RS mg/l	dh	rCl (méq/l)	rSO4 (méq/l)	rCO3 (méq/l)	rCl-rNa	rSO4	rCO3	rMg	rNa
							r Cl	rSO4	rCa	rMg
Zeghamra	795	35.8	5.09	3.12	3.03	<0	0.87	1.24	0.21	7.24
Ougarta	915	47.9	6.28	5.20	3.68	<0	0.75	0.72	0.25	4.41
KhengAatene	1255	49.0	12.76	5.39	4.70	>0	0.33	0.63	0.31	2.56

Les campagnes d'échantillonnage que nous avons réalisé durant la période, Avril 2015 et Mars-avril 2016 ont donné des températures élevées(35°) et supérieures à la température de l'air ; ces eaux

peuvent être classées comme des eaux thermales. Ce sont des eaux qui proviennent de profondeurs assez importantes. Avec des résidus secs variant entre 700 à 2010 mg/l, la majorité des eaux est douce dans les endroits de Zeghamra et Ougarta.

Le système aquifère du Cambro-ordovicien comprend des horizons plus ou moins importants. Pour caractériser hydrochimiquement l'eau de chaque nappe, Nous avons procédé à une compilation des données sur un intervalle de 60 ans, en effet plusieurs analyses qui sont à notre possession remontent aux années 1964 et 2016 (Tableau 5.3).

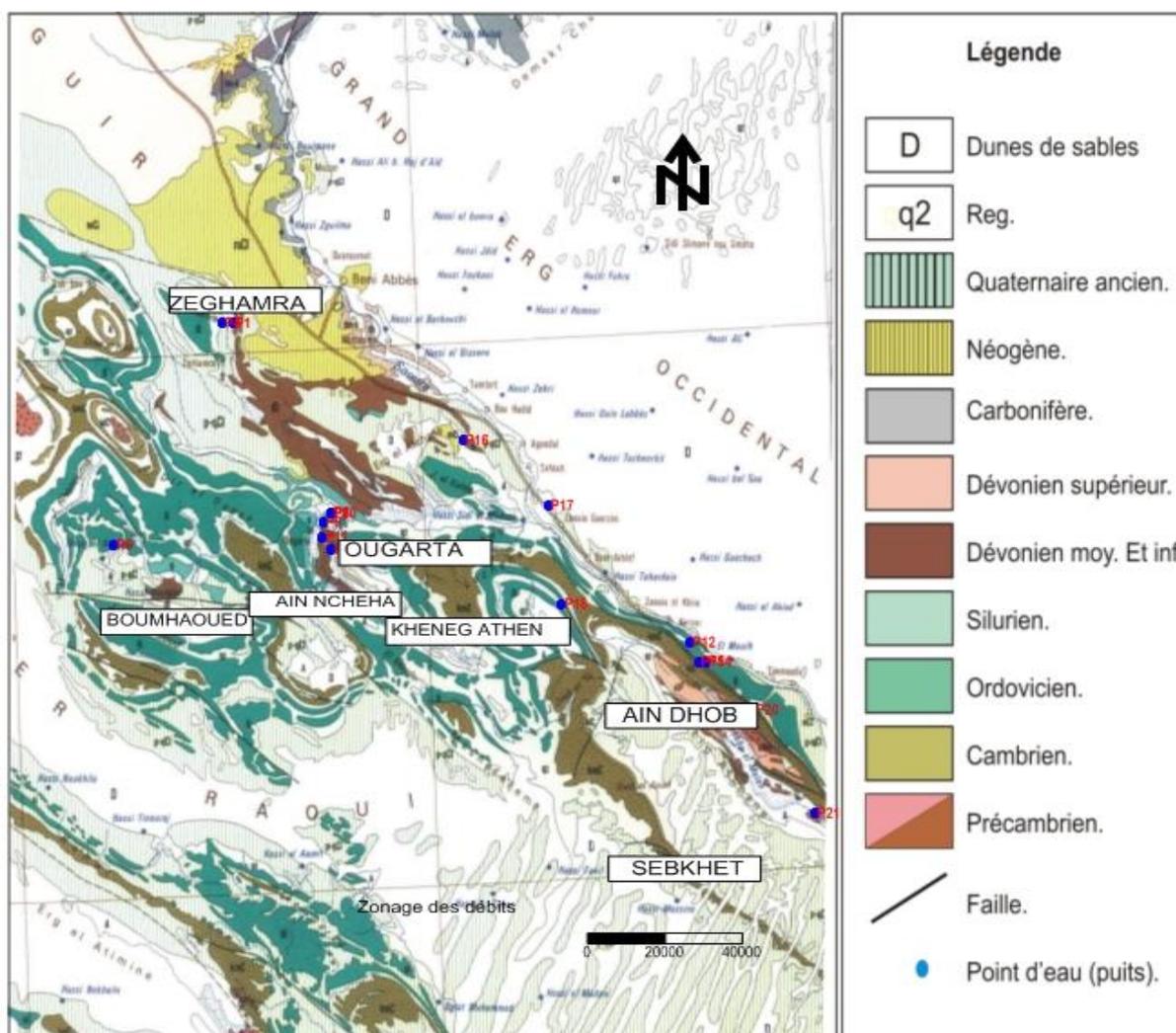


Figure 5.3. Localisation de la zone d'étude et points d'eau prélevée.

La qualité des eaux souterraines de la région d'Ougarta, sont en générale peu minéralisées, le faciès chimique prédominant est sulfato-sodique et parfois chloruré calcique pour les deux périodes anciennes (1963) et récentes (2016). L'évolution spatio-temporelle de la qualité physico-chimique des eaux de différentes zones étudiées ont des caractéristiques hydrochimiques identiques, comme le montre le tableau 5.3 et tab 5.4

Tableau.5.3 : Caractéristique et évolution hydrochimique des eaux des Monts d'Ougarta.

Zone	Date	PH	COND ms/cm	RS mg/l	Ca mg/l	Mg mg/l	Na mg/l	CL mg/l	SO4 mg/l	NO3 mg/l	HCO3 mg/l
Zeghamra	1963	7,47	1,579	970	97	58	133,6	185	380	21	119
	2016	7,47	1,6	1000	100	60	132	191	401	27	124
BouM'hawed	1963	7,87	1,53	960	82	62	140	220	298	49	168
	2016	7,17	1,64	1010	132	55	120	200	289	27,5	183
Ougrata	1963	7,65	1,515	980	105	37	170	260	268	14	159
	2016	7,49	1,687	1050	122	26	171,8	295	230	15	128
El Kseib	1963	7,17	1,64	1010	132	55	120	200	289	27,5	183
	2016	7,49	1,687	1050	122	26	171,8	295	230	15	128
Sebkat el Mellah	1963	6,2		32152	604	202,7	11000	17800	1250		72
	2016	7		41300	774	269	14160	23700	1728		72,2

La série des données hydrochimiques recueillie pour l'année 1963 et celles de 2016 (Tableau 26), s'avère très utile dans l'étude de l'évolution spatio-temporelle des constituants physico-chimiques, néanmoins elle permet de tracer des histogrammes et des cartes des quantités de sels dissous, ainsi que la migration exogène de la salinité.

Tableau 5.4 : Les formules caractéristiques pour les différentes zones d'intervention sont pour :

Zone	Année	Formule caractéristique
Zone ZEGHAMRA	2016	r SO4- - > r Cl- > r HCO3- et r (Na++ K+) +> r Ca+++ > r M
	1963	r Cl > r SO4 > r CO3 r Ca > r Na > r Mg
Zone OUGARTA	2016	r SO4- - > r Cl- > r HCO3- et r (Na++ K+) +> r Ca+++ > r Mg++
	1963	r SO4 > r Cl > r CO3 r Ca > r Na > r Mg
Zone KhenegAlatene	2016	r SO4- - > r Cl- > r HCO3- et r (Na++ K+) +> r Ca+++ > r Mg++
Zone El Kseib	2016	r SO4- - > r Cl- > r HCO3- et r (Na++ K+) +> r Ca+++ > r Mg++
	1963	r Cl > r SO4 > r CO3 r Na > r Ca > r Mg
Zone Sebkheth el Mellah (Les eaux de surface)	1963	r Cl > r SO4 > r CO3 r Na > r Ca > r Mg

Pour apprécier la potabilité des eaux souterraines du système aquifère du Paléozoïque de la région d'Ougarta, nous nous référons au diagramme de Scholler, (Fig.5.4) L'utilisation de ce diagramme montre que les eaux souterraines de toutes les zones étudiées de la chaîne d'Ougarta ont des caractéristiques de potabilité bonne et moyenne, à l'exception des eaux de la région de Sebkhath EL Mellah qui pressentent des eaux non potables.

Le diagramme de Piper montre, la similitude de faciès chimique de ces eaux pour toutes les unités hydrogéologiques du Paléozoïque de la chaîne d'Ougarta (Fig. 5.5).



Figure 5.4 :Diagramme deSchollerde la potabilité des eaux des nappes des Monts d'Ougarta

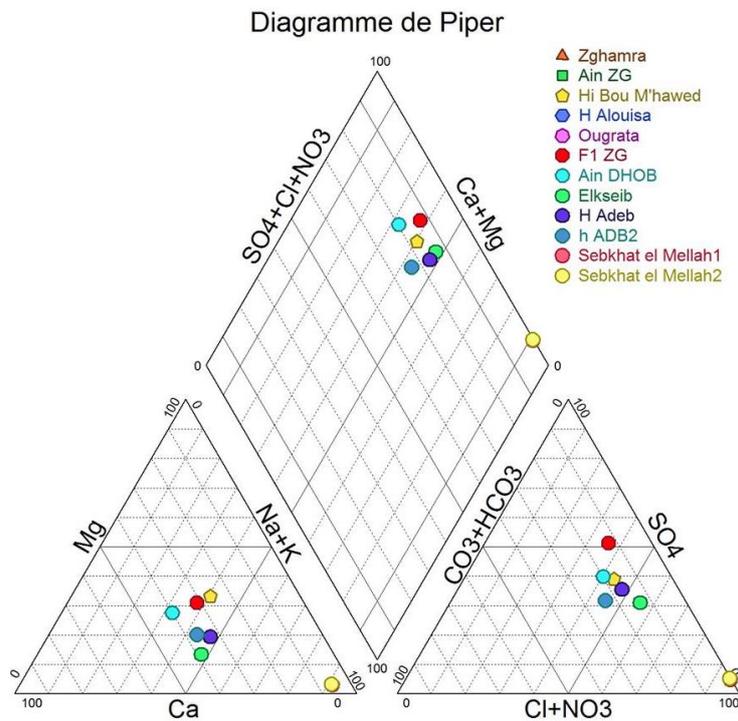


Figure 5.5 :Représentation graphique selon Piper des eaux de l'aquifère Paléozoïque des Monts d'Ougarta

Les eaux souterraines de la région d'Ougarta, zone d'alimentation du système aquifère sont, en général, peu minéralisées, elles sont à prédominance chlorurées.

Alors que la sebkhet el Melah reste alimentée par les importantes crues de 2008 et de 2014 par des eaux relativement chargées 2.5 g/l de l'oued Saoura, La concentration des eaux en sels, au niveau de la sebkhatde 32 g/l, est sensiblement celle de l'eau de mer. Les eaux de crue qui inondent la sebkha dissolvent les évaporites qui recouvrent la surface du sol, ce qui augmente très fortement la salinité du lac dès son remplissage. Le lac de la sebkhat et Melah a une très grande surface de 200 km² environ et une faible profondeur de 1 à 4 m.

Le 08 octobre 2008 et le 11 novembre 2014, le débit de la Saoura, était respectivement de 5m³/s et 3m³/s. Nous avons remarqué une différence importante entre les deux périodes, l'hiver et l'été ; en effet, la concentration en sels des eaux de la sebkha passe de 32 g/l en janvier à 400 g/l, durant le mois de juillet.

Les analyses montrent une importante croissance du magnésium qui a supplanté d'abord le calcium puis le sodium, ce dernier étant soustrait à la saumure par la précipitation d'halite.

3.2.2 Hydrochimie de la nappe du Grand Erg Occidental (Néogène)

Notre échantillonnage a porté réseau des points d'eaux bien réparties sur la surface du Grand Erg Occidental étudiée (Fig 5.6). Il faut noter que les puits inventoriés se sont des puits pastoraux, les prélèvements ont été effectués durant les mois de Mars et Avril 2016. Les analyses ont été réalisées aux laboratoires de l'ANRH d'Adrar.

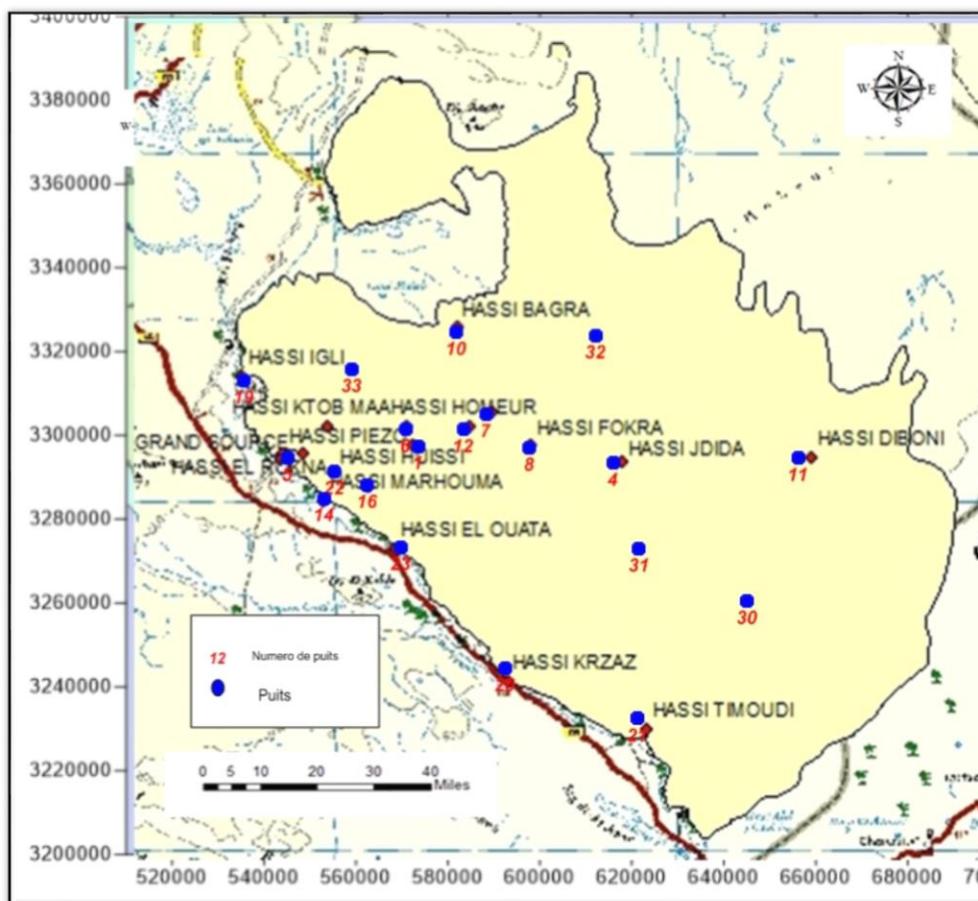


Figure 5.6 : Positionnement des puits de la nappe du Grand Erg Occidental

Pour réaliser l'étude physico-chimique des eaux de la région d'étude des campagnes de prélèvements et d'analyses ont été effectués sur 17 points situés dans l'erg et quatre points d'eaux sur le plateau de la ville de Béni-Abbès durant l'année-2016 (tab.5.5).

Tableau 5.5 : Caractérisation hydrochimique des eaux de la nappe du Grand Erg Occidental

N°	Nom	pH	CE	RS_	Ca	Mg	Na	K	CL	SO4	NO3	HCO3	TH	NO2	Miné
1	HASSI FEDJ BOUNOUARA	7.47	1.579	970	97	58	134	2.8	185	380	21	119	47	0	979
2	HASSI EL ROKNA	7.24	0.66	315	35	38	25.2	40	200	110	20	120	25	0.04	406
3	HASSI JDIDA	7.12	0.57	360	32	15	32	65	50	100	30	104	14	0.083	353
4	HASSI PIEZO	8.15	2.81	1800	241	89	235	20.8	600	340	13	262	0	0	4.5
5	HASSI DIBONI	7.09	0.81	510	103	28	120	32	246	29	80.7	85	37	0.046	502
6	HASSI HOMEUR	7.2	0.72	450	20	18	49.2	65	80	110	50	55	12	0.01	446
7	HASSI KTOB MAA	8.09	1.44	900	111	49	120	28	350	145	72	98	47	0	893
8	HASSI MARHOUMA	7.09	0.81	510	103	28	100	34	246	29	80.7	85	37	0.046	502
9	GRAND SOURCE	7.66	0.589	390	51	21	33	7	50	95	28	119	21	0	365
10	HASSI TIKHSSAGIME	7.23	0.69	345	41	21	35	50	70	100	78.6	79	19	0	427
11	HASSI IGLI	7.7	0.491	320	38	16	32	2.3	35	45	23	137	16	0.04	304
12	HASSI KRZAZ	7.48	1.2	760	97	29	115	8	180	200	10	149	36	0.006	744
13	HASSI TIMOUDI	7.5	1.057	680	80	29	97	8.4	170	150	43	88	32	0	655
14	HASSI HUISSI	7.6	0.77	480	44	27	50	48	110	20	92	22	8	0.28	477
15	HASSI EL OUATA	7.54	0.72	490	72	18	34.9	6.2	115	80	18	113	25	0.005	446

3.2.2.1 Paramètres physico-chimique

- **Le pH** ; Se maintient dans une fourchette de 7,2 à 8,15, indiquant que ces eaux sont légèrement basiques, mais elles restent dans l'intervalle permis par l'organisation mondiale de la santé (OMS, 2004).

- **La Conductivité électrique (CE)**

Elle varie entre 0.5 mS/cm et 1.579mS/cm dont la moyenne est de 0.8ms/cm, impliquant une minéralisation moyenne. Signalons que la majorité des analyses affichent des valeurs inférieures au seuil de 2880µS/cm de la norme de l'organisation mondiale de la santé (OMS, 2004).

Le Résidu sec (RS) et la minéralisation : le degré de minéralisation des eaux Pour l'ensemble des échantillons s'échelonnent entre 300 et 1800 mg /L .Au niveau du front de la nappe de la nappe du grand Erg occidental, et plus précisément les exutoires de la nappe (Grandesource) sont peut

minéralisées par rapport aux eaux du grand Erg ; les valeurs élevées dépendant essentiellement du lieu de prélèvement.

- **Les Sulfates** (SO_4^{-2})

Elles sont comprises entre 20 mg/l à 380 mg/l, répondant largement aux exigences de l'OMS.

- **Les Chlorures** (Cl^-)

Les chlorures, anions inorganiques contenus en concentrations variables dans les eaux naturelles, généralement sous forme de sels ; Halite (NaCl) et de Sylvine (KCl). (Demban'diaye A. et al. 2014). Les concentrations en chlorures oscillent entre un minimum de 35mg/l à un maximum de 600mg/l. Ces valeurs sont conformes aux normes de l'OMS.

Les Bicarbonates (HCO_3^-)

Les teneurs en bicarbonates des eaux souterraines non polluées varient entre 50mg/l et 400mg/l (Matthess G. Geol. Mijimbouw, 1994), les eaux souterraines de Mougheul affichent des valeurs de 22 mg/l à 262mg/l qui se situent largement dans la fourchette déjà mentionnée.

Le Sodium (Na^+)

D'après Matthess G. Geol. Mijimbouw, 1994, les eaux souterraines non polluées et sans contact avec des évaporites indiquent des teneurs en sodium comprises entre 5mg/l et 20mg/l. Les analyses effectuées au niveau des eaux souterraines de la nappe enregistrent des concentrations comprises entre 32mg/l et 235mg/l. Cet enrichissement léger traduit la dissolution de NaCl (Halite).

Le Calcium (Ca^{+2})

Ces concentrations dans les points d'eau analysés varient de 15 mg/l à 235mg/l, vu la nature lithologique de l'aquifère (calcaire).

Le Magnésium (Mg^{+2})

Les teneurs en magnésium varient de 65mg/l à 89mg/l. Leur existence est liée généralement au contact des eaux avec les roches calcaire-dolomitiques de l'aquifère.

Le Potassium (K^+)

Il est de l'ordre de 2mg/l à 65mg/l, restant dans les valeurs admissibles fixées par l'OMS (10mg/l).

La nappe du grand erg occidental est moyennement minéralisée dont les teneurs s'échelonnent de 300mg/l à 860mg/l.

Les Nitrates (NO_3^-); les eaux de cette nappe indiquent des valeurs en nitrates de 10g/l à 80mg/l.

3.2.2.2. Faciès chimiques et potabilités des eaux

L'interprétation des résultats des analyses chimiques des eaux de la nappe du grand erg révèle un faciès dominant. C'est le faciès Bicarbonaté-Calcique et parfois sulfaté-calcique (Tableau. 5.6).

Tableau 5.6 : Faciès chimique des eaux de la nappe du Grand Erg Occidental au niveau de Béni -Abbès.

Type	Formule ionique		Faciès chimique
	r% Anions	r% Cations	
Forage F1	HCO ₃ >SO ₄ >Cl	Ca > (Na+K)>Mg	Bicarbonaté calcique
Forage F2	HCO ₃ >SO ₄ >Cl	Ca > (Na+K)>Mg	
La Grande source	HCO ₃ > SO ₄ >Cl	Ca > (Na+K)>Mg	Bicarbonaté-Calcique
Hdab Baba Haïda	SO ₄ >Cl>HCO ₃	Ca>Mg> (Na+K)	Sulfaté-Calcique

La représentation des analyses chimiques sur le diagramme de Piper permet de différencier les familles d’eaux, l’examen des représentations graphiques (Figure 5.7 et 5.8) des différents diagrammes obtenus permet de déduire les interprétations suivantes :

- L’allure générale des diagrammes pour les différents points est la même.
- Dans le triangle des cations, le calcium et le sodium sont dominants par rapport au magnésium,
- Dans le triangle des anions, ce sont les chlorures et les sulfates qui sont les plus abondants, les bicarbonates sont peu fréquents.

Ainsi, dans le digramme losangique, l’évolution chimique est alors marquée par un positionnement vers les pôles calciques (ou sodiques), chloruré ou sulfaté. Le diagramme, fait alors ressortir trois familles de faciès chimiques :

- Famille des eaux chlorurées et sulfatées calciques,
- Famille des eaux bicarbonatées calciques,

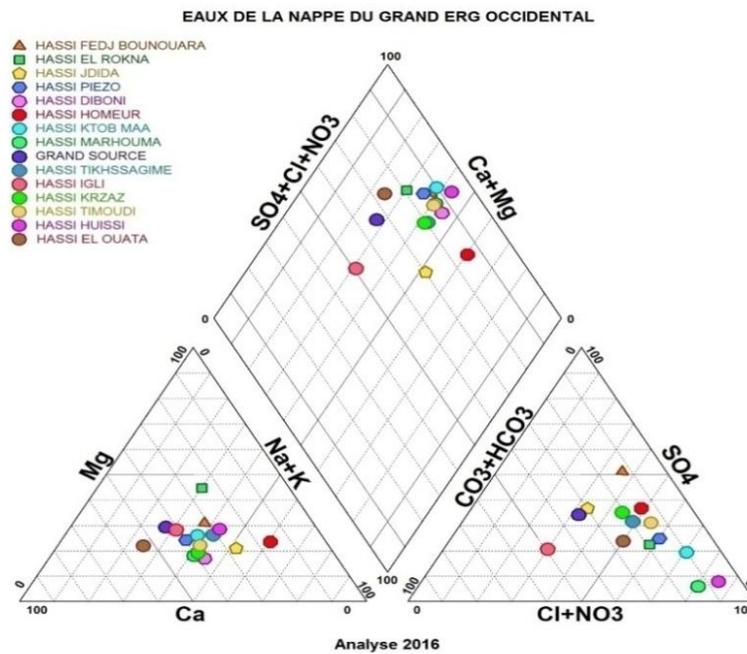


Figure 5.7 : diagramme de Piper des eaux de la nappe du Grand Erg à Béni Abbès (Analyses 2016)

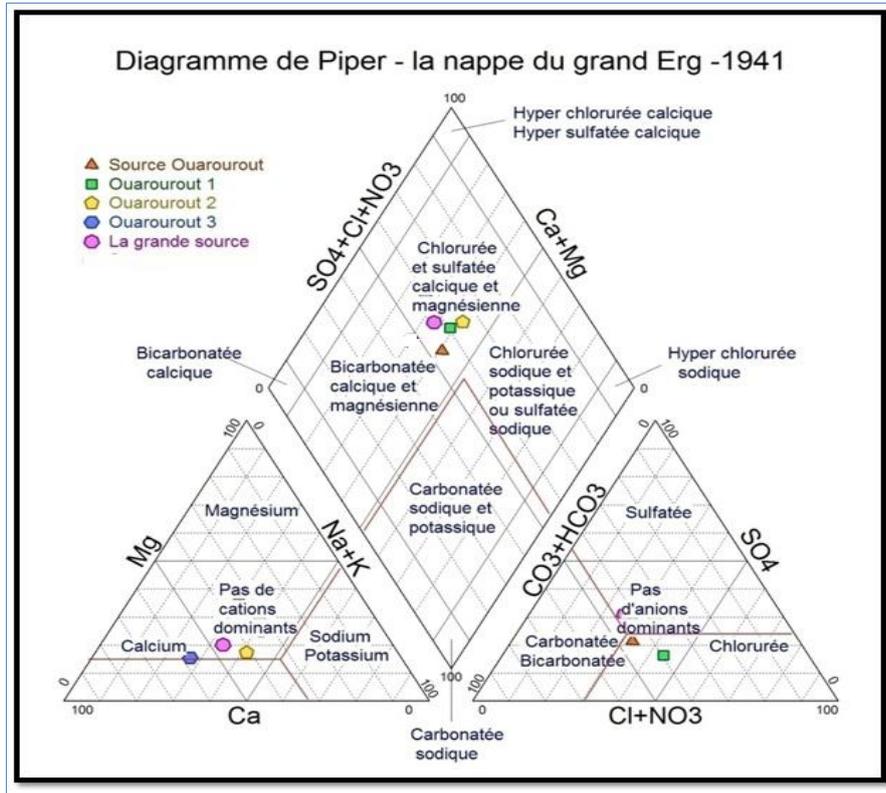


Figure 5.8 : Diagramme de Piper des eaux de la nappe du Grand Erg 1941.

Les eaux de la nappe de l'erg sont sulfatées calciques représentées par les analyses de la Grande source. D'après le diagramme triangulaire, tous les points d'eau ont des faciès chlorurés et sulfatés sodiques, les eaux ont gardées la même famille d'eau depuis 1941 (Fig. 5.6 et 5.8.).

Pour déterminer la potabilité des eaux nous avons utilisé le Diagramme semi-logarithmique de Schoeller-Berkaloff.

Cette représentation permet de représenter les faciès chimiques de plusieurs échantillons d'eaux dans un seul graphe. Les figures (5.9 et 5.10) des différents points d'eau de la nappe du Grand Erg montrent que les eaux de la nappe sont potables.

La potabilité de l'eau est définie par des paramètres physiques, chimiques et biologiques, mais surtout en fonction de son usage. Concernant l'eau de boisson, en se référant aux normes algériennes et aux valeurs guides de l'OMS (Annexe), on a obtenu que la majorité des eaux souterraines sont de bonne qualité.

Pour apprécier la potabilité des eaux de la nappe du Mio-Plio-Quaternaire (nappe de l'Erg), nous nous référons au diagramme de Schöeller (Figure 5.9 et 5.10) L'utilisation de ce diagramme montre que les eaux de la nappe du Grand Erg Occidentale, ainsi que les eaux de la grande source présente une eau potable et de bonne qualité.

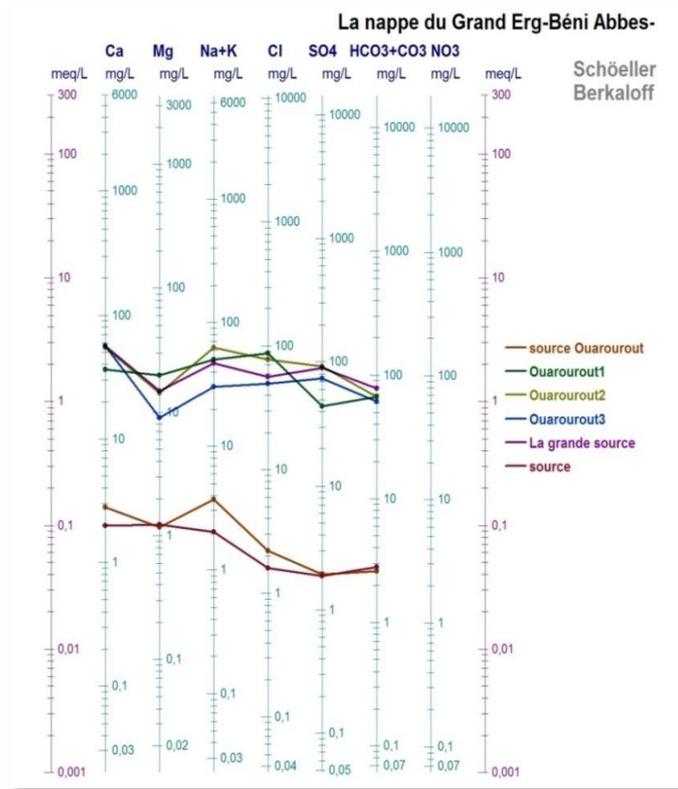


Figure 5.9 : Diagramme de Schöeller des eaux de la nappe du Grand Erg 1941

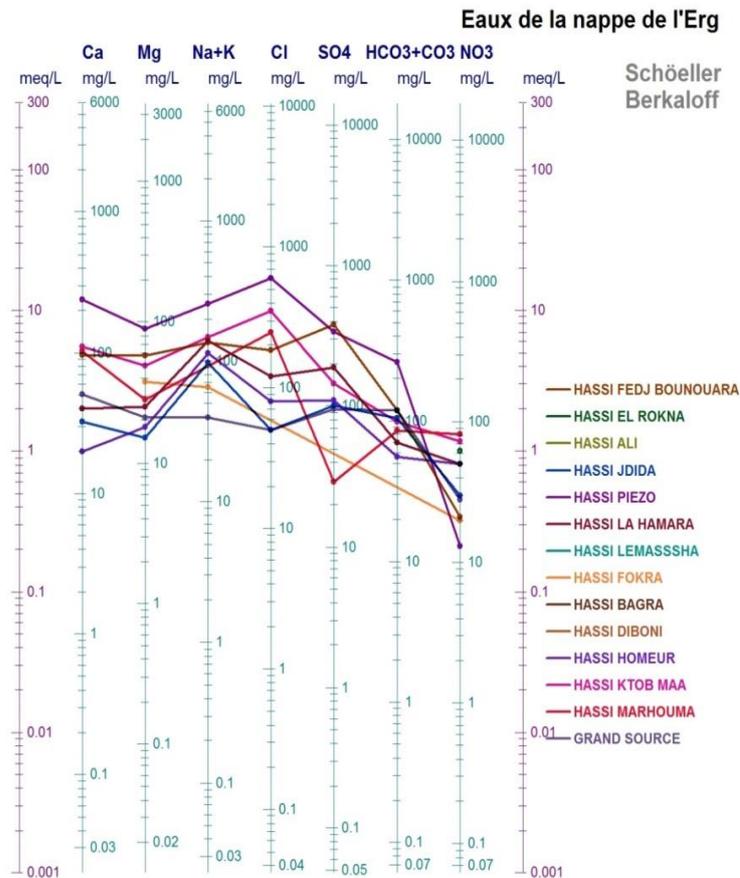


Figure 5.10 : Diagramme de Schoeller des eaux de la nappe du Grand Erg. (Analyse 2016)

3.2.2.3. Etude des rapports caractéristiques

Tableau 5.7 : Les rapports caractéristiques des eaux de la nappe Mio-Plio-Quaternaire (Erg)

Nom	rCl/rHco3	rSO4/rCl	rMg/rCa	rCl/rNa
P01	1.55	2.05	0.59	1,38
P02	0	0	0	0
P04	0.48	0.56	0.46	1.56
P05	2.29	1.58	0.37	2.55
P06	1.71	-	0.63	1.5
P08	-	-	-	-
P12	1.45	1.37	0.9	1.63
P13	3.57	0.41	0.44	2.92
P14	2.89	0.12	0.27	0
P15	0.42	1.90	0.41	1.52
P16	0.88	1.42	0.51	2
P18	3.55	0.10	1.21	1.33
P19	0.25	1.28	0.42	1.09
P20	1.20	1.11	0.29	1.56
P21	4.81	1.16	0.56	1.58
P22	1.81	1.38	0.50	1.40
P23	1.93	0.88	0.36	1.75
P24	5	0.80	0.61	2.20
P25	1.01	0.70	0.25	3.30
P26	2	0.80	0.35	2.13

1) r SO4-/ r cl- :

Les valeurs obtenues de ce rapport sont plus faibles que l'unité pour la majorité des points d'eau, ceci peut s'expliquer par la forte solubilité des chlorures par rapport aux ions sulfatés.

Extrêmement importante de **Cl-** sur l'ion bicarbonate dans la majorité des échantillons, cela est du à la dissolution des **Cl-** présents dans les lentilles de gypse ainsi qu'à l'influence des eaux de la Nappe de Erg occidental Pour les puits situés, on observe des fortes valeurs de ce rapport

3) r Cl+/r Na++ :

Les valeurs obtenues s'écartent de l'unité pour la quasi-totalité des puits, elles témoignent de l'origine commune de ces deux ions.

4) r Mg++/r Ca++ :

Les valeurs obtenues s'écartent peu de l'unité (la valeur1), sauf pour quelques points d'eau les ions **Mg** et **Ca** sont donc d'origine différente. Les teneurs élevées de **r Ca++** sont dues à la dissolution des sels contenus dans le gypse.

Les résultats des rapports caractéristiques chimiques confirment un écoulement lent des eaux de la nappe du grand erg occidental.

3.2.2.4. Evolution de l'hydrochimie de la nappe du grand erg occidental

Pour voir l'évolution de l'hydrochimie de la nappe, nous avons procédé à une compilation des données du chimisme des eaux de la Grande Source, sur un intervalle de 73 ans, en effet plusieurs analyses qui sont à notre possession remontent aux années 1963 et 2016 (Tableau, 5.8).

La série de données hydrochimiques recueillie est discontinue, mais elle s'avère très utile dans l'étude de l'évolution spatio-temporelle des constituants physico-chimiques, néanmoins elle permet de tracer des histogrammes d'évolution des paramètres physicochimique des eaux souterraines (Fig.5.11). Les eaux de la grande source, présentent une modeste évolution chimique, elles se caractérisent par un pH neutre et des teneurs en minéralisation très faible.

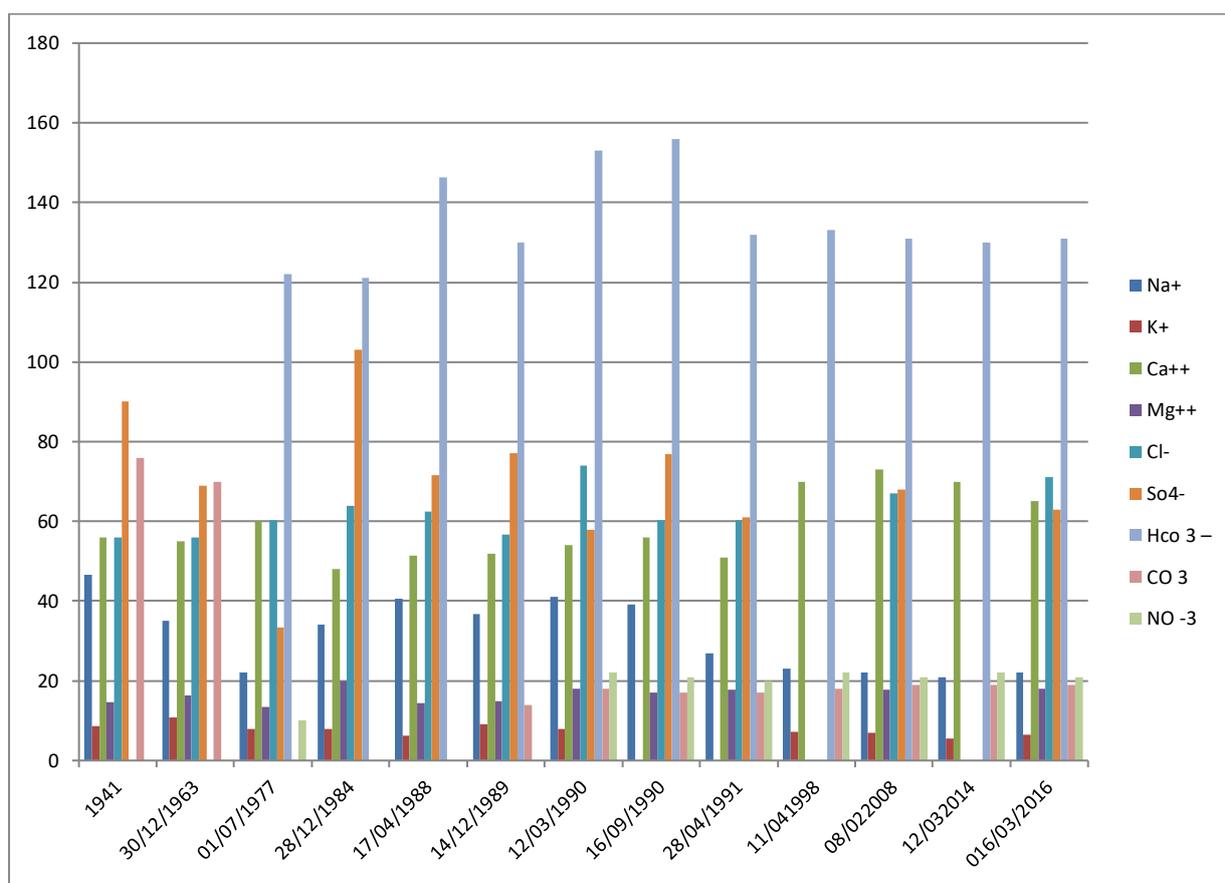


Figure 5.11 : L'évolution chimique des eaux de la Grande Source depuis 1941 jusqu'au 2016.

Tableau 5.8. Evolution et synthèse des paramètres physico-chimique des eaux de la Grande Source

Date	Na ⁺ mg/L	K ⁺ mg/l	Ca ⁺⁺ mg/l	Mg ⁺⁺ mg/l	Cl ⁻ mg/l	So4 ⁻ mg/l	Hco ₃ ⁻ mg/l	CO 3 mg/l	NO ₃ mg/l	T°C mg/l	PH	RS mg/l
1941	46.6	8.6	56	14.7	56	90	-	76	-	-	7.8	-
30/12/1963	35	10.8	55	16.4	56	69	-	70		26	7.7	350
avr-77	22	8	60	13.37	60.3	33.3	122	-	10			
28/12/1984	34	8	48	20	64	103	121	-	-	-	-	-
17/04/1988	40.6	6.22	51.4	14.5	62.4	71.6	146.4	-	-	25.2	7.8	637
14/12/1989	36.8	9	52	14.9	56.8	77	130	14	-	-	7.65	500
12/03/1990	41	8	54	18	74	58	153	18	22	26	7.8	480
16/09/1990	39.1	8.1	56	17.08	60.35	76.8	156	17	21	24	7.9	384
28/04/1991	26.91	7	51	17.69	60.35	61	132	17	20	26	7.6	234
11/04/1998	23	7.1	70	17.8	72	72	133	18	22	26	7.5	230
08/02/2008	22	6.9	73	17.68	67	68	131	19	21	27	7.6	350
avr-14	21	5.5	70	17	74	70	130	19	22	26	7.5	230
mars-16	22	6.5	65	18	71	63	131	19	21	27	7.7	322

3.2.2.5. Répartition spatiale des éléments chimiques

Les éléments chimiques (Ca^{+2} , Mg^{+2} , soulignent une augmentation du Nord vers le Suden **conformité avec l'écoulement souterrain** (Fig.5.12).En ce qui concerne les anions (Cl^- , K^+ , NO_3^-) et le résidu sec (RS), on constate **qu'ils inversent de polarité. Cependant, les teneurs en Nitrate** sont comprises entre 10 et 64 mg/l. De fortes valeurs ont été observées au niveau du puits pastorale HassiFokra et HassiLahmarasituées au centre du Grand Erg Occidental, dues aux activités agricoles intensives et en particulier l'enlevage de camelins, dans cet endroit dit (Tariat)).En contraire l'allure des valeurs faibles au niveau de la vallée de la Saoura. (Fig.5.12)

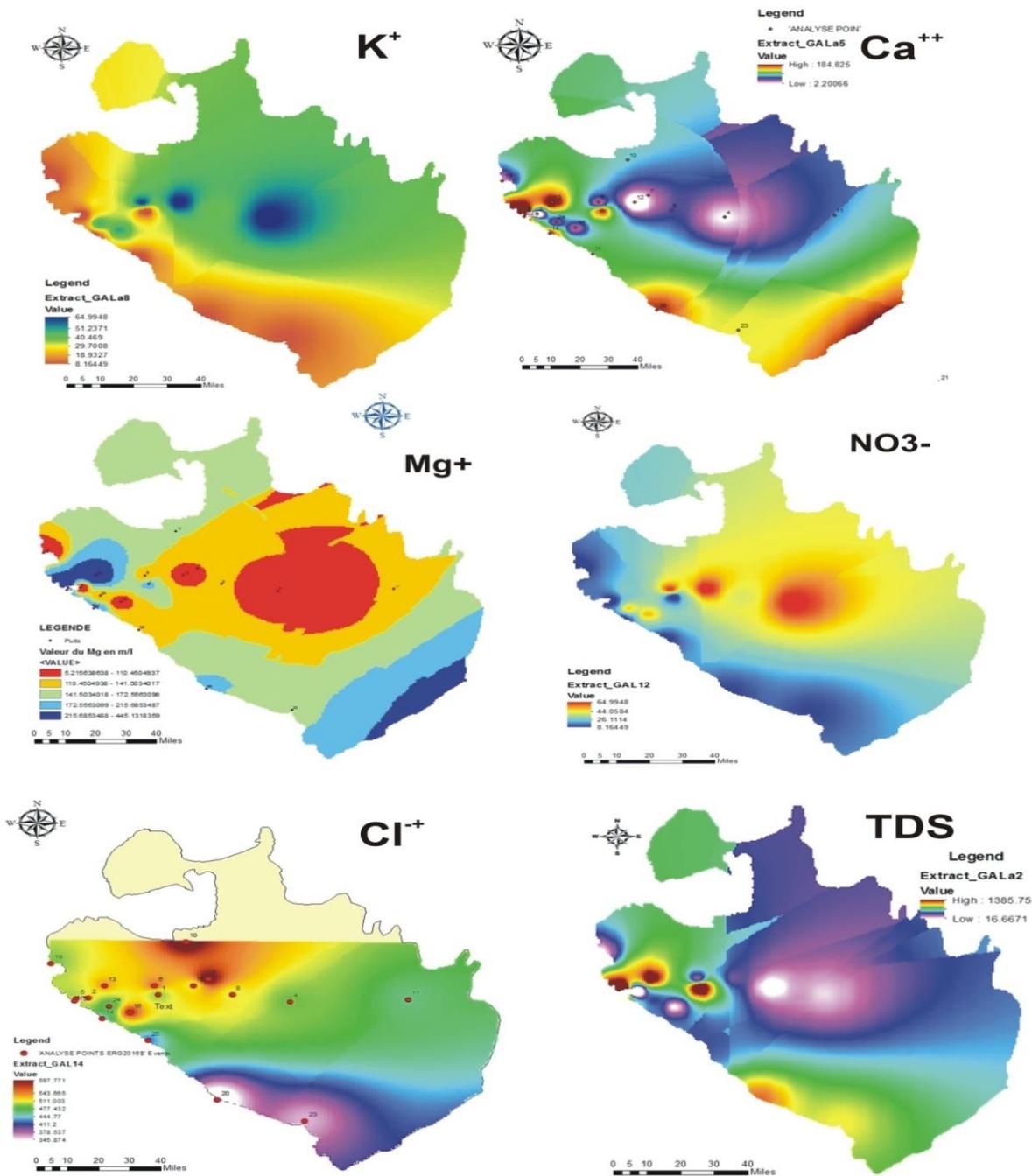


Figure 5.12 : Carte d'isoteneurs des eaux de la nappe de grand erg occidental

3.2.3. Nappe de la Hamada duGuir

Les prélèvements ont été effectués à des dates différentes, les analyses physicochimiques constituent cependant une preuve supplémentaire de l'existence d'une nappe hamadienne. Les analyses des prélèvements de décembre 1963 ont été effectuées par le Centre de recherches géodynamiques de Thonon-les-Bains, et celles de 2016 par l'ANRH (Tab.5.9). Le diagramme logarithmique montre l'appartenance des eaux au même groupe sulfaté sodique (Fig 5.13); celles de HassiZghilma et HassiBoulmane évoluant vers un faciès chloruré sodique à cause de leur passage dans le Quaternaire. Leur faciès chimique est différent de celui des autres eaux de la région, que ce soit celle de l'infero-flux de l'oued, celle de la nappe de l'Erg ou celle du Cambro-Silurien. Les eaux de Zguilma sont de qualité moyenne.

Les eaux de Boulmaneau niveau de la région d'Iglisont de mauvaise qualité (classification de H. Schoeller pour les pays arides). Notons que des nomades vivent plusieurs mois consécutifs près de ces puits et utilisent ces eaux dont la potabilité physico-chimique est médiocre ou mauvaise, tandis que la qualité biologique, non évaluée ici, doit être franchement mauvaise vu l'état de l'entretien des puits.

Tableau 5.9 : Evolution hydrochimique des eaux de la Hamada du Guir (les valeurs en mg/l)

Points	date	Ca	Mg	Na	K	Cl	So ₄	HCO ₃	Co3	TH	TAC	Min	pH	RS	NO ³⁻
HAMAGUIR F05	1964	194	110	463	-	548	641	-	124	-	-	1121	7.3	2112	55
	2016	105	88,	135,	3	172,	238,	293,	00	62,	24	1029	7,14	1010	00
HASSI SGHIR 01	1964	108	77	272	-	220	437	-	64	-	-	-	-	1390	111
	2016	-	-	400,	11	272,	700,	198,	00	0,00	16	1662	7,20	1630	14,4
HASSI ZGHILMA EL KEBIR	1964	116	57	256	-	208	400	64	00	-	-	-	7.4	-	111
	2016	92	77	220,	10	320,0	340,	214,	00	54,	18	1283,	7,01	1370	38
HASSI ZGHILMA ESSGHIR	1964	99	51	316	-	196	424	-	198	-	-	-	7.3	1410	55
	2016	207	91,	616,	19	428,	850,	296,	00	88,	24	2523	7,58	262,	00

Les formules caractéristiques des eaux de la Hamada duGuir ;

- Hi.Zguimasghir (1964) SO₄>CO₃>ClNa+K>Mg >Ca
- Hi.Zguimasghir (2016) SO₄>CO₃ >Cl Na+K> Ca > Mg
- Hi.Zguimakbir (1964) SO₄> Cl > CO₃ Na+K>Mg >Ca
- Hi.Zguimasghir (2016) SO₄>CO₃ >Cl Na+K> Ca > Mg

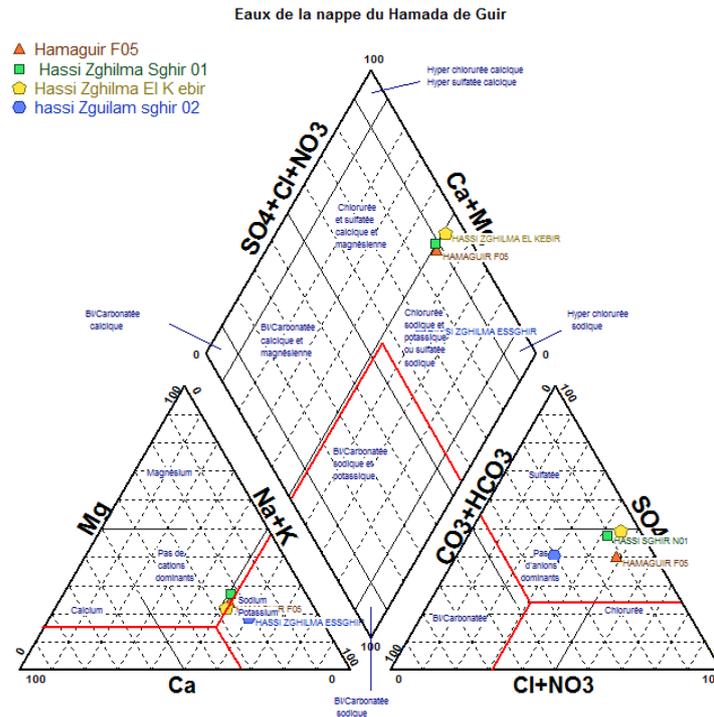


Figure 5.13: Diagramme de piper eaux de la nappe de la Hamada de Guir

Le diagramme de Schöeller a confirmé la potabilité des eaux de la nappe du Hamada de Guir présente une eau potable et de bonne qualité, nous nous référons au (Figure 5.9 et 5.10). Ce sont les eaux de puits ou sources issues de la nappe de l'Erg, creusés dans le Néogène ou la hamada ainsi que deux points d'eau de la Hamada du Guir (Z4: Zguilmasghir et Z5: Zguilma Lakbir) (Fig. 5.14 a et b).

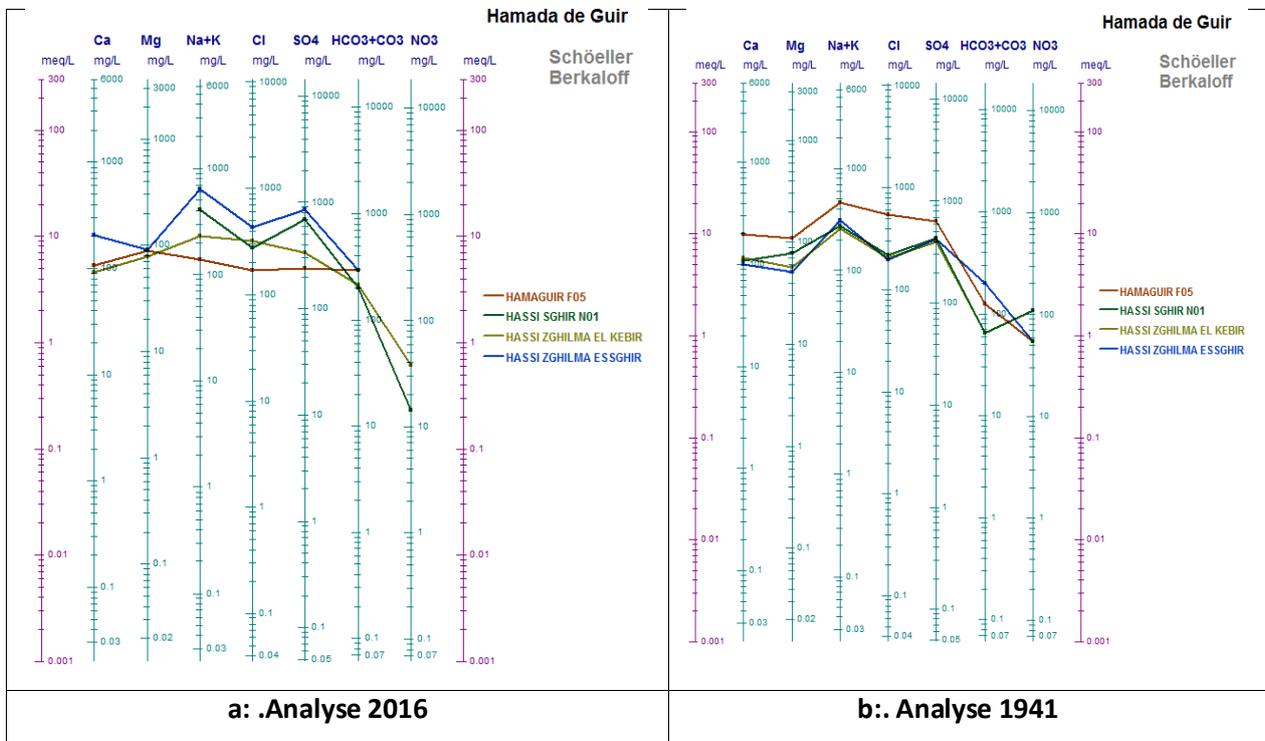


Figure 5.14 : Potabilité des eaux de la Hamada du Guir

3.2.4. Hydrochimie de la vallée de la Saoura

La majorité des points d'eau prélevés le long des oasis de la Saoura sont localisés à l'intérieur ou en bordure du Grand Erg Occidental (fig.5.15). A l'échelle de la vallée de la Saoura MERZOUGUI T en 1998 et Mebrouk 2007 a bien étudié leurs évolutions.

Nous avons représenté par ailleurs la température en fonction des profondeurs classées des eaux de la campagne réalisée en octobre-novembre 2002 (fig. 5.16).

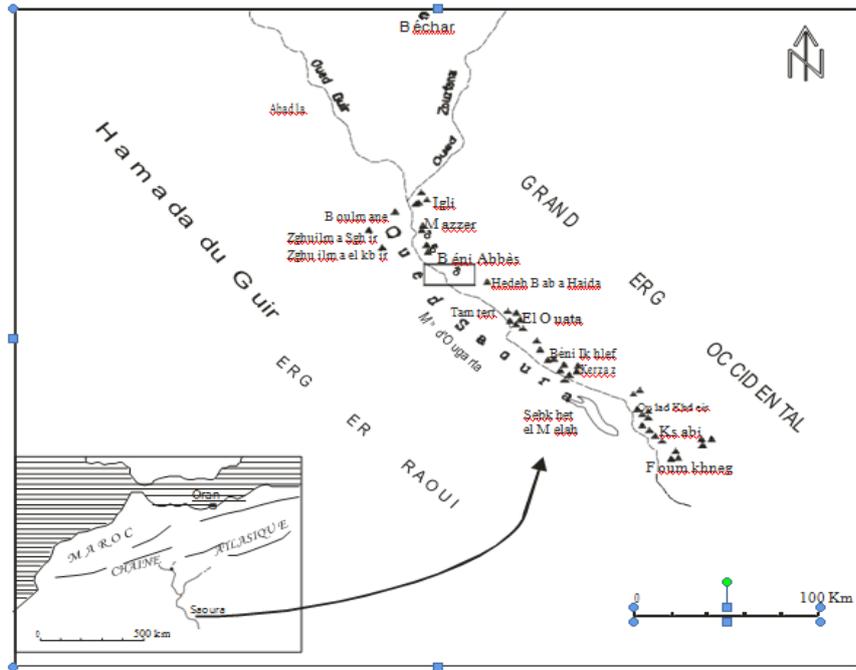
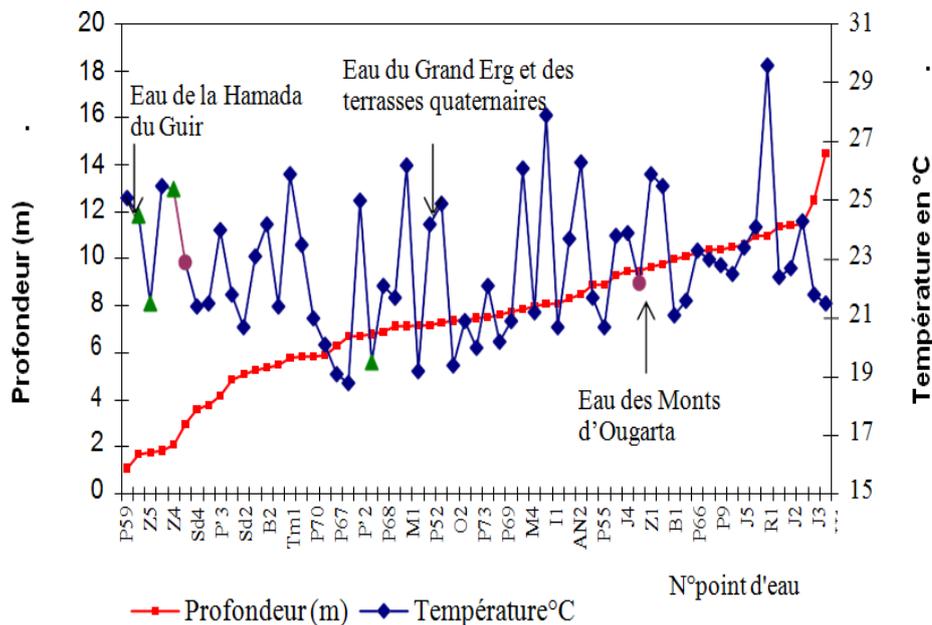


Figure 5.15 : Localisation des oasis de la vallée de la Saoura

La figure 5.14 représente la relation entre la température en fonction des profondeurs classées des eaux de la campagne réalisée en octobre-novembre 2002.

On peut observer que la température a tendance à baisser quand la profondeur augmente. Les eaux des

Figure 5.16 : Evolution des profondeurs classées et des températures des eaux de la Saoura



(Mebrouk, 2007)

Puits les moins profonds, notamment au niveau de la palmeraie de Béni- Abbès, ainsi que les puits ouverts, à grand diamètre, seraient les plus influencés par la température de l'air.

3.2.4.1. Evolution de la minéralisation le long de la vallée de la Saoura

A bien étudié l'évolution de la minéralisation à l'échelle de la vallée de la Saoura.

Sur la figure 5.17 a représenté l'évolution de la minéralisation de l'ensemble des eaux de la Saoura, d'amont (Igli) en aval (FoumLakhneg) sur une distance de 120 kilomètre. La répartition des points permet de différencier trois types d'eaux en fonction de leur conductivité. Un groupe représente les eaux de la nappe du Mio-Pliocène de l'erg, caractérisées par les plus faibles concentrations avec de faibles minéralisations, mais avec une légère augmentation à la basse de la Saoura. Un deuxième groupe intermédiaire représenté par les nappes des terrasses alluviales, et enfin un troisième groupe caractérise les eaux les plus minéralisées ($\sigma > 4$ ms/cm) correspondant aux eaux de l'inféro -flux de l'oued Saoura. (Mebrouk en 2005). L'évolution de la minéralisation de l'ensemble des eaux de la Saoura, d'amont (Igli) en aval (FoumLakhneg) est représenté sur la figure 5.17

La répartition des points permet de différencier trois types d'eaux en fonction de leur conductivité :

Le groupe 1 : caractérise les eaux les moins minéralisées, ce sont les eaux de la nappe du Grand Erg Occidental ($\sigma < 2$ ms/cm). Dans ce groupe, les plus faibles concentrations ont été mesurées à l'amont de la Saoura (haute Saoura), (la conductivité est de l'ordre de 0.5 ms/cm).. Au- delà, les eaux de l'Erg se chargent progressivement en s'approchant à la basse saoura jusqu'au de la Sebkhet el Melah où l'on atteint une valeur de 1.88 ms/cm à Hassi Abdellah (fig. 5.16)

Le groupe 2 : caractérise les eaux intermédiaires au niveau du centre de la haute Saoura Saoura (région de Béni Abb7s) ($2 < \sigma < 4$ ms/cm). Les puits appartenant à ce groupe sont généralement creusés dans les terrasses du Saourien (Pleistocène) et du Guirien (Holocène).

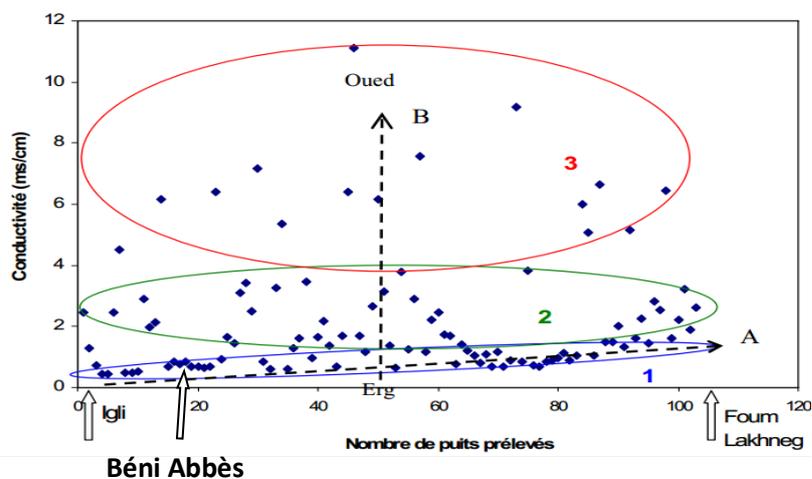


Figure.5.17: Evolution de la minéralisation des eaux du Nord au Sud de la Saoura (depuis Igli jusqu'au FoumLakhneg) (Mebrouk, 2005)

En plus de la différenciation des trois grands types d'eau en fonction de la minéralisation, deux grands

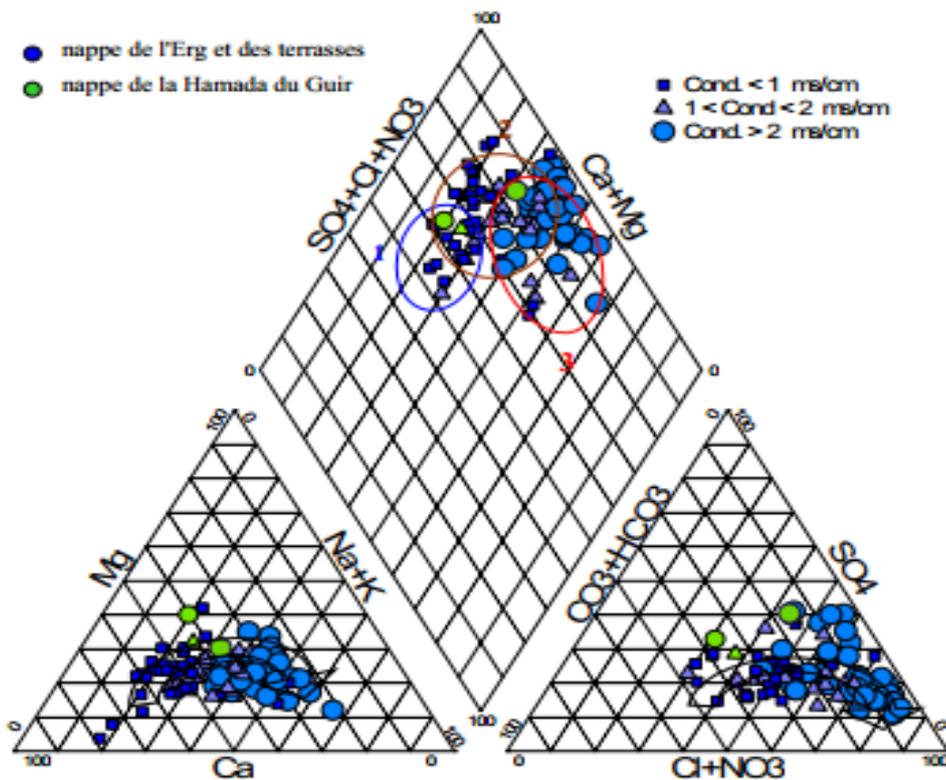
axes d'évolution peuvent être distingués :

- Un axe A : qui montre le sens d'évolution de la minéralisation des eaux de l'Erg, depuis l'amont vers l'aval (Fig.5.17)
- Un axe B : qui montre l'évolution de la minéralisation depuis l'Erg vers l'oued, ceci est le cas de toutes les palmeraies tout au long de la vallée de la Saoura

Dans la région de Béni Abbès, la minéralisation augmente du grand Erg Occidental vers l'oued. Ce scénario est presque le même pour les trois régions à Igli, Béni- Abbès et FomLakhneg

La représentation de l'ensemble des analyses sur le diagramme de Piper (Fig.5.17) a permis de bien mettre en évidence l'évolution des eaux de la Saoura. Les eaux évoluent globalement du faciès bicarbonaté calcique au faciès chloruré sodique, en passant par le faciès chloruré calcique qui représente en fait, le faciès intermédiaire, et qui englobe la majorité des points d'eau de la Saoura (Mebrouk, 2005). Elles appartiennent à la famille d'eaux bicarbonatées à sulfatées ou chlorurées calciques.

On a : $r\text{HCO}_3 > r\text{Cl} > r\text{SO}_4$ et $r\text{Ca} > r(\text{Na}+\text{K}) > r\text{Mg}$
 ou $r\text{HCO}_3 > r\text{SO}_4 > r\text{Cl}$ et $r\text{Ca} > r(\text{Na}+\text{K}) > r\text{Mg}$



Figure

5.18: Evolution du faciès chimique des eaux de la vallée de la Saoura.

(Mebrouk 2005)

La teneur totale en sels dissous (TDS), exprimée en mg/l a été estimée par le calcul, pour la période 1964, à partir des résultats des analyses chimiques réalisées par Roche (1964), en utilisant le logiciel

Diagramme (Simler, 2002). Malgré une augmentation systématique, les histogrammes de la figure ci-dessous nous permettent de constater qu'en 40 ans, les eaux de la nappe de l'Erg ont une composition relativement stable. Les variations observées pourraient être dues aux variations saisonnières ou aux erreurs dues aux méthodes d'analyses, pas très précises, utilisées dans les années 60. L'écart est toutefois remarquable pour la foggara "CNRS" du Centre de Recherche sur les Zones Arides de Béni-Abbès (CRZA, ex. CNRS). Ceci pourrait tout simplement être dû à l'état d'entretien de la foggara.

Le puits de HassiRokna (R1), puits creusé dans les sédiments néogènes au fond du Golfe de Béni-Abbès, où le faciès de l'eau est passé de bicarbonaté sodique en 1964 à chloruré sodique en 2004 (Mebrouk, 2007). Par ailleurs, les eaux de la Hamada du Guir (Z4 et Z5) présentent une dispersion assez nette entre les deux périodes (Fig.5.19). Ceci est probablement dû aux phénomènes d'évaporation très intenses sur la Hamada et, par conséquent, à la concentration de sels, notamment à partir des paléodaïas parsemant la Hamada.

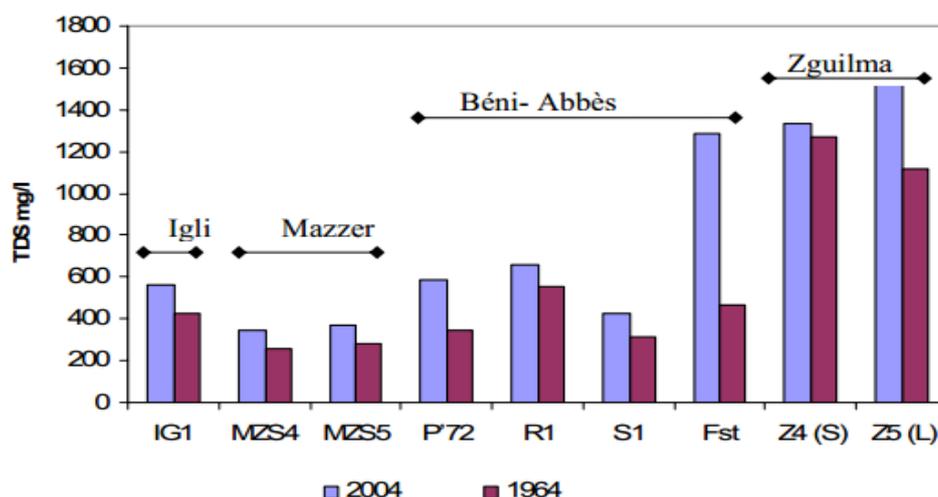


Figure 5.19: Histogramme de la TDS des eaux de Mio-Pliocène et de la Hamada du Guir en 1964 et 2004 (Mebrouk, 2007)

3.2.4.2. Mécanismes et origines de la minéralisation des eaux souterraines

Plusieurs processus naturels et anthropiques peuvent changer la qualité des eaux souterraines au cours de leur transit dans les systèmes hydrogéologiques. Interactions entre les eaux et les roches encaissantes, l'évaporation et l'utilisation des matières chimiques (engrais chimiques, pesticides et insecticides) sont les principaux facteurs responsables de la minéralisation des eaux souterraines.

Pour mettre en évidence les mécanismes et les origines de la minéralisation des eaux souterraines dans le système aquifère de la région de Béni Abbès, nous avons utilisé le programme Wateq (Plummer et al. (1984, Jones et al. 1976). Ce logiciel permet de calculer plusieurs paramètres thermodynamiques tels que la pression partielle de CO₂ (qui exprime

l'activité de ce gaz), la force ionique et les indices de saturation de l'eau vis-à-vis des minéraux.

3.2.4.2.1. Indice de Saturation (Is)

En utilisant conjointement les programmes informatiques de modélisation géochimique des eaux "Phreeq" et "Aqua", nous avons essayé d'étudier l'évolution de l'état thermodynamique du milieu aquifère par rapport à ses minéraux acquis dans l'eau.

Ces programmes nous ont permis de calculer les produits d'activité ionique (PAI), les indices de saturation vis-à-vis de certains minéraux et la pression partielle du CO₂ (pCO₂). Ils nous ont permis également de déterminer l'état d'équilibre ou de déséquilibre de ces minéraux. Les constantes thermodynamiques utilisées sont celles compilées par Plummer et al. (1984).

L'Indice de saturation (Is) est un paramètre très important dans l'étude des équilibres eau-minéraux. Il est déterminé par la formule suivante (Plummer et al., 1984) :

$$Is = \text{Log} (PAI / Ks)$$

Tels que :

PAI : le produit d'activité ionique des ions concernés.

Ks : la constante d'équilibre.

La valeur zéro de cet indice indique que l'eau est en équilibre avec le minéral. Lorsque (Is) est inférieur ou supérieur à zéro, l'eau est, dans ce cas, sous-saturée ou sursaturée vis-à-vis du minéral.

- Is < 0, L'eau est sous-saturée.
- Is > 0, L'eau est sursaturée.
- Is = 0, L'eau est en équilibre.

3.2.4.2.2 Saturation des eaux souterraines vis-à-vis de certains minéraux

Les indices de saturation (Is) calculés par le programme Wateq sont représentés dans la (figure 5.18). Plusieurs minéraux sont liés à la minéralisation des eaux souterraines des systèmes aquifères de la région de Béni-Abbès tels que la calcite (CaCO₃), l'aragonite (CaCO₃), la dolomite (Ca, Mg(CO₃)₂) ; (minéraux carbonatés), l'anhydrite (CaSO₄) et le gypse (CaSO₄ · 2H₂O ; (minéraux sulfatés).

a)- Saturation vis-à-vis des minéraux carbonatés

Les minéraux carbonatés, proviennent essentiellement de la dissolution des roches carbonatées (calcite, aragonite et dolomite). Cette dissolution devient très importante en présence de gaz carbonique dessous dans les eaux.

La saturation des eaux souterraines du système aquifère de la région de Béni Abbès vis-à-vis de ces minéraux varie d'un aquifère à l'autre et d'une région à l'autre. Les eaux des nappes de la région sont en équilibre à sous-saturées et sursaturées avec l'aragonite, la calcite et la dolomite. Dans les nappes du Quaternaire et Grand Erg Occidental, (figure 5.20) La sous-saturation vis-à-vis

d'un tel minéral peut contribuer à sa dissolution dans l'eau amenant à une augmentation de la charge saline en sa présence. L'état d'équilibre ou de sursaturation entraîne, par contre une éventuelle précipitation du minéral.

b)- Saturation vis-à-vis des minéraux sulfatés

Les minéraux sulfatés entraînant la minéralisation des eaux souterraines sont, généralement, le gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) et l'anhydrite (CaSO_4). Les indices de saturation vis-à-vis des minéraux sulfatés, montrent une sous-saturation généralisée des eaux dans la majorité du système aquifère de la région de Béni-Abbès.

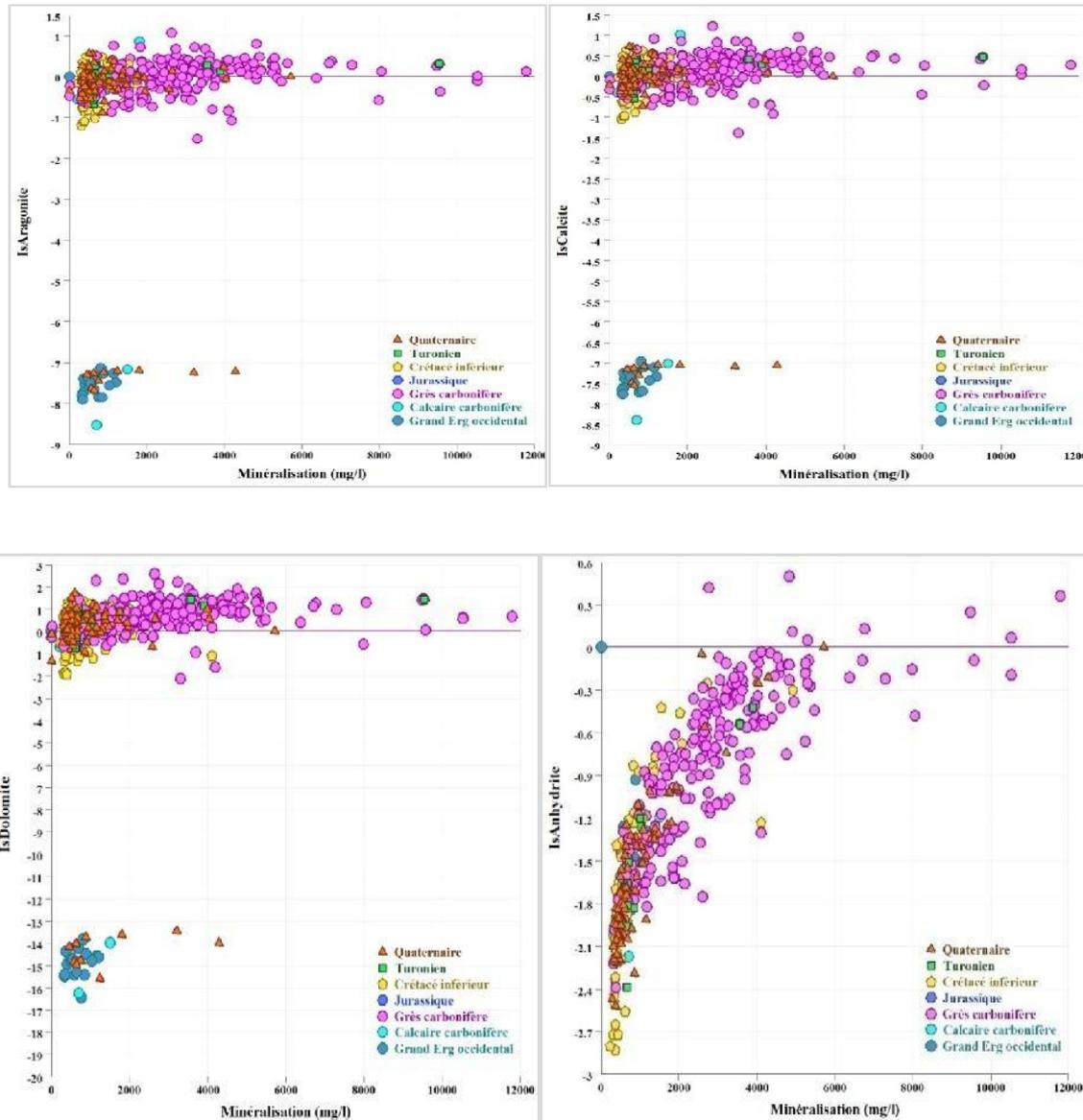


Figure 5.20 : Saturation des eaux des nappes vis-à-vis de certains minéraux (Mebrouk, 2006)

3.4.2.3 Origine de la minéralisation

Afin de mettre en évidence l'origine de la minéralisation des eaux souterraines des du système aquifère de la région de Béni Abbas, nous avons établi les relations entre la minéralisation des

eaux et les éléments chimiques majeurs (Cl^- , Mg^{2+} , Na^+ , Ca^{2+} , SO_4^{2-} et HCO_3^-) (Figure 5.21). Ces relations ont permis de remonter à l'origine de la minéralisation des eaux des aquifères de la région de Béni-Abbes.

Les relations entre ces éléments et la minéralisation montrent une corrélation positive entre eux. D'une façon générale, la corrélation Cation-Minéralisation (figure 5.21), montrent des fortes liaisons avec le sodium et le magnésium, puis en deuxième lieu avec le calcium. La répartition de ces cations entre les aquifères montre une richesse en sodium, magnésium et le calcium dans la majorité des aquifères de la région de Béni-Abbes.

Quant aux anions, les corrélations avec la minéralisation montrent que cette dernière est très bien corrélée avec l'ion chlorure. La corrélation est moins importante avec les bicarbonates presque pour tous les aquifères de la région d'étude.

a)- Relation Na^+/Cl^- , $\text{SO}_4^{2-}/\text{Ca}^{2+}$, $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$, $\text{SO}_4^{2-}/\text{Mg}^{2+}$

L'acquisition des teneurs de Na^+ en fonction de Cl^- dans les eaux naturelles est souvent liée à la dissolution de l'halite. Ceci est corroboré par la présentation graphique de ces deux ions Cl^-/Na^+ (Fehdi *et al.* 2009 ; Kamel *et al.* 2010 ; Farid *et al.* 2012) (figure 124). La majorité des points du système aquifère de la région de Béni-Abbesse regroupe autour de la droite, influencée par la dissolution de l'halite et/ou de l'anhydrite. Ceci est confirmé par une forte corrélation positive entre les chlorures et le sodium, affichant un coefficient de détermination ($R^2 = 0,92$). La corrélation SO_4^{2-} en fonction de Ca^{2+} (figure 5.21) indique la dissolution minérale sulfatée, notamment, le gypse et l'anhydrite. Cette relation montre que tout le système aquifère de la région de Béni-Abbes est soumis à l'effet de l'enrichissement des ions Ca^{2+} par rapport aux ions SO_4^{2-} , à l'exception de la nappe du grès Carbonifère (figure 5.20). De plus, cet enrichissement de Ca^{2+} accompagné par un déficit en Na^+ indique la participation de ces deux ions dans l'échange de base avec les minéraux argileux. Les argiles libèrent les ions Ca^{2+} ou Mg^{2+} et fixent les ions Na^+ ou K^+ suivant un processus qui peut être réversible (Fehdi *et al.* 2009). Pour mettre en évidence la dissolution de ce minéral, on a étudié les deux rapports $\text{SO}_4^{2-}/\text{Mg}^{2+}$ et $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ (figure 124) qui montrent une forte corrélation presque pour tout le système aquifère avec un excès des ions SO_4^{2-} par rapport aux ions Mg^{2+} et Ca^{2+} .

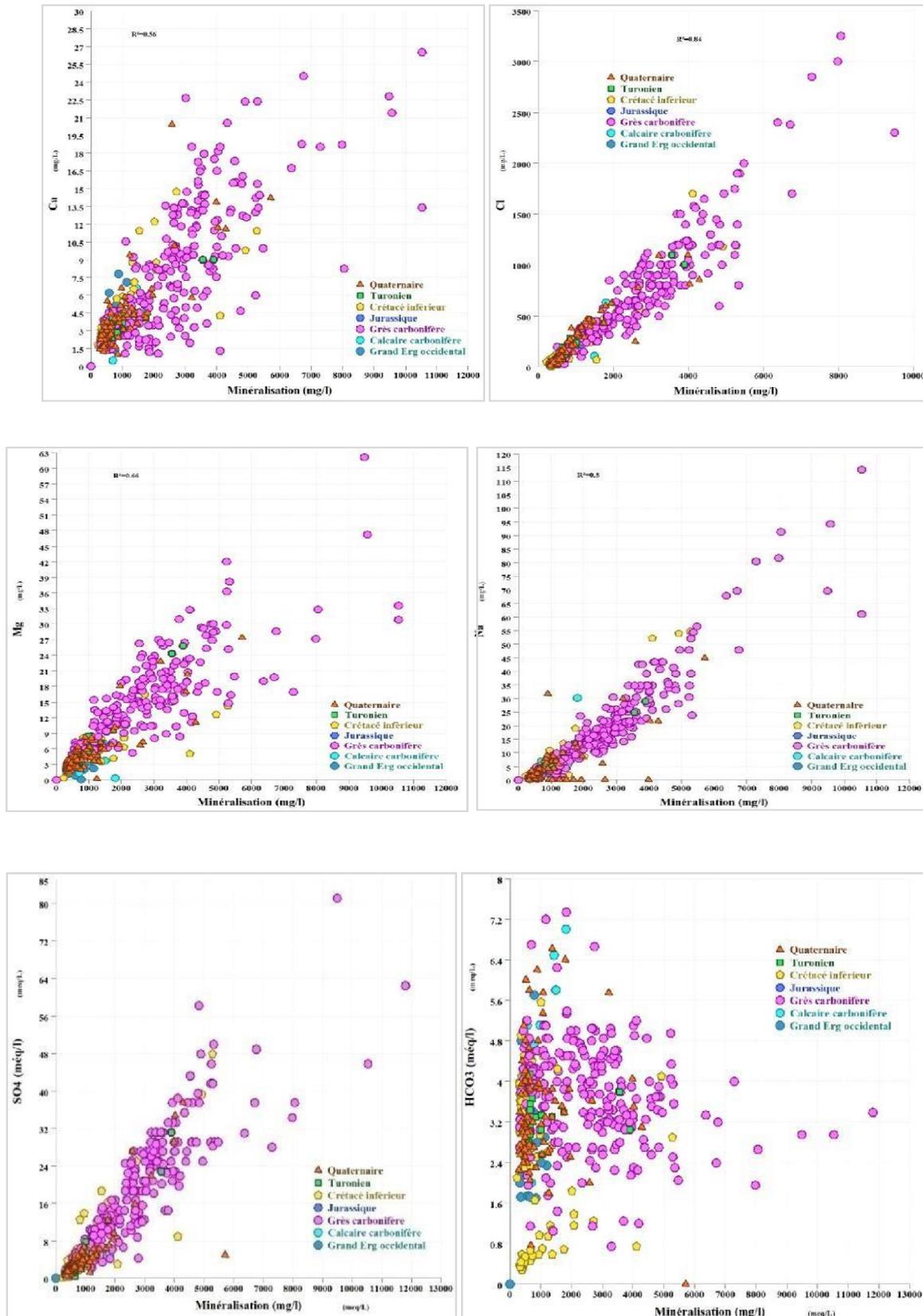


Figure 5.21 : Variation des concentrations des éléments majeurs en fonction de la minéralisation(Mebrouk, 2006)

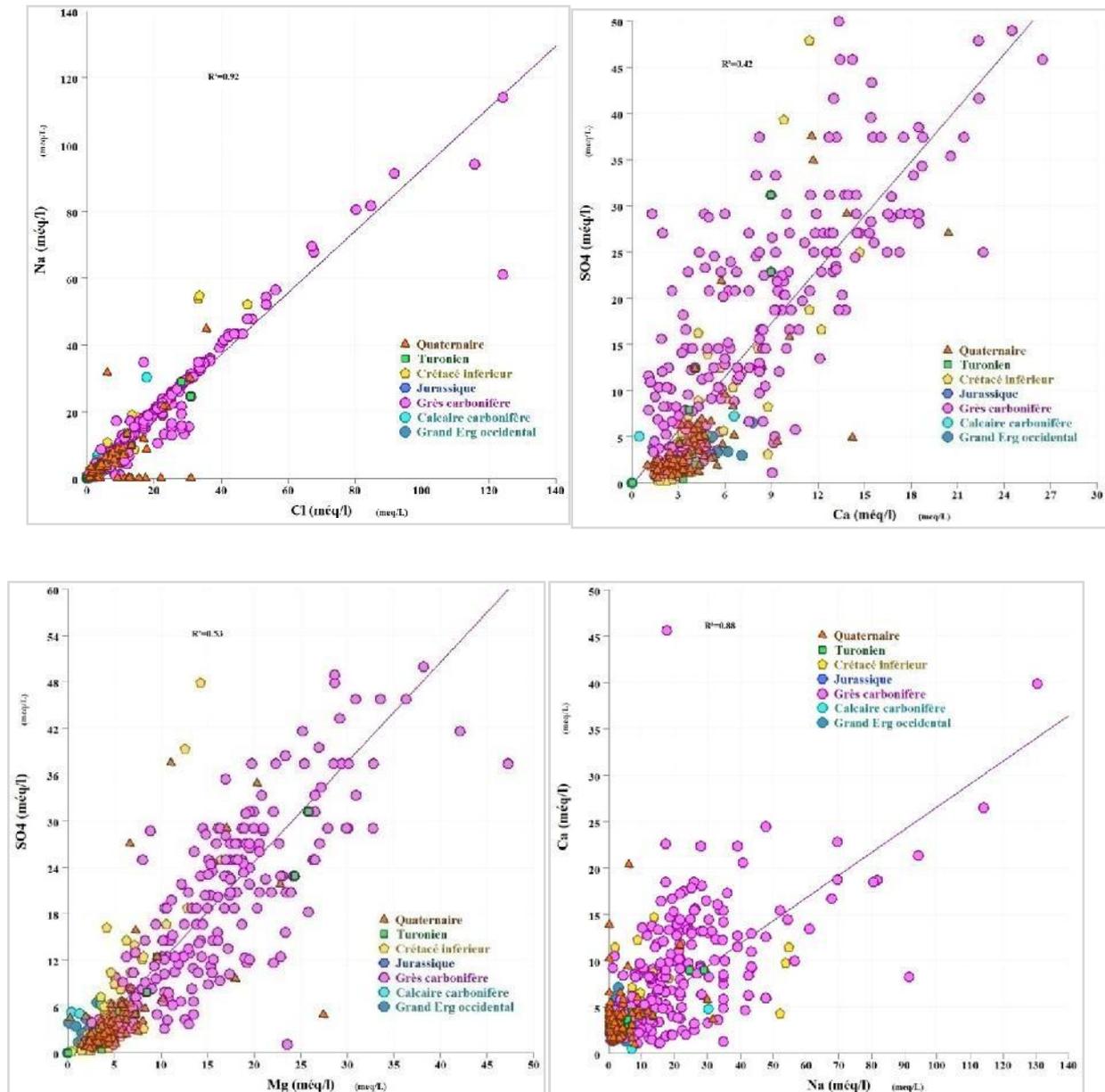


Figure 5.22 : Relation entre les éléments chimiques majeurs (Mebrouk, 2006)

b)- Échanges ioniques de base

De nombreuses substances naturelles telles que les argiles ou certaines matières organiques renferment dans leurs structures des sites cristallographiques qui peuvent être occupés par d'autres ions à la faveur d'un processus d'échange. Les argiles et les colloïdes organiques jouent un rôle très important dans la protection naturelle et l'évolution du chimisme des eaux souterraines. L'échange ionique se traduit par le fait que certains ions de ces substances sont remplacés, partiellement ou totalement, par des ions de même nature (anions ou cations) d'une façon réversible.

Dans le cas des aquifères de la région de Béni-Abbès, ces échanges de bases s'effectuent essentiellement avec les colloïdes et les minéraux argileux riches en Na^+ et K^+ . Ces minéraux fixent les cations de Na^+ et libèrent les cations de Ca^{2+} et Mg^{2+} (Mebrouk 2007). Un autre type de phénomène

d'échanges de base est observé dans les eaux de l'aquifère du Crétacé inférieur et ainsi que dans quelques points d'eau captant l'aquifère des calcaires carbonifères et grès carbonifères, où les ions Na^+ + K^+ sont libérés et sont remplacés par les ions de Ca^{2+} + Mg^{2+} (fig.5.23).

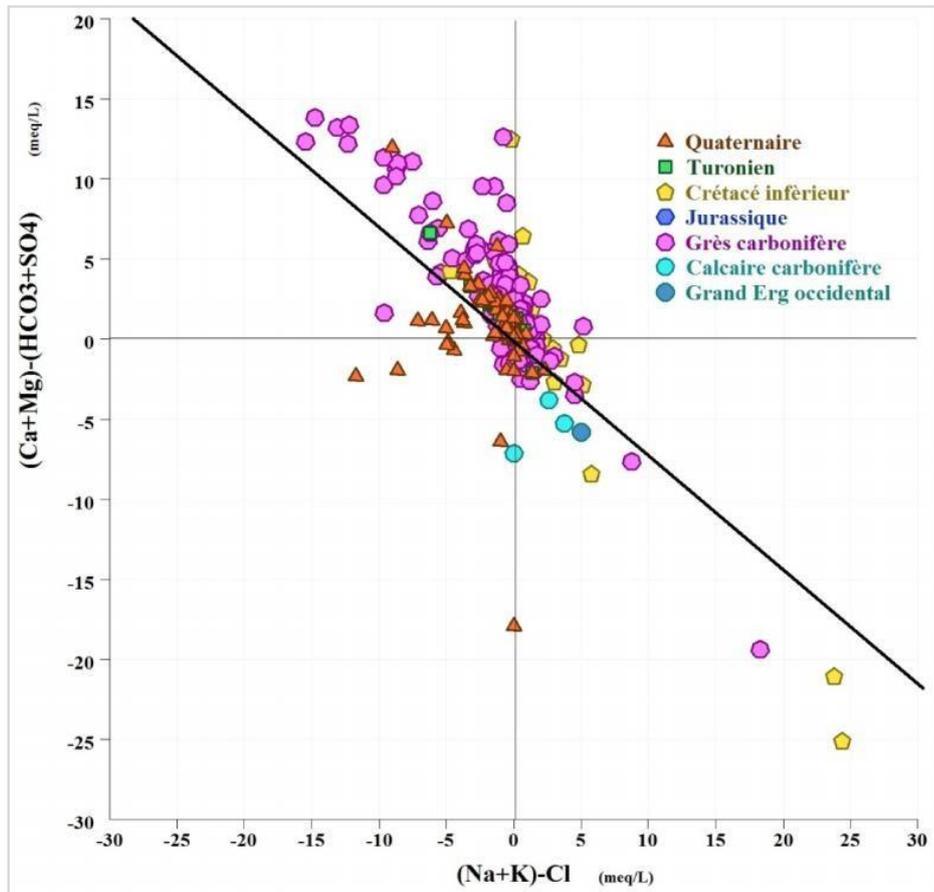


Figure 5.23 : Mise en évidence des échanges de bases avec les minéraux argileux (Mebrouk, 2006)

4. Hydrochimie du système aquifère de Béni -Abbés

Pour réaliser l'étude physico-chimique des eaux de la région d'étude et pour cerner l'information sur la qualité des eaux au niveau du système aquifère de la région d'étude (Béni Abbés), Des prélèvements d'échantillonnage et analyses d'eaux ont été effectuées sur une vingt-cinq de points d'eaux sont bien répartie sur les plateaux de la ville et les sur les terrasses alluviales durant l'année 20016(Fig.5.24).Les résultats des analyses physico-chimiques obtenus sont synthétisés sur le Tableau

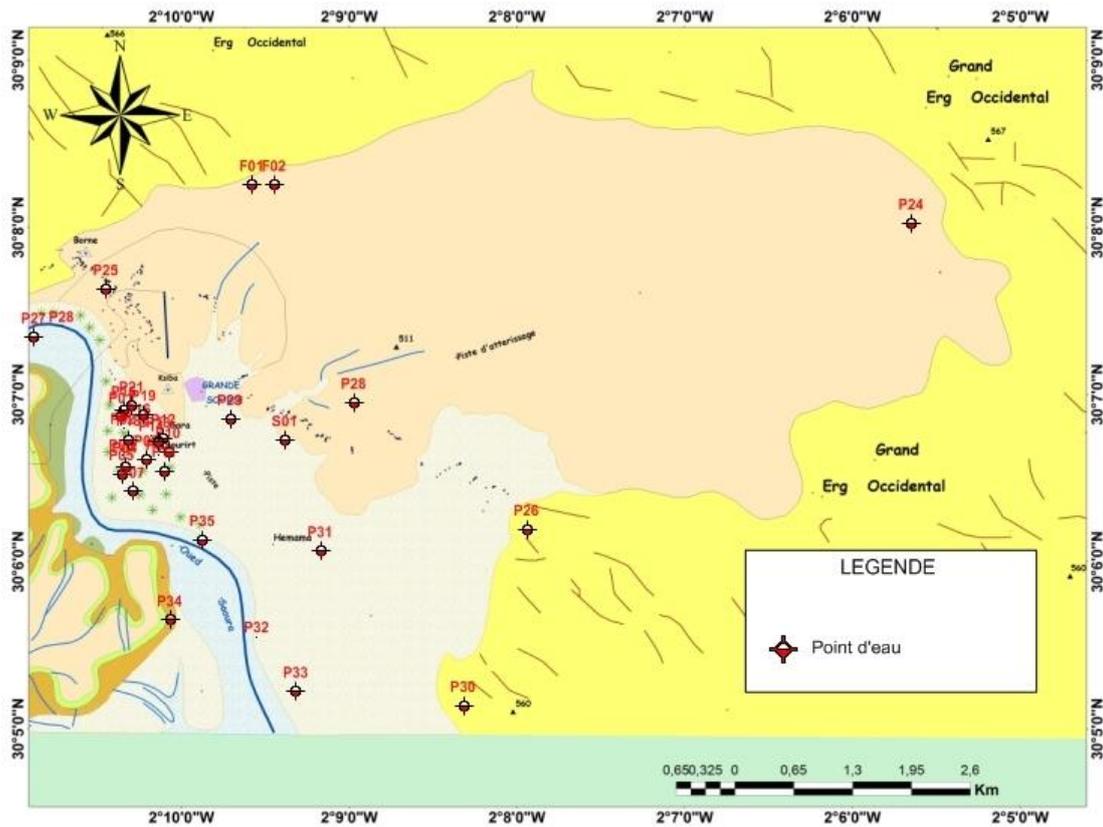


Figure 5.24: Localisation des points d’eau du système aquifère de la région de Béni-Abbès.

4.1. Paramètres physiques

4.1.1. La température

La température moyenne des eaux de la Saoura varie entre 22 et 24 °C (tableau 5.10). Elle augmente au fur et à mesure que l’on avance vers la saison sèche. Elle est supérieure à celle de l’air, calculée sur la période étudiée (1961-2016) pour la saison d'été, et inférieure à la saison d'hiver. L’écart est très marqué à la fin de l’hiver (Janvier).

Tableau 5.10 : Températures moyennes des eaux de la Saoura

Température en °C	10/04/2015	11/06/2015	15/10/2015	15/09/2015	15/11/2015	01/12/2016
T. moy. eau	22	23	24	23	21	22
T. moy air (1973-2016)	21.	32.8	23	30..9	17	19

Nous avons représenté par ailleurs la température en fonction des profondeurs classées des eaux de la campagne 2015-2016 réalisée sur 12 mois. On peut observer que la température a tendance à baisser quand la profondeur augmente. Les eaux des puits les moins profonds, notamment au niveau de la palmeraie de Béni- Abbès, que les puits ouverts, à grand diamètre, seraient les plus influencés par la température de l’air (Tableau 5.11.).

Tableau 5.11 : Evolution de la température en fonction de la profondeur dans la région de Béni-Abbès (Campagne -2015-2016)

N°	NOM	10/04/2015		11/06/2015		11/07/2015		15/09/2015		15/10/2015		15/11/2015		12/12/2015		03/01/2016	
		Prof	T°	Prof.(m)	T°c	Prof. (m)	T°c	Prof.(m)	T°c								
P01	OUED	3	19	3	24	3	27	3	22	/	/	2	15	3	11	3	10
P02	PIEZOMETRE	6	19	6	23	7	25	7	24	6	22	6	19	6	16	6	15
P03	BENAISSA OBID	2	19	3	23	3	24	/		3	21	2	16	3	13	3	12
P04	MANSORI	5	21	5	22	5	23	6	23	6	22	5	20	5	20	5	19
P05	OTHMANI	5	21	6	22	6	24	6	24	6	21	5	19	5	17	5	16
P06	OKHTAR	6	20	6	22	6	23	8	23	6	22	6	21	7	20	5	19
P07	HMAN DRIS	10	20	7	22	6	23	9	23	7	23	7	19	7	17	6	16
P08	BENALLAL B	9	22	8	23	9	28	8	23	9	22	8	21	7	16	8	17
P9	BENDJABOUR	6	/	6	21	8	22	6	23	6	22	6	20	6	18	6	18
P10	BENALLAL A	10	23	10	23	11	24	6	24	8	23	7	22	7	22	7	21
P11	BENMOULOUD	7	24	7	23	7	23	6	24	6	23	6	22	7	22	6	19
P12	TAIBI MED	8	13	7	23	8	24	7	25	6	26	6	21	7	21	6	19
P13	FDILA	3	22	4	22	5	25	5	23	4	22	3	21	3	20	3	20
P14	BANI	6	20	6	22	7	26	7	23	6	22	6	18	6	16	6	15
P15	OTAMANI AEK	4	20	5	24	4	26	5	24	5	22	5	20	4	22	4	16
P16	BOUANINI M	4	23	5	24	5	25	5	25	4	24	4	22	5	20	4	17
P17	MANSORI KSAR	5	23	5	23	6	24	5	24	5	22	5	20	3	19	3	18
P18	MERZOUGUI M	5	22	6	24	8	26	7	24	5	24	6	23	5	20	50	20
P19	CHADLI	7	20	8	23	8	24	6	23	7	22	6	19	6	17	6	17
P20	BENAISSA BELK	6	22	7	23	7	25	7	25	4	24	6	22	6	19	6	18
P21	KEBIR NADJIB	8	24	7	25	8	26	6	25	6	23	6	20	7	20	7	18
Ecart type		2	3	2	1	2	2	1	1	1	1	2	2	2	3	10	3

Moyenne	6	21	6	23	6	25	6	24	6	23	5	20	5	18	7	17
Min	2	13	3	21	3	22	3	22	3	21	2	15	3	11	3	10
Max	10	24	10	25	11	28	9	25	9	26	8	23	7	22	50	21

4.1.2 Le pH

L'ensemble des points d'eau présente des valeurs de PH qui varient entre 6.8 et 7.9 valeurs qui traduisent le caractère alcalin des eaux de la nappe phréatique, donc ils sont dans la norme de potabilité.

4.1.3 La conductivité

Pour l'ensemble des échantillons, la conductivité est comprise entre 0,5 et 12ms/cm. Les eaux les plus proches de l'erg occidental prennent des valeurs de conductivité plus faibles par rapport à celles situées à proximité de l'oued Saoura. On remarque au niveau des terrasses alluviales dans la palmeraie de grandes valeurs atteintes jusqu'à la valeur 15 ms/cm, donc ces variations dépendent du phénomène d'évaporation qui concentre ces sels dans l'eau et éventuellement suivant le substrat géologique traversé.

4.1.4 Le résidu sec

Pour l'ensemble des échantillons, le résidu sec est comprise entre 350 et 9245 mg/ l. Les eaux les plus proches de l'erg occidental prennent des valeurs de résidu sec plus faibles par rapport à celles situées à proximité de l'oued Saoura (fig.5.25).

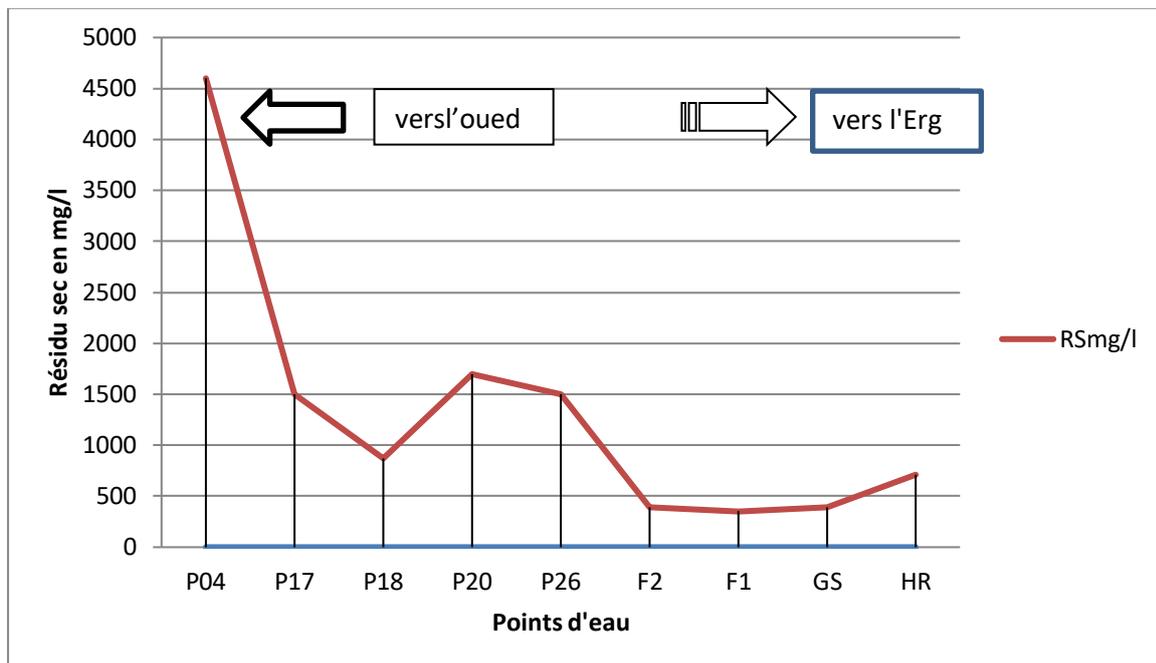


Figure 5.25 : Profil d'évolution du Résidu sec de l'Erg vers l'Oued Saoura.

Les valeurs du résidu sec des eaux de la nappe s'échelonnent entre 850 et 9245 mg /L, lorsque celles de la minéralisation varient de 861 à 9467 mg/ L.

La concentration croit globalement du talus hamadien jusqu'à l'oued. Avec des concentrations qui dépasse pas les 1 g/l, dans la partie ouest de la palmeraie pour atteindre 15mg /l (MERZOUGUI 2007)

Les eaux d'AEP du seul forage près de la piscine qui alimente la ville présente une minéralisation de 1620 mg/l selon la campagne d'analyse effectuée en Avril 2016.

Trente-cinq(35)mesures de résidu sec et de la minéralisation, que nous avons effectué en Avril 2016, ont permis de tracer la carte d'égal valeurs en sels de la palmeraie de Béni Abbés (Fig.5.26).

Les résultats des analyses obtenues montrent que :

- 13 % des points d'eaux présentent une minéralisation inférieure à 600 mg/l. (très bonne qualité physico-chimique)
- 31% des points d'eaux présentent une minéralisation qui se situé entre 600 et 1200 mg/L. (bonne qualité physico-chimique)
- 11 % des points d'eaux présentent une minéralisation comprise entre 1200 mg/L et 2000 mg/L. (qualité physico-chimique médiocre)
- 42 % des points d'eaux donnent une minéralisation supérieure à 2000 mg/l. (qualité physico-chimique mauvaise).

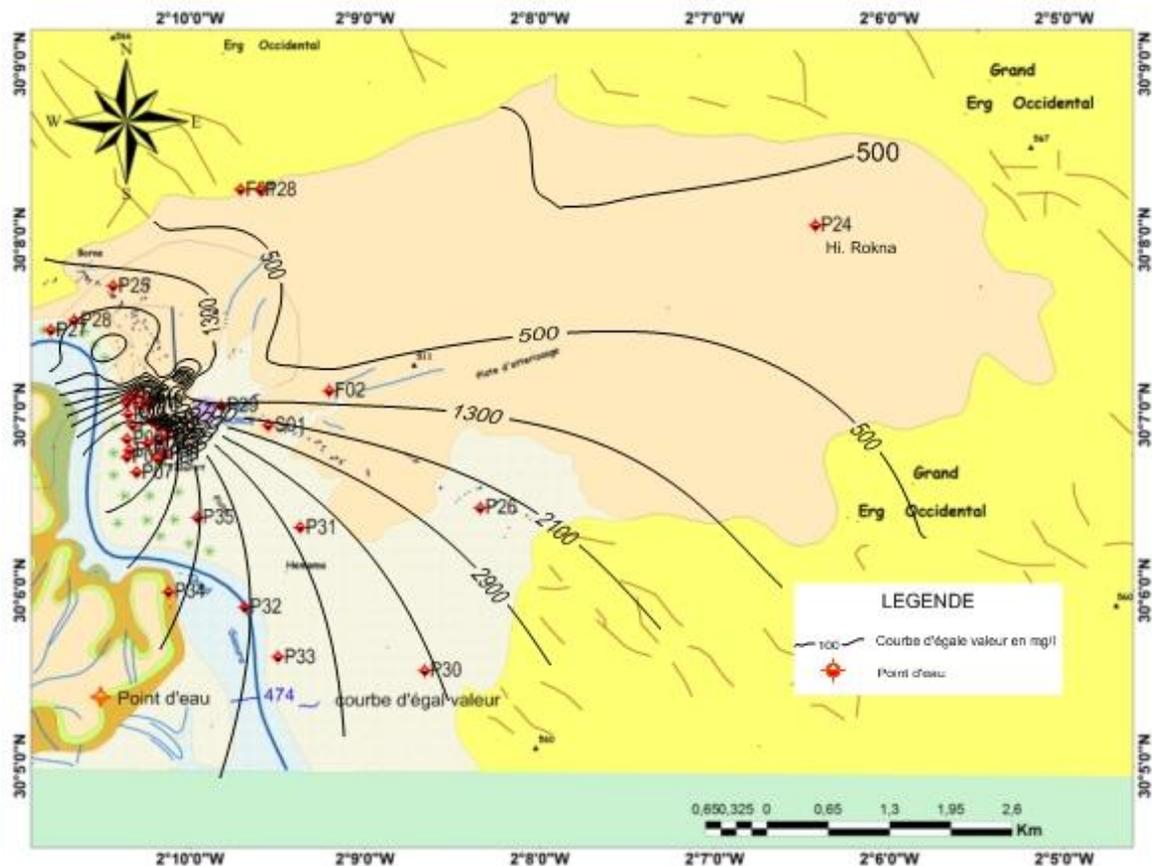


Figure 5.26 : Carte d'isoteneurs des eaux résidu sec.

4.2. Paramètres chimiques

Les résultats des analyses physico-chimiques des prélèvements sont consignés en Tableau5.12 :

Tableau 5.12 : Caractéristiques hydro chimiques des eaux u système aquifère à Béni -Abbès

N°	Nom du puits	X (m E)	Y (m E)	ph	cd ms/cm	RSmg/l	Ca++mg/l	Mg++mg/l	Na+mg/l	K+mg/l	Cl- mg/l	SO4-- mg/l	NO3- mg/l	HCO3- mg/l	MINmg/l
F01	Forage 01	580711	3334830	7.65	0.538	350	46	13	40	2.7	60	70	17	125	700
F02	Forage 02	580921	3334830	7.65	0.538	350	46	13	40	2.7	60	70	17	125	374
P01	OUED	579472	3332816	7.04	7.19	1680	206	97	540	40	840	680	80	256	4458
P02	PIEZOMETRE	579489	3332713	7.54	12.34	7620	430	336	1800	70	300	1300	40	470	7651
P03	PUIT Piscine	579826	3332485	7.54	12.34	7620	430	336	1800	70	3000	1300	0	470	7651
P04	MANSORI	579506	3332382	6.89	5.68	3600	73	312	650	34	1040	1000	18	439	3522
P05	OTHMANI	579474	3332318	6.89	5.68	3600	73	312	650	34	1040	1000	18	439	3522
P06	INCONU	579476	3332485	6.8	15.27	9245	516	659	1800	26	2850	3000	55	476	9467
P07	HMAN	579578	3332166	7.33	1.82	1150	86	94	140	19.5	230	250	20	317	1128
P08	BENALLAL B	579711	3332442	7.29	2.18	1370	112	97	170	33	285	270	27.5	360	1352
P10	BENALLAL A	579918	3332510	7.19	1.54	960	138	56	97	10.5	165	220	25	308	955
P11	BENMOULOU	579882	3332346	7.33	1.82	1150	86	94	140	19.5	230	250	20	317	1128
P12	TAIBI	579871	3332626	7.56	1.29	850	99	56	90	6	140	190	45	265	800
P13	MOULOUDI	579824	3332600	7.22	1.62	1000	77	91	130	7	210	220	22	314	1004
P14	BANI	579756	3332651	7.06	12.12	7640	667	363	1300	57	2000	2800	56	332	7514
P15	BENAISSA	579495	3332872	7.91	2.6	1700	202	62	80	233	370	460	150	253	1612
P16	BOUANINI	579636	3332797	7.09	15.83	8050	473	632	2300	70	900	1500	53	305	9815
P18	MERZOUGUI	579542	3332617	7.29	1.39	870	109	60	87	12	142	250	33	232	862
P19	CHADLI	579683	3332833	7.19	1.54	960	138	56	97	10.5	165	220	25	308	955
P21	KEBIR	579570	3332908	7.27	5.5	3500	215	188	600	42	990	890	100	275	3410

									<i>HYDROCHIMIE</i>			CHAPITRE 05			
P24	HASI ROKNA	586967	3334498	7.85	0.91	520	46	13	40	2.7	60	70	62	125	600
P25	ZENAGUI 01	579323	3333924	7.85	0.91	520	46	13	40	2.7	60	70	62	125	600
P26	F Majroud	583319	3331839	7.27	5.5	3500	215	188	600	42	990	890	100	275	4000
P27	BARED	578643	3333505	7.19	1.54	960	138	56	97	10.5	165	220	25	308	1000
P28	MOKHTAR B	578907	3333599	7.54	12.34	7620	430	336	1800	70	3000	1300	0	470	7651
P29	Hermitage	580504	3332796	7.48	1.08	700	80	18	120	8.8	145	210	72	64	391
P30	PAPC	582716	3330304	7.48	1.08	700	80	18	120	8.8	145	210	72	64	718
P31	Hemama	581361	3331648	7.09	0.81	510	103	28	10	10	246	29	80.7	85	2300
P32	Bouhadakh	580757	3330899	7.06	12.12	7640	667	363	1300	57	2000	2800	56	332	7514
P33	JUIFA	581127	3330428	7.48	1.08	700	80	18	120	8.8	145	210	72	64	1200
P34	BERKA	579932	3331048	7.48	1.08	700	80	18	120	8.8	145	210	72	64	1300
P35	KHLIFA	580240	3331746	7.44	3.44	2100	257	89	281.2	10.5	600	475	7	299	2019
Pz01	Hassipiezo	581679	3332939	7.48	1.08	700	80	18	120	8.8	145	210	72	64	390
S01	Grande Source	581023	3332613	7.66	0.589	390	51	21	33	7	50	95	28	119	365

4.2.1. Calcium Ca⁺⁺

La valeur maximale fixée par l'OMS est de 75mg/l comme une limite admissible de potabilité, les résultats desteneurs en calcium varient entre 42 et 667mg/L. les valeurs faibles ont été observées au niveau de la nappe du Grand Erg Occidental par rapport aux eaux des terrasses alluviales.

4.2.2. Magnésium Mg⁺⁺

Les teneurs en magnésium sont faibles allant de 13 à 659 mg/L.

4.2.3. Sodium Na⁺⁺

Les concentrations en Na⁺ oscillent entre 10 mg/l et 2300m g/l. Dans la nappe du grand erg occidental comme ilreprésente le cation le plus abondant dans les eaux de la nappe du quaternaire de la vallée de la Saoura. Sa présence est due au lessivage des formations argileuses d'âge quaternaire par les eaux et à l'appel des eaux salées, de l'inféro-flux causé par la surexploitation des puits au niveau de la palmeraie.

4.2.4. Potassium k⁺

Les concentrations varient dans notre secteur d'étude entre 2,7mg/l et 233 mg /l. Les valeurs de K⁺ montrent généralement les mêmes évolutions que celle de Na⁺, Cl⁻ et de la conductivité.

4.2.5. Chlorure Cl⁻

Les teneurs en chlorures varient entre 50 et 3000 mg/L

4.2.6. Les sulfates SO₄⁻

Les sulfates sont des éléments très solubles et aussi très stables, proviennent du ruissellement ou d'infiltration dans les terrains à gypse. La majorité des teneurs varient entre 30 et 3100 mg/L, et les grandesvaleurs sont enregistrées au niveau de la palmeraie ceci provient vraisemblablement du lessivage du gypse (SO₄Ca, 2H₂O) représenté sous forme de lentilles dans les formations quaternaires ainsi que la présence des marnes et des argiles dans ces formations. L'excès des sulfates dans ce point d'eau est en relation avec la contamination agricole qui l'affecte. D'après les analyses, plus de 70 % des échantillons dépassent la concentration maximale admissible de 250 mg/L fixée par l'OMS

4.2.7. Les bicarbonates HCO₃⁻

Les teneurs en bicarbonates dans les eaux de la zone d'étude varient de64 à 476 mg/l, leur origine est due au lessivage des formations hamadiennes calcaires du Moi-Pliocène vraisemblablement.

4.2.8. Les Nitrates (NO₃⁻)

Au niveau de notre secteur d'étude (nappe du grand erg occidental) les teneurs en nitrates fluctuent entre 26 mg/l à et 72mg/l. aussi des fortes valeurs de nitrate ont été observées dans la nappe des terrasses alluviale comprises entre 50 et 100 mg/l alors que l'OMS recommande de ne pas dépasser 25 mg/l. Ces fortes teneurs dues aux activités agricoles intensives et en particulier à

l'enlèvement de poulet, ovins, caprins, camelins, dans cet endroit de la palmeraie et d'autre lieu à proximité de la grande source. Cet élément azoté a des risques à moyen terme tels que la méthémoglobinémie infantile ou l'asphyxie du nourrisson.

4.2.9. La minéralisation

Les valeurs de minéralisation des eaux de la nappe s'échelonnent de 368 à 9814 mg/L. Ces valeurs révèlent que les eaux sont fortement chargées en sels, salées surtout celles situées à proximité de l'oued Saoura, on peut affecter cette forte minéralisation aux plusieurs facteurs naturels et anthropiques.

4.2.10. La dureté totale (TH)

La dureté totale d'une eau est produite par les sels de calcium et de magnésium qu'elle contient. On distingue : une dureté carbonatée qui correspond à la teneur en carbonates et bicarbonates de Ca et Mg et une dureté non carbonatée produite par les autres sels.

$$TH = (Ca^{++} + Mg^{++}) * 5.$$

La dureté est mesurée par le titre hydrotimétrique exprimé en °F (degré français); 1°F correspond à 10 mg de carbonate de Calcium dans 1 litre d'eau.

La dureté des eaux de la nappe du Mio-Plio-Quaternaire varie entre 15 et 100,7 et la nappe des formations quaternaires varient entre 19 et 902,64 °F la majorité des eaux sont très dures pour l'ensemble du système aquifère du Mio-Plio-Quaternaire. En comparant avec les normes internationales fixées par l'OMS (tableau 5.13), on constate que les eaux de la nappe sont assez dures.

Tableau 5.13 : Potabilité des eaux en fonction de la dureté (OMS).

TH (°F)	0 - 7	7 - 22	22 - 32	32 - 54	>54
Dureté des eaux	douce	Modeste douce	Assez douce	dure	Très dure
% Echantillon	0%	5%	15%	20%	60%

Ce paramètre présente une grande variation d'un puits à l'autre qui serait liée à la nature lithologique de la formation géologique de la nappe et en particulier à sa composition en magnésium et en calcium.

4.2.11. Titre d'Alcalimétrique (TA)

C'est le volume d'acide (exprimé en mL) à 0,02 mol.L⁻¹ en ions H₃O⁺ nécessaire pour doser 100 mL d'eau en présence de phénolphtaléine. Le T.A s'exprime en °F.

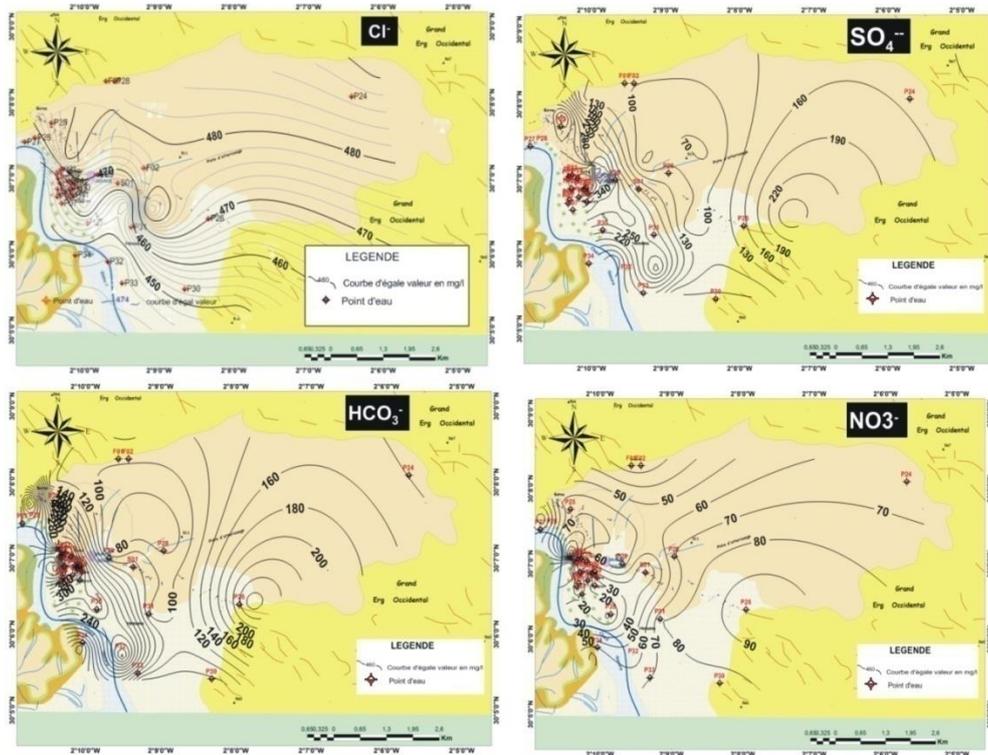
4.2.12. Titre Alcalimétrique Complet(T.A.C)

C'est le volume d'acide (en mL) à 0,02 mol .L-1 en ions H3O+ nécessaire pour doser 100ML d'eau en présence de méthylorange(encore appelé hélianthine) .Il s'exprime en °F.

4.3 Répartition spatiale des éléments chimiques

Les données ponctuelles hydrochimiquedu système aquifère à Béni -Abbèsque nous avons effectué en Avril 2016, ont permis de tracer des carte d'égalé valeurs (Fig.5.27).

Il est remarquable de constater que tous les cations augmentent de valeurs de l'erg vers l'oued vers la l'oued (exutoire de la nappe). Ce phénomène est présidé par le sens d'écoulement piézométrique permettant le lessivage des cations et leur concentration vers l'exutoire.



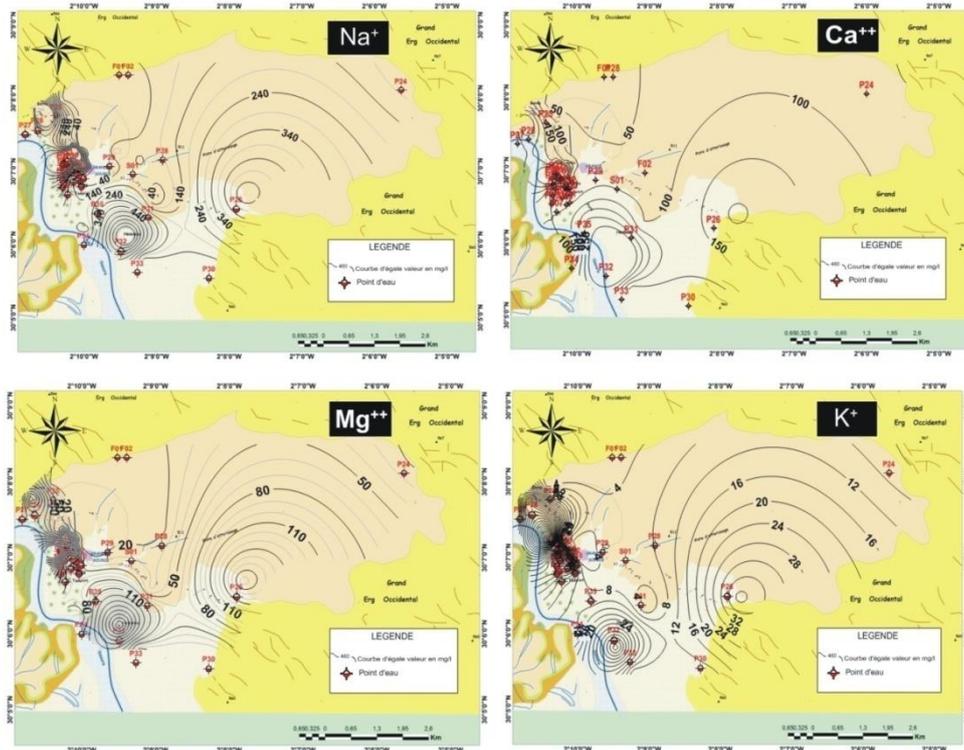


Figure 5.27: Répartition spatiale des cations et les anions du système aquifère à Béni-Abbès.

Les cations (Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^+ , K^+), soulignent une augmentation de l’Est vers le l’Ouest c’est dire de l’erg vers l’oued Saoura en conformité avec l’écoulement souterrain
 En ce qui concerne les anions (Cl^- , SO_4^{-2} , $\text{HCO}_3^{-\text{NO}_3^-}$) et le résidu sec (RS), on constate qu’ils gardent la même allure.

4.3.1. Faciès chimiques et potabilités des eaux

L’interprétation des résultats des analyses chimiques des eaux de la nappe du grand erg révèle un faciès dominant. C’est le faciès Bicarbonaté-Calcique et parfois sulfaté-calcique. Tandis que les analyses chimiques des eaux des terrasses alluviales et inféro -flux révèlent un faciès dominant, chloruré-Sodique à Calcique (Tableau 5.14).

Tableau 5.14 : Faciès chimique des eaux des nappes du système aquifère.

Nappe	Formule ionique		Faciès chimique
	r% Anions	r% Cations	
Eaux de la nappe du Mio-Pliocène	$\text{HCO}_3 > \text{SO}_4 > \text{Cl}$	$\text{Ca} > (\text{Na} + \text{K}) > \text{Mg}$	Bicarbonaté-Calcique
	$\text{SO}_4 > \text{Cl} > \text{HCO}_3$	$\text{Ca} > \text{Mg} > (\text{Na} + \text{K})$	Sulfaté-Calcique
Eaux de la nappe alluviales et inféro-flux	$\text{SO}_4 > \text{Cl} > \text{HCO}_3$	$\text{Ca} > \text{Mg} > \text{Na} + \text{K}$	Sulfaté-Calcique
	$\text{SO}_4 > \text{Cl} > \text{HCO}_4$	$\text{Mg} > \text{Na} + \text{K} > \text{Ca}$	Sulfaté-Magnésien
	$\text{Cl} > \text{SO}_4 > \text{HCO}_3$	$\text{Mg} > \text{Na} + \text{K} > \text{Ca}$	Chloruré-Magnésien
	$\text{Cl} > \text{SO}_4 > \text{HCO}_4$	$\text{Na} + \text{K} > \text{Ca} > \text{Mg}$	Chloruré-Sodique

Figure 5.28 : Diagramme de Piper des eaux du système aquifère à Béni-Abbès(2016).

Pour apprécier la potabilité des eaux de chaque nappe dans le système aquifère, nous nous référons au diagramme de Scholler, (Figure 5.29) L'utilisation de ce diagramme montre que les eaux de la nappe du Grand Erg Occidentale présente une bonne qualité classe 1 et 2. Pour les eaux de la nappe de la palmeraie presque 70%, leurs potabilité est moyenne à non potable.

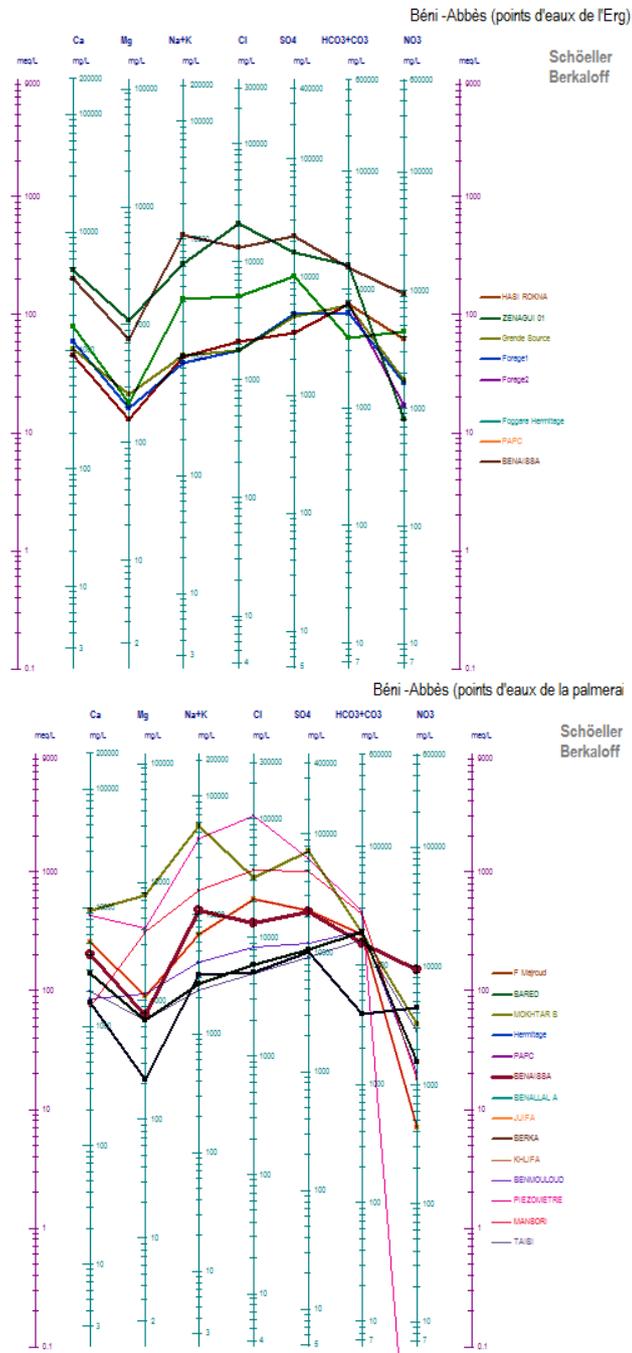


Figure 5.29 : Diagramme de Schöeller-Berkaloff des eaux des nappes à Béni- Abbès. (Campagne Avril, 2016).

L'utilisation de ce diagramme deBoudoukha, 1992 (Fig. 5.29) montre que les eaux des différentes nappes des caractéristiques de non potabilité, à l'exception des eaux de la nappe du Grand Erg

Occidentale. Les eaux d'inféro-flux sont le plus chargées aux éléments majeurs. On peut subdiviser la nappe de la palmeraie en trois zones selon la qualité de l'eau qu'elles contiennent. La figure 5.28, montre que les eaux de la zone trois (de l'inféro-flux) présentent de qualité de non potabilité.

Le diagramme de Stiff, ou modèle de Stiff (Fig. 5.30) est une représentation graphique d'analyses chimiques, d'abord développée par H.A. Stiff en 1951. Il est largement utilisé par les hydrogéologues et les géochimistes pour afficher la composition ionique majeure d'un échantillon d'eau. Une comparaison visuelle pour les deux nappes Mio-Plio-Quaternaire à Béni-Abbès a confirmé l'origine commune des sources d'alimentation, ainsi que le même trajet d'écoulement général de l'erg vers l'oued.

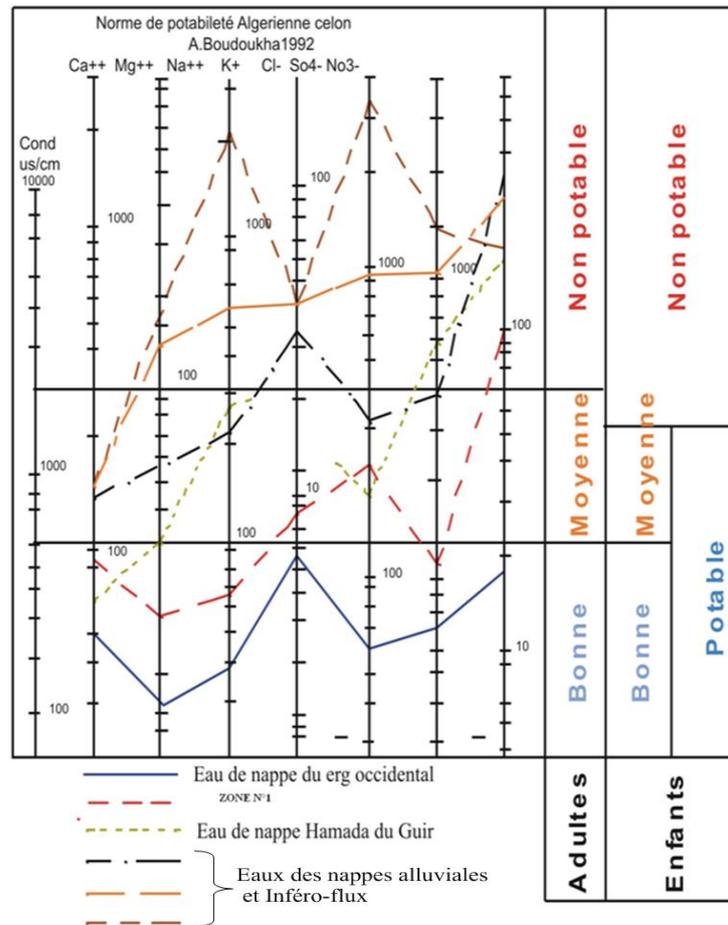


Figure 5.30 : Diagramme du Scholler de la potabilité des eaux de la région de Béni Abbès (analyse 2016). -selon les normes algériennes, Boudoukha 1992.

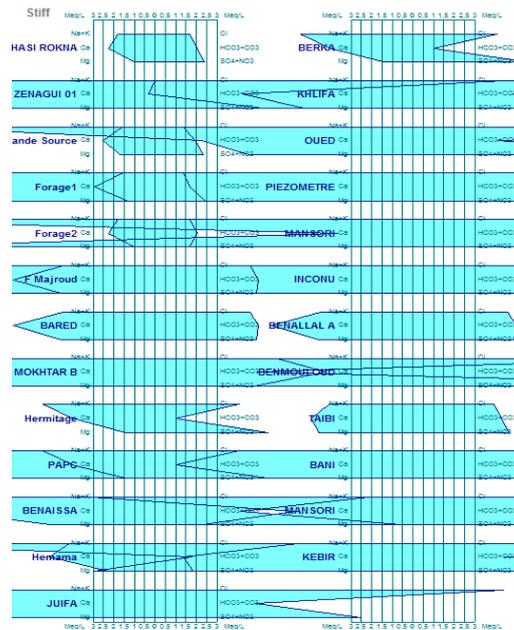


Figure 5.31 : Diagramme de Stiff des eaux du système aquifère à Béni -Abbès.

4.3.2. Etude des rapports caractéristiques

Les rapports caractéristiques sont fonction directe de la nature lithologique de l'aquifère Mio-Plio-Quaternaire à Béni -Abbès. Les principaux rapports sont représentés dans la figure 2.30.

1) $r \text{SO}_4^- / r \text{Cl}^-$:

Les valeurs obtenues de ce rapport sont plus faibles que l'unité pour la majorité des points d'eau, ceci peut s'expliquer par la forte solubilité des chlorures par rapport aux ions sulfatés.

2) $r \text{Cl}^- / r \text{HCO}_3^-$:

Ce rapport montre la prédominance extrêmement importante de Cl^- sur l'ion bicarbonate dans la majorité des échantillons, cela est dû à la dissolution des Cl^- présents dans les lentilles de gypse ainsi qu'à l'influence des eaux de l'inféro-flux. Pour les puits situés près de l'oued (Terrasse 3), on observe des fortes valeurs de ce rapport.

3) $r \text{Cl}^- / r \text{Na}^{++}$:

Les valeurs obtenues s'écartent de l'unité pour la quasi-totalité des puits, elles témoignent de l'origine commune de ces deux ions.

4) $r \text{Mg}^{++} / r \text{Ca}^{++}$:

Les valeurs obtenues s'écartent peu de l'unité (la valeur 1), sauf pour quelques points d'eau les ions Mg et Ca sont donc d'origine différente. Les teneurs élevées de $r \text{Ca}^{++}$ sont dues à la dissolution des sels contenus dans le gypse. Le calcium ne proviendrait pas seulement de la dissolution des formations carbonatées (calcite, dolomite, gypse) mais aussi de l'altération des minéraux argileux ainsi que des phénomènes d'échanges de base (Mebrouk, 2007).

Pour les eaux de la nappe du Grand Erg et des terrasses alluviales, le rapport Ca / Mg moyen est

de 2.2 variant entre 0.4 et 6.

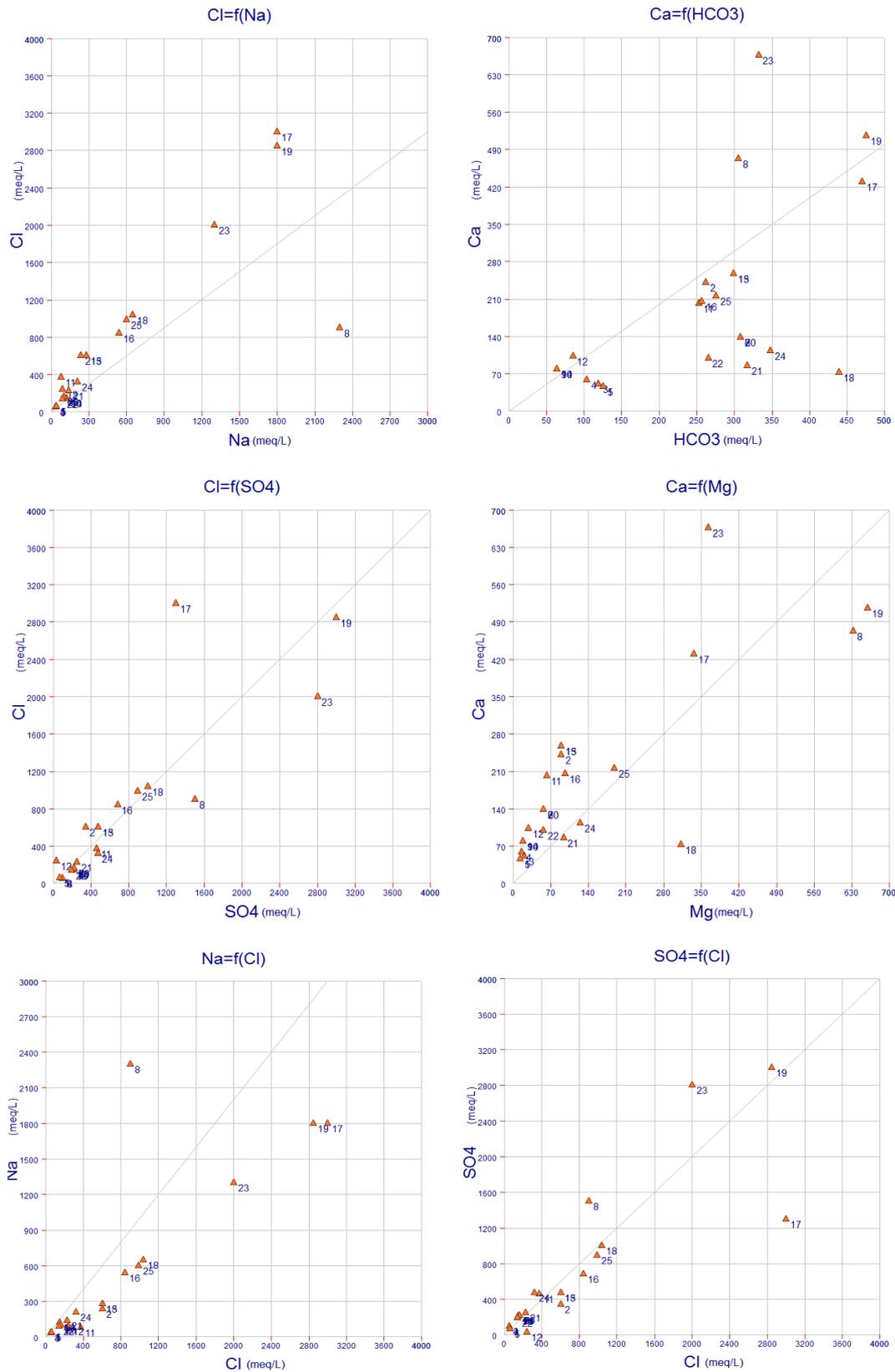


Figure 5.32: Rapports caractéristiques d'éléments chimiques des nappes de la région de Béni-Abbès.

Les résultats des rapports caractéristiques chimiques confirment un écoulement lent des eaux du système aquifère de la région de Béni-Abbès.

4.3.3. Evolution hydro chimique des eaux à Béni -Abbès

4.3.3.1. Evolution de la TDS à Béni -Abbès

Le système aquifère de Béni Abbès comprend des nappes plus ou moins importantes. Pour caractériser hydrochimiquement l'eau de chaque nappe, nous avons procédé à une compilation des données. Sur un intervalle de 60 ans, en effet plusieurs analyses qui sont à notre possession remontent aux années 1963, 1992 2008 et 2016 (tab.5.15).

La série de données hydrochimiques recueillie est discontinue, mais elle s'avère très utile dans l'étude de l'évolution spatio-temporelle des constituants physico-chimiques, néanmoins elle permet de tracer des histogrammes et des cartes des quantités de sels dissous, ainsi que la migration exogène de la salinité.

En ce qui concerne les eaux de la nappe du Grand Erg occidental, présentent une modeste évolution chimique, elles se caractérisent par un pH neutre et des teneurs en minéralisation très faible. En revanche la nappe des terrasses, l'évolution est nettement soulignée de l'ouest vers l'Est. Selon leur disposition par rapport à l'axe de l'Oued.

Roche (1963) a décrit dans sa thèse, que les eaux de la zone le long de l'oued Saoura a des concentrations en sel relativement faibles, ne dépassant pas les 2g/l, ce qui est expliqué par l'infiltration des eaux d'irrigation de la Grande Source avec une quantité importante et des crues de l'oued Saoura dans l'aquifère alluviale de la palmeraie. Les eaux de la partie amont de la nappe accusent des teneurs très faibles. Par contre (Yousfi 1991), a trouvé des valeurs de la salinité supérieur à 3 g/l. l'assèchement de l'oued Saoura, et la diminution de la part de la quantité d'eau destinée à l'irrigation, sont les principales causes. La recharge de la nappe alluviale ayant baissée.

Les résultats de l'étude hydrochimique sur un profil, confirme un écoulement souterrain lent; les valeurs moyennes permettent de distinguer trois types de comportement des éléments analysés (Merzoougui, 2011) : Le premier ensemble d'éléments, regroupant le pH, la CE, le RS, HCO₃⁻, Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, et le Cl⁻. Le second ensemble est caractérisé par des évolutions très nettes de la salinité(5.31)

Le tableau ci-dessous résume l'évolution du chimisme dans le temps et dans l'espace, on peut identifier trois zones de salinité, de la moins concentrée (0,3 à 3g/l) au centre de la palmeraie (3 à 10g/l) à la plus concentrée (10-20 g/l) au Sud-Ouest (près de l'oued Saoura).

En ce qui concerne la nappe Mio-Plio-Quaternaire et surtout au niveau des nappes de des terrasses alluviales, l'évolution est nettement soulignée de l'ouest vers l'Est. Les valeurs des cations et des anions se sont multipliées par 3 à 7 fois au niveau des terrasses (zone 03), deux fois dans les terrasses (zone 02) et 1.5 fois au niveau des terrasses (zone (zone 01) (Voir Fig5.32)

Tableau 5.15 : synthèse caractéristiques Hydrochimiques des différentes nappes à BéniAbbès.

Type	Année	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄	HCO ₃
Eaux de nappe du grand erg occidental	1963	75	30	50	15	90	600	285
	1992	96	27	40	10	80	850	310
	2008	48	33	28	5	45	120	119
	2016	50	36	38	10	45	100	122
Eaux nappe des terrasses alluviales(Zone 01)	1963	100	40	100	30	300	350	350
	1992	180	78	205	45	320	359	-
	2008	473	632	230	70	900	1500	305
	2016	363	599	210	70	950	1500	365
Eaux nappe des terrasses alluviales (zone 02)	1963	120	45	280	50	210	290	300
	1992	400	1076	2500	230	400	400	400
	2008	516	659	1800	26	2850	3000	476
	2016	514	659	1730	28	2840	3000	477
Eaux nappe de l'inféro-flux (zone 03)	1963	148	52	95	15	180	220	400
	1992	1100	1076	3380	230	450	390	100
	2008	2100	1080	2380	300	7400	3230	440
	2016	2060	1000	2220	230	7200	3000	350

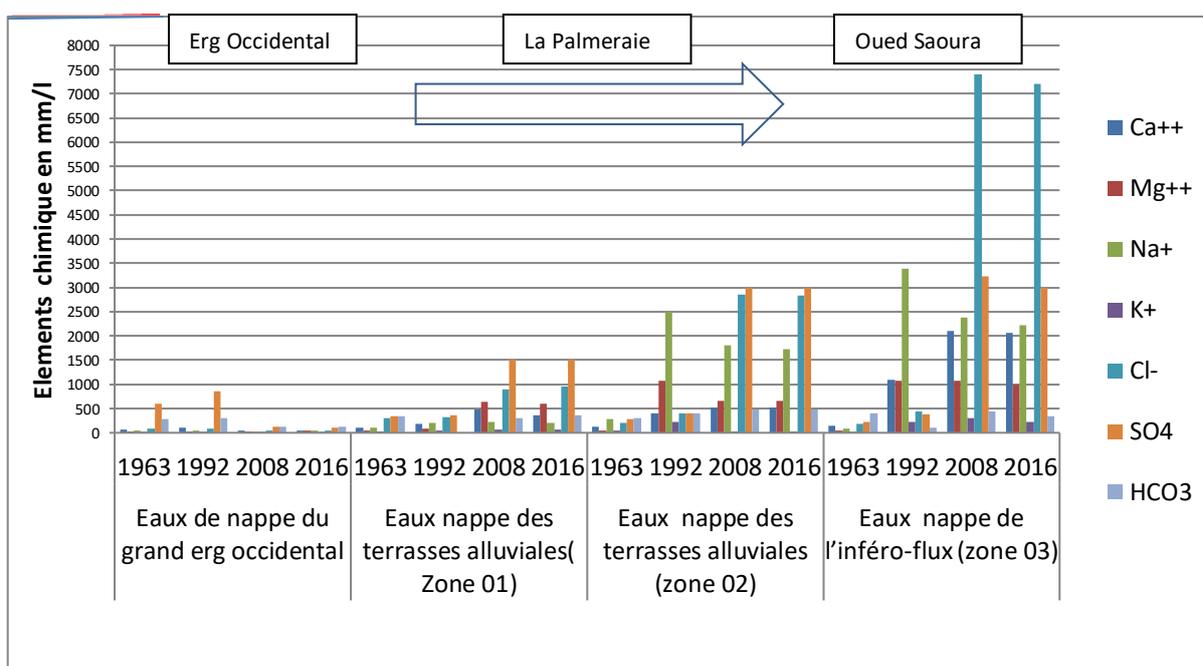


Figure 5.33 :Evolution du chimisme d'eaux de la région de Béni-Abbès

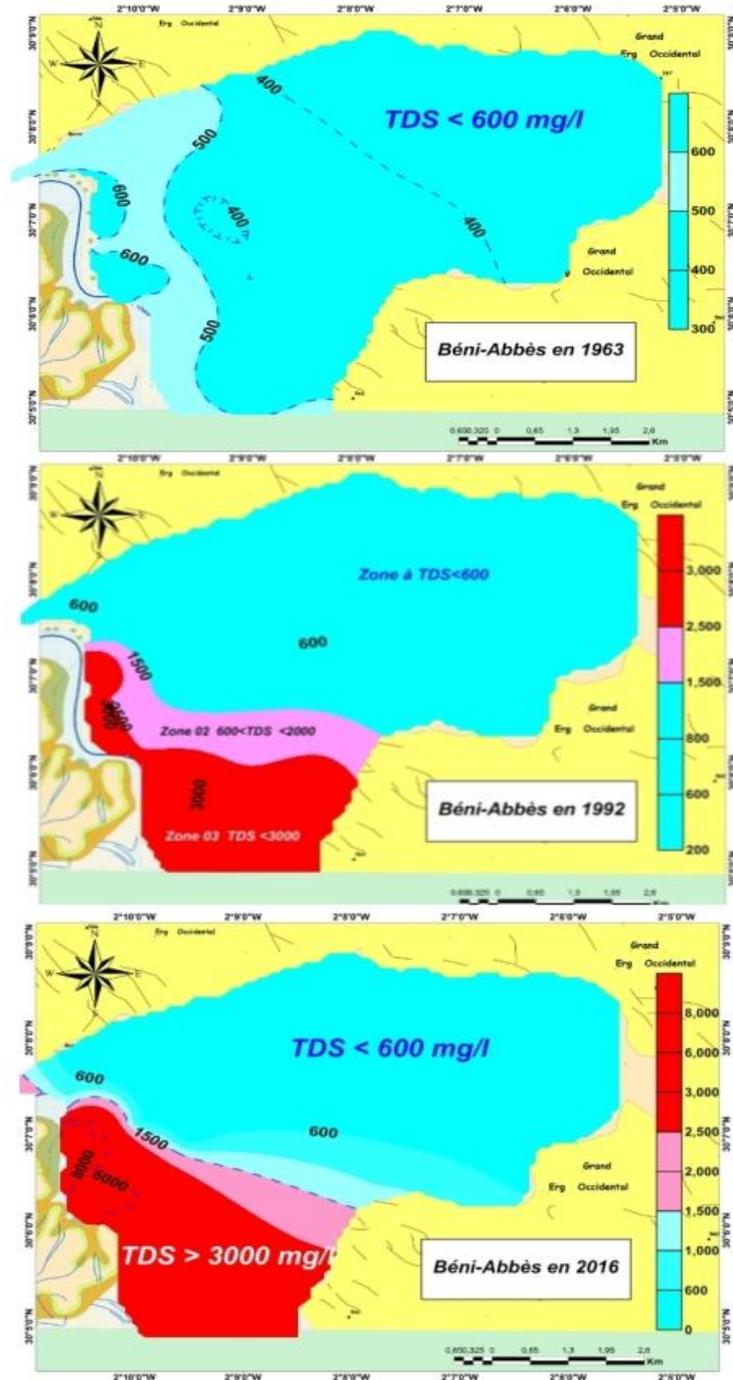


Figure 5.34: Etat des eaux de la région de Béni-Abbès.

Interprétation

Cette forte salinité est nettement constatée aux niveaux des nappes alluvionnaires qui peuvent être expliquée par la nature géologique, du remplissage alluvionnaire, l'évolution anarchique des puits et l'augmentation de pompage ont traduit un appel des eaux de l'inféro- flux chargées en sel. En conclusion, l'augmentation de la salinité explique le nombre élevé des puits de surface abandonnés, l'exploitation excessive, dépassant généralement le pouvoir régulateur de l'aquifère, entraînant une dégradation continue de la qualité des eaux causée par les activités anthropiques et

agronomiques. Cette augmentation de la salinité influe essentiellement sur le rendement des cultures par la destruction de la structure du sol. La faible salinité en bordure du talus hamadien est assurée grâce à la recharge latérale régulière par le drain naturel d'une part, et par la recharge artificielle des eaux d'irrigations de la grande source de bonne qualité d'autre part

4.3.4. Etude de la qualité des eaux d'irrigation

La qualité d'une eau d'irrigation est souvent appréciée par les paramètres : CE, pH et SAR. Et les risques qui sont liés sont : Salinisation, sodisation et d'alcalinisation du sol irrigué.

Afin de mieux cerner le système aquifère, l'utilisation des outils des hydrochimies et statistique pour but de caractériser la qualité des eaux d'irrigation dans cet environnement notamment la nappe des terrasses alluviales et inféro-flux de la palmeraie de Béni Abbés d'une part, mais aussi leurs influences sur l'irrigation et l'évolution de la palmeraie d'autre part.

4.3.4.1. Traitement statistique des données hydrochimiques et ACP

L'A.C.P est une méthode statistique essentiellement descriptive dont l'objectif est de présenter sous une forme graphique, le maximum de l'information contenu dans un tableau de données. Ce tableau est constitué, en lignes par des « individus » (puits, foggaras, sources,...) sur lesquels sont mesurées des « variables quantitatives » (CE, PH teneurs en Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- et NO_3^-) disposées en colonnes. Le but recherché est de déterminer la structure des variables (familles) ainsi que la répartition de ces dernières

L'analyse effectuée est une A.C.P centrée réduite qui a été réalisée sur un tableau de données à 10 variables (CE, PH, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- et NO_3^-) et à 31 individus (tab.5.16).

Tableau 5.16 : Caractéristiques statistiques des données analysées

	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	NO_3^-	PH	CE (sm/cm)
Maximum	1486	1292	4650	450	7160	7000	586	150	7,86	34
Moyenne	280	182	372	49	687	840	327	38	7,38	3,66
Minimum	42	8	40	7	55	70	137	20	6,65	0
Ecart type	327	281	833	85	1249	1327	118	34	0,29	6,06

L'analyse a été poussée jusqu'à dix facteurs, qui expriment 100% des renseignements. (tab.5.17),

Tableau 5.17 : Caractéristiques statistiques des données analysées

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10
Valeur propre	6,630	1,279	1,035	0,567	0,338	0,079	0,057	0,011	0,003	0,000
Variabilité (%)	66,304	12,787	10,347	5,672	3,379	0,795	0,573	0,107	0,032	0,003
% cumulé	66,304	79,091	89,438	95,110	98,490	99,284	99,858	99,965	99,997	100,00

4.3.4.1.1. Matrice de corrélation

Un examen rapide de la matrice de corrélation (tab.5.18) permet de constater que la majorité des éléments majeurs sont corrélés positivement entre eux. Tandis que les ions de Ca^{2+} et HCO_3^- sont corrélés négativement avec le pH.

Cette matrice nous permet d'apercevoir les éléments corrélables entre eux suivant la valeur du coefficient de corrélation.

La bonne corrélation se définit par le coefficient de corrélation ($r > 0,8$). Les meilleures corrélations positives se retrouvent entre le Na^+ avec les ions : K^+ (0,95) et Cl^- (0,99), et SO_4^- (0,90) et la conductivité (0,99). Aussi le Cl^- avec les ions : SO_4^- (0,94) et la conductivité (0,97).

Les éléments corrélés présentent la même origine. Par exemple le couple Na-Cl est inclus dans le faciès chimique existant dans la région (chloruré sodique). L'origine de ces derniers provient des roches carbonatées et évaporitiques (gisement gypseux de Guellal).

Tableau.5.18 : Matrice de corrélation des éléments chimiques

	pH	Ca 2+	Mg2+	Na+	K+	cl -	HCO3-	SO4-	NO3-	CE
PH	1									
Ca 2+	-0,07	1								
Mg2+	0,14	0,77	1							
Na+	0,17	0,61	0,42	1						
K+	0,20	0,54	0,43	0,95	1					
Cl -	0,16	0,68	0,54	0,99	0,93	1				
HCO3-	-0,28	0,45	0,57	0,53	0,60	0,58	1			
SO4-	0,12	0,85	0,73	0,90	0,87	0,94	0,62	1		
NO3-	0,06	0,45	0,39	0,71	0,72	0,72	0,59	0,69	1	
CE	0,09	0,61	0,36	0,99	0,95	0,97	0,55	0,89	0,71	1

4.3.4.1.2. L'analyse de cercle de l'ACP

Nous limitons notre interprétation au cercle formé par les deux axes F1 et F2 (fig.5.33). Les deux axes expriment 79,09% de l'information, ce qui rend la corrélation entre les variables significative. La conductivité électrique qui traduit la minéralisation est bien corrélée avec le facteur 1 (tab.5.19), aussi les autres éléments majeurs présentent une bonne corrélation avec le facteur 1. L'axe F1 horizontal exprime 66,30% de la variance.

Il oppose les eaux fortement minéralisées riches en Cl , SO_4 , Na et K avec une conductivité élevée aux eaux faiblement minéralisées riches en HCO_3 (fig.5.34). Ce qui nous permet de considérer ce facteur comme facteur de minéralisation.

Tableau 5.19 : Corrélations entre les variables et les facteurs

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10
PH	0,11	-0,83	0,48	0,26	-0,05	0,08	-0,05	0,00	0,00	0,00
CE	0,93	-0,18	-0,25	-0,16	-0,05	0,02	-0,04	0,04	0,04	0,00
Mg ²⁺	0,65	0,33	0,64	0,18	-0,04	-0,14	0,05	0,00	0,01	0,00
Ca ²⁺	0,76	0,31	0,40	-0,33	0,16	0,15	-0,04	-0,03	0,00	0,00
K(méq/l)	0,93	-0,22	-0,18	0,03	-0,14	0,07	0,18	-0,03	0,00	0,00
Na+ (méq/L)	0,94	-0,22	-0,17	-0,13	-0,06	-0,08	-0,05	0,00	-0,03	0,01
Cl (méq/l)	0,97	-0,14	-0,06	-0,10	-0,06	-0,11	-0,07	-0,05	0,00	-0,01
Hco ₃ (méq/l)	0,69	0,49	-0,17	0,42	-0,25	0,09	-0,08	0,00	0,00	0,00
SO ₄ (méq/l)	0,98	0,04	0,15	-0,11	0,00	0,01	0,03	0,07	-0,02	-0,01
NO ₃ -(méq/l)	0,78	-0,03	-0,23	0,34	0,47	-0,01	0,01	0,00	0,00	0,00

L'axe d'inertie F2 exprime 12.79% de la variance, et oppose les eaux sulfatées calciques et magnésiennes aux chlorurés sodiques avec présence des nitrates. Il est défini positivement par Mg²⁺, Ca²⁺, HCO₃⁻ et SO₄⁻ et négativement avec le pH et la conductivité, Na⁺, K⁺, Cl⁻, et NO₃⁻. (tab.5.19).

Etant donné que l'axe F1 est déterminé par deux groupes :

- Un premier groupe : les eaux riches en ions des minéraux évaporitiques avec des conductivités (Cl, SO₄, Na et K), ces eaux sont contaminées par les nitrates, c'est le groupe influencé par les évaporites.
- Le deuxième groupe concerne le groupe des ions des minéraux carbonates à savoir Ca, Mg et HCO₃, c'est le groupe des eaux influencé par carbonates.

Effectivement le facteur (F1) peut être considéré comme celui de la minéralisation.

Par contre l'axe F2, qui montre certes une opposition entre les ions évaporitiques et carbonates, il ne présente pas une corrélation significative avec ces ions à part HCO₃ et Na qui représentent respectivement à peu près + 0,5 et -0,25. Par ailleurs, le pH présente une très bonne corrélation négative avec ce facteur et se trouve en opposition avec les eaux bicarbonatées alcalines.

Le F2 n'est pas corrélé avec les sulfates (r SO₄ x F2 est très proche de 0). Les ions évaporitiques inf à -0,25. Les ions carbonates entre 0,25 et 0,5 (à part le HCO₃).

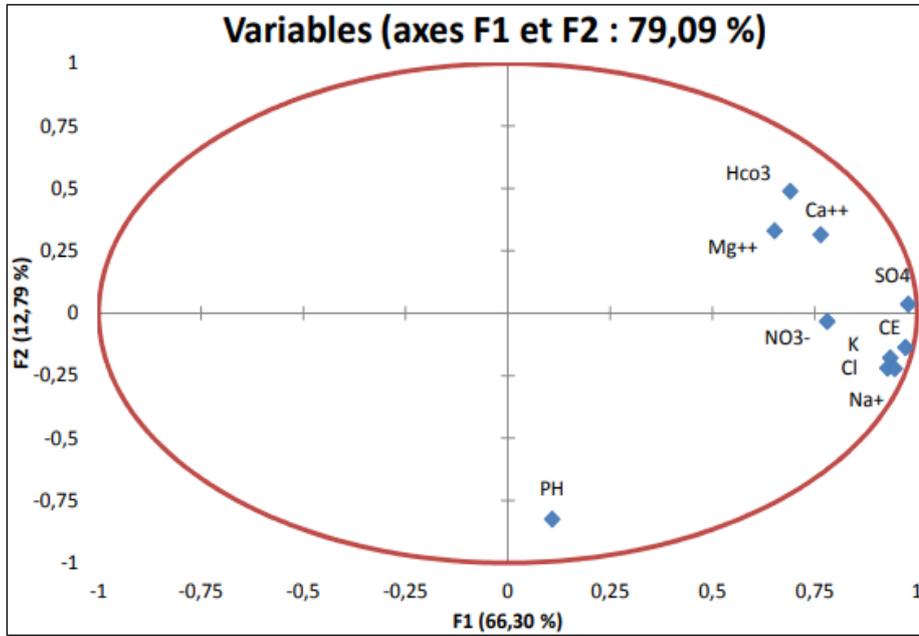


Figure 5.35 :

Représentation graphique en ACP des eaux des de la palmeraie de Béni-Abbès

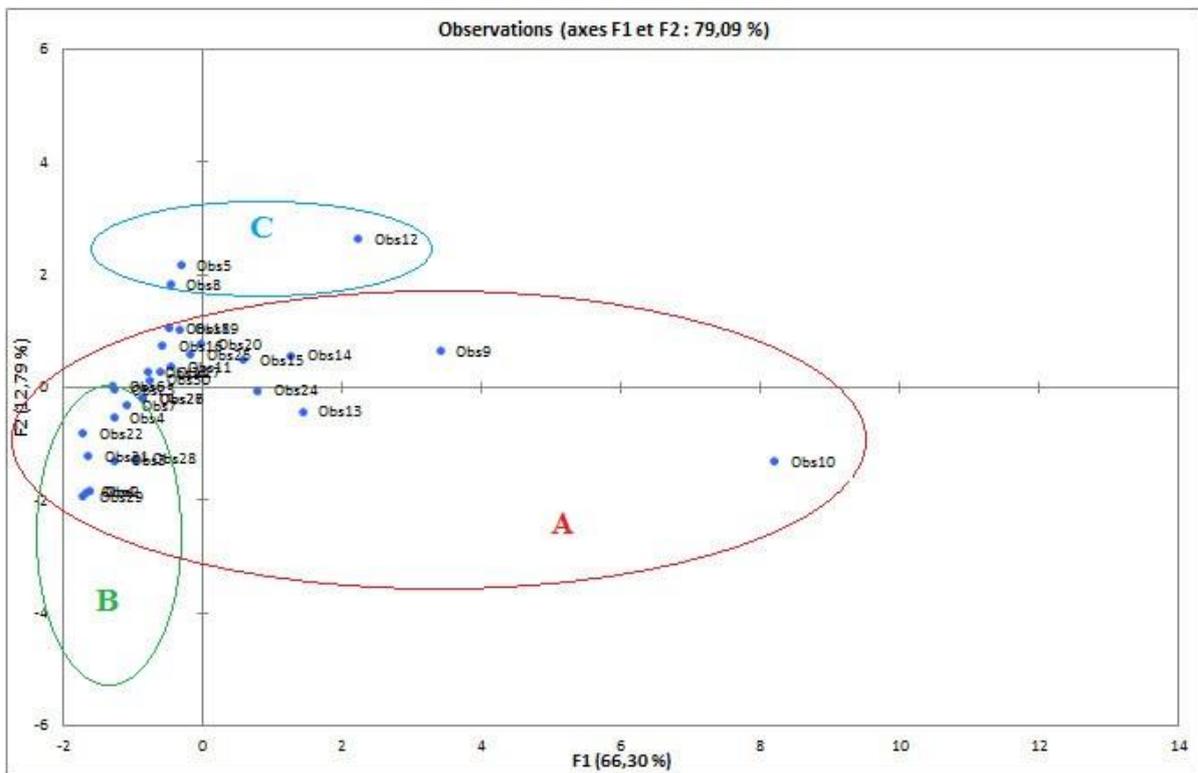


Figure 5.36 : Représentation graphique des Individus

4.3.4.2. Calcul des indices de l'eau en vue de leur utilisation agricole

C'est le rapport entre les ions échangés et les ions de même nature primitivement existants dans

l'eau. Il est obtenu à l'aide de la relation suivante :

$$IEB = \frac{rCl^- - r(Na^+ + K^+)}{rCl^-}$$

Où IEB représentant l'indice d'échange de base est sans unité ;

rCl^- : est la concentration en $r(Na^+ + K^+)$ est la concentration en milliequivalent de la somme des ions sodium et potassium. Cet indice définit le sens des échanges ioniques entre l'eau et les terrains encaissants.

Ainsi, Si :

- IEB=0 il y a un équilibre entre les compositions chimiques de l'eau et de l'encaissant, alors il n'y a pas d'échanges
- IEB < 0 alors Ca^{2+} et Mg^{2+} sont échangés par Na^+ et K^+
- IEB > 0 alors Na^+ et K^+ sont échangés par Ca^{2+} et Mg^{2+} .

L'indice d'échange de base calculé dans le cas présent varie de -0,52 à 0,57, On remarque que 62,3% des échantillons d'eaux analysés ont un (i e b) supérieur à zéro, donc les eaux échangent des ions de ($Na^{++} K^+$) contre les ions de Ca^{2+} et Mg^{2+} du terrain encaissant, tandis que le reste des points d'eau, avec un indice négative indique que les eaux souterraines de la nappe étudiée échangent les ions Ca^{2+} et Mg^{2+} par les ions Na^+ et K^+ de l'encaissant (BEN YAZZA .A, 2014).

Indice de perméabilité

Younsi (2001) et Debieche (2002) ont indiqué que la perméabilité du sol dépend de plusieurs autres facteurs tels que la concentration totale de l'eau, la quantité de sodium, la concentration en bicarbonates et la nature du sol lui-même. Tous ces termes sont combinés dans une seule formule donnant ce que l'on appelle indice de perméabilité (IP) défini par la relation :

$$IP = \frac{Na^+ + \sqrt{HCO_3}}{Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+} \times 100\%$$

Où : les concentrations sont exprimées en [meq/L].

Si $PI > 75\%$: eau d'excellente qualité.

Si $75\% > PI > 25\%$: eau de bonne qualité.

Si $PI < 25\%$: eau mauvaise pour l'irrigation

Tableau.5.20 :L'indice de perméabilité des eaux étudiée.

N°	Na ⁺ (méq/L)	Mg ²⁺ (méq/l)	Ca ²⁺ (méq/l)	HCO ₃ (méq/l)	IP (%)
F1	1,96	1,32	4,00	2,80	49,94
F2	2,18	1,32	4,00	2,80	51,39
F3	4,09	2,38	8,40	4,25	41,35
F4	2,61	5,02	8,20	4,00	29,13
P1	14,01	6,91	19,60	6,30	40,77
P2	3,39	3,70	6,95	4,61	39,45
P3	4,35	5,18	6,95	4,71	39,56
P4	5,48	8,88	16,65	6,61	25,96
P5	38,28	21,62	27,35	8,71	47,25
P6	202	65	67	9,6	61,4
P7	4,35	7,32	13,45	5,30	26,48
P9	24,80	33,79	7,15	8,10	42,05
P10	16,27	64,87	2,10	9,00	23,15
P11	26,10	12,99	14,75	6,51	53,22
P12	3,48	6,74	12,65	6,20	26,10
P13	7,66	6,08	9,70	6,00	43,11
P14	9,14	8,47	14,95	6,76	36,05
P15	8,70	10,85	10,55	7,00	37,69
P16	14,36	11,68	14,30	6,81	42,06
P17	2,61	1,07	3,15	3,20	64,41
P18	4,35	0,66	3,80	2,25	66,41
P19	8,70	4,77	5,90	3,71	54,86
P20	26,10	10,85	25,25	4,25	45,27
P21	8,70	18,42	3,15	6,05	36,87
P22	7,40	6,50	8,40	4,81	43,01
P23	7,66	6,74	8,40	4,81	43,20
P24	9,57	8,22	9,90	3,76	41,56
Pt1(G.S)	1,74	1,73	2,10	2,30	58,48
Pt2	4,35	6,50	8,85	4,30	32,61
Pt3	10,44	7,98	12,65	4,76	40,63

A partir des résultats du tableau (tab.5.20). On remarque que les eaux de la palmeraie sont convenables avec un indice de perméabilité des sols varie entre 25,9% à 66,4% qui indique une

bonne qualité, sauf un seul puits (P10) avec un indice de 23,15%, Cette mauvaise perméabilité entrave l'apport d'eau à la culture. Elle rend beaucoup plus difficile les pratiques culturales sur les parcelles agricoles.

4.3.4.3. Les chlorures

Lorsqu'ils sont présents dans l'eau d'irrigation, ces éléments contribuent à augmenter la concentration des sels solubles. Les sels de chlorures et de sulfates sont rapidement solubles. Ils peuvent donc être lessivés dans les sols qui se drainent bien.

- $Cl < 4$: eau non toxique pour les plantes.
- $4 < Cl < 10$: toxicité modérée.
- $Cl > 10$: toxicité sévère.

Où : les concentrations du $[Cl^-]$ sont exprimées en [meq/l].

D'après le tableau ci-dessous (). 52 % des échantillons ayons une concentration des chlorures dépasse les 10(meq/l). Cela fait que ces eaux ont une toxicité sévère sur les plantes. Et 16% des eaux de la palmeraie sont non toxique pour les plantes.

4.3.4.4. Magnésium Hazard absorption

En générale, le calcium et le magnésium sont à l'état d'équilibre dans l'eau, le taux élevé de magnésium dans l'eau influe sur sa qualité, l'eau devient de nature alcaline.

La formule utilisée pour le calcul de ce coefficient est :

$$MH = \frac{Mg^{2+} \times 100}{Mg^{2+} + Ca^{2+}} \text{ [}$$

Où : Les concentrations en meq/L.

- Si $MH > 50$: eau ne convient pas à l'irrigation.
- Si $MH < 50$: eau convient à l'irrigation.

D'après le tableau (tab.V.11), on remarque que les pourcentages du Magnésium Hazard dans la majorité des points d'eau (84% d'échantillons) convient à l'irrigation, et 16% d'échantillons ne convient pas à l'irrigation.

D'après le tableau (tab), on remarque que les pourcentages du Magnésium Hazard dans la majorité des points d'eau (84% d'échantillons) convient à l'irrigation, et 16% d'échantillons ne convient pas à l'irrigation.

4.3.4.5. Pourcentage de sodium

Le sodium est l'un des éléments les plus indésirables dans l'eau d'irrigation. Cet élément a son origine de l'altération de la roche et du sol, des intrusions d'eau de mer, des eaux traitées et des

systèmes d'irrigation. Le problème principal avec une grande quantité de sodium est son effet sur la perméabilité du sol et sur l'infiltration de l'eau.

Le sodium remplace le calcium et le magnésium adsorbés sur les particules d'argile et provoque la dispersion des particules du sol. Il y a donc éclatement des agrégats du sol, ce qui provoque un sol dur et compact lorsqu'il est sec et excessivement imperméable à l'eau. Le sodium contribue aussi directement à la salinité totale de l'eau et peut être toxique pour des cultures sensibles [28].

$$Na\% = \frac{Na^+}{Ca^{2+}+Mg^{2+}+Na^++K^+} \times 100 \{$$

Le pourcentage de sodium présent des valeurs très importantes ($Na\% > 15\%$) dans la palmeraie de Béni Abbés, Ce qui montre que le Na^+ prédomine dans le sol. qui s'influe par la réduction de la porosité du sol, ceci limite la circulation de l'eau et de l'air dans le sol. Ceci va entraîner un stress hydrique même si on irrigue puisque l'eau n'arrive pas aux racines, De tels sols sont appelés solssodiques.

4.3.4.6. Sodium Absorption Ratio (SAR)

Pour maintenir les conditions d'infiltration adéquates dans les sols irrigués, il faut veiller à empêcher les complexes d'échange du sol de se charger en Na^+ . On exprime le danger de sodicité d'une eau d'irrigation par le SAR (Sodium Absorption Ratio) [28],

$$SAR = \frac{Na^{2+}}{\sqrt{(Ca^{2+}+Mg^{2+})/2}} \{$$

Le sodium échangeable a une incidence marquée sur les propriétés physiques et chimiques des sols. A mesure que la teneur en eau échangeable augmente, le sol à tendance à se disperser, il devient moins perméable à l'eau et ne prête guerre aux pratiques culturales. L'eau d'irrigation stagne alors à la surface du sol et ne parvient plus jusqu'aux racines. Le calcul de ce paramètre va nous permettre d'apprécier la dégradation éventuelle de la structure du sol et l'altération de ses qualités physiques. Les résultats de calcul du SAR sont présenté dans le (tab.5.21).

Les deux diagrammes ci-dessous (Fig. 5.35) et (Fig.5.36) indique que les eaux de la nappe supérieure sont désignées par un SAR fort 3 selon Riverside. En ce qui concerne le diagramme de Wilcox, les eaux de cette nappe manifestent une qualité bonne à excellente.

Tableau.5.21 : Résultats de calcul du SAR

N°	NOM ET PRÉNOM	Na (méq/L)	Ca (méq/l)	Mg (méq/l)	SAR
F1	BEN ALLI	1,96	4,00	1,32	1,20
F2	ALLA	2,18	4,00	1,32	1,33
F3	BAKRI	4,09	8,40	2,38	1,76
F4	BEN TAIB	2,61	8,20	5,02	1,02
P1	BANI	14,01	19,60	6,91	3,85
P2	BEN MOUSSA	3,39	6,95	3,70	1,47
P3	OUBID	4,35	6,95	5,18	1,77
P4	CHERIF	5,48	16,65	8,88	1,53
P5	HADJ	38,28	27,35	21,62	7,74
P6	BEN ISA	202,28	66,95	65,36	24,87
P7	MANSSORI 01	4,35	13,45	7,32	1,35
P8	BOUANINI	0,00	74,30	106,23	0,00
P9	AROSSIPBOUSSIOR	24,80	7,15	33,79	5,48
P10	BABA	16,27	2,10	64,87	2,81
P11	ATMANI	26,10	14,75	12,99	7,01
P12	BEN MOULOUD	3,48	12,65	6,74	1,12
P13	BELKASSM	7,66	9,70	6,08	2,73
P14	HADJ BELA	9,14	14,95	8,47	2,67
P15	MANSSORI 02	8,70	10,55	10,85	2,66
P16	BEN ALLAL	14,36	14,30	11,68	3,98
P17	BAICHO	2,61	3,15	1,07	1,80
P18	ABDARRAHIM	4,35	3,80	0,66	2,91
P19	BELHADJ	8,70	5,90	4,77	3,77
P20	BOUHADA	26,10	25,25	10,85	6,14
P21	BEN TAIBLKBIR	8,70	3,15	18,42	2,65
P22	HOUMINI	7,40	8,40	6,50	2,71
P23	BEN HAMED	7,66	8,40	6,74	2,78
P24	NAJIB	9,57	9,90	8,22	3,18
Pt1	SOURCE SIDI OTHMAN	1,74	2,10	1,73	1,26
Pt2	MELONGE	4,35	8,85	6,50	1,57
Pt3	HASSI APC	10,44	12,65	7,98	3,25

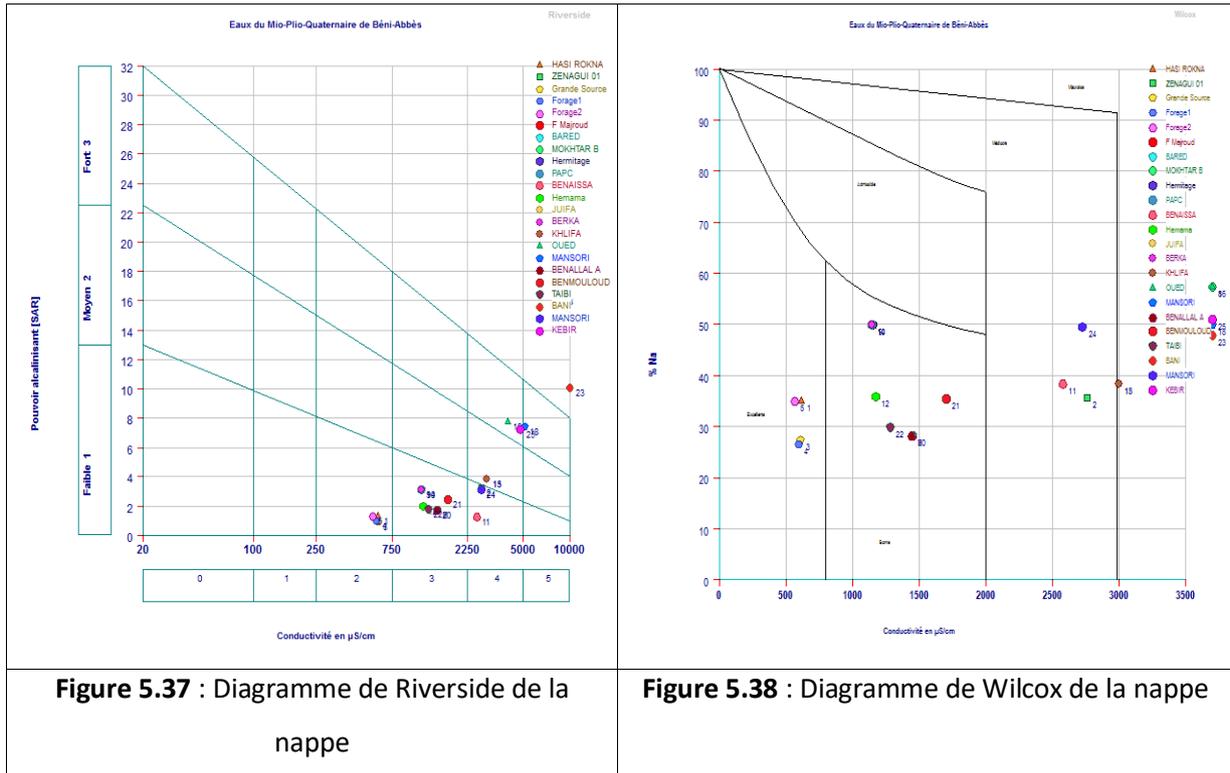


Figure 5.37 : Diagramme de Riverside de la nappe

Figure 5.38 : Diagramme de Wilcox de la nappe

4.3.4.7. Evaluation du risque de salinité

La salinité provoque des effets directs sur les végétaux et des risques de salinisation du sol. En effet, elle perturbe le développement des végétaux en limitant l’assimilation des éléments nutritifs [28]. Un niveau de salinité élevé des sols provoque le flétrissement des plantes du fait d’une augmentation de la pression osmotique et des effets toxiques des sels.

La salinité d’une eau est exprimée en termes de conductivité électrique en (µs/cm). Cette dernière caractérise la faculté de l’eau à laisser passer le courant électrique, Elle augmente avec la concentration des ions en solution et la température. Elle est exprimée en µs/cm. Généralement, les valeurs sont ramenées à 25° C [28]. On sait qu’une eau salée est très conductrice, par contre une eau pure est très résistante. Le (tab.5.22) montre la classification de l’eau d’irrigation selon Ayers et Westcot (1976).La plupart des échantillons analyses se situent dans la classe C4. Tableau.5.22 :Classification des eaux basée sur la concentration totale en sels, selon Ayers et Westcot (1976).

Tableau.5.22 :Classification des eaux basée sur la concentration totale en sels, selon Ayers et Westcot(1976).

Classe de salinité	CE ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	Pourcentage des échantillons
C1	< 250	0%
C2	250 - 750	13%
C3	750 - 2250	26%
C4	2250 - 5000	48,3%

Classe C1 : Elle est satisfaisante pour toutes les cultures, exceptée les cultures sensibles ; Classe C2 :

En général, elle est satisfaisante bien que quelques cultures sensibles peuvent être affectées ;

Classe C3 : satisfaisante pour la plupart des grandes cultures, mais des conditions de salinité vont se développer si le lessivage et le drainage ne sont pas adéquats ;

Classe C4: Elle est non recommandée sauf si des cultures tolérantes sont cultivées comme le palmier dattier et si le lessivage et le drainage sont impératifs.

4.3.4.8. Evaluation du risque d'alcalinité

Une grande quantité d'ions de sodium dans l'eau affecte la perméabilité des sols et pose des problèmes d'infiltration. Ceci est dû à l'altération des agrégats des sols. Le sol devient alors dur et compact (lorsqu'il est sec) réduisant ainsi les vitesses d'infiltration de l'eau et d'air, affectant ainsi sa structure et par conséquent la culture n'est plus suffisamment alimentée en eau et le rendement diminue.

L'alcalinisation est le processus par lequel la teneur en Na^{2+} échangeable d'un sol augmente par la fixation sur le complexe adsorbant.

La précipitation rapide des carbonates de calcium et de magnésium permet aux ions sodiques de se fixer sur le complexe. La teneur en ions et du sol provenant des sels alcalins (carbonates et sulfates) conduisent à des pH supérieurs à 8.

Le coefficient utilisé est celui d'adsorption du sodium (SAR) qui exprime l'activité relative des ions de sodium dans les réactions d'échange dans les sols. Dans la palmeraie de la région de Béni Abbés, on remarque que la plupart des points d'eaux analysés appartiennent à la classe S1 avec un pourcentage de 93,5%. Et un seul puits (P6) classer à la classe S3. Et 0% pour les classes S2 et S4 (Tab.5.23).

La précipitation rapide des carbonates de calcium et de magnésium permet aux ions sodiques de se fixer sur le complexe. La teneur en ions Na^{2+} et K^+ du sol provenant des sels

alcalins(carbonatesetsulfates)conduisentàdespHsupérieursà8.

Le coefficient utilisé est celui d'adsorption du sodium (SAR) qui exprime l'activité relative des ions de sodium dans les réactions d'échange dans lessols.

Dans la palmeraie de la région de Béni Abbés, on remarque que la plupart des points d'eaux analysés appartiennent à la classe S1 avec un pourcentage de 93,5%. Et un seul puits (P6) classer à la classe S3. Et 0% pour les classes S2 et S4 (tab.5.23).

Tableau.5.23: Classe d'alcalinité des eaux selon le SAR.

Classe	SAR	Pourcentage des échantillons
S1	< 10	93,5%
S2	10 < SAR < 18	0%
S3	18 < SAR < 26	3,2%
S4	SAR > 26	0%

- **(SAR < 10)** Eau à faible danger d'alcalinisation des sols : c'est une eauexcellente.
- **(10 < SAR < 18)** Eau bonne : danger d'alcalinisation assezappréciable,
- **(18 < SAR < 26)** Eau convenable : danger d'alcalinisationimportant.
- **(SAR > 26)** Eau médiocre.

4.3.4.9. Classification des eauxd'irrigation selon le diagramme deRiverside

Les valeurs obtenues à partir des échantillons analysés ont été reportées sur le diagramme de Riverside (fig.5.37) où on remarque que l'ensemble des points d'eau se situe dans 5 classes :

- C4, S1 : 45% deséchantillons.
- C3, S1 : 29% deséchantillons.
- C4, S3 : 13% deséchantillons.
- C4, S2 : 10 % deséchantillons.
- C2, S1 : 3% des échantillons. Ce qui représente les puits située à la lisière du front du talus du plateau.

En résumé :

- **(C4, S1) et (C4, S2)** :la qualité est médiocre à mauvaise. L'eau est fortement minéralisée. Utilisée uniquement pour des plantes très résistantes aux sels dont le solprésente une bonne perméabilité. C'est le cas de 17 pointsd'eau.
- **C3, S1** : la qualité est admissible, Dans ce cas la salinité doit être contrôlée. L'irrigation des cultures tolérables aux sels sur des sols bien drainés. Cette classe contient9 puits
- **C4, S3** : qualité très mauvaise. A n'utiliser que dans des circonstances exceptionnelles, soit

plantes très résistantes aux sels dont le sol et une bonne perméabilité. Cette classe contient 4 puits

➤ **C2, S1** : la qualité est bonne, Convenable aux plantes qui ont une tolérance aux sels. Cependant son utilisation peut générer des problèmes pour les argiles. C'est le cas de la grande Source de Sidi Othman.

L'étude hydrochimique des eaux de la nappe de la palmeraie de Béni Abbés montre que l'ensemble des eaux ont une forte conductivité électrique, les valeurs varient de 0 jusqu'à 34,45 ms/cm. Les eaux sont relativement minéralisées quand on se dirige du plateau de l'Erg vers l'Oued à cause de l'évaporation intense d'une part, et de la surexploitation de la nappe d'autre part.

D'après l'analyse en composante principale (ACP) et le diagramme de Piper on a conclu que les eaux de la palmeraie appartiennent à la famille des eaux chlorurées et sulfatées calciques et ce pour la majorité des échantillons. L'ACP a montré aussi que la plus part des points d'eau sont fortement minéralisées.

Les résultats des rapports caractéristiques chimiques confirment un écoulement lent des eaux de la nappe alluviale.

Ce qui concerne l'irrigation, les résultats du SAR ont montré que les eaux étudiées, à faible danger d'alcalinisation des sols (eau excellente). Par contre le diagramme de Richards a confirmé que 45% des eaux de la palmeraie sont de qualité médiocre à mauvaise, elles sont menacées par une forte salinisation surtout au niveau de puits (Oued). La salinité des eaux de la palmeraie augmente de l'Est vers l'Ouest, c'est-à-dire de l'Erg vers l'Oued selon l'écoulement des eaux souterraines.

Généralement, la potabilité des eaux passe d'une potabilité excellente à mauvaise selon la position des puits par rapport à l'oued Saoura.

Tableau.5.24 : Classification des eaux d'irrigation (Méthode Richards) [28].

N°	Qualité	Classe	Utilisation
1	Excellente	C1-S1 C1-S2	Utilisation sans danger pour l'irrigation de la plupart des cultures sur la plupart des sols.
2	Bonne	C2-S1 C2-S2	Convenable aux plantes qui ont une tolérance aux sels, cependant son utilisation peut générer des problèmes pour les argiles.
3	Admissible	C2-S3 C3-S1 C3-S2	La salinité doit être contrôlée, irrigation des cultures tolérables aux sels sur des sols bien drainés.
4	Médiocre	C3-S3 C4-S1 C4-S2	En général, Eau fortement minéralisée, utilisée uniquement pour des plantes très résistantes aux sels dont le sol présente une bonne perméabilité.
5	Mauvaise	C3-S4 C4-S3 C4-S4	Eau ne convenant pas à l'irrigation, mais pouvant être utilisée sous certaines conditions, soit plantes très résistantes aux sels dont le sol et une bonne perméabilité.

4.4. Estimation de la recharge par la méthode des isotopes stables

La composition isotopique des eaux souterraines dans les régions arides peut être totalement différente de celle des précipitations locales, et ce, en raison de l'enrichissement de l'eau pendant l'évaporation.

Le déplacement des eaux souterraines par rapport à la droite météorique mondiale permet une estimation grossière de la recharge. Pour des taux de recharge important, l'enrichissement isotopique par évaporation est minimal, alors que pour des valeurs faibles de la recharge, le déplacement des eaux par rapport à la droite météorique est important (Clark & Fritz, 1997). Allison et *al.* (1983) donne les relations empiriques suivantes pour le calcul de la recharge dans les sables assez grossiers :

$$\Delta \text{ }^2\text{H} = 22 / \sqrt{\text{recharge (mm/an)}},$$

Oubien,

$$\Delta \text{ }^{18}\text{O} = 3 / \sqrt{\text{recharge (mm/an)}} \text{ (dérivée de l'équation du deutérium) où } \Delta \text{ }^2\text{H} \text{ et } \Delta \text{ }^{18}\text{O} \text{ représentent l'écart par rapport à la droite météorique.}$$

En appliquant ces équations à nos données de la campagne 2, dont les teneurs en deutérium et oxygène-18 ont été analysées au laboratoire de l'AIEA, nous obtenons les résultats suivants (Mebrouk, 2007) (tableau 5.25) :

Tableau 5.25 : Estimation de la recharge des nappes de la vallée de la Saoura

Nappe	R moy (mm/an)	R min (mm/an)	R max (mm/an)
Grand Erg Occidental	1.03	0.76	1.56
Terrasses quaternaires	0.96	0.69	1.21
Hamada du Guir	3.74	2.36	5.39
Monts d'Ougarta	3.28	/	/

Bien que le nombre de points considérés soit plus important et plus représentatif pour les eaux de la nappe du Grand Erg Occidental, le taux de recharge, aussi bien pour la nappe du Grand Erg Occidental que celle des terrasses est pratiquement le même, de l'ordre de 1 mm/an. De même, celui de la nappe de la Hamada du Guir et celle des monts d'Ougarta sont très proches (3.74 mm/an pour la Hamada du Guir et 3.28 mm/an pour les Monts d'Ougarta (Mebrouk, 2007)). Les deux premières sont principalement localisées rive gauche de la Saoura, tandis que les secondes sont en rive droite, les Monts d'Ougarta ne sont en fait que le prolongement géographique de la Hamada.

Cette valeur de la recharge, bien qu'elle reste faible, pourrait s'expliquer par le taux des précipitations légèrement plus important au-dessus de la Hamada. Quoiqu'il en soit, ces valeurs de la recharge, notamment pour la nappe du Grand Erg, ne peuvent expliquer l'importance de la

réserve et nous confirment donc l'ancienneté de ces ressources.

5. Conclusion

A la lumière des résultats des analyses physico-chimiques des eaux de la région d'étude, on peut déduire que :

Les eaux de la nappe du Grand Erg occidental, présentent une modeste évolution chimique, elles se caractérisent par un pH neutre et des teneurs en minéralisation très faibles. Les eaux sont relativement minéralisées quand on se dirige du plateau de l'erg vers l'oued à cause de l'évaporation intense d'une part, et de la surexploitation de la nappe d'autre part.

Les eaux de la région de Béni Abbés, sont chlorurées sodiques et calciques parfois bicarbonatées calciques. La prédominance des chlorures (Cl^-), du sodium (Na^+), et du calcium (Ca^{++}) est due essentiellement au lessivage des calcaires Mio- Pliocène, et de la présence des lentilles de gypse et des argiles d'une part et aux processus chimiques résultant de l'évapotranspiration d'autre part. Les cartes d'iso teneurs indiquent une augmentation de la concentration de la salinité de l'Est vers l'Ouest, c'est-à-dire de l'erg vers l'oued selon l'écoulement des eaux souterraines. La potabilité des eaux passe d'une potabilité excellente à mauvaise selon la position des puits par rapport à l'oued Saoura. Les eaux de la nappe du grand Erg restent le choix optimal pour la potabilité.

Les paramètres physico-chimiques, les résultats d'analyses des éléments majeurs ainsi que des éléments en trace ont été étudiés afin d'expliquer l'origine de la minéralisation et son évolution à travers la vallée de la Saoura.

Les eaux sont essentiellement de type chloruré calcique, faciès intermédiaire entre des eaux bicarbonatées calciques, peu évoluées, caractérisant généralement les eaux typiques de l'Erg, et des eaux chlorurées sodiques, plus évoluées, caractérisant les eaux des terrasses alluviales et de l'inféro-flux. Cette évolution de la minéralisation a été mise en évidence par le traitement statistique multivariable (Analyse en Composantes Principales). L'ACP a montré aussi que la plus part des points d'eau sont fortement minéralisées. Les résultats des rapports caractéristiques chimiques confirment un écoulement lent des eaux de la nappe alluviale.

En plus de 40 ans, la minéralisation des eaux typiques de la nappe de l'Erg est relativement insensible au changement chimique. Par ailleurs, une évolution du faciès chimique de certaines eaux dans le système aquifère étudié a pu être notée entre les deux périodes 1964 et 2016.

Afin d'expliquer les mécanismes d'acquisition chimique dans les eaux, les indices de saturation par rapport aux différents minéraux ont été calculés. Les eaux sont généralement sursaturées par rapport à la calcite, la dolomite et la silice (quartz et calcédoine), proches de la saturation par rapport au gypse et l'anhydrite et sous-saturées par rapport à l'halite.

Ce qui concerne l'irrigation, les résultats du SAR a montré que les eaux étudiées, à faible danger d'alcalinisation des sols (eau excellente). Par contre le diagramme de Richards a confirmé que 45%

des eaux de la palmeraie (nappe alluviale et inféro -flux) sont de qualité médiocre à mauvaise, Elles sont menacées par une forte salinisation surtout au niveau des puits situées à la proximité de l'oued. La salinité des eaux de la nappes des terrasses alluviales et Inféro-flux augment de l'Est vers l'Ouest, c'est-à-dire de l'Erg vers l'Oued selon l'écoulement des eaux souterraines.

Généralement, La potabilité des eaux passe d'une potabilité excellente à mauvaise selon la position des puits par rapport à l'oued Saoura.

Chapitre 06

HYDROCHIMIE ISOTOPIQUE

ETUDE HYDROCHIMIE ISOTOPIQUE

1. Introduction

Depuis le début des années 1970, les techniques isotopiques sont de plus en plus mises à contribution dans l'étude des eaux souterraines. Elles sont ainsi devenues, de nos jours, l'un des principaux outils de recherche appliquée dans le domaine. Les teneurs en isotopes stables (^{18}O , ^2H , ^{13}C), radioactifs (^3H , ^{14}C , ^{36}Cl) mais également en gaz rares (Xe, Ne, Ar, Kr, He) permettent de préciser l'origine des masses d'eau de ces aquifères, ainsi que la variabilité de leur recharge dans le temps et la reconstitution des climats anciens (Moulla et al., 2002).

Dans le cadre des études de la délimitation des aires d'alimentation des captages, les outils isotopiques permettent d'acquérir des connaissances sur les caractéristiques hydrogéologiques indispensables et en particulier la détermination des lignes de flux. La définition de la zone et de l'aire de recharge, l'estimation des temps de transfert ou temps de résidence des eaux, l'existence d'un ou plusieurs aquifères et de possibles drainances entre ces différents systèmes et l'influence des eaux de surface (Blavoux et Letolle, 1995 ; Etcheverry, 2002 ; Gourcy et Petelet, 2011).

Nous présentons, dans ce qui suit, quelques isotopes et l'apport des techniques isotopiques dans l'étude des eaux souterraines de la haute vallée de la Saoura.

Les teneurs en isotopes stables font l'objet de mesures relatives. Elles sont exprimées à l'aide de la notation delta, δ , définie par Craig (1961a), comme étant le rapport d'abondance R (1) par comparaison avec un standard (2). Ce standard VSMOW (*Vienna Standard Mean Ocean Water*) accepté comme référence internationale depuis plus d'une trentaine d'années représente la composition moyenne des eaux océaniques.

Les résultats s'expriment en δ ou parts pour mille de différence par rapport au VSMOW.

Pour mieux préciser les conditions hydrodynamiques reconnues entre l'atlas saharien, la plate-forme Saharienne et la vallée de la Saoura et le fonctionnement du système aquifère de la région de Béni Abbes, il nous a paru nécessaire de prendre en compte l'ensemble des données disponibles sur le Sahara Nord occidental. A cet effet, nous allons présenter la synthèse de toutes les données isotopiques existantes dans la région étudiée.

Les données isotopiques sont essentiellement tirées des documents de Conrad et Fontes (1972), Eress (1972d), Conrad et Olive, (1972), (Roche (1973), Yousfi (1984), Gonfiantini et al. (1974), IDROTECNECO (1982c), Aranyossy et Mamou (1985), Salem et al. (1996), Edmunds et al. (2003), Guendouz et al. (2003), OSS (2003a), Mebrouk (2007).

2. Aperçu sur les isotopes

Les isotopes naturels intéressant les phénomènes hydrogéologiques sont de 02 types :

2.1. Isotopes stables

a. Oxygène-18, deutérium

Les éléments constitutifs de la molécule d'eau donnent des informations sur l'origine et l'histoire de l'eau. On peut les utiliser (Blavoux, 1978) soit :

- En reconnaissance d'une région donnée ; ce qui permet :
 - D'établir un cliché isotopique instantané d'une province hydrogéologique,
 - de comparer des teneurs
 - de confronter les teneurs de l'aquifère à celles de la pluie.
- Par l'étude détaillée d'écoulements particuliers :

En recherchant les réactions de l'aquifère ou signal d'entrée constitué par des variations annuelles ou saisonnières des teneurs de la pluie ou de l'infiltration. L'analyse avec l'oxygène précise les caractéristiques de l'aquifère et les mécanismes de son fonctionnement (alimentation en particulier). Les teneurs en isotopes stables font l'objet de mesures relatives. Elles sont exprimées à l'aide de la notation (δ), définie par Craig (1961) :

$$\delta = [(R_{\text{échantillon}} / R_{\text{étalon}})] - 1 \times 1000 \text{ ‰}$$

(R rapport d'abondance isotopique)

$$^{18}\text{O} / ^{16}\text{O} \quad \text{ou} \quad ^2\text{H} / ^1\text{H}$$

$$R = \frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \quad \text{ou} \quad R = \frac{^2\text{H}}{^1\text{H}} \quad (\text{où } R : \text{ rapport d'abondance isotopique}) \quad (1)$$

$$\delta = \left[\frac{R_{\text{échantillon}}}{R_{\text{VSMOW}}} - 1 \right] * 1000 \text{ ‰} \quad (2)$$

D'après cette relation les valeurs de δ positives indiquent que l'échantillon est enrichi vis à vis de l'étalon de référence et inversement. Pour toutes les eaux qui ne sont pas soumises à des évaporations intenses, le rapport entre la concentration en Deutérium et Oxygène-18 est exprimé par la relation (fig.6.1) :

$$\delta \text{ D} = 8 \cdot \delta^{18}\text{O} + 10$$

Etudiant les différents stades de l'évaporation d'un Chott Algérien, J. Ch. Fontes et R. Gonfiantini (1967) ont donné la relation (fig. 139) :

$$\delta \text{ D} = 4,6 \cdot \delta^{18}\text{O} - 13$$

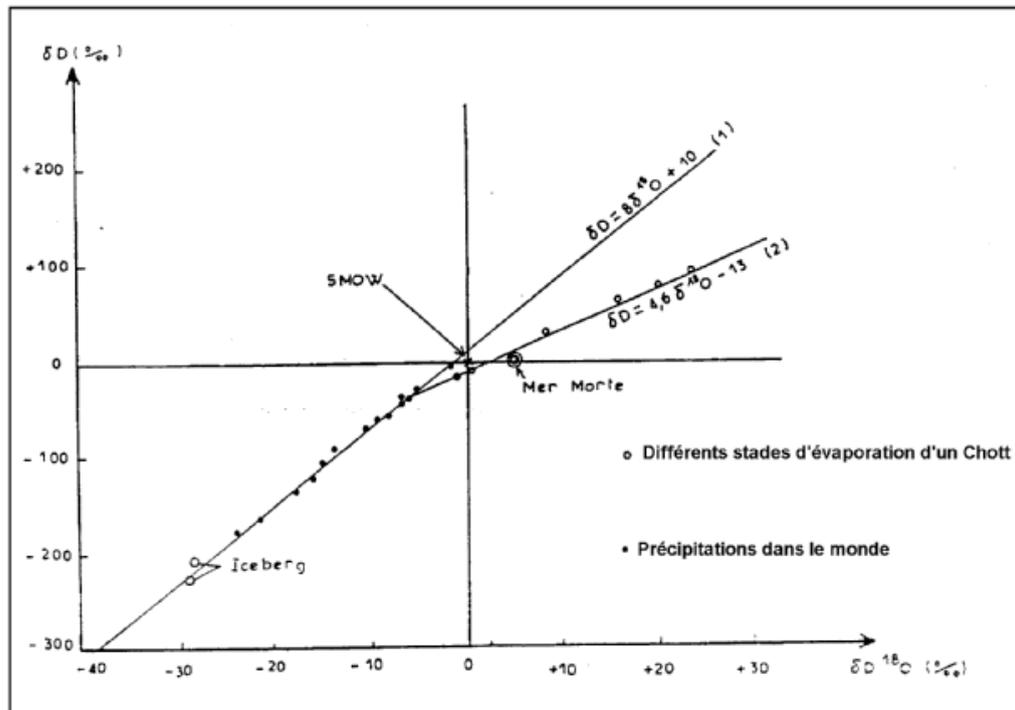


Figure 6.1 : Corrélation entre la composition isotopique de ^{18}O et ^2H

(J. CH. Fontes et R. Gonfiantini, 1967)

Par exemple, une valeur $\delta^{18}\text{O} = -10\text{‰}$ signifie que l'eau analysée est déficitaire en ^{18}O de 10 ‰ par rapport au SMOW. L'étude de la covariation en ^2H et ^{18}O est réalisée par un graphique de $\delta^2\text{H}$ en fonction de $\delta^{18}\text{O}$ pour lequel la fonction de corrélation mondiale définit la ligne des eaux météoriques (CRAIG, 1961) : $\delta^2\text{H} = 8\delta^{18}\text{O} + 10$

b. Carbone 13 et Soufre 34

En hydrogéologie, les isotopes stables ^{13}C et ^{34}S sont d'un grand intérêt puisqu'ils permettent l'étude des environnements sédimentaires d'origine organique (carbonates) et évaporitique (à sulfates et sulfures). Ces isotopes sont cependant encore peu utilisés du fait de la complexité des réactions et processus mis en jeu. Les abondances relatives des isotopes du carbone et du soufre sont (FRITZ et FONTES, 1980) : ^{12}C : 98,89% ; ^{13}C : 1,11% ; ^{14}C : 10-10% ; ^{32}S : 95,02% ; ^{33}S : 0,75% ; ^{34}S : 4,21% ; ^{36}S : 0,02%. La variation $\delta^{13}\text{C}$ (par rapport au standard des carbonates PDB « Pee Dee Belemnite ») est contrôlée par l'ensemble du cycle géochimique des carbonates (dissolution et précipitation), le carbone gazeux (CO_2) et le carbone organique (organismes vivants et matières organiques de dégradation). Pour le carbone gazeux (CO_2) dans le sol $\delta^{13}\text{C}$ est égale à -20 ‰. Le $\delta^{13}\text{C}$ des roches carbonatées est d'environ 0 ‰, ce qui est compréhensible car elles sont précipitées à partir de l'océan qui a une valeur similaire (FETTER, 1994). Dans l'atmosphère, $\delta^{13}\text{C}$ est égale à -7 ‰ (DREVER, 1988). Son évolution dans la phase gazeuse est principalement gérée par la respiration des organismes et leur dégradation, alors qu'elle est gérée dans la phase aqueuse par la géochimie et l'oxydation de la matière organique dissoute.

2.2. Isotopes radioactifs : Tritium, Carbone 14 et Chlore 36

C'est la stratosphère qui peut être considérée comme la source du tritium et du carbone 14 (^{14}C). Ces isotopes ont une double origine :

- Par action des rayons cosmiques sur les éléments présents dans la stratosphère.
- Conséquence des explosifs thermonucléaires.

Depuis la fin des essais thermonucléaires, les teneurs en tritium et en carbone 14 diminuent régulièrement suivant une loi périodique très caractéristique à composante saisonnière.

L'hydrogène 3 (tritium), le carbone 14 et le chlore 36 sont des isotopes radioactifs, c'est-à-dire qu'ils se désintègrent selon une cinétique exponentielle constante. Leurs temps de demi-vie (i.e. le temps nécessaire à la désintégration de 50 % de la masse initiale) sont de 12,26 ans pour ^3H , 5730 ans pour ^{14}C et $3,01 \cdot 10^5$ ans pour ^{36}Cl . Ces isotopes sont utilisés pour dater des eaux dont l'âge est inférieur à 40 ans pour ^3H , 40000 ans pour ^{14}C , et potentiellement 4 millions d'années pour ^{36}Cl .

Le tritium (hydrogène 3, ^3H) est un excellent dateur des eaux souterraines récentes. L'unité tritium (UT) représente la présence d'un atome de ^3H pour 1018 atomes d'hydrogène ^1H , provenant essentiellement de l'interaction entre les neutrons du rayonnement cosmique et l'azote atmosphérique (tritium naturel). Avant 1953, l'eau atmosphérique contenait moins de 10 unités tritium. A partir de 1953, les nombreux essais nucléaires de surface qui ont eu lieu ont considérablement enrichi l'atmosphère en ^3H ; se traduisant par un accroissement du taux de tritium dans l'eau souterraine. Ainsi, le tritium peut être utilisé de manière quantitative pour dater l'eau souterraine en ce sens qu'une eau souterraine présentant une concentration $2 < \text{UT} < 4$ est antérieure à 1953, si la concentration est significativement > 10 à 20 UT, l'eau est récente, elle a été en contact avec l'atmosphère depuis 1953. Cet isotope permet de cette façon d'évaluer assez précisément le taux de renouvellement des ressources en eau souterraine.

Malheureusement, du fait des variations rapides en tritium induites par les essais nucléaires, l'application directe du ^3H pour la datation précise de l'âge des eaux souterraines est délicate (FETTER, 1994)

Le ^{14}C est naturellement produit dans l'atmosphère par le bombardement de l'azote par des rayons cosmiques (De VRIES, 1959). Se combinant à l'oxygène pour former du dioxyde de carbone CO_2 , ainsi le CO_2 atmosphérique contient une proportion relativement constante ($1,2 \cdot 10^{-10}$ %) de $^{14}\text{CO}_2$. Une fois le $^{14}\text{CO}_2$ atmosphérique incorporé sous une forme où il est isolé du ^{14}C moderne, l'activité du ^{14}C décroît alors régulièrement. La mesure de cette radioactivité (en % par rapport à l'originale) conduit, ainsi, à la détermination de l'âge de la substance organique.

Ce processus est mis à profit dans l'étude des eaux souterraines. Les précipitations, qui

contribuent à la recharge des nappes souterraines, contiennent du dioxyde de carbone dont l'activité en ^{14}C est connue. Quand l'eau s'infiltré dans le sol, du carbone additionnel peut provenir du CO_2 du sol ou de la dissolution des minéraux carbonatés. Il en résulte une augmentation de la concentration globale en carbone de l'eau souterraine. La datation de l'eau souterraine tient compte de ces deux apports en introduisant des facteurs correctifs dans l'interprétation des mesures d'activité, reflétant la « dilution » du carbone atmosphérique radioactif par le carbone « inactif » d'origine minérale (FETTER, 1994). L'équation de désintégration radioactive est donnée par l'équation ci-dessous :

$$A(t) = A_0 e^{-\lambda t} = A_0 2^{-t/t_{1/2}}$$

Où A est l'activité ^{14}C au temps t ; A_0 l'activité initiale (usuellement 100 pmc pour l'eau de pluie ; pmc = % en carbone moderne), λ la constante de désintégration = $\ln(2)/t_{1/2}$; $t_{1/2}$ le temps de demi-vie. MULLER et MAYO (1986) ont démontré qu'on peut s'attendre à des variations de $\pm 20\%$ sur la base de la variation du contenu en ^{13}C du carbone « inactif » des roches carbonatées. Le ^{36}Cl peut aussi être utilisé pour dater une eau souterraine plus ancienne que celle pouvant être datée par le ^{14}C . On peut déterminer le rapport ^{36}Cl au Cl total.

Plus ce rapport est élevé, plus l'eau est jeune. L'eau océanique est suffisamment ancienne pour que peu (ou pas) de ^{36}Cl s'y trouve (FETTER, 1994)

3. Résultats et discussion des données isotopiques

3.1. La nappe du Continental intercalaire

Les teneurs en isotopes stables (^{18}O , ^2H) ou radioactifs (^{14}C) liées à l'origine des eaux permettent de distinguer trois ensembles. Cette subdivision isotopique correspond, dans une large mesure, à la répartition hydrogéologique de la nappe du Continental intercalaire en trois domaines : le bassin central, le bassin occidental et le bassin oriental (Fig.6.2). Nous verrons que, dans chaque bassin, les études isotopiques donnent des preuves évidentes d'une éventuelle recharge actuelle aux zones de recharge déjà définies.

La composition des eaux du CI près des affleurements de l'Atlas est confondue avec celle de la droite des eaux météoriques avec des valeurs de -6,3 ‰ en ^{18}O et -40 ‰ en ^2H . Significativement appauvri par rapport à la pluie actuelle. Cette eau, la plus récente, contiendrait aussi une composante d'eau plus ancienne (Baba Si, 2005).

Les analyses de radiocarbone résultant de cette étude (EDMUNDS et al. 2003) ainsi que des études précédentes (Conrad et Fontes, 1972), qui montre la relation activités-âges du ^{14}C des eaux de la région de Béni Abbès sont portées dans le tableau 6.1.

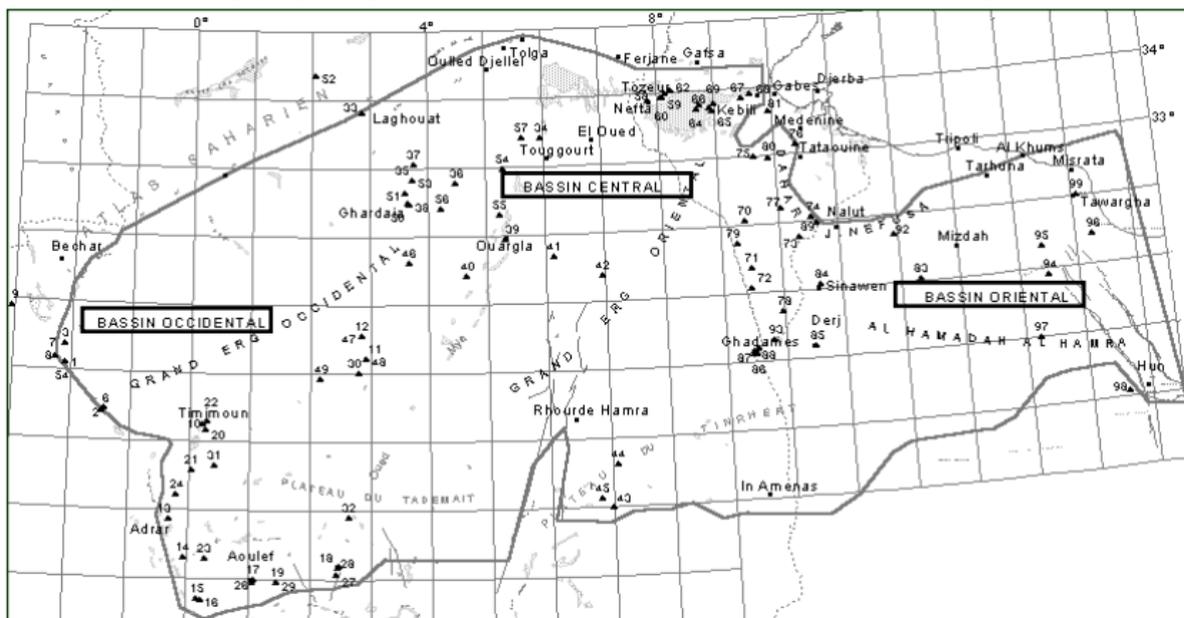


Figure 6.2 : Subdivision isotopique, de la nappe du CI en trois domaines (OSS, 2003)

Tableau 6.1 : Relation activités – âges du ^{14}C des eaux de la région de Béni Abbès (Conrad et Fontes, 1972)

LACALITE	AQUIFERE	TYPE D'OUVRAGE	^{14}C (%)	y= Age estimé
Béni Abbès	Néogène	Foggara	104.9	20
Ain eLDhob	Paléz.	puits	106.6	20
Igli	Mio-Plioc.	puits	38.8	1312
Béni Abbès	Mio-Plioc.	exsurgence	31.1	3239
Béni Abbès	Mio-Plioc.	exsurgence	32.8	2779
Berzaz	Mio-Plioc.	puits	38.3	1429
Hi.Zguila	Hd.Guir	puits	49.4	-791
Hi.Zguila	Hd.Guir	puits	48.4	-613
hamaguir	Hd.Guir	forage	18.9	7575

Les données de radio carbone limitées à la zone de recharge de l'Atlas saharien (> 60 % pmc), appuyées par les résultats d'analyse des isotopes stables indiquent que la recharge ancienne (Holocène) et actuelle a eu lieu à une distance de 100 km des montagnes atlasiques (Fig.6.3). Ce n'est que dans les zones de recharge ou à proximité de celles-ci que l'on relève des teneurs en ^{14}C assez élevées. Ailleurs, les eaux ont en général une activité en ^{14}C faible ou nulle. Ainsi, 54.7% de carbone moderne ont été relevés à Laghouat sur le revers Sud de l'Atlas saharien (GONFIANTINI et al. 1974), 54% à El Assafia1 et 60% à Djebel Makrane (U1) (EDMUNDS et al. (2003).

Des teneurs en tritium assez significatives ont été trouvées dans les eaux de la partie centrale de l'Erg occidental (CONRAD et OLIVE, 1972, CONRAD et al, 1975), ce qui suggère la présence d'une fraction d'eau récente. L'étude des précipitations disponibles à Beni-Abbès montre que des teneurs basses en isotopes lourds peuvent être relevées à l'heure actuelle sans faire intervenir de période climatique plus humide (CONRAD et FONTES, 1970 ; FONTES, 1976). Ces auteurs ont admis que la recharge de la nappe de l'Erg occidental ne peut être strictement paléo climatique. Il existe des réserves souterraines initialement héritées de périodes anciennes humides qui sont réalimentées de façon très intermittente par les événements pluvieux exceptionnels.

a. Cartographie des âges des eaux souterraines

Il a donc été possible de collecter une série de données représentatives, bien réparties dans le domaine du SASS. La figure 6.3, résultat d'une interpolation sur un support cartographique, représente la répartition des activités en ^{14}C mesurées aux forages, traduite en âges-équivalents des eaux de la nappe du Continental intercalaire.

La lecture de la carte des âges (Fig.6.3) rend bien compte à la fois du gisement géologique de l'aquifère, et de son comportement hydrodynamique. En effet, et bien qu'il soit difficile de faire correspondre l'âge hydrodynamique des eaux avec leur âge radiométrique, on retrouve clairement, dans la répartition spatiale des âges au ^{14}C , l'organisation du SASS selon les trois bassins géologiques et hydrodynamiques.

- Dans le Bassin Occidental, les eaux sont toutes jeunes (inf. à 10000 ans). Tout au long de leur parcours (plus de 500km) de la zone de recharge principale qu'est l'Atlas saharien, vers la zone d'exutoire principale qu'est la vallée de la Saoura, du Gourara, du Touat et du Tidikelt, les eaux du Continental Intercalaire continuent de se renouveler tout au long de leur cheminement. Cette observation est en cohérence avec la géologie régionale ; en effet, le CI n'est plus recouvert ici par le Crétacé supérieur et la nappe du CI est à surface libre.
- Dans le Bassin Oriental, les eaux sont anciennes.
- Dans le Bassin Central, les eaux sont toutes anciennes (sup. à 20000 ans),

b. Gradients des temps de séjour

La cartographie du gradient des temps de séjour moyens peut fournir des indications sur les vitesses de circulation moyennes des eaux souterraines.

Sur la base d'une telle constatation, il a été admis dans la partie algérienne (DRAY & al, 1983) que les eaux de la nappe du Continental Intercalaire correspondent à une période climatique plus froide et plus humide que celle actuelle.

En effet, l'enrichissement en ^{18}O , l'excès de ^2H , les activités de ^{14}C et les teneurs de tritium (^3H) relevés aux zones de recharge sont autant de preuves irréfutables d'une alimentation actuelle des nappes du Sahara septentrional. Cette alimentation s'ajoute aux eaux anciennes.

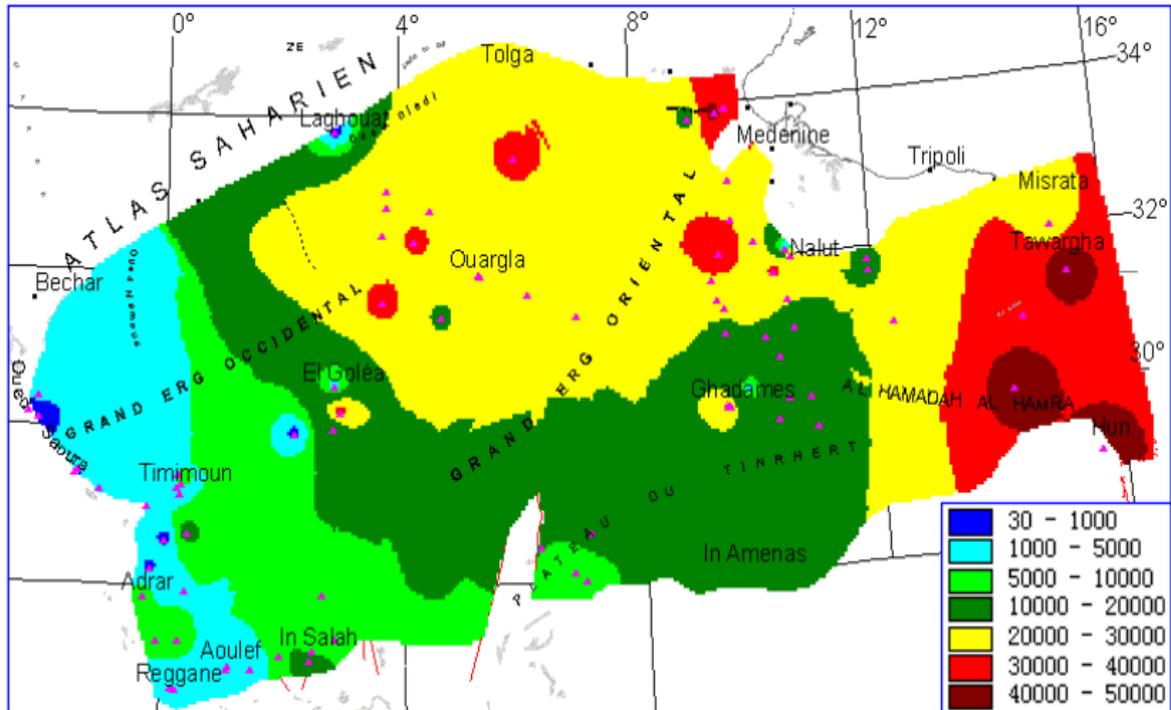


Figure 6.3 : Age des eaux du CI d'après la teneur en carbone 14(SAAS, 2003)

3.2. Nappe du grand Erg occidental

Cette nappe doit son originalité et son individualité à sa localisation géographique sous le Grand Erg occidental. Les échantillons dont nous faisons état ont été prélevés sur les bordures Sud et Ouest de la nappe (fig. 6.4).

- Oxygène-18 et deutérium

Un certain nombre d'échantillons de pluie, collectés en 1975 et 1976 à la station de Béni Abbes par. Yousfi (1984) étaient destinés à l'étude de ^{18}O et ^2H . L'examen des échantillons prélevés dans la région de Béni Abbes 1, 2, 3 et 4 montrent un bon alignement sur la droite des eaux météoriques (fig. 6.5).

Les précipitations n'auraient donc subi aucune évaporation ni au cours de leur chute, ni au cours de leur stockage, qui a duré plusieurs années.

L'échantillon 5 représente les précipitations du mois de mars ; il semble avoir subi une forte évaporation et se situerait parfaitement sur la droite d'évaporation définie par Fontes et Gonfiantini (1967).

Il apparaît donc que les pluies qui tombent pendant les mois les plus froids, favorables à l'infiltration (octobre à mars) ne subissent qu'une évaporation très faible, à l'inverse des précipitations des périodes chaudes qui à la limite, peuvent être entièrement évaporées.

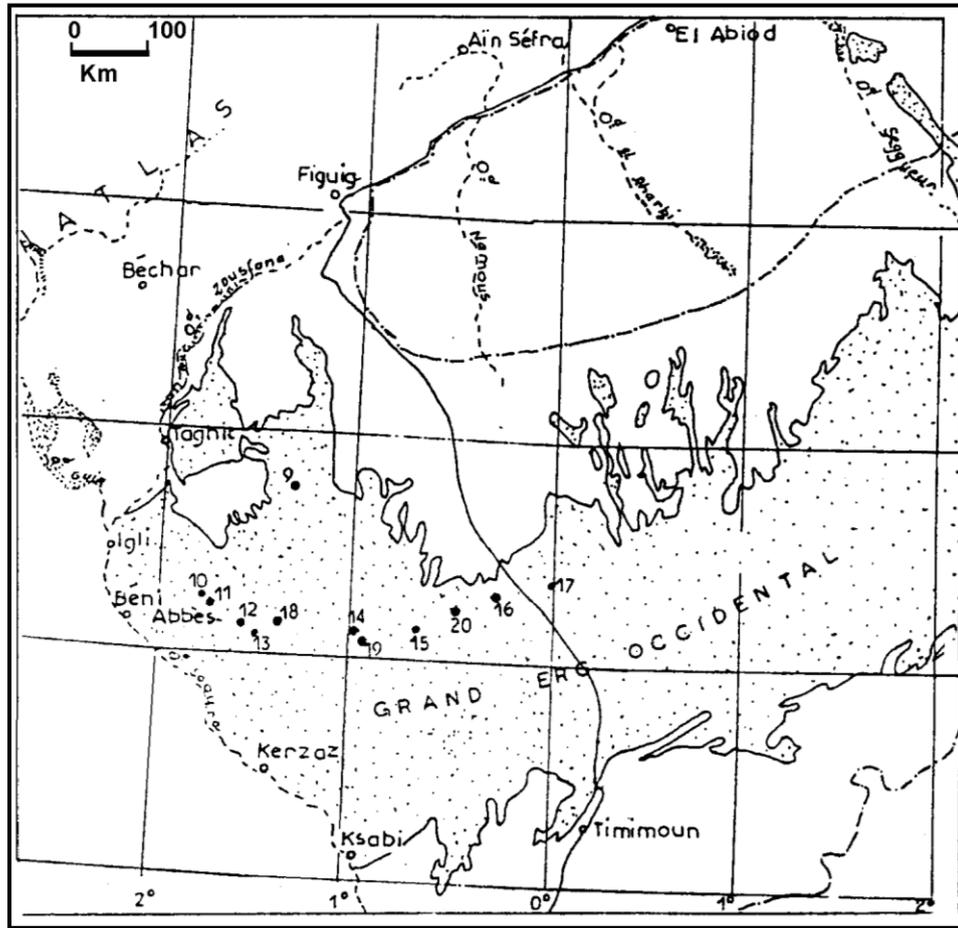


Figure 6.4 : Carte des points d'eau de la nappe du Grand Erg Occidental (G. Conrad et al, 1975)

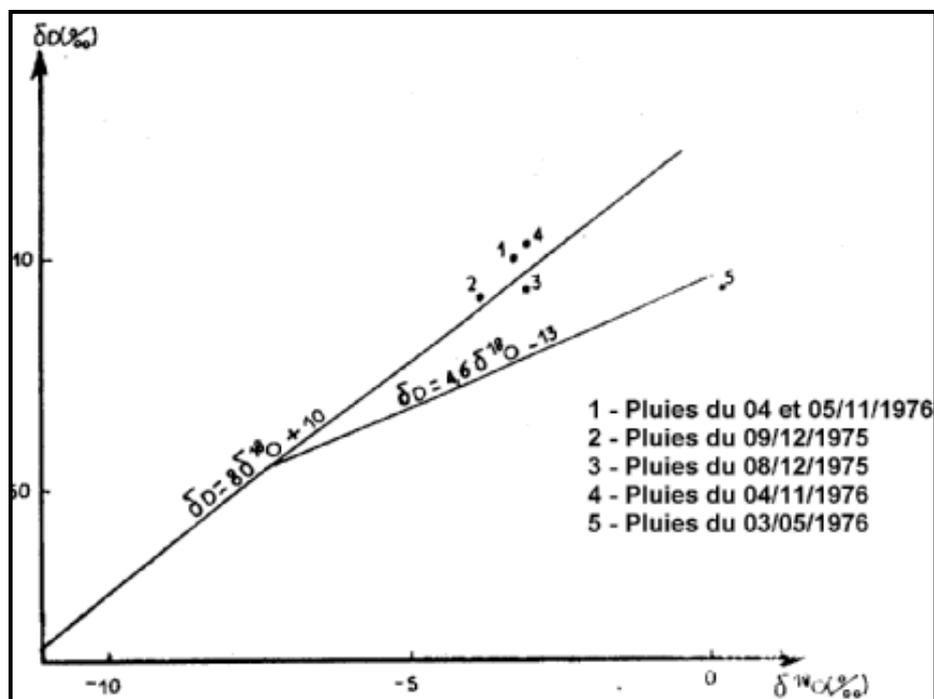


Figure 6.5 : Teneur en Deutérium et en Oxygène-18 des précipitations à Béni Abbès (Yousfi, 1984)
 Les échantillons de la nappe de l'Erg se placent en dessous de la droite des eaux météoriques, témoignant d'un enrichissement en ¹⁸O.

Il en est de même pour une série d'échantillons prélevés au Nord du grand l'Erg, au sein des eaux superficielles dont la piézométrie indique qu'elles passent ensuite sous l'Erg. On a ici une valeur moyenne de -9.1% en ^{18}O et -67% en ^2H .

Ces valeurs s'inscrivent sur la droite des eaux de l'Erg et correspondent à la composition initiale des eaux de l'Erg avant évaporation (fig. 6.6).

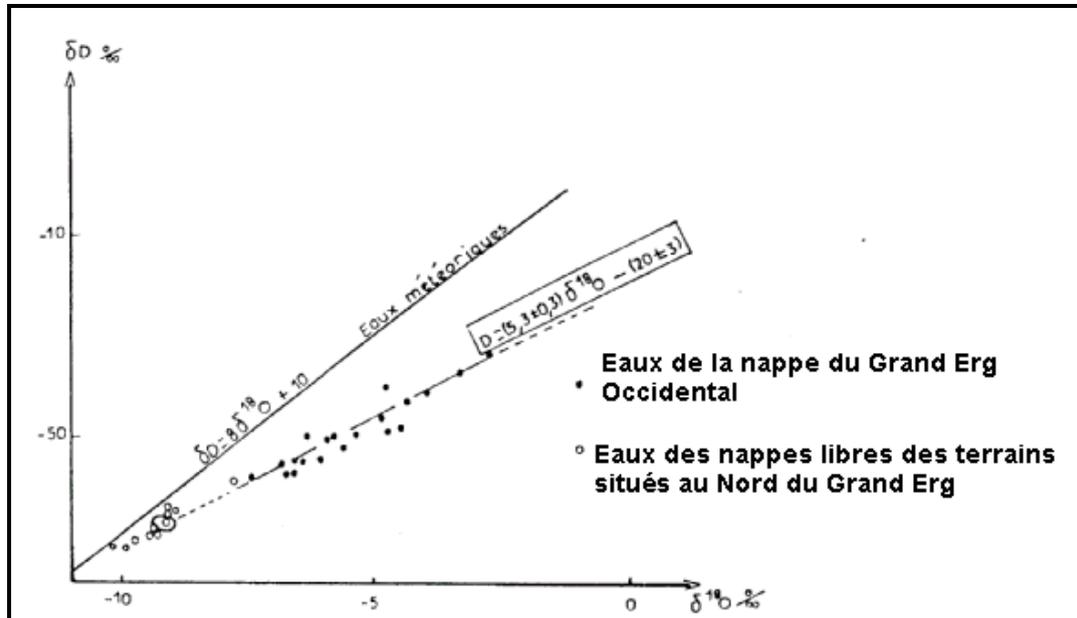


Figure 6.6 : Corrélation entre les teneurs en ^{18}O et ^2H dans les eaux de la région du Grand Erg (Gonfiantini et al, 1974 in Fontes, 1976)

- **Tritium**

Dans la nappe des calcaires Carbonifères de l'Erg et de la grande source de Béni Abbes, les teneurs de Tritium sont comprises entre 07 et 20 unités Tritium (U.T). On serait en présence des :

- Eaux anciennes : teneurs < 1 UT (échantillons 5, 11, 18, 19, 20, 21 et la grande source de Béni Abbes le 12/11/1970).
- Eaux antérieures à 1952 : teneurs < 2.4 UT (échantillons 2, 15, 16, 29 et 35).
-

La teneur moyenne en Tritium de ces échantillons est de 2.6UT, valeur faible pour l'associer à une alimentation survenue au cours des dernières années qui ont précédé leur prélèvement.

Les fortes pluies d'octobre 1967 à Béni Abbes (65 mm en 24 heures, avec des activités comprises entre 100 et 200 UT), ne paraissent pas à ce jour avoir atteint la nappe, puis qu'aucune activité mesurable n'a été enregistrée aussi bien à la grande source que sur les Foggaras. Il en est de même pour les précipitations les plus faibles.

Cependant, des teneurs de 17 et 20 UT, témoignent de la contribution des précipitations actuelles contenant du Tritium d'origine thermonucléaire. Bien sûr, l'hypothèse d'un mélange partiel des eaux récentes n'est pas à écarter mais il faudra dans ce cas définir la zone probable de recharge.

- **Carbone 14**

La valeur moyenne du ^{14}C est de 59 % sur l'ensemble des échantillons, à l'exception de l'échantillon n° 5 qui correspond à un forage profond et montre des eaux anciennes, d'âge supérieur à 30.000 ans. Les dépôts lacustres inter dunaires comme ceux de la lisière du Grand Erg donnent une activité moyenne de 50 %.

Sur ces bases, l'âge radiométrique des eaux de la nappe du Grand Erg pourrait s'inscrire entre 4.000 et 10.000 ans (Conrad, 1968). Nous admettons qu'il en est de même pour les eaux des calcaires Carbonifères et celles de la grande source.

Les teneurs variables souvent élevées du ^{14}C des eaux traduisent le fait que les réserves héritées des périodes plus humides se trouvent mêlées à un apport sporadique actuel.

Une série de données isotopique sont reportées au tableau 6.2

Tableau 6.2 : Données isotopiques sur les eaux de la nappe du Grand erg occidental sur le front de déversement le long de la Saoura (Conrad et Fontes, 1970).

Localisation	date	$\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ vs SMOW	$\delta^2\text{H}\text{‰}$ vs SMOW	$^{14}\text{C}\text{‰}$	$\delta^{13}\text{C}\text{‰}$	^3H en UT	R .S en g /l
Béni-Abbes Grande source	01 /12/70	-5,5	-47	31,1±0,3	-7,0	-	356
Béni-Abbes	2/12/70	-5,4		32,8±0,2	-5,5		427
Béni-Abbes	06/12/71	-4,8	-	93,6		≤1	417
Béni-Abbes	07/04/72	-4,5		40	-		426
Béni-Abbes	03/12/73	-5,32	-	34,4±0,9	-5,9	-	464
Foggara CNRS à Béni-Abbes	01/12/70	-5,5	-	104,9±0,9	-9,5	-	763
Hassi Rokna	06/12/70	-5,0	-	53	-5,7	3±1	883

3.2.1. Etude isotopique des eaux de la Grande Source

Pendant la période 1965-1973, des prélèvements systématiques de l'eau de la Grande Source de Béni-Abbes ont été analysés. Cette source représenta une exurgence karstique très importante (débit de 28 à 291/s ±1) alimentée par la nappe du Grand erg occidental. L'oxygène-18 a été dosé systématiquement. Les températures mesurées d'une manière grossière au Moment des prélèvements sont toujours stables autour de 25-26°C.

Les valeurs en oxygène-18 sont assez stables. Les eaux de la source sont exemptes de tritium décelable.

La moyenne des valeurs pour la grande source s'établit à

$\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ vs SMOW=-5,05 pour 78 mesure

$\delta^2\text{H}\text{‰}$ vs SMOW=-58,4 pour 5 mesure

en 1970, les valeurs obtenues pour les mêmes points de prélèvement sont comme suit (Conrad et Fontes, 1970).

Grande source : $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ vs SMOW=-4,9‰ pour 40 mesure.

Foggara CNRS : $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ vs SMOW=-4,3‰ pour 11 mesure.

La moyenne actuelle des valeurs pour la foggara du laboratoire du CNRS s'établit à :

$\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ vs SMOW=2,83 pour 47 mesure.

Mais l'activité en tritium n'est pas décelable. ÜB, GC SAH 70/2 (30-11-70).

L'étude détaillée de la nappe du Grand Erg nous permet de mettre en évidence une recharge actuelle indubitable dans la partie massive de l'erg et de faire apparaître une spécificité de composition isotopique des eaux des aquifères dunaires. Dans ce milieu particulier et souvent très homogène, les eaux acquièrent, par suite de phénomènes d'éviration complexes, une forte concentration en isotopes stables tout en gardant une faible minéralisation globale. (Conrad, 1972).

3.2.2. Teneurs en Tritium des eaux de nappes

Les résultats de mesures de la quarantaine d'échantillons ainsi que leur teneur en $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ (Mebrouk, 2005). La limite de détection de nos mesures en tritium est de 0.4 UT. Bien que les résultats nous paraissent plausibles comparés à nos connaissances sur la région, ces mesures doivent être considérées avec précaution vu le temps écoulé entre la date de prélèvements et la réalisation des analyses au CRNA d'Alger, soit plus de deux ans, pour raison de panne d'appareillage (Mebrouk, 2007). Pour l'ensemble des nappes considérées, les teneurs varient entre 0 et 9.6 UT.

3.3. Nappe de la Hamada du Guir

Cette nappe située en rive droite du Guir et de la Saoura est caractérisée par des ressources en eaux souterraines limitées. Les exutoires naturels sont peu nombreux. Le tableau 6.3 résume les teneurs isotopiques des principaux points d'eau de la Hamada.

Tableau 6.3 : Teneurs isotopiques des eaux de la Hamada du Guir (Conrad, 1964)

Points d'eaux	Date	T (°C)	¹⁸ O SMOW	Tritium U.T	Carbone 14 ¹⁴ C	RS Mg/l
Zguilma Es-Srir	22.09.64	25,1	- 9,6	} → < 26	-	1130
	27.09.64	26	- 8,6			1130
	23.11.64	17	- 9,0			1140
	25.04.68	-	- 9,9			1142
Zguilma El-Kébir	02.09.64	24	- 10,4	} → < 23		-
	27.09.64	25	- 10,0			1060
	23.11.64		- 8,2			1155
Zguilma Es-Srir	12.1970	17,5	- 9,74	-	49,4 ± 0,4	1362
Zguilma El-Kébir	12.1970	21	- 10,20	-	48,4 ± 0,5	1136
Hamaguir	12.1971	24		-	18,9 ± 1,5	885
Boul mane	12.1971	-	- 7,2	-	-	1600

- Oxygène 18

Les valeurs sont faibles, variant entre - 7,2 à - 10,20. L'évaporation y semble réduite, vraisemblablement liée à l'importance de l'infiltration directe par les fissures.

- Tritium

Les teneurs oscillent autour d'une valeur moyenne 25,5 U.T, traduisant l'apport de recharges actuelles, qui en tout état de cause reste très minime.

- Carbone 14

Les activités en ¹⁴C donnent une moyenne de 48,9 % pour les deux Zguilmas ; on aurait ici des eaux d'un âge voisin de 1.000 ans, alors que celle du forage d'Hamaguir à un âge supérieur à 30.000 ans. La hamada du Guir discordante sur le Paléozoïque se révèle identique aux eaux des nappes libres situées au Nord du Grand Erg, par la faible teneur en ¹⁸O. Le rapport ²H/¹⁸O la place légèrement au-dessous de la droite des eaux météoriques. En raison des débits insignifiants et les faibles teneurs en ¹⁴C, cette nappe est considérée comme fossile. Son activité a été forte au Pléistocène moyen et supérieur, par l'importance les travertins étagés d'Hassi Zguilma témoignant de l'existence de fortes exurgences fossiles et attestent de la baisse du niveau piézométrique au cours de l'Holocène (Mebrouk, 2005).

3.4. Teneurs isotopiques des eaux de la région de Béni Abbés

3.4.1. Relation entre $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$ dans les eaux des précipitations à Béni-Abbés

La teneur moyenne pondérée en isotopes lourds des pluies à Béni-Abbés estimée à partir de l'ensemble des données considérées est de -5.5‰ VSMOW (Conrad, 1972).

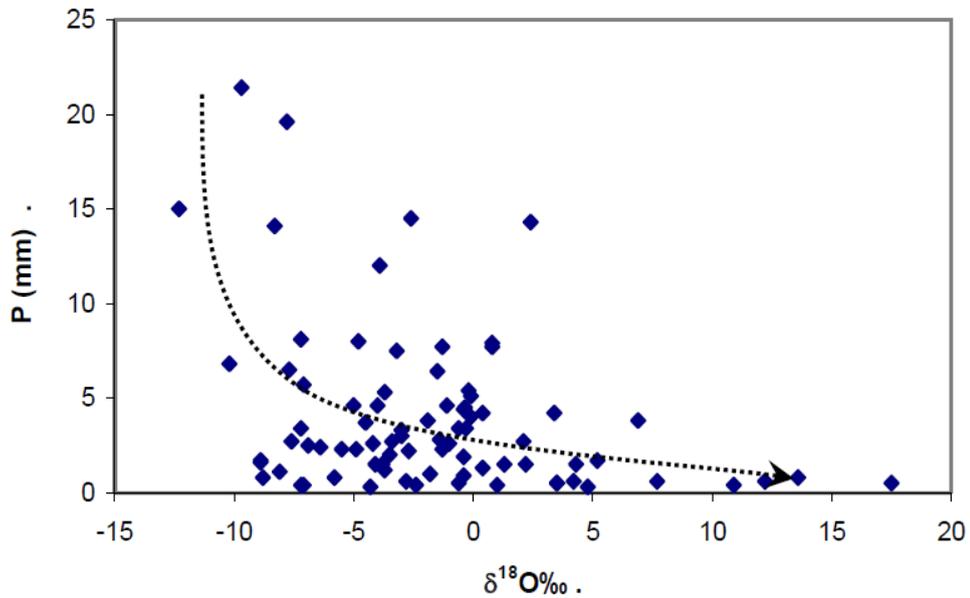


Figure 6.7 : Variation de la composition isotopique en fonction de la hauteur des Précipitations à Béni-Abbés (Conrad et Fontes, 1970)

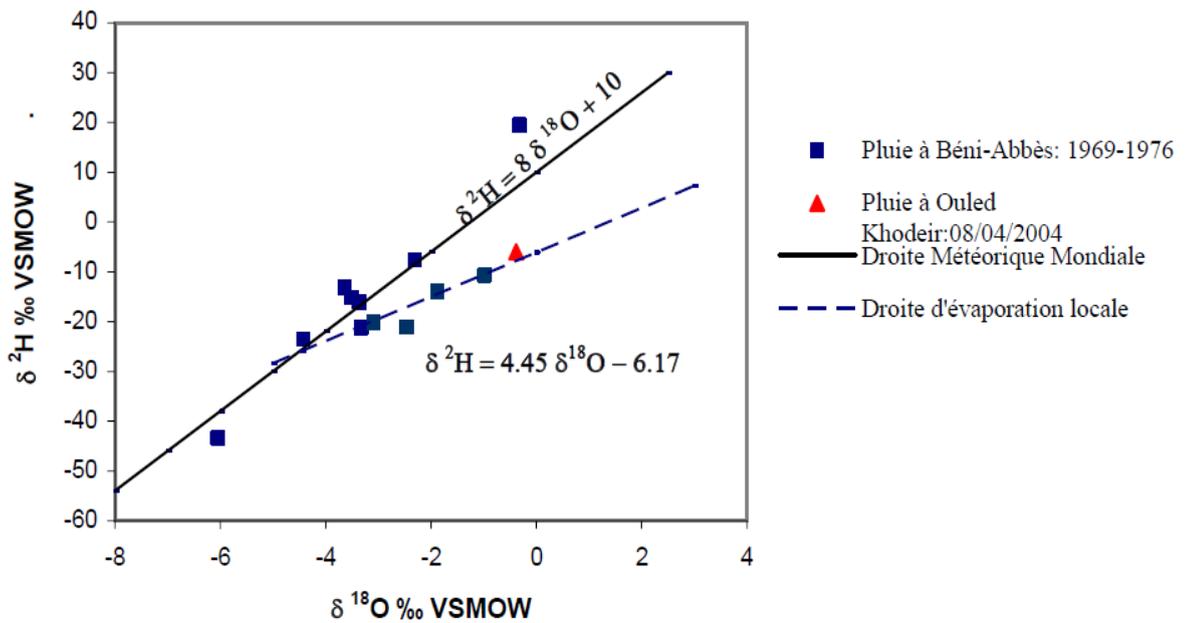


Figure 6.8 : Relation $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$ dans les eaux de pluie

Nous avons reporté sur les figures 6.7 et 6.8, les teneurs en isotopes stables des précipitations de quelques échantillons de pluie collectés à Béni-Abbès par Conrad et Fontes (1970), Gonfiantini et al. (1974) et Yousfi (1984), et un échantillon prélevé en Avril 2004 à Ouled Khodeïr (Mebrouk, 2007).

3.4.2. Teneur en Tritium des précipitations

Conjointement aux teneurs en Oxygène 18 des précipitations, des teneurs en Tritium ont également été mesurées (données tirées de Conrad et Fontes, 1970, Conrad et al, 1975). La figure 6.9 montre la variation des teneurs en Tritium des eaux de pluie à Béni-Abbès en fonction de la hauteur des précipitations durant la période allant de 1964 à 1972. Le pic de la teneur en Tritium est observé pendant le petit orage du 6 septembre 1964.

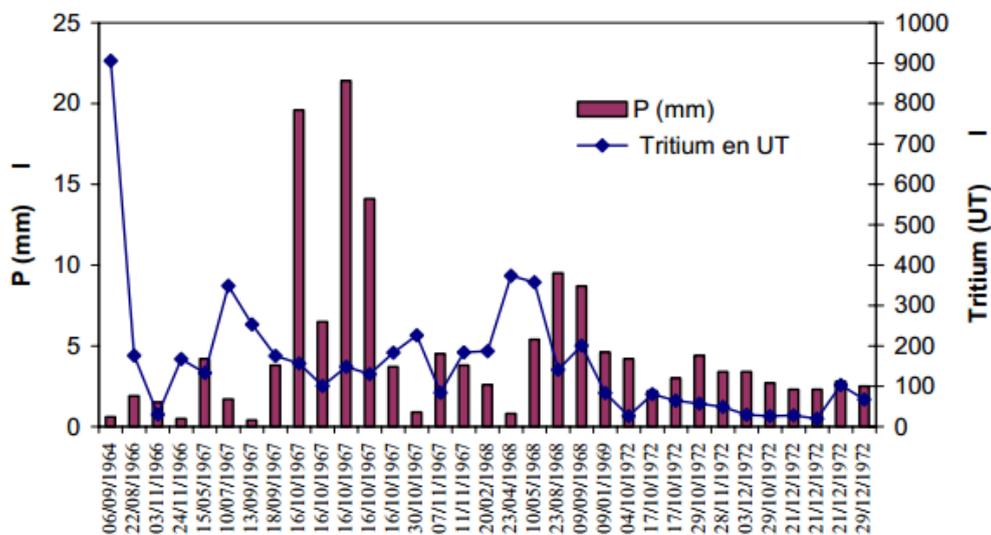


Figure 6.9 : Tritium et hauteurs de pluie à Béni-Abbès

3.4.3. Relation entre $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$ dans les eaux des nappes

Nous avons résumé dans le tableau 6.4 ci-dessous les résultats des analyses isotopiques réalisées au laboratoire de l'A.I.E.A. à Vienne pour les isotopes stables ($\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$) et au CRNA (Centre de Recherches Nucléaires d'Alger) pour le Tritium, ainsi que les résultats de Mebrouk (2003).

Les tableaux 47 et 48 ci-dessus résument les valeurs de l'excès en deutérium calculées pour l'ensemble des points d'eau de différentes nappes de la région de Béni Abbès.

Les valeurs de l'excès en deutérium sont la conséquence de la relation $\delta^{18}\text{O} - \delta^2\text{H}$ (fig.6.10) traduisant le degré d'évaporation des eaux.

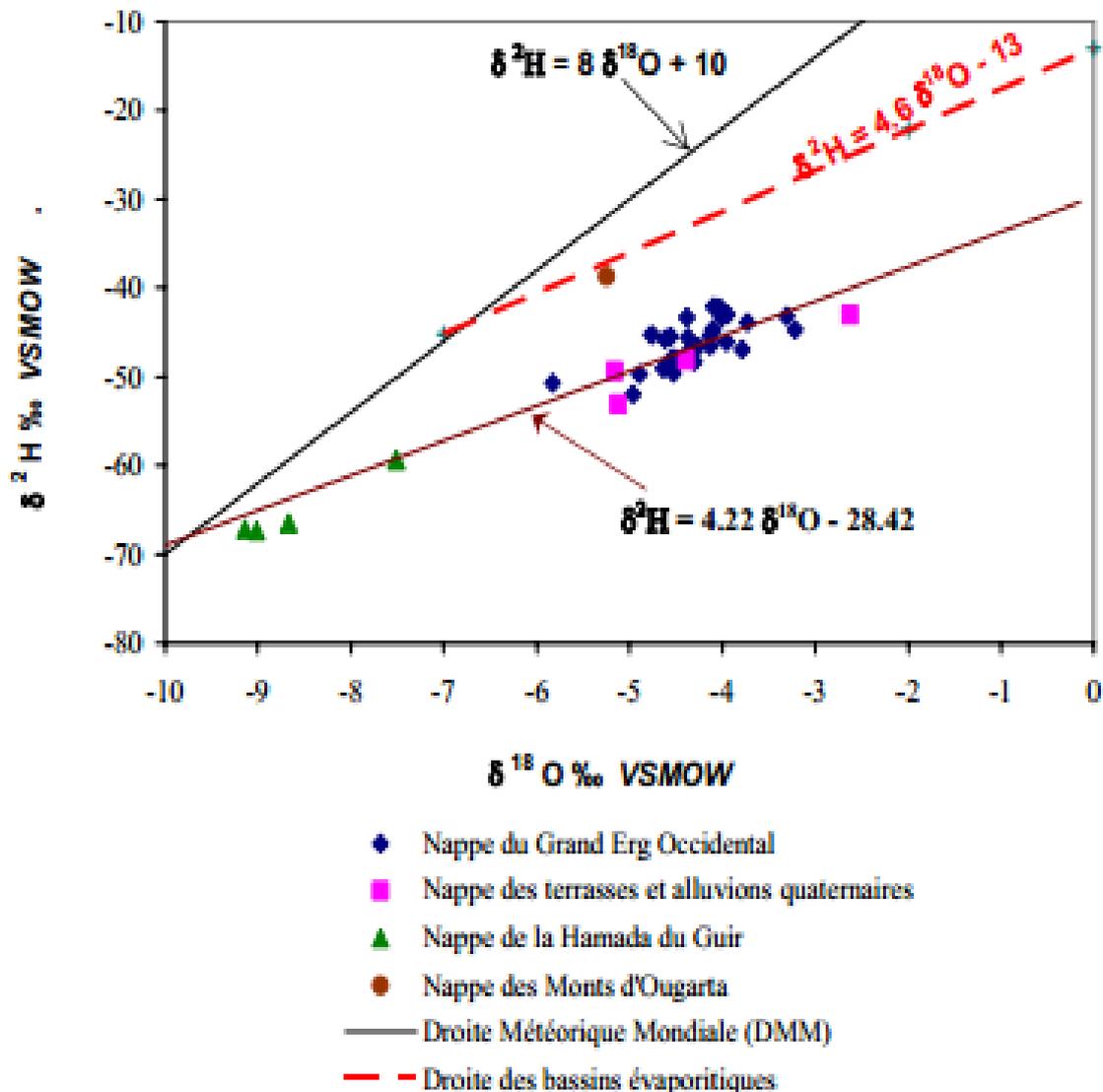


Figure 6.10 : Relation $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^2\text{H}$ dans les eaux de la Saoura

La figure 6.11 exprime la relation $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$ dans les eaux de la Saoura. Que ce soient celles du Grand Erg Occidental et des terrasses quaternaires ou celles de la Hamada du Guir, toutes ces eaux semblent s'aligner selon une seule droite de pente égale à 4.22, presque parallèle à la droite d'évaporation établie par Fontes et Gonfiantini (1967) (*in Fontes, 1976*). Le coefficient de corrélation calculé pour le tracé de cette droite de régression est hautement significatif ($R=0.95$). Ceci pourrait suggérer que ces eaux ont une même origine.

Les moyennes isotopiques des eaux de la nappe du Grand Erg Occidental et de celle des terrasses sont très proches et confirment l'alimentation de cette dernière par la première.

Tableau 6.4 : Résultats des analyses isotopiques des eaux de nappes de la Saoura (Mebrouk, 2007)

Localité	Type de captage	Réf. Ech	$\delta^{18}\text{O} \text{‰}$	$\delta^2\text{H} \text{‰}$	d (Excès En deutérium)	^3H (UT)	Cond. ($\mu\text{s}/\text{cm}$)
Igli AEP	F (Forage)	IG3	-4.09	-42.1	-9.38	0.1	464
Igli Hi Marius	F	IG5	-4.38	-43.3	-8.26	0	476
Touzzit	F	TZ3	-4.03	-42.2	-9.96	1.3	488
Mazzer Hi	P (Puits)	MZ2	-5.16	-49.4	-8.12	1.2	3950
Mazzer AEP	F	MZ3	-4.54	-47.9	-11.58	3.5	481
SceMazzer	S (Source)	MZS4	-4.13	-45.4	-12.36	0.3	505
SceOuarourout	S	SG4	-3.95	-43	-11.4	2.3	686
SceOuarourout	S	SG6	-4.01	-43.3	-11.22	1.5	674
Hi Rokna	P	R1	-4.62	-45.8	-8.84	0	866
SceJuiffa	S	S2	-4.37	-45.6	-10.64	0.6	1707
Fog. Juiffa	Fog(Foggara)	F'10	-4.56	-45.5	-9.02	2.1	812
SceHemama	S	S3	-4.76	-45.3	-7.22	0	642
GdeSce BA	S	S1	-4.1	-44.7	-11.9	1.1	587
Bchir	P	B1	-3.31	-43.2	-16.72	2.2	1251
Tamtart	P	TM1	-3.73	-43.9	-14.06	9.6	1102
AguedalOuata	P	A1	-4.64	-49.1	-11.98	5	1641
AnefidOuata	P	AN1	-4.3	-48.3	-13.9	4.3	1143
El Bayada	P	B2	-4.39	-48.1	-12.98	4.1	3700
EL Majja	P	M1	-5.83	-50.7	-4.06	6.9	781
Gurezim Hi	P	KH12	-3.96	-46.1	-14.42	2.7	910
AEP Guerzim	F	KH11	-4.37	-47.3	-12.34	2.4	2300
Bénilkhlef Hi	P	KH10	-4.89	-49.7	-10.58	0.5	993
Tezzager Hi Zaouia	P	KH9	-4.26	-46.6	-12.52	0.5	1382
Tezzager	F	KH7	-4.52	-48.6	-12.44	0.9	925
AEP Kerzaz	F	KH6	-4.13	-46.5	-13.46	0.1	769
Timoudi	P	KH4	-4.37	-47.6	-12.64	0	1597
BouTerfaya	P	KH3	-4.53	-49.6	-13.36	1.4	1300
OuledKhodeir	P	KH1	-2.63	-43	-21.96	1.6	2100
OuledRafaa	P	RF1	-4.5	-48	-12	1.4	1372
Timgharine	P	TGH1	-5.12	-53.1	-12.14	0	5700
Ksabi	F	KS3	-3.79	-46.9	-16.58	0.3	2150
Ksabi	F	KS1	-4.96	-52	-12.32	0.2	1695
HassiAbdellah	F	HA1	-3.22	-44.7	-18.94	0	2450
HassiBoulmane	P	BMZ"	-9.01	-67.4	4.68	2.4	2630
ZguilmaSghir	P	Z3	-9.14	-67.2	5.92	0.8	2050
ZguilmaKbir	P	Z5	-8.67	-66.5	2.86	0.7	2320
ZguilmaKbir	P	Z6	-7.51	-59.4	0.68	0	4110
Mtsd'Ougarta	P	Z1	-5.25	-38.7	3.3	4.3	741



Nappe du Grand Erg



Nappe des terrasses



Nappe de la Hamada du Guir



Nappe des Mts d'

Tableau 6.5 : Caractéristiques isotopiques des eaux de la Saoura (Avril 2003)

Nappe d'eau	$\delta^{18}\text{O} \text{ ‰}$			$\delta^2\text{H} \text{ ‰}$			d ‰ (Excès en deutérium)		
	Moy	Min	Max	Moy	Min	Max	Moy	Min	Max
Nappe du Grand Erg Occidental	-4.30	-5.83	-3.22	-46.27	-52.0	-42.1	-11.85	-18.94	-4.06
Nappe des terrasses	-4.33	-5.16	-2.63	-48.18	-53.1	-43.0	-13.51	-21.96	-8.12
Nappe de la Hamada du Guir	-8.58	-9.14	-7.51	-65.13	-67.4	-59.4	+3.54	+0.68	+5.92
Nappe des Mts d'Ougarta (1 valeur)	-5.25			-38.70			+3.30		

La disposition de nos points d'eau sur le graphique $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$ montre clairement que ce sont des eaux anciennes. Ces teneurs sont proches de celles observées dans les eaux du Continental intercalaire du Sahara ($\delta^{18}\text{O} = -8.4\text{‰}$ et $\delta^2\text{H} = -61\text{‰}$) (Fontes, 1976) où les eaux sont anciennes.

L'intersection de la droite des eaux évaporées avec celle des eaux météoriques donne la composition isotopique moyenne de l'eau d'alimentation initiale. Ces valeurs d'intersection

$\delta^{18}\text{O} = -10.2\text{‰}$ et $\delta^2\text{H} = -71\text{‰}$, seraient proches de la composition des eaux de la nappe de la Hamada du Guir.

La teneur en isotopes des eaux de la nappe du Grand Erg impliquerait la contribution d'eau récente à son alimentation. Fontes (1976) considère que la composante contemporaine y joue un rôle non négligeable. La moyenne calculée sur nos données ($\delta^{18}\text{O} = -4.3\text{‰}$) serait proche de la composition des eaux du Hoggar ($\delta^{18}\text{O} = -3.2\text{‰}$) (Saighi, 1984). Les données sont pratiquement inchangées, par rapport aux moyennes données depuis plus de 30 ans par Conrad et Fontes, (1970).

Les teneurs en $\delta^{18}\text{O}$ pour les analyses effectuées en 2004 par Mebrouk, ont donné -4.94‰ pour les eaux de la nappe du Grand Erg Occidental et des terrasses et -8.67‰ pour les eaux de la Hamada du Guir (fig .6.11) (Mebrouk, 2007).

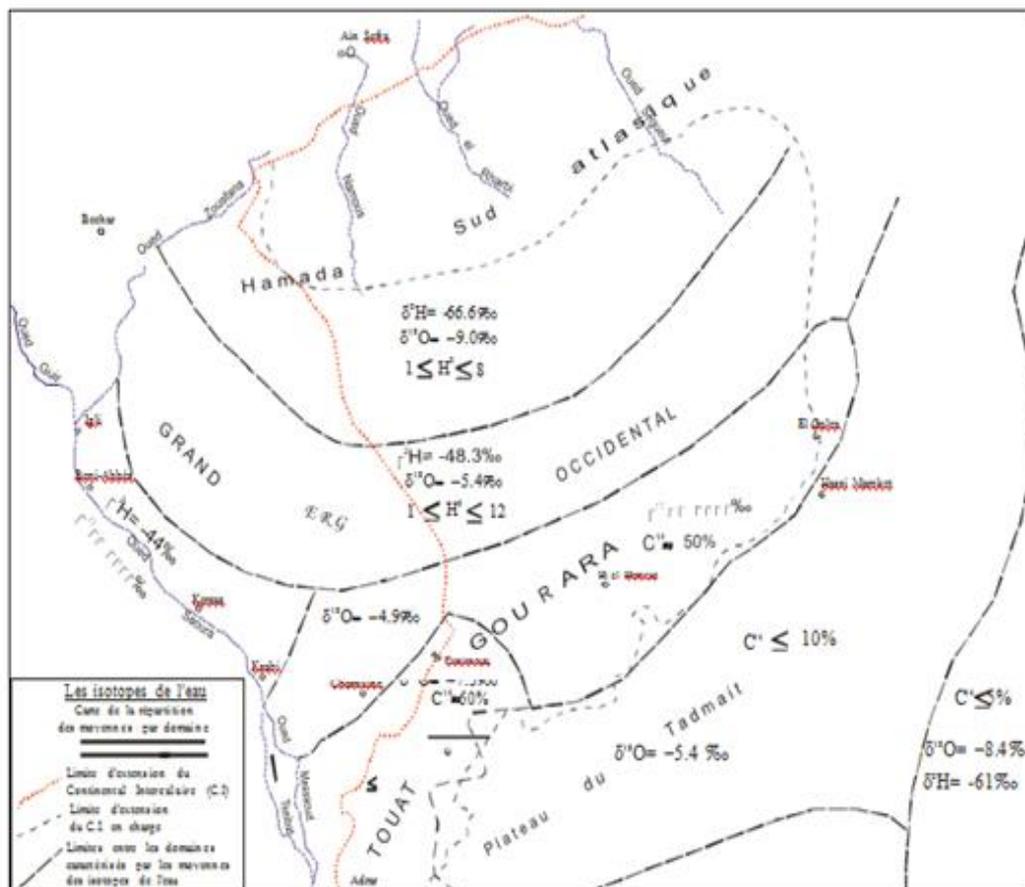


Figure 6.11 : Carte de répartition des moyennes isotopiques de l'eau dans le Sahara (Conrade et Fontes, 1970)

3.4.4. Relation $\delta^{18}\text{O}$ - Conductivité de l'eau d'élution d'un sondage à Béni-Abbès

Dans un sondage réalisé grâce à un carottage en continu, sans lubrification dans le sédiment poreux horizontal à Hassi Juiffa, sur la terrasse moyenne de Béni-Abbès, constituée essentiellement d'alluvions anciennes, M. Yousfi (1984) a mesuré les teneurs en isotopes stables et la salinité des eaux d'élution selon un profil vertical (de 0 à 12m environ) afin de mieux mettre en évidence le rôle des phénomènes d'évaporation. En effet, la relation $\delta^{18}\text{O}$ -Conductivité (fig. 6.12) a permis de mettre en évidence trois processus d'évaporation différents :

- Zone 1 où les teneurs en $\delta^{18}\text{O}$ sont bien corrélés à la conductivité, comme cela doit être le cas lors de l'évaporation d'un liquide. C'est le cas dans les eaux de la Saoura (voir paragraphe ci-dessus).

- Zone 2, où l'on assiste à une évaporation en régime stationnaire, avec une augmentation rapide de la salinité pour une teneur en $\delta^{18}\text{O}$ presque constante. Cet état est engendré par l'évaporation contrainte sous couvert sableux (Fontes, 1976).
- Zone 3, avec seulement 2 points, suggérant toutefois un processus d'évaporation en phase vapeur, où seule la teneur $\delta^{18}\text{O}$ varie. Ce qui pourrait correspondre à une diffusion des isotopes en phase vapeur.

Ces conclusions sont également confirmées par la relation excès en deutérium-conductivité de ce même profil (Yousfi, 1984).

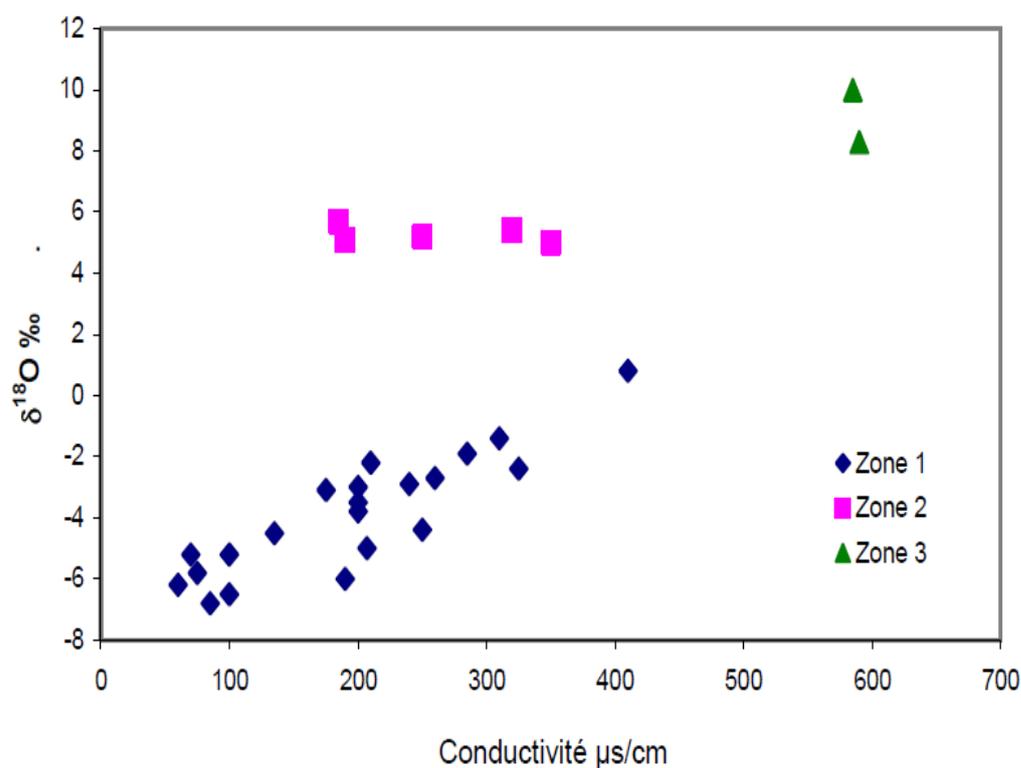


Figure 6.12 : Relation $\delta^{18}\text{O}$ -Conductivité des eaux d'élution d'un sondage à Béni-Abbès (Yousfi 1991)

3.4.5. Relation $\delta^{18}\text{O}$ - Chlorures des eaux de la Saoura

Une eau évaporée se distingue généralement par une forte teneur en Cl et en $\delta^{18}\text{O}$. Dans le chapitre ainsi que dans le paragraphe précédent, nous avons montré que la salinité des eaux de la Saoura est essentiellement contrôlée par les phénomènes d'évaporation.

De façon générale, lorsque la salinité des eaux est due à un enrichissement des sels par évaporation, alors la signature $\delta^{18}\text{O} - \delta^2\text{H}$ aura une pente faible, reflétant le fractionnement cinétique (voir fig.6.12). De plus, le report des teneurs en chlorures en fonction de l'Oxygène 18 ou du Deutérium sera positivement corrélé puisque l'augmentation de l'évaporation pourrait résulter d'un

enrichissement isotopique de même que l'augmentation de la concentration en chlorures (Payne 1988).

Au Sahara Nord Occidental, l'augmentation de la minéralisation des eaux est liée, non seulement aux phénomènes d'évaporation qui y sont prépondérants, mais aussi aux phénomènes de dissolution et de lixiviation. Le report des teneurs en Oxygène-18 des eaux de la Saoura en fonction de leur teneur en Chlorures (fig. 6.13) le montre bien. En effet, une relation linéaire existe entre la teneur en Oxygène 18 et les chlorures. Cette relation est claire notamment pour les eaux ayant une teneur en chlorures inférieure ou autour de 500mg/L. Pour des teneurs en Cl plus importantes, la dispersion des points pourrait s'expliquer par les différentes origines des chlorures. La variation de teneurs en isotopes serait également liée à la profondeur et aux différences lithologiques des points d'eau.

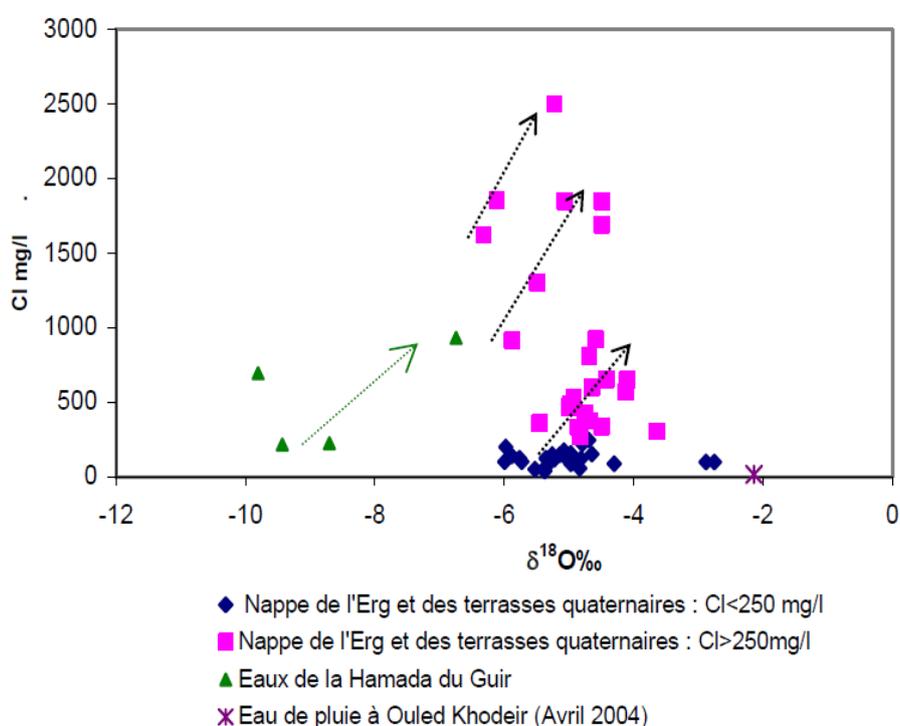


Figure 6.13 : Relation $\delta^{18}\text{O}$ - Cl des eaux de la Saoura

3.4.6. Variations de $\delta^{18}\text{O}$ des eaux à Béni-Abbès

a. Variations de $\delta^{18}\text{O}$ des eaux souterraines (nappe du GEO)

Pour les eaux de la nappe du Grand Erg Occidental à Béni-Abbès, nous disposons d'une longue série de mesures (1965-1973) : une à la grande source de Béni-Abbès, l'autre à la foggara du CRZA (Centre de Recherches sur les zones Arides, ex-CNRS). Ces données, recueillies par Conrad et *al*, (1970, 1972), ont été complétées par Conrad et *al* (inédit) dans le cadre du projet CNRS-AIEA et consignées dans le rapport final sur "les isotopes du Sahara nord Occidental". Nous avons représenté les variations des teneurs en $\delta^{18}\text{O}$ de ces deux points d'eau sur la figure 6.14. Nous pouvons

remarquer que les eaux de la foggara sont nettement plus évaporées que celles de la Grande Source, ce qui est tout à fait normal, les eaux de la foggara étant très proches de la surface du sol.

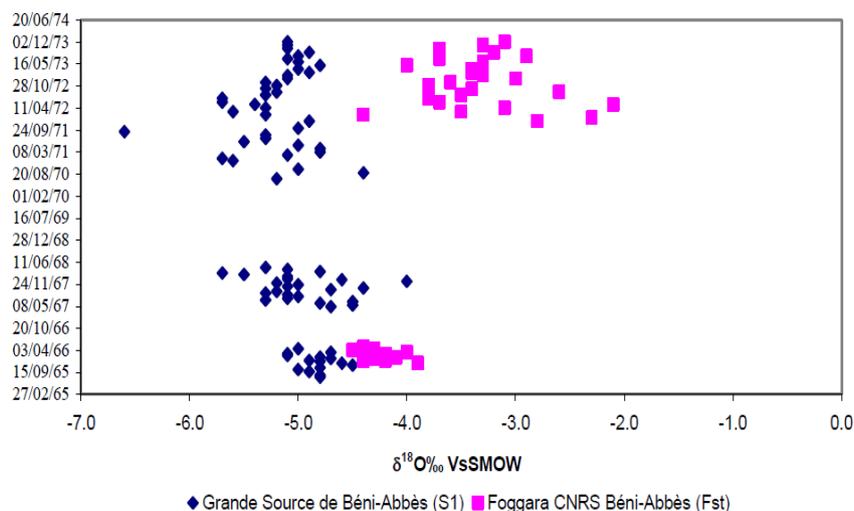


Figure 6.14 : Variations des teneurs en $\delta^{18}\text{O}$ à la Grande Source et à la foggara de Béni-Abbès

La teneur varie entre -6.6‰ et -4.0‰ avec une moyenne de -5.0‰ pour les eaux de la Grande Source, et entre -4.5‰ et -2.1‰ avec une moyenne de -3.6‰ pour les eaux de la foggara. La moyenne sur l'ensemble des deux séries est de -4.3‰, valeur tout à fait compatible avec la teneur moyenne connue des eaux de la nappe du Grand Erg Occidental.

b. Variations de $\delta^{18}\text{O}$ des eaux de surface (Guelta de Gara Diba)

Dans le cadre du même projet CNRS-AIEA, 33 mesures ont été réalisées entre 1972-1973 à la Gara Diba à Béni-Abbès. Cette mare d'eau superficielle est soit alimentée par l'inféro-flux de la Saoura soit par les crues exceptionnelles de l'oued. Le plan des gueltas est généralement en équilibre avec le niveau piézométrique du sous-écoulement et les apports en eau se réduisent au rétablissement de l'équilibre du niveau statique que l'évaporation tend à rabattre. Les conditions correspondent à celles d'un lac en état d'évaporation. Cette dernière est favorisée par une très faible humidité de l'air (<10%) (Conrad et al, 1970).

Les teneurs en $\delta^{18}\text{O}$ varient entre -10.71‰ et 17.74‰ avec une moyenne de +8.81‰. Nous remarquerons que, seules 3 valeurs sur les 33 sont négatives (Fig. 6.15).

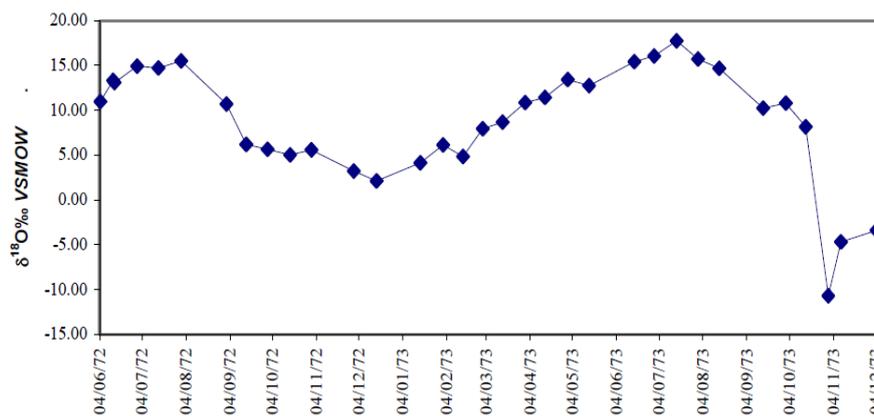


Figure 6.15 : Variations des teneurs en $\delta^{18}\text{O}$ à la Guelta de Gara Diba

3.4.7. Les isotopes radioactifs dans les eaux des nappes

a. Teneurs en Tritium des eaux des nappes

Pour l'ensemble des nappes considérées, les teneurs varient entre 0 et 9.6 UT. (Mebrouk 2007)

Tableau 6.6 : Teneurs en Tritium et en $\delta^{18}\text{O}$ des eaux de nappes de Béni Abbes (Mebrouk 2007)

Localité	Réf. Ech	^3H (UT)	$\delta^{18}\text{O}$ ‰
Sce Ouarourout	SG4	2.3	-3.95
Sce Ouarourout	SG6	1.5	-4.01
Hi Rokna	R1	0	-4.62
Sce Juiffa	S2	0.6	-4.37
Fog. Juiffa	F'10	2.1	-4.56
Sce Hemama	S3	0	-4.76
Gde Sce BA	S1	1.1	-4.1
Zguilma Sghir	Z3	0.8	-9.14
Zguilma Kebir	Z5	0.7	-8.67
Zguilma Kebir	Z6	0	-7.51
Mts d'Ougarta	Z1	4.3	-5.25
Zguilma Sghir	Z3	0.8	-9.14

A titre indicatif, nous donnons ci-dessous les classifications permettant une interprétation qualitative des teneurs en tritium des eaux. Celle de Clark et Fritz (1997) pour les régions continentales permet de distinguer les groupes suivants :

- ❖ Teneurs inférieures à 0,8 UT : il s'agit d'une eau qui s'est infiltrée avant les premiers essais atmosphériques.
- ❖ Teneurs allant de 0,8 à 4 UT environ : il peut s'agir d'un mélange entre une eau "anté-nucléaire" et une eau actuelle.
- ❖ Teneurs allant de 5 à 15 UT : il s'agit d'une eau récente, de temps de séjour de l'ordre de 5 à 10 ans.

- ❖ Teneurs allant de 15 à 30 UT : il s'agit d'une eau qui possède une part importante d'eau infiltrée dans les années 1960.

Au-delà, l'aquifère est affecté par une pollution anthropique (industries nucléaires, industries utilisant des produits thermo luminescents et décharges).

La classification, donnée par Blavoux et Letolle (1995) pour les latitudes moyennes, permet de distinguer les classes suivantes :

- ❖ Teneurs en tritium inférieures à 2 UT, ce sont des eaux anciennes (avant 1952)
- ❖ Teneurs en tritium comprises entre 2 et 10 UT : il s'agit d'un apport d'eau post-nucléaire dans une eau ancienne
- ❖ Teneurs en tritium comprises entre 10 et 20 UT : il s'agit généralement d'eau infiltrée durant la dernière décennie
- ❖ Teneurs en tritium supérieures à 20 UT : il s'agit d'une eau dont l'âge moyen est de quelques dizaines d'années parce qu'elle est marquée par les fortes teneurs des pluies du pic de 1963.

Selon Fontes (1985), une activité inférieure à 3 UT correspondrait en Afrique de l'Ouest à une recharge avant 1952 (eau ancienne).

Les résultats de Mebrouk 2003 révèlent que 82% des échantillons ont une teneur inférieure à 3 UT et que les eaux de la Hamada du Guir (avec T compris entre 0 et 2.4 UT) sont des eaux anciennes, vu leur teneur en oxygène 18, nous pouvons adapter la limite de 3UT donnée par Fontes aux données de Mebrouk. De ce fait, en combinant les précédentes classifications, nous pouvons distinguer deux grands groupes d'eaux :

- Des eaux à teneur en tritium inférieure à 3 UT, correspondant à des eaux anciennes (avant 1952)
- Des eaux à teneur supérieure à 3 UT, et qui correspondraient, à un mélange entre eau post-nucléaire et une eau ancienne.

Sur la figure 154, nous avons représenté l'histogramme des fréquences des eaux de la nappe du Grand Erg et des terrasses (33 échantillons), de la Hamada du Guir (4 échantillons) et des Monts d'Ougarta (1 échantillon) par classes, en fonction de leur teneur en tritium. La première classe regroupe les échantillons dont les activités sont inférieures au seuil de comptage.

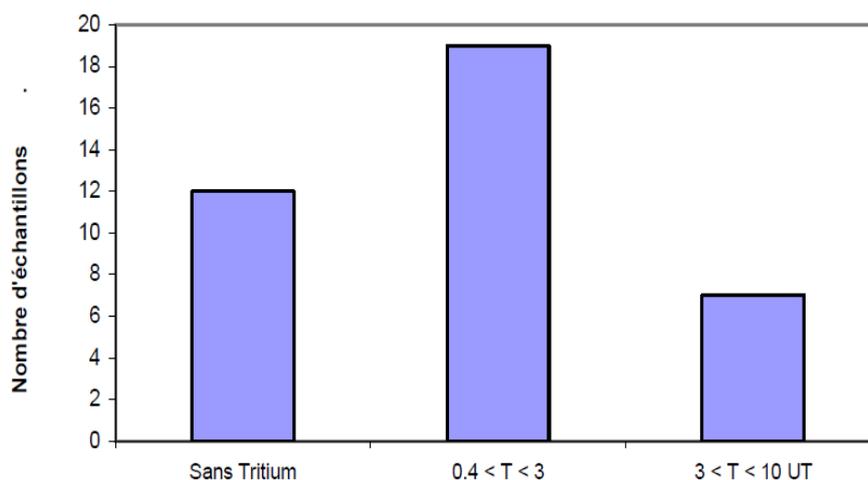


Figure 6.16 : Histogramme des fréquences des teneurs en tritium des eaux de la Saoura (Mebrouk, 2007)

Cette distribution montre que, globalement, la majorité des eaux considérées sont des eaux anciennes (82%). Les 18% restants sont des eaux mélangées avec une composante récente très limitée.

Les teneurs importantes en tritium seraient dues à une alimentation par les crues de l'Oued Saoura avant la construction du barrage de Djorf Torba dans les années 60 (Mebrouk, 2007).

3.5. Corrélation $\delta^{18}\text{O}$ - Tritium

La corrélation entre la composition isotopique en Oxygène-18 et la teneur en Tritium est représentée par la figure 6.17.

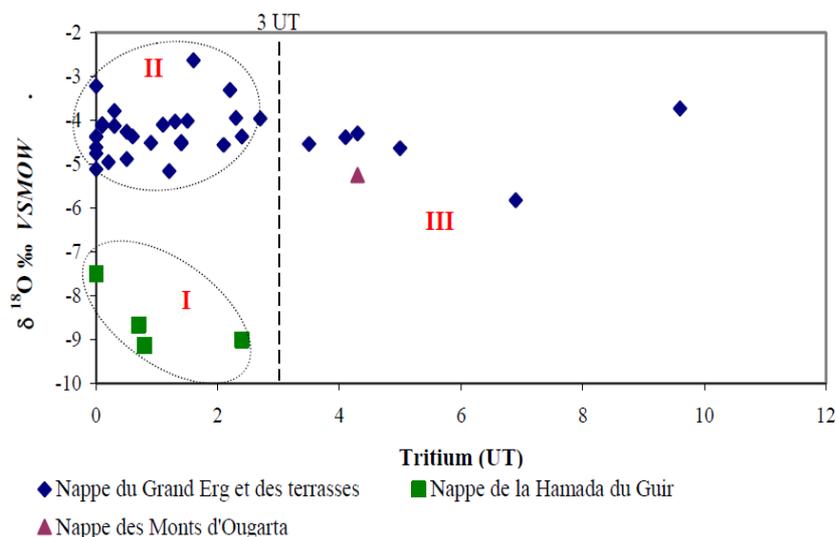


Figure 6.17 : Corrélation $\delta^{18}\text{O}$ - Tritium (Campagne II, Avril 2003)(Mebrouk, 2007)

L'examen de cette figure nous permet de mieux préciser la classification précédente et l'on différencie ainsi 3 groupes :

- Le groupe I, correspondant à des eaux anciennes, non évaporées : ce sont les eaux de la Hamada du Guir
- Le groupe II, correspondant à des eaux anciennes évaporées : ce sont les eaux de la nappe du Grand Erg Occidental et des terrasses
- Le groupe III, correspondant à des eaux évaporées mélangées, englobant aussi bien les eaux de la nappe du Grand Erg Occidental et des terrasses ainsi que celles des Monts d'Ougarta.

3.6. Corrélation tritium-salinité

La relation tritium - salinité des eaux a déjà été mise en évidence dans les eaux de surface de la Sebkhha el Melah, alimentée par les crues exceptionnelles de la Saoura, lors des processus d'évaporation, conduisant à un fort enrichissement isotopique (Fontes et Gonfiantini, 1967) (Conrad *et al*, 1975). La figure 6.18 met en exergue cette relation. En effet, nous pouvons différencier 3 ensembles :

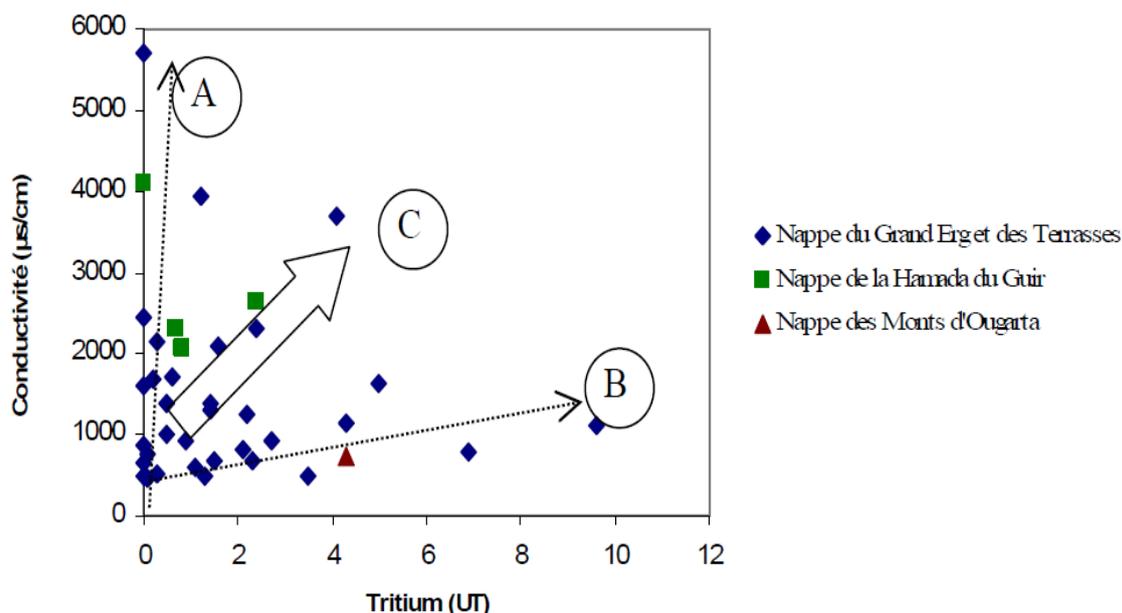


Figure 6.18 : Relation Tritium- salinité des eaux de la Saoura (Mebrouk, 2007)

Un ensemble A, où les eaux ne contiennent pas ou peu de tritium décelable, avec une augmentation rapide de la salinité. Nous remarquerons que les eaux les plus chargées sont celles localisées à l'aval de la Saoura (Timgharine, Ksabi et Hassi Abdellah)

- Un ensemble B, où la teneur en tritium augmente rapidement pour une augmentation progressive de la salinité. Ce groupe englobe essentiellement les eaux localisées entre Ouarourout et El Ouata, en passant par Béni-Abbès. Les eaux de toutes les palmeraies d'El Ouata y sont incluses (El Majja, Anefid, Aguedal, Tamtert)
- Un ensemble C, intermédiaire entre les deux précédents, englobant les eaux localisées dans la moyenne et la basse vallée de la Saoura (entre Béchir et Ouled Rfaa)

3.7. Synthèse des données Tritium mesurées entre 1964 et 1973

Toutes les données concernant les teneurs en Tritium sont résumées dans les tableaux 6.7 et 6.8 ci-dessous. Elles ont été collectées par Conrad et Fontes (1970) et Conrad et al (1975).

Le tableau 6.8 résume les mesures essentiellement faites sur la nappe du Grand Erg Occidental, à son exutoire au niveau de la vallée de la Saoura et particulièrement dans la région de Béni Abbès.

L'examen de ces valeurs nous permet de constater, qu'aussi bien pour les eaux de la nappe du Grand Erg Occidental, à son exutoire sur le front de la Saoura, que celles de la Hamada du Guir, confirme l'ancienneté de la réserve, sauf à Hassi Rokna, près de Béni-Abbès, où l'on mesure une activité de 3 UT.

Une valeur de 1.1 UT a été mesurée à la Grande Source de Béni-Abbès. Aussi les valeurs significatives traduisent une recharge actuelle de la nappe. Cette recharge est très évidente pour la nappe des alluvions, tandis qu'elle reste hypothétique pour la nappe du Grand Erg Occidental tant qu'on n'aura pas complété par des mesures en Carbone 14 (Mebrouk, 2007).

Tableau 6.7 : Teneurs en Tritium de la nappe du Grand Erg Occidental et de quelques valeurs de référence (Conrad et al, 1975)

Nom	Prof, nappe (m)	Localisation (N° carte 5.28)	Date	Tritium en UT
HassiRokna	10.0	6 km West B-A	06/12/1971	3 ± 1
Ain el Hammam à Mazzer	Source	Béni Abbès	17/05/1966	≤ 12
Grande source de Béni-Abbès	Source	Bén Abbès	09/09/1964	≤ 20
Grande source de Béni-Abbès	Source	Béni Abbès	07/03/1966	≤ 17
Grande source de Béni-Abbès	Source	Béni Abbès	02/12/1970	≤ 10
Grande source de Béni-Abbès	Source	Béni Abbès	12/11/1971	≤ 1
Foggara lab, CNRS (drain)	Eau de surface	Béni Abbès	Déc 70	7
Hassi el Hamra	12.9	10	16/04/1973	12 ± 1
HassiDjedid el Guarbi	10.8	11	16/04/1973	10 ± 1
Hassi el Homeur	12.6	12	14/04/1973	5 ± 1
Hassi el Haimeur	11.1	13	13/04/1973	6 ± 1
HassiBelguezza	19.5	14	11/04/1973	5 ± 1
Hassi Mansour	25.9	15	08/04/1973	2 ± 1
HassiBoukhala	44.5	16	05/04/1973	2 ± 1
HassiDjedid el Oustani	32	17	03/04/1973	3 ± 1
HassiFokra	26.9	18	14/04/1973	≤ 1
HassiTaourdassa	14.6	19	10/04/1973	≤ 1
HassiGaouni	27.6	20	06/04/1973	≤ 1
Daïa Hamada du Guir	0	21	26/10/1971	51 ± 5
Daïaet el Maa	0	22	09/03/1973	54 ± 4

Les références récentes données par les teneurs en tritium des eaux, mesurées à cette période, et qui sont susceptibles d'alimenter la nappe, peuvent être fournies par les deux échantillons prélevés au niveau des daïas, l'une au Nord, à la Hamada du Guir, l'autre au nord du Grand Erg, inondées respectivement l'une et l'autre par une forte averse et une forte crue de l'oued Gharbi. Nous remarquerons cependant que les fortes pluies d'octobre 1967 tombées sur Béni-Abbès (65.3 mm en

24h avec des activités comprises entre 100 et 200 UT) ne paraissent pas à ce jour avoir atteint la nappe puisqu'aucune activité mesurable n'a été enregistrée à la Grande Source et à la foggara du CNRS à Béni-Abbès. La faible activité décelée à Hassi Rokna, près de Béni-Abbès (3 ± 1 UT) n'est pas suffisante pour conclure sur ce point (Conrad et al, 1975).

Roche (1973) supposait que ce sont les très fortes pluies (>20 mm) qui s'infiltreraient dans les sables de l'Erg. Il est vrai que l'importance des réserves que l'on déduit de la régularité des débits et des compositions chimiques et isotopiques stables au cours du temps, masque peut-être ces apports actuels (Conrad et al, 1975).

Les mécanismes de pénétration des eaux dans la zone non saturée sous climat aride sont encore mal connus. Il est donc difficile de donner une valeur, même approximative pour le temps de transit, entre la surface et le niveau de la nappe. La pénétration de l'eau dans la zone non saturée de la nappe de l'Erg est de toute manière lente et certainement aléatoire au-delà d'un mètre de profondeur d'après les travaux des physiciens du Globe à Béni-Abbés (Demon et al, 1957) et à El Oued (Dervieux, 1956). L'activité de la teneur en Tritium montre bien la contribution des eaux récentes à l'alimentation des nappes.

Tableau 6.8 : Teneurs en Tritium des différentes nappes du Sahara Occidental

Nappe	Nom	Date	Tritium
Nappe du Grand Erg Occidental			
	Source de Mazzer, Ain el Hammam	17/05/1966	≤ 12 UT
	Grande Source de Béni-Abbès	Sept, 1964	≤ 20 UT
	Foggara CNRS Béni-Abbès	Déc, 1970	≤ 5 UT
	El Ouata	18/05/1966	≤ 12 UT
	Guerzim (Puits de Hadj si Meki)	21/03/1966	≤ 17 UT
	Grande Source de Béni-Abbès	1966	≤ 7 UT
	Grande Source de Béni-Abbès	1970	≤ 10 UT
Nappe de la Hamada du Guir			
	Hassi Zguilma Srir	27/09/1964	≤ 26 UT
	Hassi Zguilma kebir	27/09/1964	≤ 33 UT
	Hammaguir, forage Ouest	Nov, 1971	≤ 4 UT
Nappes du Paléozoïque:			
Monts d'Ougarta	Ain-ed-Dhobb (nappe des Grès cambriens)	27/04/1968	12 ± 3 UT
Monts d'Ougarta	Ain en-Néchéa (Cambrien)	19/04/1973	17 ± 3 UT
Monts d'Ougarta	Foggara d'Ougarta (nappe des schistes siluriens)	12/09/1965	≤ 18 UT
Monts d'Ougarta	Foggara d'Ougarta (schistessiluriens)	08/03/1966	≤ 17 UT
Ahnet	Ain Tikkidine (Ahnet) (nappe du Dévonien)	07/05/1966	≤ 12 UT
Ahnet	Ain Tikkidine (Ahnet) (nappe du Dévonien)	15/11/1971	4 ± 1
Ahnet	Hassi el Bachir (nappe du Carbonfère)	16/11/1971	5 ± 1
Mouydir	Ain Redjem (nappe du Dévonien)	30/04/1968	≤ 5 UT
Nappes liées aux alluvions des vallées:			
	* Eau des alluvions d'Oued Saoura	Sept, 1964	981 ± 59 UT
	* Vallée Oued Irharrhar (Nord du Hoggar)	Puits Amguid	68 ± 13 UT
	* Vallée de l'Ahnet-Mouydir (Sud de Reggane)	Pts Anou-Tirechoumine	200 ± 14 UT
		Hassi Archira	49 ± 10 UT
		Hassi El-Khenig	52 ± 7 UT
		Hassi Habadra	276 ± 16 UT
Nappe Erg Chech			
	Pts de Grizim (série antécambrienne)	02/04/1966	20 ± 4 UT
	Hassi Mkakane (sable argileux Villafranchien inf)	27/05/1966	34 ± 7 UT
	Bir ben Takoul (sable argileux Villafranchien inf)	02/05/1966	≤ 15 UT
	BirKaddour (sable argileux Villafranchien inf)	03/05/1966	≤ 12 UT
	Bou Bernous (nappe au toit des argiles du Dév, inf)	28/03/1966	≤ 19 UT

3.8. Les isotopes du Carbone -13 et -14

Le Carbone-13 est un isotope stable du Carbone tandis que le Carbone 14 est un isotope radioactif. La mesure de ce dernier en particulier, permet de déterminer le temps de séjour des eaux dans l'aquifère et de donner un âge jusqu'à 30 000 ans. De façon générale, le principe est basé sur l'acquisition du Carbone atmosphérique par l'eau s'infiltrant dans la nappe.

Dans la vallée de la Saoura, cette datation permettrait de répondre à certaines interrogations quant à l'ancienneté des eaux de la région et à l'importance des phénomènes de recharge actuelle. Nous n'avons, malheureusement pas pu réaliser nous-même ce type d'analyses ; toutefois, nous disposons d'une dizaine de résultats réalisés en décembre 1970, par Conrad et Fontes (1972) que nous avons essayé de réinterpréter. Avant de les discuter, il nous a paru utile de présenter les principes fondamentaux du traçage du Carbone dans les eaux souterraines.

Les teneurs en carbone-13 montrent une gamme de variation assez peu étendue : de -9.52 à -4.81 ; tandis que les activités en carbone 14 mesurées varient entre 18 et 106 % (tableau 52). Nous ne disposons malheureusement pas d'autres mesures sur la région, aussi bien de ^{13}C que de ^{14}C pour pouvoir comparer. Nous remarquons que pour les eaux de la nappe du Grand Erg les activités ^{14}C les plus faibles ne sont pas particulièrement localisées à un endroit de la Saoura, tandis qu'elles se situent plus au nord (foggara d'Hammaguir) pour la nappe de la Hamada du Guir. Par ailleurs, les activités les plus fortes se situent en deux points : à Ain Dhobb, et à Béni-Abbés, où elles dépassent 100%. Ces valeurs traduisent une recharge actuelle ou une forte participation d'eau post-nucléaire.

En règle générale (Fontes, 1985), lorsque $A_{14\text{C}} \geq 100$ pcm, le système $\text{H}_2\text{CO}_3/\text{HCO}_3^-/\text{CO}_3^{2-}$ est soit ouvert sur une surface de CO_2 biogène (nappe libre peu profonde en relation directe avec l'horizon humifère : ce serait le cas des eaux des formations néogènes de la nappe du Grand Erg à Béni-Abbés par exemple), soit en réouverture sur la strate biologique (c'est le cas de certains systèmes captifs sub-artésiens et anciens qui remontent à la surface à la faveur d'accidents tectoniques). Ce second cas semble s'appliquer aux eaux des Monts d'Ougarta, où des températures élevées des eaux ont été mesurées par Roche (1973) et par nous-même sur le forage de Zghamra durant la campagne 1 en 2004 (30°C). Mais, une activité supérieure à 100 pcm peut-être également le produit d'un mélange eau ancienne-eau récente contemporaine du pic de 1963 (fig. 6.20).

Tableau 6.9 : Teneurs en ^{13}C et ^{14}C de quelques eaux de la vallée de la Saoura et leurs caractéristiques physico-chimiques (Conrad et Fontes, 1972)

iD	Localisation	Nappe	Date	T°C	pH	R.S.	CO ₂ (mg/l)	HCO ₃ (mg/l)	d ¹⁸ O ‰	¹³ C PDB	¹⁴ C %
IG3	Puits Igli	Grand Erg	Déc. 1970	24.5	7.9	267	10	2	-5.23	-7.16	38.8 ±0.6
Fg	Foggara Béni-Abbès	Grand Erg	Déc. 1970	17.5	7.8	763	0	2.08	-4.57	-9.48	104.9 ±0.9
S1	Source Béni-Abbès	Grand Erg	Déc. 1970		7.8		10	2.56	-5.48	-6.67	31.1 ±0.3
S12	Source Béni-Abbès	Grand Erg	Déc. 1970	26	7.8	427	15	2.72	-5.44	-5.54	32.8 ±0.21
KZ1	Puits Kerzaz	Grand Erg	Déc. 1970		7.8	38	10	2.15	-5.84	-4.88	38.3 ±0.8
KS2	Puits Ksabi	Grand Erg	Déc. 1970	21	7.4		1580	10	1.75	-4.69	-4.81
Z3	Hassi Zguilma	Hamada du Guir	Déc. 1970	17.5	7.6		1362	60	7.05	-9.74	49.4 ±0.4
Z4	Hassi Zguilma	Hamada du Guir	Déc. 1970	21	7.5	1136	60	6.15	-10.2	-9.06	48.4 ±0.5
Z7	Foggara Hammaguir	Hamada du Guir	Déc. 1970	24	7.6		885	35	3.64	-9.52	18.9 ±1.5
Z12	Puits Ain Dhobb	Montsd'Ou garta	Déc. 1970	23	7.7	1026	30	5.27	-6.45	-7.07	106.6 ±1.0

Les nappes dont les eaux aux émergences sont supposées anciennes ont des activités en carbone-14 nettement inférieures à l'activité du carbone moderne (Conrad et Fontes, 1972). Les températures de tous les points d'eau considérés sont relativement basses (<32°C), ce qui limite l'échange isotopique avec l'aquifère (Munich et Thilo, 1970).

Pour la nappe du Grand Erg, en partant de l'amplitude maximale théoriquement possible de variation de la teneur initiale en ^{14}C du carbone dissous, soit 50 à 100%, Fontes (1972) estime l'âge radiométrique apparent des eaux de la nappe entre 4000 et 10 000 ans B.P.

Pour la nappe de la Hamada du Guir, les eaux prélevées plus au Nord (foggara Hammaguir), donc plus près des zones supposées de recharge, ont des teneurs plus faibles en ^{14}C . L'influence d'une recharge locale vieille de quelques milliers d'années et dont les eaux relaient de façon probablement totale les apports en provenance des confins atlasiques, apparaît ici (Conrad et Fontes, 1972).

4. Estimation de la recharge

L'estimation de la recharge en milieu désertique est un problème délicat qui a suscité de nombreuses interrogations. Plusieurs hypothèses ont été émises quant à l'alimentation de la nappe du Grand Erg Occidental. Suite aux observations de E. F. Gautier (1923, 1928), l'étude de H.

Schoeller en 1945 a d'abord émis l'hypothèse de l'existence pour la première fois d'une nappe importante sous les dunes du Grand Erg Occidental et de son éventuelle alimentation soit à partir de l'infiltration des eaux de pluie ou de la condensation de la vapeur atmosphérique à l'intérieur des dunes. En observant l'humidité du sol en fonction de la profondeur dans les dunes, il considère que l'humidité des sables peut être due à l'évaporation de la nappe, et pense à une alimentation de la nappe par infiltration. Par ailleurs, des profils sismiques effectués par la Compagnie de Géophysique ont révélé l'existence de sables humides en profondeur. Ce n'est qu'en 1956 que des chercheurs physiciens du CNRS concluent à la présence dans l'erg d'un résidu d'eau datant du dernier "pluvial", estimant que l'eau contenue dans les sables des dunes ne peut provenir de la nappe par évaporation ou de la pluie tombant sur l'erg. Par la suite, les mesures isotopiques réalisées par Conrad et al (1972, 1973, 1975), ont mis en évidence le phénomène de recharge dans la vallée de la Saoura où les crues contribuent d'une manière quasiannuelle au relèvement du niveau piézométrique de la nappe superficielle liée à l'oued, et ceci conjointement à la nappe du Grand Erg Occidental située rive gauche de la Saoura.

Etant donné M. Yousfi (1984) réalisa des profils avec carottages continus en profondeur afin d'estimer la valeur de l'infiltration dans la région de Béni-Abbès,, à partir de la méthode du Tritium et celle du bilan du Chlore. La valeur de la recharge ainsi calculée sur le profil de Hassi Juiffa, ($R=31$ mm/an) paraît surestimée tandis que celle calculée par la méthode des chlorures, beaucoup plus faible ($R=0.13$ mm/an) semble plus raisonnable. Nous présentons ci- dessous la méthode de calcul de cette dernière valeur.

4.1 Estimation de la recharge par la méthode des isotopes stables

La composition isotopique des eaux souterraines dans les régions arides peut être totalement différente de celle des précipitations locales, et ce, en raison de l'enrichissement de l'eau pendant l'évaporation.

Le déplacement des eaux souterraines par rapport à la droite météorique mondiale permet une estimation grossière de la recharge. Pour des taux de recharge importants, l'enrichissement isotopique par évaporation est minimal, alors que pour des valeurs faibles de la recharge, le déplacement des eaux par rapport à la droite météorique est important (Clark & Fritz, 1997). Allison et al. (1983) donne les relations empiriques suivantes pour le calcul de la recharge dans les sables assez grossiers :

$$\Delta ^2\text{H} = 22/\sqrt{\text{recharge (mm/an)}},$$

ou bien, $\Delta ^{18}\text{O} = 3/\sqrt{\text{recharge (mm/an)}}$ (dérivée de l'équation du deutérium) où $\Delta ^2\text{H}$ et $\Delta ^{18}\text{O}$ représentent l'écart par rapport à la droite météorique.

d'après les analyses les teneurs en deutérium et oxygène-18 effectuée au laboratoire de l'AIEA par Mebrouk 2005, a obtenus les résultats suivants :

Nappe	Recharge moy (mm/an)	Recharge min (mm/an)	Recharge max (mm/an)
Grand Erg Occidental	1.03	0.76	1.56
Terrasses quaternaires	0.96	0.69	1.21
Hamada du Guir	3.74	2.36	5.39
Monts d'Ougarta	3.28	/	/

Bien que le nombre de points considérés soit plus important et plus représentatif pour les eaux de la nappe du Grand Erg Occidental, le taux de recharge, aussi bien pour la nappe du Grand Erg Occidental que celle des terrasses est pratiquement le même, de l'ordre de 1 mm/an. De même, celui de la nappe de la Hamada du Guir et celle des monts d'Ougarta sont très proches (3.74 mm/an pour la Hamada du Guir et 3.28 mm/an pour les Monts d'Ougarta). Les deux premières sont principalement localisées rive gauche de la Saoura, tandis que les secondes sont en rive droite, les Monts d'Ougarta ne sont en fait que le prolongement géographique de la Hamada.

Cette valeur de la recharge, bien qu'elle reste faible, pourrait s'expliquer par le taux des précipitations légèrement plus important au-dessus de la Hamada.

Quoiqu'il en soit, ces valeurs de la recharge, notamment pour la nappe du Grand Erg, ne peuvent expliquer l'importance de la réserve et nous confirment donc l'ancienneté de ces ressources.

5. Conclusion

L'étude isotopique des eaux de la région de Béni Abbes, a confirmé l'ancienneté des réserves d'eaux souterraines. Par ailleurs, les eaux de la Hamada du Guir, moins évaporées, se différencient de celles de la nappe du Grand Erg et des terrasses.

Les phénomènes d'évaporation sont prépondérants et conditionnent les teneurs isotopiques. Les valeurs de l'excès en deutérium le confirment bien (négatifs pour les eaux de la nappe de l'Erg et des terrasses et positifs pour les eaux de la Hamada du Guir et des Monts d'Ougarta), ont suggéré qu'elles sont d'une origine commune.

La relation entre la teneur en isotopes et la salinité des eaux, celles de la Hamada du Guir, les plus appauvries en isotopes stables, les moins évaporées et peut-être plus anciennes que celles du Grand Erg, ont une minéralisation plus importante. Cette minéralisation est essentiellement due aux phénomènes de dissolution et d'hydrolyse, bien plus importants dans les formations tertiaires hamadiennes que dans les sables quaternaires de l'Erg

En second lieu, la liste des isotopes potentiels utilisables n'est pas limitative et il importe de développer la recherche sur d'autres isotopes que ceux qui sont couramment employés. Enfin, il faut favoriser les études pluridisciplinaires afin de replacer les études dans un contexte caractérisé par de nombreux paramètres, seule approche pertinente pour lever le maximum d'ambiguïtés.

Chapitre 07

SIG et vulnérabilité

Introduction

Le SIG c'est une possibilité de générer dans les délais raisonnables, des produits cartographiques, carte, tableau, graphes pouvant permettre de répondre à certaines questions essentielles et pratiques de gestion et de planification de la ressource en eau. C'est un système de gestion de l'information de données, codées suivant une grille géographique.

Face à la situation actuelle d'usage des ressources en eau dans la région de Béni Abbès, une approche de la gestion intégrée des ressources en eaux est devenue indispensable surtout durant ces dernières années. Pour fournir une image réelle d'aide à la décision aux gestionnaires et dépasser tous ces problèmes, anthropiques, naturels et environnementaux, on doit procéder par un moyen sophistiqué permettant à la fois de rassembler toutes les données, les analyser et de visualiser plusieurs couches d'informations sur un même support. Le SIG est considéré un parmi les meilleurs outils les plus utilisés actuellement. En effet, le premier avantage de ce dernier c'est qu'il est capable de rassembler dans une même base de données des informations autrefois dispersées.

Le présent chapitre est réservé à l'élaboration d'un SIG pour aider une gestion des ressources en eaux souterraines et la cartographie de la vulnérabilité du système aquifère de Béni Abbès. Ainsi, la bonne qualité de l'eau potable pourra être assurée ce qui nécessite une intervention rationnelle et préventive, et nous a incité de penser à la protection des eaux souterraines en étudiant les méthodes de la cartographie de la vulnérabilité.

1. Apport des SIG dans la gestion des ressources en eau

Pour notre étude, nous avons utilisé le logiciel ArcGIS 10.2, qui présente un ensemble complet de fonctionnalités. Il permet :

- ❖ D'importer des données.
- ❖ De visualiser les données.
- ❖ De sélectionner soit d'une manière graphique (au pointeur de souris sur une carte) ; soit sur la base des données (sélection des champs sur les tables) ; soit sous forme de calcul ou en combinant les différentes méthodes.
- ❖ D'analyser des données géographiques et interroger le système.
- ❖ D'enrichir des données des éléments sur la carte grâce aux outils déjà existants ou en intervenant sur la base de données directement ou bien même en faisant une jointure ou une liaison avec une autre base de données existante (exportée au format dbf).

1. 1 Méthodologie de travail

La méthodologie adoptée consiste à élaborer un SIG pour le traitement des différentes informations organisées dans une base de données. La démarche appliquée dans ce cadre

nécessite une compilation des données géographiques relatives à la topographie, la géologie, l'hydrogéologie et l'hydrochimie.

1.1.1 Inventaire de données des points d'eau

Pour parvenir à une gestion intégrée des ressources en eau nous avons besoin de collecter le maximum d'informations nécessaires que ce soit les eaux souterraines ou superficielles, par un inventaire de données décrivant les points d'eau (forages, puits, foggara, sondages, barrages, et sources... etc.) exploitant les systèmes aquifères étudiés. Ce travail fondamental permet de définir en première approximation ces systèmes aquifères en fonction des conditions géologiques et hydrogéologiques et d'avoir une première estimation de leurs modes d'alimentation, du sens d'écoulement, leurs débits, les relations entre eux...etc.

L'inventaire est effectué afin de vérifier la distribution des différents types de points d'eau et leurs caractéristiques générales. Les informations sont obtenues à ce stade soit des campagnes de terrain, soit par collecte de données archivées des points d'eau auprès de plusieurs directions en relation avec le domaine de l'eau. Le but est de prévoir une évaluation du bilan hydrique et de la qualité des eaux des différents systèmes aquifères dans la région de Béni-Abbès. Toutes les informations récoltées sont saisies et stockées dans la composante sémantique de Database.

1.1.2 Informatisations des données

Après la collecte et la modélisation des données nécessaires vient la phase de l'informatisation de ces dernières ; c'est-à-dire les rendre sous forme numérique afin de faciliter leur sélection et le lien entre elles. Selon le type de données (sémantiques et spatiales) et leurs complexité, leur informatisation a été subdivisée en plusieurs phases sur une plateforme multilogiciels (Fig.7.1) :

- ❖ Création d'une base de données sous Microsoft Excel ou Access pour les données descriptives.
- ❖ Digitalisation (numérisation) des cartes création d'une base de données cartographiques sous Arc-Info, Arc View et ArcGis
- ❖ Elaboration d'une base de données sous le logiciel Rock Works contenant les données des puits, sondage et forages. Cette composante est mise en relation avec les deux premières citées.
- ❖ Développement d'un modèle de gestion des ressources en eau dans la région de Béni-Abbès.
- ❖ Elaboration d'une base de données relationnelle interactive avec les autres composantes (données et logiciels).

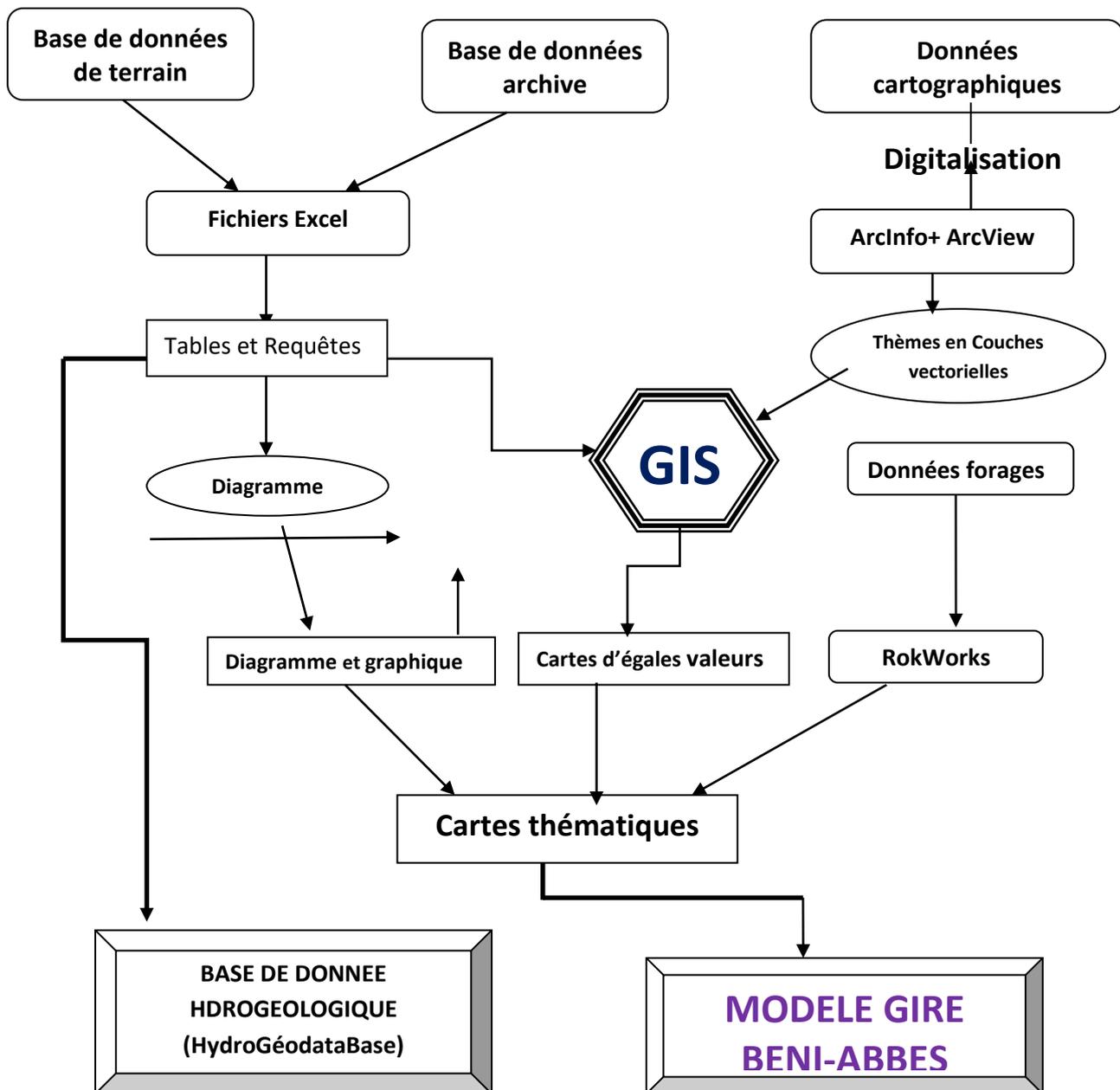


Figure 7.1 : Méthodologie du travail adopté.

Rentrer des fiches papiers au clavier reste encore le moyen le plus courant pour Informatiser des données sémantiques. On profite généralement de cette phase pour standardiser (normaliser) les descriptions qui sont informatisées. Ceci se fait par l'intermédiaire des formulaires de saisie.

1. 1.3 Importation des données

Une petite partie des données archivées existe, mais sous forme de fichiers numériques et papiers. Il faut alors traiter ces données pour les rendre lisibles par un système de gestion de la base de données utilisé. On parle de format interne et format externe. Le format interne est le format propre au logiciel de SGBD. Un format externe est tout autre format de données correspondant à un autre logiciel et sur lequel le SIG ne peut pas fonctionner (Gilliot, 2000).

1. 1.4 Informatisation de la composante spatiale

Cette phase concerne les modes de numérisation des cartes, leur assemblage, leurs géoréférencement, et la sélection de ces informations dans le SIG. Elle se fait de deux manières en relation avec le type de données spatiales (vecteurs et rasters).

Les logiciels de SIG ont des fonctionnalités cartographiques, permettant notamment la cartographie thématique et l'habillage des cartes pour une présentation standardisée. Selon le type de traitement prévu et la qualité de l'information d'origine, les données géométriques sont saisies soit à l'aide d'une tablette ou d'un scanner et traitées par les logiciels SIG.

Le géoréférencement numérique de l'information spatiale constitue le fondement du système vectoriel. La première étape pour géoréférencer une carte est de caler l'image raster qui servira de fond pour le dessin avant ou après leur numérisation. Il s'agit, d'attribuer des coordonnées géographiques réelles en prenant, au moins, quatre points de calage. Cette étape se fait avec les logiciels SIG (annexe 2). Le géoréférencement peut se faire en deux manières : transformation affine des cartes scannées (images) et transformation conforme pour les cartes digitalisées. Pour géoréférencier notre support cartographique, le choix s'est porté sur le système de coordonnées géographiques UTM (Universel Transverse Mercator) WGS 84 (World Global System 1984) pour l'ensemble des cartes de la région d'étude.

I.2 Elaboration des résultats.

Les résultats seront obtenus en analysant toutes les données du système, en allant de la surface en profondeur.

1.2.1-Réseau hydrographique

La région de Béni-Abbès est caractérisée par un réseau hydrographique dense formé par un réseau de premier ordre groupant les principaux Oueds tels qu'Oued Guir, Oued Zousfana, Oued Saoura, Oued Béni-Abbès et Oued Namous (Figure.7.2).L'oued Guir est contrôlé par le plus grand barrage du Sud-ouest algérien ; le barrage de Djorf Torba.

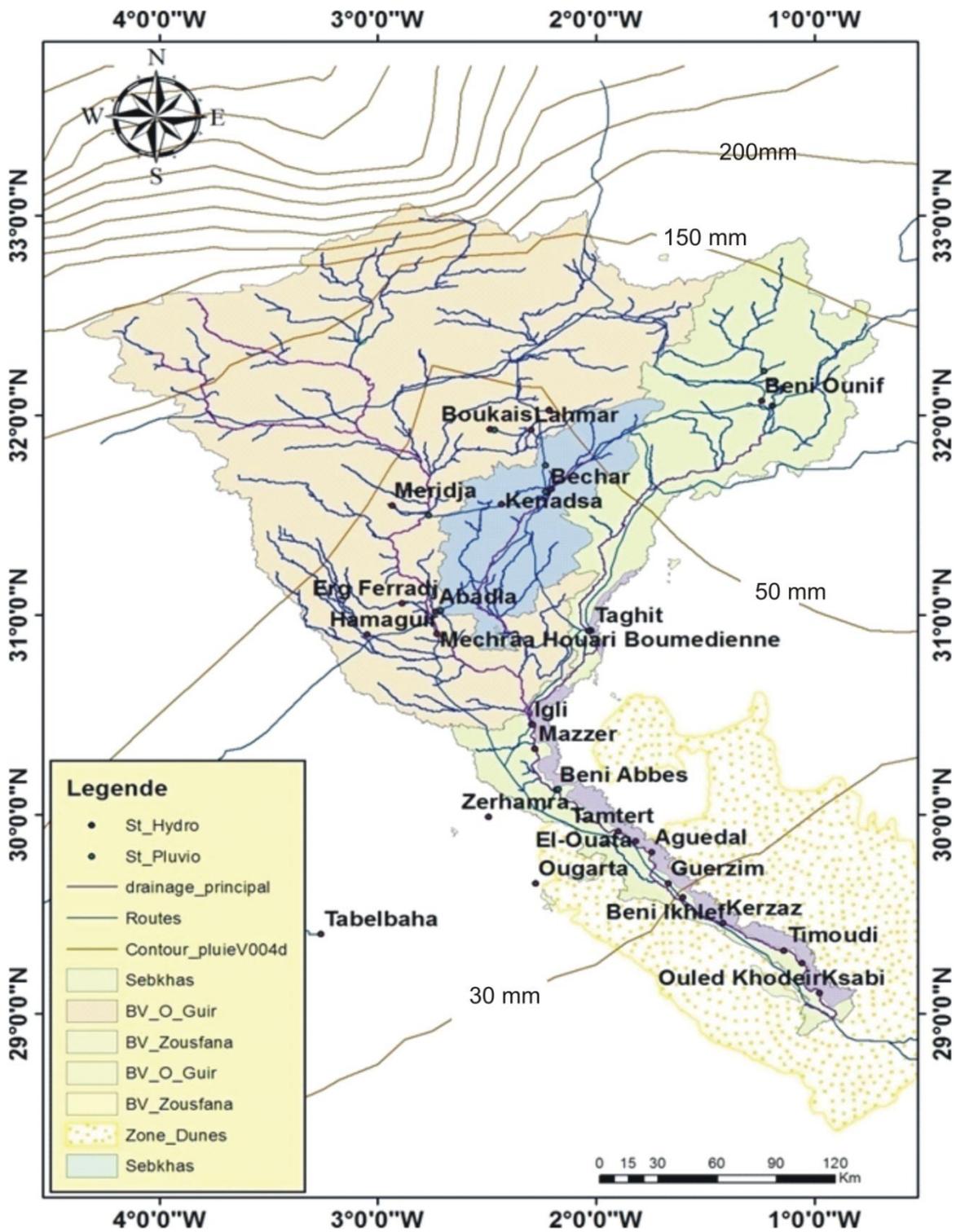


Figure 7.2. Subdivision des bassins versants le réseau hydrographique de la Saoura (période 1904-2014).

1.2.2 Elaboration d'un modèle géologique de terrain

La situation géologique de la région d'étude est représentée de façon schématique dans la figure ci-dessous obtenue en utilisant la carte géologique (1/5 000) (Figure 7.3).

Le Néogène est formé principalement par deux niveaux, constitués par une dalle de calcaire gréseux, reposant sur des dépôts argileux appelés « Torba ».

Le premier niveau constitue un aquifère à porosité de fracture et de chenaux dont la vidange s'effectue au contact des argiles de la Torba par de nombreuses sources qui émergent au niveau de la berge. Cet aquifère est exploité depuis longtemps par des agriculteurs, qui ont creusé une multitude de foggaras et de puits fournissant de faibles débits.

Le second niveau dit « Torba » est généralement imperméable, mais il peut présenter une faible perméabilité dans les endroits où la carapace hamadienne a été érodé, et lorsqu'il contient des éléments grossiers pouvant constituer des pores à travers lesquels circule l'eau.

La nappe du néogène est exploitée actuellement par deux forages situés au Nord de la ville près des dunes de sable. Ces forages d'une profondeur de l'ordre de 100 m ont été réalisés par battage (F1 et F2 sur carte), et fournissent un débit de 3 l/s.

Un troisième forage (F3) situé entre les deux premiers (d'une profondeur de 122 m) a été abandonné du fait qu'il est stérile.

Il est à noter que presque toutes les sources sont situées sur la rive gauche de l'Oued qui est recouverte par les immenses dunes du grand Erg occidental. Sur la rive droite par contre, les sources sont rares et de faible importance.

Cette inégalité de répartition des eaux, peut s'expliquer par le très grand pouvoir absorbant du sable des dunes. Quand il pleut, toute l'eau est absorbée et le ruissellement est nul. Les sables cèdent les eaux ainsi accumulées à travers la dalle hamadienne sous-jacente au niveau aquifère existant par endroits, au-dessus de la Torba imperméable, et par d'autres, au-dessus des schistes argileux dévoniens lorsque la Torba est semi perméable.

Parmi les nombreuses sources existantes, on peut citer « la grande source », située à environ 2 km au Sud-est de l'agglomération. Son débit relativement important (de l'ordre de 30 l/s) couvre en partie le besoin en eau potable de l'oasis.

De point de vue hydraulique souterraine, il faut noter que la région d'étude constitue d'un bassin versant à Beni -Abbès, la source est constituée par une vaste cuvette située à l'Est de la ville et qui peut se prolonger même sous l'Erg Occidental.

Les résultats obtenus suite à la prospection géophysique, nous ont permis de tracer une carte structurale synthétique (Fig). Celle-ci montre la limite probable du bassin versant de la source qui coïncide avec celle de la Torba conductrice imperméable. Elle montre également la présence de failles ou fractures probables susceptibles de constituer des chenaux d'alimentation de la source.

D'autre part, l'interprétation des données donne à penser que l'émergence naturelle de la source est probablement située aux environs des sondages B4 et B5.

Concernant les schistes argileux alternés parfois par des bancs de calcaires du Dévonien, le forage de reconnaissance réalisé au pied de la Gara Diba a montré que ces formations ne constituent pas un aquifère intéressant.

Il est à noter avec une probabilité proche de la certitude que la réalisation d'un forage ou puits est réussi, il influencera négativement sur le débit de la grande source.

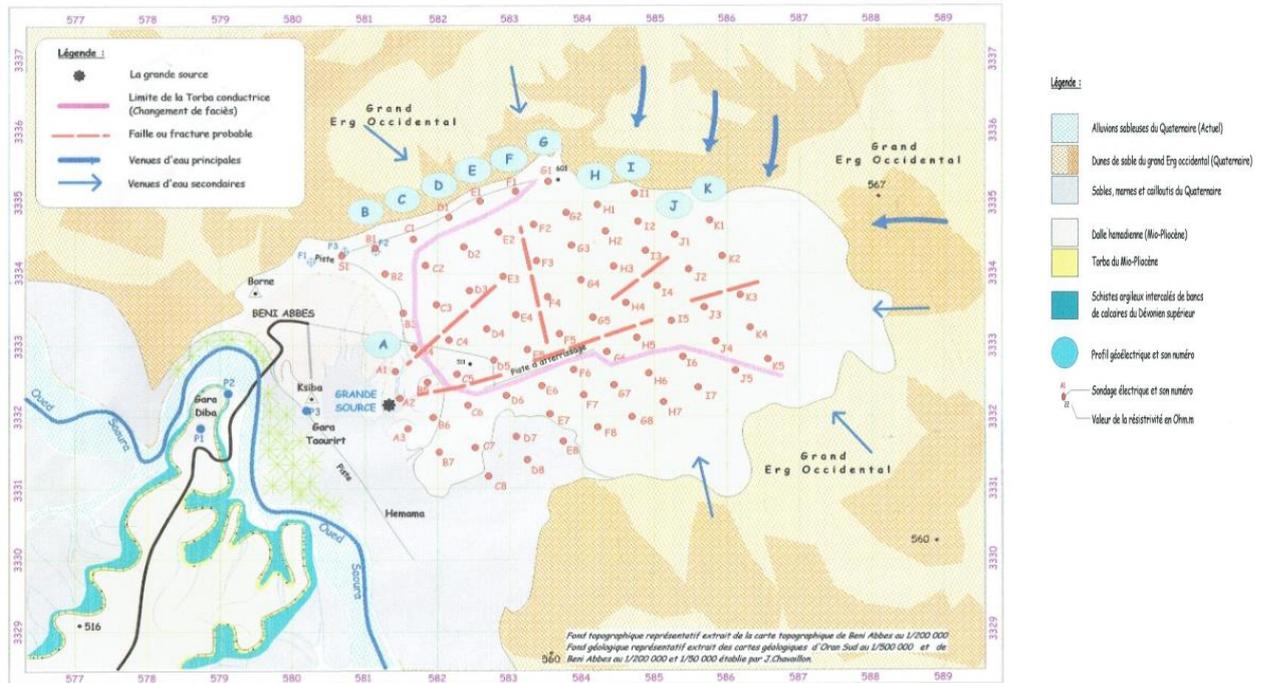


Figure. 7.3: Carte géologique et structurale synthétique de la région de Béni -Abbès.

1.2.3 Répartition des points d'eau

La région de Béni- Abbès est exploitée par plus de 165 points d'eau (Tableau 7.1),(Figure 7.4) **(Puits, forages, sources et foggaras)**. Ils captent le système aquifère de la région de Béni-Abbès.

Tableau 7.1 : Type et usage des points d'eau

Type	AEP	Irrigation	Industrial
Forages	02	00	0
Puits	05	80	/
Sources	01	15	01
Foggaras		60	01

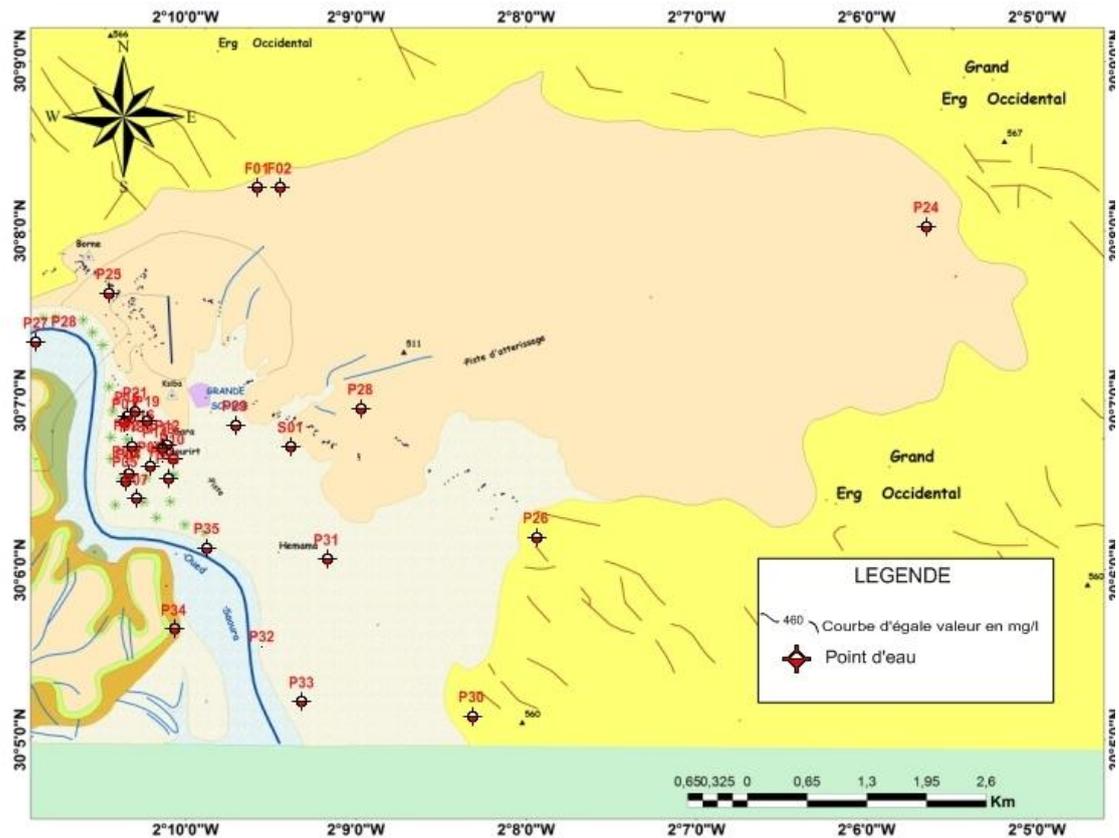


Figure 7.4 : Carte de distribution des points d'eau dans la région de Béni Abbès

1.2.4 Carte des aquifères

La région de Béni -Abbès est constituée d'un système aquifère qui renferment un nombre de nappes très intéressantes de points de vue quantitatif et qualitatif (Figure 162) (voir chapitre 04 Hydrogéologie).

Les prélèvements pour la région de Béni-Abbès sont effectués à partir de deux aquifères (Fig.7.5)

1. La nappe du grand erg occidental (Mio-Pliocène).
2. La nappe des terrasses alluviales et d'inféro-flux (Quaternaire).

Le captage de la nappe du Grand Erg Occidental s'effectue comme suit:

- La Grande sources (29l/s) (32 l/s GTZ ,2007)
- Deux forages) F1 (4.5 l/s) et F2 (5.5 l/s)
- Système de Foggaras (nviron 8-10 l/s)

Le captage de la nappe des terrasses alluviales et d'inféro-flux par plus de 40 puis avec des profondeurs varies entres 3 à 10 m et un débit moyen de prélèvement de 2 l/s .

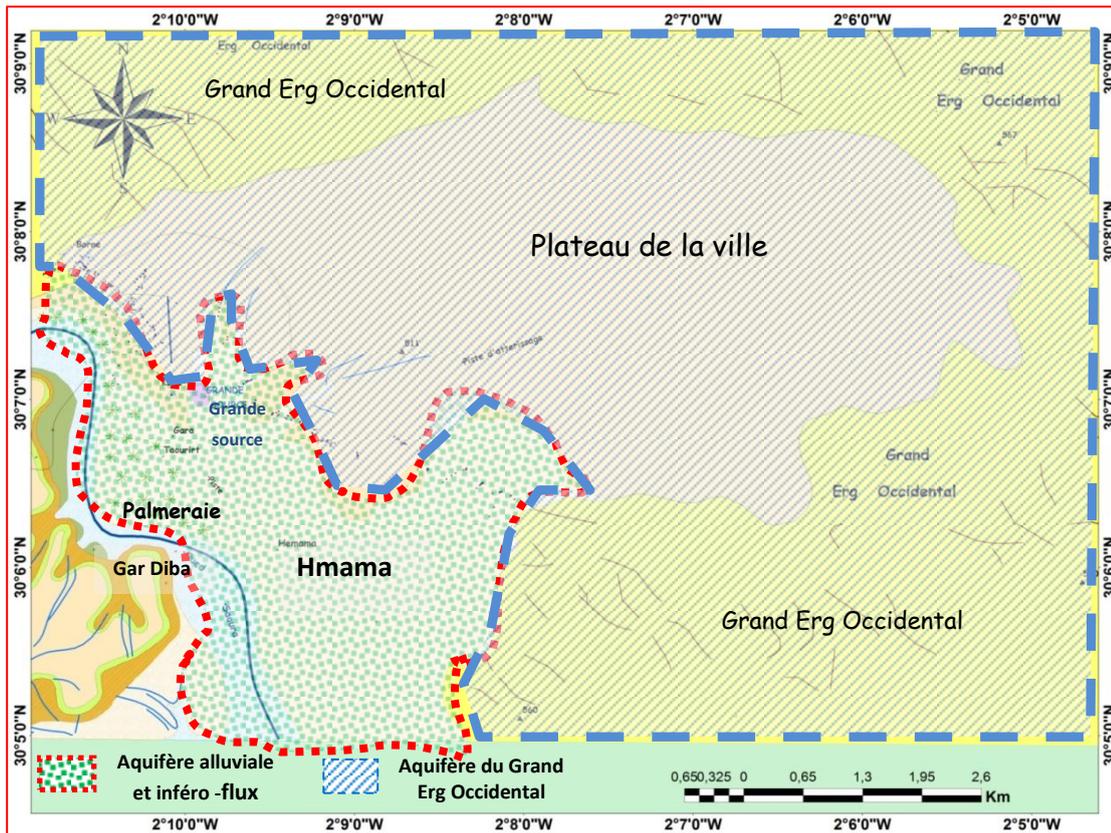


Figure 7.5: Le système aquifère de la région de Béni Abbès

1.2.5 Carte piézométrique globale.

Dans la figure ci-dessous nous avons élaboré une base de données globale de la région de Béni Abbès pour étudier le sens général de l'écoulement des eaux souterraines des différents aquifères de cette région d'étude (Figure 7.6) (voir chapitre 04)

La direction d'écoulement souterraine dans le système aquifère de Béni Abbes se fait Nord Est -Sud-Ouest. Il faut noté que les sens d'écoulement est resté le même pour toute la période 1964-2016. L'alimentation du système se fait de la partie Nord-est.

Etant donné que le domaine d'influence du cône de dépression, a été déterminé dans les secteur des deux forages par le pompage continue et les prélèvements permanants pour assurer l'alimentation en eau potable de la population de Béni-Abbès avec un niveau dynamique constant à 32 m pour les deux forages, ceci nous confirme la recharge permanente du système à partir des eaux de la nappe du grand erg occidental

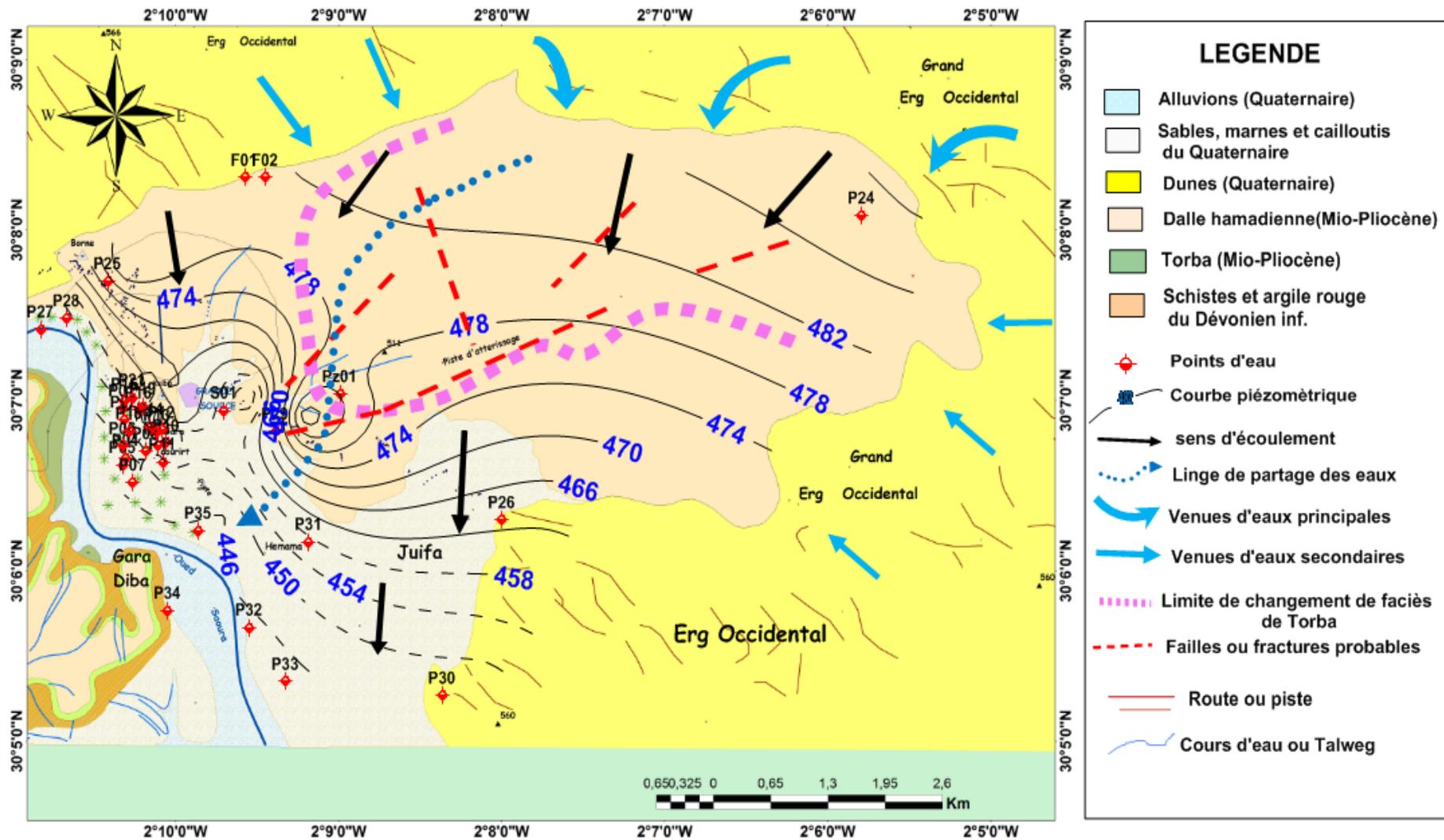


Figure 7.6: Carte piézométrique et hydrogéologique du système aquifère de la région de Béni-Abbès.

1.2.6 Carte des débits

La productivité correspond aux débits fournis par les points d'eau lors des pompages d'essai. L'établissement d'une analyse carte ponctuelle sur l'attribut relatif au débit d'exploitation a permis de définir 06 classes (Figure 7.7E), montrant que les débits varient généralement entre de 2 et 30 l/s, tout en indiquant que les zones les plus productifs de la nappe sont situées dans le plateau de Béni-Abbès au niveau de l'exutoire de la grande source. Par contre les moins productifs se trouvent aux alentours de la Grande Source sur le plateau et les terrasses alluvionnaires. Les zones où les débits sont forts, peuvent s'expliquer, par le développement du système karstique des calcaires du Néogène où la perméabilité est en grande (de fissure).

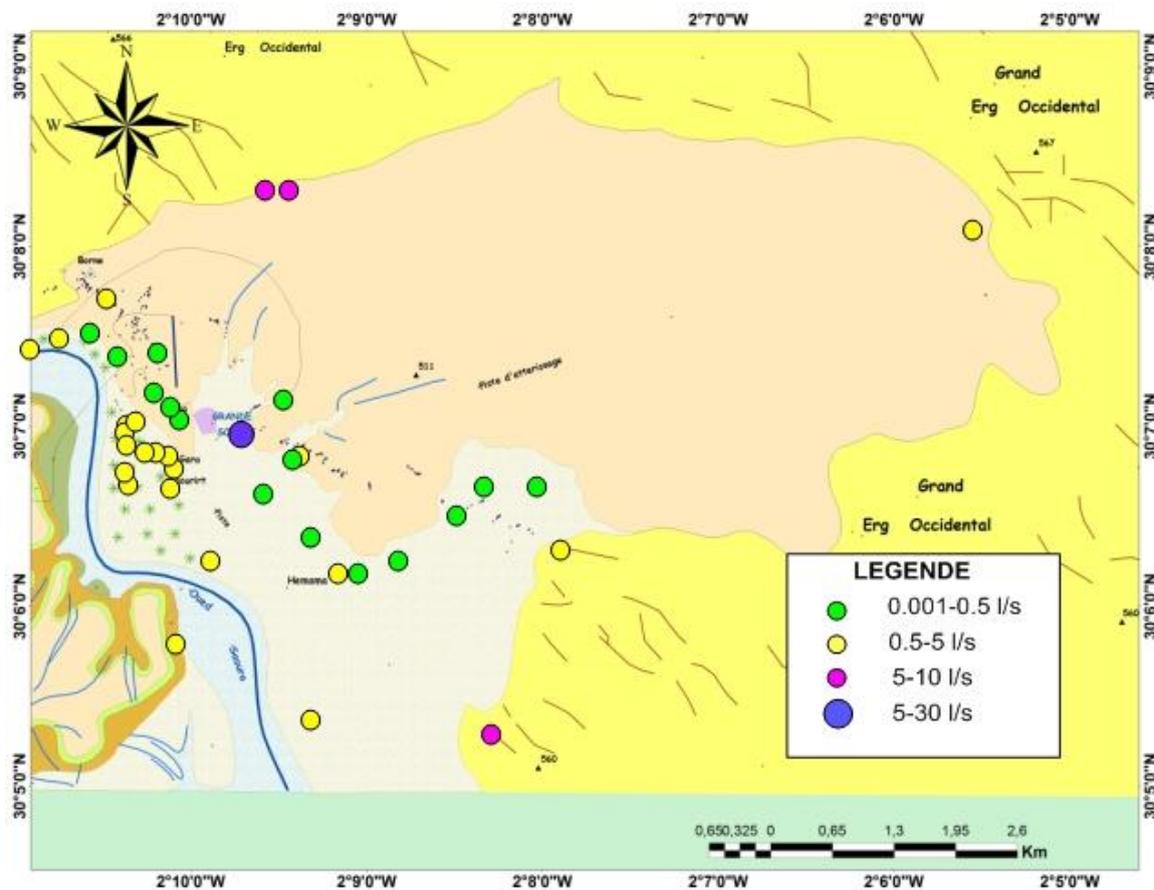


Figure 7.7: Carte de distribution des débits de la région de Béni Abbès

1.2.7 Carte de transmissivité

L'analyse Thématique de la carte de transmissivités (Fig.7.8) montre qu'on peut grouper les zones transmissives en 03 classes

- Des transmissivités intéressantes, supérieures à $0.2 \text{ m}^2/\text{s}$ représentées par la trajectoire en direction d'écoulement souterrain vers l'exutoire de la grande source.
- Des transmissivités moyennes comprises entre 0.14 et $0.06 \text{ m}^2/\text{s}$, représentées par les sites des deux forages.
- Des transmissivités faibles, inférieures à $0.04 \text{ m}^2/\text{s}$, représentées au niveau des terrasses

alluviales de la palmeraie.

Il est donc interdit de réaliser des forages ou des puits dans ses zones favorables à transmissivités Intéressantes qui présentent un risque directe sur la grande source de Béni Abbès.

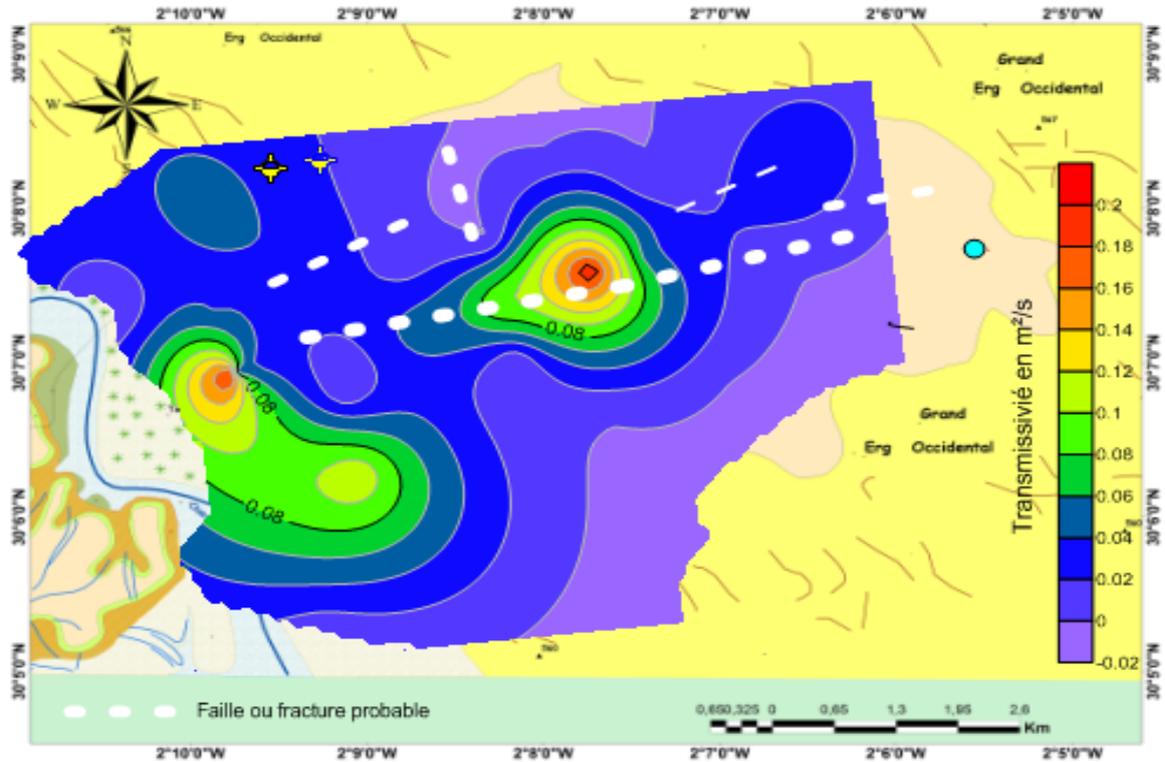


Figure 7.8 : Carte thématique de transmissivité

1.2. La minéralisation

La répartition spatiale de la minéralisation des eaux du système aquifère de la région de Béni Abbès montre une variation d'un aquifère à l'autre et des teneurs variant entre 8,75 et 11 792 mg/L (fig.7.9). Cette carte montre une augmentation d'une façon logique dans le sens d'écoulement de la carte piézométrique. Les valeurs les plus fréquentes oscillent entre 500 et 1500 mg/l, à l'exception de quelques variations au centre de l'aquifère du Turonien vers le barrage de Djorf Torba avec de fortes concentrations et des valeurs entre de 1500 à 5712 mg/l caractérisant quelques points d'eau de l'aquifère de l'inféro-flux et du Quaternaire.

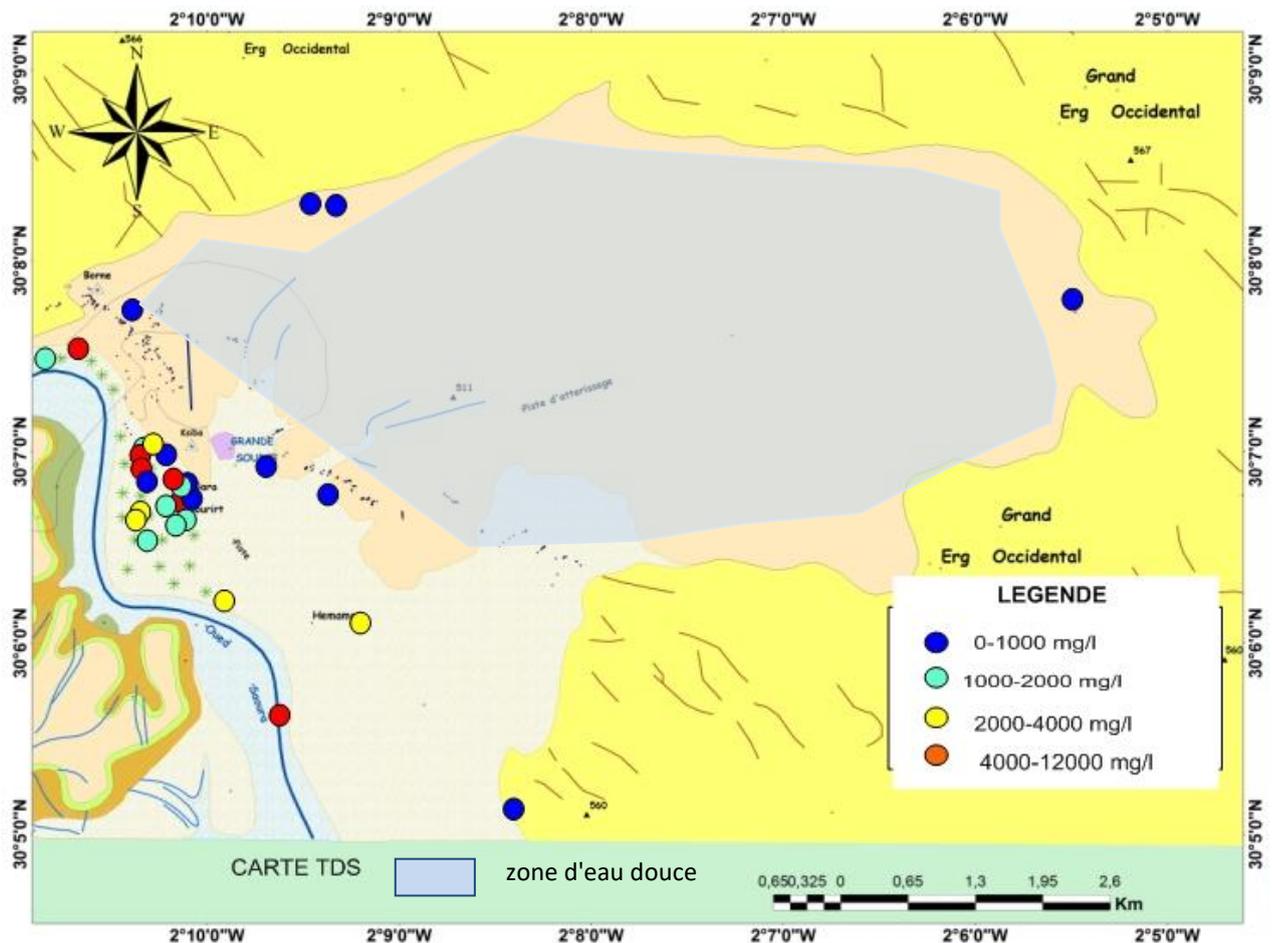


Figure 7.9: Carte thématique de la minéralisation de la région d'étude

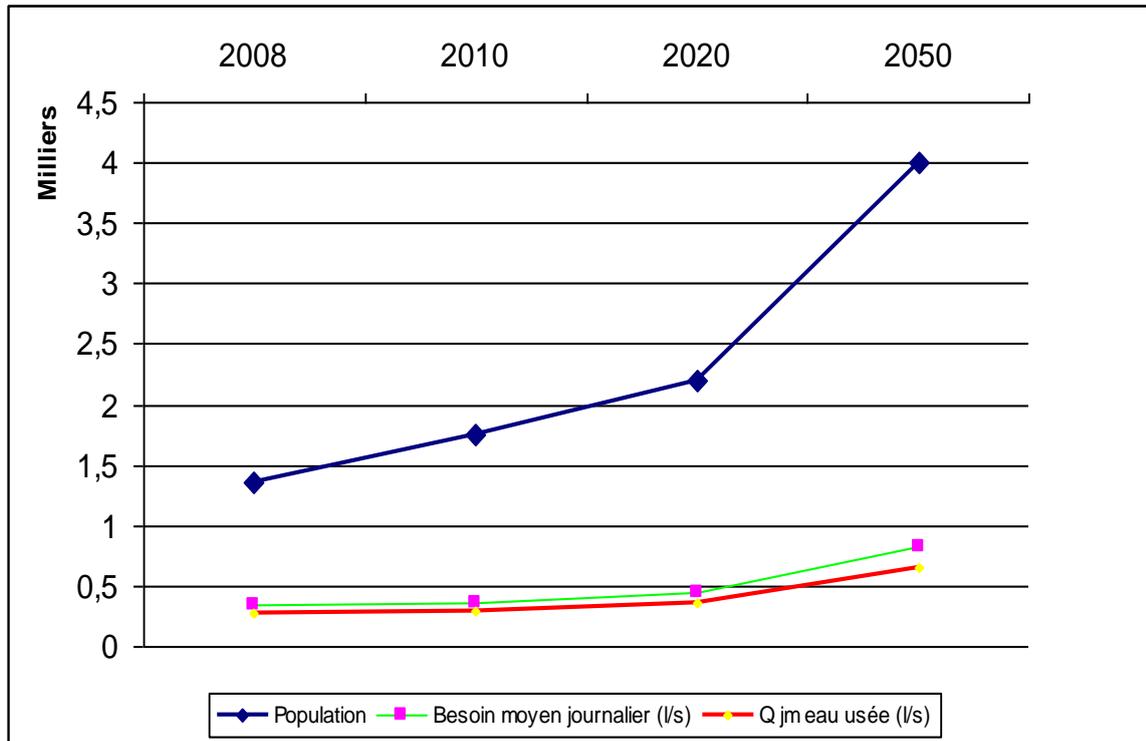
2. Schéma de la gestion intégrée des ressources en eau de Béni-Abbès.

La région de Béni-Abbès a connue un développement urbain et agricole, par une évolution démographique, suivi d'une augmentation du tissu urbain très importante. Aussi la création des nouveaux périmètres agricole d'une surface de 2800 ha (DPAT, 2010).

Comme par ailleurs, dans la région de Béni-Abbès, les besoins en eaux deviennent de plus en plus contraignants du point de vue qualité et quantité, liée essentiellement à plusieurs facteurs :

- Les besoins en eau potable pour les différents usagers ne cessent d'augmentation d'avantage (taux de développement 4%), ce qui nécessite une demande de plus en plus pour les générations futures (Fig.7.10).
- La diffusion de la salinité où on assiste à une propagation spectaculaire de la salinité (70 % des eaux de la nappe des terrasses alluviales).

- l'assèchement d'oued Saoura.
- Les activités humaines qui semblent être orientées pour remédier aux points précédentes, mais réellement elles contribuent efficacement à la détérioration des eaux souterraines.
- Les eaux usées déversées sans traitement préalable dans l'Oued Saoura, les rejets urbains risquent de polluer les ressources en eau, ce qui constitue une menace pour la santé publique, l'environnement et l'équilibre écologique.



2.1 Les potentialités en eau

2.1.1 Les ressources en eau superficielles

La région de Béni -Abbès reçoit des eaux de l'oued Zouzfana et les lâchées du barrage Djorf Torba, qui joue un rôle important dans la recharge des nappes du quaternaire et maintenir l'équilibre de l'écosystème des oasis de la Saoura.

Les apports d'oued Zouzfana à Beni Ounif (3670 km²), le débit annuel est de 0,136 m³/s. l'apport de cet Oued (2215km²) serait de 0,082 m³/s. A la sortie de l'atlas, la Zouzfana aurait un débit de 0,218 m³/s et un apport de 6,875 Hm³/an (ANRH, 1995). Le débit de la Zouzfana à Taghit (la deuxième station hydrométrique sur le cours d'eau de Oued Zouzfana» serait de 0,129 m³/s soit un apport de 4,068 Hm³/an (ANRH, 1995).

Au niveau de la Saoura (Fig.7.10) Vanney dans sa thèse sur la "cru de mars 1959" a estimé les apports à 400 Hm³ à Béni Abbès et à 350 Hm³ au niveau de Kerzaz.



Figure 7.11 : La palmeraie de Béni-Abbes et l'oued Saoura dans sa dernière crue (2014).

Des projets de réflexion pour une valorisation des eaux de surface de l'oued Saoura (Fig. 7.11) sont hautement recommandés.

2.1.2 Les ressources en eau souterraines

Les prélèvements pour Béni Abbès sont effectués à partir de:

- La nappe du Grand Erg Occidental.
- Les nappes des terrasses et inféro-flux.

Le captage de la nappe du Grand Erg Occidental s'effectue comme suit:

- La grande source de Béni-Abbès dite " Ain Sidi Otmane" 28-29 l/s (GTZ en 2006, 32 l/s)
- Deux forages: F1(4.5 l/s) et F2(5 l/s) avec des niveaux statiques de nappe de 25 et 30m respectivement.
- Système de foggaras (environ 8-10 l/s)
- Ensemble de puits (40 puits) captant les eaux des alluvions quaternaires et inféro-flux (2 l/s par puits)

2.-2 Les disponibilités et les besoins en eau

Pour les besoins d'une population d'environ 13.000 habitants la source de Béni-Abbes est largement suffisante avec son débit de 29l/s plus les deux forages de 10 l/s jusqu'à l'horizon 2020 si les réseaux d'AEP n'enregistrent pas de défaillances. Une simple opération de calcul donne 158, 4 L/J à chaque habitant ; une moyenne largement supérieure à la norme nationale.

Les différents diagnostics ont fait un état de la situation sur la gestion de l'eau dans les différents secteurs d'exploitation et d'utilisation. Si les débits des eaux disponibles ont pu être suivis, la connaissance du comportement et de l'écoulement des eaux dans les différentes nappes souterraines nécessite une amélioration des connaissances et un suivi régulier. Une meilleure connaissance de la ressource par la mise

en place d'un réseau d'observation pour un suivi quantitative et qualitative des différentes masse d'eau souterraines..

La production et la distribution de l'Eau potable sont assurées par un réseau dont l'architecture s'est développée sans planification au fur et à mesure de l'augmentation de la population et de l'habitat. Le plan du Schéma Directeur pour l'AEP et l'Assainissement préparé par la Commune a servi de base à l'élaboration d'un modèle hydraulique ainsi qu'un cadastre du réseau AEP et l'assainissement a été réalisé par la compagnie GTZ en 2010. Des travaux de réhabilitation sont en cours ainsi que la rénovation de la Station de pompage sur financement de l'Etat via la Direction des ressources en eau.

Pour satisfaire les besoins futures, des hypothèses de transfert d'eau à partir de la région d'Ougarta sont en cours d'étude.

2.2.1 Alimentation en eau potable (AEP)

L'eau est nécessaire pour de nombreux usages qui dépendent de sa quantité et sa qualité. Mais certains usages peuvent avoir un impact sur la ressource et compromettre à la fois le bon fonctionnement du milieu naturel et les autres usages qui en dépendent.

L'approvisionnement en eau potable est l'activité qui consomme la plus grande partie des ressources en eaux disponibles à Béni -Abbès (29 l/s soit 57%). Les contraintes majeures se situent au niveau de la conception et de la gestion des réseaux AEP. Des actions fondamentales sont donc mises en œuvre pour surmonter les contraintes.

La population totale de la zone d'étude est estimée à 13000 habitants en 2014(DPAT, 2014) avec un taux d'accroissement démographique de l'ordre de 4 % (tableau 7.2, figure 7.10) Les besoins sont fonction de la population. Ils sont estimés sur la base d'une dotation théorique variable entre 240 et 150 l/j/h, desservie 10h/24h. Le tableau 7.2 regroupe les besoins et les disponibilités, ainsi que les déficits en eau à l'horizon 2050. Par conséquent, l'augmentation des déficits et la diminution des débits de consommation fournis, engendrent la réduction du taux de satisfaction (DHWB, 2016).

Tableau 7.2 : Evolution des besoins en fonction des disponibilités et du déficit.

Année	Popul ation	Besion en eau l/j/	Besion en volume m3	Débit disponible l/s	Volume existant m3	Déficit m3
2008	12000	20.83	1800.000	20	1728	-72
2010	13000	22.57	1950.000	28	2419.2	469
2500	25000	43.40	3750.000	42	3628.8	-121
2050	40000	69.44	6000.000	42	3628.8	-2371

Pour la zone d'alimentation de Béni Abbès et sa périphérie immédiate les eaux disponibles et utilisées proviennent (Fig ..7.12) :

La disponibilité actuelle de la ressource pour l'AEP est de 34 l/s (2017) dont.

- 18 l/s provenant la source principale Sidi Othmane,
- 4 l/s provenant du puits proche de la station de pompage,
- 7 l/s provenant des deux forages situés sur le plateau près de L'Erg.
- 5 puits implantées aux pieds du grand erg vers la région de Marhouma, offre un débit de 7 l/s

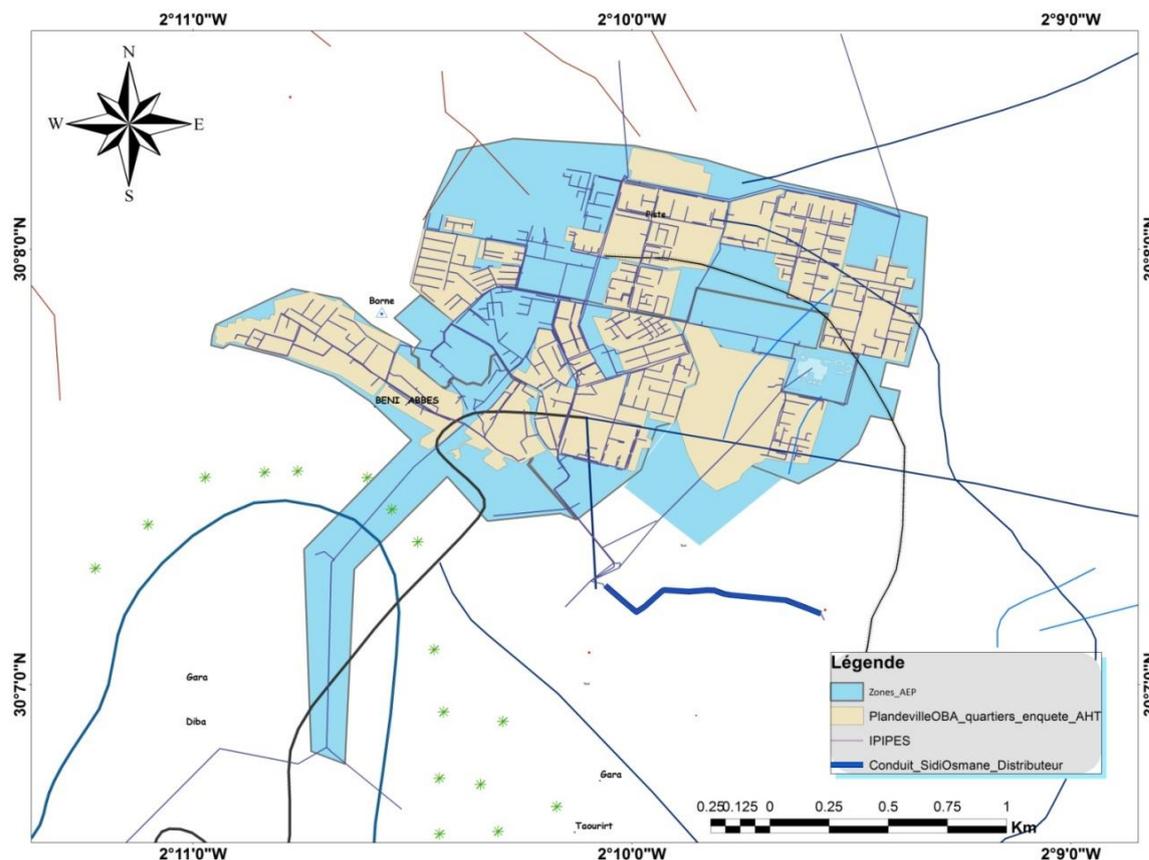


Figure 7.12 : Zone d'alimentation en eau potable de la ville de Béni -Abbès

D'après les résultats de l'enquête effectuée par la GTZ en 2008, les plus fortes consommations d'eau potable pour l'activité de service sont enregistrées au niveau des établissements scolaires et particulièrement des pensionnats où les services de toilette et de nettoyage du linge sont les plus consommateurs (Fig.7.13).

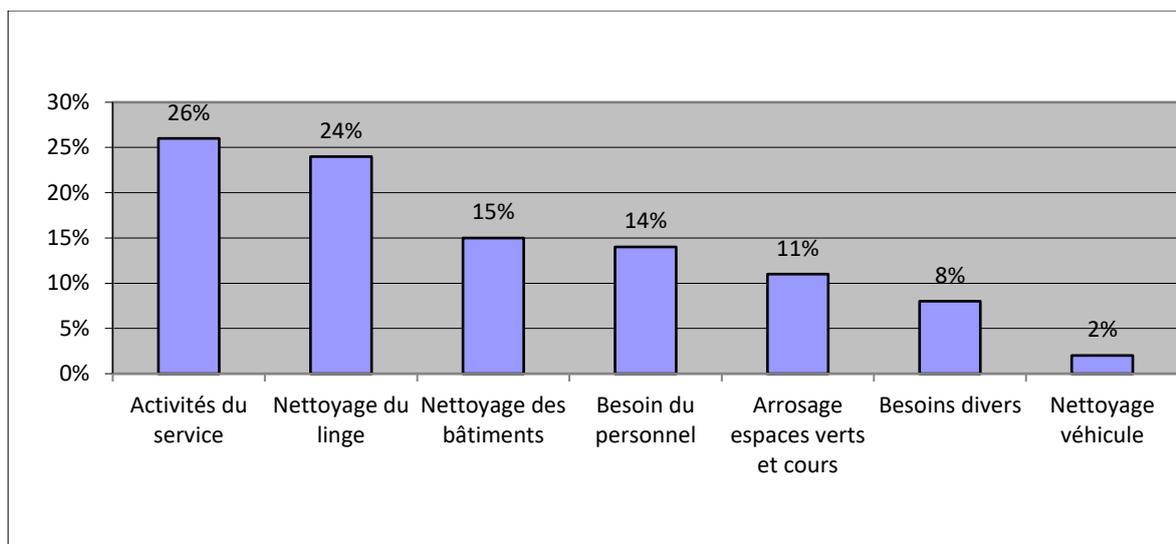


Figure 7.13 : Répartition d'usage d'eau par activités (Enquête GTZ, 2010)

La consommation au niveau des ménages est raisonnable, avec cependant un triplement de la consommation en été (693 litres en moyenne par ménage, soit 94 litres en moyenne par personne), par rapport à l'hiver (242 litres en moyenne par ménage, soit 33 litres en moyenne par personne).

Les ménages (97%) sont prêts à payer leur consommation d'eau suivant les quantités consommées si la fourniture de l'eau est assurée 24 heures sur 24. Une majorité de ménages (76%) sont conscient des améliorations à apporter à la gestion de leur consommation d'eau.

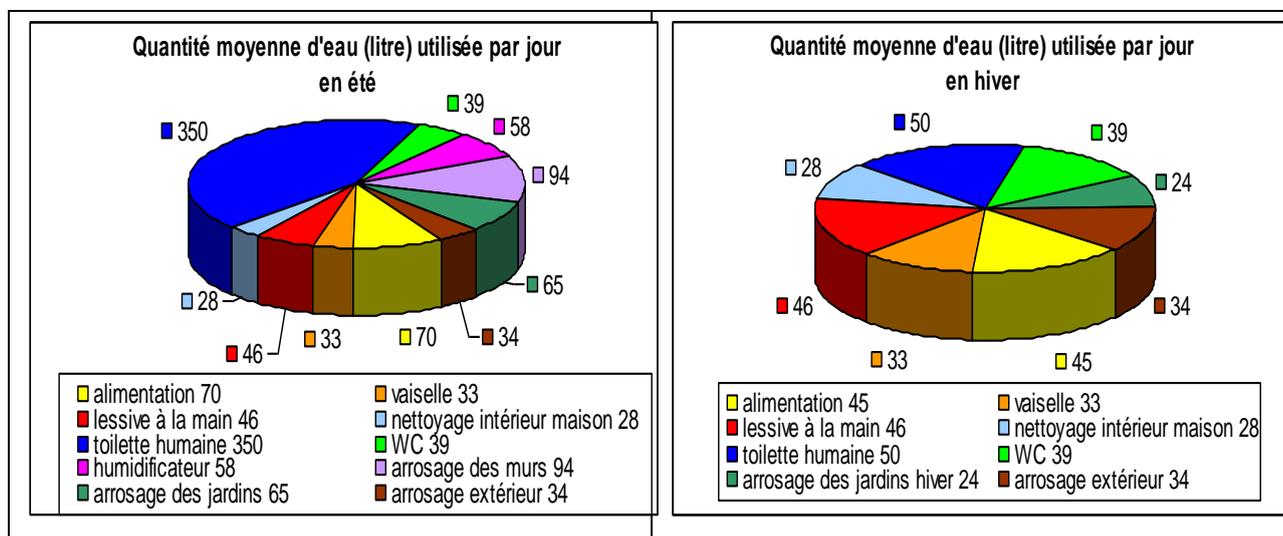


Figure .7.14. Consommation d'eau saisonnière et par activités à Béni -Abbès.

En été, la consommation d'eau augmente considérablement pour l'alimentation, la toilette humaine et le rafraîchissement de l'habitat (humidificateur, arrosage des murs) i (Fig.7.14.):

Les consommations d'hiver sont basses et essentiellement consacrées aux besoins courants des ménages(Fig.7.14.). Il y a une forte diminution des besoins en hiver. Même si l'eau est disponible, les ménages sont économes de leur consommation.

Face à cette « gestion de pénurie », les services développent leur capacité personnelle de stockage (1754 m³), consomment un maximum d'eau aux heures de livraison, n'apportent pas de soin à l'entretien de leurs équipements (fuites d'eau), ne contrôlent pas leur consommation (50% seulement des organismes ont un compteur fonctionnel), utilisent plus d'eau qu'ils en ont besoin lors du renouvellement des stocks (rejet de la quantité d'eau stockée pour la renouveler au moins une fois tous les trois jours). Peu à peu se développe une mentalité et des réflexes de « pénurie », synonyme de peur de manquer d'eau. Les consommations augmentent et deviennent une charge pour la société qui doit supporter économiquement les gaspillages et l'usure prématurée des installations (ADE).

En outre, les principales contraintes sont la conception du réseau d'approvisionnement et de distribution, et la gestion du service de l'eau potable. Le réseau s'est développé au fur et à mesure de l'extension de la ville.

A cette effet, l'élaboration d'un plan d'urgence est obligatoire afin de sensibiliser à la fois les gestionnaires de l'AEP et les usagers pour une meilleure gouvernance de la gestion de l'eau. .

Ce plan prévoit des raccordement avec d'autres concessionnaires AEP, approvisionnement par citerne ou raccordement d'un autre puits à Béni Abbes.

La structure en charge de la ressources en eau devait en outre disposer des mécanismes nécessaires et d'un setup pour être en mesure d'opérer en tant qu'unité de coordination en cas d'urgence, aussi le gestionnaire doit effectuer des estimations des capacités et les possibilités du système AEP de Béni Abbes en cas de situation d'urgence .

2.2-2- Alimentation en eau d'irrigation et d'industrie(AEI)

Les activités de production sont essentiellement des activités d'agriculture et d'élevage. L'artisanat en poterie et tissage a pratiquement disparu. La construction de l'habitat moderne utilise essentiellement le parpaing (ciment, sable, gravillons et eau).

La production agricole couvre une superficie de 75 hectares dont 40 ha pour la palmeraie centrale et 35 hectares pour la zone périphérique. La palmeraie centrale est la zone la plus importante et joue un rôle vital pour l'Oasis de Béni Abbes et celle qui consomme le plus d'eau (12 à 15 l/s). Elle est typique du système de production oasien à trois étages (Palmier, arbres fruitiers et cultures annuelles). Elle est le cœur historique de Béni-Abbès, le patrimoine culturel de la cité et la raison d'être de Béni-Abbès en tant que centre de vie. Sur les 40 ha de palmeraie centrale, seulement 1/4 sont cultivés de manière plus ou moins intensive (10 ha), 15 ha sont cultivés de manière plus ou moins extensive et 15 ha sont abandonnés où seuls subsistent quelques vieux palmiers. La production agricole en palmeraie est faible et ne suffit pas à la consommation de la population de Béni -Abbès. En zone périphérique à la palmeraie centrale, 35 ha sont cultivés de manière plus ou moins extensives à partir de puits, de foggaras ou de faibles résurgences. Des systèmes d'irrigation en goutte à goutte ont été abandonnés. Les deux petites palmeraies de l'Ermitage irriguées à partir de foggaras et de résurgences présentent cependant un bel aspect et produisent sept variétés de dattes différentes et de très bonne qualité.

Un système de foggaras de nombre de 60 puits (Fig.7.15), offre une quantité plus ou moins importante si elle est bien valorisée à travers un travail de réhabilitation . Ce system hydraulique traditionnel est alimenté par les eaux du grand Erg Occidental

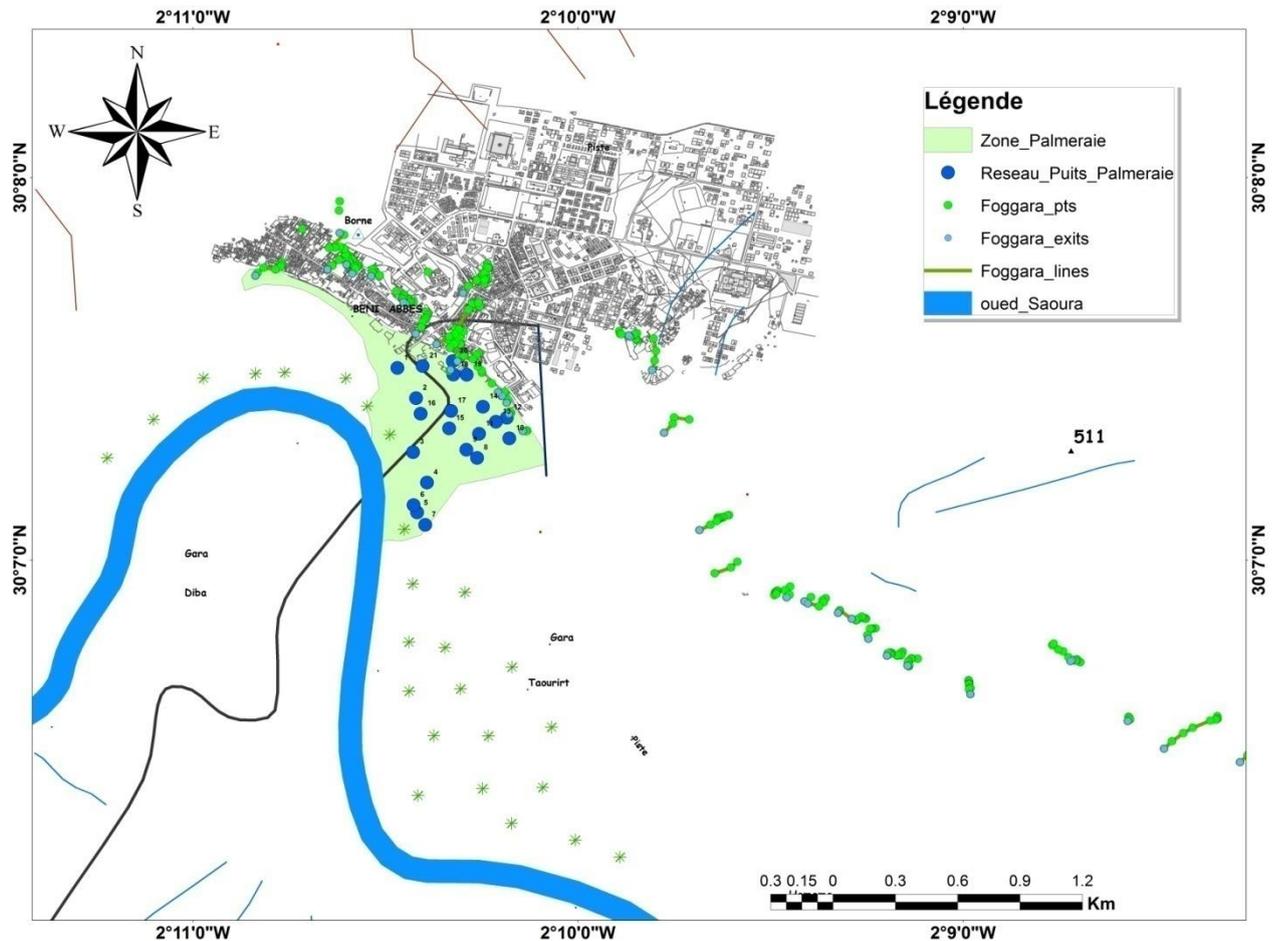


Figure 7.15 : Positionnement des foggaras à Béni -Abbès.

Si l'utilisation inadaptée de l'eau disponible, par rapport aux besoins en eau, est le problème central de la palmeraie, l'eau n'est pas la seule contrainte à la diminution de la production. Les contraintes relèvent aussi du système d'exploitation (main d'œuvre), du système de gestion foncière (héritage) et du système de distribution et de répartition des ressources en eau (gestion des droits d'eau). Le développement urbain de Béni -Abbès a soustrait une grande part de l'eau (+50%) de la source principale à la palmeraie. La construction du barrage Djorf Torba a réduit l'écoulement régulier des eaux de surface dans l'oued Saoura, le manque d'entretien des foggaras en a limité le débit(Fig.7.16). Mais, même limitées, les ressources en eaux seraient suffisantes pour entretenir la production de l'oasis, si le système actuel d'exploitation agricole et le système actuel de gestion de l'eau étaient revus par les familles propriétaires des droits de terres et d'eaux dans la palmeraie

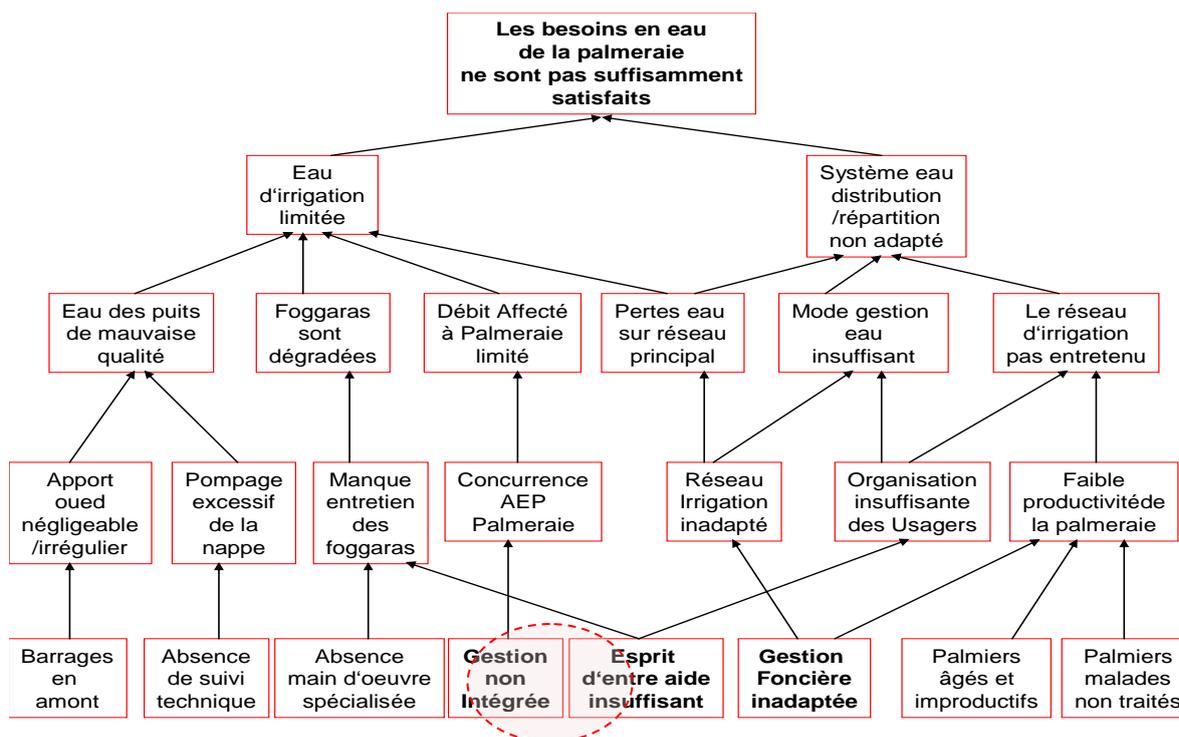


Figure 7.16 : Contraintes est problèmes de la dégradation de palmeraie à Béni-Abbès

2.2.3 Assainissement Et Evaluation Du Débit Des Eaux Usées

Le réseau d'assainissement à Béni -Abbès est constitué de deux réseaux distincts (Fig 7.17) :

- Le réseau 1, le plus ancien, dimensionné pour collecter environ 2/3 des eaux usées de la ville de Béni -Abbès,
- Le réseau 2, dimensionné pour collecte le 1/3 des eaux usées restantes dont celle du nouvel hôpital après un premier traitement par celui – ci de ses rejets.

La situation au niveau assainissement 95 % des ménages sont raccordés aux réseaux d'assainissement, 5% des ménages possèdent une fosse septique dont ils évacuent au moins une fois par an les boues. Les fosses septiques se situent principalement dans le quartier des 62 logements et celui du Chaaba (rejet 2). Les mesures de débit au rejet 1 ont révélé un débit moyen de 6,8 l/s qui se déverse en aval de la ville dans le lit majeur (rive droite) de l'oued Saoura.

Les mesures de débit au rejet 2 ont révélé un débit moyen de 3,3 l/s qui se déverse dans un lagunage expérimental, située sur la rive gauche de l'oued Saoura très en aval de la ville de Béni Abbès. Les eaux décantées de ce lagunage sont utilisées pour irriguer 0,6 ha d'une plantation de jeunes palmiers et de parcelles de production de luzerne.

La Station d'épuration de l'hôpital ne fonctionne pas et les rejets vont directement dans le collecteur général augmentant les risques de contamination bactériologique et virale.

Le lagunage en cours de réalisation va permettre une épuration des eaux usées qui seront rejeter dans l'oued Saoura avec un traitement, et peut être produire une eau de qualité requise pour la réutilisation.

L'ensemble du réseau d'assainissement a besoin d'entretien et de surveillance pour éviter les accidents. L'installation de stations d'épurations sur les deux rejets et le dépannage de celle de l'hôpital sont des investissements à réaliser en priorité.

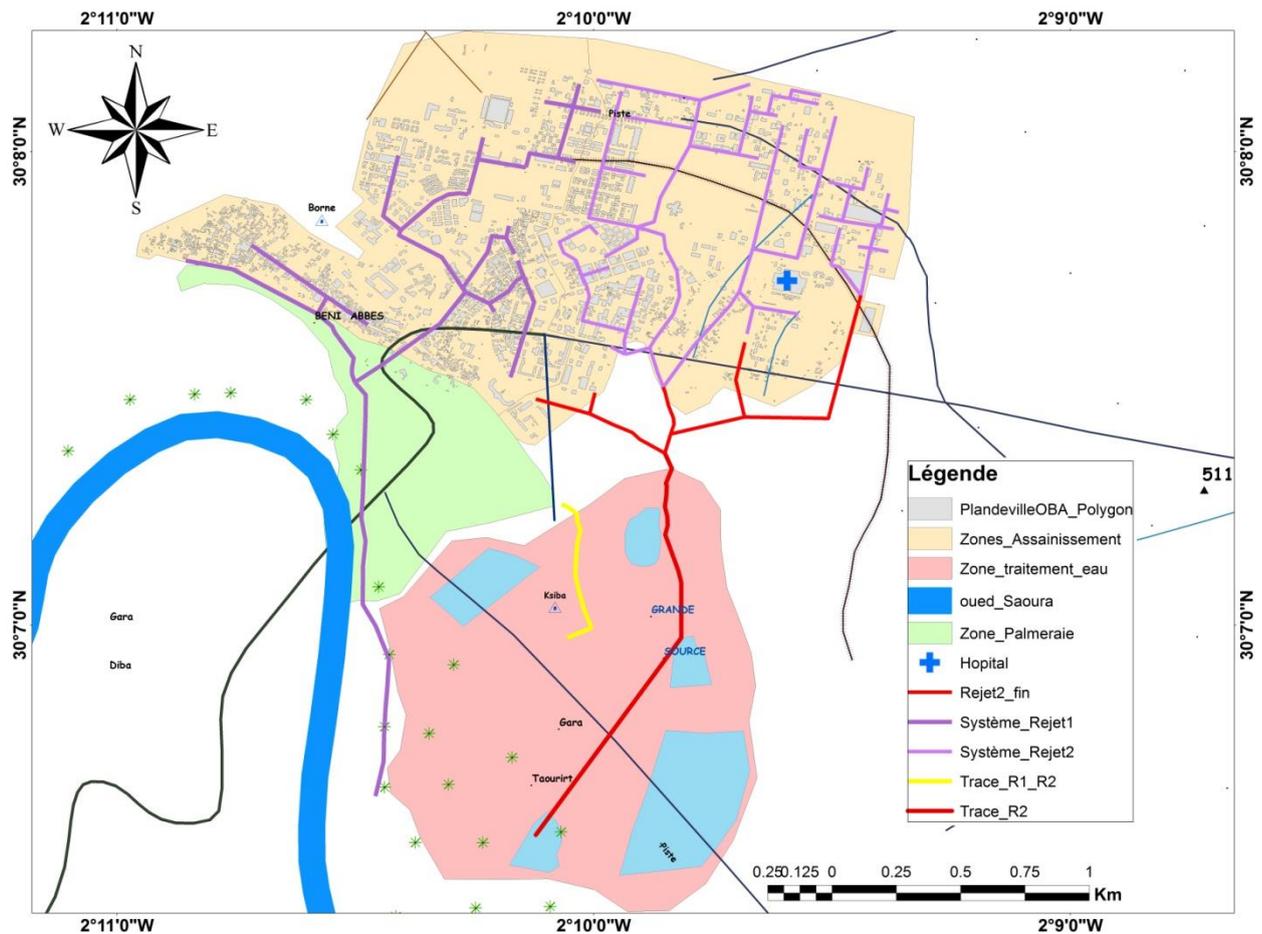


Figure 7.17: Zone d'assainissement de la Ville de Béni-Abbés.

La Valorisation des eaux usées traitées est hautement recommander, ces eaux épurées seront réutiliser dans l'irrigation, cette solution présentent une variante plausible pour la palmeraie de Béni Abbés. Le choix de la filière pour le traitement des eaux usées qui prend considération les paramètres climatiques de la région (évaporation intense) ainsi que en éléments quantitatifs des rejets et qualitatifs des eaux (Fig7.18) .



Figure 7.18 : sortie de rejet 01 et infiltration d'eaux usées.

2.2.4 Vision et stratégie de Gestion intégrée des ressources en eau à Béni -Abbès

L'ensemble de ces éléments, nous a permis d'établir un schéma du cycle de la gestion intégrée des eaux à l'échelle de la région de Béni Abbès, adapté au milieu Oasien et schématiquement illustré et qui prend en compte principalement différentes étapes de planification, recensement et gestion des ressources en eaux. Le schéma de la gestion intégrée du modèle Oasien fonctionne comme suit (Fig.7.19) :

- ❖ Une analyse de l'état actuel et futur des ressources en eau disponibles.
- ❖ Une analyse de l'état actuel et futur des besoins, en AEP, AEA e tAEI.
- ❖ Un inventaire des acteurs participants à cette gestion intégrée (les usagers, les experts, les autorités locales et gouvernementales).
- ❖ Planifier les différentes étapes pour l'application de la gestion intégrée (Connaissance, problèmes, solution, suivi)..
- ❖ Prendre en considération la préservation des ressources existantes (quantité et qualité).
- ❖ Préserver l'environnement (traitement des rejets).
- ❖ Promouvoir les activités socio-économiques, principalement l'agriculture.
- ❖ Etablir une législation de gestion et de protection de l'environnement.
- ❖ Atteindre un taux de satisfaction en AEP et assainissement très satisfaisant.
- ❖ Etablir un modèle saharien qui peut être adopté et adapté à d'autres régions en zone aride.

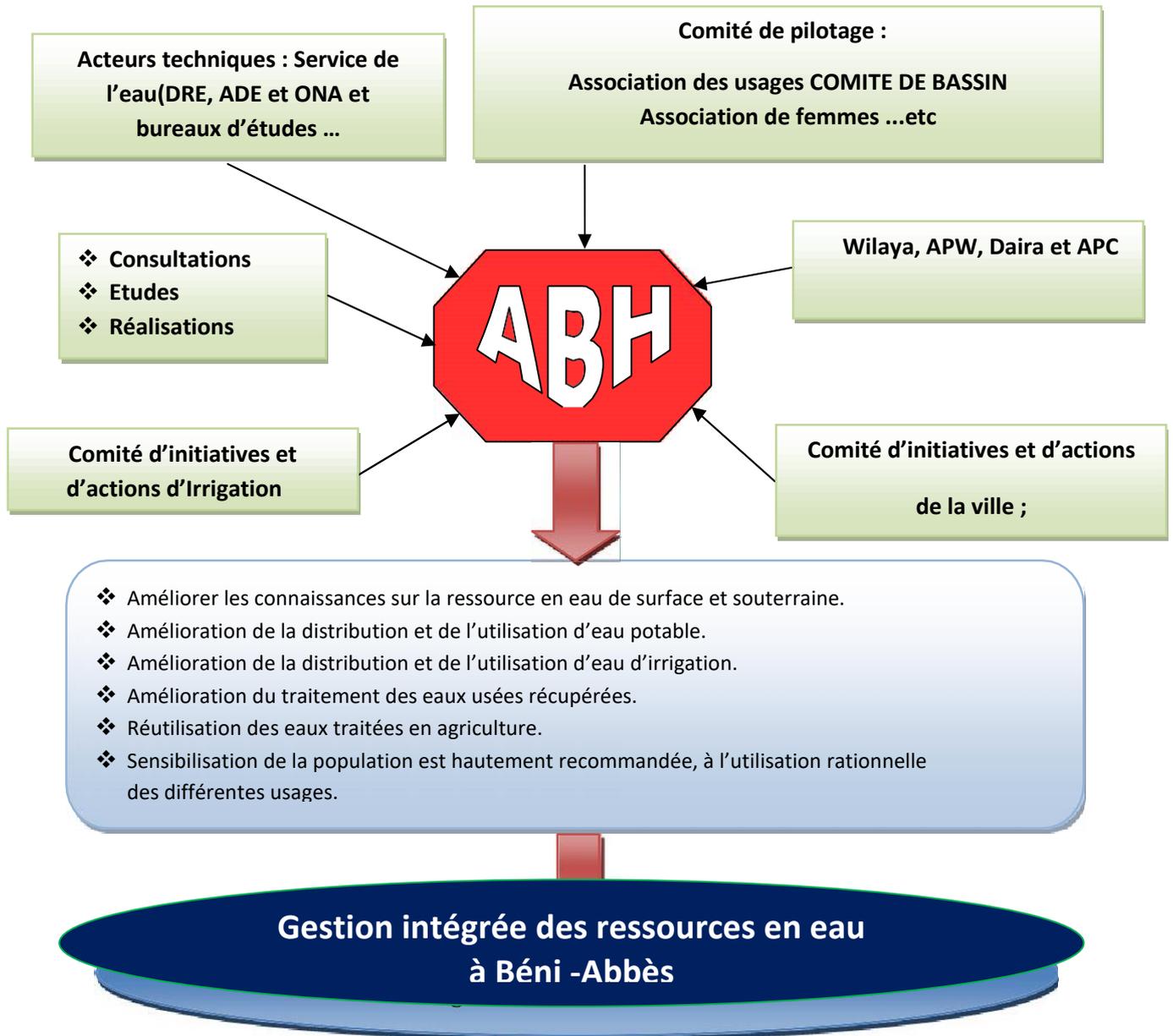


Figure 7..19: Canevas du fonctionnement de l'approche participative(MERZOUGUI, 2011)

2. 2.5 Définition de l'approche de GIRE pour la région de Béni- Abbès

Actuellement la nécessité de gérer la ressource en eau de façon à concilier le développement socio-économique et la préservation des milieux aquatiques et à équilibrer les différents usages pour garantir un développement durable, dans l'objectif globale d'assurer l'équilibre entre l'offre et la demande.

Cette approche est basée sur quatre actions :

- ❖ Améliorer les connaissances sur le fonctionnement du système aquifère local, régional et ces potentialités hydriques et les prélèvements dont l'intérêt stratégique rend la gestion prioritaire.
 - Les eaux souterraines : un capital précieux qu'il faut mieux connaître
 - Les eaux souterraines sont présentes en tous points sur les deux tiers du territoire, dans des nappes qui constituent à la fois un "plan" de distribution et un réservoir. Leur stock présente une très grande inertie au plan de la qualité comme de la quantité en raison de la lenteur des écoulements qui les affectent.
 - La protection naturelle importante dont certaines d'entre elles bénéficient vis-à-vis des pollutions accidentelles, leur confère un grand intérêt en cas de crise.
 - Le coût d'appropriation de cette ressource de qualité est le plus souvent faible.
 - Le revers de ces avantages résulte, comme eux, de la nature même des eaux souterraines : Elles sont cachées, et les limites des unités hydrogéologiques souterraines, où les prélèvements s'influencent mutuellement, ne sont pas apparentes.
 - L'acquisition de leur connaissance est coûteuse.
 - Une connaissance approfondie, nécessaire à qui veut gérer cette ressource, ne peut que résulter de l'exploitation elle-même et ne peut pas en pratique la précéder.
 - La nature de cette ressource et ses liens avec les eaux de surface ne sont pas concrètement perceptibles et aisément compréhensibles pour l'opinion, en particulier pour les occupants du sol qui l'influencent.
 - Amélioration de la distribution et l'utilisation d'eau potable et prévoir une alimentation continue dans le réseau des villes.
 - La valorisation et la réutilisation des eaux usées pour des fins d'irrigation, présentent une variante plausible : elle permet de récupérer un volume journalier de 14 M m³/an.
 - Enfin, une sensibilisation de la population est hautement recommandée, à l'utilisation rationnelle des eaux, pour la ville et l'irrigation.

Pour une meilleure connaissance des ressources en eau souterraines

Certains milieux doivent prioritairement faire l'objet de mises à niveau des informations :

- ❖ Identification des zones d'alimentation et recharge au niveau des différentes nappes pour les systèmes aquifères (hétérogénéité, alimentation, exploitabilité...).

- ❖ Le système aquifère régional (limites, mécanismes, fonctionnement ,qualité de l'eau ...etc.).
- ❖ Influence du changement climatique sur les nappes alluviales et inféro-flux (exploitation, salinités, vulnérabilité de leurs qualités).
- ❖ Réalisation d'une base de données et un SIG sur toutes les ressources en eau.

Un suivi des eaux souterraines est indispensable, par le biais de trois aspects la piézométrie, l'installation d'un réseau d'observations qualité de l'eau et enfin le contrôle des prélèvements par le service de l'eau.

- ❖ Valorisation et réutilisation des eaux usées

La réutilisation des eaux usées en irrigation présente une variante plausible. Pour cela on prévoit une station d'épuration (station de lagunage ou bassin de décantation dimensionnés selon les normes techniques).

Les outils de la gestion intégrée du modèle saharien

Les données de base collectées sur les réseaux ou à la faveur des exploitations doivent être interprétées et traitées pour devenir des informations.

Les traitements numériques des données variables dans le temps conduisent à l'estimation des termes saisonniers du bilan d'eau et sont valorisés à la faveur de bulletins de la situation.

La structuration de ces données dans des Systèmes d'Information Géographique (SIG) permet de les combiner avec des données d'autres natures (données sur l'environnement, d'occupation des sols, économiques...) et de produire automatiquement des cartes thématiques.

2.2.6 La mise en œuvre d'un modèle de gestion intégrée des eaux (fg.7.20)

Le présent modèle conduit à établir un schéma de gestion des eaux, basé sur l'avantage d'aménager les réseaux de distribution de l'alimentation en eau potable, d'améliorer le système d'irrigation traditionnel et de réutiliser les eaux usées après le traitement pour des fins d'irrigation. Ce modèle socio-économique doit être mis en œuvre et constitue une base essentielle pour une gestion efficace de l'eau dans les milieux oasiens. Elle permet de prendre conscience de la nécessité de gérer et préserver la ressource en eau souterraine, de façon à concilier un développement socio-économique, la préservation de la palmeraie de Béni Abbés et à équilibrer les différents usages pour garantir un développement durable.

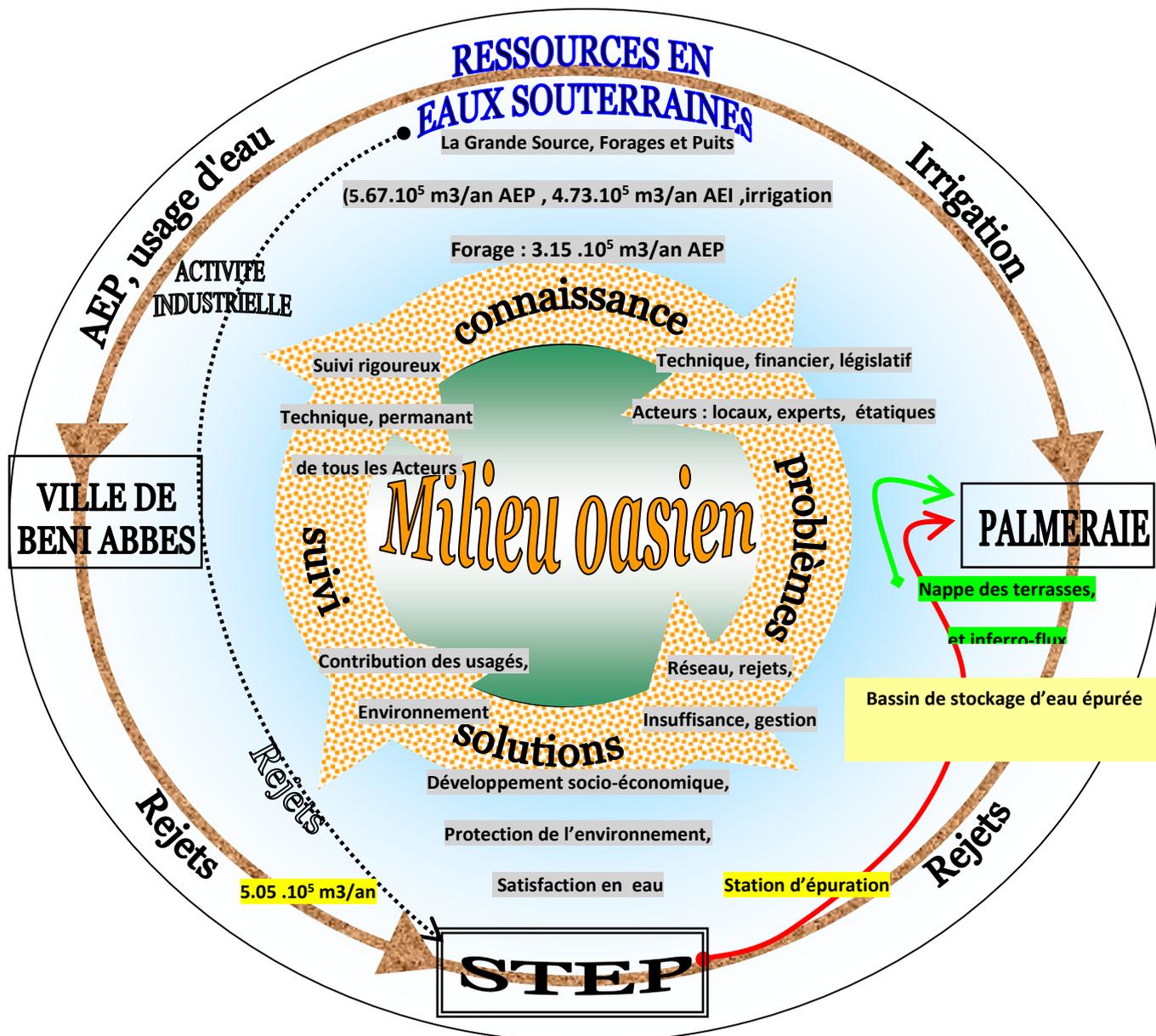


Figure 7.20: Schéma du cycle de la gestion intégrée des ressources en eau dans l'oasis de Béni- Abbès (MERZOUGUI 2013)

3. Evaluation de la vulnérabilité du système aquifère de Béni- Abbès

La vulnérabilité d'une nappe d'eau souterraine à la pollution chimique matérialise la facilité avec laquelle elle peut être atteinte par une pollution chronique ou accidentelle, diffuse ou ponctuelle.

L'estimation de cette vulnérabilité tient compte de certains facteurs qui sont :

- Les conditions de pénétration des polluants dans la nappe, c'est-à-dire le transit, selon un trajet vertical de corps polluants, entraînés par les eaux d'infiltration depuis la surface du sol jusqu'à une nappe souterraine, à travers la zone non saturée.
- La propagation des polluants dans la nappe, qui est matérialisée par l'écoulement de l'eau polluée. Elle dépend des conditions hydrodynamiques de la nappe.
- Le séjour du polluant dans la nappe, c'est-à-dire sa persistance plus ou moins prolongée, après l'élimination de la source de contamination. La durée de ce séjour est régie par le renouvellement naturel de l'eau dans la nappe aquifère.

La vulnérabilité des aquifères comprend deux niveaux d'approche :

- la vulnérabilité intrinsèque, qui prend en compte les conditions physiques du milieu naturel ;
- la vulnérabilité spécifique qui fait intervenir non seulement les paramètres naturels mais aussi les propriétés du contaminant, sa nature et sa mise en place (Murat et al. 2003).

Dans le but de l'évaluation de la vulnérabilité du système aquifère et les risques courus par Les eaux souterraines, une visite au site du captage de la grande source nous a permis de constater l'amoncellement de déchets solides (décharge sauvage) et de fumier provenant d'élevage ovin et caprin dans les proches voisinages. Ces déchets sont une source potentielle de pollution ponctuelle des eaux souterraines.

Ces quelques images illustrent clairement la menace qui plane autour du captage de la grande source de Béni-Abbes. Ce sont des construction illicite d'habitations précaires et des installations de zones d'habitations sauvages non viabilisées aux prochesenvirons de la source qui peuvent engendrer de graves dégâts au site de la source et à son architecture.



Figure . 7.21. : La construction illicite d'habitations.



Figure 7.22: L'installation de bergeries et de poulailiers autour du site de la source.

Afin de minimiser ces risques de dégradation et autres dangers de pollution, il est indispensable de délimiter des zones de protection des eaux souterraines autour du captage de la grande source. La

création de zones de protection constitue la meilleure solution afin de préserver cette eau des multiples risques de pollution, et par là, l'eau potable en tant que principal et plus précieux aliment. Ainsi, la bonne qualité de l'eau potable pourra être assurée ce qui nécessite une intervention rationnelle et préventive, ce qui nous incite à étudier la vulnérabilité des nappes du système aquifère de Béni Abbès,

3.1 Condition et gisement de l'exutoire

L'eau sort entre des affleurements des calcaires silicifiés, séparés par deux bancs de grès calcaires. L'ensemble de ces bancs forme la dalle hamadienne inférieure, d'une fissure horizontale de 60 cm. Pour ce qui est des écoulements souterrains, ils suivent la direction des pendages des formations géologiques, dans le cas de notre région de Béni Abbès, ils sont d'orientation du Nord Est vers le Sud-Ouest.

Par la suite l'accumulation des eaux des émergences qui sont en nombre de quatre dans un bassin d'une surface amorphe plus ou moins triangulaire de 2 m² approximativement, ensuite l'eau se dirige vers une section étroite de 0,45 m de largeur avec une lame d'eau de 0,40 m de profondeur, enfin l'eau rejoint une section large d'une forme plus ou moins triangulaire vers un tuyau (Φ 300) vers le captage (chambre) déjà existant à 90 m de l'exutoire.

Il y'a lieu de mentionner qu'une partie des eaux est difficile à cerner en raison d'anciens aménagements effectués au niveau de la source.

Sur le plan hydrogéologique, à proximité de l'exutoire de la grande source, la nappe des calcaires est déprimée : on appelle rabattement cette dépression qui correspond à un accroissement de la vitesse de l'eau dans l'aquifère et qui se matérialise par une incurvation de la surface piézométrique vers l'exutoire.

Dans le cas de notre émergence, le débit dépend de la perméabilité de l'aquifère (perméabilité en grande = karst) ainsi que de la pente de la surface piézométrique (ou gradient hydraulique).

3.2 Elaboration d'une carte de vulnérabilité

Après avoir achevé la partie précédente, qui a montré le risque de contamination de la nappe du grand Erg, il s'est avéré intéressant de cartographier les zones vulnérables à la pollution. Cette cartographie pourrait aider les gestionnaires du secteur de l'hydraulique à mieux gérer cette ressource hydrique en la protégeant contre la pollution et également les aider à implanter des ouvrages de captage en dehors des zones contaminées.

L'objectif visé par l'établissement de la cartographie de la vulnérabilité est de faire apparaître les possibilités de pénétration et de circulation des polluants dans la nappe. On peut aussi évaluer la sensibilité des ouvrages de captage au risque de pollution et par conséquent le limiter.

Les méthodes d'estimation de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution sont nombreuses. Dans notre approche, on va utiliser la méthode DRASTIC la plus citée dans la littérature .

3.3 METHODES D'EVALUATION

3.3.1 La méthode DRASTIC

La méthode DRASTIC a été mise au point par l'EPA (Environmental Protection Agency) en 1985 aux Etats-Unis et Aller et al. en 1987, afin d'estimer le potentiel de pollution et d'évaluer la vulnérabilité des eaux souterraines (Schneblen et al. 2002).

Evaluation de la vulnérabilité par la méthode DRASTIC Bien que la méthode DRASTIC ne soit pas initialement conçue pour les Systèmes d'Informations Géographiques (SIG), ce modèle repose sur une analyse spatiale classique largement répandue dans les SIG. L'acronyme DRASTIC correspond aux initiales de sept facteurs déterminant la valeur de l'indice de vulnérabilité (Bézégues et al., 2002) : la profondeur de la nappe (D) ; la recharge efficace (R) ; les matériaux de l'aquifère (A) ; le type de sol (S) ; la topographie ou la pente (T) ; l'impact de la zone vadose ou zone aérée (I) et la perméabilité ou la conductivité hydraulique de l'aquifère (C). A chaque paramètre est attribuée une échelle comprenant des intervalles où une cote est attribuée selon la particularité du milieu. Chaque paramètre a été classé en classes associées à des cotes variant de 1 à 10. Chacun des sept paramètres a ensuite été affecté d'un facteur multiplicatif (Dp) fixe variant entre une valeur de 5 pour les facteurs les plus significatifs et une valeur de 1 pour les facteurs qui le sont moins. L'indice de vulnérabilité DRASTIC notée ID a été déterminé selon l'équation (1) (Osborn et al., 1998) :

$$ID = D_c \times D_p + R_c \times R_p + A_c \times A_p + S_c \times S_p + T_c \times T_p + I_c \times I_p + C_c \times C_p \dots\dots\dots (1)$$

(Où D, R, A, S, T, I, et C sont les sept paramètres de la méthode DRASTIC, "p" étant le poids du paramètre et "c" la cote associée). Les valeurs des poids des paramètres de la méthode DRASTIC utilisées (Tableau 1) sont celles définies par Aller et al. (1987). Les valeurs références de l'indice DRASTIC utilisées, sont celles fournies par Engel et al. (1996) et représentent la mesure de la vulnérabilité hydrogéologique de l'aquifère. Ces valeurs varient de 23 à 226 et sont classées en quatre classes distinctes.

L'objectif de DRASTIC est de donner une méthodologie standard qui donne des résultats fiables pour les efforts de protection des eaux souterraines. DRASTIC génère un indice pour le potentiel de pollution des ressources en eau souterraines. Cet indice s'étale sur un intervalle d'entiers allant de 23 à 200. Il faut noter que la vulnérabilité à la pollution est plus importante pour des valeurs plus élevées.

Pour chacun des paramètres DRASTIC, une note est affectée sur une échelle entière allant de 1 (le moins important) à 10 (le plus important). Pour un paramètre donné, une note basse implique que la nappe concernée n'est pas vulnérable à la pollution et vice-versa (Tab.7.3).

Tableau 7.3: Poids des paramètres et des indices de vulnérabilité DRASTIC (Aller et al., 1987 ; Engel et al., 1996).

Paramètre	Version DRASTIC	Degré de vulnérabilité	Indice de vulnérabilité
D : Profondeur de la nappe	5	Faible	<101
R : recharge efficace	4	moyen	101-140
A : matériaux de l'aquifère	3	Forte	141-200
S : type de sol	2	Très forte	>200
T : pente de terrain	1		
I : impact de la zone non saturée	5		
C : conductivité hydraulique	3		

La valeur minimum de l'indice est de "23", tandis que la valeur maximum est de "226". L'indice (ID) permet de caractériser ou d'évaluer le degré de vulnérabilité de l'unité hydrogéologique à laquelle il se rattache. La vulnérabilité est d'autant plus importante que l'indice ID calculé est élevé. Après le calcul de l'indice, on fait correspondre des classes de vulnérabilité aux différentes plages d'indices DRASTIC calculés (Tableau 7.4). L'équation 2 permet d'effectuer la conversion des indices DRASTIC en pourcentage (Jourda et al., 2007) :

$$\text{Indice (\%)} = (\text{ID} - 23 / 203) \times 100$$

Avec : r pour Rating (cote) et w pour Wight (poids).

Après le calcul de l'indice, on fait correspondre des classes de vulnérabilité aux différentes plages d'indices DRASTIC calculés.

Tableau 7.4 : Classification des indices de vulnérabilité DRASTIC

Indice DRASTIC (ID)	Degré de vulnérabilité
23 à 84 (0 à 30%)	Très faible
85 à 114 (31 à 45%)	Faible
115 à 145 (46 à 60%)	Moyenne
146 à 175 (60 à 75%)	Elevée
176 à 226 (76 à 100%)	Très élevée

Les différentes étapes de réalisation de la carte de vulnérabilité selon la méthode DRASTIC sont résumées dans l'organigramme ci-dessous (fig 7.5):

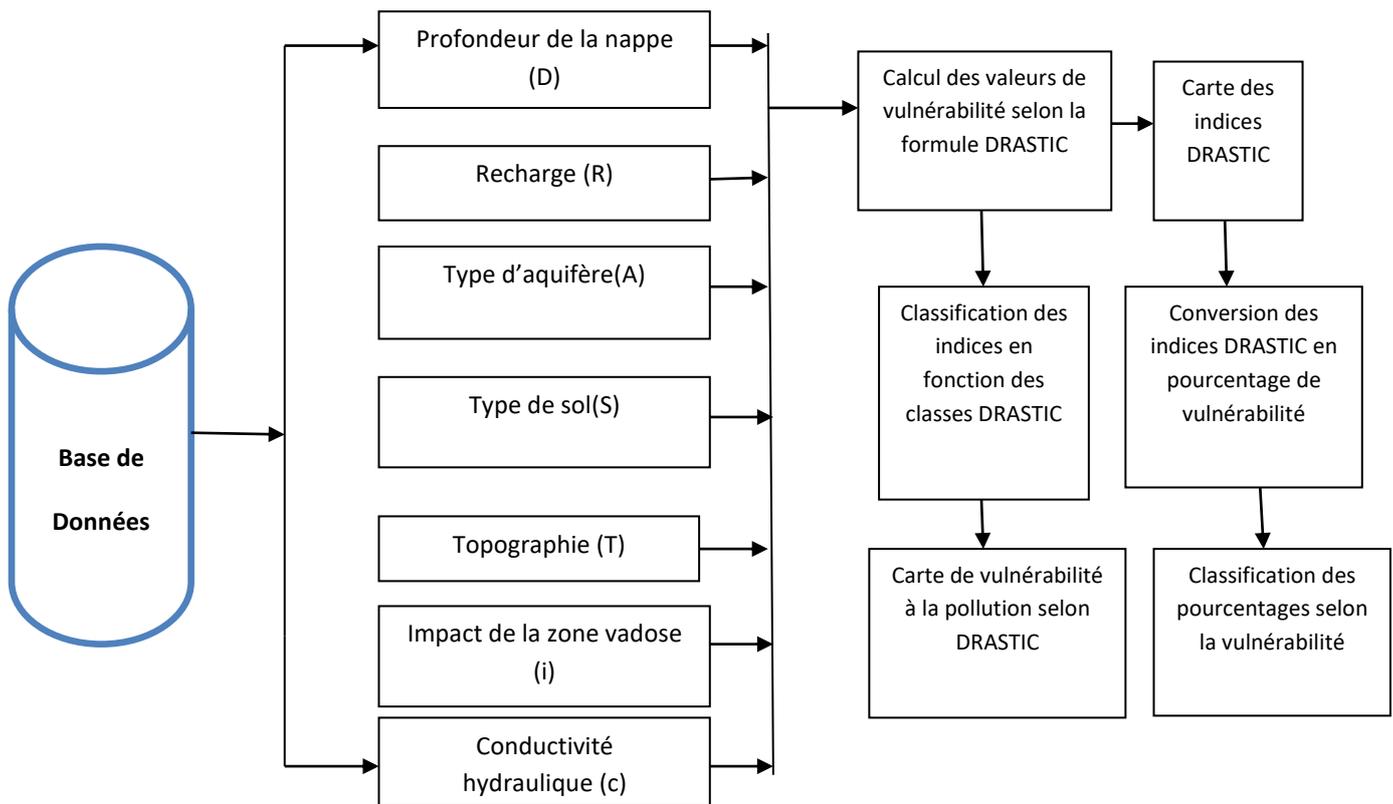


Figure 7.5: Organigramme présentant les étapes de réalisation de la carte de vulnérabilité à partir de la méthode DRASTIC.

3.3.2. Méthode GOD

La méthode GOD, conçue en Angleterre en 1987 par Poster (Murat et al. 2000), nécessite moins de paramètres que DRASTIC. Elle permet de réaliser une estimation rapide de la vulnérabilité d'un aquifère (Bézelgues et al. 2002) à partir des trois paramètres de vulnérabilité ci-dessous :

G : (Groundwater occurrence) type de nappe en fonction de son degré de confinement

O : (Overallaquifer class) lithologie de la Zone non saturée

D : (Depth to groundwater) Profondeur de la nappe

Des cotes inférieures ou égales à 1 sont attribuées aux classes des différents paramètres GOD selon la particularité du milieu. L'indice GOD (IG) qui permet d'évaluer la vulnérabilité se fait par la multiplication de ces trois paramètres selon l'équation 3 suivante (Murat et al., 2003) :

$$IG = Ca \times C1 \times Cd$$

avec Ca : cote du type d'aquifère ; C1 : cote de la lithologie et Cd : cote de la profondeur de la nappe.

L'indice GOD (IG) a pour valeur minimum « 0 » et valeur maximum « 1 ».

La vulnérabilité augmente avec l'indice. Après le calcul de l'indice, on fait correspondre des classes de vulnérabilité aux différentes plages d'indices obtenues réparties en cinq classes de vulnérabilité allant du "très faible" à "extrême" (Tableau 7.5)

Tableau 7.5: Poids GOD des paramètres de la vulnérabilité

Paramètres	Classes	Cotes
G : Type d'aquifère	Artésien	0,1
	Confiné	0,2
	Semi-confiné	0,3
	Libre avec couverture	0,4 – 0,6
	Libre	0,7–1
O : Lithologie de la zone non saturée	Sol résiduel	0,4
	Limon alluvial, loess, calcaire fin	0,5
	Sable éolien, siltite, roches ignées ou métamorphiques fracturées	0,6
	Sable et gravier, grès	0,7
	Gravier (colluvion)	0,8
	Calcaire	0,9
	Calcaire fracturée ou karstique	1
D : Profondeur de la nappe(en mètres)	0 – 1.5	1
	1.5 – 4.5	0,9
	4.5 – 9	0,8
	9.0 – 15.0	0,7
	15 – 23	0,6
	23 – 30	0,4
	> 30	0,4

La classification de la carte des indices GOD (Tableau 7.6) en tenant compte de la vulnérabilité permet l'élaboration de la carte de vulnérabilité à la pollution.

Tableau 7.6 : Intervalles des valeurs de l'indice GOD et classes de vulnérabilité (Murat et al., 2003)

Classe GOD	Intervalle
Vulnérabilité très faible	0 - 0,1
Vulnérabilité faible	0,1 - 0,3
Vulnérabilité modéré	0,3 - 0,5
Vulnérabilité élevée	0,5 - 0,7
Vulnérabilité extrême	0,7 - 1

La vulnérabilité est fonction de l'indice calculé. En tenant compte de ce fait, la classification des différents indices doit tenir compte des intervalles définis par la méthode GOD. Les valeurs limites des intervalles des indices GOD sont relatives. En effet, si les indices calculés n'oscillent pas entre les extrêmes fixés (0, valeur minimum ; 1, valeur maximum), une autre classification adaptée à l'étude est effectuée. Cette autre classification permet de fixer les limites des intervalles des indices calculés et de faire correspondre des classes de vulnérabilité à ces indices. Ce fut le cas des travaux réalisés par Navalur et Engel (1997), Murat et al. (2000), Mohamed (2001), Murat et al. (2003), Jourda et al. (2005), Kouamé (2007).

Les différentes étapes de réalisation de la carte de vulnérabilité selon la méthode GOD sont résumées dans l'organigramme (fig. 7.7) ci-dessous :

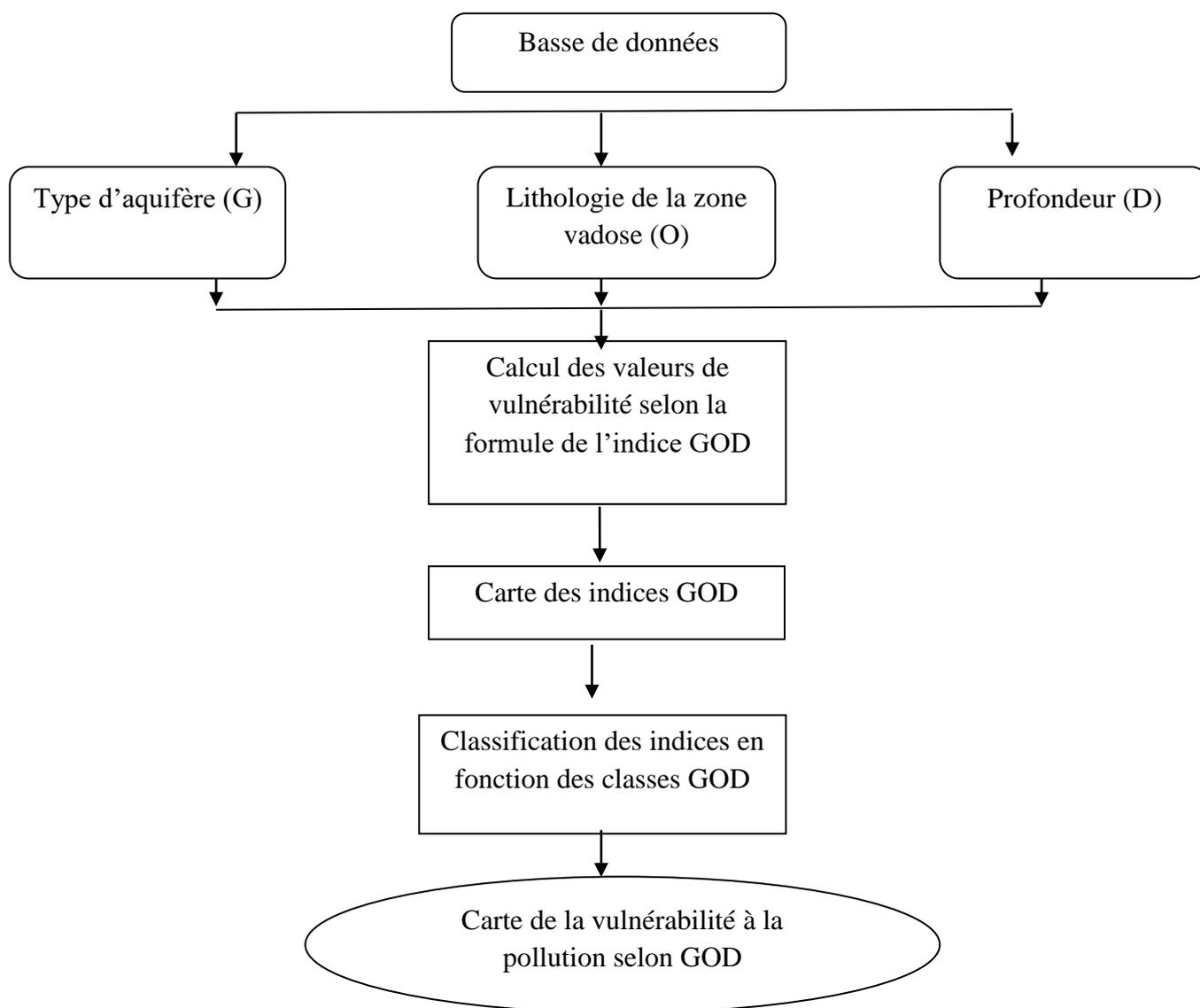


Figure 7.7 : Organigramme de la cartographie de vulnérabilité à partir de la méthode GOD

3.3.3. Méthode SI

1.1.1 Méthode de vulnérabilité spécifique utilisée : la méthode SI

La méthode SI (*Susceptibility Index*) ou méthode d'indice de susceptibilité est une méthode de vulnérabilité verticale spécifique, développée au Portugal par Ribeiro [2000] pour tenir compte du comportement des polluants d'origine agricole, principalement les nitrates. Cette méthode prend en considération cinq paramètres. Les quatre premiers paramètres sont identiques à quatre paramètres déjà pris en compte dans la méthode DRASTIC : la profondeur du plan d'eau (D), la recharge efficace de l'aquifère (R), la lithologie de l'aquifère (A), et la pente topographique du terrain (T). Les cotes attribuées aux différentes classes de ces paramètres dans la méthode DRASTIC ont été conservées. Le cinquième nouveau paramètre introduit est le paramètre « occupation des sols » (OS). La classification utilisée pour ce paramètre est la classification CORINE Land Cover [1993] (Tableau 5). Une valeur appelée facteur d'occupation des sols et notée LU, variant de 0 à 100, est attribuée à chaque classe d'occupation des sols. Il est à signaler que les valeurs des cotes attribuées aux classes des différents paramètres ont été multipliées par 10 pour faciliter la lecture des résultats obtenus. Les valeurs des cotes varient par conséquent de 0 à 100, allant du moins vulnérable au plus vulnérable. Les poids attribués aux paramètres SI varient de 0 à 1 selon l'importance du paramètre dans la vulnérabilité (Tableau 6). La méthode SI présente quatre degrés de vulnérabilité selon les valeurs des indices de vulnérabilité (Tableau 7).

Tableau 7.7. Principales classes d'occupation des sols et valeurs de LU correspondantes [Ribeiro,2000]

Classe d'occupation des sols	Valeur du facteur LU
Décharge industrielle, décharge d'ordures, mines	100
Périmètres irrigués, rizières, cultures annuelles irriguées et non irriguées	90
Carrière, chantier naval	80
Zones artificielles couvertes, zones vertes, zones urbaines continues	75
Cultures permanentes (vignes, vergers, oliviers, etc.)	70
Zones urbaines discontinues	70
Pâturages et zones agro-forestières	50
Milieux aquatiques (marais, salines, etc.)	50
Forêts et zones semi-naturelles	0

Tableau 7.8 : Poids attribués aux paramètres SI (variant de 0 à 1, du moins au plus important) [Ribeiro,2000]

Paramètre	<i>D</i>	<i>R</i>	<i>A</i>	<i>T</i>	<i>OS</i>
Poids	0,186	0,212	0,259	0,121	0,222

Tableau 7.9 : Critères d'évaluation de la vulnérabilité dans la méthode SI [Ribeiro,2000]

Degré de vulnérabilité	Indice de vulnérabilité
Faible	< 45
Moyen	45–64
Élevé	65–84
Très élevé	85–100

Les différentes étapes de réalisation de la carte de vulnérabilité selon la méthode SI sont résumées dans l'organigramme (fig. 7.8) ci-dessous :

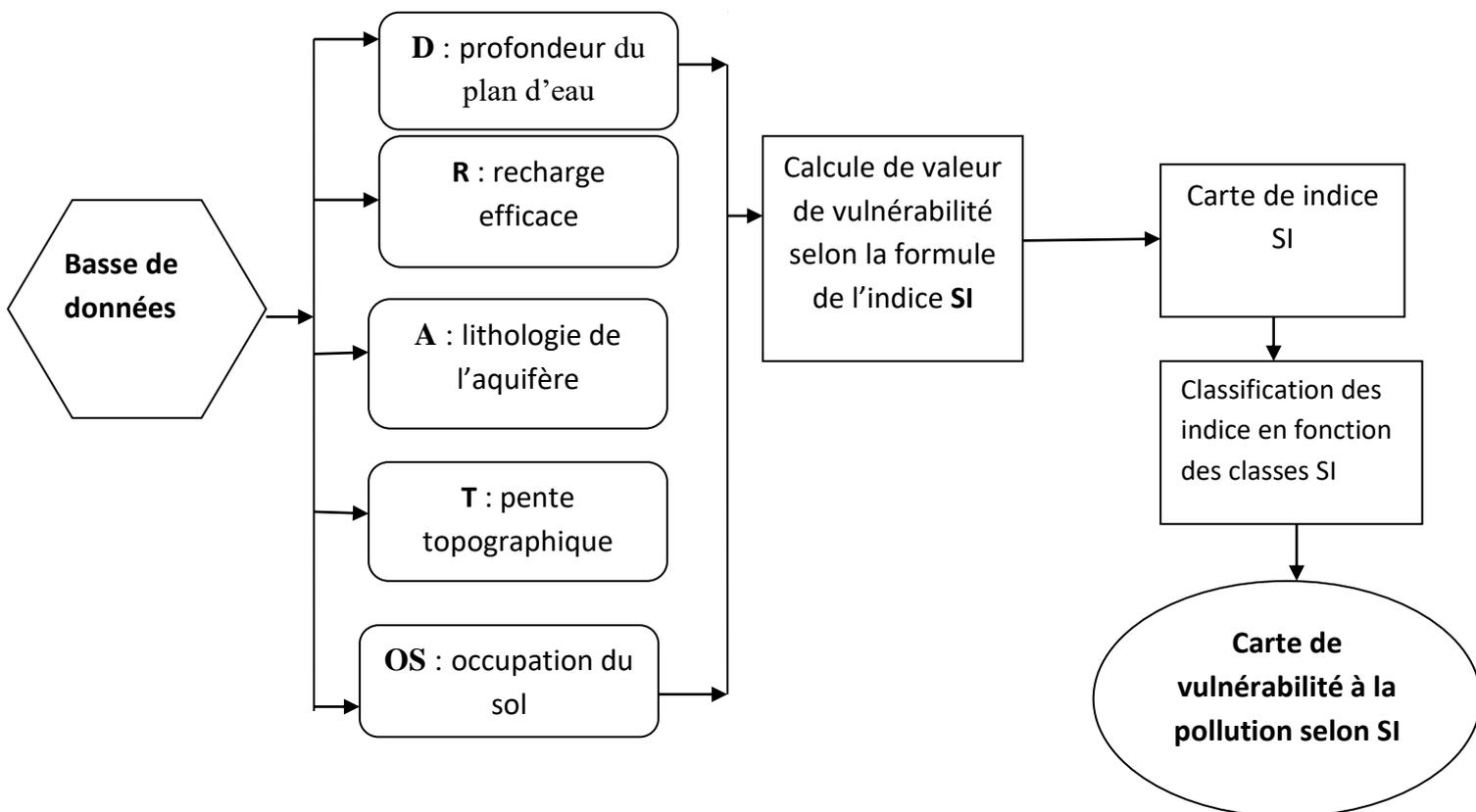


Figure 7.8 : Organigramme de la cartographie de la vulnérabilité à partir de la Méthode SI.

3.4 Application au système aquifère de Béni-Abbès

3.4.1 Profondeur de la nappe

La profondeur de la nappe est un paramètre important, qui constitue un facteur déterminant de la vulnérabilité. Plus cette profondeur est élevée, plus le contaminant met de temps à atteindre la surface piézométrique. Pour la nappe du Grand Erg, et de la palmeraie ce paramètre a été déterminé pendant les relevés piézométriques.

3.4.2 La recharge efficace

Elle concerne la quantité d'eau qui franchit la surface du sol pour renouveler les réserves d'eau souterraine et entretenir le débit de l'écoulement souterrain, après circulation dans l'aquifère. Les résultats du bilan hydrologique montrent que la valeur de ce paramètre est très faible et parfois nulle.

3.4.3 Nature de la zone saturée

Ce paramètre désigne la lithologie de l'aquifère. Son identification a été basée sur les logs des forages et des puits creusés pour le captage de la nappe. Dans les chapitres précédents nous avons montré que le matériau aquifère de la nappe du Grand Erg est constitué essentiellement de calcaire, au niveau de la palmeraie on trouve généralement du sable.

3.4.4 La nature du sol

La nature de la surface du sol influe sur la pénétration des polluants vers l'aquifère. Plus le sol est riche en argile, plus l'absorption des polluants est importante, et plus la protection des eaux souterraines est grande. Ce paramètre joue un rôle important dans la détermination des zones polluées. Les valeurs indiciaires ont été déterminées selon les classes signalées dans le tableau 7.10.

Tableau7.10: Notation et pondération de la nature du sol.

La nappe	Classes	Sn	Sp	Sn .Sp
Grand Erg (plateau)	Mince ou absent	10	2	20
Les terrasses alluviales (la palmeraie)	Sable	9	2	18

3.4.5 La topographie (pente)

Plus la pente des terrains est grande, plus le ruissellement des eaux est important et par conséquent la contamination des eaux souterraines est faible. Les valeurs de pentes ont été estimées et présentées dans le tableau 7.11.

Tableau 7.11 : Notation et pondération du facteur de la pente.

La zone	Classes	Tn	Tp	Tn.Tp
Le plateau de la ville	0 à 2 %	10	3	30
Les terrasses (la palmeraie)	2 à 6 %	9	3	27

3.4.6 Nature de la zone non saturée (vadose)

La nature de la zone non saturée constitue un paramètre important dans l'estimation de la vulnérabilité, car elle influe sur la vitesse de propagation des polluants. Son impact est déterminé à partir de la lithologie des terrains qui la constituent. La percolation des contaminants jusqu'à la surface piézométrique est d'autant plus grande que cette lithologie est favorable (Tab.7.12).

Tableau 7.12: Notation et pondération de la couche vadose.

L'aquifère	Classes	In	Ip	In.Ip
Des terrasses alluviales (palmeraie)	Sable et gravier	9	5	45
Grand Erg	Sable et gravier avec silt et argile	8	5	40

3.4.7 La perméabilité

La perméabilité de la couche aquifère nous renseigne sur la vitesse de propagation des polluants dans la nappe. Plus ce paramètre est important, plus le transfert des polluants est rapide. L'estimation des indices de ce paramètre a été faite selon les classes présentées dans le tableau.7.13.

Tableau 7.13: Notation et pondération de la perméabilité.

Perméabilité (K en m/s)	In	Ip	In.Ip
$4,7 \cdot 10^{-5}$ - $14,7 \cdot 10^{-5}$	2	3	6

➤ Remarque

Cette approche présente une application intégrale de la méthode DRASTIC. Appliquée au système aquifère de la région de Béni-Abbes, qui se situe en milieu hyper-aride, elle a permis de fournir une carte de vulnérabilité des eaux souterraines de l'aquifère. À l'issue de cette première approche, l'adéquation des zones très vulnérables avec celles où sont observées des cas de pollution a permis de vérifier l'efficacité de la méthode.

Les résultats des calculs des indices pour ces paramètres ont été faits selon les tableaux (annexes IV)

3.5 Résultats et discussions d'évaluation de la vulnérabilité

3.5.1 La méthode DRASTIC

L'étude de la vulnérabilité du système aquifère de Béni Abbes selon la méthode DRASTIC a montré que la zone à forte vulnérabilité se localise au niveau du plateau de la ville (où existent des failles et des fractures) et surtout près du captage de la grande source (Fig.7.9). D'après la cartographie nous avons obtenu deux zones ; la zone 1 qui représente une forte vulnérabilité et la zone 2 a une vulnérabilité moyenne. La zone au niveau de la nappe du grand erg (Plateau de la ville) est perméable (perméabilité de fissure). Elle est formée essentiellement par des calcaires et des marno-calcaires ce qui constitue un impact indirect sur la qualité des eaux qui s'écoulent et s'infiltrent par les fissures.

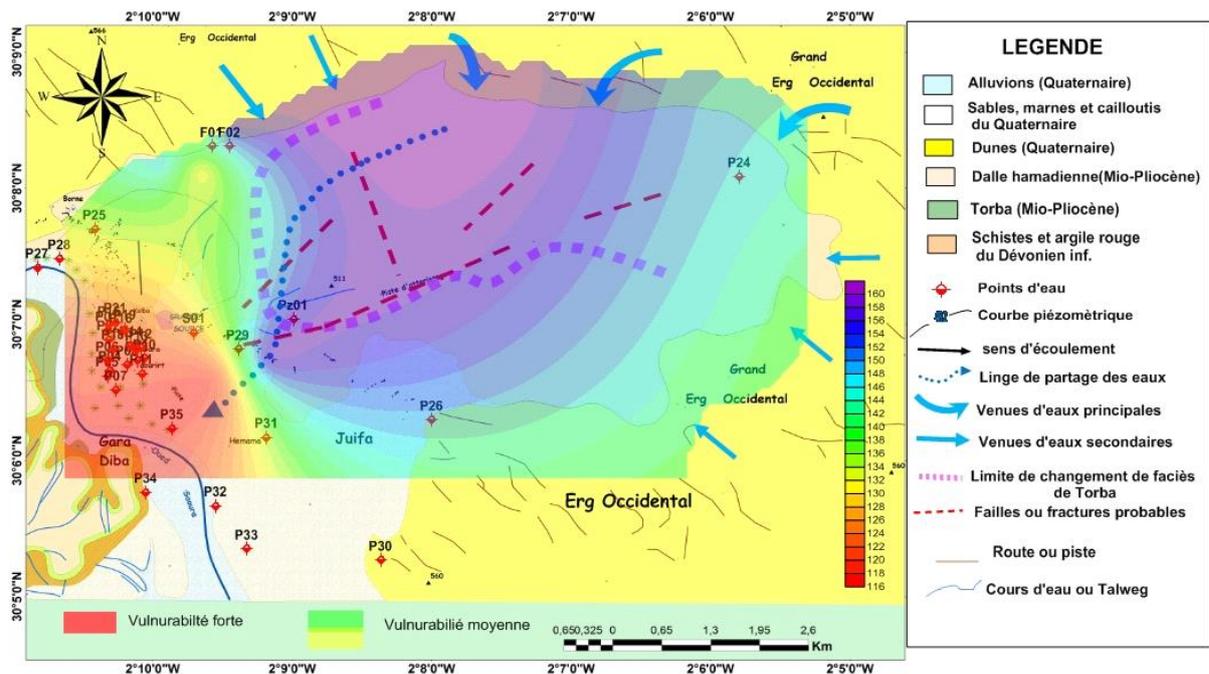


Figure 7.9: Carte de vulnérabilité du système aquifère de Béni-Abbes(DRASTIC).

➤ **Interprétation**

- Classe **Moyenne** : est la classe la plus importante car elle s'étend sur presque toute la zone d'étude. Elle garantit une pollution moins sévère dans le cas d'une contamination. Ce degré de vulnérabilité moyen, peut être lié à la nature de la zone non saturée.
- Classe **Forte** :cette classe occupe une partie moins importante, elle garantit une pollution plus sévère dans le cas de contamination.

3.5.2. La méthode GOD

La carte des indices de vulnérabilité donne des valeurs qui oscillent entre 0,4 à 0,7

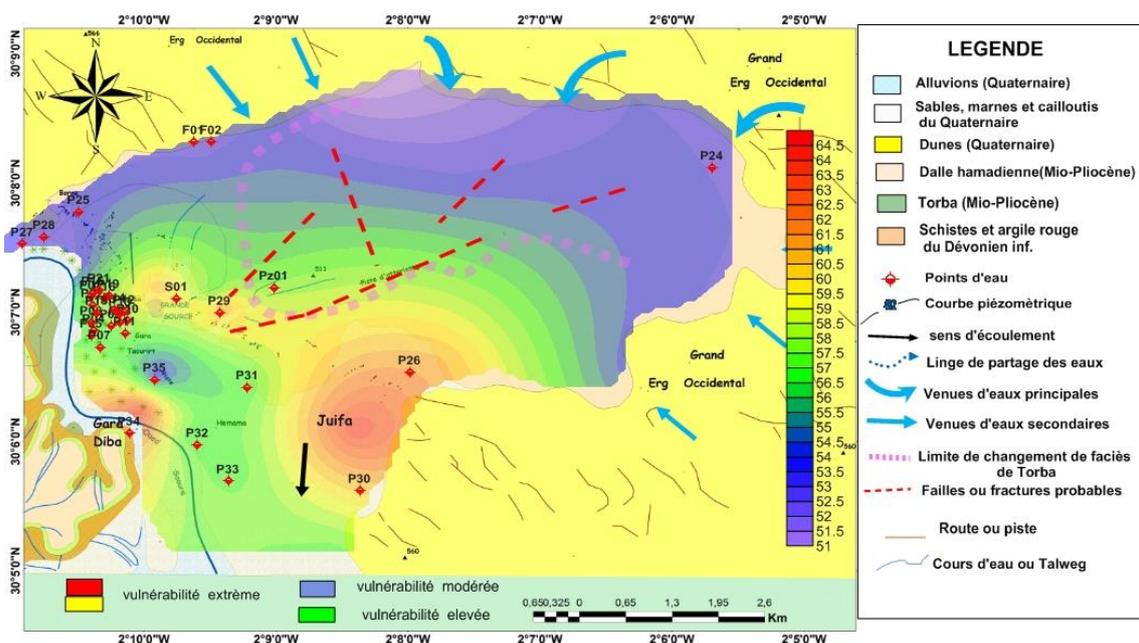


Figure7.11 Carte de vulnérabilité de la région de Béni Abbés (GOD)

L'analyse de cette carte révèle trois (3) classes de vulnérabilité réparties comme suit :

Classe modérée : C'est la classe dominante de la zone d'étude

Classe élevée : quelques endroits présentent une vulnérabilité élevée à cause de la nature lithologique de la zone non saturée.

Classe extrême : quelques foyers présentent des zones très vulnérables, comme la zone entourée de l'exutoire de la grande source de Béni Abbés et dans la zone de failles dans le plateau de la ville.

3.5.3 La méthode SI

Pour la méthode SI, la carte des indices de vulnérabilité donne des valeurs qui varient entre 52,34 et 73,52.

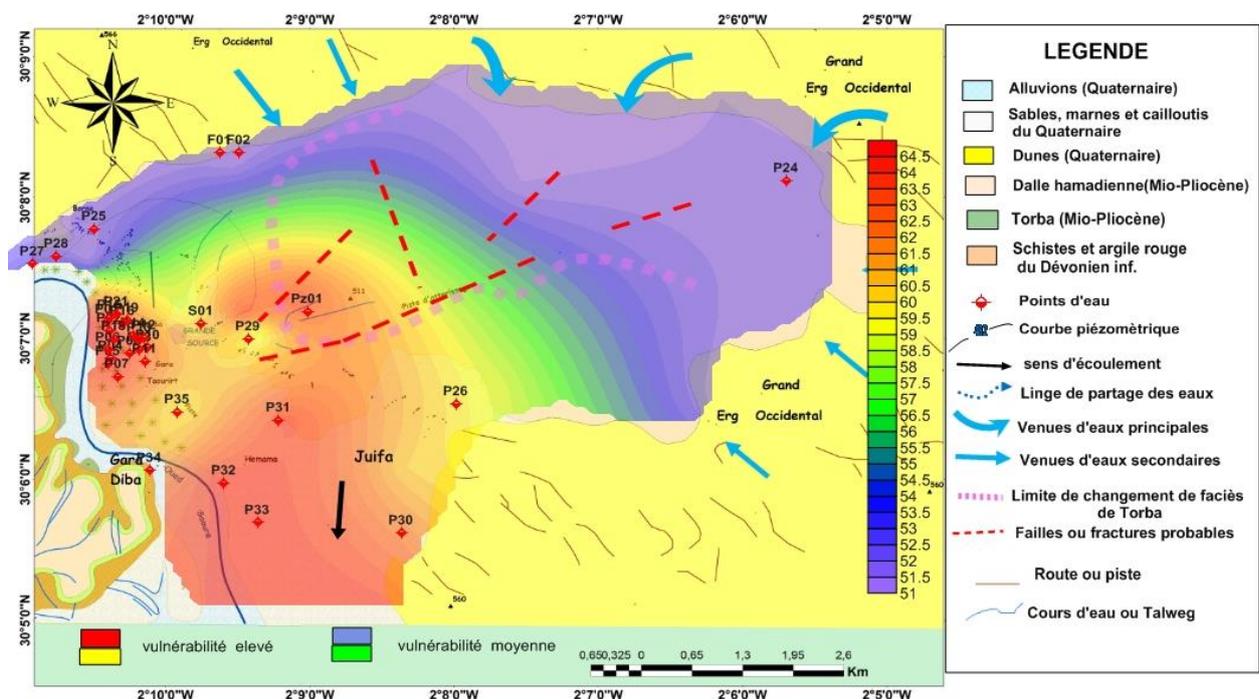


Figure 7.12. Carte de vulnérabilité de la région de Béni Abbés (SI)

La classification de ces indices a permis d'établir la carte de vulnérabilité à la pollution par la méthode SI (Figure 7.12). L'analyse de cette carte met en évidence deux classes de vulnérabilité réparties comme suit :

Classe **Moyenne** : cette classe occupe toujours une surface de 80% de la surface totale

Classe **Forte** : cette classe n'occupe que 20% de la zone d'étude.

3.5.4 Analyse comparative des résultats (Tab. 7.14):

Après exposé les résultats de cartographie de la vulnérabilité à la pollution des différentes méthodes d'évaluation pour le système aquifère de Béni Abbés (tableau. 66). Il ressort que les méthodes DRASTIC, GOD et SI présentent une vulnérabilité concentrée sur la classe « moyenne » respectivement 79% et 70% et 79% ; la méthode GOD étant un peu plus concentrée sur la classe « forte » avec 25%. Le tableau révèle aussi que la classe « faible » n'est pas représentée pour les trois méthodes.

Tableau 7.14 : Pourcentage des surfaces selon le degré de vulnérabilité

Classe de vulnérabilité	Pourcentage de surface par classe et par méthode (%)		
	DRASTIC	GOD	SI
Faible	0	0	0
Moyenne	79	70	79
Forte	21	25	21
Extrême	0	5	0

3.6 Cartographie de la vulnérabilité et le risque de pollution

La cartographie de la vulnérabilité dans la région de béni Abbes, nous a permis de distinguer deux classes comme :

Classe 1 : domaine des alluvions

Dans ce domaine les nappes, peu profondes, sont en effet en communication souvent étroite avec les cours d'eau de surface, principaux récepteurs et conducteurs des produits polluants. De plus et de façon générale, les alluvions drainent en partie les eaux des nappes adjacentes.

Dans les terrasses alluvionnaires et surtout dans la palmeraie deux cas ont été envisagés

A) nappe alluviale libre sans aucune protection, directement alimentée dans les conditions naturelles par les eaux d'irrigation.

B) nappe alluviale libre, semi captive ou captive protégée en surface par une couche peu perméable

Toute pollution d'eau en surface se propage obligatoirement dans la nappe alluviale, dans la mesure toutefois où le colmatage du lit et des berges du cours d'eau n'assure pas son isolement relatif.

Classe 2 : terrains dans lesquels la pollution se propage très rapidement (calcaires, dolomies ; domaine karstique)

Ces terrains ont été présentés en couleur rouge dans la carte de vulnérabilité (Figure 7.13) Ce cas se présente dans le plateau de la ville (Néogène) où ces terrains sont très développés, c'est-à-dire dans les fissures de la dalle calcaire de l'aquifère ou la circulation des eaux de surface se caractérise par des écoulements temporaires avec de nombreuses pertes et résurgences (foggaras) : seules les circulations souterraines sont dotées de la continuité et de la permanence caractérisant ailleurs les réseaux hydrographiques.

L'étude géophysique a identifié des failles de direction Est Ouest de la région, ces endroits présentés par des terrains dans lesquels la pollution se propage très rapidement (calcaires, dolomies).

3.6.1 Pollution des nappes

Pour traiter le risque de la pollution nous avons focalisé notre travail au niveau de la palmeraie et le front de la dalle hamadienne.

Les pollutions anthropiques proviennent de sources multiples : En effet, il est maintenant avéré que les effluents d'élevage ou les rejets des eaux usées non traitées épandues sur des surfaces importantes qui

constituent un risque de contamination de la nappe . Une pollution diffuse des aquifères, suite au lessivage de ces substances appliquées sur le sol, n'est donc pas à exclure, ainsi que les rejets des eaux usées non raccordées au réseau d'assainissement, (formation des mares d'eau usées) et l'utilisation intensive des engrais dans les surfaces irriguées au niveau de l'aquifère alluviale de la palmeraie) .

Généralement, les méthodes DRASTIC, GOD et SI, nous ont permis d'identifier trois zones de vulnérabilité ; très forte, forte et moyenne. A partir de la carte de vulnérabilité de l'oasis de Béni Abbès et l'échelle de l'indice DRASTIC (Fig.7.13), il y a trois zones ; zone I à vulnérabilité très forte et zone II à vulnérabilité forte et zone III moyenne. Ces résultats sont attachés parfaitement avec la nature géologique et l'hydrodynamique du système aquifère de la région de Béni Abbès ; soit pour la nappe alluviale de la palmeraie , soit pour la nappe du grand erg occidental. Par manque de données couvrant toute la zone d'étude, toutes les données ponctuelles utilisées dans cette étude (recharge, conductivité hydraulique) ont été interpolées, assignant ainsi des valeurs dans la région de Béchar.

La carte de la vulnérabilité à la pollution établie sur la base de l'indice DRASTIC, a permis l'établissement de la carte du périmètre de protection du champ captant de l'Oasis de Béni Abbès, où on peut distinguer trois zones.

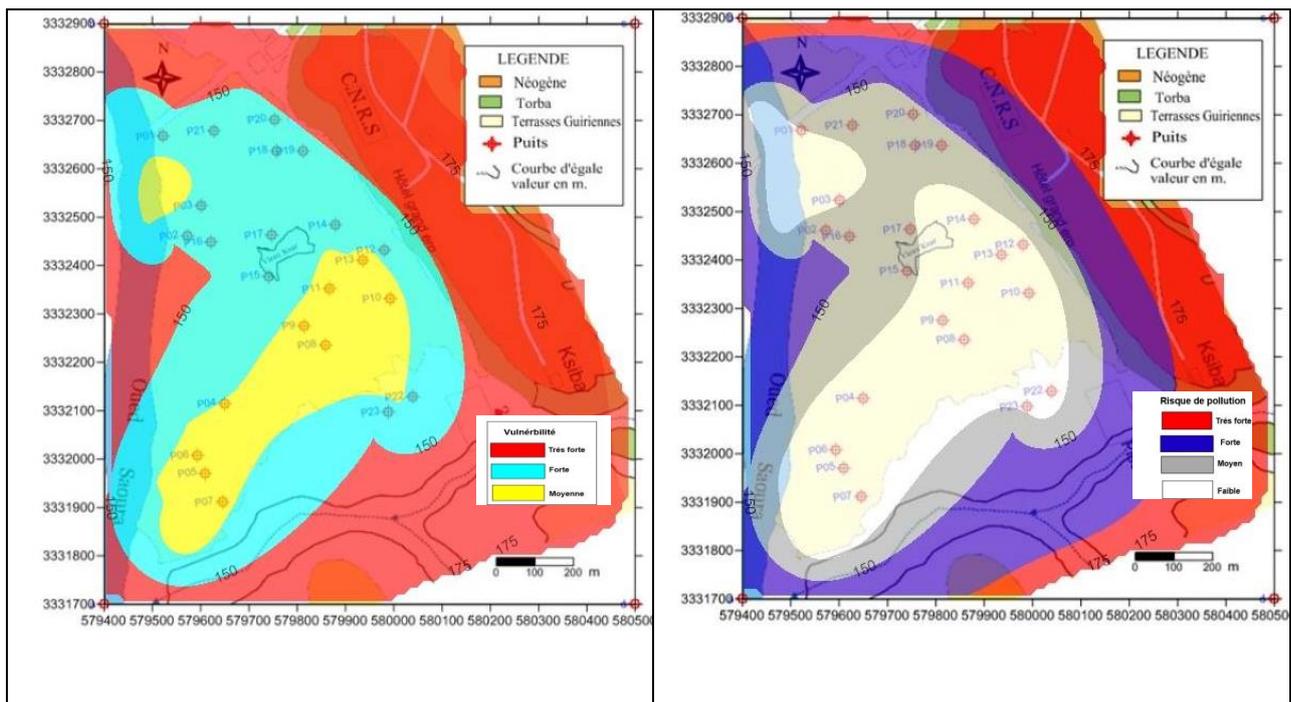


Figure 7.13 : Vulnérabilités de système aquifère de Béni- Abbès

Figure 7.14: Carte des risques de pollution des eaux souterraines de palmeraie de Béni -Abbès

Le rejet des eaux usées dans l'oued Saoura et ses affluents, sans aucun traitement préalable, des eaux usées des villes et des hôpitaux se trouvant sur les terrasses alluviales présente un haut potentiel de risque de contamination des eaux souterraines de la nappe alluviales de la palmeraie d'autant plus que l'oued traverse sur la presque totalité de son cours des zones moyenne et forte vulnérables.

Ce risque est autant plus grave que des échanges sont possibles d'une part entre l'oued et la nappe superficielle et d'autre part entre les deux nappes (superficielle et nappe alluviales) en particulier dans le secteur sud est de la palmeraie ou une alimentation par drainage descendante est possible.

Pour des mesures préventives, ces zones à risque doivent être contrôlées, à l'échelle de tout l'oasis de Béni Abbés, un traitement préalable des eaux usées urbaines et industrielles qui sont rejetées dans l'oued Saoura. Aussi la protection des forages de captage par des périmètres rapprochés et éloignés est très recommandée.

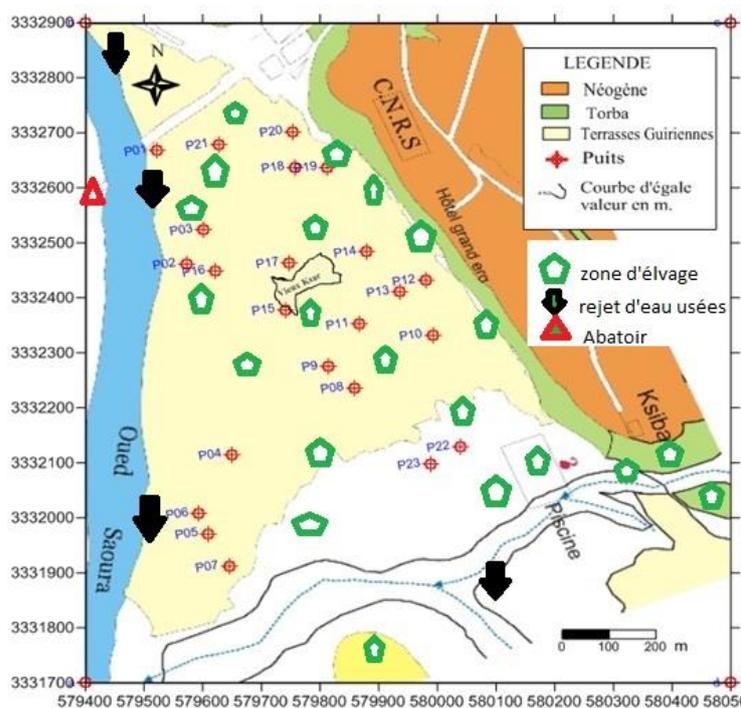


Figure 7.15 : Carte des sources potentielles de pollution.

La carte des risques de pollution des eaux souterraines de la palmeraie de Béni Abbés (figure) a été élaborée, par confrontation de la carte de vulnérabilité intrinsèque (figure 7.14) et celle des sources potentielles de pollution (Figure 7.15) et en tenant compte aussi de la gravité des polluants potentiels. Les zones à risques sont des zones à forte exploitation agricole et le long du trajet de l'oued Saoura. Vu l'intense activité agricole que connaît la palmeraie sur sa totalité, le risque potentiel d'une pollution diffuse dépend en l'occurrence de sa vulnérabilité intrinsèque. Pour la pollution localisée, les sources potentielles de pollution restent limitées et concentrées en particulier aux alentours de la palmeraie. A cet effet, la protection de la grande source et les forages de captage, même ceux qui captent la nappe des calcaires par des périmètres rapprochés et éloignés est très recommandée.

➤ Interprétation

L'étude de la vulnérabilité du système aquifère de Béni Abbes selon la méthode DRASTIC, GOD et SI ont montrés que la zone à forte vulnérabilité se localise au niveau du plateau de la ville (ou il existe des failles et des fractures) et surtout le lieu de captage de la grande source. D'après la cartographie nous avons obtient deux zones ; la zone 1 qui représente une forte vulnérabilité et la zone 2 a une

vulnérabilité moyenne. Les zones au niveau de la nappe du grand erg (Plateau de la ville) sont perméable (perméabilité de fissure). Il est formé essentiellement par des calcaires et des marno-calcaire et ce qui pose un impact indirect sur la qualité des eaux qui s'écoulent et s'infiltrent par les fissures.

3.7 Quelles sont les réglementations qui peuvent s'appliquer sur mon territoire et avoir un impact sur la qualité de nos ressources ?

-La protection du captage : une première étape pour la fourniture d'une eau potable de bonne qualité

La création de zone de protection autour du captage de la grande source constitue par conséquent un instrument incontournable pour atteindre notre objectif qui est l'amélioration et de la préservation de la qualité de l'eau. D'autant plus que les coûts des mesures préventives contre une éventuelle pollution sont de loin inférieurs aux coûts à mettre en œuvre en cas d'un nécessaire traitement d'une eau souterraine contaminée par des substances polluantes, telles les nitrates et pesticides.

- zone 01 (zone de protection immédiate)

- Zone 02 (zone protégée rapprochée)

- Zone 03(zone protégée éloignée)

-La zone 01 Périmètre de protection immédiate

Est destinée à protéger le captage de la grande source contre toute introduction directe de polluants dans le captage et la dégradation ou la destruction des installations. L'étendue de la zone en amont de la direction de l'écoulement de l'eau souterraine est de 10 m au minimum et de 20 m au maximum. Mais dans le cas de la de la grande source il est recommander de construire un mur de clôture autour du captage de 400m car cette zone est très vulnérable et qui représente un exutoire par excellence de la nappe du grand erg qu'il faut le bien protégé.

Dans cette zone, seules sont autorisées des activités destinées à l'entretien et à la révision des installations de prélèvement des eaux. En règle générale, cette zone sera clôturée et à maintenir en zone de verdure.

L'installation du dispositif de mesure de débit et la qualité de la source.

- La zone 02 : périmètre de protection rapproché

Afin de permettre une protection efficace contre des transmetteurs de maladies, la zone II doit s'étendre à partir de l'aire de captage jusque vers une ligne équivalent à un temps de séjour d'environ 50 jours des eaux souterraines destinées à une eau de consommation. Ceci correspond en règle générale à une distance maximale de 500 à 600 m en amont du site de captage. L'extension minimale de la zone de protection rapprochée est de 100 mètres en amont du captage.

Il existe également des situations dans lesquelles la protection naturelle des couches aquifères n'est pas suffisante. Dans de telles situations qui s'avèrent être particulièrement sensibles à d'éventuels risques de pollutions, une zone de protection supplémentaire, à savoir la zone 2-3 (zone à vulnérabilité élevée) peut être délimitée. Une telle zone peut être située à l'intérieur des zones 02 ou 03.

Cette zone à vulnérabilité particulièrement élevée est surtout régie par des interdictions. Y sont interdits tous ouvrages, installations, constructions, travaux ou activités susceptibles de porter atteinte à la qualité de la ressource hydrique, y compris le pâturage et l'épandage d'engrais, de fertilisants et/ou de pesticides. Des ouvrages et constructions existants doivent être adaptés aussi rapidement que possible afin d'assurer que tout risque potentiel de pollution soit réduit et limité au minimum possible.

- La zone de protection 03: périmètre de protection éloigné

Doit contribuer à la protection des ressources en eau contre des substances polluantes non ou difficilement dégradables et assurer un débit suffisant du captage. En règle générale, cette zone de protection est censée couvrir la surface restante du bassin versant du captage d'eau souterraine. En cas de pollution accidentelle (p.ex. accident de circulation, fuites dans un réservoir de mazout,...), cette zone de protection doit permettre, de garantir une disponibilité en temps d'intervention suffisant pour pouvoir engager des mesures d'élimination du polluant avant son arrivée au captage. L'application de pesticides ainsi que celle d'engrais et de fertilisants minéraux et organiques sera fortement limitée à l'intérieur de la zone 03.

Les zones de type 02 et 03 sont en particulier marquées par les interdictions suivantes:

- la construction, l'agrandissement et la conduite d'installations destinées à l'utilisation ou au stockage de substances nocives à l'eau,
- le déversement ou l'infiltration des eaux résiduelles dans le sol, l'épandage de boues d'épuration,
- l'interdiction des travaux de forages
- l'interdiction de l'extraction de tuf

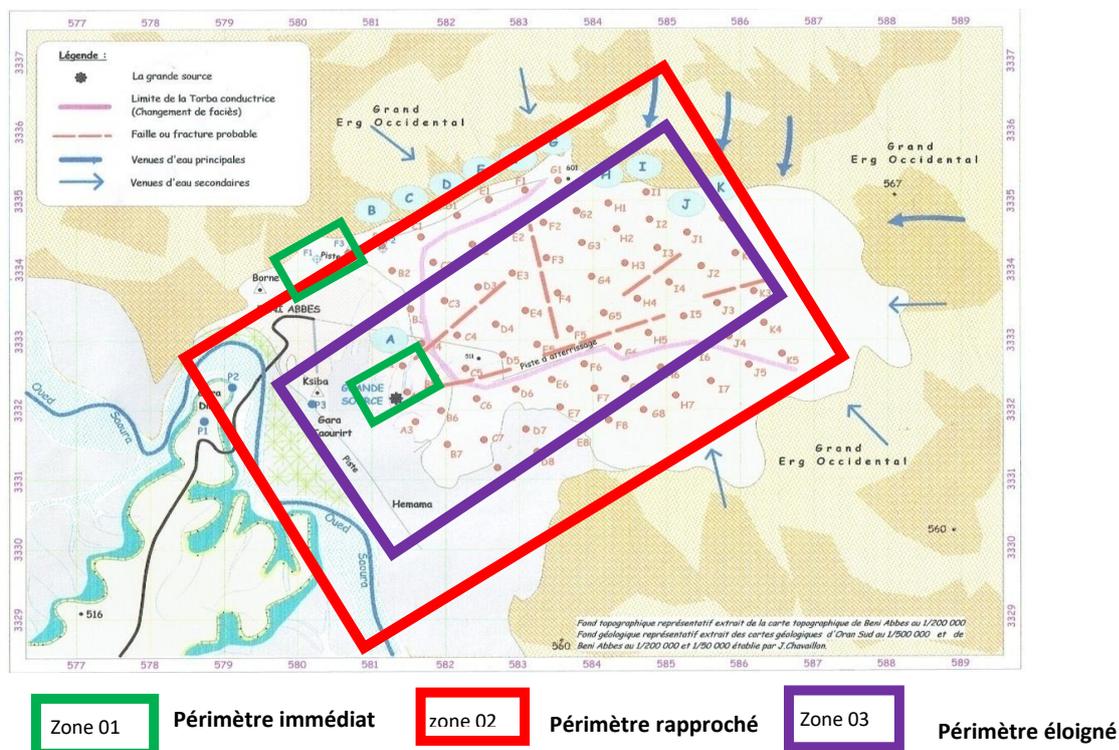


Figure 7.13 : Carte de zonation des périmètres de protection de la région de Béni –Abbes.

4. Conclusion

L'utilisation des Systèmes d'Information Géographique, nous a permis d'élaborer une base de données relationnelle contenant une masse de données climatiques, topographique, géologiques, hydrogéologiques et hydrochimiques. La visualisation conjointe des informations de sources diverses a permis d'élaborer des cartes thématiques très utiles en mettant en valeur l'apport des outils informatiques utilisés.

la superposition des différentes cartes géologique, structurale hydrogéologique, géophysique, ainsi que en présentant une meilleure image pour réalisera un plan de protection de la nappe ainsi une délimitation des zone a fortes potentiel au niveau de Béni Abbes.

Les cartes de la vulnérabilité intrinsèque de la nappe de l'oasis de Béni-Abbès réalisées à partir des méthodes DRASTIC, GOD et SI ont révélé une grande tendance de la vulnérabilité à la pollution de la région de Béni Abbés

L'établissement de la carte de vulnérabilité de la nappe du Grand Erg permet de délimiter les zones les plus fragiles à protéger. Elle permet ainsi la prise de mesures de protection, notamment dans la partie couvrant le champ de captage. Elle permet aussi d'aider les responsables et les décideurs la délimitation des périmètres de protection de la grande source.

La gestion des ressources en eau pour la région de Béni Abbes a été exposée en se basant sur une base de données collectée a été traitée et analysée avant son exploitation. Une approche de gestion intégré des ressources en eau(modèle oasisien) a été recommandée afin d'assurer l'équilibre entre l'offre et la demande. Cette approche de gestion conduit à établir un schéma de gestion des eaux, basé sur:

- Sur la surveillance et l'amélioration de la connaissance de la ressource en eau souterraines.
- Réaliser un périmètre de protection de la grande source et le plateau de la ville.
- D'aménager les réseaux de distribution de l'alimentation en eau potable, de valoriser et réutiliser après le traitement des eaux usées pour des fins d'irrigation.
- Réhabilitation des foggaras et valorisation des eaux de ces derniers.

Ces résultats vont enrichir la base de données sur les caractéristiques de l'aquifère et aider les décideurs à mieux se prononcer sur la gestion des ressources en eaux en vue d'un meilleur développement durable de la région.

Conclusion Générale

C1. Contexte

Le présent travail s'inscrit dans une stratégie générale de mieux connaître les ressources en eau souterraines dans une contrée aride à hyperarides, en occurrence la région de Béni -Abbès, sur les aspects géologiques, hydrogéologiques, géophysiques, hydrochimiques ainsi que la vulnérabilité de cette source. Il s'agit donc d'une contribution, caractérisant le système aquifère de la région de Béni Abbes de point de vue structurale, son fonctionnement hydrodynamique, la qualité des eaux qu'il renferme et évoquer les prédispositions à la pollution. La région de BéniAbbès appartient au monde du Sahara algérien, fortement enclavée dans la vallée de la Saoura, entité géographique célèbre dans le Sud-Ouest de l'Algérie, Cette entité est ornée de verdoyantes oasis, transformée profondément en véritables villes modernes, dont celle de Béni- Abbès considérée comme étant une capitale.

La Saoura est connue par son oued, qui débute à Igli, point de confluence entre le Guir et la Zousfana et s'achève vers le Sud au niveau de Foug El Kheneg, après un parcours de 250km, puis, il donne naissance à deux oueds ; *Souireg* qui conduit les flux de la Saoura à l'immense dépression de Sebkh el Melah près de Kerzaz. Le second, dit *l'oued Messaoud* qui coule vers la dépression de Touat, qu'après le débordement de sebkha. L'Oued Saoura manifeste des crues en Automne et au Printemps. Ses apports sont variables, on note des apports au niveau de Béni Abbès estimé à 400 Hm³ et à 350 Hm³ au niveau de Kerzaz.

C2. Climat hydrologie et morphologie

Cette région est soumise à un climat hyperaride, souligné par une faible pluviosité et une sécheresse permanente. Elle reçoit une pluviométrie variable de 30 à 40 mm/an, souvent sous forme d'averse au mois de septembre, octobre et novembre. La moyenne des températures est de 24°C. Les vents dominants proviennent du nord et leur fréquence est très grande durant toute l'année, varient entre 16% et 50 %. L'évaporation annuelle est importante et s'élève à 2012 mm/an.

Le paysage est modelé selon la lithologie et les aspects structuraux, les rhyolites et les quartzites cambro-ordoviciens forment l'ossature de cette chaîne constituant de véritables reliefs antiformes. En revanche, les formations tendres siluro-dévonien ne sont conservées que dans les structures synformes.

- la vallée de la Saoura, forme une véritable entaille à fond plat et à bords escarpés, occupé par les alluvions de l'oued.
- le plateau rocailleux ouest, interrompu par quelques chaînons de l'Ougarta.
- le plateau de la ville et dunes de sable du grand erg occidental.

C3. Géologie, structural et géophysique

La région de Béni Abbès est annexée aux monts de l'Ougarta, formés de socle volcanique à volcano-sédimentaire et une couverture paléozoïque, scellée par des formations tertiaires et quaternaires.

Les investigations géologiques et géophysiques recèlent un soubassement du Dévonien inférieur plissé, constitué d'argiles rouges et un remplissage Mio-Plio Quaternaire, composé de dalle calcaire, de Torba, de graviers, d'argile et de sable. Il totalise une épaisseur de 15 à 20 m au niveau de la vallée de la Saoura et il s'épaissit de 50 à 100 m au niveau du plateau de la ville. Cet empilement présente des variations latérales et il est affecté de failles, type ksiksou (NE-SW) (N 50° et N 70° E) et ougartien (NW-SE), (N140), attestées par corrélations de coupes et différentes méthodes géophysiques. Ces failles et fractures servent comme drains naturels, permettant les écoulements d'Est vers l'Ouest.

En effet, Les conditions d'émergence des sources et les foggaras le long du front de la région de Béni Abbes sont tributaires d'une part aux failles et à la fissuration affectant les formations Mio-Plio-Quaternaires.

La grande source (Sidi Othmane) plaide en faveur de ce constat. Elle représente l'exécutoire par excellent de la nappe du grand erg occidental, en empruntant un accident NE-SW affectant les calcaires. La présence de système ingénieux ancestral des foggaras est aussi un argument de la

fissuration

C4. Hydrogéologie

Ce remplissage abrite des eaux souterraines, lesquelles forment un système hydrogéologiques complexe et interconnecté, dissocié localement en nappe phréatique du grand erg occidentale, nappe de Hamada de Guir, nappe de terrasses-inféro-flux et nappe du Cambro-Ordovicien.

Ce système est scindé par l'oued Saoura en compartiment oriental (nappe du grand erg occidental et celle des terrasses et inféro-flux de la Saoura) et occidental (nappe de hamada de Guir et nappe du Cambro-Ordovicien).

La nappe du Grand Erg Occidental est plus ample et bien définie. La carte piézométrique montre deux sens d'écoulement ; Nord - Sud et Est - Ouest (de l'erg vers l'oued Saoura), indiquant aussi les endroit de recharge provenant principalement de l'Atlas saharien et localement du Djebel Kehela et ses environs. Ses déchargements vers le front de la Saoura peuvent atteindre des valeurs appréciables s'échelonnent de 5 à 30 l/s.

Les nappes des terrasses alluviales et inféro-flux bénéficient de deux recharges ; écoulement d'oued Saoura et drain naturel d'est vers l'ouest.

La nappe de hamada de Guir est soulignée par un écoulement du Nord vers le Sud, sans exutoire notable vers la Saoura. Elle présente des débits fort intéressants jusqu'à 10 l/s.

La nappe du Cambro-ordovicien circule dans des grès et quartzites du Nord vers le Sud. Les ouvrage de captage au niveau de Zeghamra indiquent des grands débits (plus 40 l/s), par contre aux environs de Kerzaz les débits deviennent très faibles sous forme de modestes sources tel que Ain Dob .

A l'échelle locale, le système aquifère de Béni -Abbès. indique une Transmissivité : 6.10^{-4} m²/s à 4.10^{-2} m²/s et un coefficient d'emmagasinement : 1,3 à 6 %. Ce système se caractérise par une piézométrie régulière et un écoulement Nord Est sud- Ouest sous un gradient hydraulique de 8.10^{-2} à 1.10^{-1} . Les débits d'exploitations s'échelonnent entre de 2 à 29 l/s.

Sur un intervalle de 40 ans ce système se trouve dans un état stationnaire, néanmoins au niveau des terrasses alluviales et inféro- flux , le rabattement est de 2 m.

L'alimentation du système aquifère de la région se fait par les eaux souterraines du Grand Erg Occidental, d'une part et d'autre part par les eaux des crue et l'inféro -flux. Cette conclusion est déduite conjointement de la géologie, de la piézométrie, de l'hydroclimatologie et de l'hydrochimie. L'étude hydrodynamique a permis d'estimer le débit spécifique moyen au niveau du front de la nappe compris entre 30 et 40 m³/h/km².

Les eaux de la nappe du grand Erg se rangent dans les eaux bicarbonaté-calciques et parfois sulfaté-calciques, se caractérisant par de bonne qualité, avec de faibles minéralisations (de à), dont l'évolution chimique est insignifiante.

C5. Hydrochimie

Du point de vue hydrochimique, la nappe de la hamada de Guir possède un faciès sulfato-sodique avec une minéralisation moyenne induisant une potabilité conforme aux normes.

Les eaux de la nappe du Cambro -ordovicien sont à prédominance chlorurées en général, peu minéralisées.

Les séries de données hydrochimiques recueillies sont discontinues, mais elles s'avèrent très utile dans l'étude de l'évolution spatio-temporelle des constituants physico-chimique. Elles permettent de tracer des histogrammes et des cartes de qualités d'eaux souterraines, ainsi que de la migration exogène de la salinité. En effet, ce phénomène causé par plusieurs facteurs anthropiques et naturels, engendre de sérieux problèmes d'irrigation.

L'hydrochimie montre que les puits situés à la lisière du grand erg ne sont pas attaqués par la salinité, les eaux de la nappe du grand erg occidental offre une eau de bonne qualité insensible au changement hydro chimique. En effet, pendant presque un siècle la grand source de Béni Abbès a gardé la même composition chimique. En revanche, ceux situés au bord de la Saoura sont très salées (15 à 20g/l). En outre, les eaux prélevées des puits de la palmeraie présentent en général un faciès chloruré- calcique et magnésien, parfois bicarbonaté calcique.

L'étude physico- chimique des eaux de la région de Béni Abbas présentent en général une minéralisation plus moins importantes, allant de 300 mg/là 15000 mg/l environ, du au lessivage des

formations argileuses, marneuses et gypsifères.

C.6. Apport des isotopes

Les estimations des âges des eaux nous permettent de conclure que la recharge de la nappe s'est faite durant la période humide du quaternaire (entre 4000 et 10000 ans B.P. approximativement) correspondant à l'Holocène.

La réinterprétation des isotopes faite par nos prédécesseurs aboutit à discriminer et conforte la subdivision du système en deux compartiments oriental et occidental.

La recharge de la nappe du Grand Erg Occidental s'effectue dans les zones d'affleurements perméables utiles au piémont de l'Atals Saharien conformément à la piézométrie.

L'apport des isotopes géochimiques, ont montré l'existence d'eaux récentes dans ces zones de recharge. En outre aux zones exutoire dans la Saoura, on peut voir des eaux de plus de 20000 à 40000 ans d'âge ancien.

Les nappes de Hamada de Guir et le Cambro-ordovicien présentent des similitudes en deutérium et par conséquent en suggère une origine commune.

C.7. SIG, vulnérabilité et GIRE

Les cartes de vulnérabilité intrinsèque au système aquifère de Béni- Abbès réalisées à partir des méthodes DRASTIC, GOD et SI ont révélé une grande tendance de la vulnérabilité à la pollution .

Notons que les sable du grand Erg Occidental joue un rôle essentiel à la protection des eaux de la nappe de l'évaporation.

L'utilisation des Systèmes d'Information Géographique, nous a permis d'élaborer une base de données relationnelle contenant une masse de données climatiques, topographique, géologiques, hydrogéologiques et hydro-chimiques. La visualisation conjointe des informations de sources diverses a permis d'élaborer des cartes thématiques très utiles en mettant en valeur l'apport des outils informatiques utilisés pour une meilleure compréhension de l'hydrogéologie local du système aquifère étudié.

C.8. Discussion et perspectives

A l'issue de ce travail il ressort que l'alimentation en potable de la ville de Béni Abbès s'effectue selon deux hypothèses:

- ✓ un transfert à partir de la nappe Cambro- ordovicien ou Hamada de Guir.
- ✓ transfert à partir de la nappe du grand erg occidental.

La pérennité de système clés de développement durable exige sans équivoque de réglementer toute les actions entropiques aux sol et ou sous-sol, dont la Grande Source devrait être aménagée et délimitée par un périmètre de protection immédiat. Cette source pourra être qualifiée comme zone pilote pour l'étude future faisant mieux d'appréhender l'évolution quantitative et qualitative du système Mio-plio-Qauternaire de la Saoura.

Une réhabilitation et valorisation des système ingénieux des foggaras est nécessaire, ces dernières permettent une bonne mobilisation de la réserve régulatrice de la ressources en eau jusqu'à nos jours.

L'exploitation des eaux issues de la station d'épuration à des fins d'irrigation et des éventualités de recharge artificielle du système aquifère.

Cette étude des ressources en eau pour la région de Béni Abbes a été élaborée sur la base de données collectées qui ont été traitées et analysées. Sur la base de ce travail, la mise en application d'une gestion intégré des ressources en eau(modèle saharien) a été recommandée afin d'assurer l'équilibre entre l'offre et la demande.

Ces résultats vont enrichir la base de données sur les caractéristiques de l'aquifère et aider les décideurs à mieux se prononcer sur la gestion des ressources en eaux en vue d'un meilleur développement durable de la région.

En outre, dans les travaux futurs et les perspectives de recherche à envisager que nous projetons de réaliser nous proposons :

- Réalisation d'un forage ou des forages et piézomètres de contrôle et d'étude pour une

meilleure connaissance et surveillance de la nappe du grand erg occidental de point de vue quantitative et qualitative.

- Réalisation d'un forage ou des forages et piézomètres de contrôle et d'étude pour une meilleure connaissance et surveillance de la nappe du Cambro-ordovicien de point de vue quantitative et qualitative.
- Cartographie de la recharge potentielle des aquifères en zone aride et hyper arides: application aux systèmes aquifère de la Saoura.
- une étude hydrogéologique approfondie du paléozoïque très intéressante, par l'utilisation les différentes méthodes géophysiques
- Etude détaillé de l'ensemble des ouvrages hydrauliques implantés sur la rive gauche de la Saoura pour apporter des informations sur l'effet de la décharges de la nappe, et pour arriver a une estimation des débits transitant par l'inféro-flux de la Saoura.
- valorisation et traitement par dessalement (filtration membranaire) des eaux saumâtre des inféro-flux.
- Etude climatologique des précipitations journalières pour estimer les recharges ponctuels actuel sur l'aquifère paléozoïque et l'aquifère de l'erg ainsi que sur l'ensemble du bassin versant de la Saoura.
- l'installation des stations de jaugeages pour estimer et contrôler les écoulements de d'oued Saoura à Igli, Béni Abbes , Kerzaaz et sebkhet el Mellah.
- la mise en ouvre d' un projet pilote du contrat de nappe au niveau de Béni -Abbès.
- Actualisation des études isotopiques des eaux de la Saoura
- Modélisation hydrogéologique de la nappe du Mio Plio- Quaternaire du grand Erg Occidental de la Saoura.
- Gestion intégrée des ressources en eau dans la région de Sud-ouest Algérien.
- Une étude pour l'estimation du temps de séjour des eaux dans le système aquifère à l'échelle régionale et locale..

Références bibliographiques

Références bibliographiques

Abdelbaki C. (2014). Modélisation d'un réseau d'AEP et contribution à sa gestion à l'aide d'un SIG, Cas du Groupement Urbain de Tlemcen. Thèse de doctorat, Université de Tlemcen, 139p.

Ait Kaci, A. (1990) Evolution litho stratigraphique et sédimentologie des Monts d'Ougarta pendant le Cambrien (Sahara algérien nord occidental).Thèse 3^{ème} cycle IST (USTHB) Alger.

Aloui Rafiq. (2018). Caractérisation hydrogéologique du système aquifère jurassique de Mougheul (Djebel Grouz, Sud-Ouest, Algérie),Thèse Doctorat LMD, Université de Tahri-Mohamed- Bechar Faculté de Technologie ,152 P.

Aloui R., Mekkaoui A., Ameri S., Merzougui T., Sadat S., (2015). La nappe turonienne dans la zone pilote d'Ouakda (Béchar, Sud-ouest, Algérie). International Journal of Environment & Water Vol. 3, Issue 4, PP 53- 64.

ANRH (1995) Carte hydrogéologique de la région de Bechar Echelle 1/500 000 (Notice explicative).

ANRH (2009). carte de qualité des eaux souterraines dans la wilaya de Bechar. (Rapport inedit).

Alimen H. (1957). Tertiaire et villafranchien au Sahara nord-occidental. C R .Soc Géol Fr, pp 238-40.

Baba Hamed K., Bouanani A et Terfous A. (2005). Modèle transitoire de la plaine des alluvions de la plaine d'Hennaya (Tlemcen, NW-Algérie) le journal de l'eau et de l'environnement, ENSH Blida p7-p17.

Bakalowicz M. (1977). Etude du degré d'organisation des écoulements dans les aquifères carbonatés par une nouvelle approche. C.R. Acad .Sc. Paris, t.284, Série D, pp. 2463 – 2565.

Bennadji, A. Bennadji, H. Cheverry, C. Bounaga, N. (1998). Béni-Abbès ou le dépérissement d'une palmeraie. Cahiers Sécheresse, Volume 9, Numéro 2, pp 131-137.

Bouhouche Z, Ghazi F (1993). Contribution à l'étude hydrogéologique de la région de Béni-Abbès. Thèse Ing État, USTHB. Alger, p146.

Bouima, T., (1986). Le gîte de Rahmani (Monts d'Ougarta, Algérie). Sédimentologie du Cambrien inférieur et étude des minéralisations stratiformes cuprifères associées. Mise en évidence d'un processus de remobilisation de type Roll. Th. Doct. Ing., Orsay, Univ. Paris-Sud, 211 p.

Blanc D. Et Conrad G. (1968). Evolution géochimique des eaux de l'oued Saoura (Sahara Nord Occidental). Revue de Géog. Phys et de Géol. Dyn, Fasc.5, Paris, pp. 415 – 428

Castany G. 1984. Hydrogéologie, principes et méthodes, Dunod, Paris.

Charnay B. 2010. Pour une gestion intégrée des ressources en eau sur un territoire demontagne. Le cas du bassin versant du Gire (Haute-Savoie). Thèse de doctorat, Université de Savoie (E.D. SISEO), France, 17-37p.

Chavaillon J. (1964). Etude stratigraphique des formations Quaternaires du Sahara Nord Occidental (Béchar – Reggane). Thèse. 393 p, 111 fig, 32 pl, 16 cartes. Publ.CRZA. Serv. Géol, n° 5, Paris, CNRS.

Chavaillon J.(1964) Les Formations quaternaires du Sahara nord-occidental (de Colomb-Béchar à Reggane). Géologie et préhistoire. Paris: Publ CNRS, série Géol,; 393p.

Castany G. (1982) Hydrogéologie, principes et méthodes, Dunod, Paris.

- Chedjati, T et Djaba H, (2001)** Modélisation et hydrodispersion de la nappe de l'aquifère dunaire de Boufelldja , mémoire de fin d'étude, université de Annaba 54p.
- Chikhaoui, M. (1974).** Les ignimbrites et les roches basiques du Précambrien supérieur des Monts d'Ougarta (Souara). Thèse. Doct. 3^{ème} cycle. USTHB. Alger.
- Chikhaoui, M. et Donzeau, M. (1972).** Le passage Précambrien-Cambrien dans les Monts d'Ougarta : le conglomérat du Djebel Ben Tadjine (Saoura, Sahara algérien nord-occidental). Bull. Soc. Hist. Nat. Afr. Nord, Alger, 63, 1-2, pp. 51-62.
- Choubert, G. et Lavocat, R. (1950)** . Les déformations et plis de la Hamada du Draa. C.R. Acad. Sc. t.231, pp. 451-453.
- Collomb, P. et Donzeau, M. (1974).** Relation entre Kink-bands décamétriques et fractures du socle dans l'Hercynien des Monts d'Ougarta (Sahara occidentale, Algérie). Tectonophysics, 24, p. 213-242.
- Conrad G, Roche MA. (1965)** Étude stratigraphique et hydrogéologique de l'extrémité méridionale de la Hamada du Guir. Bull Soc Géol Fr; VII: 695-712.
- Conrad G. Et Al (1966).** Etude isotopique des eaux de la région de la haute Saoura (Sahara Nord Occidental). CR. Acad. Sciences, 262 p, pp. 1058 – 1061.
- Conrad G. (1969)** L'évolution continentale post-hercynienne du Sahara algérien (Saoura, Erg Chech-Tanezrouft, Ahnet-Mouydir). Paris: Centre de Recherche sur les Zones Arides, série géologie, CNRS,; 10; 527p.
- Conrad G. Et Fontes J.Ch. (1970)** . Hydrologie isotopique du Sahara Nord Occidental. In Isotope Hydrology, AIEA, pp. 405 – 419. Vienne.
- Conrad G. Et Fontes J.Ch. (1972)** .Circulations, aires et périodes de recharges dans les nappes aquifères du Nord Ouest Algérien : données isotopiques (¹⁸ O, ¹³ C, ¹⁴ C). C.R. Acad. Sc. Paris. t.275, n° 2, Série D, pp. 165 – 168.
- Conrad G., Marce A. Et Olive P. (1975).** Mise en évidence par le tritium de la recharge actuelle des nappes libres de la zone aride Saharienne (Algérie). Journal of Hydrology. n° 27.
- Cornet A. (1948).** Hydrologie de l'Erg Occidental. Etudes scientifiques. SCH. Clairbois, Birmandreis. Alger. Rapport I, p 13, 4 fig.
- Cornet A. (1952).** Essais sur l'hydrogéologie du Grand Erg Occidental et des régions limitrophes. Travaux de l'institut des recherches Sahariennes (Tome III), 4^{ème} partie, pp. 71 – 122, 18 fig, 01 carte.
- Cornet A. (1962)** Essai sur l'hydro- géologie du Grand Erg occidental et des régions limitrophes. Les foggaras. Trav Inst Rech Sah, VII: 71-122.
- Cornet A. (1952)** Introduction a l'hydrogéologie saharienne. Trav . Inst. Rech. Du Sahara.
- Cvijanovich B.G. (1953).** Sur le rôle des dunes en relation avec le système hydraulique de la nappe souterraine du Grand Erg. Trav. Inst. Rech. Sahar, t.IX, 1^{er} septembre, pp. 131 – 136, 3 fig.
- Combes M (1966)** Etude hydrogéologique de la hamada du Guir. Commune de Bechar Dépt. De la saoura. Etude S.E.S. :68/DH.1M.1'I/C.de la circons.des T.P.H.Des Oasis et de la Saoura, 8 fiches de sondages, 4pl, 14p.
- Combes M (1968)** Note sur l'influence du barrage de Djorf Torba sur l'écoulement de l'oued Saoura.
- Deleau P. (1947)** .Le Guir et la Saoura ; cours d'eau du Sahara Oranais. La nature. 15 mars 1947, n° 3132, pp. 89 – 92.

- Gouskov N. (1944).** Les problèmes hydrauliques à Béni Abbes (Territoire du Sud). Rapport.
- Deleau P.** 1952. La région de Colomb-Béchar, Monographie Régionale, Alger, XIX Congrès de Géologie International.
- Demarsily G. (1981).** Hydrogéologie quantitative- Edition MASSON – Paris- 215 p.
- Derdour A. (2010).** Modélisation hydrodynamique de la nappe des grés crétacés du Synclinal de Remtha –Monts des ksour- Algérie, mémoire Magister, université de Tlemcen 101p.
- DODO A. (1993).** Etude des circulations profondes dans le grand bassin sédimentaire du Niger. Identification des aquifères. Doctorat d'état. Université Neuchatel (Suisse). 101 p, 44 fig, 14 Tabl, 15 annexes.
- Donzeau, M. (1971).** Etude structurale dans le Paléozoïque des Monts d'Ougarta. Thèse. Doct. 3^{ème} cycle, Fac. Sci. Orsay.
- Droux P.** 1995. Système d'information et gestion du territoire, Approche systématique et procédure de réalisation, Presses polytechniques et universitaires romandes.
- Dubief J. (1953)** .Essai sur l'hydrologie superficielle du Sahara. Pub. Serv. Etudes. Sciences. Direc. Serv. De la colonisation et de l'hydraulique. Clairbois. Alger, 457 p, 41 fig, 3 pl.
- Dubief, J. (1960).**Le climat du Sahara Tome I. Univers. Alger, inst. rech. Sahar. , publication C.N.R.S, Paris.
- Dubief J. (1963).** Le climat du Sahara. Tome II. Fascicule I. Univers. Alger, Inst. Rech. Sahar., Publication C.N.R.S., Paris, 275p. 200 fig., 106 cartes, 24 photos.
- Dubief J. (1959).** Le climat du Sahara. Mémo. Hors-série, Inst. Recherche Saharienne, t. I, 312p.
- Durand J.H. (1953).** Etude géologique, hydrogéologique et pédologique des croûtes en Algérie. 250 p S.E.S, Alger.
- Fabre, J. (1975).** Introduction à la géologie du Sahara algérien.- Ed. SNED, Alger, 422 p.
- Fabre J. (1976).** Introduction à la géologie du Sahara algérien et des régions voisines. S.N.E.D. Alger. 421p.
- Fabre J. (2005).** Géologie du Sahara Nord Occidental et Central. Tervuren African Geosciences. Collection. Musée Royal de l'Afrique Centrale- Belgique. Vol. 108. 572 p.
- Fontes J.Ch. Et Gonfiantini R. (1967).** Comportement isotopique au cours de l'évaporation de 02 bassins Sahariens. Earth and Planetary Sciences letters, Vol 3, n° 3. Décembre 1967.
- Fontes J.Ch. (1976)** .Isotopes du milieu et cycle des eaux naturelles : Quelques aspects. Thèse doctorat d'état. Paris VI, 208 p.
- Fontes J.C. et Gonfiantini R. (1967).** Comportement isotopique au cours de l'évaporation de deux bassins sahariens. Earth planet. Sc. Lett., Vol. 3 : pp 258-266.
- Fontes J.C. et Gonfiantini R. (1970).** Composition isotopique et origine de la vapeur d'eau atmosphérique dans la région du lac Léman. Earth Planet. Sc. Lett. Vol. 7: pp 325-329.
- Fontes J.C. (1976).** Les isotopes du milieu dans les eaux naturelles. La houille blanche n°3/4. pp 205-209.
- Fontes J.C. (1976).** Fontes, J .C. 1976. Les isotopes du milieu et cycles des eaux naturelles : quelques

aspects. Thèse Dr-ès-Science, Paris VI, 228p.

Fontes J.C. (1983). Dating of groundwater. Guidebook on Nuclear Techniques in Hydrology. Technical Reports Series n°. 91 IAEA, Vienne pp. 285-317.

Fontes J.C. (1985). Hydrogeology in the Service of Man. Memoirs of the 18th Congress of the International Association of Hydrogeologists, Cambridge. Vol. XVIII, I.

Fontes J.C. and Edmunds W.M. (1989). The use of environmental isotope techniques in arid zone hydrology – a critical review. IHP- III Project 5.2. UNESCO, Paris 75p.

Fontes J.C., Andrews J.N., Edmunds W.M., Guerre A. and Travi Y. (1991). Paleorecharge by the Niger River (Mali) deduced from groundwater geochemistry. Water Resources Research , vol. 27, no. 2, pp199-214.

Frederic Huneau (2000). Fonctionnement hydrogéologique et archives paléoclimatiques d'un aquifère profond méditerranéen- étude géochimique et isotopique du bassin miocène de valréas (sud-est de la France), 150 p.

Gautier E.F. (1923). Le Sahara, Payot éd., Paris, 174 p.

Gautier Y. (1997) Estimation de paramètres géostatistiques à partir de tests de puits, thèse de Doctorat, Université de Paris 06, Paris, France. 167p

Gautier, E, F. (1906). Contribution à l'étude géologique du Sahara (Saoura, Gourara, Touat), Bull. Soc. Géol. France (4), 6, pp. 729-767.

Gonfiantini R. (1986). Environmental isotopes in lake studies. In Fritz P. and Fontes J-Ch. (eds) « Handbook of Environmental Isotopes Geochemistry , Vol. 2, The Terrestrial environment , B ». Elsevier, Amsterdam, The Netherlands : 113-168.

Gonfiantini R. (1996). On the isotopic composition of precipitation ». In JeanCharles Fontes (1936-1994), Un Souvenir, Proceedings, International Symposium, déc. 1995. European Geologist, 2 :5-8.

Gonfiantini R., Roche M.A., Olivry J.C., Fontes J.C. et Zuppi G.M. (2001). The altitude effect on the isotopic composition of tropical rains. Chemical Geology. 181 p. 147- 167.

GTZ Coopération Technique Algéro-Allemande (2006) gestion intégrée des eaux oasis de Béni Abbès atelier de restitution et d'évaluation, rapport interne.

Haddou k, Bensalem.S (2004) Contribution hydrogéologique à l'étude de la qualité des eaux de la nappes de Béni Abbès Mémoire ing. Etat Université d'Oran, 65p.

Hamddiddouche.R (2009) Le bassin intra cratonique de l'Ougarta(Sud Ouest Algérie): évolution géodynamique au Paléozoïque, thèse de doctorat d'état, USTHB. 220p.

Hamzaoui Fadoua.(2011). Géochimie et modélisation des eaux des nappes de Zeuss-Koutine, des grès du Trias et du Miocène de Jorf-Jerba-Zarzis. Thèse Doct. Univ Manar Tunis. ,260 p ,132 fig

Joseph A. (1990). Recharges et paléo-recharges des aquifères en région sub-désertique au Niger. Thèse Doct. Univ. Paris VI. 167 p.

Joseph A., Frangi J.P. et Aranyossy J.F. (1993). Caractéristiques isotopiques des eaux météoriques et souterraines en Afrique Sahélo-Soudanaise. In «Les ressources en eau du Sahel, IAEA-TECDOC-721.», pp 23-38.

Jean-Claude Schmit (2008) Préservation de la ressource en eau dans les bassins d'alimentation des

captages d'eau potable en Eure et Loir; Mise en oeuvre des mesures agro-environnementales. revue géologues N°159 .P85-91

Kabour. A (2005) Contribution à étude hydrogéologique de bassin versant de Cheria, (Sud-Ouest Algérie et essai de modélisation de la région Sud, thèse de Magister, U Batna. 170p.

Kheddoum O., Merzougui T (2010) Évaluation de la qualité du calage du modèle mathématique de la nappe alluviale de l'oued M'zi (Laghouat, Algérie). Deuxième colloque international Gestion intégrée des ressources en eau et défis du Développement durable, Mars 24, 25 & 26, 2010, Agadir, Maroc.

Kheddoum O, Merzougui T (2009) Structure et modélisation hydrodynamique de la nappe alluviale de l'oued M'zi (partie orientale de Djebel Amour Méridional) Laghouat, Algérie). Colloque international sur la gestion intégrée des ressources en eau ; Batna 10 et 11 Novembre, Algérie.

Klingel, P. Deuerlein, J. Cembrowicz, R.G(2005). Analyse des défauts et réhabilitation du réseau d'alimentation en eau de Beni Abbès/Algérie Universität Karlsruhe (Th) Institut für Wasser und Gewässerentwicklung Rapport final GTZ,

Kouane .K.J. et al (2008) Groundwater modelling and implication for groundwater protection: Case study of the Abidjan aquifer Cote d'Ivoire (in Applied groundwater studies in Africa: seum MA Adelana et Alan M. MacDonald N° 13, chapitre 27, pp458-472)

Lachache S.,Nabou M.,Merzougui T.,Amroune A. (2018). Hydrochemistry and origin of principal major elements in the groundwater of the Béchar-Kénadsa basin in arid zone, South-West of Algeria. Journal of Water and Land Development. No. 36 (I-III) p. 77-87. DOI 10.2478/jwld-2018-0008.

Lachache S. et Merzougui, T. 2016. Caractérisation hydrogéologique et hydrochimique de la région de Meridja à l'aide d'un sig (région de Béchar sud-ouest, algérien). 3ème Edition du Colloque International des utilisateurs du SIG. Oujda 22-23 novembre 2016, Université Mohammed 1er Oujda. Maroc.

Lachache S.Nebou, M. et Merzougui, T. 2017. Hydrochimie des eaux souterraines en zone aride, cas de la plaine de Méridja (Béchar Sud -Ouest Algérien). 3ème séminaire international sur l'industrie minérale et environnement, 11 -13 October 2017, Université d'Annaba, Algérie.

Lachache S.Nebou, M. et Merzougui, T. 2017. Hydrogéologie et hydrochimie des eaux de l'aquifère Turonien dans une zone aride. (Béchar Sud-Ouest Algérien). 3ème colloque international francophone en environnement et santé, 23-25 October, Université Littoral Cote d'Opale, Dunkerque, France.

Lachache S (2018). Apport des SIG dans la gestion intégrée des ressources en eau dans la région de Béchar (Sud-Ouest Algérien), Thèse doctorat LMD, Univ. Tahri Med Bechar. 217p. 166 fig.

Laroussi C., Habaleb H., (1986) Gestion des ressources en eau en conditions d'aridité, cas de la Tunisie, INAT.

Lasserre F. et Descroix, L. 2003. La gestion intégrée des ressources en eau par bassin : au-delà de la rhétorique in eau et territoires : tensions, coopérations et géopolitique de l'eau. Paris, Harmattan. pp 221-239.

Lavocat R. (1954). Reconnaissance géologique dans les hamadas des confins algéro-marocains du Sud. Notes et M. serv. Géol. Maroc, n°116. 1 vol., 148 p., 27 fig., 5 pl. h. t., 10 pl. et 20 cartes.

Louvat, D., Michelot J.L. and Aranyossy J.F. (1999). Origin and residence time of salinity in the Äspö groundwater system. Applied Geochemistry, Volume 14, Issue 7, pp. 917-925.

Laurence, Chery et Marsily, Ghislain (2007) Aquifer systems management: Darcy's legacy in a world of impending water Shortage, edition Taylor et Francis Chapter 20, pp 269-279.

- Maguire D.** 1991. An overview and definition of GIS. In Geographical information systems principles and applications, ed. D. J. Maguire, M. F. Goodchild, and D. W. Rhind, 9– 20. New York: Longman Scientific and Technical, John Wiley and Sons.
- Mahboubi M.** (1983). Etude géologique et paléontologique du Crétacé post Alpin et du Tertiaire de la bordure méridionale du Djebel Amour (Atlas Saharien central). Thèse 3ème cycle, Univ – Oran. 113 p, 26 fig.
- Margat J. Suais-Parascandola M. F.,** (1987). Mapping of the vulnerability of groundwater to pollution, some lessons from experience in France. In: W. Van Duijvenbooden and H. G. Van Waegeningh (Editors), Vulnerability of soil and groundwater to pollutants, the Hague, pp. 433-436.
- Margat J., (1968)** . Vulnérabilité des nappes d'eau souterraine à la pollution. Base de la
- Margat J. (1985).** Hydrologie et ressources en eau des zones arides. Bull. Soc. Géol. France, (8), t. 1, n°7, pp.1009-1020.
- Margat J. (1990).** Les gisements d'eau souterraine. La recherche n°221. mai, 1990.
- Margat J. (1992).** Les eaux fossiles. Afrique contemporaine, N°161 (Spécial) 1er trimestre.
- Mebrouk Naïma 2007 Etude** hydrochimique et isotopique des eaux de la vallée de la Saoura (Sahara Nord Occidental) Thèse Doct. FSTGAT ,université Oran, 243 p.
- Mansour H. (1993)** Les isotopes dans l'eau du Sahara Nord Occidental Algérien (Grand Erg Occidental - Hammada du Guir). 2ème journées de géologie appliquées, Sfax, pp. 88 – 111.
- Mansour H, Safa A et Bekhedda B. (1998).** La flexure Sud Atlasique et son rôle hydrodynamique dans la réalimentation de la plate forme Saharienne à Béni Ounif. Journées d'étude sur les zones arides, retrospectives, enjeux et réalités. Adrar.
- Mansour H., Merzougui T., Nadji A., Foukrache M., Zeroual I. (2006).** Les grands transferts hydrodynamiques dans le bassin sédimentaire du Nord Ouest Saharien de l'Algérie (Monts des Ksour – Plate forme Saharienne). International Symposium sur la gestion des grands aquifères, Dijon (France).
- Mansour Hamidi 2007** Hydrogéologie du continental intercalaire et du complexe terminal en domaine aride. Exemple des monts des ksour (atlas saharien occidental), Thèse Doct. FSTGAT ,université Oran 443 p. 08 planche, 161 figure, 43 tableau.
- Mekideche D., Mansour H., Sai W., Tout S. Et Younsi N. (1995)** . Notice explicative de la carte hydrogéologique de la région de Béchar au 1/500.000e. ANRH. Projet PNUD/ALG/88/021. 73 p, 33 fig, 6 tabl, 1 carte.
- Meddi, M. (1998).** Etude des pluies annuelles et journalières dans le Sahara algérien. Cahier Sécheresse, Vol.9, Numéro 3, page 193-199.
- Mekkaoui A.** 2000. Bordure du sillon atlasique–plateforme saharienne, pendant le jurassique inférieur et moyen (Grouz méridional, Charef -Fendi) Algérie Sud Occidentale. Mémoire de magistère, Université d'Oran, Algérie, 210 p.
- Mekkaoui A, Merzougui T et al (2009)** Patrimoine géologique au Km 30 (Vallée de la Saoura, Sud Ouest algérien ; Revus El Ater N°2.
- MEKKAOUI Abderrahmane (2015)** . Géochimie Le magmatisme basique de l'axe Damrane-Kahal Tabelbala (Daoura, Monts de l'Ougarta, Sud-Ouest, Algérie): Géologie, Pétrologie, Géochimie et Contexte Géodynamique, THESE Doctorat en Sciences ; Université d'Oran 2 Faculté des Sciences de

la Terre et de l'Univers ; 232 P, Planche14.

Mekideche D.Sai, N.Touat, S. et Younsi, N. 1995. Carte hydrogéologique de la région de Béchar. Rapport interne, notice explicative, DHWB, Béchar, Algérie, 74 p.

Mekideche D., Sain., Touat S. et Younsi N. (1995). Carte hydrogéologique de la région de Béchar. Notice explicative, p 73.

Menchikoff N. 1930. Recherches géologiques et morphologiques dans le Nord du Sahara occidental. Rev. Géogr. Phys. Géol. Dyn., VII, 2, p.139.

Menchikoff N.Alimen, H.Maitre, D. L.Petter, G., et al. 1952. Les chaînes d'Ougarta et de la Saoura. 19^{ème} Congr. Géol. Inter., Alger, Mongr. Région, 1ère série, Algérie n. 15.

Menchekoff, N. (1933) la série primaire de la Saoura et des chaînes d'Ougarta, bull, ser, car, géol, Algérie, 2^{ème} série, fasc II, p109

Menchikoff, N. Alimen, H. LE Maitre, D. Petter, G. Poueyto, A. (1952). Les chaînes d'Ougarta et de la Saoura. 19^{ème} Congr. Géol. Inter., Alger, Mongr. Région, 1ère série, Algérie n. 15.

Menchikoff N. (1957) – Les grandes lignes de la géologie Algérienne. Rev. Géogr. Phys. Et Géol. Dynam. Paris, Serv, 2, vol 1, Fasc.1, pp. 37 – 45.

Levin I., Graul R. and Trivett N.B.A. (1995). Long terme observations of atmospheric CO₂

Merzougui T. (1998) Valorisation des ressources en eau de la haute Vallée de la Saoura (entre Taghit et kerzaz) Thèse Ing état, Univ Sci Tech d'Oran Algérie, 175 p.

Merzougui T, Mekkaoui A et Graine G, (2007). Hydrogéologie de Béni Abbès : potentialités, hydrodynamique ces conséquences sur la palmeraie (Vallée de la Saoura, Sud Ouest algérien). Congrès Gestion des grands aquifères, Dijon AIH 2006 France.12 p

Merzougui T.; Mekkaoui A.; Mansour H.; Graine-Tazrout (2007). Hydrogeology of Béni Abbès: potential, hydrodynamics and influence on the palm field (Valley of Saoura, Algerian South-West). Aquifers system management. Editors L. Chery et G. De Marsily. Chapter 20, pp 269 – 279.

Merzougui T et al (2007). Approche d'une gestion intégrée des eaux dans l'oasis de Béni Abbès (sud ouest algérien, vallée de la Saoura Colloque SHF « gestion active des eaux » 12 et 13, Paris, France.

Merzougui T (2007). Élaboration d'un périmètre de protection du champ captant de la ville de Bechar - La plaine de Ouakda– (rapport interne) ANRH.

Merzougui T, Kabour A et Bouanani A. (2008). Un modèle de gestion intégrée des ressources en eau dans une zone hyperaride : Cas de l'oasis de Béni Abbès (Vallée de la Saoura, sud ouest algérien), 13e Congrès Mondial de l'Eau, 1-4 septembre, Montpellier, France.

Merzougui T (2008) L'eau dans l'oasis de Béni Abbès : un enjeu majeur, Bulletin d'information N°8 , DGF/PNUD G35.Saoura, Sud-Ouest algérien ; Revus El Ater N°2.

Merzougui T. (2011) Caractérisation hydrogéologique et modélisation hydrodynamique d'un aquifère alluvial dans une zone hyper aride : cas de la palmeraie de Béni Abbès (Vallée de la Saoura, sud ouest algérien), Mémoire de Magister ; Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen. 145p.

Merzougui Touhami t all. (2012) Un modèle de développement durable : la gestion intégrée des eaux dans une région hyperaride, cas de l'oasis Béni Abbès (Vallée de la Saoura, sud ouest algérien) ». Published in 2012 by the United Nations, IHP-VII Series on groundwater N°4, International Hydrological Programme, Division of Water Sciences. Educational, Scientific and Cultural Organization.p265-274

Merzougui Touhami.(2013). A model of integrated water management in Saharan environment; example the oasis Beni Abbes. (Saoura Valley, South West Algeria). 2013. International Journal of Environment &Water ; ISSN 2052-3408 Vol 2 ; Issue 5, pp: 50-57.

Merzougui Touhami , Bouanani Abderzzak, (2013). Modélisation mathématique d'un aquifère alluvial en zone saharien : Cas de la nappe de la palmeraie de Béni Abbes (Vallée de la Saoura, sud ouest algérien).International Journal of Environment &Water; ISSN 2052-3408 Vol 2, Issue 5, pp: 95-104

Merzougui Touhami Et all (2013). Risque des innodations dans le bassin versant de la Saoura ; cas d'oued Bechar, International Journal of Environment &Water; ISSN 2052-3408 Vol 2, Issue pp 95-104.

Merzougui T. Bouanani A., Rezzoug Ch., Mekkaoui A., Hamzaoui F.A., Merzougui F.Z. (2019). Palm grove groundwater assessment and hydrodynamic modelling. Case study: Beni Abbes, South-West of Algeria. Journal of Water and Land Development. No. 43 (X–XII) p. 133–143. DOI: 10.2478/jwld-2019-0071

Merzougui F.Z., Makhloufi A., **Merzougui T.** (2019). Hydro-chemical and microbiological characterization of Lower Cretaceous waters in a semi-arid zone Beni-Ounif syncline, South-West of Algeria. Journal of Water and Land Development. No. 40 (I–III) p. 67–80. DOI: 10.2478/jwld-2019-0007

Mokeddem I., Belhachemi M., **Merzougui T.**, Nabbou N., Lachache S.(2018.) Hydrochemical assessment and groundwater pollution parameters in arid zone: Case of the Turonian aquifer in Béchar region, southwestern Algeria. Journal of Water and Land Development. No. 39 p. 109–117. DOI: 10.2478/jwld-2018-0065.

Nédjari A (2003) le bassin de l'Ougarta une mobilité permanente, 2^{ème} séminaire de stratigraphie Béni Abbès mémoire de service géologique national n°14

Nourddine Gaaloul, Moncef Rekaya, Fayçal Jlassi (2008) Salinisation des eaux souterraines de la nappe phréatique de la Cote orientale au Sud –Est de la Tunisie ; revue géologues. U.F.G, numéro 159, les aquifères souterraines : caractérisation, protection et gestion, pp59-64.

O.R.G.M, (1998). Rapport final de prospection régionale de l'Argent dans les Monts d'Ougarta.(Tomel).

OSS (2002). Système Aquifère du Sahara Septentrional : De la concertation à la gestion commune d'un bassin aquifère transfrontière. Projet SASS. Rapport interne. Tunis, Tunisie. 58p.

OSS (2003a) . Système Aquifère du Sahara Septentrional. Volume 2 : Hydrogéologie. Projet SASS. Rapport interne. Coupes. Planches. Annexes. Tunis, Tunisie. 275p.

OSS (2003b). Système Aquifère du Sahara Septentrional. Volume 4 : Modèle Mathématique. Projet SASS ; Rapport interne. Annexes. Tunis, Tunisie. 229p.

Oueld Baba Sy Mouhamed (2005). Recharge et paléo recharge du système aquifère su Sahara septentrionale. Thèse de doctorat en géologie. Univ. El Manar Tunis. 271p

Partenariat Mondial Pour L'eau/Comité Technique Consultatif (2000). La gestion intégrée des ressources en eau, document no 4.

Partnership G. W. 2000. Integrated Water Management. Comité technique consultatif, TacBackground Paper n°4, Stockholm, 80 p.

Partnership G. W. 2009. Better water resources management. Greater resilience today, moreeffective adaptation tomorrow. 5th World Water Forum : perspectives on water and climate

change adaptation. Istanbul.

Paryen, C. (1961). Les massifs carbonifères du Sahara sud-oranais. Edit. C.N.R.S. , 1, 325 p., 2 c. H.t.

Philippe Verjus.A (2008) Gestion de la nappe du Champaigne (Ile de France) p91, revue géologues N°159

Poirmeur H. 1906. La région du Guir-Zousfana. Bulletin. Comité. Afrique. France., Juillet,1906, XVI, Renseignements coloniaux. Bureau Topographie du Territoire d'Ain Sefra.

Pornon H., 1992. Systèmes d'information géographique pour petites communes. STU.

Pareyn C. (1961) .Les massifs Carbonifères du Sahara Sud Oranais.

mique et procédure de réalisation. Presses polytechniques et universitaires romandes.

Reynard E. 2000. Gestion patrimoniale et intégrée des ressources en eau dans les stations touristiques de montagne. Les cas de Crans-Montana-Aminona et Nendaz (Valais). Thèse de doctorat en lettre, Université de Lausanne, Suisse, Lausanne, 371 p.

Star J. et Estes, J. 1990. Geographic information systems: An introduction. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice Hall.

Roche MA. (1973). Hydrogéologie de la Haute Saoura (Sahara nord-occidental). Paris: Publ CNRS, série Géol.,; 91p.

Schoeller H. (1942). La question de l'eau fossile au Sahara. C.R. som. Soc. Géol. Fr., n°10, pp. 81-83.

Schoeller H. (1945a). Le Quaternaire de la Saoura et du Grand Erg Occidental. Trav. Ins. Rech. Sahar., t. III, pp. 57-71, 2 fig.

Schoeller H. (1945b). L'Hydrogéologie d'une partie de la vallée de la Saoura et du Grand Erg Occidental. Bull. Soc. Géol. Fr., 5, t. XV, pp. 563-585.

Service Géologique De L'Algérie (SGA), (2000) . Carte géologique de Ben Zireg à 1:200 000 NH-30-XXIII, Ministère de l'industrie et de l'énergie, Office nationale de la recherche géologique et minière, dressée par Arezki Zerrouki.

Service Géologique De L'Algérie (1952) .Carte géologique de Kerzaz au 1/500 000e , dressée par Menchikoff.

SOGREAH (1970) . Etude hydrogéologique des nappes aquifères de l'Erg Occidental et du piémont de l'Atlas. Grenoble. ANRH, Alger, Algérie

SONAREM (IDROTRCNECA) (1979). Etude hydrogéologique de la région de Bechar. Rapport final.

SONAREM, (1980). Rapport des travaux de recherches et de levé systématique au 1/200 000 sur la feuille NH-30-X (Ougarta). (Équipe d'Ougarta). (Inédit)

Rahmani A. (2010) . Apport des S.I.G. dans la caractérisation hydrodynamique et hydrochimique de la nappe du Crétacé inférieur de la région d'Ain-Sefra (Atlas saharien occidental —Algérie.,Mém. Mag. Univ – Tlemcen, 105p, 56fig.

RUSSO P. (1939) .Nouvelles observations sur le grand accident Sud Atlasien. Bull. Soc. Géol. France. Paris (5), IX, pp. 691 – 701, 1 fig.

Thériault M. 1995. Systèmes d'information géographique, concepts fondamentaux, Notes et documents de cours, numéro 12, LATIG, Département de géographie, Université Laval, Sainte-Foy,

Québec, G1K 74p.

Vanney .J (1960) Pluie et crue dans le Sahara Nord Occidental (Mars 1959). Inst. Rech. Sahar. Alger, Monographie régionale, n°4, 118 page.

Verdeil .P (1989): Abaque pour le calcul du déficit d'écoulement en Algérie. Sem. Sci. Terre. Alger

Valérie Murat, (2000). Etude comparative des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque des aquifères à la pollution : application aux aquifères granulaires du piémont laurentien. Maître ès sciences (m.sc. université du Québec INRS, 291 p,7 annexe

UNESCO (1972). Etude des ressources en eau du Sahara Septentrional. Rapport inédit. ANRH.

UNESCO (2003). L'eau pour les hommes, l'eau pour la vie, Rapport mondial sur la mise en valeur des ressources en eau, UNESCO/Division des sciences de l'eau, Paris, France.

Yousfi M. (1984). Etude géochimique et isotopique de l'évaporation et de l'infiltration en zone non saturée sous climat aride : Béni-Abbès, Algérie. Thèse Doct. 3è cycle. Univ. Paris- Sud Orsay, 181p.

Yousfi N. Et Aït Ahmed C. (1992) . Contribution à l'étude hydrogéologique de la grande source de Béni Abbes (Sahara Nord Occidental). Mém. Ing. Univ – Oran, 396 p, 126 fig.

Youcef Hacini. (2006). Application des méthodes géophysiques à l'étude de deux sites (Kappelen et Grenchen) de l'aquifère poreux complexe du Seeland. Thèse de doctorat présentée à la Faculté des géosciences et de l'environnement de l'Université de Lausanne par Magister en Hydrogéologie Université Badji Mokhtar - Annaba (Algérie).

Zouari K. (1983). Etude géochimique et isotopique de l'infiltration en zone non saturée sous climat semi-aride (Sud Tunisien). Thèse Doct. 3è cycle, Paris XI, Orsay.

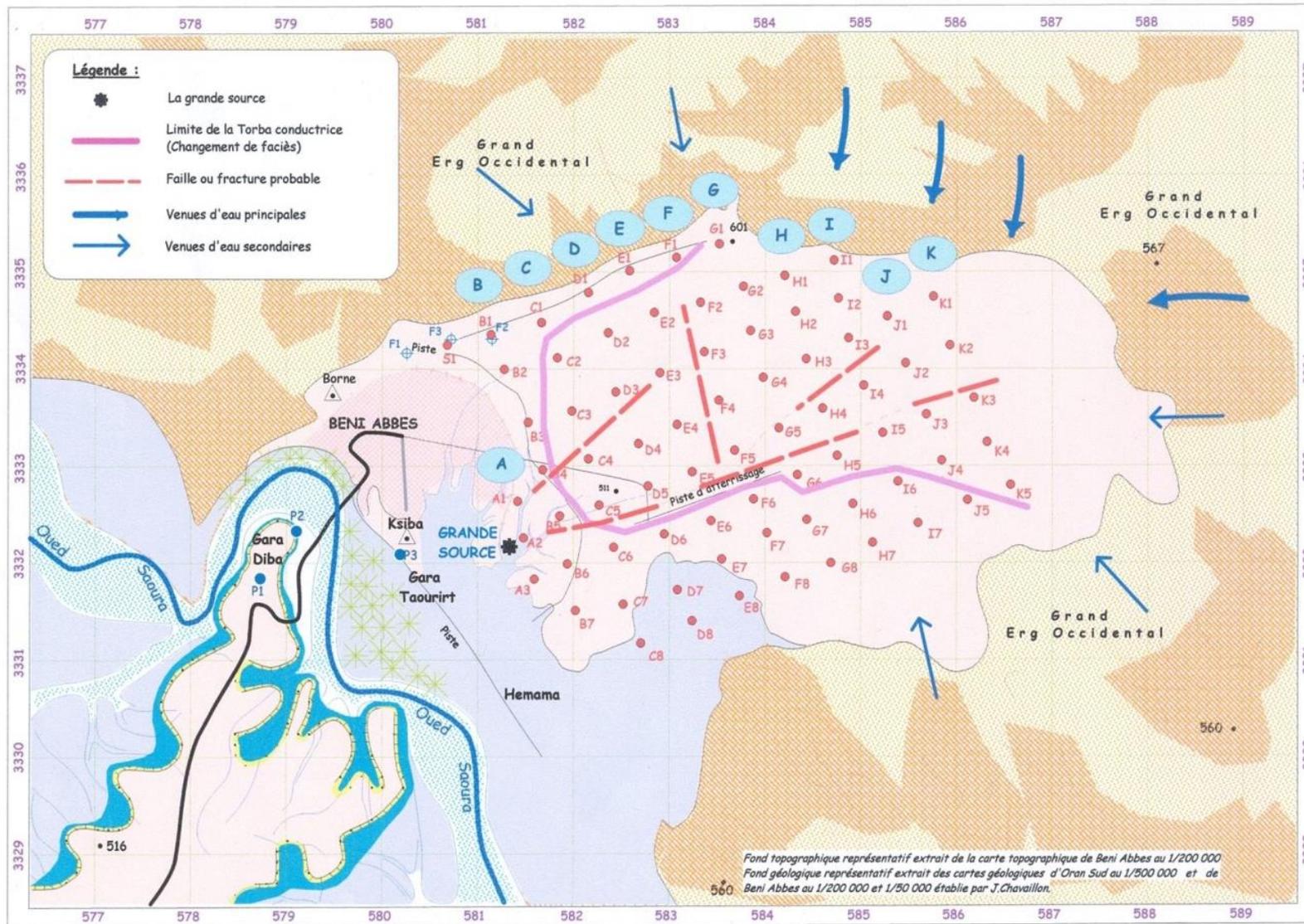


PLANCHE N° 01 : Carte structurale synthétique à Béni -Abbès

ANNEXE 1.1 INVENTAIRE ET ANALYSE HYDROCHIMIQUE DES POINT D'EAUX DE LA NAPPE MIP-PLIOCENE (Grand Erg Occidental)

N°	NOM	X	Y	Z	TYPE	NS	NP	PH	CE	RS	CA	MG	NA	K	CL	SO4	NO3	HCO ₃	TH	TAC	NH4	NO2	PO ₄	MO	SiO2	MIN E	SI
1	HASSI FEDJ BOUNOUARA	618155	3337184	502	PUITS	13	489	7.47	1.57 9	970	97	58	133.6	2.8	18 5	380	21	119	47	10	0	0	0	2	7.5	979	996
2	HASSI EL ROKNA	586967	3334499	533	Puits	12.5	522	7.24	0.66	315	35	38	25.18	40	-	-	20		25	7	0.08	0.04	0.1 5	2.4	10.8 5	406	422
3	HASSI ALI	584801	335838	603	Puits	12	591	7.24	0.66	315	32	38	25.18	40	-	-	20		25	7	0.08	0.04	0.1 5	2.4	10.8 5	406	422
4	HASSI JDIDA	677364	3332978	521. 2	Puits	11.1	486.9	7.12	0.57	360	32	15	32	65	50	100	30	104	14	9	0.48	0.083	0.2	2.9	10.9 7	353	
5	HASSI PIEZO	581620	3334223	498	Puits	0	498	8.15	2.81	180 0	24 1	89	235	20. 8	60 0	340	13	262	0	96	22	0	0	0	0	4.5	1742
6	H. LA HAMARA	616631	3343319	561	Puits	13.3	547.7	7.14	91	430	40	25	80	61	12 0	190	50	70	20	6	0.22 1	0	-	-	6.91		-
7	H.LEMASSSHA	640336	3348613	562	Puits	13	594	7.24	0.66	315	50	38	25.18	40	-	-	20	-	25	7	0.08	0.04	0.1 5	2.4	10.8 5	406	422
8	HASSI FOKRA	651520	3337625	536	Puits	27.4 5	508.55	7.24	0.66	315	50	38	25.18	40		--	20	-	25	7	0.08	0.04	0.1 5	2.4	10.8 5	406	422
10	HASSI BAGRA	630152	3375027	622	Puits	24	598	7.24	0.66	315	50	38	25.18	40		--	20	-	25	7	0.08	0.04	0.1 5	2.4	10.8 5	406	422
11	HASSI DIBONI	730403	3335328	505	Puits	43.8	461.2	7.09	0.81	510	10 3	28	0	0	24 6	29	80.7	85	37	7	0.32 8	0.046	0.0 1	1.6	11.44	502	
12	HASSI HOMEUR	633931	3343635	520. 8	Puits	13.5	507.3	7.2	0.72	450	20	18	49.2	65	80	110	50	55	12	5	0.15	0.01	0	0.7	8.06	446	447
13	HASSI KTOB MAA	594101	3343225	550	Puits	16	534	8.09	1.44	900	111	49	120	28	35 0	145	72	98	47	8	0.01	0	0	4	14	893	973
14	H. MARHOUMA	593281	3319770	448	Puits	2.4	445.6	7.09	0.81	510	10 3	28	0	0	24 6	29	80.7	85	37	7	0.32 8	0.046	0.0 1	1.6	11.44	502	
15	GRAND SOURCE	580912	3332346	494	Source	0	494	7.66	589	390	51	21	33	7	50	95	28	119	21	10	0	0	0	0.9	7.35	365	404
16	H TIKHSSAGIME	605699	3324284	520	Puits	12.0 9	567.91	7.23	0.69	345	41	21	35	50	70	100	78.6 1	79	19	7	0.24 7	0	0.2 5	0.9	8.27	427	475
19	HASSI IGLI	570019	3358836	500	Puits	11.1	488.9	7.7	0.49 1	320	38	16	32	2.3	35	45	23	137	16	11	0	0.04	0	0.3	5.5	304	328
20	HASSI KRZAZ	645778	3262794	328	Puits	10.2	317.8	7.48	1.2	760	97	29	115	8	18 0	200	10	149	36	12	0.00 4	0.006	0	1.6	7.8	744	788
21	HASSI TIMOUDI	685528	3248347	369	Puits	11	358	7.5	1.05 7	680	80	29	97	8.4	17 0	150	43	88	32	7	0	0	-	-	-	-	
22	HASSI HUISSI	596285	3328637	470	Puits	6	464	7.6	0.77	480	44	27	50	48	110	20	92	22	8	0.13	6.68	0.28		2.2	11.4	655	681
23	HASSI EL OUATA	614066	3304536	435	Puits	7.6	427.4	7.54	0.72	490	72	18	34.9	6.2	115	80	18	113	25	9	0	0.005	-	-	-	-	-

Unité des analyse en mg/l

ANNEXE 1.2 INVENTAIRE ET ANALYSE HYDROCHIMIQUE DES POINT D'EAUX DU SYSTEME AQUIFERE DU MIO-PLIO-QUATERAIRE DE BENI ABBES

N	Nom	X (m E)	Y (m E)	Z	NP2016	Débit L/S	T m2ls	K m/s	Q lls	E m	Mur	ph	CE	RS	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO4	NO3	HCO3	NO2-	MIN
P24	HASI ROKNA	586967	3334498	513	491	0.5	0.00163	0.00184	1.25	100	424.25	7.85	0.91	520	46	13	40	2.7	60	70	62	125	1.9	600
P25	ZENAGUI 01	579323	3333924	500	482	0.5	-	-	1.25	40	442	8.15	2.81	1800	241	89	235	20.8	600	340	13	262	0	1900
S1	Grande Source	581023	3332613	489	489	28	-	-	28	16	473	7.66	0.589	390	51	21	33	7	50	95	28	119	0	404
F1	Forage1	580711	3334830	511	480.1	3	0.02	0.00184	3	55	425.1	7.7	0.631	391	59	16	33.5	3.5	50	100	26	104	0	391
F2	Forage2	580921	3334830	511	482.5	3	0.012	0.00184	3	55	427.5	7.65	0.538	350	46	13	40	2.7	60	70	17	125	0	374
P27	F Majroud	583319	3331839	506	463.6	0.001	-	-	1	45	418.6	7.19	1.54	960	138	56	97	10.5	165	220	25	308	6.2	1000
P28	BARED	578643	3333505	462	449.9	0.002	-	-	2	20	429.9	7.19	1.54	960	138	56	97	10.5	165	220	25	308	6.2	1000
P16	MOKHTAR B	578907	3333599	462	458	0.0015	-	-	1.5	20	438	7.09	15.83	8050	473	632	2300	70	900	1500	53	305	6.1	9814.6
P29	Hermitage	580504	3332796	486	450	-	-	-	2.5	16	434	7.48	1.08	700	80	18	120	8.8	145	210	72	64	0.9	500
P30	PAPC	582716	3330304	463	448.3	0.002	0.004	0.0027	2	16	432.3	7.48	1.08	700	80	18	120	8.8	145	210	72	64	0	718
P20	BENAISSA	579495	3332872	465	464.6	0.0018	0.12	0.012	1.8	10	454.6	7.91	2.6	1700	202	62	80	233	370	460	150	253	0.001	1612
P31	Hemama	581361	3331648	494	462	-	-	-	2	25	437	7.09	0.81	510	103	28	90	10	246	29	80.7	85	11.44	800
P33	JUIFA	581127	3330428	502	446.5	0.001	-	-	2	25	421.5	7.44	3.44	2100	257	89	281.2	10.5	600	475	7	299	0	2019
P34	BERKA	579932	3331048	502	445	0.002	-	-	2	20	425	7.48	1.08	700	80	18	120	8.8	145	210	72	64	0	718
P2	KHLIFA	5802	33317	50	445.5	0.00	0.04	0.012	2.5	25	420.5	7.4	3.44	210	25	89	281.	10.	600	475	7	299	0	2019

DATE	2008 Avril	10/04/2015			19/05/2015			11/06/2015			11/07/2015			11/08/2015		
PARAMETRE	Prof(m)	Prof (m)	CE (myS/cm)	T C°	Prof (m)	CE (myS/cm)	T C°	Prof (m)	CE (myS/cm)	T C°	Prof (m)	CE (myS/cm)	T C°	Prof (m)	CE (myS/cm)	T C°
P01	4,65	2,91	34,9	19,2	3,12	37,9	19,5	3,20	44,2	23,6	3,30	51,9	27,3	3,4	64,3	24,8
P02	6,43	5,82	8,98	19,3	6,10	9,01	19,9	6,28	9,15	23,1	6,55	9,6	25,3	6,6	9,71	25,2
P03	6,46	2,40	7,09	18,6	2,80	7,28	20,2	2,92	7,72	22,8	3,20	8,92	23,9	2,15	11,37	22,8
P04	5,30	4,68	3,93	21	5,10	3,98	21,1	5,02	3,58	22,1	5,20	3,12	22,7	4,28	2,76	22,7
P05	3,44	5,40	29,2	20,6	5,50	27,3	20,9	5,60	28,1	22,1	5,75	29	23,9	5,76	30	23,8
P06	4,85	5,72	18,14	20,4	5,97	17,83	20,9	5,90	17,6	22,1	6,05	17,43	23,1	5,14	17,38	23,7
P07	7,02	9,50	616	19,6	6,60	25,7	20,8	6,60	25,8	21,8	5,70	26,1	22,8	6,8	26,4	23,2
P08	5,59	9,17	2,29	22,2	8,00	2,2	22,0	8,20	2,09	22,8	8,80	1023	28,0	8,48	2,38	23
P9	6,78	6,38	3,08		6,98	3,51	20,8	6,04	3,21	21,3	8,00	2,94	22,0	8,02	2,97	22
P10	/	9,95	1267	23,2	8,12	1230	22,0	9,60	1151	23,1	11,10	1093	23,9	11,2	1086	24,1
P11	4,46	6,70	1554	23,6	7,28	1643	23,3	6,63	1680	23,4	7,40	1703	23,4	7,28	1730	23,6
P12	6,15	8,45	1533	12,8	7,46	1136	21,8	6,80	1148	23,0	7,65	1182	24,1	6,37	1310	25,4
P13	3,05	3,24	1160	22,4	3,50	1106	21,3	3,95	1112	22,0	5,30	1090	24,5	5,33	1147	23,4
P14	6,15	5,65	1645	20,1	5,93	1585	20,5	6,32	1504	22,4	6,60	1437	25,9	6,93	1395	24,8
P15	4,83	4,20	10,87	19,9	4,38	10,85	21,5	4,50	11,09	23,5	3,80	11,25	25,8	5,16	11,15	25
P16	4,84	4,46	14,65	23,2	4,68	14,24	22,5	4,90	14,41	24,1	5,10	14,56	24,7	5,3	14,75	25
P17	4,69	5,17	2,39	22,8	4,64	2,41	22,5	5,18	2,52	22,8	5,60	2,7	23,5	5,24	3,09	23,6
P18	5,10	5,05	1175	22,1	5,30	1075	22,7	6,30	1094	23,9	7,60	1148	26,3	6,6	1105	25
P19	6,00	6,75	945	19,8	7,08	861	20,7	7,50	8,15	22,5	7,85	870	24,3	8,3	890	24,9
P20	7,46	6,32	1990	21,5	6,45	1958	22,1	6,60	1888	23,1	6,60	1795	24,6	6,52	1763	25,2
P21	6,59	8,40	4,6	24,2	8,14	4,72	23,5	7,49	4,39	24,5	8,00	4,55	25,5	8,2	4,58	25,3

ANNEXE 1.2 : Résultats des analyses physico chimique de la palmeraie de Béni Abbés 2015-2016

ANEXE 3 : LA SUITE

DATE	15/09/2015			15/10/2015			15/11/2015			12/12/2015			11/01/2016			13/02/2016			13/04/2016		
PARAMETRE	Prof (m)	CE (myS/cm)	T C°	Prof (m)	CE (myS/cm)	T C°	Prof (m)	CE (myS/cm)	T C°	Prof (m)	CE (myS/cm)	T C°	Prof (m)	CE (myS/cm)	T C°	Prof (m)	CE (myS/cm)	T C°	Prof (m)	CE (myS/cm)	T C°
P01	3,4	80,9	22,3	la crue			1,95	1732	14,8	2,55	19,5	11,2	2,60	2,45	10,1	2,40	2,4	10,2	2,89	2,44	19,2
P02	6,89	10,05	23,6	6,45	10,24	21,9	5,64	12,06	18,9	5,80	12,04	15,7	5,60	12,02	14,9	5,40	12,12	14	5,85	12,12	19,3
P03	pas d'eau			2,70	9,79	21,0	2,30	12,59	16,2	2,70	13,15	12,6	3,20	14,26	12,1	3,00	14,3	12,3	2,80	14,26	18,3
P04	5,5	2,8	22,6	6,40	3,28	22,2	4,85	4,68	20,4	4,55	6,71	19,7	4,50	5,05	18,7	4,30	5,07	18	4,60	5,04	21
P05	5,8	17,8	23,8	5,90	10,28	20,6	5,40	28,2	19,1	5,40	29,2	16,8	5,20	20,6	15,8	5,00	20,4	15,8	5,10	20,6	20,6
P06	8,3	30,9	22,8	6,16	12,57	22,1	5,65	17,23	21	6,53	17,41	19,7	5,40	17,65	18,9	5,20	17,6	18,6	5,72	17,6	20,4
P07	8,9	26,1	23,3	6,90	26,2	23,3	6,63	26,8	18,8	6,50	27,4	16,6	6,48	28,4	15,9	6,28	28,4	15,9	9,00	28,4	19,4
P08	8,3	2,18	23	8,50	2,16	21,8	8,40	2,21	20,6	7,16	2,2	16,2	7,98	2,2	16,5	7,78	2,24	16,5	9,10	2,2	22,2
P9	6,49	2,64	22,5	6,44	2,46	21,6	6,25	2,72	20	6,10	2,67	17,5	5,64	3,1	18,3	5,44	3,2	18,3	6,50	3,1	
P10	6,4	1125	24	7,58	1170	23,0	7,45	1233	21,8	7,40	1265	21,5	7,17	1401	21,1	6,97	1402	21,1	9,80	1406	231
P11	6	1699	23,7	6,14	1672	23,2	5,95	1635	21,9	7,40	1613	22,1	5,52	1645	18,7	5,32	1640	18,7	6,66	1643	23,6
P12	6,85	1224	25,3	5,62	1418	26,0	6,00	1592	20,7	7,10	1575	20,6	6,20	1401	19,4	6,00	1401	19,4	8,45	1401	12,8
P13	5	1116	23,4	3,75	1187	22,4	3,45	1259	21,2	3,30	1321	19,9	3,28	1515	20,1	3,08	1515	20,1	3,27	1515	22,4
P14	6,9	1403	23,2	6,15	1486	21,6	6,00	1588	17,6	5,80	1654	16,0	5,60	1771	15,4	5,40	1771	15,4	5,65	1771	20,1
P15	4,98	11,23	24,2	4,85	9,3	22,0	5,45	10,69	20,4	4,40	13,38	21,6	4,05	10,87	16,1	3,85	10,87	16,1	4,2	10,87	19,70
P16	5,4	14,64	25	4,40	18,3	23,7	4,45	14,63	22,1	4,50	14,54	19,6	4,40	15,34	17,3	4,20	15,34	17,3	4,45	15,5	22,30
P17	5,45	3,23	23,5	5,10	3,32	22,1	4,50	3,27	20,3	3,40	2,28	19,4	3,35	2,73	17,9	3,15	2,73	17,9	5	2,73	22,8
P18	7,02	1123	23,7	4,70	1077	23,6	5,50	1062	22,7	4,70	1144	20,1	####	1148	20,1	50,10	1148	20,1	5,05	1148	22,1
P19	6,4	1010	23,4	7,30	1559	22,4	6,40	1690	19,2	6,40	1735	16,8	6,15	1633	17,0	5,95	1633	17,0	6,75	1633	19,8
P20	6,6	1778	25,2	4,20	3,4	24,0	6,40	3,46	21,7	6,20	3,08	18,6	6,00	2,84	18,0	5,80	2,84	18,0	6,3	2,84	21,30
P21	5,65	4,57	24,7	6,38	5,09	23,2	6,40	6,05	19,8	6,85	5,49	20,3	6,50	5,3	18,1	6,30	5,3	18,1	8,6	5,33	24,2

ANNEXE 2.1 : Les essais de pompage

ESSAI N°01

Nom Puits: MANSSOURI	Coordonnées	Y 30° 7'14.51"N
NS/Sol = 5.84 m		X 2°10'30.85"O
Débit :0.34 l/s		Z= 459
Date: 06/05/2016		

Descente				Remontée			
	t(m)	ND(m)	S(m)	Date	t(m)	ND(m)	S(m)
	0	5.84	0.05		0	6.03	0.19
	0.3	5.89	0.11		0.3	6.02	0.18
	1	5.94	0.15		1	5.99	0.16
	1.3	5.99	0.16		1.3	5.97	0.13
	2	6	0.17		2	5.96	0.12
	2.3	6.01	0.18		2.3	6.91	0.07
	3	6.02	0.19		3	5.89	0.05
	3.3	6.03	0.2		3.3	5.89	0.05
	4	6.04	0.21		4	5.88	0.04
	4.3	6.05	0.23		4.3	5.88	0.04
	5	6.07	0.25		5	5.87	0.03
	6	6.09	0.27		6	5.87	0.03
	7	6.11	0.29		7	5.87	0.03
	8	6.13	0.19		8	5.87	0.03
	9	6.03	0.17		9	5.87	0.03
	10	6.01	0.18		10	5.86	0.02
	12	6.02	0.19		15	5.85	0.01
	14	6.03	0.17		20	5.85	0.01
	16	6.07	0.18		25	5.84	0
	18	6.03	0.19		30	5.84	0
	20	6.03	0.19				
	30	6.03	0.19				
	40	6.03	0.19				
	50	6.03	0.19				

ESSAI N°02

Nom Puits: BEN TAYEB	Coordonnées	Y 30° 7'23.70"N
NS/Sol = 7.80 m		X 2°10'18.40"O
Débit :0.19 l/s		Z 464
Date : 10/05/2016		

Descente			Remontée					
t(m)	ND(m)	S(m)	t(m)	ND(m)	S(m)	t(m)	ND(m)	S(m)
0	7.80	0	0	9.85	2.05	155	8.3	0.50
0.3	7.73	0.07	0.3	9.85	2.05	160	8.28	0.48
1	7.77	0.03	1	9.82	2.02	165	8.26	0.46
1.3	7.79	0.01	1.3	9.79	1.99	170	8.25	0.45
2	7.81	0.01	2	9.79	1.99	175	8.23	0.43
2.3	7.83	0.03	2.3	9.76	1.96	180	8.22	0.42

3	7.84	0.04	3	9.74	1.94	185	8.20	0.4
3.3	7.85	0.05	3.3	9.72	1.92	190	8.19	0.39
4	7.86	0.06	4	9.7	1.90	195	8.18	0.38
4.3	7.87	0.07	4.3	9.68	1.88	200	8.17	0.37
5	7.88	0.08	5	9.65	1.85	205	8.16	0.36
6	7.89	0.09	6	9.63	1.83	210	8.15	0.35
7	7.9	0.10	7	9.61	1.81	215	8.14	0.34
8	7.95	0.15	8	9.6	1.80	220	8.13	0.33
9	8.00	0.20	9	9.60	1.80	225	8.12	0.32
10	8.04	0.24	10	9.59	1.79	230	8.11	0.31
12	8.11	0.31	12	9.55	1.75	235	8.1	0.30
14	8.13	0.33	14	9.52	1.72	240	8.09	0.29
16	8.17	0.37	16	9.48	1.68	245	8.08	0.28
18	8.21	0.41	18	9.44	1.64	250	8.07	0.27
20	8.25	0.45	20	9.42	1.62	255	8.06	0.26
25	8.33	0.53	25	9.34	1.54	260	8.05	0.25
30	8.43	0.63	30	9.27	1.47	265	8.04	0.24
35	8.53	0.73	35	9.19	1.39	270	8.03	0.23
40	8.62	0.82	40	9.12	1.32	275	8.02	0.22
45	8.72	0.92	45	9.06	1.26	280	8.01	0.21
50	8.80	1.00	50	9	1.20	285	8.00	0.2
55	8.89	1.09	55	8.95	1.15	290	7.99	0.19
60	8.99	1.19	60	8.89	1.09	295	7.98	0.18
70	9.13	1.33	65	8.83	1.03	300	7.97	0.17
80	9.27	1.47	70	8.78	0.98	305	7.96	0.16
90	9.34	1.54	75	8.74	0.94	310	7.95	0.15
100	9.39	1.59	80	8.7	0.90	315	7.94	0.14
110	9.43	1.63	85	8.66	0.86	320	7.93	0.13
120	9.47	1.67	90	8.62	0.82	325	7.92	0.12
135	9.52	1.72	95	8.6	0.80	330	7.91	0.11
150	9.58	1.78	100	8.57	0.77	335	7.89	0.09
165	9.62	1.82	105	8.54	0.74	340	7.88	0.08
180	9.68	1.88	110	8.5	0.70	345	7.87	0.07
200	9.71	1.91	115	8.48	0.68	350	7.86	0.06
220	9.74	1.94	120	8.46	0.66	355	7.85	0.05
240	9.76	1.96	125	8.43	0.63	360	7.84	0.04
270	9.80	2.00	130	8.4	0.60	365	7.83	0.03
300	9.85	2.05	135	8.38	0.58	370	7.82	0.02
330	9.85	2.05	140	8.36	0.56	375	7.81	0.01
			145	8.34	0.54	380	7.80	0
			150	8.32	0.52			

Suite ANNEXE 2.1 : ESSAI N° 03

**Nom Puits:
BOUSSOURI**

Coordonn
ées

Y 30° 7'18.26"N

NS/Sol = 9.15 m			X 2°10'14.45"O					
Débit : 0.21 l/s			Z 466					
Date ; 13/05/2018								
Descente				Remontée				
t(m)	ND(m)	S(m)	t(m)	ND(m)	S(m)	t(m)	ND(m)	S(m)
0	9.15	0	0	10.21	1.06	150	9.77	0.62
0.3	9.18	0.03	0.3	10.20	1.05	160	9.75	0.60
1	9.21	0.06	1	10.19	1.04	170	9.73	0.58
1.3	9.23	0.08	2	10.19	1.04	180	9.71	0.56
2	9.25	0.10	3	10.18	1.03	190	9.69	0.54
2.3	9.27	0.12	4	10.18	1.03	200	9.67	0.52
3	9.29	0.14	6	10.17	1.02	210	9.65	0.50
3.3	9.32	0.17	8	10.16	1.01	220	9.63	0.48
4	9.34	0.19	10	10.15	1.00	230	9.61	0.46
4.3	9.37	0.22	12	10.14	0.99	240	9.59	0.44
5	9.39	0.24	14	10.13	0.98	250	9.57	0.42
6	9.44	0.29	16	10.125	0.98	260	9.55	0.40
7	9.48	0.33	18	10.12	0.97	270	9.52	0.37
8	9.52	0.37	20	10.11	0.96	280	9.50	0.35
9	9.57	0.42	25	10.09	0.94	290	9.48	0.33
10	9.61	0.46	30	10.08	0.93	300	9.46	0.31
12	9.7	0.55	35	10.06	0.91	310	9.44	0.29
14	9.78	0.63	40	10.04	0.89	320	9.42	0.27
16	9.87	0.72	45	10.03	0.88	330	9.39	0.24
18	9.95	0.80	50	10.01	0.86	340	9.37	0.22
20	10.02	0.87	55	9.99	0.84	350	9.35	0.20
22	10.1	0.95	60	9.98	0.83	360	9.33	0.18
24	10.18	1.03	65	9.97	0.82	370	9.31	0.16
25.1	10.21	1.06	70	9.96	0.81	380	9.29	0.14
			80	9.93	0.78	390	9.27	0.12
			90	9.9	0.75	400	9.25	0.10
			100	9.87	0.72	410	9.23	0.37
			110	9.85	0.70	420	9.21	0.36
			120	9.83	0.68	430	9.19	0.35
			130	9.81	0.66	440	9.17	0.34
			140	9.79	0.64	450	9.15	0.00

Suite ANNEXE 2.1 : ESSAI N° 04

Nom Puits: BEN AISSA	Y 30° 7'28.30"N
NS/Sol = m	X 2°10'29.12"O
Débit : l/s	Z= 460
Date :	

descente		Remonté	
t (s)	Rabattement (m)		
90	0	t' (s)	Rabattement
120	0.04	158	1.33
150	0.05	78.5	1.33
180	0.06	53.3	1.31
210	0.08	40.2	1.24
270	0.14	32.4	1.29
330	0.14	27.2	1.31
390	0.13	23.4	1.32
450	0.18	20.6	1.27
510	0.2	18.4	1.27
570	0.27	16.7	1.26
630	0.27	15.3	1.27
690	0.29	14.1	1.23
750	0.33	12.2	1.22
810	0.37	10.8	1.2
930	0.41	9.7	1.21
t (s)	0.45	8.8	1.17
1050	0.5	8.1	1.17
1170	0.55	7.5	1.15
1290	0.59	7	1.14
1410	0.63	6.6	1.09
1530	0.66	6.2	1.1
1650	0.72	5.6	1.08
1770	0.74	5.1	1.04
1890	0.8	4.7	1.01
2010	0.89	4.4	1
2310	1		
2610	1.017		
2910	1.14		
3210	1.31		
3510	1.39		
4110	1.62		
4710			

ANNEXE3.1: mesure des résistivités des sondages électrique vertical sev

Sondage électrique vertical A1

X: 571739:

Y: 3319418

X: 540m

AB/2	MN/2	ρ ($\Omega.M$)
1	0,25	187
2	0,25	471.7
3	0,25	691.2
3	0,5	181.5
5	0,5	381.2
7	0,5	444.2
10	0,5	470.1
15	0,5	502
15	2,5	302.2
20	2,5	346.3
30	2,5	386.9
40	2,5	401.5
50	2,5	418.3
50	10	281.6
75	10	324.5
100	10	199
150	10	144.2
200	10	94
200	40	117.6
300	40	131.8
400	40	155.5
500	40	185.3
500	100	79.1
750	100	36.4
1000	100	21.7

Sondage électrique vertical A2

X: 569 743

Y: 3 319

413

Z: 553m

AB/2	MN/2	ρ ($\Omega.M$)
1	0,25	107.3
2	0,25	138.3
3	0,25	162.9
3	0,5	200.7
5	0,5	210
7	0,5	214.4
10	0,5	222.8
15	0,5	357.9
15	2,5	261.1
20	2,5	311.7
30	2,5	335.8
40	2,5	395.5
50	2,5	291.4
50	10	288.4
75	10	321.1
100	10	374.4
150	10	221.6
200	10	156.6
200	40	162.8
300	40	114.5
400	40	74.6
500	40	58.5
500	100	52.7
750	100	28.6
1000	100	21.7

Sondage électrique vertical A3 :

X: 569743

Y: 3321413

Z: 540 m

AB/2	MN/2	ρ (Ω .M)
1	0,25	81,4
2	0,25	148,2
3	0,25	179,8
3	0,5	198
5	0,5	210
7	0,5	214,4
10	0,5	216,2
15	0,5	172,2
15	2,5	178,6
20	2,5	198,9
30	2,5	232,5
40	2,5	243,3
50	2,5	366,6
50	10	342,3
75	10	302,8
100	10	264,3
150	10	165,3
200	10	131,6
200	40	134,2
300	40	142,3
400	40	155,5
500	40	165,8
500	100	188,5
750	100	69,4
1000	100	34,2

Sondage électrique vertical A4 :

X: 571 739

Y: 3320418

Z: 525 m

AB/2	MN/2	ρ (Ω .M)
1	0,25	259,6
2	0,25	209,9
3	0,25	162,9
3	0,5	214,5
5	0,5	314
7	0,5	314
10	0,5	376
15	0,5	225,9
15	2,5	247,3
20	2,5	296,8
30	2,5	320,6
40	2,5	364,5
50	2,5	269,5
50	10	377
75	10	353,2
100	10	326,5
150	10	235,7
200	10	137,8
200	40	108,5
300	40	135,3
400	40	192,8
500	40	87,7
500	100	94,2
750	100	55,5
1000	100	29,5

Sondage électrique vertical B2 :**Sondage électrique vertical Gassi**

EI Massha :

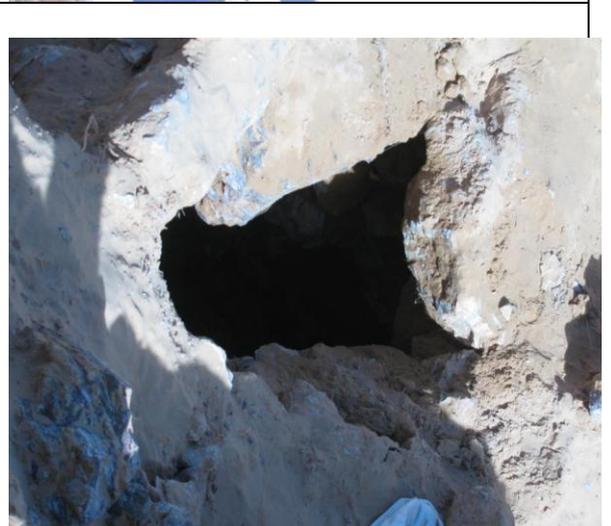
X: 560545
Y: 3325225
Z: 546

X: 640336
Y: 3348613
Z: 560

AB/2	MN	ρ (Ω .M)		AB/2	MN	ρ (Ω .M)
1	0.5	97.9		1	0.5	497.3
2	0.5	187.7		2	0.5	249.6
3	0.5	1185.8		3	0.5	190
3	1	198		5	1	193.7
5	1	1353.7		7	1	238.9
7	1	1623.9		10	1	244.4
10	1	1817.7		15	5	368.5
15	5	144.7		20	5	445.3
15	5	151.1		30	5	477.9
20	5	154.8		40	5	479
30	20	161.1		50	5	530
40	20	164.2		75	20	430
50	20	134.7		100	20	330
50	20	167.7		150	20	265.3
75	20	196.1		200	80	198.7
100	20	234.8		300	80	142.3
150	20	165.3		400	80	126.5
200	10	119		500	200	117.8
200	80	107		750	200	69.4
400	80	118.1		1000	200	44.2
500	80	89.7				
500	200	94.2				
750	200	52.9				
1000	200	26.4				

Tableau : Echelle des résistivité

Formation	Résistivités en ohm m
Quaternaire récent	100 - 300
calcaires	> 350
Grès	100 à 270
Grès argileux	36 à 80
Argiles	6 à 18



SERIE PHOTO GRANDE SOURCE:

Exutoire naturel de la grande source Béni- Abbès, l'eau sorte a partir de la dalle calcaire solidifier d'une fissure horizontale d'une longueur de 70 cm et un joint (ouverture) moins de 1 mm. débit mesuré par un jaugeage = 28,87 l/s



Hassi Fedj Bounouara



HASSI LFOKRA



Hassi JDIDA



Hassi lhomor



HASSI KOTB LMAA



HASSI IBONI EQUIPE D'UN PANAEAU SOLAIRE

SERIE PHOTO :Mission dans le grand erg occidental Février mars 2016



Zone d'accumulation des eaux superficielles et infiltration des eaux pour alimenter la nappe de l'erg
 RAOUi- Novembre 2014
Mission Ougarta avril 2014



Crue d'oued Saoura october 2016



Crue d'oued Saoura Novembre 2014
 Débit 1012 m³/s crue centenal



Photo n°05 : l'oued Saoura en crue (avril 2015)

SERIE PHOTOS D'OUED SAOURA EN CRUE



Hassi Ain Dhob 02



Hassi Ain Dhob 01



Ain dhob



Sebket Mellah MARS 2015



Sebket Mellah MARS 2015



SERIE DES PHOTOS DANS LA CHAINE D'OUGRTA MARS 2016



puits d'une foggara dans la palmeraie



Foggara de Benamour



puits salé (P03) dans la palmeraie



un puits dans la palmeraie (P14)

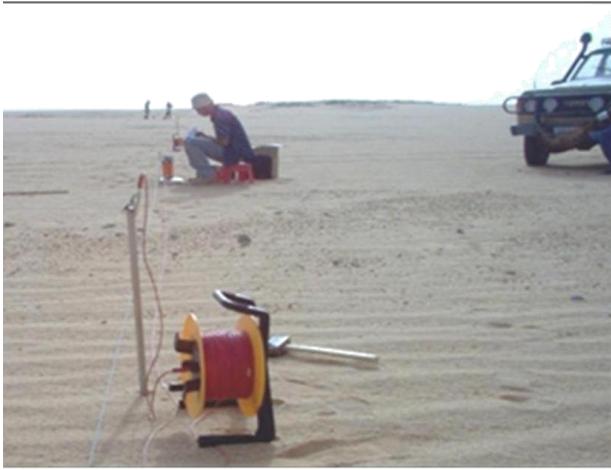


falaise du talus hamadien (Torba)
-ETUDE DE LA FRACTURATION-



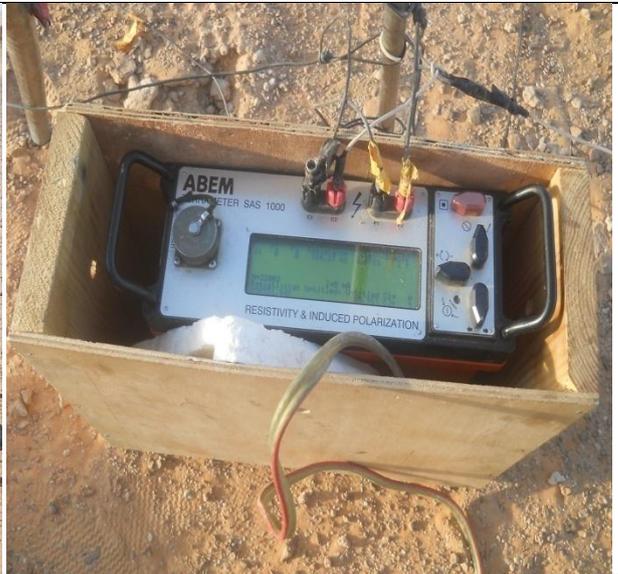
fissuration dans les calcaires et Torba du talus hamadien

SERIE PHOTOS DANS LA PALMERAIE CENTRALE BENI ABBES



Gassi el masha

Tariat de hassi fokra



**SERIE PHOTOGRAPHIQUE DES MISSION DE GEOPHYSIQUE DANS LE GRAN ERG OCCIDENTAL ET
HAMADA DE GUIR 2014-2016**