



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

MEMOIRE DE MAGISTER

Option :

Ressources en eau dans leur environnement

Présenté par

Touhami MERZOUGUI

**CARACTERISATION HYDROGEOLOGIQUE ET MODELISATION D'UN
AQUIFERE ALLUVIAL EN ZONE HYPER ARIDE : CAS DE LA NAPPE
DE LA PALMERAIE DE BENI ABBES
(VALLEE DE LA SAOURA, SUD OUEST ALGERIEN).**

Soutenu le 01/12/ 2011 devant le jury composé de :

Mr BENSALAH Mustapha	Professeur à l'Université de Tlemcen	Président
Mr BOUANANI Abderzzak	Maître de conférences (A) à l'Université de Tlemcen	Rapporteur
Mme Fouzia ADJIM	Maître de conférences (A) à l'Université de Tlemcen	Examineur
Melle Mebrouk Naima	Maître de conférences (A) à l'Université d'Oran	Examineur
Mme BABA-HAMED Kamila	Maître de conférences (B) à l'Université de Tlemcen	Invitée



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

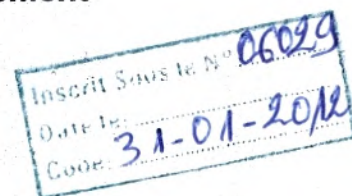
MEMOIRE DE MAGISTER

Option :

Ressources en eau dans leur environnement

Présenté par

Touhami MERZOUGUI



**CARACTERISATION HYDROGEOLOGIQUE ET MODELISATION D'UN
AQUIFERE ALLUVIAL EN ZONE HYPER ARIDE : CAS DE LA NAPPE
DE LA PALMERAIE DE BENI ABBES
(VALLEE DE LA SAOURA, SUD OUEST ALGERIEN).**

Soutenu le 01/12/ 2011 devant le jury composé de :

Mr BENSALAH Mustapha	Professeur à l'Université de Tlemcen	Président
Mr BOUANANI Abderzzak	Maître de conférences (A) à l'Université de Tlemcen	Rapporteur
Mme Fouzia ADJIM	Maître de conférences (A) à l'Université de Tlemcen	Examineur
Melle Mebrouk Naima	Maître de conférences (A) à l'Université d'Oran	Examineur
Mme BABA-HAMED Kamila	Maître de conférences (B) à l'Université de Tlemcen	Invitée



﴿ (67) أَفَرَأَيْتُمُ الْمَاءَ الَّذِي تَشْرَبُونَ (68) أَأَنْتُمْ أَنْزَلْتُمُوهُ مِنَ السَّمَاءِ أَمْ نَحْنُ الْمُنزِلُونَ (69) ﴿
لَوْ نَشَاءُ جَعَلْنَاهُ أَجْحًا فَلَوْلَا تَشْكُرُونَ (70) ﴿
- صدق الله العظيم -

Dédicaces

Au Nom d'ALLAH tout puissant, qui nous a éclairé les chemins du savoir et de la Sagesse, je dédie ce travail;

*A tous ceux que je porte dans mon coeur
Je dédie ce mémoire;*

*A ceux qui nous réserve tout le temps, la tendresse, l'amour
et l'affection, mes chères mères*

*A mes très chers parents toujours présents à me donner un magnifique modèle de
labour et de persévérance;*

A mes sœurs et frères, pour leur soutien et encouragements ;

A tous mes amis et collègues avec amour et attention durant toute notre existence

A mes familles : Merzougui, Bouhadda, Kadouri et Mahboubi;

Enfin, à tous ceux qui m'ont aidé à réaliser ce mémoire.

TOUHAMI

«La théorie, c'est quand on sait tout et que rien ne fonctionne. La pratique, c'est quand tout fonctionne et que personne ne sait pourquoi. Ici, nous avons réuni théorie et pratique : Rien ne fonctionne... et personne ne sait pourquoi !»

[Albert Einstein]

AVANT-PROPOS

A l'issue de ce travail, je tiens à exprimer ma gratitude aux nombreuses personnes qui ont contribué à son élaboration d'une manière directe ou indirecte. Que ceux que j'aurais pu oublié m'en excusent.

Les membres du jury de leur intérêt manifesté à cette étude et d'avoir accepté de bien vouloir la juger.

Je tiens d'abord a remercier Monsieur **BOUANANI Abderrzzak** Maître de conférences à l'université de Tlemcen qui, après avoir accepté d'encadrer ce travail, m'a donné un goût spécial à l'hydrogéologie, il m'a laissé bien souvent gérer mon travail tout en apportant les critiques et conseils nécessaires lors de son élaboration. Je le remercie vivement pour l'intérêt qu'il a apporté à ce travail, pour ses précieux conseils, sa disponibilité et sa sympathie.

Mes vifs remerciements et mes respects les plus distingués vont à Monsieur le Professeur **BENSALAH Mustapha**, Doyen de la Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie et des Sciences de la Terre et de l'univers et Directeur du laboratoire 25(LRHMP) à l'université de Tlemcen, pour avoir accepté de juger ce travail et de me faire l'honneur de présider mon jury de mémoire, malgré ses importantes responsabilités.

J'adresse mes sincères remerciements et ma profonde reconnaissance à Mme Fouzia ADJIM, Maître de conférences « Classe A » à l'université de Tlemcen et M^{elle} **Mebrouk Naima**, Maître de conférences « Classe A » à l'université d'Oran qui ont bien voulu examiner ce travail et faire partie du jury de ce mémoire.

Mes sincères remerciements à **Mme Kamila Baba-Hamed** Maître de conférences "Classe B" à l'Université de Tlemcen de m'avoir 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; Je la remercie également d'avoir bien voulu juger ce travail et de faire partie du Jury de mon mémoire.

J'exprime mes vifs remerciements à M. MEKKAOUI Adderhmane qui est toujours disponible pour me faire profiter de ses connaissances et son expérience en géologie de la région sud Ouest du Sahara algérien et pour les bons moments que nous avons passé ensemble soit sur le terrain soit au bureau, je lui exprime ma profonde reconnaissance.

Je suis très reconnaissant à Monsieur KABOUR Salim, Maître assistant (A) à l'université

La saison commence au mois de Septembre/Octobre avec la préparation de carrés pour faire la pépinière en Novembre/Décembre. La transplantation de la pépinière au carre s'effectue en Janvier. La récolte commence en Avril/Mai (avec arrosage il y a une seconde récolte pour certains maraîchers jusqu'en Août). Comme la récolte se fait selon les besoins quotidiens et non pour le marché, elle est permanente.

Pour toutes les cultures il y a presque 100% d'autoconsommation.

Les nappes des terrasses sont sérieusement polluées par la salinité, présentant 70 % du volume d'eau avec des risques d'en augmenter. Par sa position géographique, les précipitations atmosphériques à Béni Abbès sont faibles et couplées à une forte évaporation (2153 mm/an)(Mékideche et al, 1995).,

A ces contraintes se conjuguent un comportement de gaspillage au niveau de la population, un disfonctionnement du réseau d'AEP, et une distribution inadéquate d'eau d'irrigation. L'ensemble des ces contraintes sont synthétisées dans le schéma ci-dessous (fig. 4).

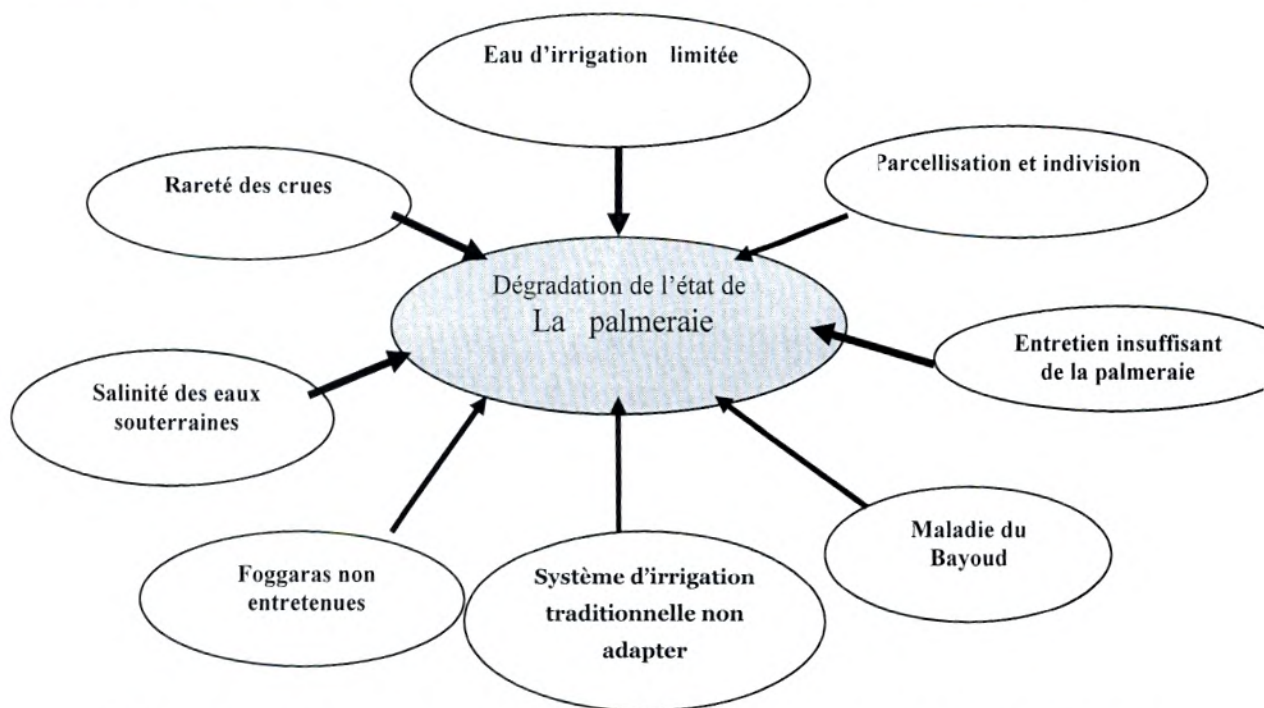


Figure.4:Synthèse des contraintes de développement agricole dans la palmeraie de Béni Abbès.

En passant à l'optimisation et la valorisation des eaux au niveau de la palmeraie source, système de foggaras), en outre en valorisant l'eau de la séguia principale, on e rénovation de leurs parcelles en rétablissant le système de production oasisien (Palmier cultures annuelles et petit élevage).

Avant la colonisation

Les tribus autochtones ont construit au cœur de la palmeraie une forteresse qu'on appelle le ksar. L'eau était ramenée discrètement vers ce ksar à partir de la grande source de "Sidi Othmane" par l'intermédiaire d'une « Seguia ». Le débit de la source était acheminé en entier vers le Ksar et partagé entre les tribus selon une convention admise en fonction de l'apport de chaque tribu lors des travaux de captage et canalisation qui ont eu lieu. Dès alors, l'eau de la grande source est devenue un patrimoine protégé.

Période de 1900 – 1962

Après la période coloniale, le vieux ksar ne pouvait guère satisfaire les besoins de la vie moderne, les français ont construit le centre de recherche et quelques habitations sur le bord de la palmeraie. Cette action a été suivie d'une déviation du 1/3 du débit global de la source et le reste du débit était conservé à la palmeraie et au vieux Ksar. Cette situation demeurait applicable jusqu'au 1980.

Période de 1980 à ce jour

À partir de cette année, après une concertation entre les chefs des tribus et la mairie, il a été décidé de réserver à la ville 2/3 du débit global de la source et 1/3 pour la palmeraie.

Actuellement (2010) la commune de Béni Abbès a décidé de réserver totalement les eaux de la grande source pour l'alimentation en potable.

Conclusion

En résumé, les contraintes majeures du développement urbain et agricole de l'oasis de Béni Abbès, sont étroitement liées aux ressources en eau limitées. La construction du barrage de Djorf Torba sur la cour de l'oued Guir a engendré une diminution des apports hydriques de la Saoura.

forment l'ossature de la chaîne. Le Silurien est argileux, le Dévonien et le Carbonifère tendre ne sont conservés que dans les structures synclinales.

Le Figure.7 synthétise la géologie et la lithostratigraphie du Paléozoïque.

2.1.2.1 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.

2.1.2.2 Ordovicien (1150-1250m) ; se compose de cinq formations:

- Formation de Foum 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 Foum Ez Zeidya (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 Djebel Serraf (10-200m) ; est argilo conglomératique.

2.1.2.3 Silurien (1000-1250m) : connu sous le nom de formation d'Oued Ali, représentée par des schistes noirs armés de bancs calcaires.

2.1.2.4 Dévonien (1700-2000 m) : subdivisé en six formations

- Formation de Zmeilet argilo-silteuse ;

- Formation de Saheb El Djir argileuse ;

- Formation de Dkhissa argilo-gréseuse dans sa partie inférieure et gréseuse dans sa partie supérieure ;

- Formation de l'Oued Tiferguenit argilo-gréseuse ;

- Formation de Chefar El Ahmar représentée par des calcaires ;

- Formation de Merhouma; argilo gréseuse ;

2.1.2.5 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 grés, des argiles et des calcaires rougeâtres à Goniatices. Ces affleurements sont connus sous le nom de la formation de Ouarourout.

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

2.1.3 Le Crétacé

Il est connu dans la partie nord ouest de la chaîne, au niveau de Tadaout El- Beghile, qui est une partie de Kem Kem, il s'agit de grès, d'argile et de calcaire, cumulant une épaisseur de 40m.

2.1.4 Le Cénozoïque

Il forme les dépôts de la Hamada du Guir (40 à 50 m), 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).

2.1.5 Le Quaternaire

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

2.2. Tectonique

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 (Fabre, 1976)

Toutefois on esquisse cette tectonique en :

2.2.1 Style souple

Les terrains constituant la chaîne sont organisés selon une succession de plis synclinaux larges et anticlinaux serrés, orientons NW-SE (Menchikoff, 1930)

Les structures sont le résultat de deux phases majeures : la première série est SW-NE ; suivie d'une autre phase N.S (Zaitzev ,1980 et Danzeau, 1974). Ces phases ont donné naissance à :

- l'anticlinorium de Kahal Tabalbala. ;
- l'anticlinorium central d'ougarta ;
- l'anticlinorium de Kerzaz ;

Récemment de nouveaux travaux ont mis en évidence des structures en paliers rampes (Duce et Hervoué, 2006).

2.2.2 Style cassante

Cette catégorie de tectonique se matérialise dans le terrain par des failles normales et inverses. Les failles ont trois principales directions : NW – SE ; NE – SW et E – W, (Mekkaoui, 1998). Les charnières des plis sont fortement fracturées.

Les cartes aéromagnétiques suggèrent deux grandes failles que la chaîne d'Ougarta a pour limite : Au Sud-Ouest, la faille Sud-ougartienne (F.S.O) (Figure.8) ; Au sud-Est, par la faille nord est (Nord-ougartienne: F.N.E), qui la sépare de la plate forme africaine.

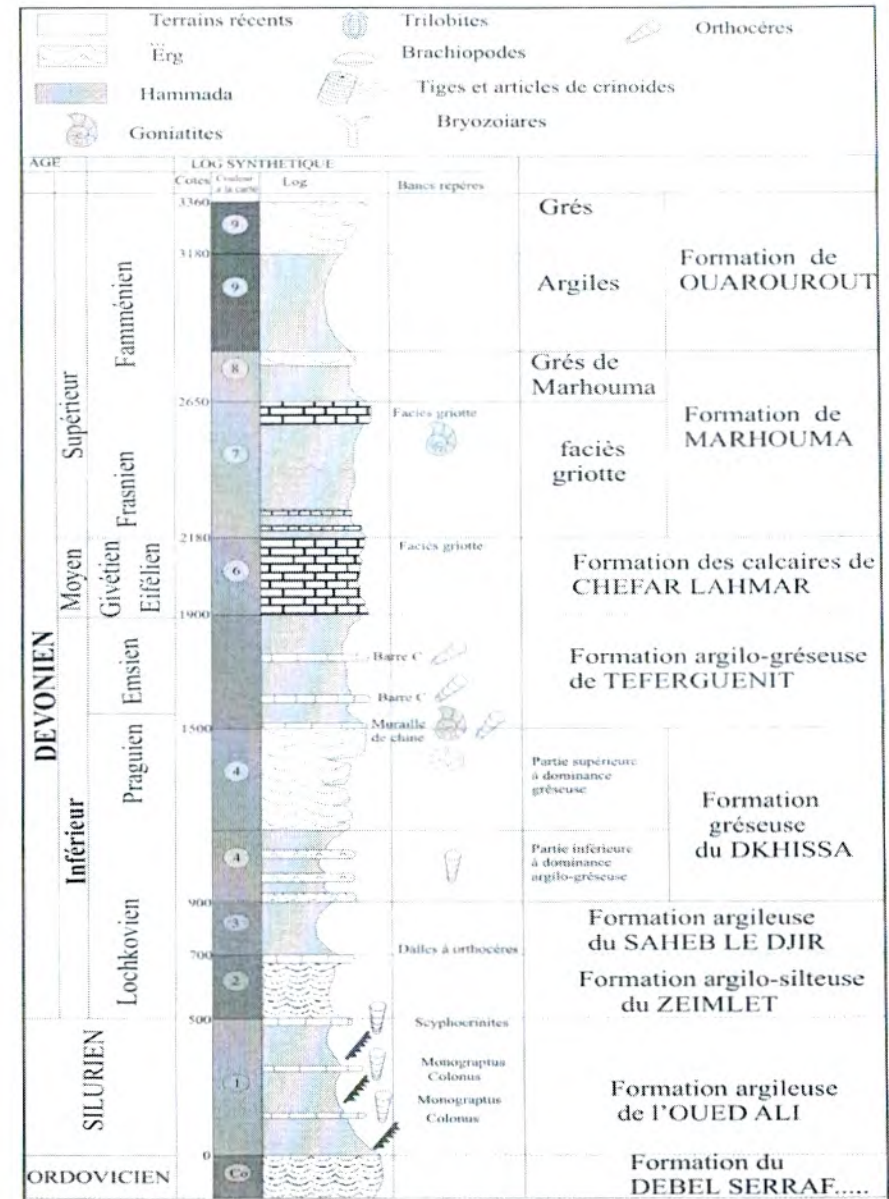
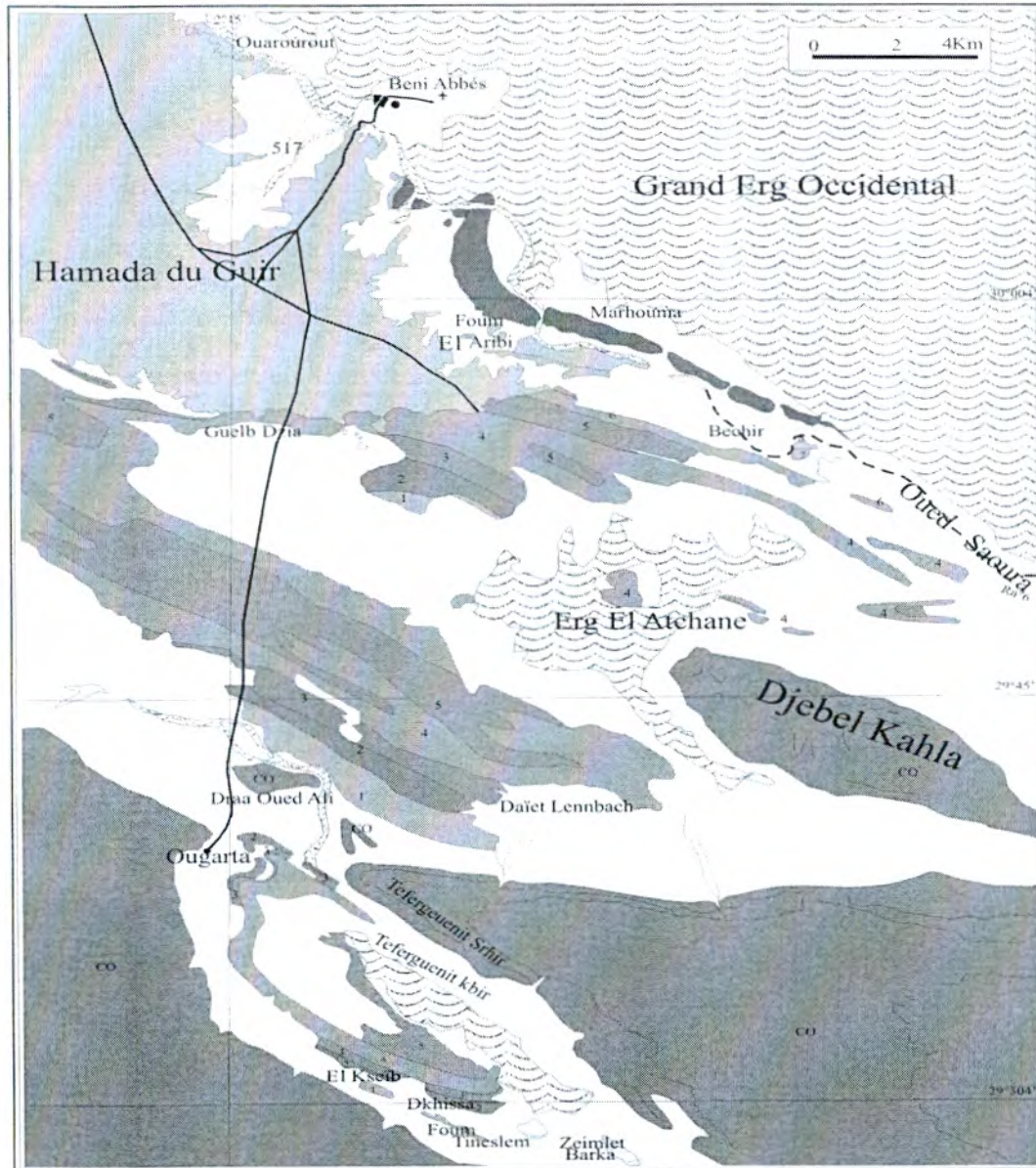


Figure.7 : Carte géologique des monts d'Ougarta « Beni Abbès » (Blès, 1969, modifiée)

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 Sourien. Les deux couches sont formées d'une série d'encroûtement surmontée par des sables fluvio-éoliens avec des passées marneuses, c'est une sédimentation lacustre.

3.3.3 Terrasses supérieures (Holocène ou Guirien)

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. 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.

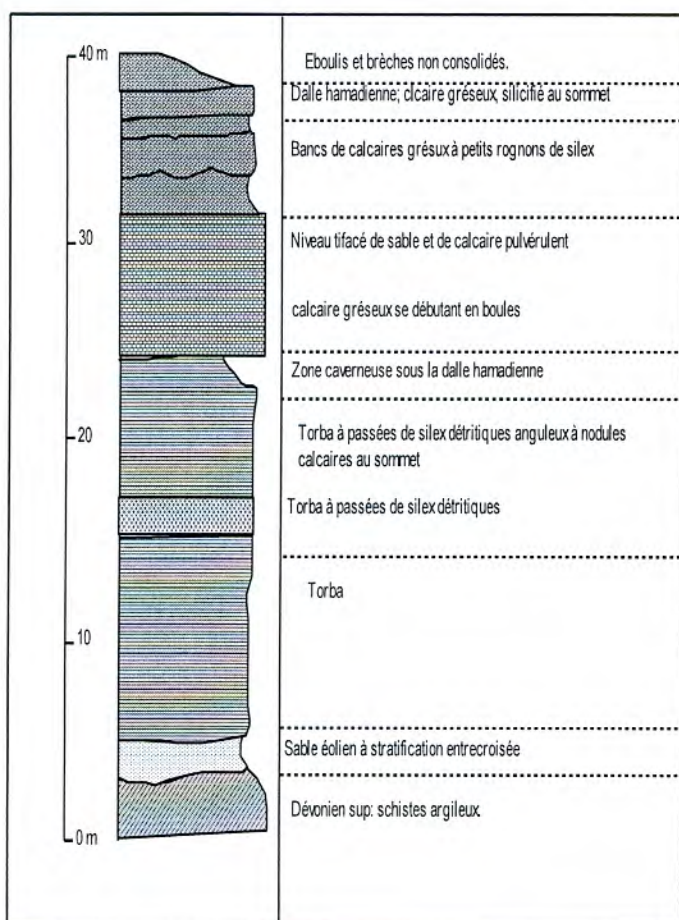


Figure.10 Coupe schématique de Gara Diba (Roche, 1973)

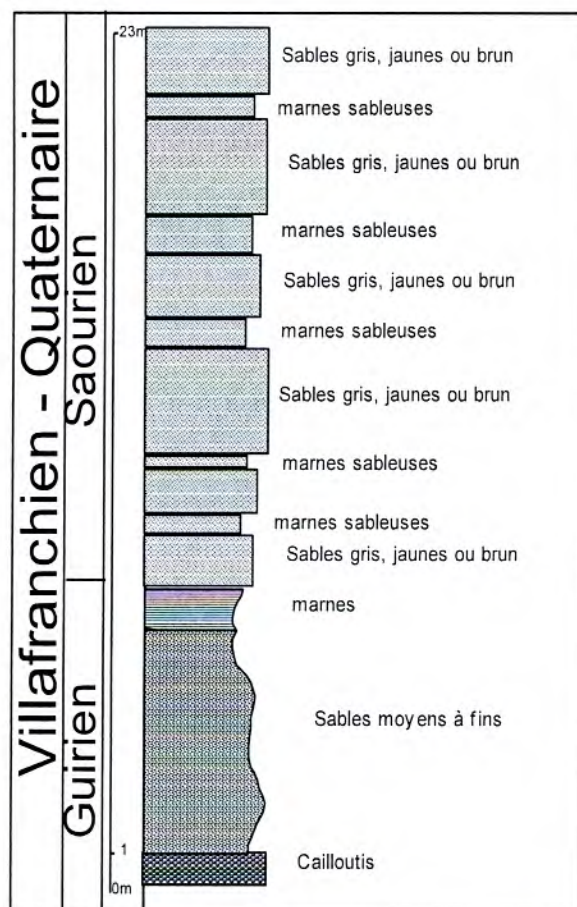


Figure.11 Coupe schématique du Quaternaire (Chavaillon, 1964)

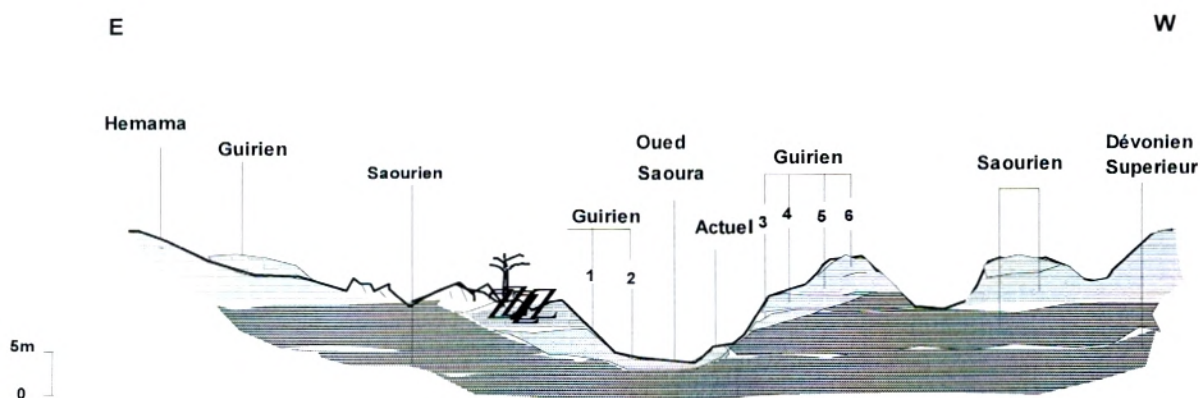


Figure.12-a Coupe à travers la vallée de la Saoura à Hemama, près de Beni Abbés Montrant les terrasses guiriennes (Chavaillon, 1964)

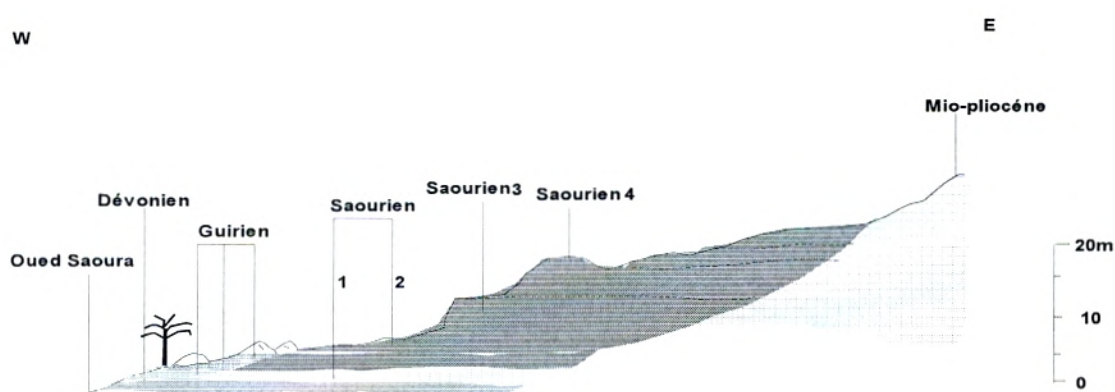


Figure.12-b Coupe à travers la vallée de la Saoura à Hemama, près de Beni Abbés montrant les terrasses saouriennes de la rive gauche (Chavaillon, 1964).

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 sables de la base par remaniement éolien. La mise en place de l'erg occidental ayant débutée au cours de l'aride post- villafranchien.

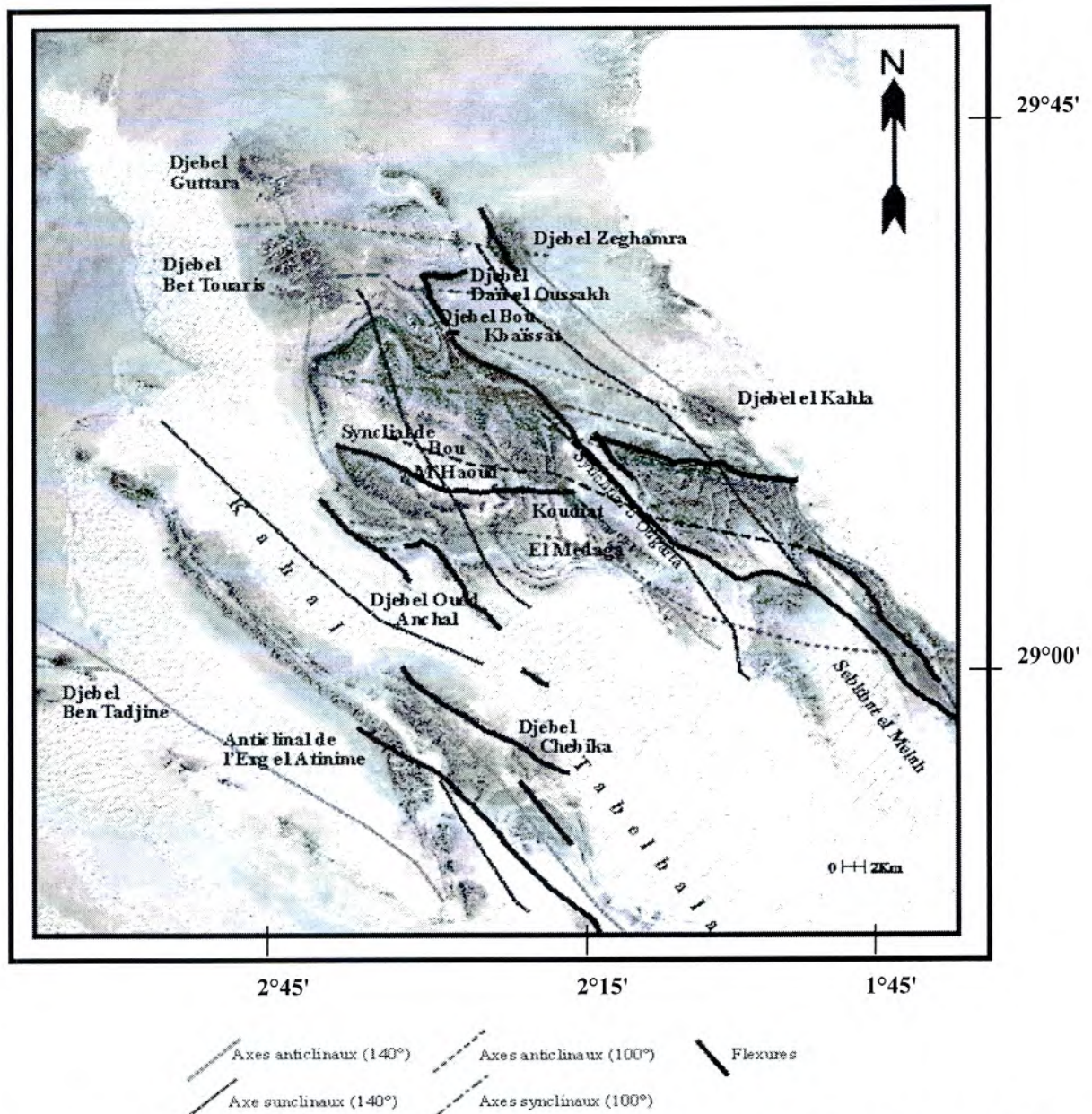


Figure.14 : Schéma des axes des plis et des flexures des synclinaux et anticlinaux des monts de l'Ougarta. (Schéma élaboré à l'aide des travaux de M. Donzeau. 1971&1972)

3.4.3 Les fissures

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 du *Torba*.

3.5 Néotectonique

La néotectonique des formations calcaires du Mio- Pliocène de la Hamada du Guir est dictée par la tectonique ancienne existant, à cet effet, les différentes fracturations et failles favorisent généralement des sources ou Foggaras au niveau de l'Oasis de Béni Abbès, tel le que la grande source. La néotectonique, c'est la réactivation des failles anciennes pendant le Tertiaire (Waisprych.B et al, 1988).

4 Gisement et Condition de réservoir

Les formations présentes aux limites de la palmeraie de Béni Abbès, conditionnent l'existence de plusieurs aquifères et des nappes dans le tableau ci-dessous (Tab.01):

Tableau 1 : schémas de multicouches et les aquifères à Béni Abbès

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

5. Conclusion

La géologie de la région de Béni Abbès est formée essentiellement d'un substrat constitué d'assises paléozoïque allant du Précambrien au Visée. Les calcaires du Mio-Pliocène 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.

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.

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
- ❖ Les aquifères des terrasses alluviales
- ❖ Les aquifères du Paléozoïques, 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 en contact anormal.

De point de vue hydrogéologique en revanche le Tertiaire et la Quaternaire présente de faible épaisseur et par conséquent, leurs potentialités hydriques demeurent limitées.

Chapitre 3

Hydroclimatologie

Introduction

Nous essayons de synchroniser les éléments du bilan d'eau dans le secteur d'étude, en utilisant les données d'une période récente. Les facteurs mesurés (pluviométrie, température) sont indispensables et leur connaissance permet de quantifier la ressource en eau et de déduire la fraction d'eau infiltrée qui conditionne la recharge des nappes souterraines.

1. Hydrographie

Le système hydrographique est constitué de deux importants oueds, le Guire et le Zouzfana, alimentant le cours d'eau de la Saoura

Le bassin de la Saoura, fait partie du grand bassin versant du Sahara. Il est situé au Sud Ouest du territoire algérien et occupe une superficie de l'ordre 100 000 Km². (fig.15). Le bassin est composé de quatre sous bassins de taille variée. Ils sont drainés par des cours d'eau descendants de l'Atlas Marocain et de l'Atlas saharien et coulent du Nord vers le Sud.

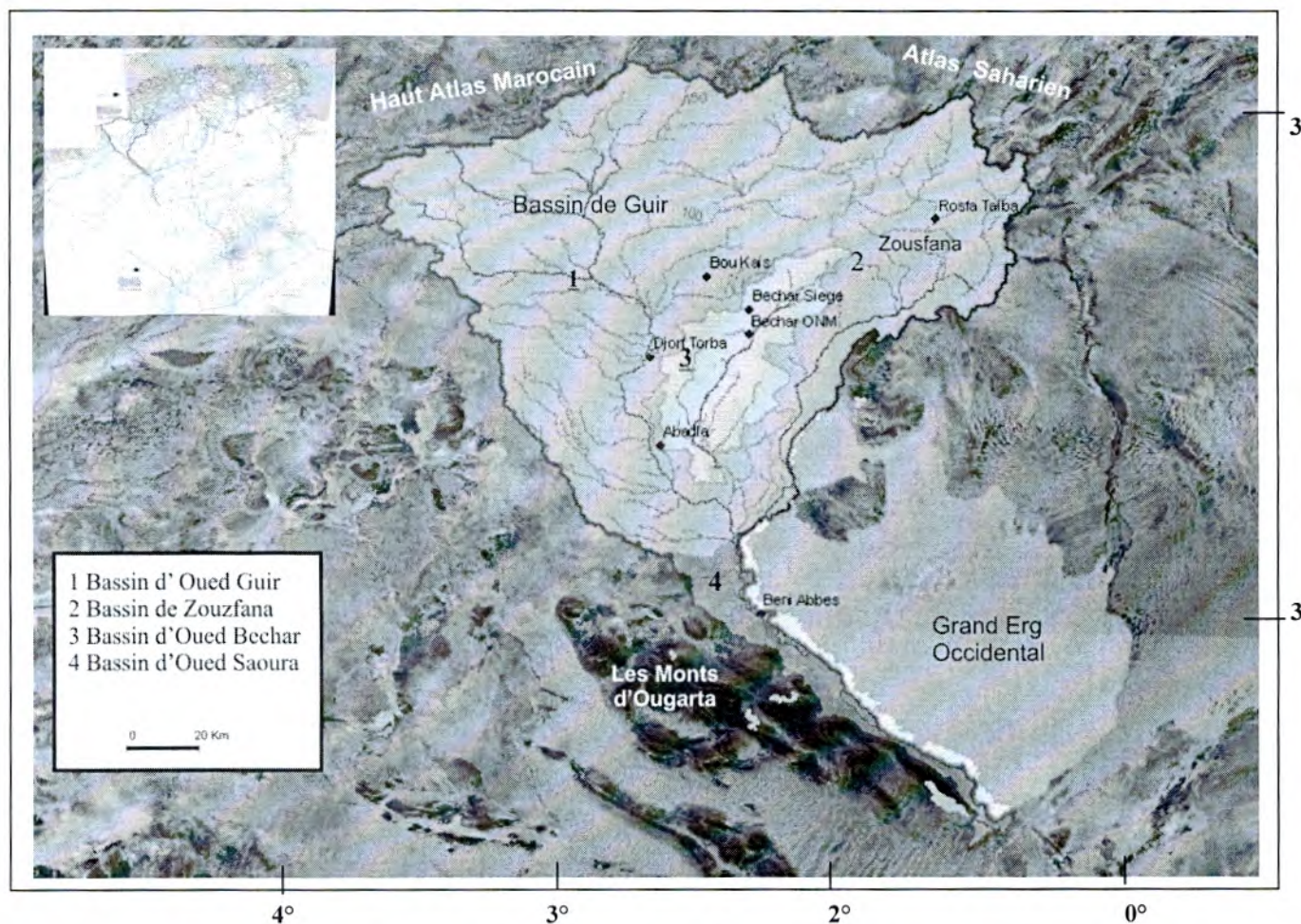


Figure 15 : Situation du bassin versant de la Saoura

1.1 Oued Saoura

L'oued Saoura commence à Igli au confluent du Guir, Bechar et de la Zousfana, descendus respectivement du Haut Atlas Marocain et de l'Atlas Saharien (fig. 16).

Les crues de l'oued Saoura favorisant la présence et le maintient de la qualité des eaux et des sols. Au niveau de Béni Abbès 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 Abbès ou le lit de l'oued devenu plus large terminer dans une cuvette fermée appelée la Sebkha el Mellah, par l'intermédiaire de l'oued Es Souireg qui descend vers le Nord-Ouest à la sortie du Foug el Kheneg.

1.2 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.

1.3 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 16 600 km². L'Oued Zouzfana suit un parcours de 360 Km. Son principal affluent est l'oued Zoubia. A l'aval, le cours d'eau très dégradé fonctionne comme un canal de dérivation.

1.4 Oued Bechar

L'oued Bechar prend sa source vers 1600m d'altitude dans le Djebel Grouz. Il draine une surface de 5800 km² 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 Dait Tior.

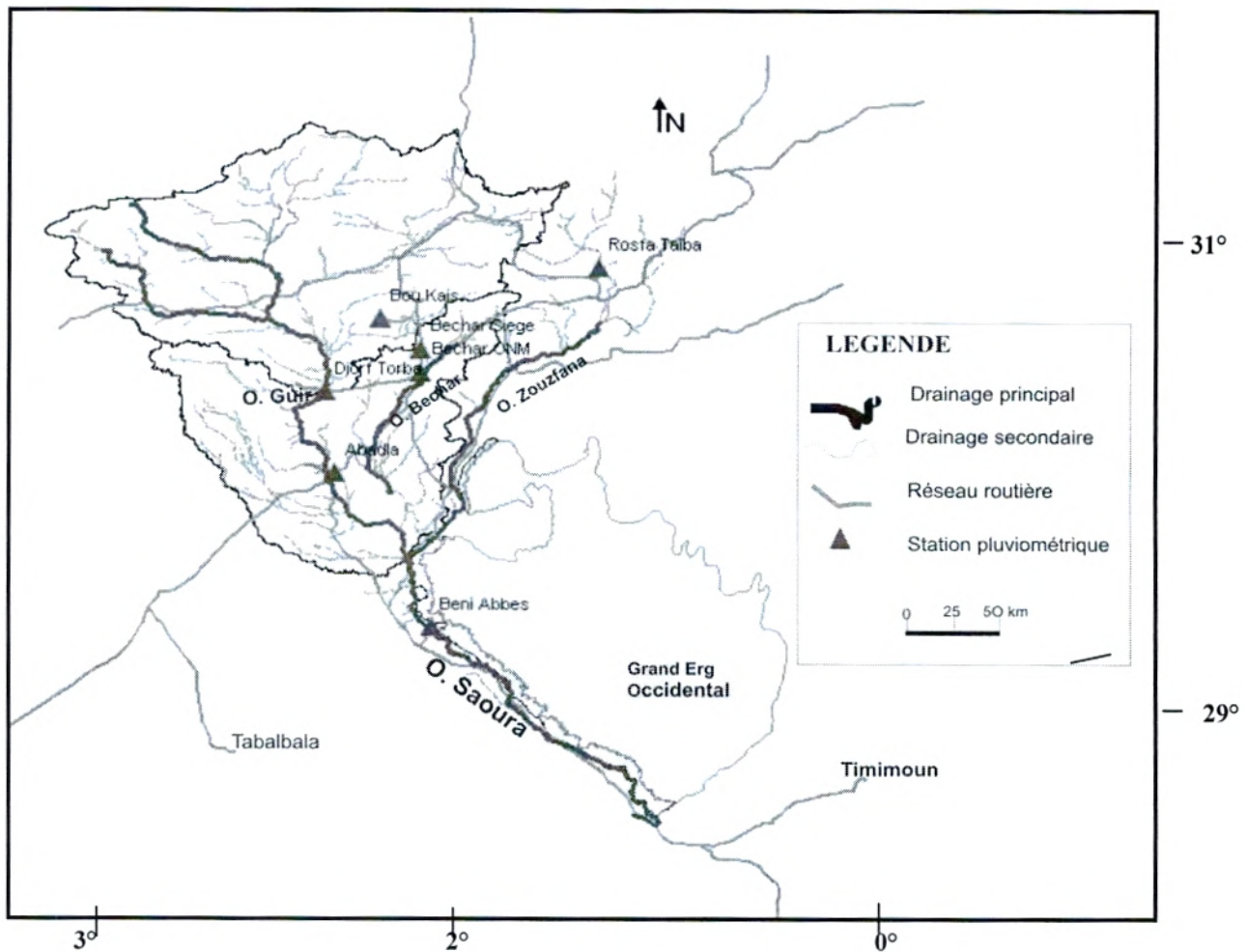


Figure 16 : Réseau hydrographique du bassin versant de la Saoura

2. Climatologie

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.

2.1 Température

Les températures moyennes mensuelles (°C) relevées dans la station de Béni Abbès durant quatre périodes respectives (J.Dubief) 1926-1950, 1961-1990 et (1973-2008) (ANRH) sont données dans le tableau 2.

Tableau 2: Répartition mensuelle des moyennes (°C) de la station de Béni Abbès
Périodes :(1926- 1950), (1961 -1990) et (1973-2008)

Mois	Jav	F	M	A	M	J	Jt	A	S	O	N	D	Moy
1926-1950	11,0	13,5	17,9	22,3	26,5	31,7	34,7	33,9	30,1	23,5	16,6	11,9	22,8
1961-1990	11,2	14,1	17,3	21,5	26,4	31,4	34,9	34,2	27,7	22,6	16,6	11,5	22,5
1973-2009	11,3	14,0	17,6	22,1	26,9	32,0	35,3	34,6	29,3	23,2	16,9	11,9	22,9

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.

2.2 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) dans une surface libre. A la station de Béni Abbès, on dispose des moyennes mensuelles pour la période 1973-2008, (Tab.3)

Tableau 3: Evaporation moyenne mensuelle station de Béni Abbès (1973-2008)

Mois	Ja	F	M	A	M	J	Jt	A	S	O	N	D	Total
Evap (mm)	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.

2.2.1 Le déficit d'écoulement et évapotranspiration

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 28,73mm de déficit d'écoulement (Fig.17)

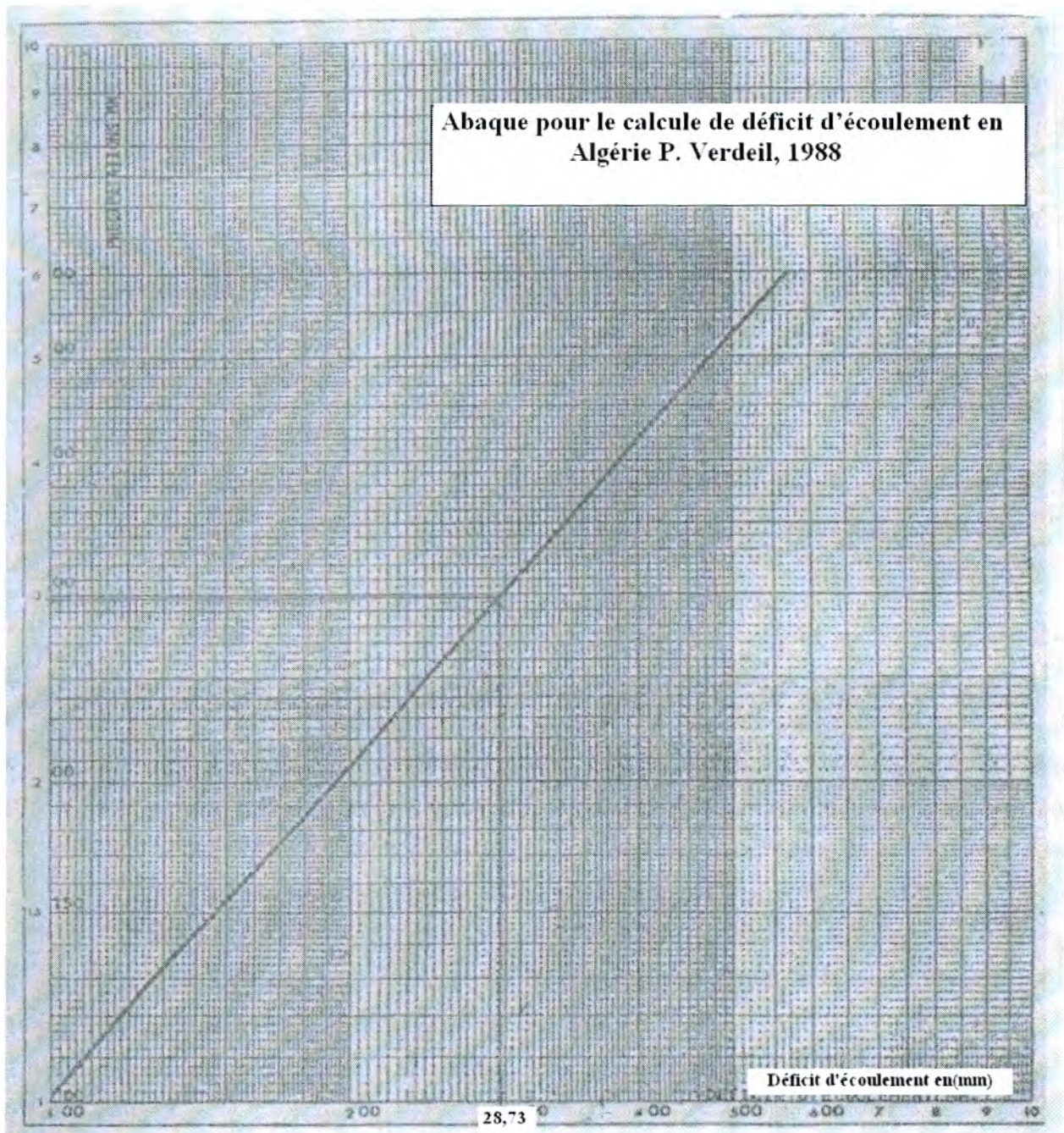


Figure 17 : Le déficit d'écoulement d'après l'Abaque de Verdeil Béni Abbès.

2.3 Pluviométrie

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)(ANRH, 1995) (Fig. 18)

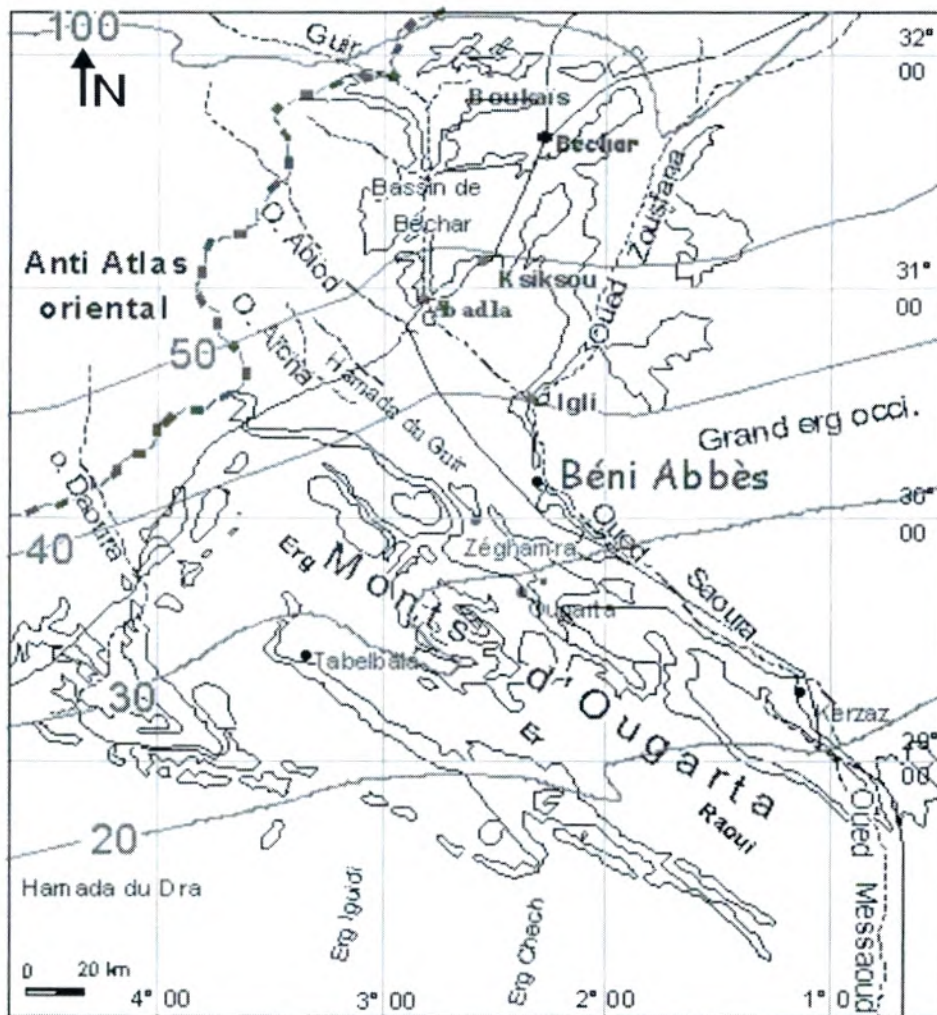


Figure 18 : Carte pluviométrique du Sud Ouest algérien (ANRH, 1995)

2.3.1 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 (1973-2008), sont présenté au (Tab. 04)

Tableau 4: Répartition mensuelle des précipitations (mm) de la station de Béni Abbès (1926-1950) et (1973-2008)

station	Précipitations mensuelles (mm)												P(mm)
	J	F	M	A	M	J	Jt	A	S	O	N	D	
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/A1973-2009	1,45	3,38	1,38	1,51	1,14	0,75	0,38	1,39	3,75	4,98	5,22	4,45	36,78

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. 19). Au mois de Juillet, la pluviométrie est généralement nulle. La moyenne annuelle des précipitations pour la période (1973-2009) est de 37 mm.

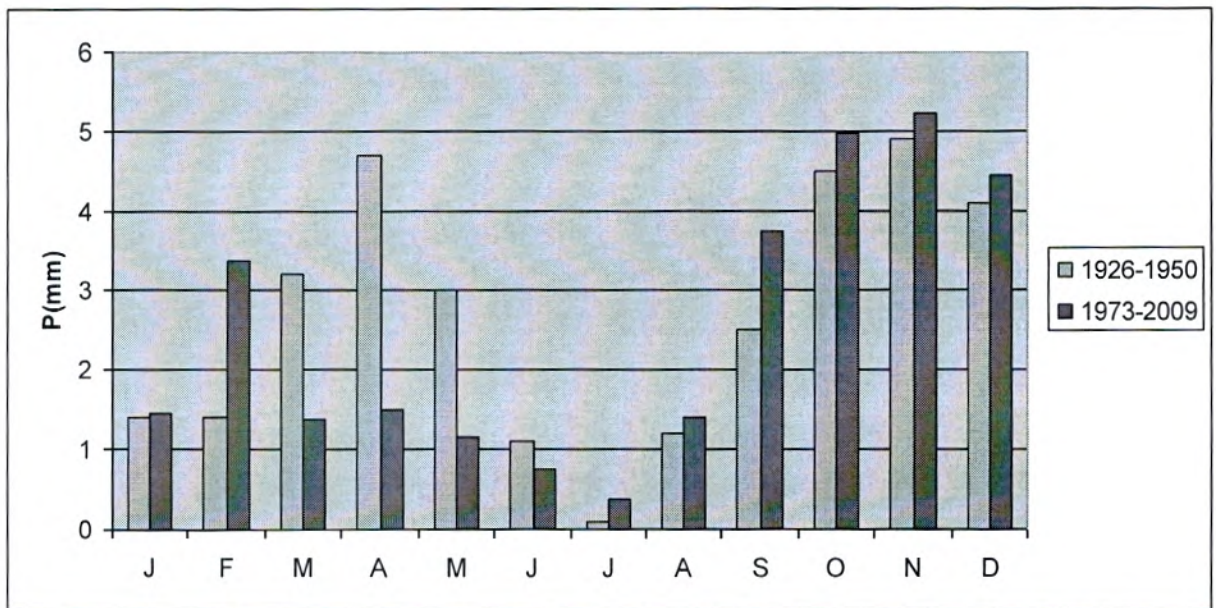


Figure 19 : Histogramme des précipitations mensuelles de la station de Béni Abbès

2.3.2. Précipitation saisonnière (Fig. 20)

Tableau 5 : Répartition saisonnière des précipitations (1973-2008).

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

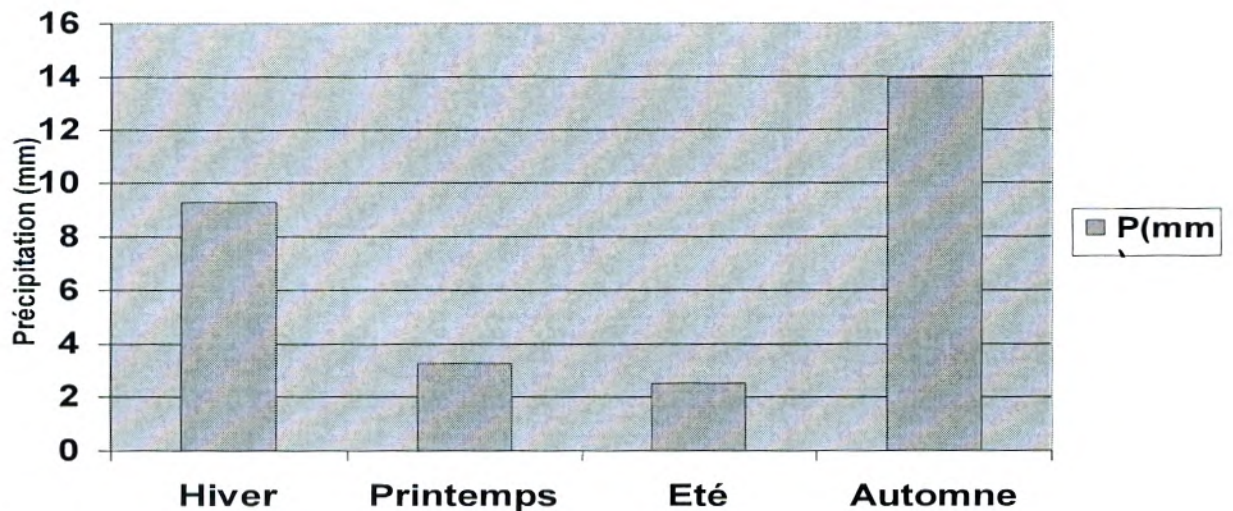


Figure 20 : Répartition des précipitations saisonnières à la station de Béni Abbès(1973-2008).

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. 5) et (fig. 20)

2.3.3 Précipitation annuelle

Pour l'étude des précipitations annuelles nous disposons d'une série relevée sur la période (1909-2008) à la station de Béni Abbès.

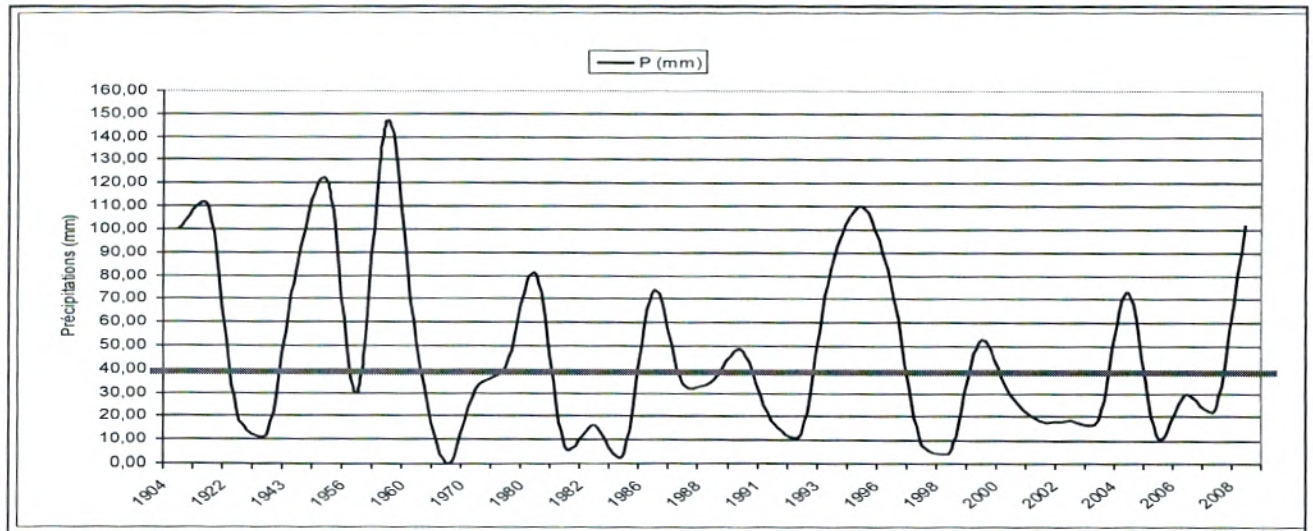


Figure 21 : Répartition des précipitations annuelles (station Béni Abbès, 1904-2008).

La répartition interannuelle des précipitations (fig. 21), est très irrégulière. Ces précipitations varient entre une valeur minimale nulle et une maximale de presque 150 mm pour une moyenne de 40 mm.

* L'étude statistique des précipitations annuelles

Pour l'étude statique des précipitations, pour la station de Béni Abbès. Il ressort que cette station suivre une loi log normal, mais elle s'ajuste mieux avec la loi de Gumbel, ce qui confirme le caractère variable des précipitations dans le Sud.

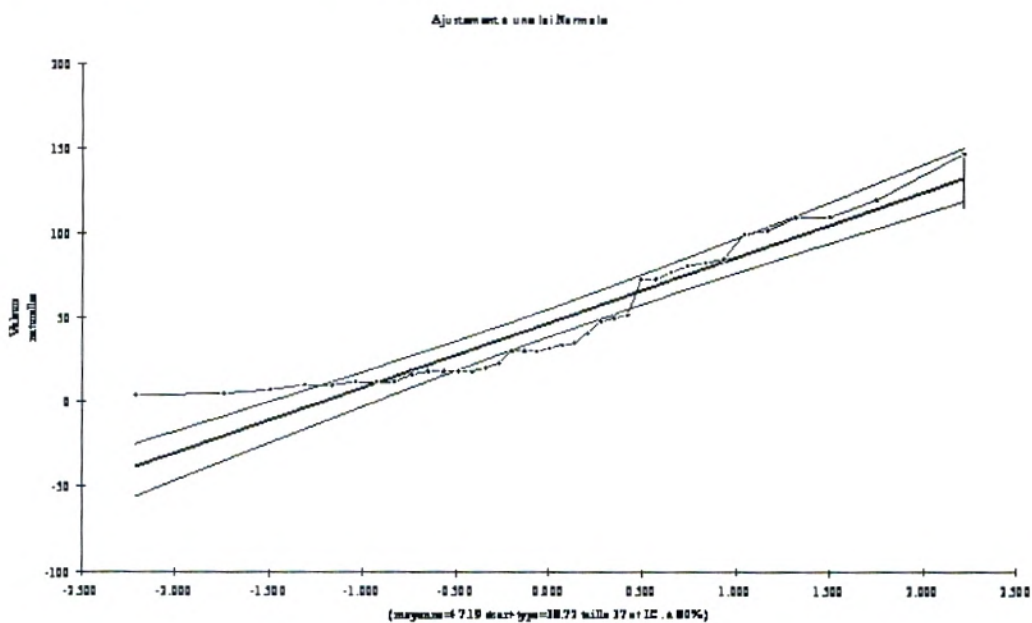


Figure. 22. Ajustement des précipitations annuelles à une loi Gumbel (Station de Béni Abbès).

Tableau n° 6: Précipitation de période de retour

Précipitation de retour (ans)	10	20	25	100	1000
Fréquence	0.90	0.95	0.96	0.98	0.999
Précipitations (mm)	87	105	129	147	206

2. 5 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. Hydrologie

Les eaux collectées par les oueds sahariens proviennent essentiellement des massifs atlasiques relativement bien arrosés.

Autrefois très actif, L'oued Saoura résultant de la jonction au niveau d'Igli, des oueds Guir et Zousfana, est actuellement considéré comme un cours d'eau qui ne reçoit qu'un apport hydrique négligeable en raison de la construction du barrage de Djorf Torba, alimenté par l'oued Guir et situé à environ 260 km en amont de Béni-Abbès.

3.1 Apports de l'oued Guir

Le cours d'eau majeure est l'Oued Guir qui draine un bassin dont la superficie avoisine 27400 Km². Ses crues principales se manifestent en Novembre et en Avril, son alimentation est assez régulière assurée en partie par la fonte des neiges. Ces eaux sont totalement perdues dans les zones désertiques où elles provoquent des inondations et parfois des dégâts aux palmeraies.

3.1.1 Apports de l'oued Guir à Djorf-Torba

La superficie drainée par l'oued Guir en amont du barrage de Djorf-Torba est d'environ 22 .000 Km². Deux séries de débits ont pu être observées durant les périodes 1952/53 -1955/56 (avant la construction du barrage) et 1969/70 -1991/92 (après la construction du barrage) .Il

s'agit d'une série, qui donne un débit moyen interannuel de $6,32 \text{ m}^3/\text{s}$, soit un apport de $200 \text{ Hm}^3/\text{an}$. Le débit spécifique est de $0,287 \text{ l/s/km}^2$ (ANRH 1995).

3.1.2 Apports de l'oued Guir à Abadla

Avant la construction du barrage, l'oued Guir, la hauteur observée était de 4 m. Actuellement le barrage de Djorf Torba retient la presque totalité des débits. Sa capacité est de $316,4 \text{ hm}^3$. Durant la crue d'octobre 1979, le barrage a observé un volume de $38,338 \text{ hm}^3$. La crue d'octobre 2008 a continué en aval du barrage, avec un débit maximal de $370 \text{ m}^3/\text{s}$. Après un parcours de 400 Km du barrage, la crue se perd dans la Sebkha el Mellah. Cette sebkha s'est entièrement remplie.

Au niveau de Béni Abbès, il est difficile d'évaluer les écoulements (Vanney. J, 1960) dans sa thèse sur la crue de mars 1959 estime les apports à 400 Hm^3 .

3.2 Apports de l'oued Bechar

Pour l'oued Béchar à Béchar ville ($S=1520 \text{ km}^2$), un débit moyen interannuel est évalué à $0,056 \text{ m}^3/\text{s}$ soit un apport de $1,766 \text{ Hm}^3/\text{an}$. (ANRH, 1995)

3.3 Apports de l'oued Zouzfana

Pour l'oued Zousfana à Beni Ounif (3670 km^2), le débit annuel est de $0,136 \text{ m}^3/\text{s}$. l'apport de cet Oued (2215 km^2) serait de $0,082 \text{ m}^3/\text{s}$. A la sortie de l'atlas, la Zousfana aurait un débit de $0,218 \text{ m}^3/\text{s}$ et un apport de $6,875 \text{ Hm}^3/\text{an}$ (ANRH, 1995).

Le débit de la Zousfana à Taghit (la deuxième station hydrométrique sur le cours d'eau de Oued Zouzfana) serait de $0,129 \text{ m}^3/\text{s}$ soit un apport de $4,068 \text{ Hm}^3/\text{an}$ (ANRH, 1995).

Les ressources en eau superficielles peu abondantes en valeur absolue, sont surtout variable d'une année à l'autre, et dans le courant d'une année, condensée en quelques crues rapides, aux débits de pointe accentués et a volume importants. Les débits varient en fonction des années sèches ou humides. A Djorf Torba, le débit maximum annuel de $31,8 \text{ m}^3/\text{s}$ a été observé en 1972 tandis que l'année 1969 a enregistré un minimum de $0,549$ (ANRH, 1995)

3.4 Les apports de l'Oued Saoura

L'oued Saoura commence à Igli au confluent de l'Oued Guir et de l'Oued zouzfana, descendus respectivement du Haut Atlas marocain et de l'Atlas Saharien.

L'Oued Saoura connaît une succession de crues en automne et au printemps saisons non favorables aux travaux de constructions, Cependant il est l'un des oueds sahariens le plus vivant car fréquemment il s'y produit des crues souvent importantes qui se basent sur les données pluviométriques (précipitations).

Au niveau de la Saoura, Vanney dans sa thèse sur la "crue de mars 1959" a estimé les apports à 400 Hm^3 à Béni Abbès et à 350 Hm^3 au niveau de Kerzaz.

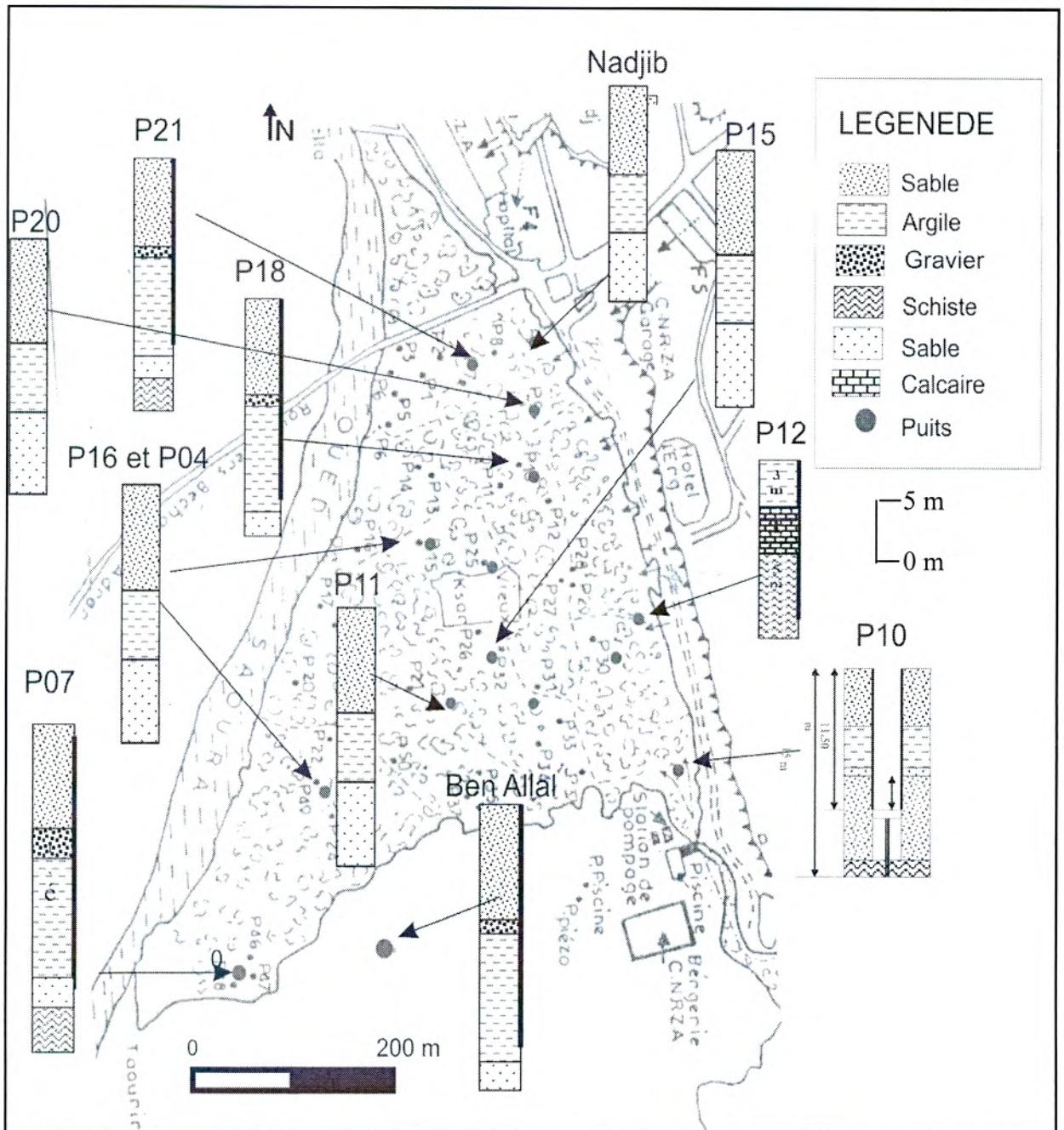


Figure. 29 : Coupes lithologiques de quelques puits creusés dans la palmeraie (Enquête sur terrain, 2008)

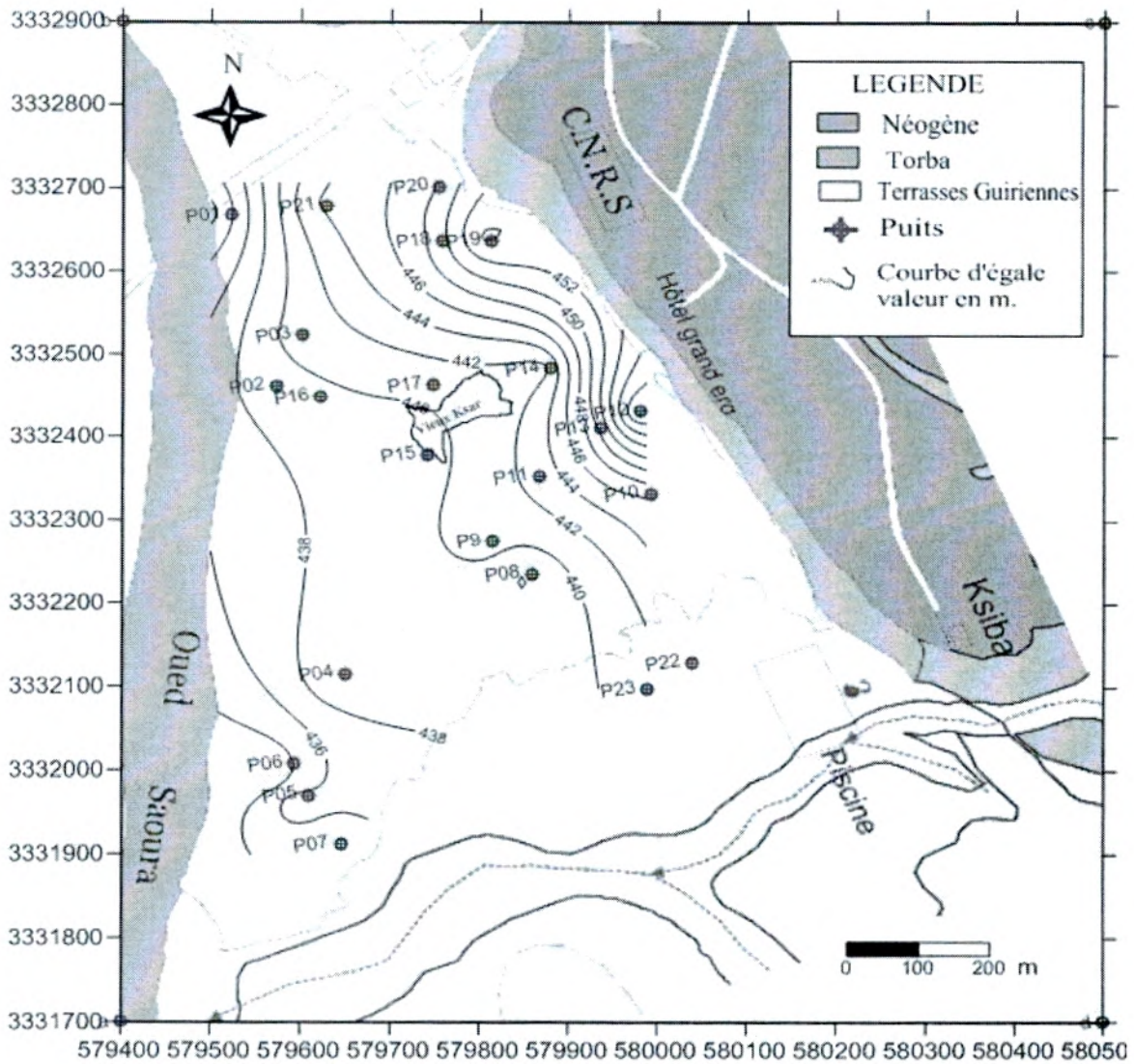


Figure 30 : Présentation du mur du Quaternaire.

2.3 Cartographie du remplissage de l'aquifère alluvial

L'aquifère alluvial de la palmeraie est perméable est constitué de sable fin à la surface, argile et gravier à la base.

A partir de la carte de mur, nous avons tracé la carte d'épaisseur (Fig. 31) du remplissage alluvionnaire de la palmeraie.

Nous avons utilisé le maximum de données pour l'interpolation par krigeage, pour reconstituer les cartes d'égalité de valeur. Dans l'ensemble l'épaisseur de l'aquifère alluvial varie entre 10 à 17 m.

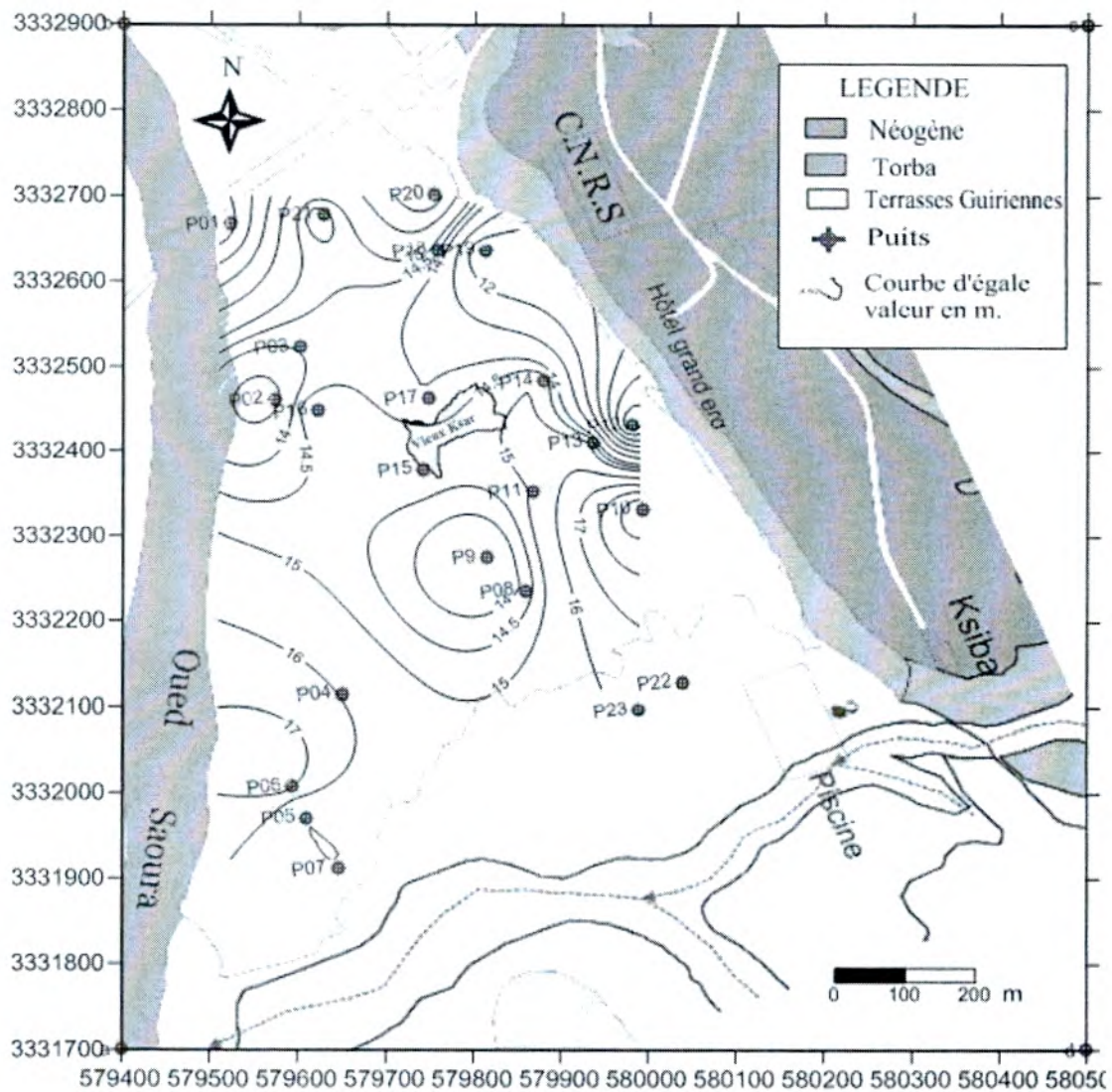


Figure 31 : Présentation, de l'épaisseur du remplissage quaternaire

3. Piézométrie

Les cartes piézométriques permettent de définir le sens d'écoulement souterrain, les principales zones de circulation des eaux, l'alimentation de la nappe de la palmeraie et ainsi d'y prévoir un schéma d'exploitation pour la gestion des ressources souterraines. D'après l'allure des lignes isopièzes des anomalies piézométrique peuvent être distinguées et un gradient hydraulique sera déduit. Le premier document de base de la palmeraie a été réalisé en 1973 par M. Roche, (superficie de 40 ha). Une deuxième étude hydrogéologique a été réalisée en 1991 par N. Yousfi, au niveau de la palmeraie central 37 ha, qui fait l'objet de notre étude.

Pour ce faire et pour réaliser une campagne piézométrique pendant toute l'année 2008-2009, nous avons installé un réseau de 21 piézomètres (Fig. 32) bien repartis dans l'espace de la palmeraie, nous avons réalisés des relevés piézométriques mensuelles pendant douze mois (Tab. 3 en annexe). Les mesures du niveau statique sont effectuées qui captent la nappe alluviale à l'aide

d'un GPS Magiclanc (Précisions : 05 m pour les coordonnées X, Y et 15m pour l'altitude) et une sonde électrique.

3.1 Piézométrie de la Nappe des terrasses alluviales de la palmeraie

Sur une carte topographique au 1/1000 ème, nous avons tracé la carte piézométrique de la nappe de la palmeraie. Les puits observés sont généralement de diamètre important, ils sont bétonnés sur leurs parois latérales, l'arrivée d'eau se faisant le plus souvent par la base. Les eaux sont destinées à l'irrigation de la palmeraie.

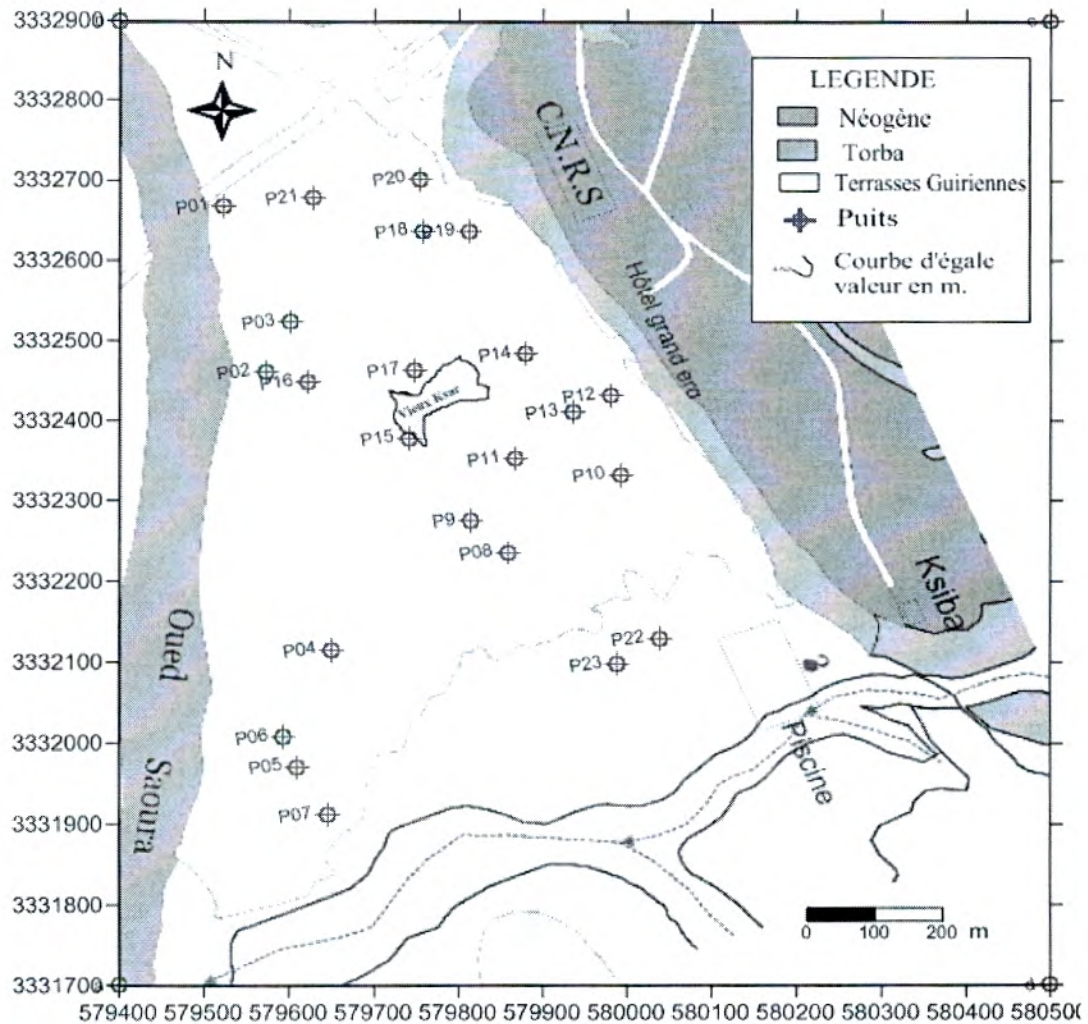


Figure 32 : Carte de positionnement des puits dans la palmeraie

3.1.1 Carte piézométrique de 1991 (Yousfi et Ait Ahmed)

La carte en courbes isopièzes établie en 1991 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 de 3.10^{-2} (3%)

Le gradient hydraulique dans la partie est du vieux ksar présente une valeur est fort de 4%, il devient faible dans la partie Ouest du ksar 0,4% (Fig. 33).

Connaissant la transmissivité et le gradient hydraulique, il est possible d'estimer le débit traversant une isopièze à partir de la relation de Darcy, nous avons :

Les apports de la dalle hamadienne, les eaux transitent par un drain naturel et par les seguias, tout au long du talus, les apports seraient 15 l/s. Des apports superficiels par la seguia provenant de la piscine qui véhicule le 1/3 des eaux de la grande source, soit un débit de 11 l/s. L'ensemble des débits soit un totale de **23 l/s**.

La présence d'un axe de drainage ou les écoulements se font de l'Est vers l'Ouest.

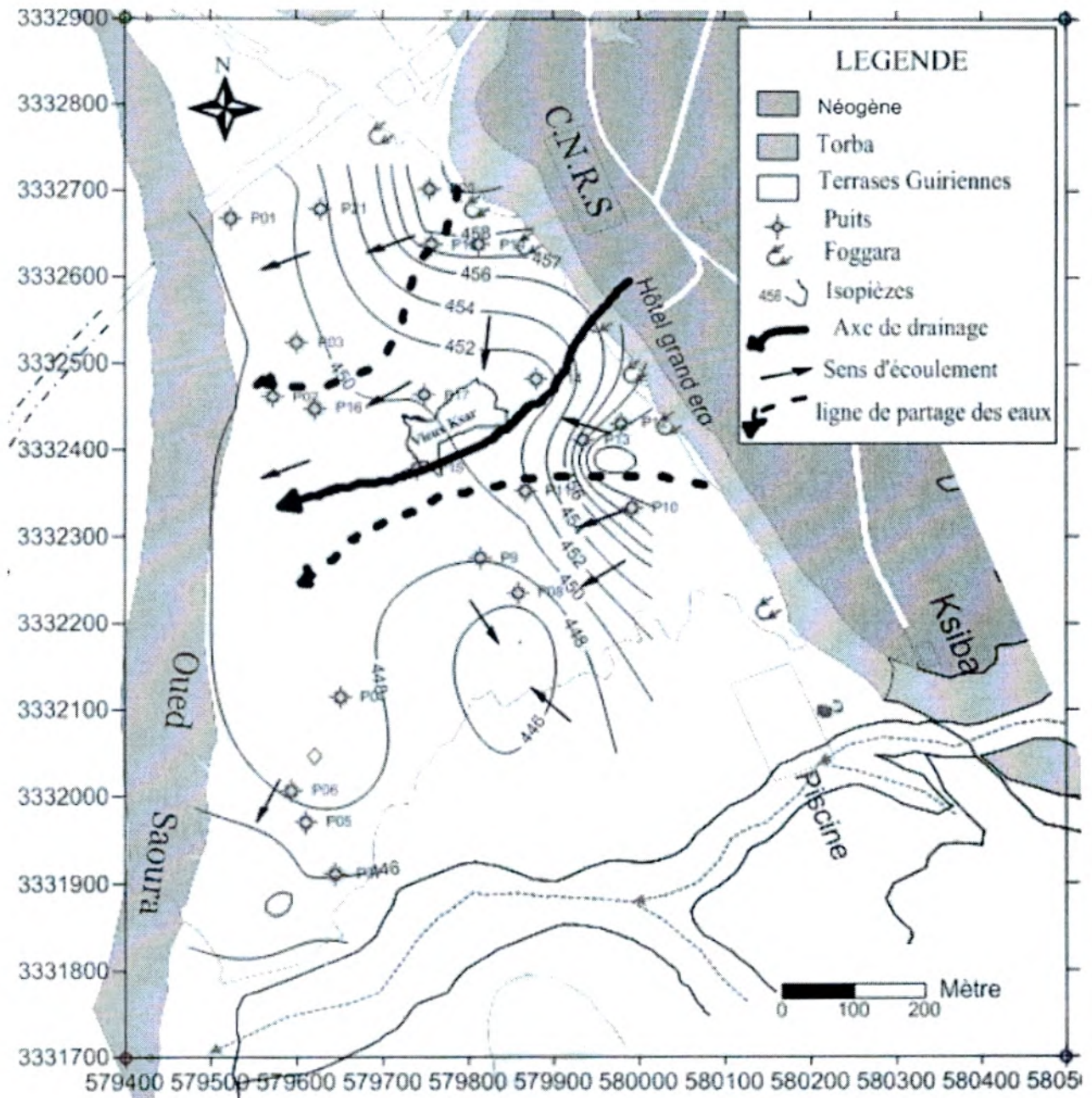


Figure 33 : Carte piézométrique de la palmeraie Avril 1991(Yousfi et Ait Ahmed, 1991)

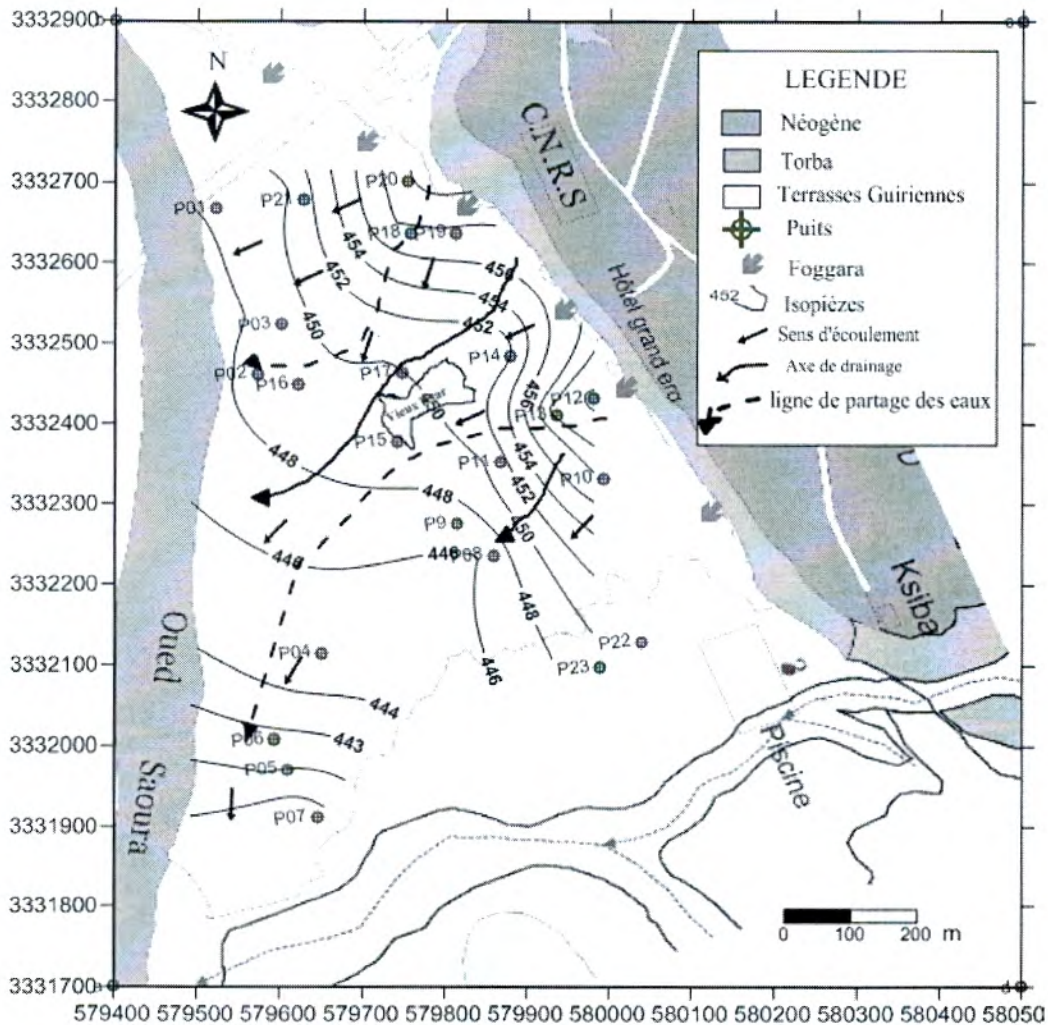


Figure 34 : Carte piézométrique de nappe de la palmeraie Avril 2008(Merzougui, 2008)

3.1.2 Carte piézométrique avril 2008(Fig.34)

La carte piézométrique réalisée en 2008 est presque identique de celle- établie en avril 1991. Elle présente un écoulement général NE/SW.

Les courbes isopièzes montre une dépression piézométrique au Sud du Ksar, au niveau du puits 08, du a la topographie du substratum dévonien de l'aquifère d'une part, ou bien par la surexploitation de la nappe d'autre part.

Le gradient hydraulique dans la partie Est du vieux ksar présente un valeur est fort de 0,03, il devient faible dans la partie Ouest du ksar 0,004 à 0,005 (Fig 34).

En outre, la carte piézométrique dressée en 2008, montre un étalement des isopièzes le long de la limite Est, ce qui met en évidence une alimentation à partir des assises néogènes de l'erg et une communication avec la nappe Mio-pliocène, l'influence de la structure est nette. La remontée du niveau piézométrique, dans la partie Nord de la nappe alluviale est due à la mise en repos de la nappe depuis 1999, d'une part et à l'augmentation de la pluviométrie dans la dernière décennie d'autre part (année 2008).

Depuis 1996 la nappe alluviale dans sa partie sud du ksar vers l'oued est en repos grâce à la forte salinité et la mauvaise qualité des eaux d'irrigation.

La carte montre deux zones de recharges, la plus importante au Nord, et une autre au Sud séparées par un axe de drainage traversant le vieux ksar. Un petit cône de dépression dans la partie Nord explique une surexploitation dans ce point.

Cette comparaison de l'évolution piézométrique, nous a permis de reconstituer les données à introduire dans le modèle lors de son initiation notamment, les conditions aux limites, la perméabilité, la recharge et la décharge.

3.1.3 Interprétation et résultat des deux campagnes piézométriques(1991 et 2008)

a) Schéma général

La profondeur moyenne du plan d'eau par rapport au sol est de l'ordre de 2 à 9,95 mètres, dans toute la palmeraie dont les puits les plus profonds sont situés dans les extrémités de la palmeraie. Les deux cartes établies montrent un écoulement général, d'une direction Nord Est Sud-Ouest, de l'erg vers l'oued dans le sens de la pente générale, et cela dans la majorité de la palmeraie.

b) Alimentation

Zone de recharge des eaux de la nappe du grand erg occidental dans tout le front Nord de la palmeraie : l'écoulement de la nappe provenant des formations Mio- Pliocènes alimentent les terrasses alluviales par un drain naturel à partir des eaux de la nappe de l'erg.

c) Gradient hydraulique

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

d) Evaluation de la ressource

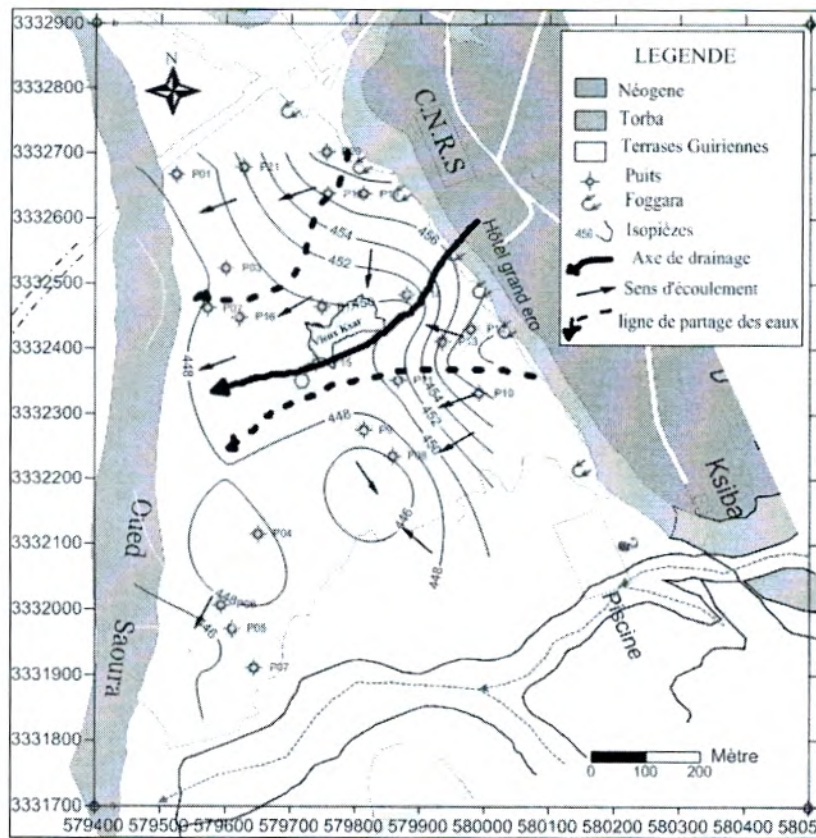
L'évaluation de la ressource repose sur le comportement hydrodynamique c'est une évaluation des débits au niveau du front de la palmeraie,

Tableau 09 : évaluation de débit de la ressource

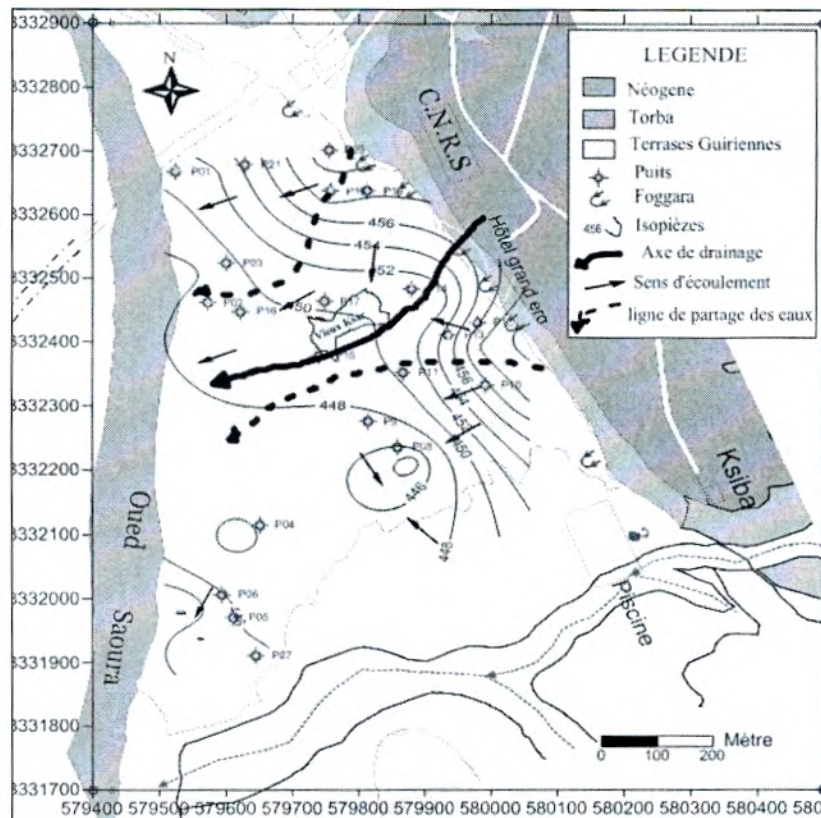
Zone	Front (km)	T (m ² /s)	I	Q=T*I*F	Débit (m ³ /j)
Béni Abbés	5	$2 \cdot 10^{-2}$	3	0.3	2592

2.4 Fluctuations de la nappe

Une faible variation du plan d'eau de la nappe de la palmeraie a été observée entre la période de hautes et basses eaux (Fig, 35).



a) période basse eau (Juillet, 2008)



b) période hautes eaux (Octobre, 2008)

Figure .35 : Fluctuation de la piézométrie de la nappe de la palmeraie.

La figure 36, nous a permet de constater que le niveau piézométrique a baissé à partir de 1 à 8 m dans le puits 10, et un léger baissement parfois une augmentation de quelque mètre

dans le reste des puits ; Ce qui explique la surexploitation de la nappe alluviale. Il y a lieu de noter aussi que cette variation est plus sensible, dans les puits près de la falaise hamadienne.

Les fluctuations annuelles dépassent rarement les 2 mètres d'amplitude et la nappe se recharge rapidement par le drain d'une part et les crues de la Saoura d'autre par à chaque période proportionnellement à la pluviosité.

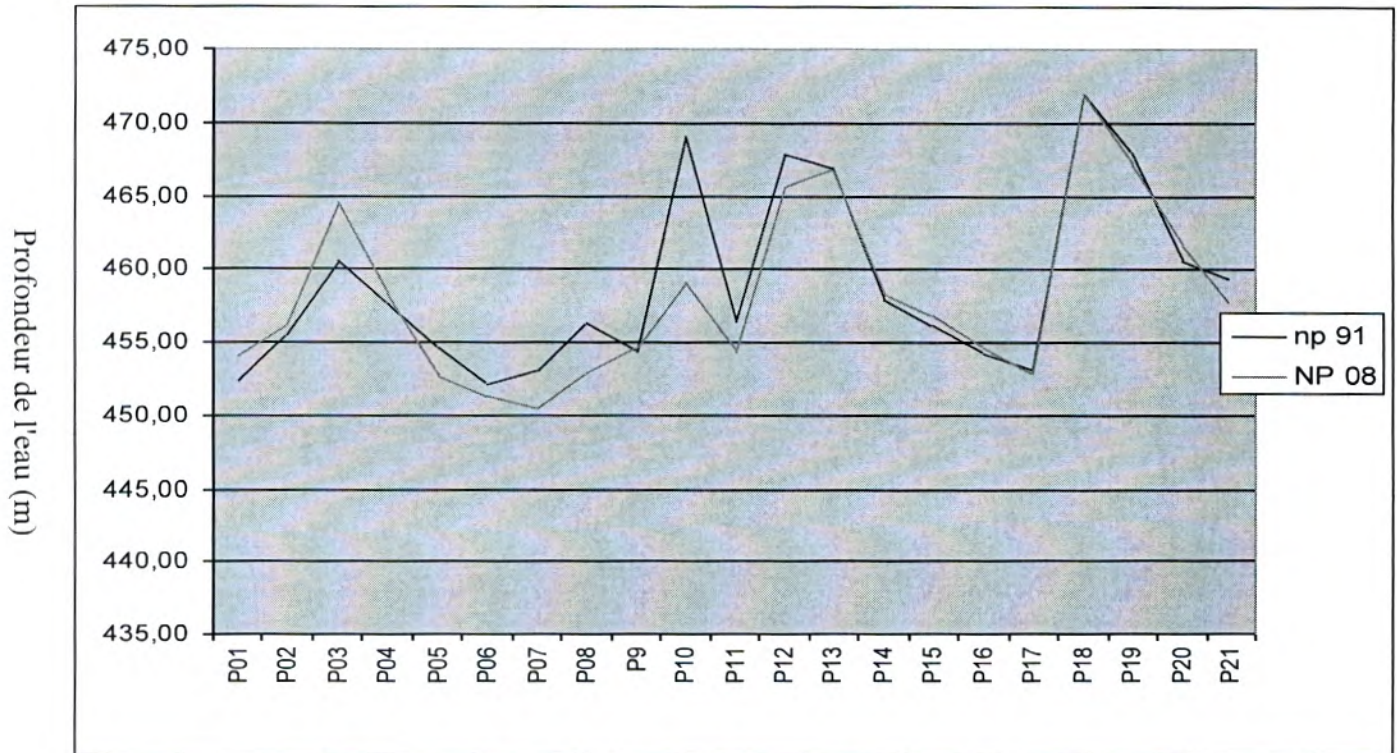


Figure 36 : Evolution piézométrique de la nappe de la palmeraie pendant 18 ans.

3.4 Caractéristiques hydrodynamiques

Les paramètres hydrodynamiques ont été calculés à partir des résultats d'essais de pompage de (.Yousfi et Ait Ahmed 1991).

3.4.1 La transmissivité

La transmissivité est un paramètre hydrodynamique essentielle dans l'étude de la nappe libre de la palmeraie, les résultats des essais de pompage sont donnés (Tableau n°10) :

Tableau 10 : valeurs de transmissivités de quelques puits dans la palmeraie.

Ouvrage	Benaissa P03	Piézomètre P02	Puits de piscine P22	Piézomètre P23
JACOB	Descente $2 \cdot 10^{-4}$ Remonté $12 \cdot 10^{-4}$	Descente $12 \cdot 10^{-2}$	Descente $4 \cdot 10^{-2}$	Remonté $11 \cdot 10^{-2}$
BOULTON	-	-	$4 \cdot 10^{-2}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$
COOPER_ papadopoulos	-	-	-	$4 \cdot 10^{-2}$

3.4.2 Le coefficient d'emmagasinement

L'interprétation des données des essais ont permis de déterminer des valeurs de coefficients d'emmagasinement. 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.

4. Bilan du système aquifère (MERZOUGUI, 2007)

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 80 000 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.38).

Les caractéristiques hydrodynamiques ($T = 6.10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ à $4.10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$; $S = 1,3$ 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 m³/an (Merzougui, 2007). L'évaluation de la ressource en eau sur un front de 5 km a été estimée 0.3 m³/s (Bouhouche Z, Ghazi F, 1993).

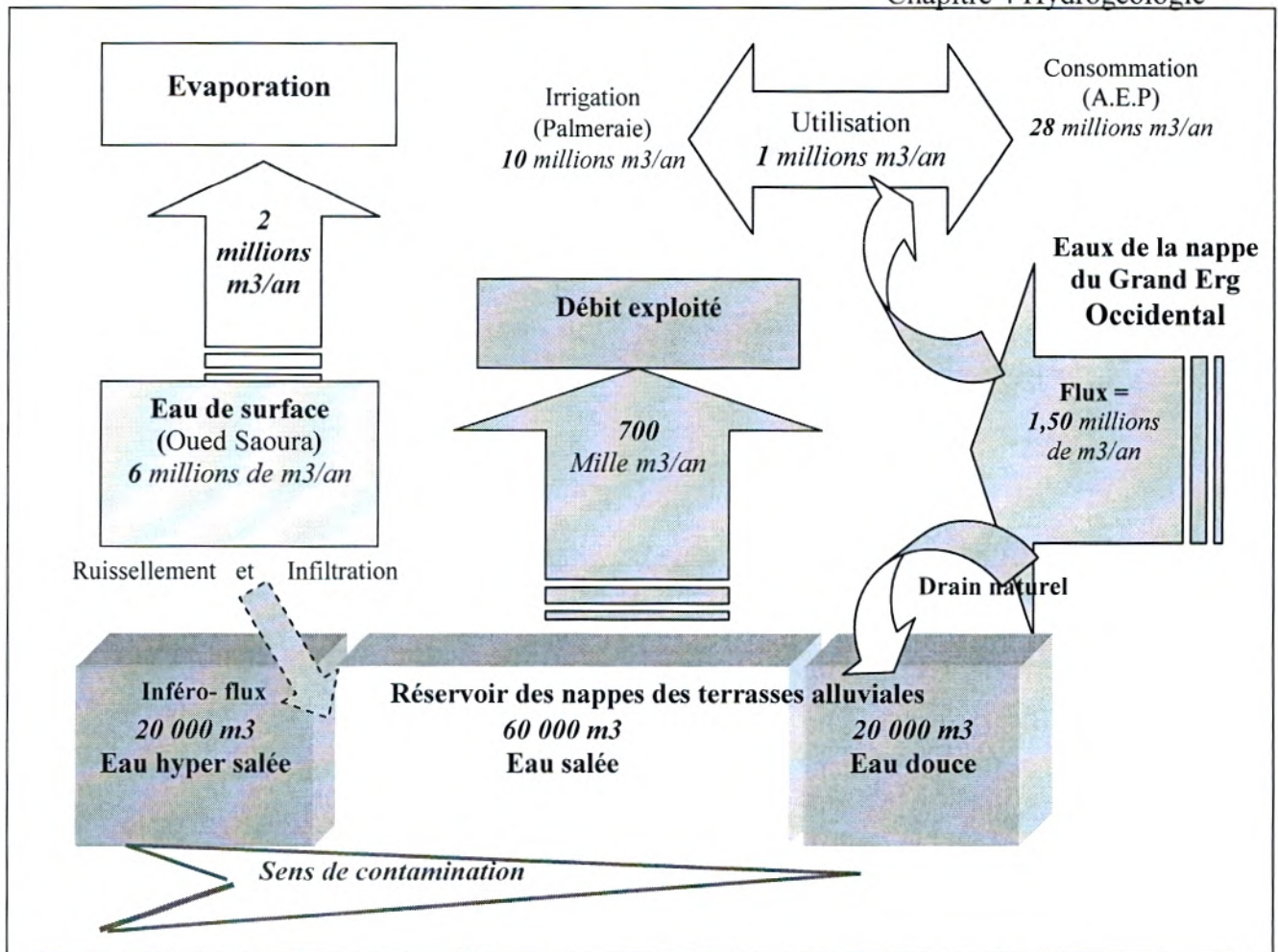


Figure 38 : Bilan quantitatif estimatif du système aquifère dans l'oasis de Beni Abbés
(Merzougui, 2007)

Conclusion

La nappe des terrasses alluviales de la palmeraie de Béni Abbés est plus ou moins homogène dans l'ensemble, le substratum plissé qui entraînent des modifications de pente, d'écoulement, de réserve et de perméabilité. Elle représente une unité à écoulement convergent vers l'oued caractérisé par une piézométrie relativement homogène. La nappe est l'alimentée d'une manière régulière par les eaux de la nappe de l'erg de bonne qualité chimique par l'alimentation d'un drain naturel, et par infiltration directe des eaux superficielles de l'oued Saoura d'une part et d'autre part par les eaux de la grande source destinée à l'irrigation de la palmeraie.

Chapitre 5

Hydrochimie

Introduction

L'étude des propriétés physico-chimique des eaux d'une nappe permet, non seulement de déterminer la qualité des eaux, de l'usage domestique et agricole mais elles constituent 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.

Notre échantillonnage a porté sur **17** points d'eau, les prélèvements ont été effectués au mois de Mars et **Avril 2009** 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 11)

1. Eaux de surface

Le tableau 1 ci-dessous donne pour les périodes 2008 et 2009, une synthèse des caractéristiques hydrochimiques du bassin versant de la Saoura dans différentes stations.

Tableau 11 : Synthèses des analyses physico chimiques des eau de surface dans la bassin de la saoura.

	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
Oued ZOUZFANA TAGHIT	7,62	7,03	4200	57	427	750	34,5	1800	-	4358,60
Oued ZOUZFANA TAGHIT 2	7,51	8,31	4950	270	348	900	75,5	2030	0,002	5152,20
Oued SAOURA IGLI	7,21	7,33	4700	168	263	875	225	1400	0	4544,60
Oued GUIR BARRAGE	7,27	4,17	2600	215	96	500	14,5	807,5	0,001	2585,40
Oued SAOURA BENI ABBES	8,03	3,28	5360	267	300	850	55	1680	-	5033,60

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. 39).

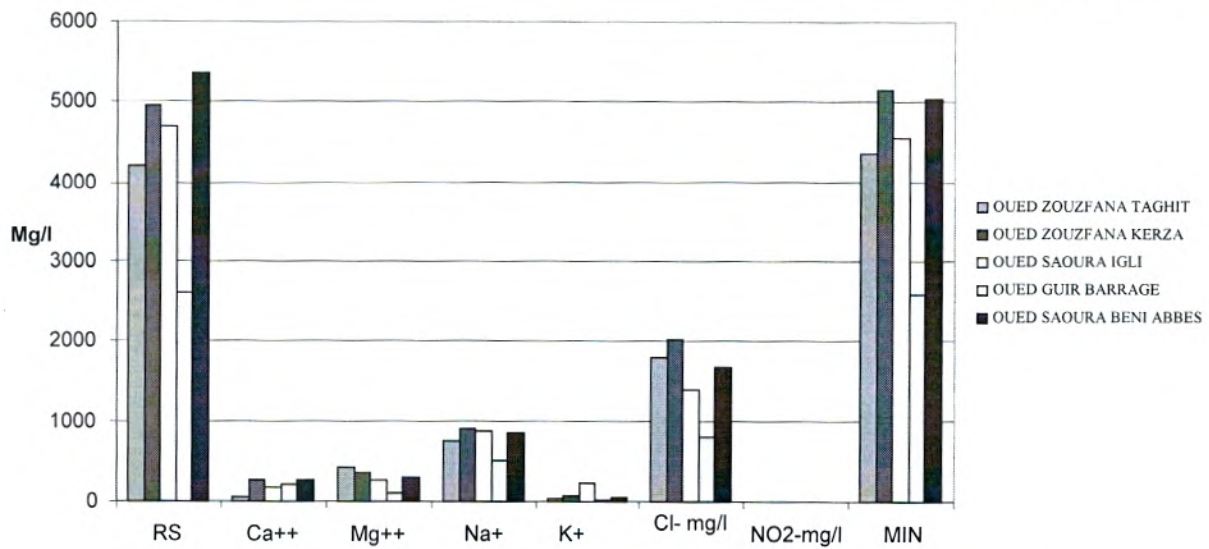


Figure 9 : Synthèse des paramètres hydrochimiques des eaux de surfaces du bassin versant de la Saoura
2 - Eaux souterraines

Eaux de la nappe alluviales de la palmeraie (Campagne de mesure 2009)

Une campagne de prélèvements et d'analyses a été effectuée le mois d'Avril 2009, au niveau de la nappe alluviale de la palmeraie à travers un réseau d'observation et de suivi de la qualité des eaux souterraines composé de 17 point d'eau répartis dans toute la surface de la palmeraie.

2.1. Interprétation des analyses chimiques

Les résultats des analyses physico-chimiques des prélèvements sont consignées en annexe2 .

2.1.1 Caractères physiques

2.1.1. 1 Potentiel hydrogène (pH)

Le potentiel hydrogène d'eau représente son acidité ou alcalinité liée à la nature des terrains traversés. L'ensemble des points d'eau présente des valeurs de **pH** qui varient entre **6,8** et **7,91**, valeurs qui traduisent le caractère alcalin des eaux de la nappe phréatique.

2.1.1. 2 La conductivité électrique

Elle est liée directement à la quantité d'ions présents, et leur mobilité, elle donne une idée sur la teneur en sels dissous.

Pour l'ensemble des échantillons, la conductivité est comprise entre **1,92** et **15 mmhos/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.

2.1.1. 3 La dureté totale (TH)

Elle est due essentiellement aux sels dissous de calcium et de magnésium, leur concentration trop forte rend l'eau très dure.

$$TH = (Ca^{++} + Mg^{++}) * 5 \text{ en degré français (°F).}$$

La dureté des eaux de la nappe des formations quaternaires varie entre **47** et **312°F** la majorité des eaux sont très dures.

En comparant avec les normes internationales fixées par l'OMS (tableau, 12), on constate que les eaux de la nappe sont assez dures.

Tableau 12 : Potabilité des eaux en fonction de la dureté (OMS) de la nappe de la palmeraie

TH (°F)	0-7	7-22	22-32	32-54	>54
Dureté des eaux	Douce	Modestement douce	Assez douce	Dure	Très dure
% échantillons	0	6	15	9	70

2.1.1. 4 Le résidu sec et la minéralisation (Fig.40 et 41)

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 dépassent pas les 1g/l, dans la partie ouest de la palmeraie pour atteindre 10 mg /l

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 2009.

Dix sept mesures de résidu sec et de la minéralisation, que nous avons effectuée en Avril 2008, ont permis de tracer la carte d'égalité valeurs en sels de la palmeraie de Béni Abbés (Fig.40).

Les résultats obtenues montrent que :

- 0 % des points d'eaux présentent une minéralisation inférieure à 600 mg/l. (très bonne qualité physico-chimique)
- 35 % des points d'eaux présentent une minéralisation qui se situe entre 600 et 1200 mg/L. (bonne qualité physico-chimique)
- 30 % des points d'eaux présentent une minéralisation comprise entre 1200 mg/L et 2000 mg/L. (qualité physico-chimique médiocre)
- 35 % des points d'eaux donnent une minéralisation supérieure à 2000 mg/l. (qualité physico-chimique mauvaise).

Ces valeurs révèlent que les eaux sont très salées surtout celles situées à proximité de l'oued Saoura, on peut affecter cette forte minéralisation aux trois phénomènes suivants :

- Dissolution des sels contenus dans les formations de sable de quaternaire.
- L'évaporation au niveau des puits de large diamètre (2m).
- La remontée des eaux de l'inféro-flux chargées en sels, par pompage et phénomène de diffusion.

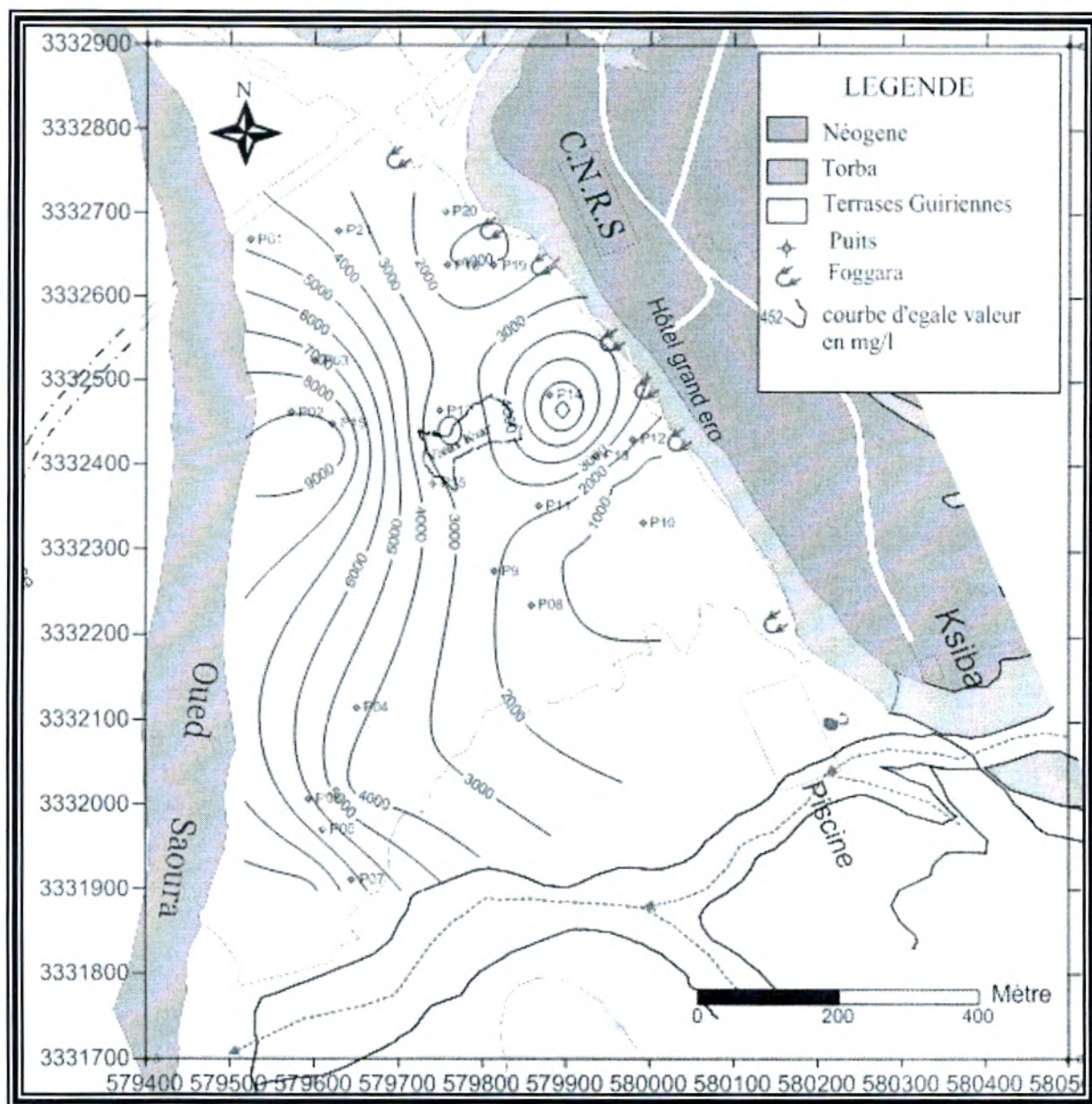


Figure 40 : Carte d'isoneurs de résidu sec en mg/l de la palmeraie.

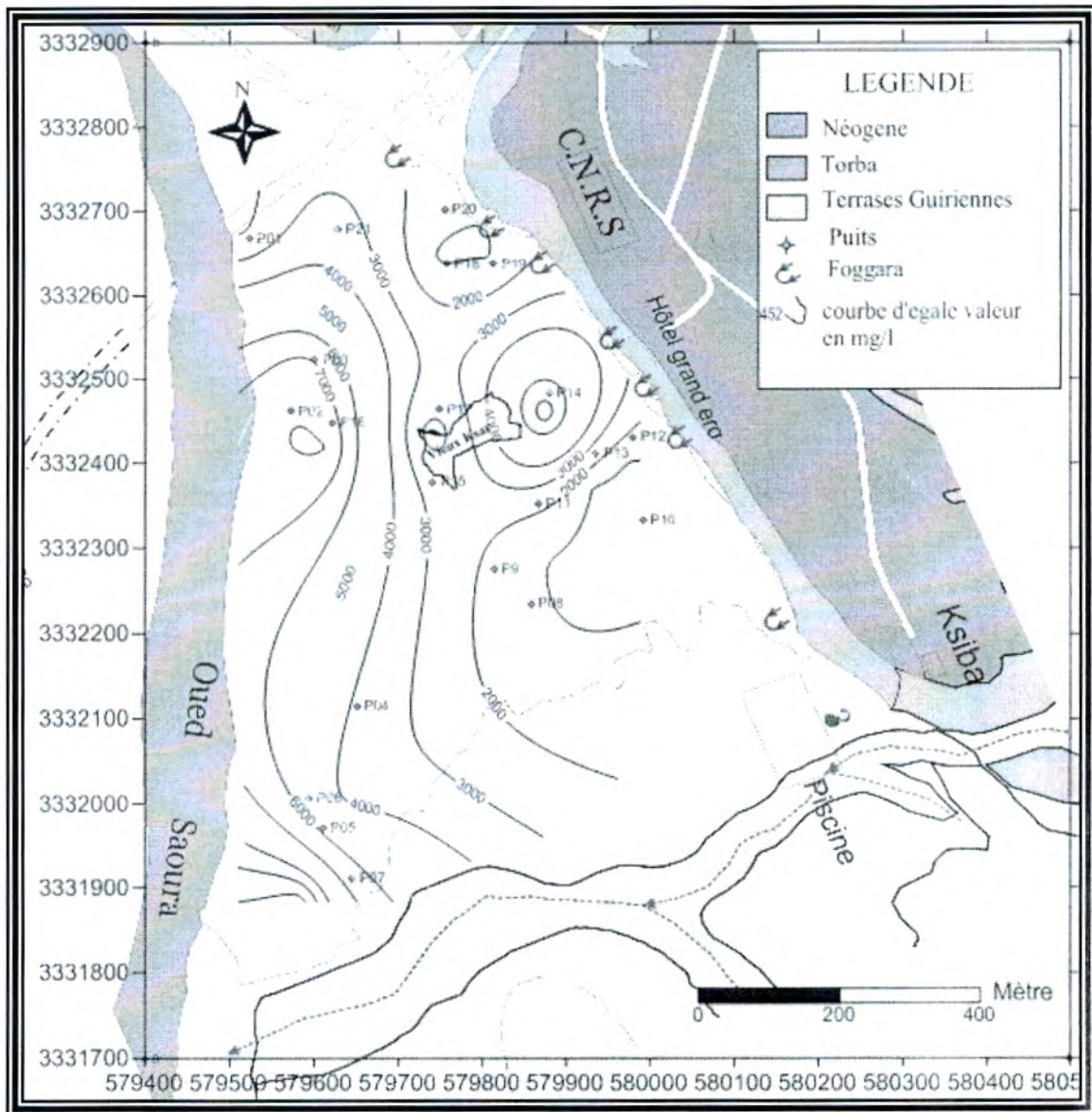


Figure 41: Carte d' isoteneurs de minéralisation en mg/l des eaux de la palmeraie.

2.1.2 Caractères chimiques (Fig.43)

2.1.2.1 Les chlorures (Cl⁻)

Les chlorures sont des éléments très solubles et très stables difficile à s'éliminer et dans l'ensemble des terrasses alluviales de la zone étudiée, les teneurs en chlorures varient entre **140** et **3000 mg/L (Fig. 43)**. Les chlorures ont une origine géologique liée au lessivage des formations alluviales quaternaires, argileuses et marneuses.

La carte en courbes isochlores présente le même scénario que la carte du résidu sec, on retrouve une disposition des courbes d'isochlores analogue à celle des courbes d'isoteneurs de résidu sec.

2.1.2.2 Les sulfates (SO₄)

Les sulfates sont des éléments très solubles et aussi très stables. Les teneurs varient entre **190** et **3000 mg/L**, 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, **70 %** des échantillons dépassent la concentration maximale admissible de **250 mg/L** fixée par l'OMS.

2.1.2 2 Les bicarbonates (HCO_3^-)

Les bicarbonates proviennent essentiellement de la dissolution de CO_2 libre dans des solutions à **pH** relativement élevé. La teneur en bicarbonates varie de **281 à 470 mg/l**, leur origine est due au lessivage des formations hamadiennes calcaires du Moi-Pliocène vraisemblablement.

2.1.2 3 Calcium (Ca^{++})

Les teneurs en calcium varient entre **73 et 667mg/L**.

L'OMS fixe une valeur maximale de **75mg/l** comme une limite admissible de potabilité. Cette valeur, est largement dépassée par les eaux de la nappe alluviale. Le calcium est du à la dissolution du carbonate de calcium dans les formations calcaires hamadiennes d'âge quaternaire de la vallée de la Saoura.

2.1.2 4 Magnésium (Mg^{++})

Les teneurs en magnésium sont faibles s'échelonnent entre **56 à 632 mg/L**. Les valeurs élevées dans les eaux de la nappe des terrasses alluviales peuvent être le résultat d'un échange de base important entre l'eau et les lentilles d'argiles magnésiennes, contenues des lentilles d'argiles dans les sables du quaternaire.

2.1.2 5 Sodium (Na^+)

Le sodium représente le cation le plus abondant dans les eaux de la nappe du quaternaire de la vallée de la Saoura. Ces teneurs sont comprises entre **80 et 2300 mg/l**. 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.

2.1.2 6 Nitrates (NO_3^-) (fig.42)

La présence de nitrates dans l'eau est un indice de pollution d'origine agricole (engrais), urbain ou industrielle. L'OMS recommande de ne pas dépasser **25 mg/l**. Les teneurs en nitrates sont comprises entre **20 et 150 mg/l**. De fortes valeurs ont été observées au niveau du puits numéro 21 et 20, dues aux activités agricoles intensives et en particulier l'enlèvement de poulet, bovins, ovins, caprins, camelins et chevaux, dans cet endroit de la palmeraie.

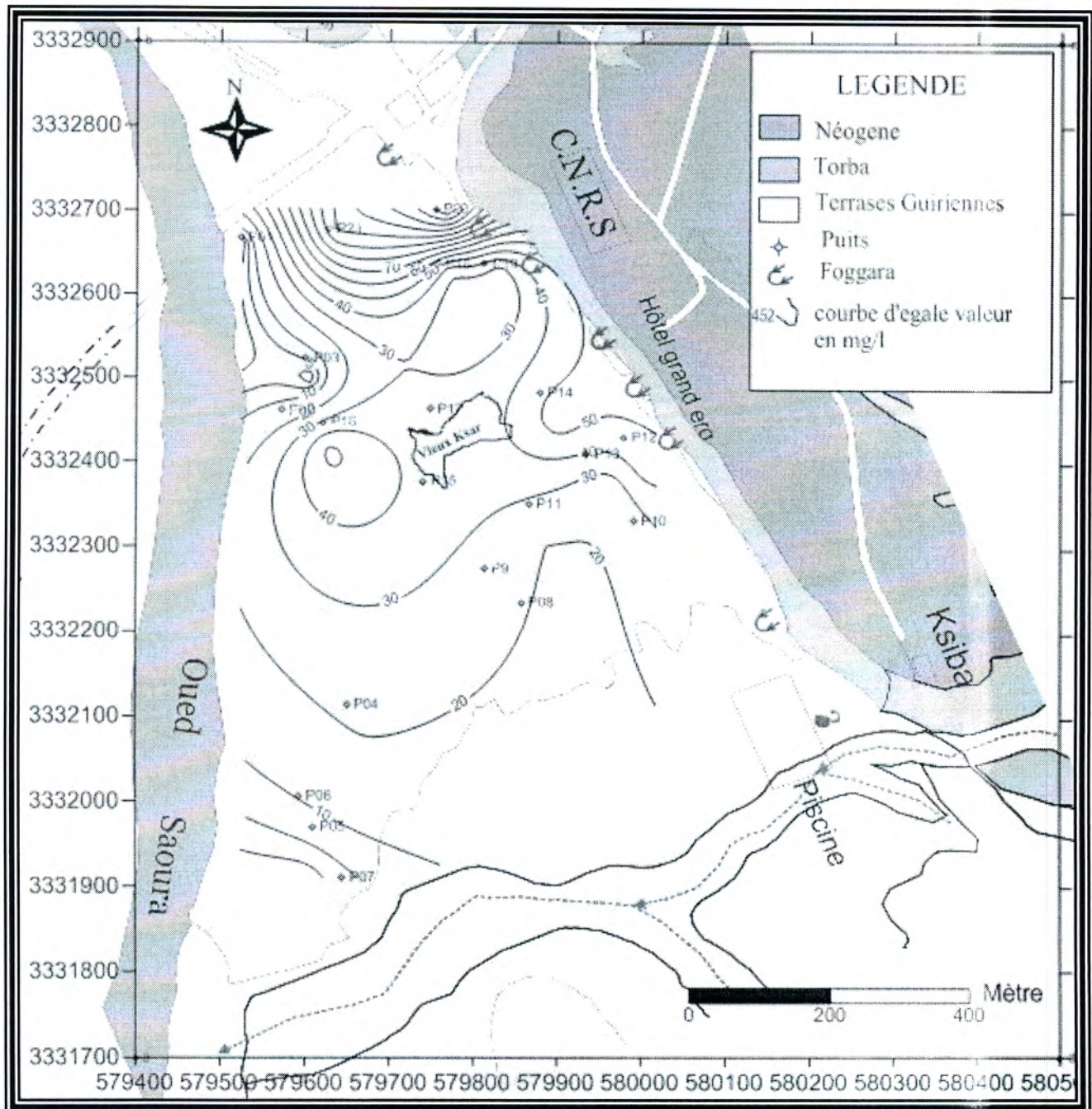


Figure 42 : Carte d'isoteneurs en Nitrates en mg/l des eaux de la palmeraie.

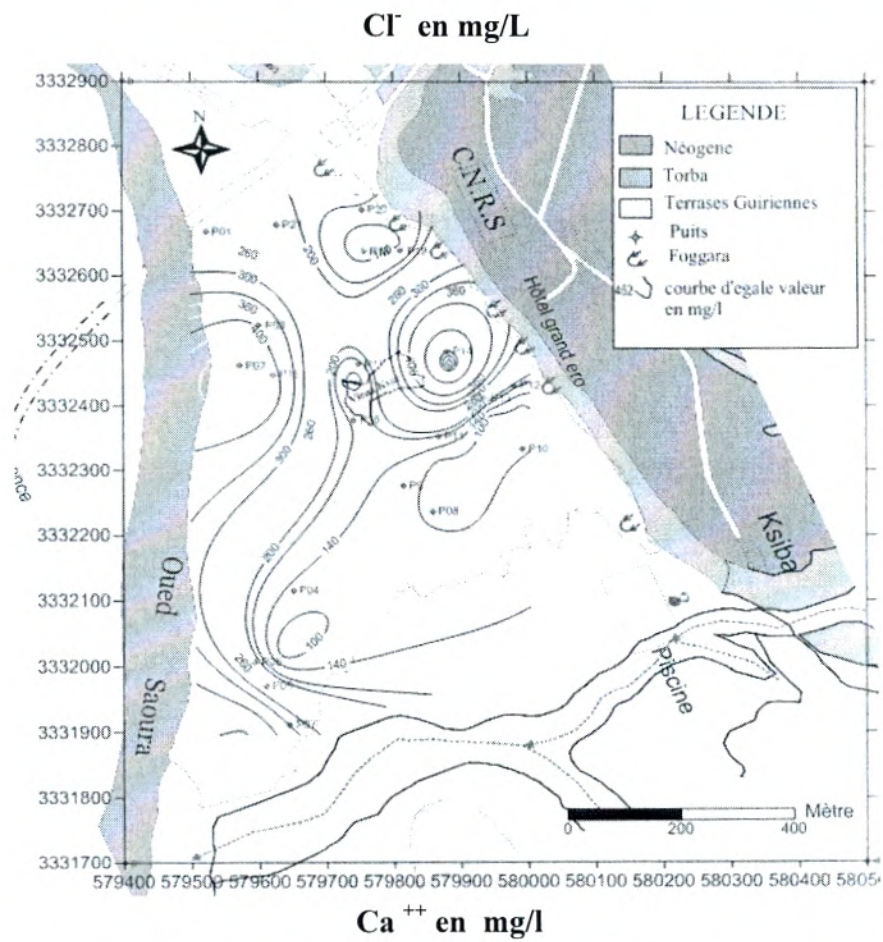
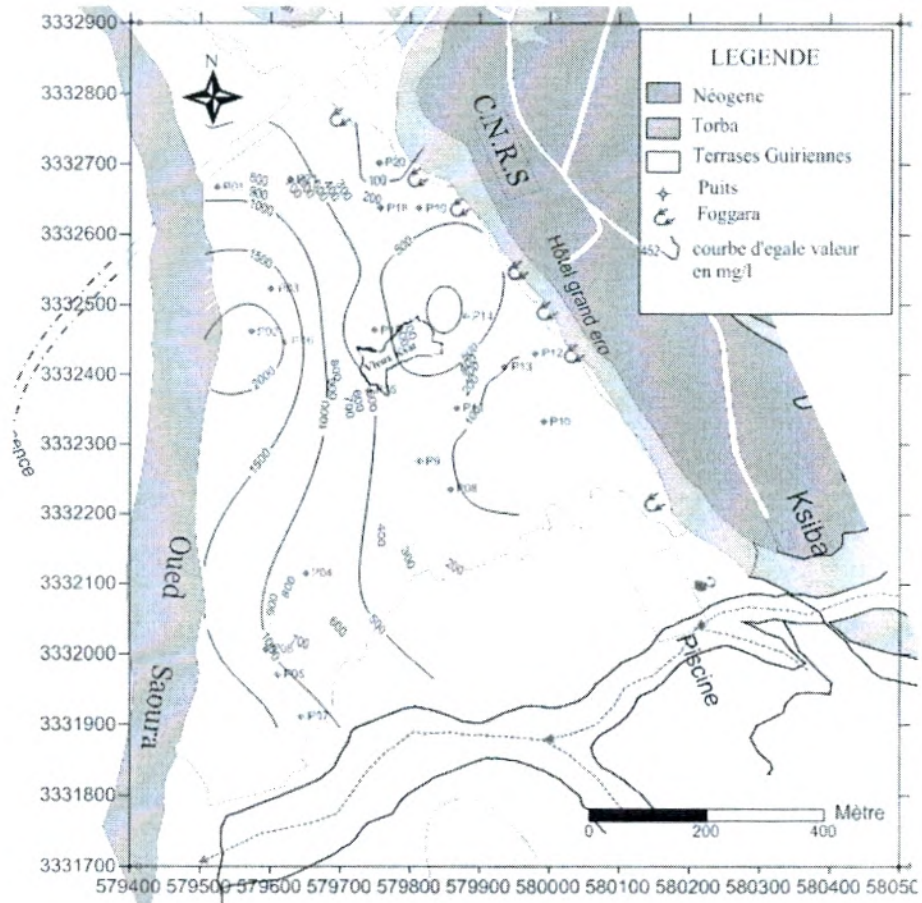
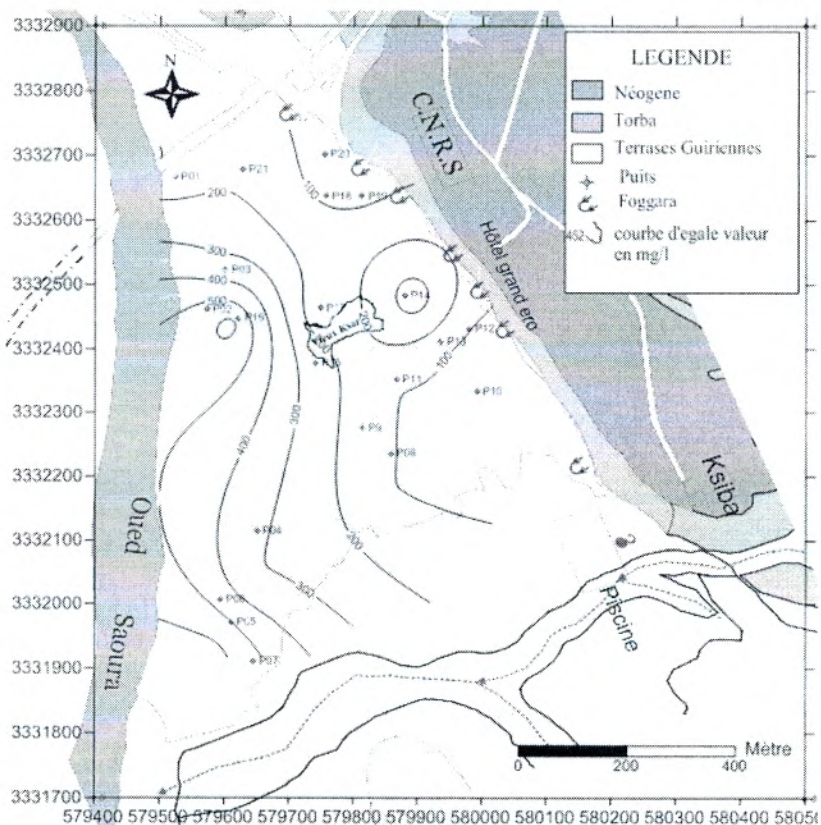
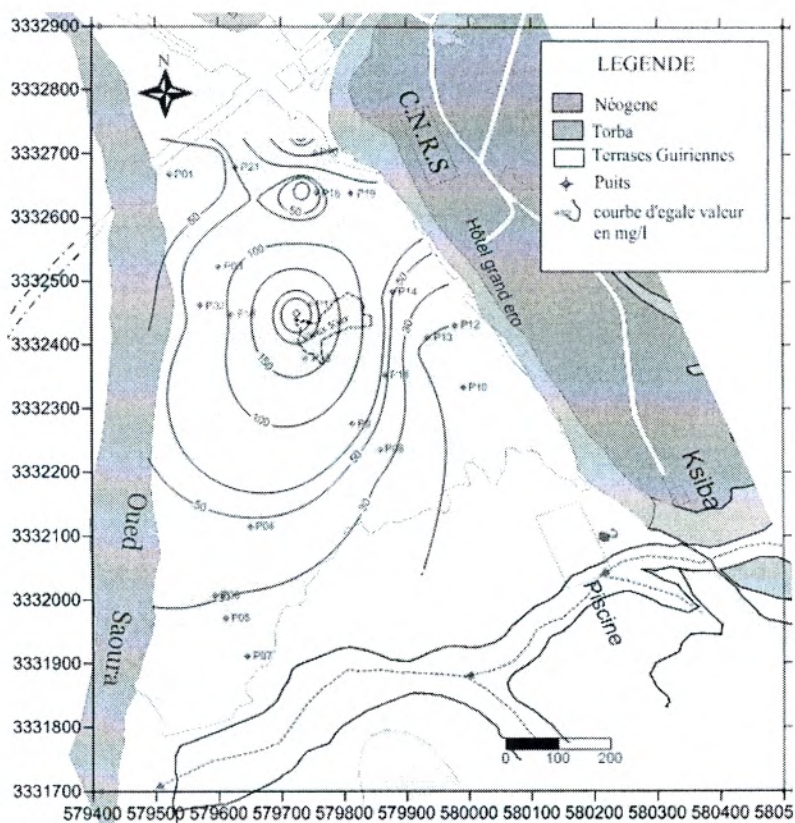


Figure 43 (a): Carte d' isoteneurs des eaux de la palmeraie (Chlorures et Calcium)



Mg⁺⁺ en mg/l



K⁺ en mg/l

Figure 43 (b): Carte d' isoteneurs des eaux de la palmeraie (Potassium et Magnésium)

2. 2 Faciès chimiques et familles d'eaux

2. 2 1 Représentation graphique selon Scholler et Piper (Fig.44)

Au cours de leur trajet, les eaux voient leur faciès évoluer par suite des phénomènes modificateurs. Nous les avons classées en familles, en fonction de leur composition chimique et en utilisant les diagrammes logarithmiques mis au point par **H. Scholler** et piper

a) Eaux des terrasses 3 :

Faciès sulfato- sodique (60% des échantillons):

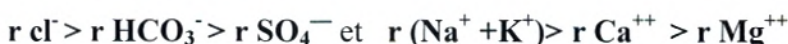
La formule caractéristique dans les terrasses 1 (près de l'oued) :



b) Eaux des terrasses 2 (au centre de la palmeraie)

Faciès chloruré sodique (10 % des échantillons):

De formule caractéristique :



c) Eaux des terrasses 1 (près de l'erg):

Faciès Bicarbonaté calcique (30 % des échantillons):

La formule caractéristique :



Faciès Chloruré- Calcique (10 % des échantillons):

La formule caractéristique :



d) Eaux d'inféro- flux: les familles caractéristiques permettent de classer les eaux de cette nappe dans le type chlorure sodique,



Les eaux de la nappe de l'erg sont sulfatés 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.

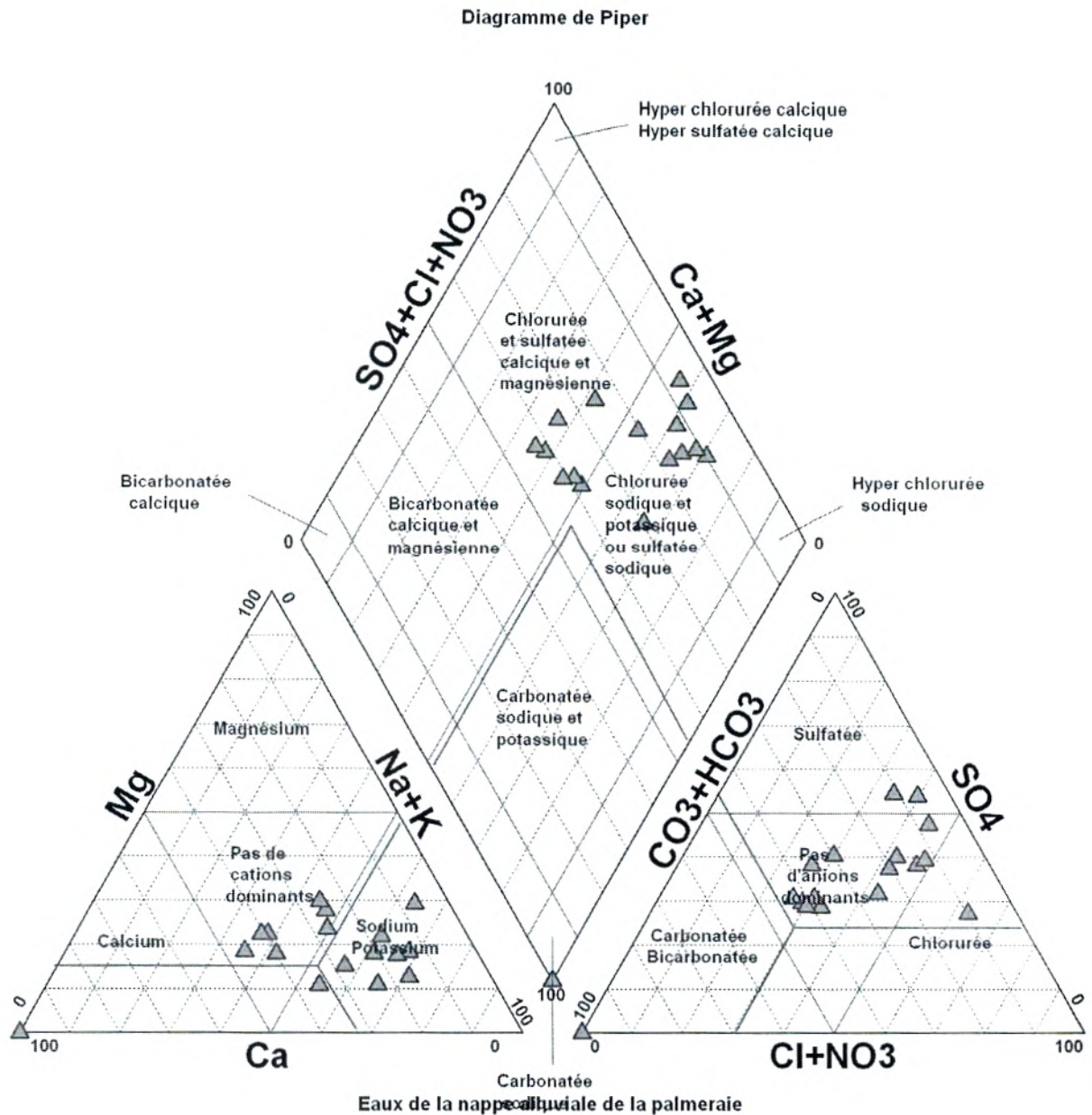


Figure 44: Représentation graphique selon Piper des eaux de la palmeraie.

2. 2. 2 Potabilité des eaux:

Pour apprécier la potabilité des eaux de chaque nappe, nous nous référons au diagramme de Scholler, (Fig.41.) L'utilisation de ce diagramme 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 45, montre que les eaux de la zone trois (de l'inféro-flux) présentent de qualité de non potabilité.

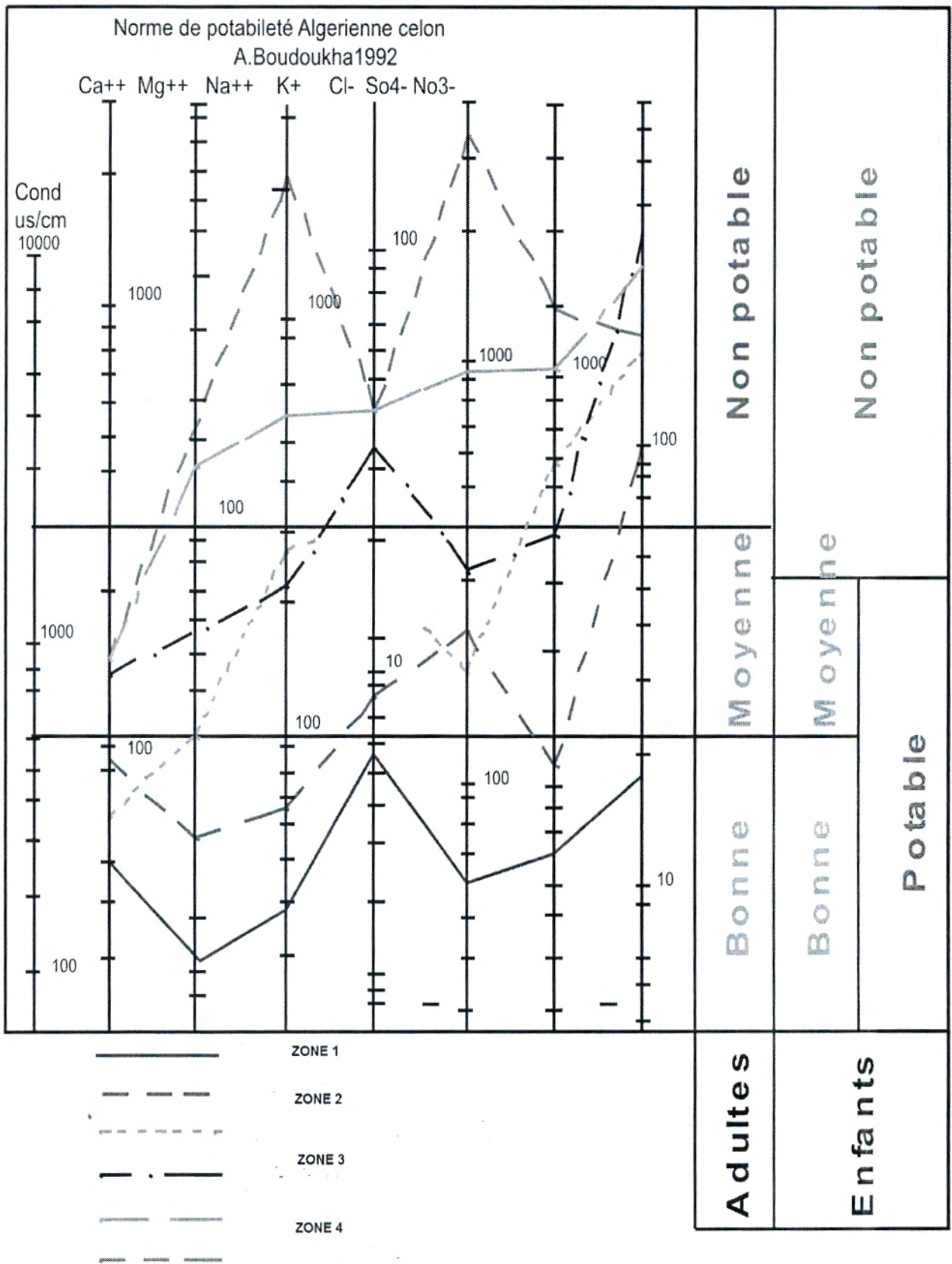


Figure 45: Diagramme du Scholler de la potabilité des eaux de la palmeraie de Béni Abbès.

2. 3 Etude des rapports caractéristiques

Tableau 13 : Les rapports caractéristiques

Nom	Cl/Hco3	rSO4/Cl	Mg/Ca	Cl/Na
P01	3,28	0,81	0,471	1,556
P02	6,39	0,43	0,781	1,667
P04	2,37	0,96	4,274	1,6
P06	5,99	1,05	1,277	1,583
P08	0,79	0,95	0,866	1,676
P10	0,54	1,33	0,406	1,701
P11	0,73	1,09	1,093	1,643
P12	0,53	1,36	0,566	1,555
P13	0,67	1,05	1,182	1,615
P14	6,02	1,40	0,544	1,538
P16	2,95	1,67	1,336	0,391
P17	0,92	1,46	1,088	1,56
P18	0,61	1,76	0,551	1,632
P19	0,54	1,33	0,406	1,701
P20	1,46	1,24	0,307	4,626
P21	3,60	0,90	0,874	1,651
P22	1,64	0,76	0,449	2,3

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.

Les résultats des rapports caractéristiques chimiques confirment un écoulement lent des eaux de la nappe alluviale.

2.4 Qualité de l'eau dans la palmeraie à différentes périodes : Des présentations géographiques sont utilisées afin de mettre en valeur le phénomène de la propagation de la salinisation dans les nappes :

➤ **Dans le passé En 1966**

Les travaux entrepris par M. Roche 1966, permettent de constater que la vallée de la Saoura était gorgée d'eaux douces, dont la teneur en résidu sec varie entre 500 et 2000 mg/l. (fig. 42)

En détail nous remarquons que l'inféro-flux montre un enrichissement relatif par rapport aux eaux de la Grand Source.

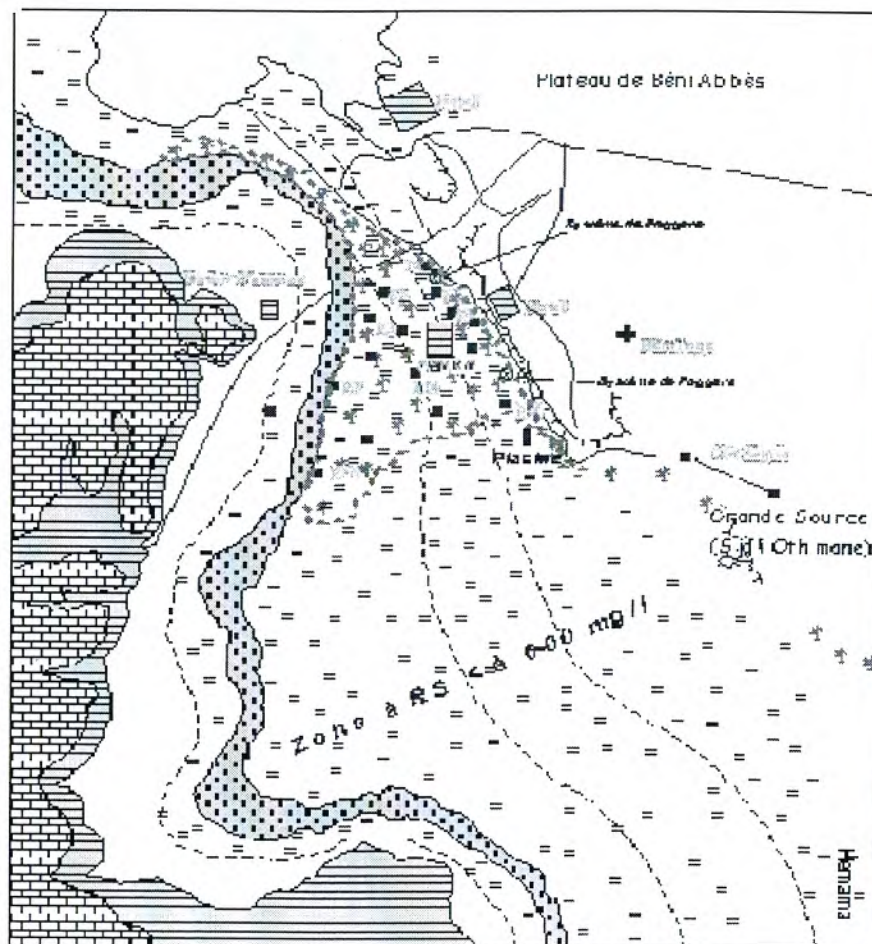
➤ **Etat actuel, de 2006 jusqu'à 2008:** la palmeraie a été subdivisée en trois zones de taux de salinité différentes, correspondant aux trois terrasses alluviales. Une zone fortement salée près de l'oued, une autre à salinité moyenne au centre, et une tertiaire à faible salinité à proximité de l'erg (fig.46.)

Zone 1 : $RS < 600$ mg/l

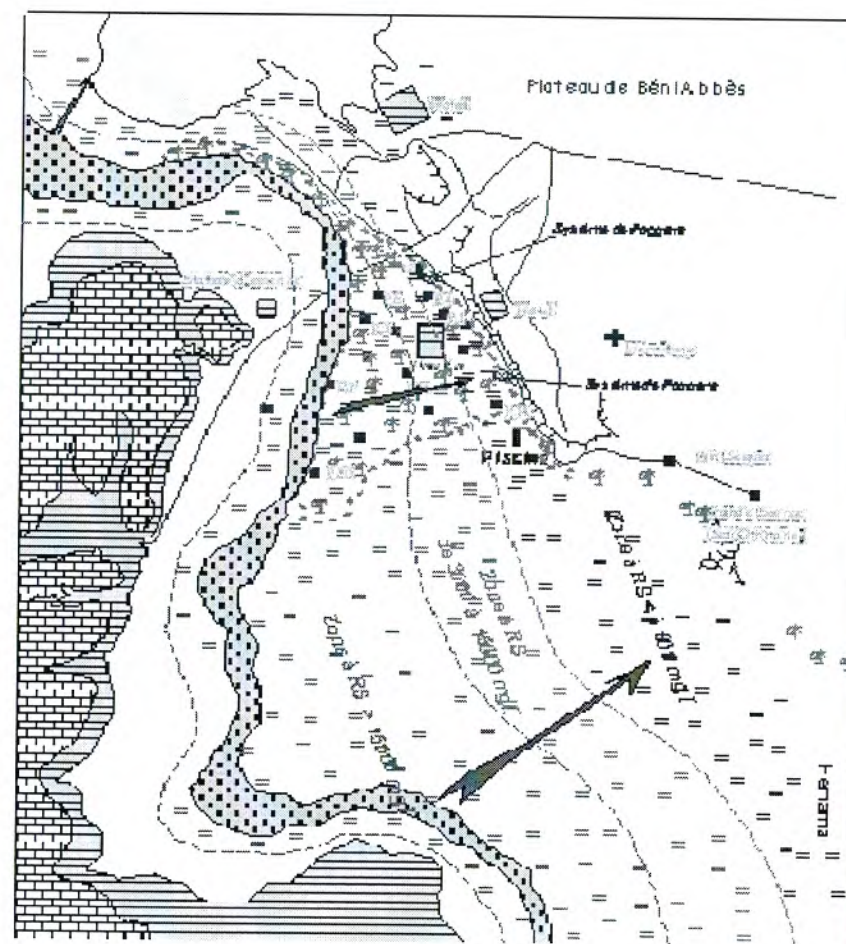
Zone 2 : $600 < RS < 3000$ mg/l

Zone 3 : $3000 < RS < 15000$ mg/l

Zones 4 : > 15000 m/g c'est les eaux de l'inféro- flux.



(a) La palmeraie en 1966



(b) La palmeraie en 2006

Figure 46 : État des eaux de la palmeraie (Merzougui et al, 2007)

On remarque que les eaux d'inféro-flux la zone près de l'oued sont hypersalées avec une teneur de 3000 à 15000 mg/l en résidu solide. Les eaux des terrasses 2 sont salées avec un résidu solide de 15000 mg/l. la zone près de l'erg gardent encore une eau douce (inférieur à 600 mg/l en résidu solide).

La surexploitation des puits au niveau de la zone du centre, accentue les phénomènes de salinité et ne peuvent pas satisfaire les besoins en eau d'irrigation de la palmeraie.

3. Système aquifère et évolution hydrochimique

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 et 2008 (tab.20).

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 la nappe des terrasses, 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 3, deux fois dans les terrasses 2 et 1.5 fois au niveau des terrasses 1.

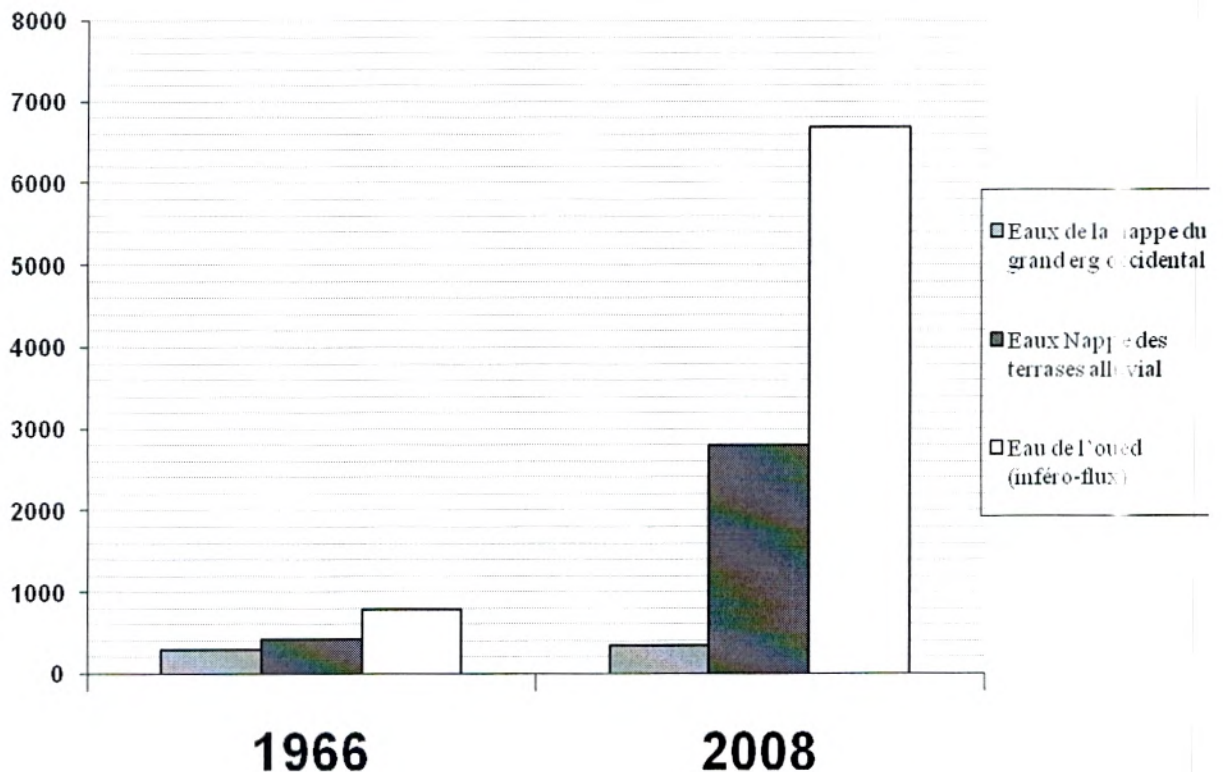
Les eaux de la nappe du Grand Erg occidental et de la Hamada du Guir, présentent une modeste évolution chimique, elles se caractérisent par un pH neutre et des teneurs en minéralisation très faible. En revanche, selon leur disposition par rapport à l'axe de l'Oued, les nappes des terrasses et inféro-flux, montrent une évolution alarmante. (fig.47).

En 1966 (fig.46-a); Seul l'inféro-flux, montre une teneur en résidu sec de 5,1 g/l. Au niveau des différentes terrasses cette concentration n'excède pas la valeur de 2 g/l.

En 2005 (Fig. 46-b) ; les eaux des terrasses et de l'inféro-flux se chargent d'avantage en résidu sec de 4 à 20 g/l.

Tableau 14 : caractéristiques Hydrochimiques des différentes nappes du de Béni Abbès.

Groupe d'eau	Année	pH	Res. sec mg/l	Ca ⁺⁺ mg/l	Mg ⁺⁺ mg/l	Na ⁺ mg/l	K ⁺ mg/l	Cl ⁻ mg/l	SO ₄ mg/l	HCO ₃ mg/l
Eaux de nappe du grand erg occidental	1966	7.6	530	75	30	50	15	90	600	285
	2005	7.7	556	96	27	40	10	80	850	310
	2008	7,5	300	48	33	28	5	45	120	119
Eaux nappe des terrasses alluvials 1	1963	7.5	625	110	40	90	12	85	900	400
	2005	7.4	862	98	39	78	09	220	123	76
	2008	7,19	960	138	56	97	10,5	165	220	308
Eaux nappe des terrasses alluvials 2	1963	7.5	430	100	40	100	30	300	350	350
	2005	7.7	3250	180	78	205	45	320	359	-
	2008	7,09	8050	473	632	2300	70	900	1500	305
Eaux nappe des terrasses alluvials 3	1963	7.3	2000	120	45	280	50	210	290	300
	2005	7.2	15000	400	1076	2500	230	8000	1630	400
	2008	6,8	9245	516	659	1800	26	2850	3000	476
Eaux nappe de l'inféro-flux	1963	7.5	5802	148	52	95	15	180	220	400
	2005	7.1	20587	1100	1076	3380	230	8400	2230	100
	2008	7.2	15587	2100	1080	2380	300	7400	3230	440

**Figure 47** : Evolution du résidu sec des eaux des nappes de la région de Béni Abbès

3.1 Evolution de la salinité de la nappe de la palmeraie (Fig.48)

D'après (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 dépassent 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 deviennent 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, jouent un rôle important dans la recharge de la nappe alluviale.

Cette forte salinité peut 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.

Avec la cartes de 2008 on peut identifier trois zones de salinité, de la moins concentrée (0,3à 3g/l) au centre de la palmeraie (3à 7g/l) à la plus concentrée (20 g/l) au Sud Ouest (près de l'oued)

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, entraîne 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 du à la recharge latérale régulière par le drain naturel d'une part, et par la recharge artificiel des eaux d'irrigations de la grande source de bonne qualité d'autre part.

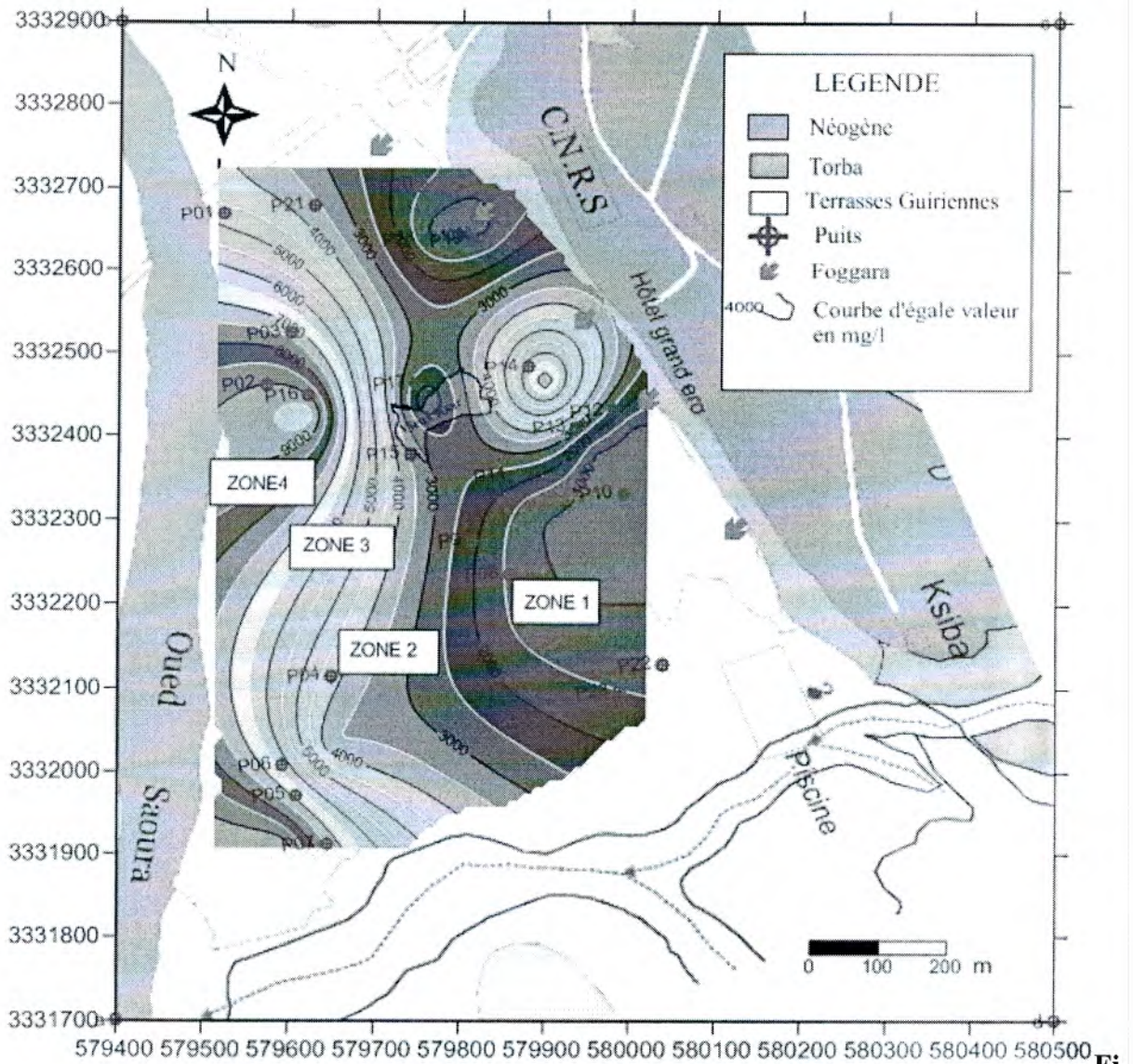


Figure 48 : Carte de zonage selon la salinité des eaux de la nappe de la palmeraie 2008.

3.2 Origine de la salinité de l'aquifère alluviale de la palmeraie

Des campagnes de mesure de la salinité à différents horizons ont été effectuées dans les zones 1, zones 2 et zone 3 ainsi que l'inféro-flux (Fig.48)

- Zones 1 : une eau de bonne qualité, passe de 1g/l à 2g/l.
- Zones 2 : la salinité évolue de 2g/l à 5g/l, contient une eau de qualité moyenne.
- Zones 3 : une eau de qualité médiocre. La salinité est très évoluée de 5g/l à 15g/l.
- Zone 4 de (Inféro- Flux): une eau de mauvaise qualité chimique. La salinité dépasse la valeur 15g/l.

La salinité est donc plus importante au fond de la vallée (oued), qu'en amont de la nappe près du talus hamadien ce qui confirme l'intrusion du biseau salé observée le long de la nappe de l'inféro-flux à la lisière de l'oued.

L'interprétation des analyses chimiques par la méthode de Piper montre en outre que la plus part des échantillons d'eau de la zone numéro un de la première terrasse une et de l'infé- flux sont chlorurés sodiques, ce qui est cohérent avec l'hypothèse de la salinisation de l'aquifère par l'avancé de l'infé- flux vers les trois terrasses un, deux et trois.

Conclusion

L'étude physico-chimique des eaux de la palmeraie de Béni Abbès montre que 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 Abbès, sont chlorurées sodiques et calciques parfois bicarbonatés calciques et magnésiennes. 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'isoteneurs 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.

Chapitre 6

Modélisation hydrodynamique

Introduction

Une modélisation hydrodynamique de la nappe de la palmeraie va permettre de comprendre le fonctionnement hydrodynamique de l'aquifère en estimant les échanges latéraux de la nappe alluviale avec la nappe de l'erg et l'oued Saoura.

Les objectifs de cette modélisation sont la connaissance de la distribution des perméabilités et des coefficients d'emménagement et la réalisation des simulations serviront plus tard à la gestion et la protection des ressources en eau. La modélisation du système doit permettre d'explorer ses tendances d'évolution et de simuler des scénarios d'intervention. Elle constitue une base essentielle pour orienter l'exploitation pour une gestion efficace de l'eau dans les milieux oasisien et 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 et une préservation de la palmeraie et à équilibrer les différents usages pour garantir un développement durable.

A partir de ce modèle, on va représenter d'une manière simplifiée le système aquifère local, on va aussi représenter l'écoulement souterrain dans le sous sol, visualiser la situation de l'aquifère en temps réel et effectuer des prédictions à long terme.

1. Méthodologie des modèles de simulation

1.1 Les modèles mathématiques en hydrogéologie

Ce sont des modèles de nappes qui constituent l'outil le plus efficace et qui apparaissent de plus en plus souvent comme l'objectif final de toute étude. Ces modèles permettent d'améliorer la connaissance fondamentale des circulations d'eau souterraines dans une formation aquifère, de dégager les règles pratiques utiles dans la perspective d'un projet d'exploitation rationnelles des ressources en eau et simuler la propagation des polluants.

Ces modèles sont décrits de manière détaillées dans de nombreux ouvrages (Kinzelbach, 1998 ; Bear et all, 1990 ; DeMarsily)

1.2 Théorie sur la modélisation mathématique

1.2.1 Principes de discrétisation

On utilise généralement un découpage de l'aquifère à étudier en mailles homogènes de formes variables dans lesquelles les différents éléments caractéristiques ont des valeurs moyennes :

Transmissivité – T –

Coefficient d'emménagement – S –

Débit prélevé ou injecté – Q –

Infiltration par la pluie efficace – Inf –

Niveau piézométrique ou charge – H –

On applique à chaque maille les lois fondamentales de l'hydrodynamique. On mène les calculs d'une maille à l'autre par approximations successives de manière itérative. Partant d'un état initial des charges dans les mailles, on les recalcule les unes après les autres plusieurs fois avec les charges des mailles voisines et les conditions de débit, d'infiltration et de charges imposées dans certaines mailles situées en limite. On arrête les itérations lorsqu'on obtient une quasi stabilisation des charges calculées dans toutes les mailles.

Il est possible, au cours du calcul, de tenir compte des variations de transmissivité avec la hauteur d'eau (nappe libre), de l'assèchement ou du débordement en d'autres points (rivières, gravières, etc....).

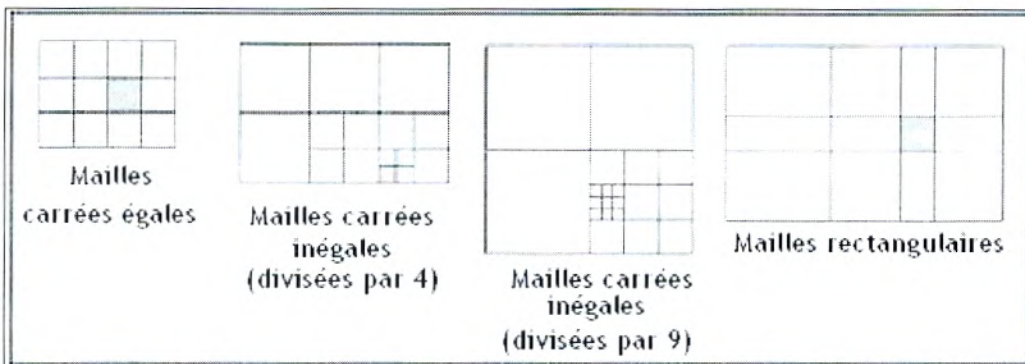


Figure 49 : Taille et forme des mailles (Roche, 2005)

La taille des mailles dépend de plusieurs facteurs :

- De la précision souhaitée sur les calculs,
- Des contours plus ou moins sinueux des limites,
- Du nombre et de l'éloignement des singularités (puits),
- Mais aussi de la capacité de l'ordinateur.

Il est évident que pour une même précision il y aura un plus grand nombre de mailles carrées égales que de mailles inégales, choisies plus petites dans les zones sensibles. Mais un modèle à mailles égales est beaucoup plus facile à utiliser. Suivant le problème, la dimension des mailles peut être de l'ordre de 5 mètres (pour l'étude d'une digue ou d'un champ captant) à 5 Km (pour l'étude d'une nappe régionale). En pratique, on essaiera de limiter le nombre de mailles à une valeur comprise entre 1000 et 10000 mailles (par couche).

1.2.2 Formulations mathématique

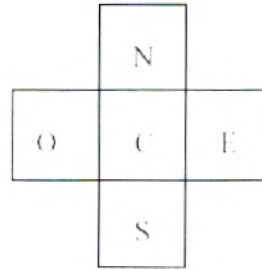
1.2.2.1 Les équations

Pour toute modélisation de la nappe de type déterministe, trois lois physiques élémentaires sont strictement nécessaires : loi de conservation de la masse, loi de Darcy, et les équations d'état.

L'intégration des trois équations élémentaires de la circulation de l'eau en milieu poreux, se combinent pour donner l'équation de diffusivité (Bonnet, 1983)

On peut appliquer les lois fondamentales de l'hydrodynamique directement à tout élément d'aquifère qu'on considère comme homogène et donc aux mailles.

La discrétisation se fait généralement par la méthode des différences finies. Si les mailles sont carrées l'équation de l'hydrodynamique en régime permanent avec les hypothèses de Dupuit (vitesses horizontales) décrit le fait que le bilan d'échange est équilibré (Roche, 2005). On a alors :



$$Q + Inf + \sum T_{Ci} (H_i - H) = 0$$

Avec

T_{Ci} Transmissivité entre les mailles C et i.

L'équation d'équilibre à laquelle obéit toute maille est :

$$A \cdot S (H_{t+dt} - H_t) / dt = Q + Inf + \sum_{i=1}^4 T_i (H_{t,i} - H_t)$$

Avec :

A : aire de la maille (=dx² pour une maille carrée de côté dx) ;

S : coefficient d'emménagement (libre ou captif, suivant le cas) ;

H_t : charge à la date t ;

t : temps ;

dt : pas de temps ;

i : numéro de la maille Nord, Sud, Est et Ouest ;

Inf : infiltration.

1.2.2.2 Méthode de résolution

Pour que les équations aux dérivés partielles (équation de diffusivités) admettent une solution unique, il faut tout d'abord, définir le domaine d'étude, affiner le mieux possible les paramètres structuraux caractérisant le système et déterminer les conditions initiales, avec une piézométrie mesurée, de référence et les conditions aux limites. Deux méthodes de résolution peuvent être alors utilisées selon le choix des fonctions d'approximation et le type de maillage :

La méthode des éléments finis est utilisée lorsque les fonctions d'approximations sont polynomiales de degré supérieur ou égale à 1, et le maillage est triangulaire.

La méthode des différences finies est utilisée lorsque l'on choisit des fonctions constantes (polynôme de degré zéro), pour une fonction d'approximation et les mailles sont rectangulaires ou carrées.

Dans tous les cas des deux méthodes, on abouti finalement à un ou plusieurs systèmes d'équations linéaires qui admettent comme inconnues, les valeurs approchées de la fonction recherchée (charge hydraulique), en un nombre de données de point (nœuds des mailles).

Notant bien que la méthode des différences finies, est la plus réponde en hydrogéologie (LEDOUX, 1986)

En pratique les calculs se font par approximations successives. Partant d'un état initial des charges dans les mailles, on les recalcule toutes, les unes après les autres plusieurs fois, à partir des équations précédentes avec les charges des mailles voisines et les conditions de débit, d'infiltration et de charge imposée aux limites. On arrête le calcul lorsqu'on obtient une quasi stabilité des charges recalculées.

On peut tenir compte au cours du calcul des variations de transmissivité avec la hauteur d'eau (eau de nappe libre), de l'assèchement ou du débordement en certains points.

Les calculs en régime transitoire se font également par approximations successives avec un découpage en intervalles (subdivisions des pas de temps) en partant d'un état équilibré.

Pour toutes les méthodes de résolution, on donne sur la périphérie du modèle étudié (qui forme les limites du modèle) :

- Soit les niveaux : le modèle calcule alors les débits qui transitent par cette limite,
- Soit une perméabilité nulle : c'est une limite imperméable,

Soit (plus rarement) un débit d'échange imposé (entrant ou sortant).

1.2.3 Estimation des paramètres - Calibration

Dans la plupart des cas d'étude, la connaissance quantitative des propriétés de l'aquifère est le problème majeur lors de l'élaboration d'un modèle, à cause de l'insuffisante connaissance quantitative de la géologie, de l'hydrogéologie et des paramètres hydrodispersifs du milieu étudié. Ces constatations démontrent l'obligation de vérifier si les résultats d'un modèle sont réalistes ou non par rapport à la réalité. Cette procédure appelée calibration consiste à minimiser la différence entre 'mesures et résultats' par l'ajustement des données d'entrée (une période du passé dont les conditions initiales, les sollicitations et la réponse du système sont mesurées) jusqu'à ce que le modèle reproduise les conditions du champ mesuré avec un niveau de précision acceptable. (DASSARGUES, 1995)

1.2.4 Exploitation du modèle - Simulation

Après la calibration, le modèle est prêt à l'emploi pour des prévisions. Il a la capacité de calculer des extrapolations dont les résultats constituent une aide précieuse lorsque des décisions concernant des modifications de sollicitations de l'aquifère sont à prendre. Parmi les applications possibles des modèles d'écoulements (DASSARGUES, 1995) :

1.2.4.1 Etudes de bilans

Détermination des tendances régionales des écoulements dans le réservoir et les interactions avec les eaux de surfaces, les autres réservoirs, ... etc.

1.2.4.2 Puits de pompage

- Prédiction des effets du pompage sur la piézométrie et sur la suppression de certains flux ;
- Détermination de périmètres de protection ;
- Prédiction du mouvement de l'interface entre eau douce et eau salée ;
- Prédiction de l'effet de l'épandage d'eau pompée lors de l'irrigation.

1.2.4.3 Changements dans la réalimentation de la nappe

- Prédiction des effets dus à l'urbanisation ;
- Prédiction des changements résultants de l'irrigation ou de l'infiltration en provenance d'un nouveau canal ;
- Analyse à long terme des influences des tendances climatiques sur les niveaux piézométriques et la distinction des effets dus aux facteurs anthropiques..

1.2.4.4 Estimation des paramètres

Précision de la distribution régionale des paramètres hydrogéologiques.

1.2.4.5 Planning des mesures in situ

Rationalisation dans la collecte ultérieure des données par détermination des mesures les plus nécessaires.

1.2.4.6 Gestion des eaux souterraines

- Planning idéal d'exploitation des ressources ;
- Stockage souterrain saisonnier d'eaux de surface.

Toute mesure de sauvetage ou de prévision doit être précédée d'une excellente compréhension des conditions existantes. Les modèles mathématiques fournissent un moyen d'intégrer les paramètres d'un tel problème. Ils constituent un outil indispensable pour guider l'interprétation et la ligne de conduite à appliquer dans les cas d'étude.

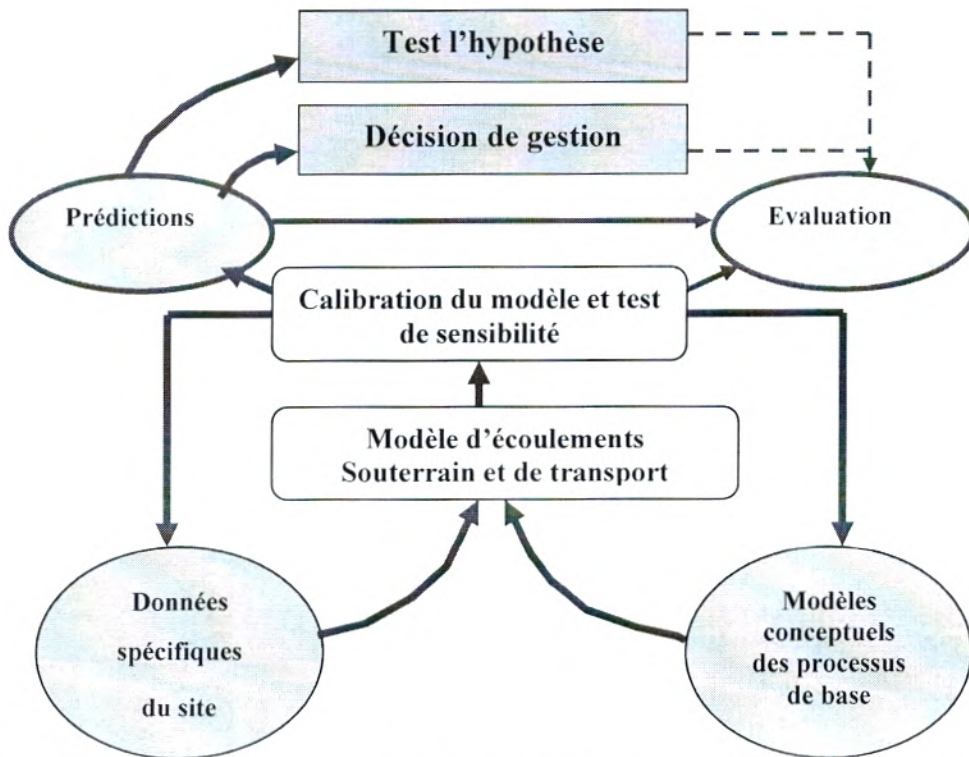


Figure 50: Utilisation et rôle des modèles dans la résolution des problèmes hydrogéologiques (Konikow, 2000).

1.3 Les étapes d'élaboration d'un modèle

1.3.1 Introduction des données

Après avoir défini les conditions initiales et les conditions aux limites, et après avoir procédé à la discrétisation du domaine à modéliser en un certain nombre de mailles, nous introduisons pour chaque maille les données physiques du système (cotes piézométriques de la carte qui servira de référence, la cote du toit, du substratum, paramètres hydrodynamiques ou hydro dispersifs...).

1.3.2 Calage du modèle

Le but de cette phase est de reconstituer la variation des paramètres de l'aquifère, en utilisant le modèle pour, affiner ces paramètres, c'est à dire, en minimisant les écarts entre les réponses du modèle (calculées) et les réponses du système (observées). Ce calage est important car il va permettre de réaliser par la suite des simulations sur le domaine étudié.

1.3.3 Exploitation du modèle

C'est l'étape finale et plus importante où le modèle révèle toute son utilité, son intérêt principal, c'est de pouvoir faire des prévisions des réactions hydrodynamiques futures du système aquifère à des scénarios d'aménagement éventuels (exploitation, sécheresse, recharge...) ou d'élaborer des simulations de la propagation des polluants dans la nappes.

1.3.4 Type d'erreur

D'une manière générale, il existe quatre types d'erreurs, qui sont liés à l'utilisation des modèles mathématiques :

Les erreurs de données, qui sont liées à une mauvaise connaissance des conditions initiales et des conditions aux limites régissant les écoulements souterrains.

Les erreurs de conception, qui sont incontournables, dues à une mauvaise formulation du modèle, qui engendre une utilisation non appropriée de celui-ci.

Les erreurs de troncatures, induites par l'utilisation d'un maillage qui ne tient pas compte des données disponibles (maillage trop fin ou trop grand), et par les méthodes de résolution de lois physiques régissant les écoulements souterrains (méthodes des éléments fins et méthodes des différences finies)

1.3.5 Conditions initiales et conditions aux limites

Les conditions aux limites concernent les règles d'échange des flux d'eau ou de la matière entre le domaine modélisé et le milieu extérieur. La détermination de ces conditions est nécessaire pour résoudre l'équation de la diffusivité.

1.3.5.1 Conditions initiales

Elles sont définies par la valeur de la charge h connue en tout point du domaine modélisé à un temps de référence $t=0$.

1.3.5.2 Conditions aux limites

On connaît quatre types de conditions aux limites (DE.MARSILY, 1998).

a) limite à potentiel imposé (condition de Dirichlet) : c'est une limite le long de laquelle la charge hydraulique est indépendante des conditions de circulations de la nappe. Ce sera généralement le contact d'une nappe avec un plan d'eau libre (mer, lac, oued...).

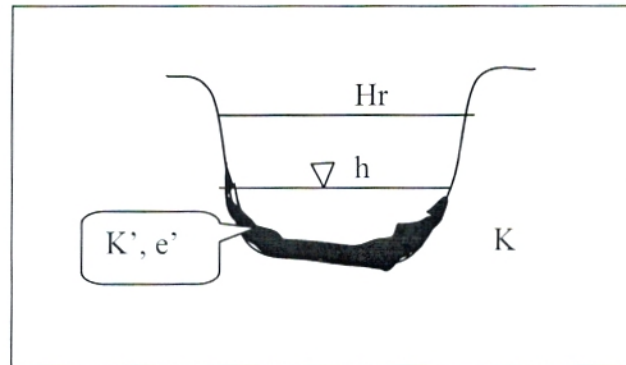
b) limite à flux d'eau imposé (condition de Neuman) : Le débit par unité de surface est constant ou nul le long d'une limite à flux imposé. On distingue les limites à flux nul (contact de l'aquifère avec une formation imperméable), et les limites à flux imposé non nul, qui sont matérialisées par les limites du domaine ou les ouvrages de captages

c) condition de Fourier : C'est le cas d'un oued dont le fond est colmaté et qui est en communication avec une nappe libre (drainage ou alimentation), par conservation du flux à la traversée de l'interface, la condition de Fourier s'écrit :

$$-K = \left(\frac{\partial h}{\partial n} + hK' \right) / e' = \frac{K'}{e' J r}$$

(n : Normale à la surface de constante)

d) Condition de surface libre : Deux conditions définissent une surface libre :



e)- Condition du potentiel : c'est la pression atmosphérique qui s'exerce sur tout point M de la surface libre exprimé en charge, elle est égale par convention à zéro et on écrit :

$$h_M = z_M$$

1.3.5.3 Conditions de flux

* si la nappe n'est pas alimentée par sa surface, le flux est nul et il s'écrit : $dh/dn=0$.

* si un flux (alimentation ou évaporation) traverse la surface libre de la nappe, on a : $dh/dn=a$

n : normal orienté vers l'extérieurs.

a : est positif ou négatif (flux entrant ou sortant)

2 .Modélisation hydrodynamique de la nappe alluviale de la palmeraie de Béni Abbès

Toute étude par modèle débute par une phase dite de « collecte » des données qui a pour objectifs :

- De réunir l'ensemble des données disponibles sur le système
- De les critiquer tant en ce qui concerne leur précision qu'en ce qui concerne leur nature et donc leur usage possible à un des stades de l'étude envisagée
- De les présenter sous forme la mieux adaptée à cet usage

En ce qui concerne les données à considérer classées sont d'ordre : Géologique, hydrodynamique, hydrologique et climatique (Bonnet, Clouet D'orval, 1968-1969).

Pour la présentation synthétique des données, un moyen particulièrement bien adapté reste l'expression cartographique. Elle permet évidemment de bien représenter toutes les données spatiales objectives nécessaires à la caractérisation des modèles utilisables pour simuler le système.

2.1 Choix du logiciel de simulation et description du modèle

Le modèle numérique basé sur les méthodes des éléments finis ou, celle des différences finis, sont théoriquement très puissants en ce qui concerne les possibilités de représentation des systèmes réels et les conditions aux limites, qui peuvent y être appliquées (Mailloux et al 2002)

Notre choix s'est porté sur le programme de modélisation ASMWIN, (Aquifer Simulation Model) qui est l'implémentation complète d'un modèle d'eaux souterraines bidimensionnel de simulation hydrodynamique en milieu aquifère continue par la méthode de différences finis. Il a été initialement développé par (Kinzelbach et Rausch, 1995) comme un outil pédagogique à l'intention d'étudiants en hydrogéologie, ingénierie civile et environnementale. Ce logiciel a pour qualité première d'être simple et modulaire.

L'interface graphique permet de créer et de simuler facilement des modèles. Elle peut manipuler des modèles comportant jusqu'à 150 par 150 mailles et 1000 périodes de temps (intervalles de pompage). ASMWIN peut tracer des cartes d'isovaleurs et des tracés colorés des données d'entrée et des résultats de simulation. Des graphiques pouvant être intégrés dans des publications peuvent être sauvegardés sous une large gamme de formats parmi lesquels SURFER, DXF, HPGL et BMP (Windows Bitmap).

Les outils de modélisation comprennent un extracteur de résultats, un interpolateur de champ, un générateur de champ, un estimateur de bilan hydrique et un visualiseur de graphiques. L'extracteur de résultats permet à l'utilisateur d'extraire les résultats de simulation de n'importe quelle période et de les diriger vers une feuille de calcul. Les résultats peuvent alors être examinés ou sauvegardés dans des fichiers de données ASCII ou compatibles avec SURFER.

L'estimateur de bilan hydrique calcule non seulement le bilan de zones définies par l'utilisateur mais aussi l'échange de flux entre de telles zones. Il permet à l'utilisateur de déterminer le flux à travers une frontière particulière.

2.1.1 Maillage et discrétisation de l'espace modélisé

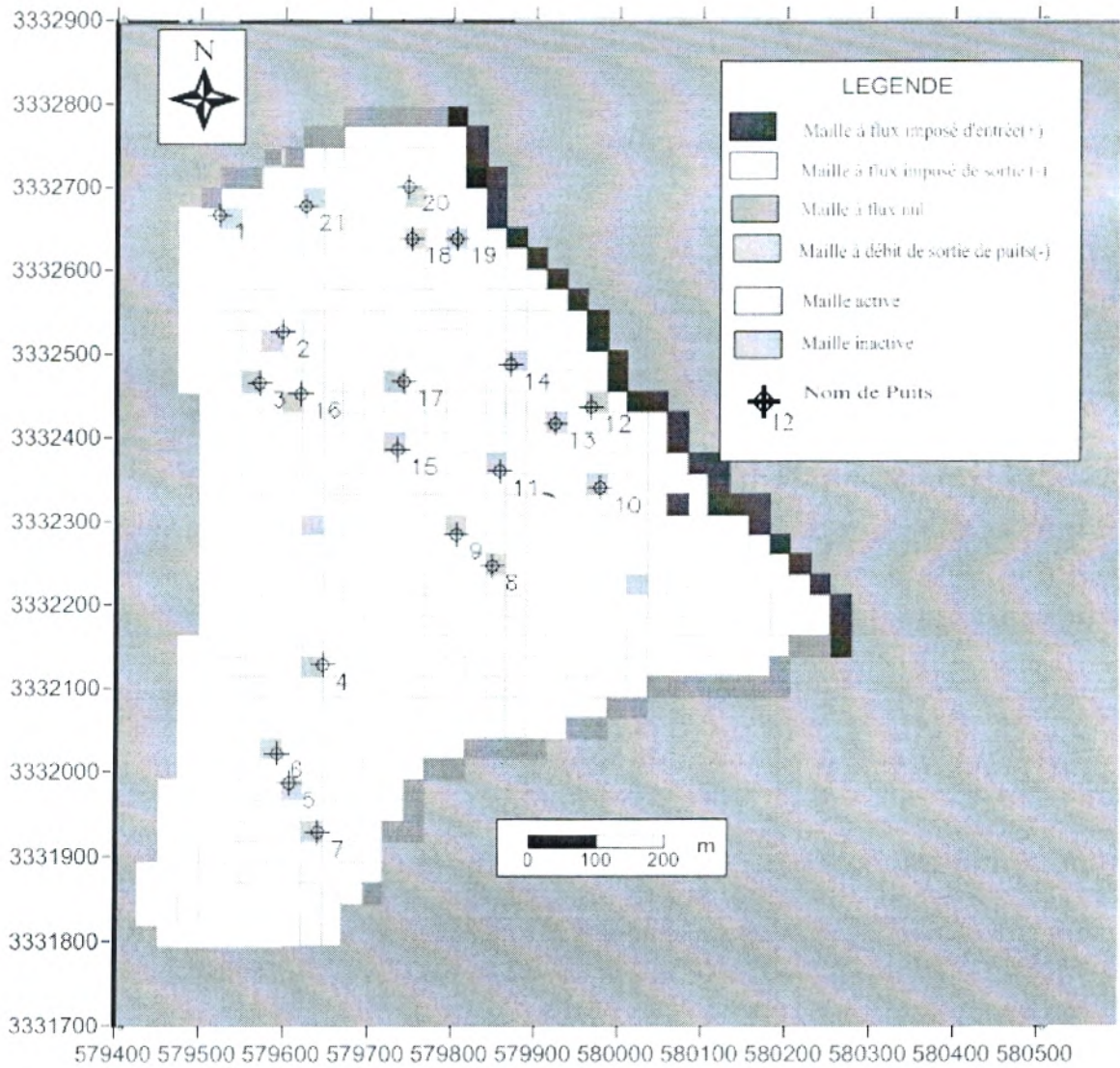


Figure 51: Discretisation et conditions aux limites du modèle.

Le fond de la carte servant de référence pour le modèle est obtenu par la numérisation de la carte topographique au 1/1000^{ème}. Pour la discrétisation spatiale, nous avons placé sur 1 Km² de la zone, un maillage carré uniforme de 25 m de côté, dont 800 mailles sont actives (Fig.51)

2.1.2 Définition des conditions aux limites

Le remplissage alluvionnaire de la palmeraie de Béni Abbés a été étudié dans sa globalité, il peut être considéré comme monocouche pour le modèle. Les limites du domaine sont précisées par la coupe établie par Roche 1973. Les formations néogènes représentées par la falaise hamadienne du grand erg occidental, dans le cote Est, à l'ouest le remplissage est limitée par les formations néogène de la hamada de Guir;

Les conditions aux limites suivantes ont été imposées (fig.52)

A L'est : limite à flux imposé d'entrée (alimentation de l'erg),

A l'ouest : limite à flux imposé de sortie (oued),

Au sud et au Nord : limite à flux imposé nul

Par ailleurs les débits de sortie en continu ont été imposés aux mailles où existent les pompes. (Fig.48), le débit a été multiplié dans les mailles comportant plus d'un puits.

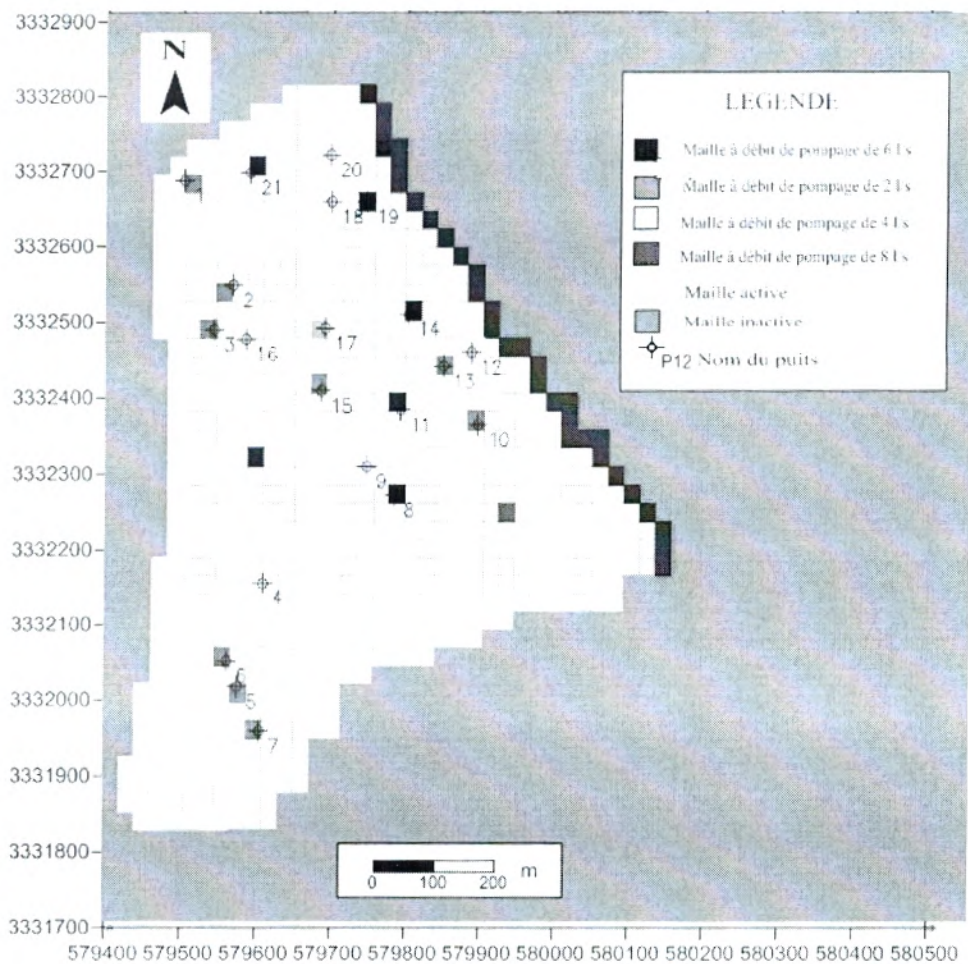


Figure 52 La répartition des débits de pompage des puits de la palmeraie

2.1.3 Paramètres utilisés par le modèle

➤ Les données géométriques

La structure de l'aquifère alluviale de la palmeraie et la nature exacte du réservoir sont connues ponctuellement par un certain nombre de puits et par une campagne de prospection géophysique (méthode électrique). Les coupes du substratum du réservoir sont plissées affectées par des ondulations très nettes de l'erg vers l'oued, augmentant l'épaisseur des terrains aquifères d'une dizaine de mètres alors qu'au centre de la vallée celle-ci dépasse les vingt mètres. Cette connaissance est synthétisée par coupe géologique interprétative (fig. 10, chapitre 4).

Déterminer la géométrie de l'aquifère, revient à bien définir la nature des conditions aux limites de la palmeraie. Au fait ces conditions aux limites contrôlent les règles d'échanges des flux entre le domaine discrétisé et le milieu extérieur. La description des conditions aux limites fait partie de la définition de la structure du modèle et en conditionne par conséquent fortement la validité, car c'est effectivement à travers les limites que s'établit le bilan d'un aquifère. Les relations entre les différentes zones de circulation sont d'un intérêt essentiel pour cerner le fonctionnement du système en entier (De Marsily, 1972; Ledoux, 1986).

➤ Les données hydrodynamiques

Les paramètres hydrogéologiques nécessaires au modèle sont la perméabilité horizontale, la transmissivité et le coefficient d'emmagasinement de l'aquifère alluvial.

Les valeurs initialement introduites proviennent de l'étude hydrogéologique (Chapitre 4). Ces données de perméabilités sont disponibles sous forme de valeurs ajustées et distribuées par zones dans la surface de la palmeraie (Fig.53).

➤ **La Transmissivité** est connue suite à l'interprétation de deux pompages d'essai réalisés dans la palmeraie; elles s'étalent de $1,2 \cdot 10^{-2}$ m²/s à $4 \cdot 10^{-2}$ m²/s. Dans notre démarche, les perméabilités sont calculées en divisant les transmissivités par l'épaisseur saturée de l'aquifère. Le tableau ci-dessous donne les valeurs de ces paramètres.

Tableau .15 Paramètre hydrodynamiques initiaux introduites T

Zones	Transmissivités (T m/s)	Perméabilité (k m/s)	Coefficient d'emmagasinement S%
Valeur 1	$1,1 \cdot 10^{-1}$ - $1,2 \cdot 10^{-2}$	$1,1 \cdot 10^{-1}$ - $12 \cdot 10^{-1}$	5,9
Valeur 2	$2,1 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-2}$	3

Pour le coefficient d'emmagasinement on prend les valeurs de $S= 3\%$, 5.9% et 0.11%

On choisi comme piézométrie initial celle du mois d'avril 2008.

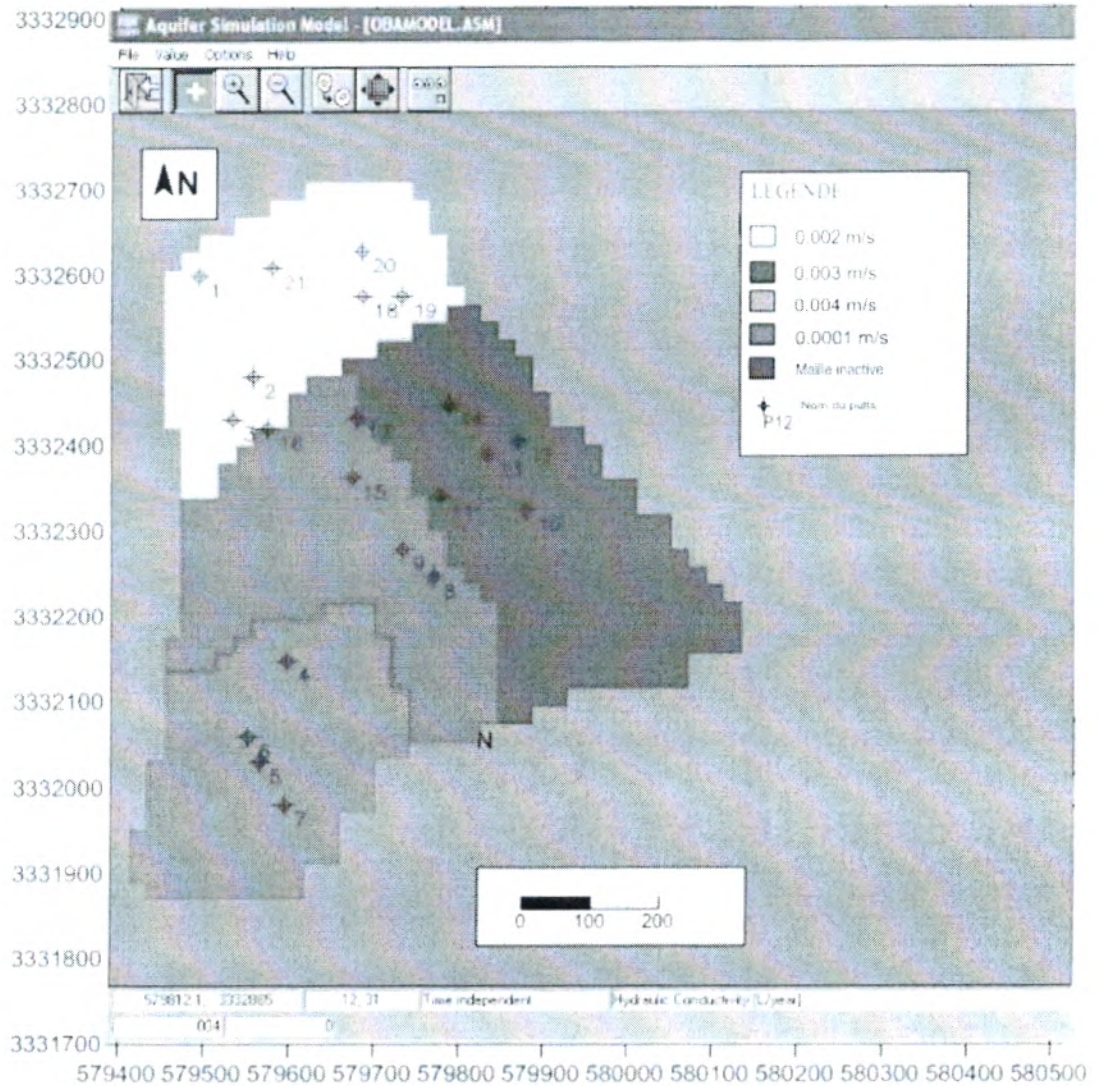


Figure 53 : Répartition des différentes valeurs de perméabilité dans le modèle

2.1.4 Nature et condition aux limites

Le domaine aquifère à représenter sur le modèle, s'étend sur une superficie d'environ 37 Hectare, dont les limites amont et aval sont respectivement le plateau néogène et l'oued Saoura avec pour limites naturelles.

La principale alimentation du système, est constituée par :

- Les apports d'eau de la nappe de l'erg sur tout le front de la palmeraie.
- Une limite principale à flux est matérialisée par l'oued Saoura plus au moins importante

2.1.4.1 Conditions internes

Ce terme désigne, tous les facteurs influençant l'écoulement qui se manifestent à l'intérieur du domaine circonscrit par les limites précédentes. On peut distinguer pour le système considéré

2.1.4.1.1 Conditions de débit

➤ Débit des exurgences

Les débits des sources et foggaras ont été mesurés par débitmètres (déversoir). Les foggaras fournissent un débit de suintement moyen de 0.05 l/s avec un total de 0.5 l/s pour tout le front de la palmeraie il faut noter que presque toutes les foggaras de la palmeraie sont mortes à cause de l'absence de l'entretien de ces ouvrages de captages,

Des mesures annuelles ont été effectuées sur les eaux de la grande source qui irriguent la palmeraie, on a évalué un débit moyen de 8 l/s.

➤ Débit de la nappe

L'évaluation de la ressource repose sur le comportement hydrodynamique. Les paramètres hydrodynamiques de la palmeraie de Béni Abbès ($T=0.02$ et $I=0.03$) nous ont permis d'évaluer le débit d'exploitation et le débit de la nappe de la palmeraie sur un front de 1000 m.

Tableau 16 : débit d'exploitation et évaluation de la ressource

	Débit d'exploitation		Evaluation de la ressource
	résurgences	nappe	Nappe de la Palmeraie
Débit l/s	9	52	80
Débit m ³ /s	0.009	0.052	0.08

2.1.4.1.2 Conditions de niveau liées à la piézométrie

Le secteur modélisable est une zone d'épandage de crue. Il s'agit d'une aire d'échange qu'il n'est pas possible de représenter par des conditions de niveau. Il s'agit dans ce cas là de condition de débit imposable. On se contentera d'afficher une infiltration sur tout le domaine modéliser estimée à 30 % de l'apport total estimer à 3 l/s : de la seguia de la grande source, des foggaras actives et l'inféro-flux de l'oued saoura.

2.1.4.1.3 Débits mesurés des prélèvements (pompage)

Nous avons introduit le nombre de puits et leur débit d'exploitation d'après les données disponibles (inventaire 2008).

Afin d'éviter toute modification de la configuration du modèle le nombre et la position des puits d'exploitation est retenue, mais nous avons rassemblée sur chaque maille l'ensemble de puits qui s'y trouvent. Chaque point représente une concentration de puits. Le débit total prélever en 2008 est de 0.052 m³/s, ce débit est estimé à partir des informations recueillies auprès des utilisateurs qui ne sont pas nombreux.

Les conditions ponctuelles sont constituées par les prélèvements par puits qui se concentrent surtout dans la palmeraie. Dans notre approche nous avons considéré comme conditions ponctuelles, les prélèvements effectués seulement dans les puits traditionnels (équipés par motopompe, maximum 2 l/s par puits) dans toute la palmeraie, dont le débit le plus élevé (8 l/s) est celui du puits 22 destiné à l'alimentation en eau potable de la population. Les puits localisées près de l'oued sont moins exploités (1 l/s) qu'antérieurement, depuis le lancement du Fond National de Régularisation et de développement de l'Agriculture (FNRDA. 1999)

2.1.4.1.4 Recharge

La palmeraie de Béni Abbès, soit 37 Hectares, est irriguée par les eaux de la grande source et foggaras en continu. Le débit déversé en continu est voisin de 10 l/s, ce qui représente 0,26 l/s /ha.

2.2 Calage du modèle

Au cours de la phase de calage ; deux objectifs ont été recherchés :

1. La reproduction d'un état stable de la nappe ;
2. La reproduction des fluctuations piézométriques au cours du temps.

Le premier objectif correspond au calage en régime permanent pour ajuster les valeurs de perméabilité des formations aquifères. Dans ce cas le bilan de la nappe est équilibré

Au cours du calage en régime transitoire, la reproduction des fluctuations piézométriques permet d'adopter les coefficients d'emmagasinement

2.2.1 Calage en régime permanent

L'état de référence retenu pour caler le modèle en régime permanent est la piézométrie de 2008. Cette modélisation est effectuée pour obtenir une bonne coïncidence des hauteurs piézométriques mesurées et calculées la différence entre la piézométrie mesurée et en ajuster les valeurs des transmissivités des alluvions quaternaires de la palmeraie de Béni Abbés. Elle conduit également à ajuster les valeurs locales de la perméabilité de la formation aquifère, et des perméabilités des épontes (Fig.53). Une répartition de la perméabilité selon un zonage d'activité hydrodynamique, le

principe est simple: là où il y a une activité hydrodynamique forte, on attribue à cette zone une valeur de k relativement forte. Il est indispensable d'ajuster les paramètres des fonctions rivière (drain/alimentation). Enfin, cette étape suppose également de déterminer les flux d'entrée et de sortie imposés aux limites de la nappe.

Tableau 17 : Différentes valeurs de la perméabilité introduites et leurs zones d'attribution.

Zones	Valeurs de Perméabilité k m/s	Valeurs ajusté de Perméabilité k m/s
Zone 1	$1.1 \cdot 10^{-1} - 12 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^{-1}$
Zone 2	$4 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2} - 4 \cdot 10^{-2}$
Zone 3	$2 \cdot 10^{-3} - 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$
Zone 4	$12 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$

2.2.1.1 Reconstitution de la piézométrie

La géostatistique est "l'étude des phénomènes qui fluctuent dans l'espace et/ou le temps" (DEUTSCH et JOURNEL, 1992, in GAGON 1998). La base de la géostatistique repose sur la théorie des variables régionalisées, qui s'applique particulièrement bien aux phénomènes naturels tels que les écoulements souterrains.

Le krigeage se définit comme étant un estimateur linéaire sans biais offrant une variance d'estimation minimale (Chilès et Delfiner, 1999). Contrairement à la régression linéaire, le krigeage est un bon interpolateur et il tient compte de la corrélation spatiale entre les observations par l'intermédiaire du variogramme.

Il existe trois types de Krigeage univarié (i.e. à une seule variable) : le Krigeage simple, le Krigeage ordinaire et le Krigeage universel. La différence entre ces types d'estimation réside dans la connaissance de la statistique de la variable à interpoler :

Krigeage simple : variable stationnaire de moyenne connue ;

Krigeage ordinaire : variable stationnaire de moyenne inconnue ;

Krigeage universel : variable non-stationnaire (qui contient une tendance). (GRATTON, 2002)

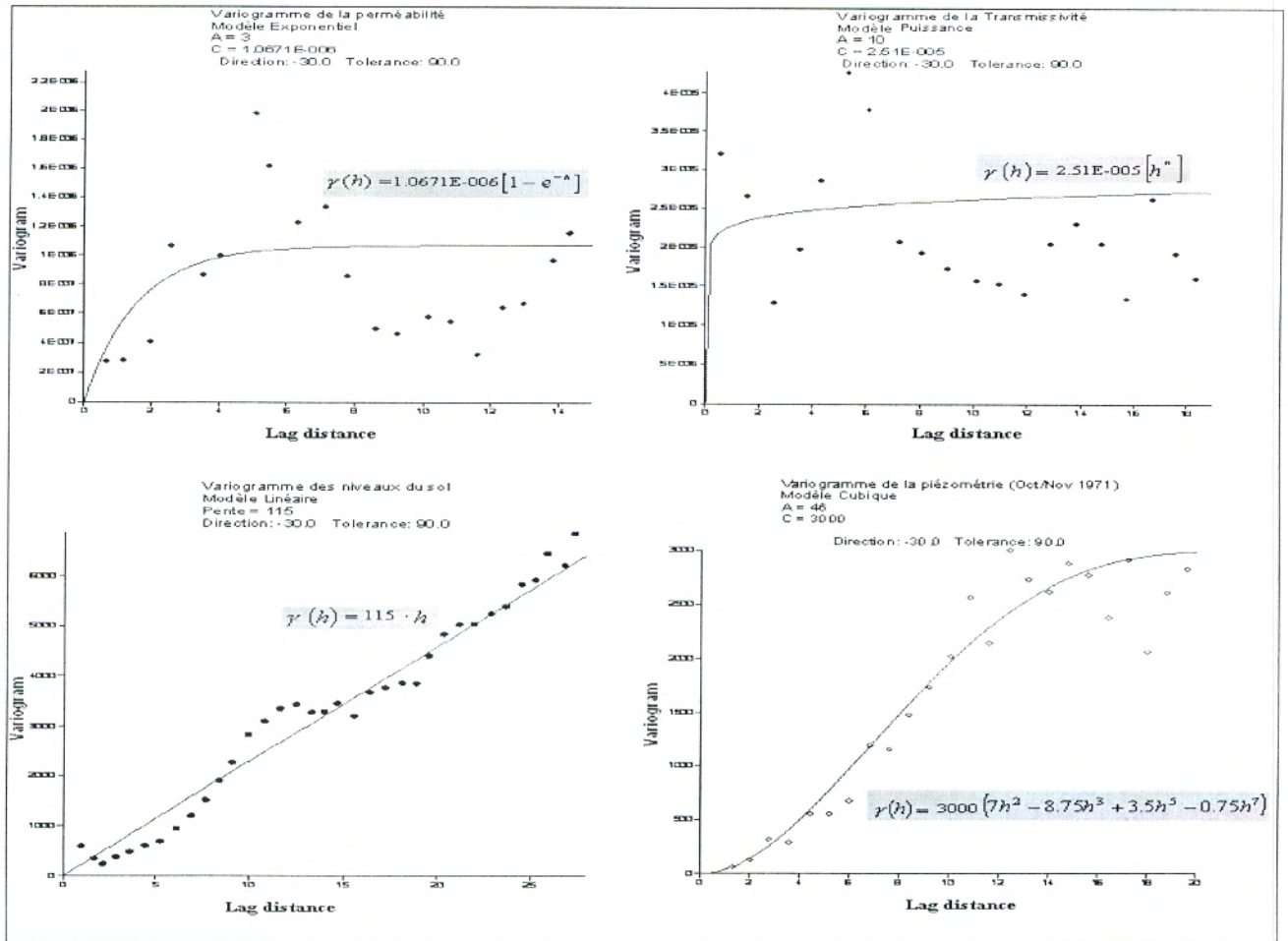


Figure 54 : Les variogrammes des phénomènes étudiés et ces équations.

Le variogramme est un outil servant à décrire la continuité spatiale d'un phénomène. Il repose sur l'idée voulant que deux observations séparées par une faible distance vont en moyenne se ressembler davantage que deux observations séparées par une plus grande distance (fig.54).

Notre variogramme est de type GAUSSIEN (fig.55) Dans ce cas, le krigeage devrait prendre en charge la dérive de la moyenne dans le cadre du krigeage universel.

La présence d'une non stationnarité est identifiable lorsque le variogramme expérimental des charges hydrauliques ne présente aucun palier et qu'il montre une croissance d'ordre ≥ 2 en fonction du pas du variogramme..

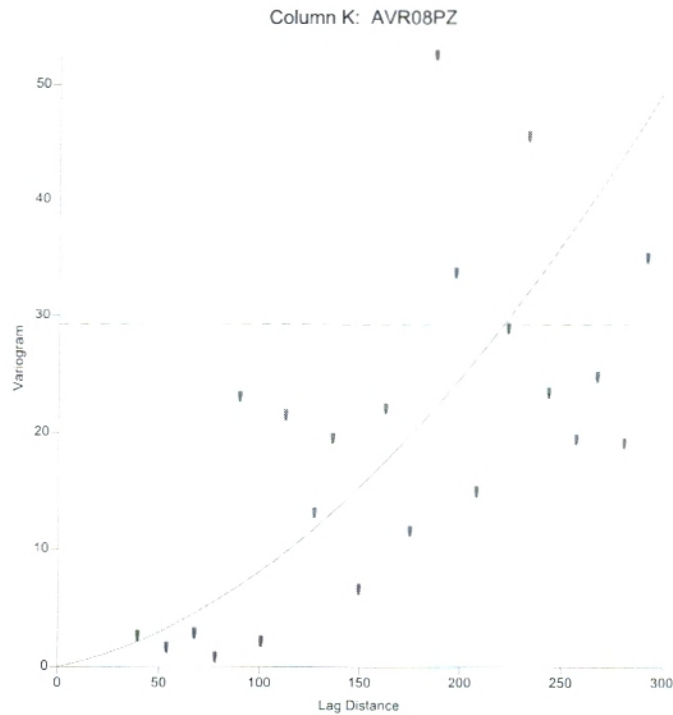


Figure 55 : Variogramme expérimental de la piézométrie mesurée (2008)

Pour tout les cas nous avons considéré que les phénomènes ne présentent pas de dérive c'est-à-dire que l'hypothèse intrinsèque est satisfaite. Les valeurs expérimentales sont ponctuelles. Donc on procédera à un krigeage ponctuel ordinaire.

L'erreur d'estimation a été calculé par « cross validation » disponible au Surfer 9.0. Les cartes krigées (Fig.56) obtenues expliquent la variation des phénomènes étudiés selon une direction SW-NE.

A partir des données krigées de la transmissivité (T) et la perméabilité (K), nous avons calculé les épaisseurs de la couche aquifère (b) par l'équation :

$T \text{ (m}^2\text{/s)} = K \text{ (m/s)} \cdot b \text{ (m)}$, puis dessiné une carte des épaisseurs

L'application des techniques géostatistiques nous a permis d'utiliser au mieux les données disponibles et d'obtenir des résultats satisfaisants. Les valeurs krigées obtenues cette technique nous a permis aussi de comprendre au mieux la variation spatiale des paramètres étudiés. Ces valeurs qui présentent quelques données d'entrée du modèle hydrodynamique, facilitent l'étape du calage du modèle.

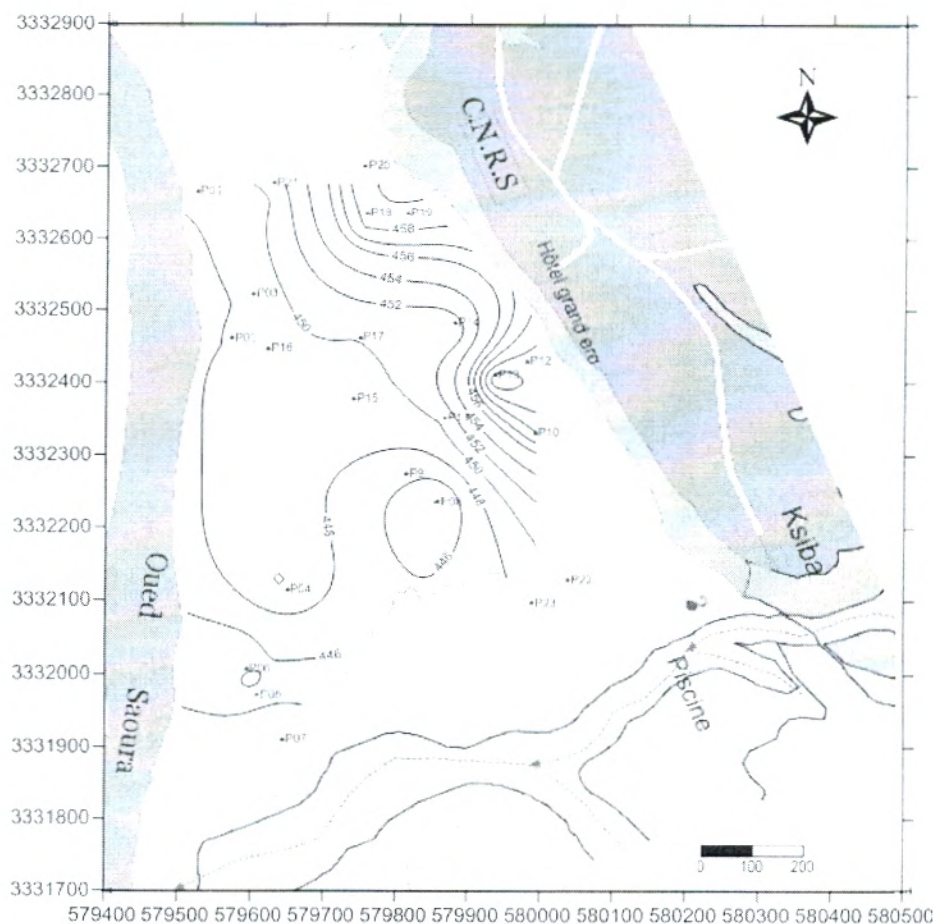


Figure 56 : Carte krigée des potentiels mesurés (Avril. 2008)..

L'erreur d'estimation = 0.63451127

2.2.1.2 Le calage de perméabilité

Les perméabilités ont été ajustées dans leur ensemble à 2.10^{-4} m/s. il est apparu de plus au cours du calage qu'il fallait, dans la partie Est (front de l'oued), décroître les transferts du massif alluvial vers l'inféro-flux et augmenter la drainance exercée par celle-ci. Les perméabilités dans la partie ouest de la palmeraie ont été portées à 3.10^{-2} . Les modifications locales ont été réalisées, une diminution au sud (près de la piscine) et la partie Nord Est du vieux ksar vers l'oued. Avec une augmentation au centre de la palmeraie (ksar) et à lisière de talus hamadienne. Les perméabilités ajustées sont comme prévu extrêmement hétérogènes et varient de 1.10^{-2} à $1,5.10^{-4}$ m/s. Nous avons travaillé à partir de la position des zones supposées les plus perméables que nous avons conservés au cours du calage. Au centre de la palmeraie les terrains sont moins perméables (1.10^{-5} m/s), par contre à l'est, l'oued et au sud du vieux ksar, des valeurs, sont relativement forte de (2.10^{-2} et 5.10^{-3}).

2.2.1.3 Potentiels mesurés et calculés (avril. 2008)

La figures 58 représente la carte des potentiels mesurés et calculés pour l'état de la piézométrie en avril 2008 et correspondant a une période de moyenne eaux..

Les écarts après calage aux points d'observations sont mentionnés dans le tableau 24 ci-dessous. Les valeurs de H calculée sont prises au centre de chaque maille. La comparaison entre les potentiels calculés et mesurés ($H_c - (H_m)$) pour les vingt et un mailles d'observation, montre que le nuage de points est bien situé autours de droite définie par l'équation $H_c = H_m$ (Fig.57)

Nous pouvons observer que la piézométrie calculée est globalement proche de la piézométrie mesurée, et les écarts restent relativement acceptables.

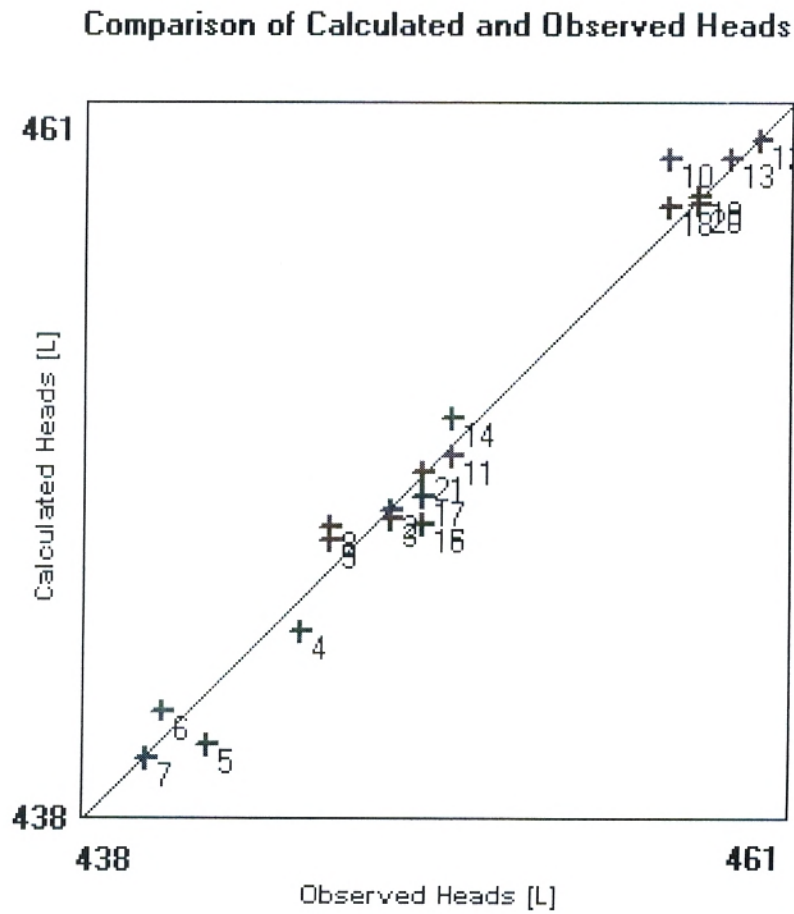


Figure 57. Comparaison entre les potentiels mesurés et calculés après calage du modèle en régime permanent

Tableau 18 : Ecart entre les potentiels mesurés et calculés après calage du modèle en régime permanent.

N° puits d'observation	Coordonnées (colonne , ligne)	H mesuré	H calculé	Hmesuré-Hcalculé
P01	6,1	448,1	448,05	0,04
P02	8,16	448,2	447,84	0,37
P03	7,18	448,0	448,64	-0,64
P04	10,34	445,0	443,55	1,45
P05	9,38	442,0	439,81	2,19
P06	8,36	440,5	441,35	-0,85
P07	10,4	440,0	439,5	0,50
P08	19,27	446,0	447,37	-1,37
P09	17,25	446,9	446,68	0,24
P10	24,23	457,9	459,35	-1,45
P11	19,22	450,3	449,74	0,52
P12	24,19	460,0	459,92	0,08
P13	22,2	459,0	459,43	-0,43
P14	20,17	450,4	449,55	0,80
P15	14,21	449,8	448,45	1,35
P16	9,19	449,5	448,41	1,12
P17	14,18	449,8	448,05	1,78
P18	15,11	458,0	457,81	0,14
P19	15,9	458,3	457,93	0,32
P20	10,9	458,7	459,35	-0,69
P21	15,31	449,6	448,9	0,70

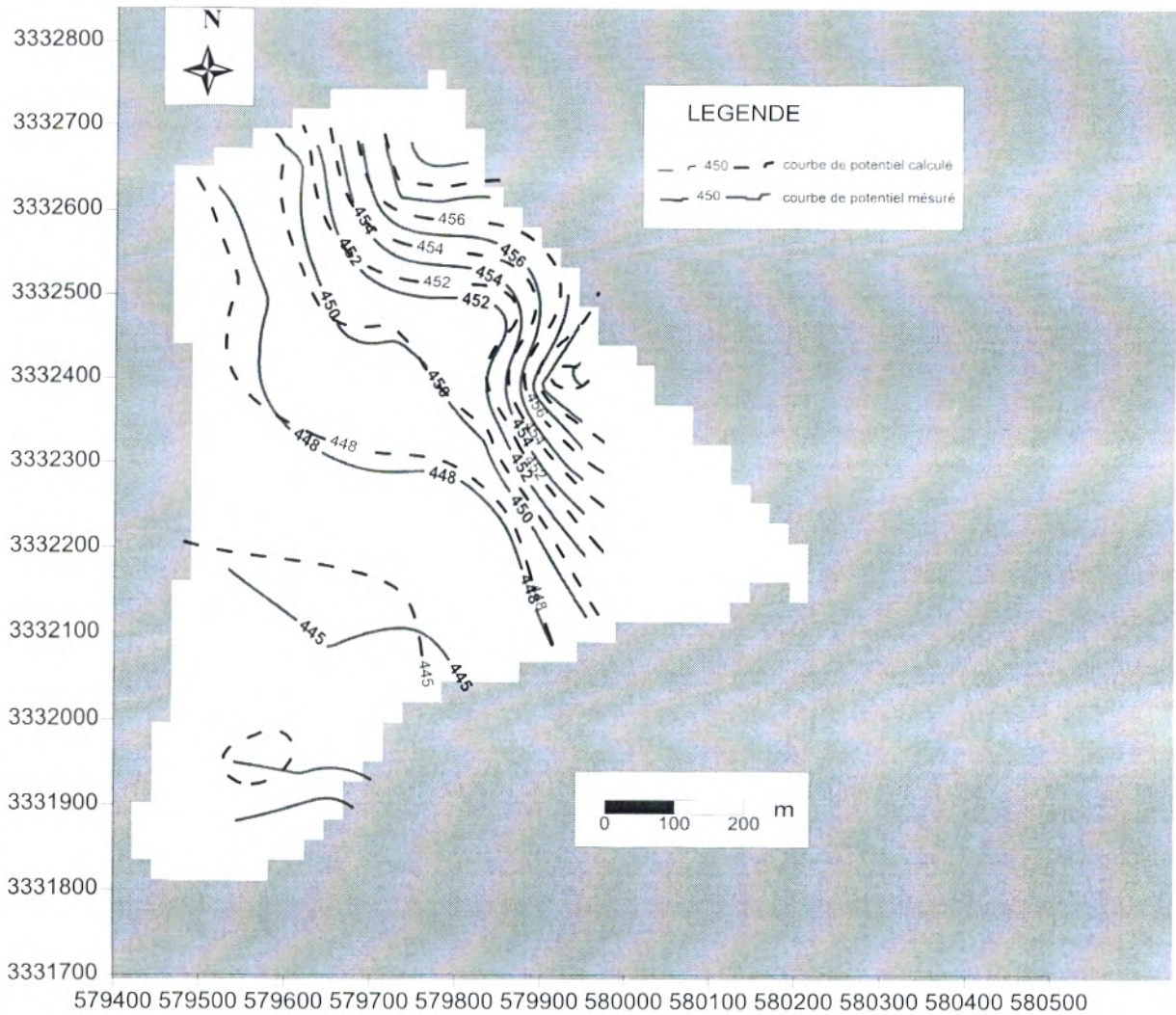


Figure 58: Carte des potentiels calculés et mesuré en régime permanent

2.2.1.4 Carte des perméabilités

Comme nous montre la figure 59; Pour le calage du modèle, nous avons adopté une zonation des perméabilités très découpée pour tenir compte de l'hétérogénéité de l'aquifère. Cinq plages de perméabilité comprises entre 10^{-5} et 10^{-2} m/s ont été définies..

Nous remarquons que les fortes valeurs de perméabilités ($1 \cdot 10^{-2}$ à $2 \cdot 10^{-2}$ m/s) sont situées aux alentours du ksar de la palmeraie ceci peut être liées à la présence du gravier qui favorisent l'alimentation de la nappe. Les faibles valeurs ($1 \cdot 10^{-5}$ à $9 \cdot 10^{-5}$ m/s) situées au centre de la palmeraie, au nord et au sud s'expliquent par l'existence sable argileux d'une part, et par les fortes épaisseurs du remplissage de l'aquifère alluvial d'autre part.

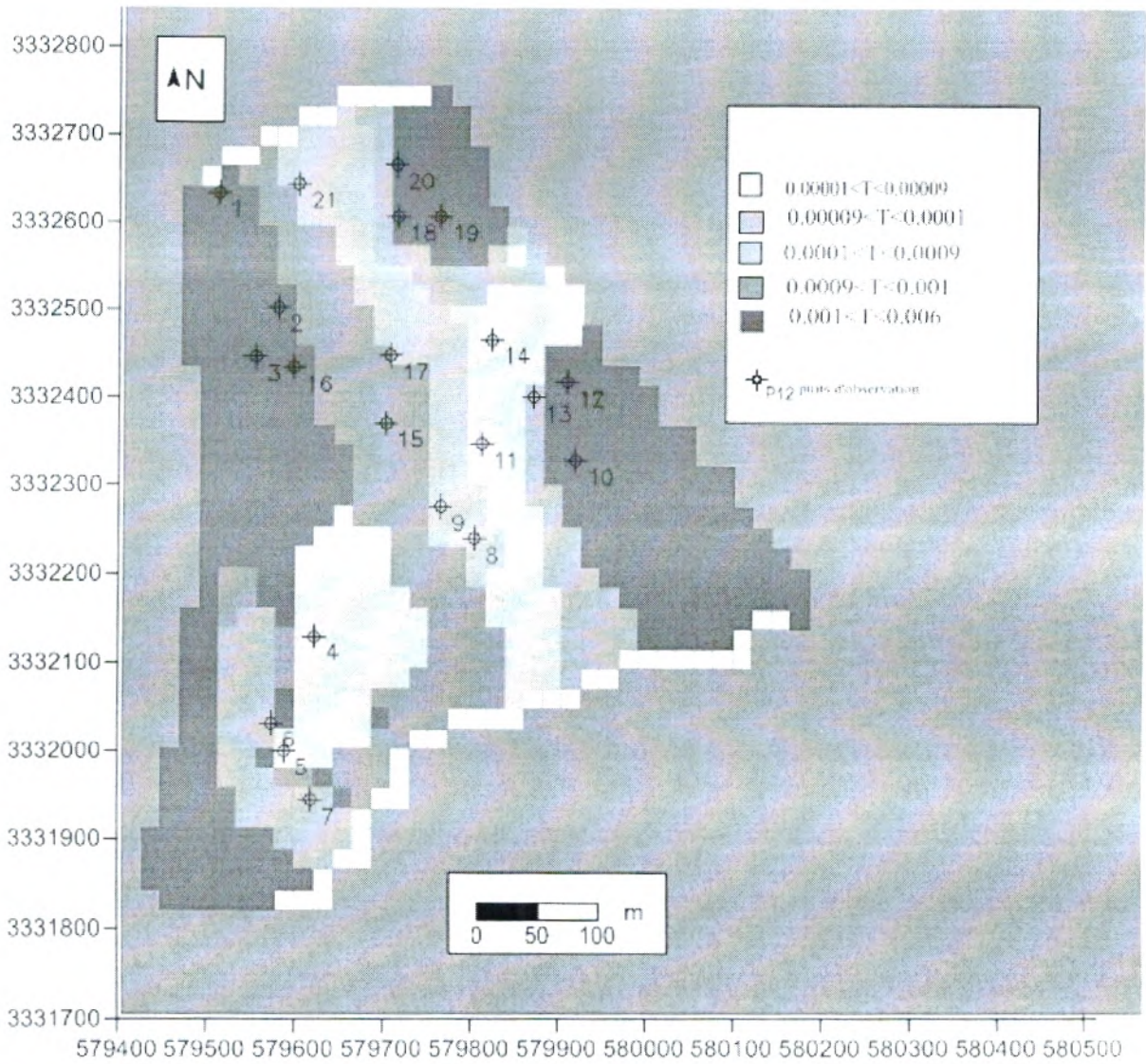


Figure 59 : Carte des permeabilités (m^2/s) adoptées pour le calage du modèle en régime permanent.

2.2.1.5 Etude du bilan de la nappe

Le tableau 19 résume les débits d'échange de la nappe aux limites calculés par le modèle :

Afin de quantifier les effets du drainage des cours d'eau, l'alimentation aux limites et l'impact de l'infiltration efficace sur la piézométrie, il est nécessaire de dresser un bilan de la nappe. Le tableau 19 résume les débits d'échange de la nappe aux limites calculés par le modèle :

Tableau 19 : Bilan de la nappe calculé par le modèle.

FLOW TERM FLOWS (m ³ /s)	IN	OUT	IN-OUT
CONSTANT HEAD	1.041776E+00	9.317525E-01	1.100236E-01
WELL	0.000000E+00	8.704533E-02	-8.704533E-02
BOUNDARY FLOW	0.000000E+00	2.300000E-02	-2.300000E-02
RECHARGE	4.285074E-06	0.000000E+00	-2.300000E-02
SUM	1.041780E+00	1.041798E+00	-1.752377E-05

Tous d'abord, nous pouvons voir que le bilan est plus ou moins équilibré.

Par ailleurs, nous pouvons constater que l'alimentation de la nappe se fait surtout par le drain naturel et l'infiltration efficace des eaux d'irrigation.

2.2.2 Calage en régime transitoire

Cette partie, consacrée au modèle en régime transitoire représente une continuité au calage en régime permanent. L'objectif principal de cette étape de la modélisation hydrodynamique en régime transitoire par la méthode des différences finies permet de caler le coefficient d'emménagement et d'appréhender l'évolution de la piézométrie suite à des perturbations multiples variables (débits extraits, l'infiltration efficace...).

La phase de simulation considérée s'étant d'avril 2008 à avril 2009 et correspond à une période de moyenne eaux. Les débits de pompages ont été considérés comme constants. La distribution du coefficient d'emménagement a été obtenue à partir des données disponibles variant entre $S = 5.9\%$, 3% , et 0.11% pour la palmeraie.

2.2.2.1 Potentiels mesurés et calculés en moyenne eaux

Les cartes piézométriques calculés et mesurés pour l'état de moyennes eaux, montrent que les écarts entre les courbes observées et calculées évalués entre 0 et 5 mètres sont acceptables (fig.60) (tableau 20).

La figure 61, montre la comparaison entre les valeurs de la piézométrie (Avril 2009), et celles calculées par le programme ASM en régime transitoire. La précision du calage est affectée par l'imprécision des prélèvements dans la nappe. L'évolution a été remarquée en plusieurs points dans des différentes zones (figure.62). Des variations des potentiels calculés, ont été signalées durant la période 2008/ 2009, au niveau de quelques mailles actives(figure.62).

Tableau 20 : Ecart entre les potentiels mesurés et calculés après calage du modèle en régime transitoire.

Maille	$H_{\text{mesuré}} - H_{\text{calculé}}$
(6,10)	0,11
(7,18)	0,18
(10,32)	-0,4
(8, 36)	4,9
(19, 27)	3
(17, 25)	-2,1
(19, 22)	0,8
(24, 19)	1,05
(22, 20)	0,3
(20, 17)	-0,45
(9, 19)	0,35
(14, 18)	1,8
(15, 11)	1,54
(15, 9)	1
(10, 9)	0,95
(15, 31)	0,25

La distribution de la porosité efficace obtenue à partir des données disponibles variant entre 20 à 30 %, qui a été adoptée au cours des phases de calage.

Comparison of Calculated and Observed Heads

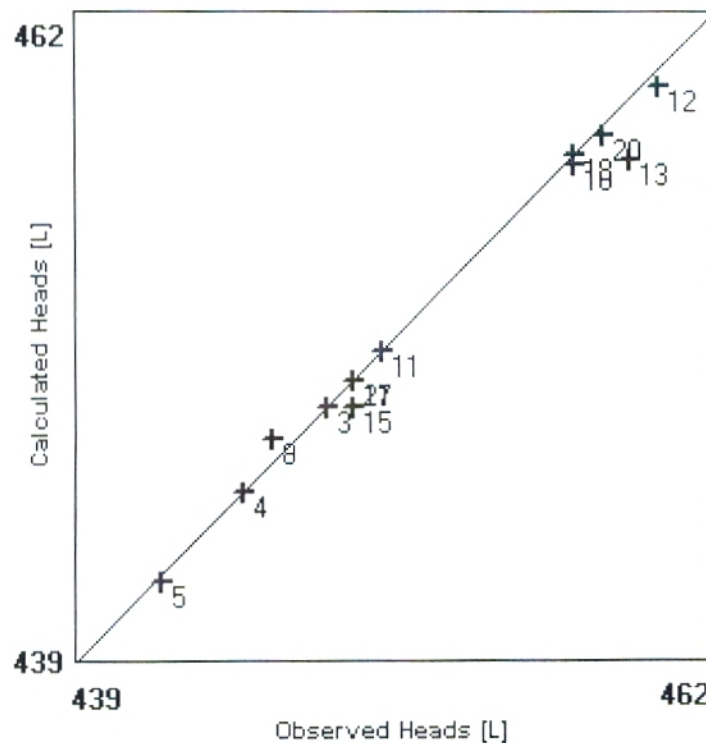


Figure 60 .Comparaison entre les potentiels mesurés et calculés après calage du modèle en Régime transitoire

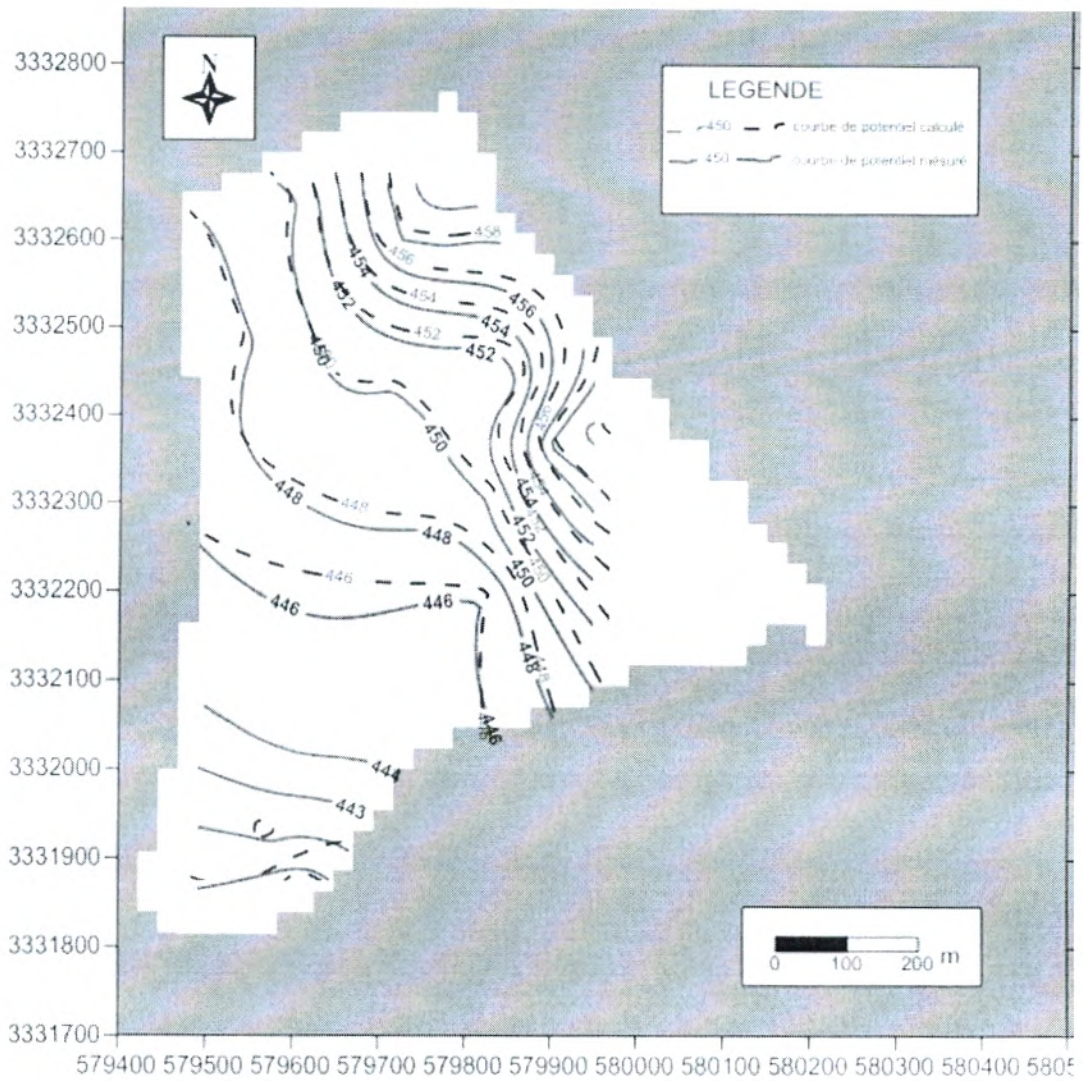


Figure 61. Carte des potentiels calculés et mesurés de la simulation de l'état 2009.

2.2.2 .2 Carte de coefficient d'emmagasinement

Afin de caler le modèle hydrodynamique en régime transitoire, une carte de distribution des valeurs du coefficient d'emmagasinement a été établie (fig.63).

On peut constater que la répartition spatiale du coefficient d'emmagasinement est la même que celle des perméabilités. Ce qui confirme l'existence d'une hétérogénéité de l'aquifère par la présence du gravier situé au centre de la palmeraie.

Le coefficient d'emmagasinement de la nappe alluvial a été estimé à $3 \cdot 10^{-3}$ sur l'ensemble de la nappe ; excepté la partie amont de la nappe ou il est élevé 10^{-2} .

L'appréciation de coefficient d'emmagasinement de la nappe alluviale est rendue complexe en raison des pompages, principale cause des fluctuations piézométrique ; et dont les volumes prélevés ne sont connus qu'approximativement.

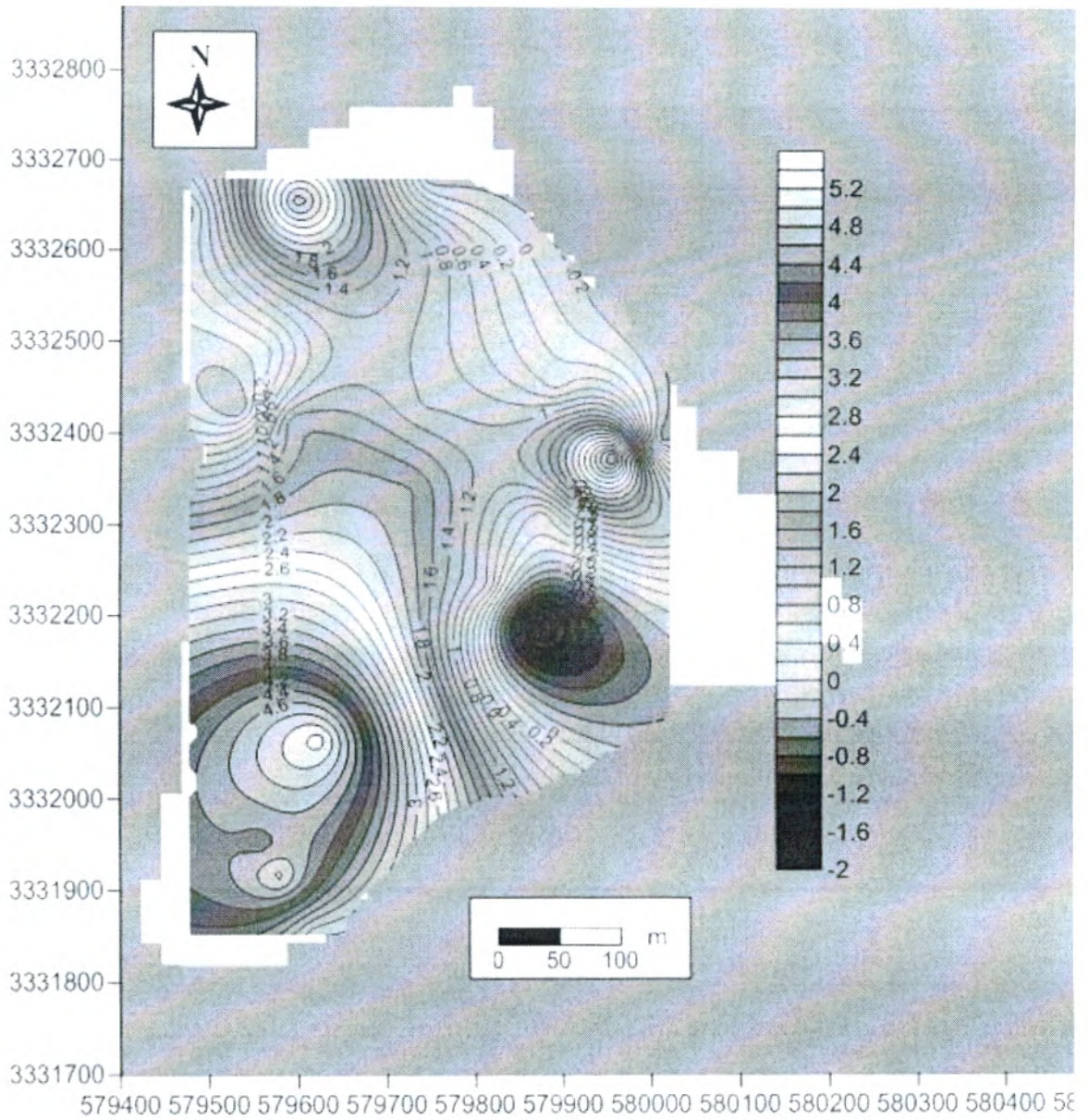


Figure 62. Carte des écarte (ΔH) de la simulation de l'état 2009. ($H_{09} - H_{08}$)

2.2.2 .3 Bilan de la nappe

Tableau 21 : Bilan de la nappe calculé par le modèle en régime transitoire.

FLOW TERM FLOWS(m ³ /s)	IN	OUT	IN-OUT
STORAGE	1.068625E+01	1.101592E+01	-3.296690E-01
CONSTANT HEAD	8.199019E-01	5.111691E-01	3.087328E-01
WELL	7.999851E-03	9.203774E-02	-8.403789E-02
BOUNDARY FLOW	1.409520E-02	0.000000E+00	1.409520E-02
RECHARGE	7.445569E-02	0.000000E+00	7.445569E-02
SUM	1.160270E+01	1.161912E+01	-1.642323E-02

Le calage du modèle en régime transitoire a permis d'affiner la distribution spatiale du coefficient d'emmagasinement de l'aquifère. La zonation de ce paramètre se coïncide avec la nature géologique et l'épaisseur de l'aquifère.

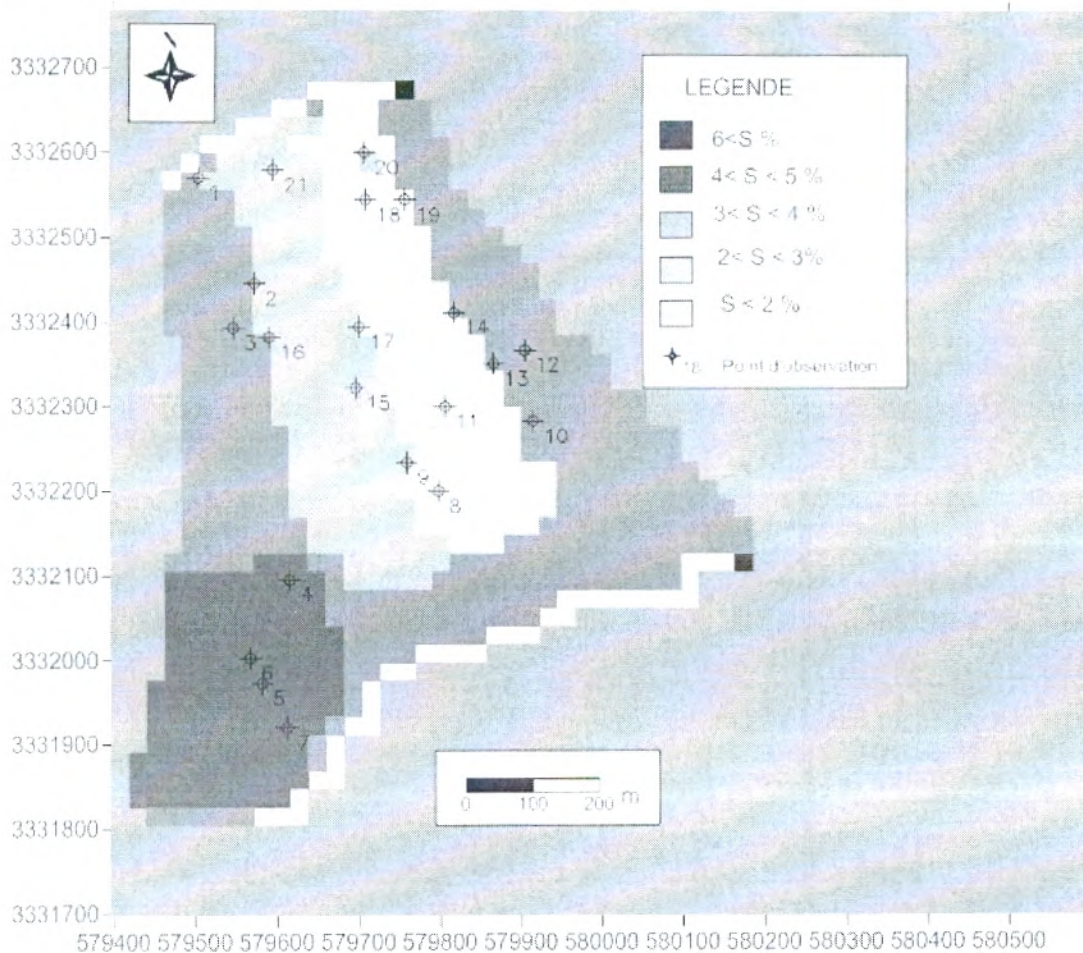


Figure 63 : Carte de distribution des valeurs du coefficient d'emmagasinement adoptées pour le calage du modèle en régime transitoire.

2.3 Exploitation du Modèle

Après avoir caler le modèle hydrodynamique, il apparaît intéressant de réaliser quelques simulations afin de pouvoir estimer les potentialités en eaux souterraines de la nappe de la palmeraie de Beni Abbés.

quatre scénarios de simulation ont été testés :

1. Une exploitation à long terme (20 ans) avec le même régime actuel.
2. La construction d'un barrage souterrain perpendiculaire au sens d'écoulement de la nappe.
3. La recharge artificielle par les eaux épurées avec barrage.
4. La recharge dans des bassins d'épandage sans barrage.

2.3.1. Première simulation, exploitation sur une période de 20 ans

Cette simulation présente une exploitation de la nappe avec le même régime actuel.

Les résultats de cette simulation sont présentés par l'évolution du niveau piézométrique dans trois zones, à la lisière de l'erg au centre et l'ouest de la palmeraie.

Les courbes dans la figure 64, montrent une diminution du niveau piézométrique d'environ 2 m dans toute la nappe.

La figure de la piézométrie et des rabattements (fig.64 et fig.66) issus de cette première simulation montre un baisse du plan d'eau de plusieurs mailles situées au sud de la palmeraie du au pompage important dans cette zone.

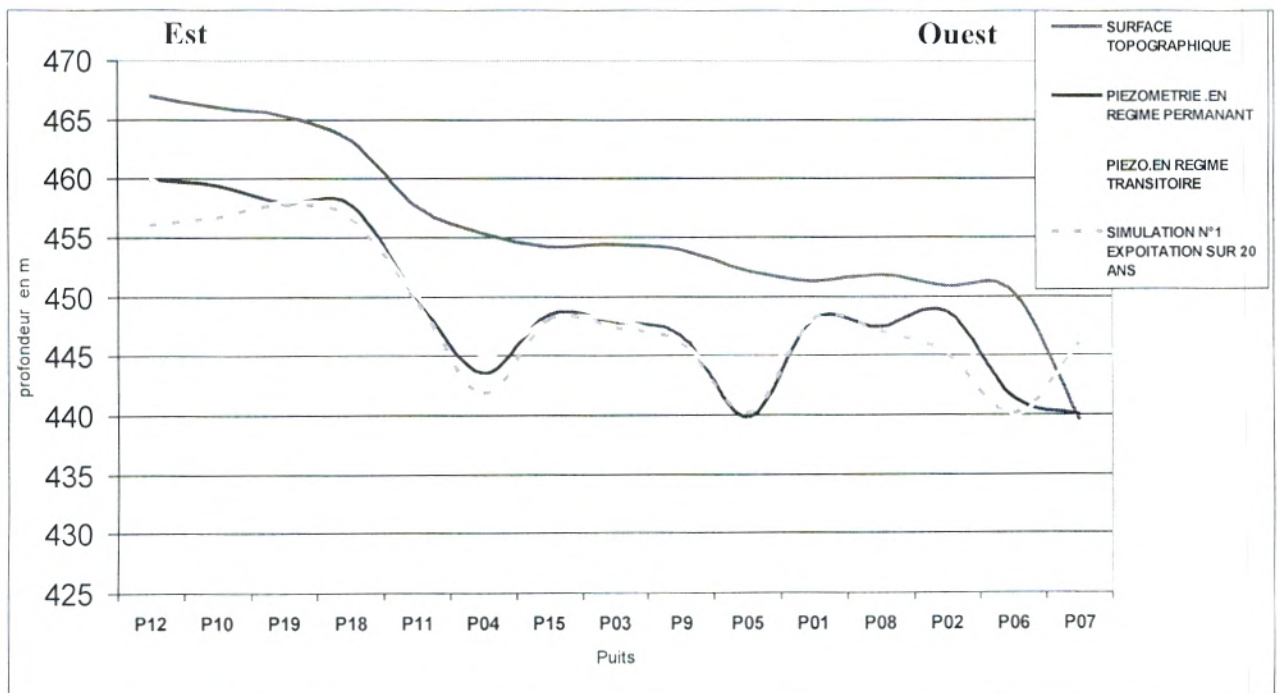


Figure 64 : Evolution piézométrique de la première simulation dans différentes mailles (puits).

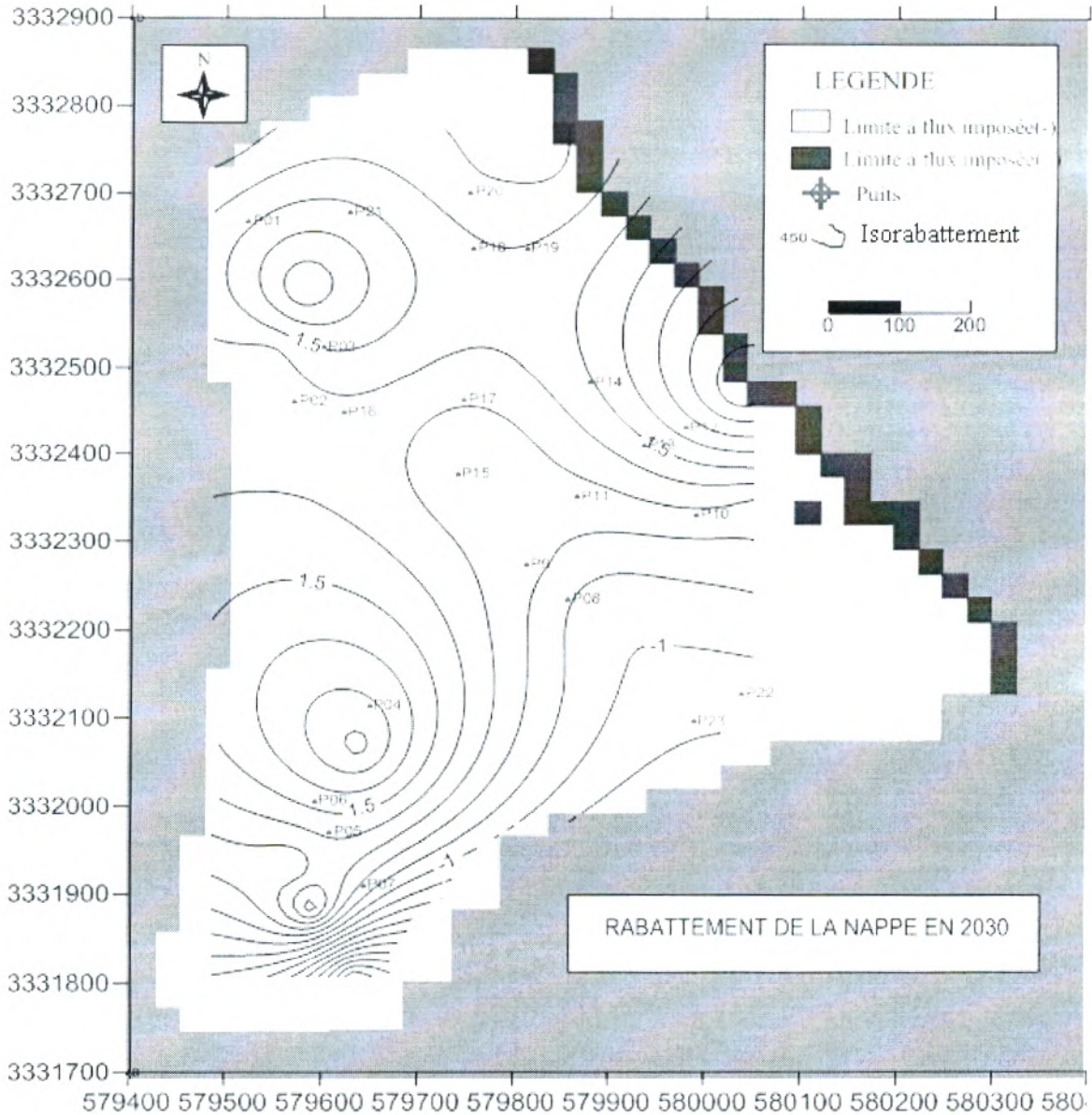


Figure 66 : carte des rabattements de la nappe (simulation jusqu'à 2030)

2.3.2 Deuxième simulation

La création d'un barrage souterrain à l'ouest de la palmeraie, sur toute la longueur de l'aquifère 0 la limite de l'oued sur 400 de largeur et une hauteur de 10 m. La digue sera située à un mètre au dessous de la surface du sol. Cet ouvrage hydraulique va permettre d'augmenter le niveau du plan d'eau de la nappe, par un stockage d'eau du drain naturel dans l'aquifère alluvial, en provenance de la de la nappe de l'erg.

La simulation réalisée sur 10 ans, en maintenant le même régime d'exploitation montre une remontée du niveau d'eau d'une moyenne de 2 à 3 m au centre de la palmeraie et au Sud avec une légère diminution à l'Ouest.

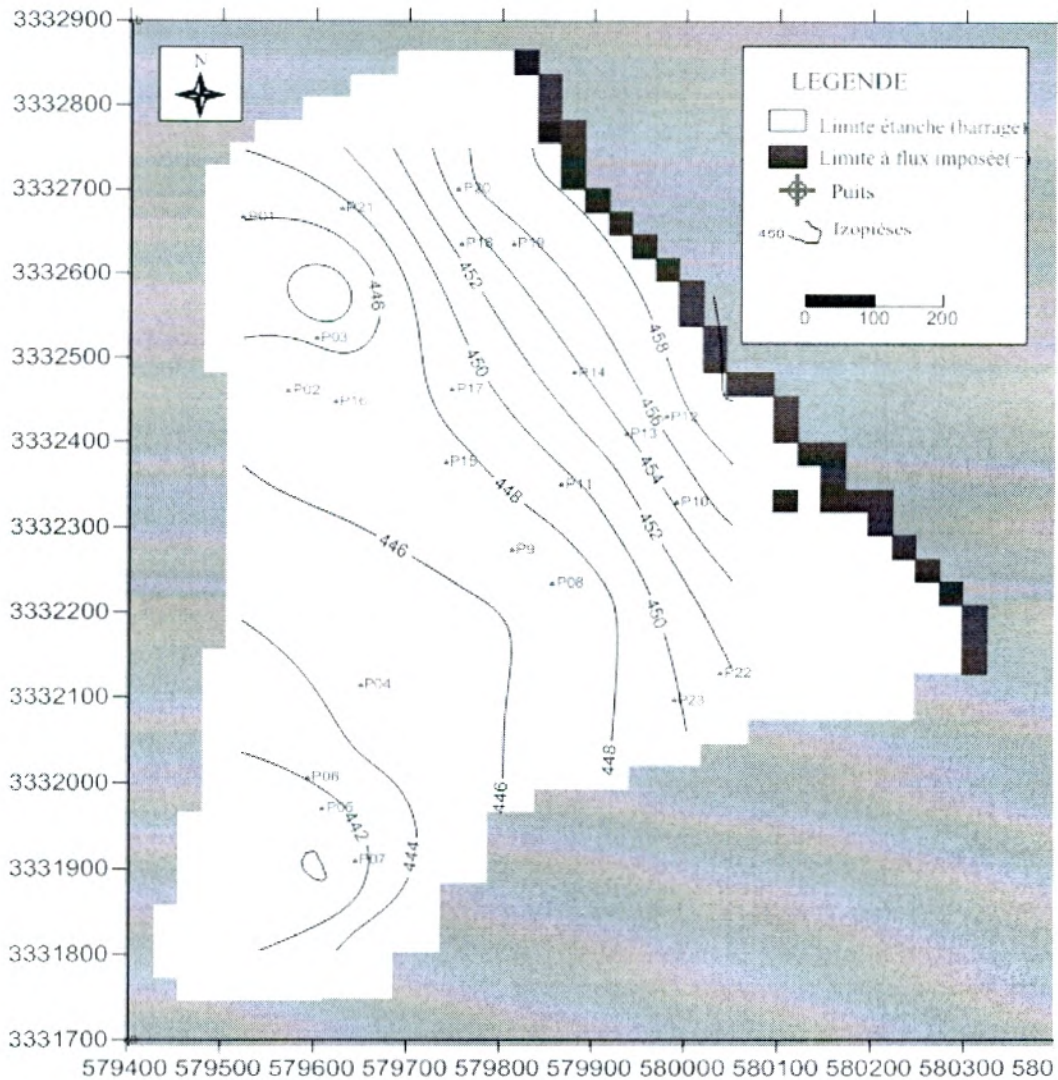


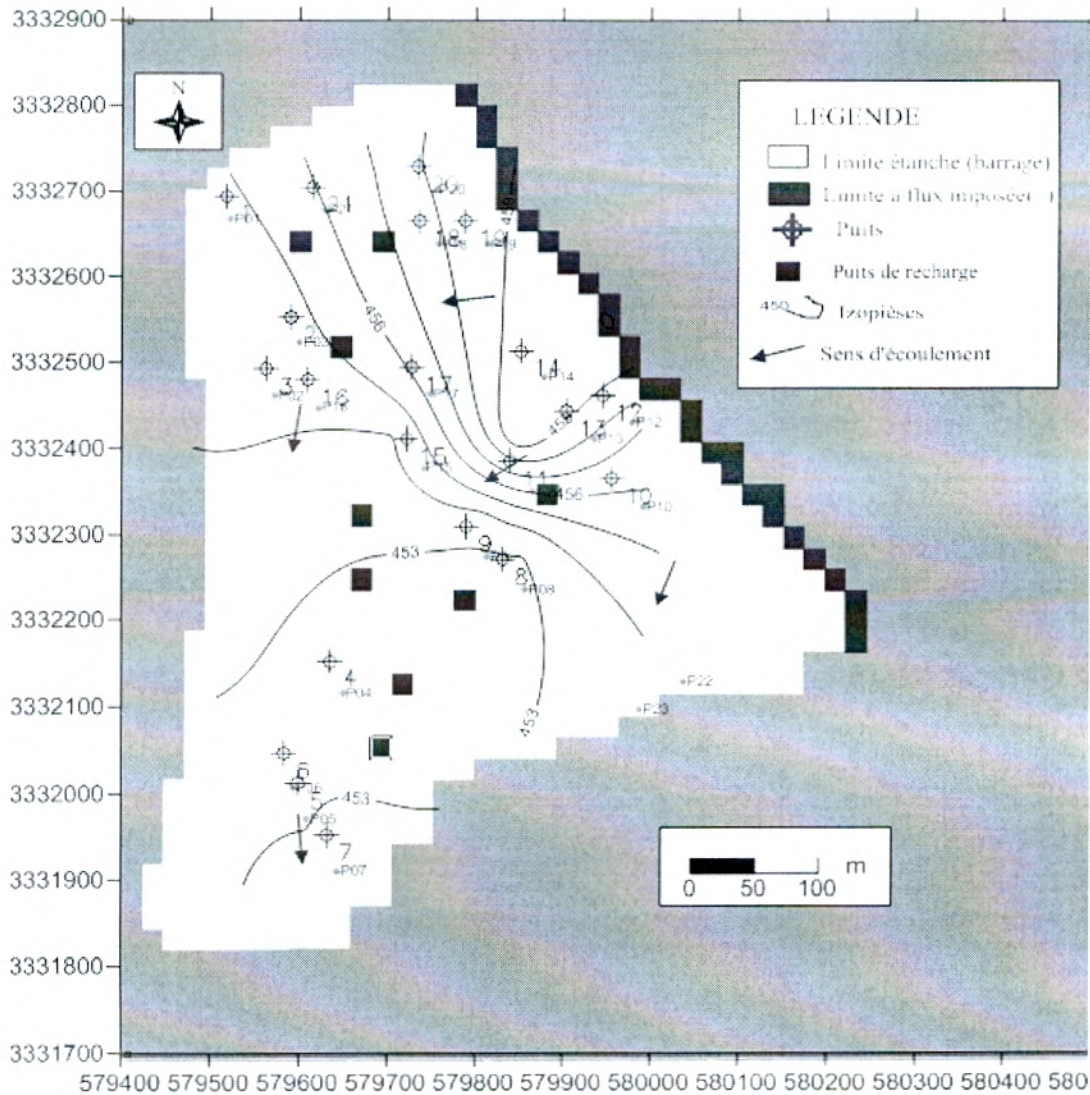
Figure 67 : Carte piézométrique avec barrage souterraine sans recharge.

2.3.3 Troisième simulation

Nous avons supposé une recharge artificielle de l'ordre de 28 l/s par les eaux usées traitées, que nous injectons dans neuf puits et une recharge de tout le domaine modéliser, en présence du barrage souterrain

Deux scénarios ont été visualisés montrent que la recharge artificielle par une infiltration directe dans des puits, provoquant une remontée importante du niveau piézométrique qui peut être nocif pour la palmeraie (Fig.68).

Les courbes qui représentent la variation des rabattements du plan d'eau montrent une augmentation considérable du niveau de la nappe Par contre le deuxième scénario, avec la recharge artificielle dans tout le domaine maintient le même hauteur du plan d'eau que le régime transitoire (fig. 69).



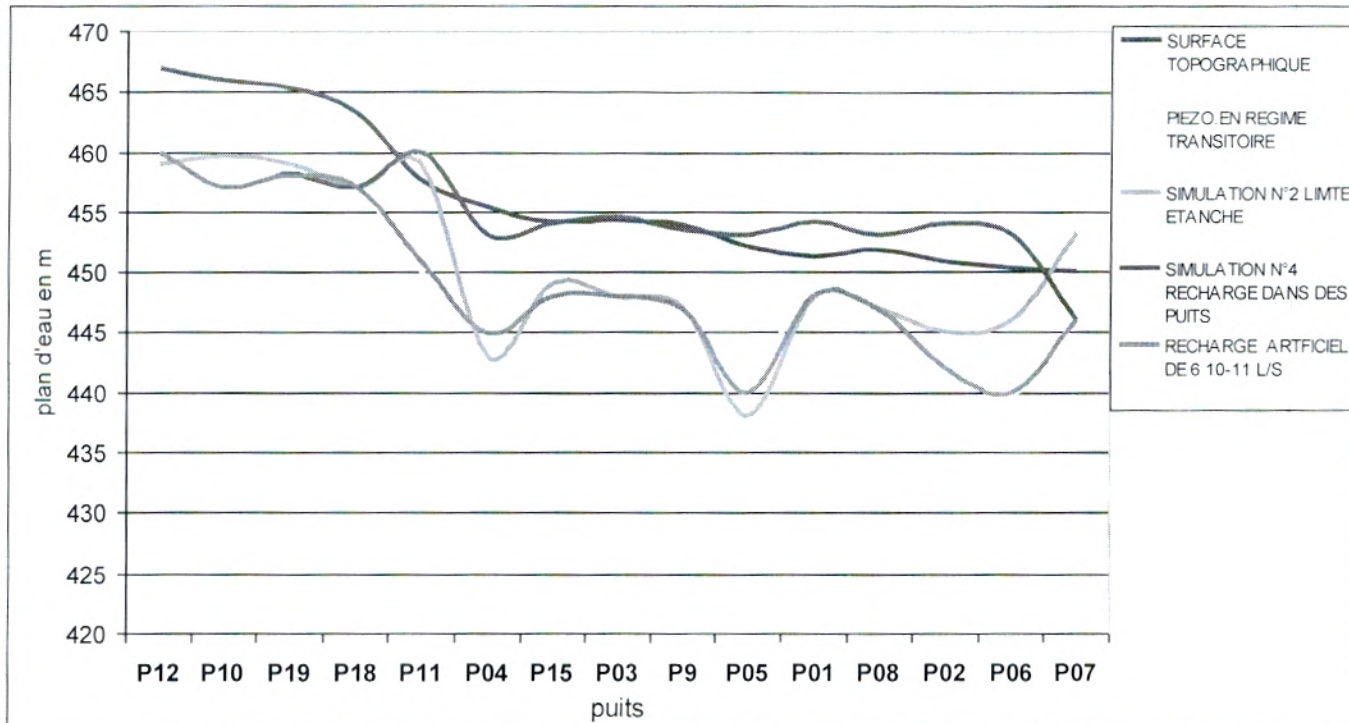


Figure. 69: Représentation graphique des différents scénarios simulés (recharge avec barrage).

2.3.3 Quatrième simulations

Cette simulation visualise les scénarios sans barrage avec recharge artificielle et recharge ponctuel. Les cartes et les courbes du modèle en 2020 (fig.70 et 71), visualisent la simulation de la recharge artificielle sans barrage, en faite nous avons :

Un premier scénario avec recharge artificiel:

Une recharge artificielle sur le domaine modélisé, les résultats de ce scénario montrent une stabilité du plan d'eau de la nappe, aucun changement dans l'ensemble du comportement de la nappe (fig.70 (a)).

Un deuxième scénario avec recharge par bassin(étang) :

La recharge ponctuel dans trois étangs de décantation d'une surface de 400 m², implantées dans les zones dégradées à l'Ouest de la palmeraie (fig.70 (b)), sur dix ans provoque une remontée remarquable de la nappe de la palmeraie, particulièrement près des étang de recharge comme le montre la figure ci dessous.

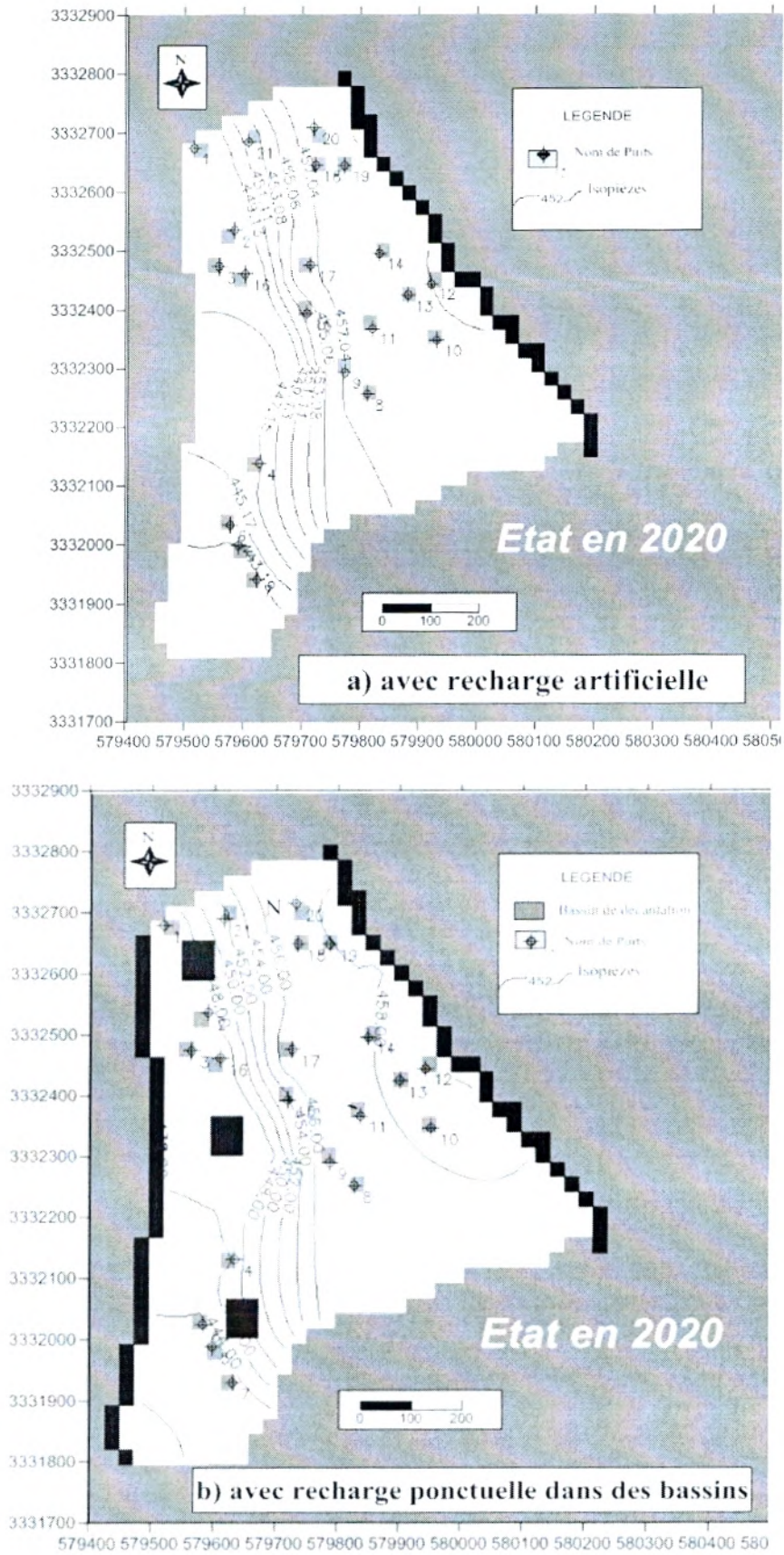


Figure 70: Carte piézométrique de nappe de la palmeraie, recharge sans barrage

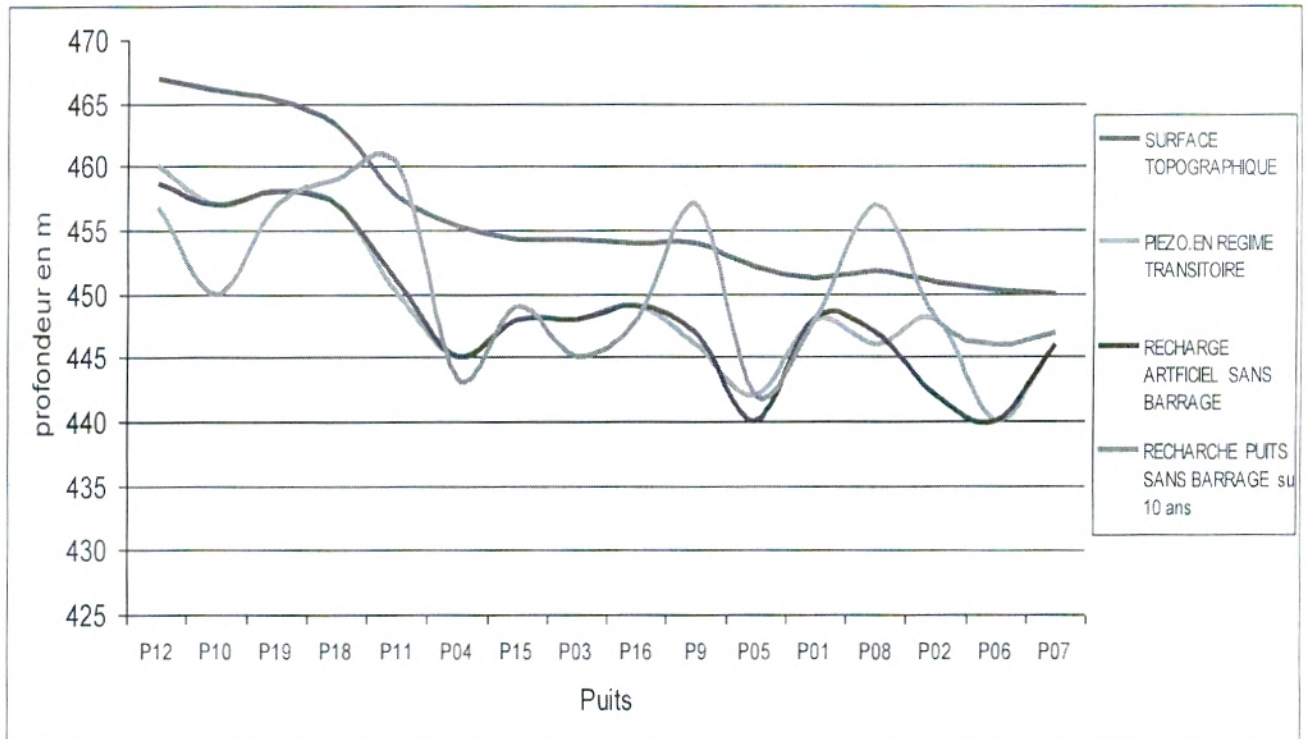


Figure 71: Représentation graphique des différents scénarios simulés (recharge sans barrage).

CONCLUSION

La modélisation hydrodynamique de la nappe de la palmeraie de Béni Abbés par le programme ASMWIN nous a permis de comprendre le fonctionnement hydrodynamique de l'aquifère, en estimant l'alimentation latérale de la nappe et la recharge par infiltration efficace puis l'influence des prélèvements par pompage sur l'écoulement souterrain.

Le modèle mathématique en régime permanent a permis d'affiner la distribution spatiale de la perméabilité et de la transmissivité sur l'ensemble du domaine et de dresser le bilan de la nappe en régime permanent.

Le modèle en régime transitoire a permis d'affiner la distribution spatiale du coefficient d'emmagasinement de l'aquifère.

L'exploitation du modèle par la réalisation des scénarios nous a permis de définir le comportement futur de la nappe en cas d'une surexploitation.

1. Caractérisation hydrogéologique de la nappe de la palmeraie

.. L'aquifère alluviale de la palmeraie s'étend sur une superficie d'environ 40 ha et une longueur d'environ 1 km. Le climat aride de la région se caractérise par une pluviométrie moyenne annuelle comprise entre 30 et 40 mm. L'été est chaud et sec l'hiver froid et sec. L'évaporation annuelle est importante (autour de 2012 mm/an).

1.1 Condition de gisement et alimentation :

La palmeraie de Béni Abbès est implantée au pied du grand erg occidental, sur le Saourien et le Guirien, en contrebas de la falaise Mio-pliocène. A l'origine, l'oasis de Béni Abbès doit probablement son importance à l'existence d'une source unique dans la Saoura qui irrigue à elle seule la palmeraie principale et alimente en partie la population en eau potable.

Le Dévonien moyen et supérieur constitue dans la région le socle de la hamada.

En rive gauche de l'oued Saoura à Gara Diba, les schistes rouges du Dévonien supérieur constituent le mur imperméable de la nappe. On les observe au fond de plusieurs puits, sous le Quaternaire.

Des bancs de calcaires observés dans la falaise sont très fissurés avec des fissurations inférieures à une dizaine de centimètres. La *torba* de faible perméabilité réduit la circulation des eaux de l'erg qui se dirigent vers l'aquifère alluvial (terrasses alluviales)

Une étude statistique des fissures de la dalle de la falaise, permet de comprendre le mode de circulation dans les formations hamadiennes.

A partir de ces terrains néogènes, l'eau passe dans les terrasses alluviales quaternaires. La palmeraie de Béni Abbès est alimentée par l'infiltration des eaux de la grande source utilisées dans l'irrigation. L'apport latéral du Mio-pliocène est alors secondaire (roche 1973).

L'épaisseur de l'aquifère varie entre 10 à 20 m.

L'infé- flux de l'oued, c'est à dire le niveau de la base de la nappe, se situerait, aux alentours du radier, à 453 m.

Le système aquifère met en scène deux unités lithologiques : les calcaires et marnes sableuses du Mio-pliocène et les formations quaternaires. Le réservoir est constitué par des dépôts quaternaires composée par trois couches (sable, argile sable, conglomérat) d'épaisseur moyenne de quinze mètres, l'ensemble repose sur un substratum schisteux dévonien supérieur plissé (fig.72).

1.1.2. Débit de la nappe

La palmeraie principale, est irriguée par les eaux de la grande source et le prélèvement des puits creusés dans l'aquifère alluvial. Le débit déversé en continu est voisin de 8 l/s (jaugeage 2008), présentent 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.

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), donne un débit total de 88,5 l/s

Les activités agricoles dominant (palmier dattier, cultures maraîchères, arboriculture et élevage).ces activités demandent 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 de l'ordre 80 l/s, les prélèvement sont évalué à 52 l/s et le débit de vidange de la nappe vers l'oued évaluer sont à 20 l/s, aussi une quantité de 20 l/s qui s'évapore, avec un déficit de l'ordre de 12 l/s 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 salée 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 égal $2 \cdot 10^{-4}$ et $4.4 \cdot 10^{-4}$ m²/s.

Vingt et un puits bien repartis dans toute la palmeraie ont été suivis afin de tenter une surveillance de l'écoulement souterrain de l'erg vers l'oued

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 :

- ✓ 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

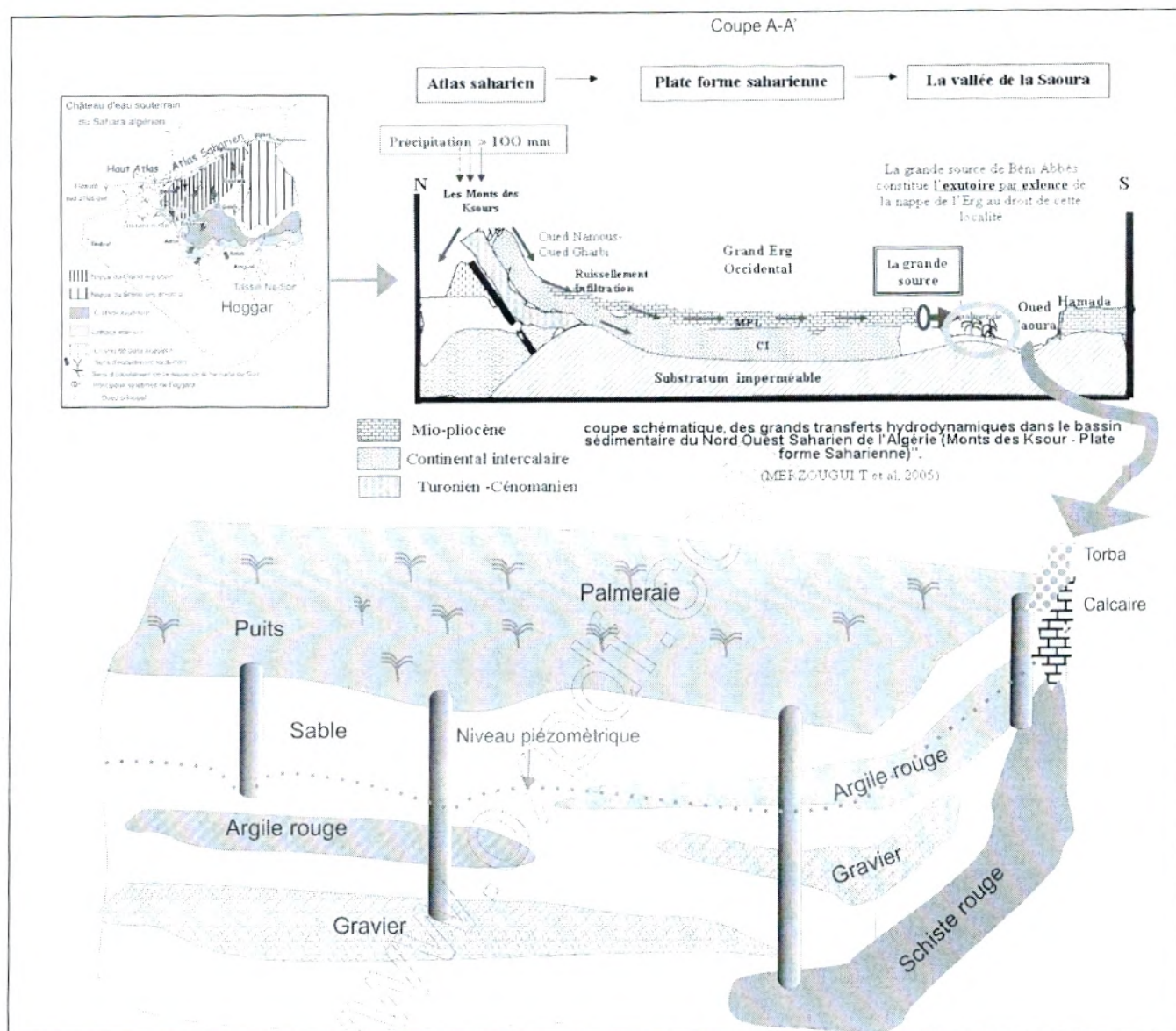


Figure 72 : Condition et gisement des aquifère alluviale de la palmeraie

1. 2. Evolution piézométrique de la nappe de la palmeraie

Nous considérons d'abord trois situations piézométriques : celle de 1973, 1991, 2008.

La piézométrie de 1973 (Roche, 1973) a permis d'identifier le sens d'écoulement naturel de la nappe, qui se fait du Nord- Est vers le Sud- Ouest en direction de l'oued Saoura. L'oued Saoura draine la nappe alluviale. L'isopièze 438 m se place à l'intérieur du fond de la vallée de la Saoura représentant l'inféro- Flux.

La piézométrie de **1991** (Yousfi. N, 1991), permis d'enregistrer une nouvelle avancée des valeurs de rabattement de la nappe de la palmeraie. L'aggravation de la situation piézométrique, soulignée par la progression de l'iso profondeur 438 m, est liée à la réalisation de nouveaux puits, à l'approfondissement des puits existants et à l'augmentation des volumes pompés suite à l'électrification des pompes. Cette situation critique est due essentiellement à la sollicitation continue de l'aquifère et à la diminution de la part de la palmeraie en quantité d'eau d'irrigation de 2/3 à 1/3 (17l/s, 8l /s).

L'état piézométrique de 2008, souligne qu'à proximité du talus hamadien une baisse de niveau piézométrique, accompagnée d'une augmentation alarmante de la salinité, elle montre aussi que les dépressions observées ne font que l'accroître avec le temps. En effet, la recharge naturelle (drain naturel) n'arrive pas à couvrir l'extraction et le niveau du plan d'eau de l'inféro flux délimite la quasi-totalité de la surface de la palmeraie.

Durant notre période d'observation en 2008, la profondeur de la surface piézométrique dans l'aquifère, ne dépasse pas 10 m (puits 7), dans la plus part des puits, elle se trouve dans une moyenne de 6 m. En 1973, la profondeur se situait souvent entre 3 et 5 m, actuellement elle s'échelonne entre 2 et 9 m,

L'état piézométrique de 2008, enfin marque la poursuite de l'évolution vers un abaissement du niveau piézométrique et une augmentation de la salinité, actuellement la nappe est presque stable.

Les campagnes de mesures mensuelles et annuelles ont permis de tracer les courbes d'évolution du plan d'eau dans l'aquifère alluvial de la palmeraie (Fig.73 et 74)

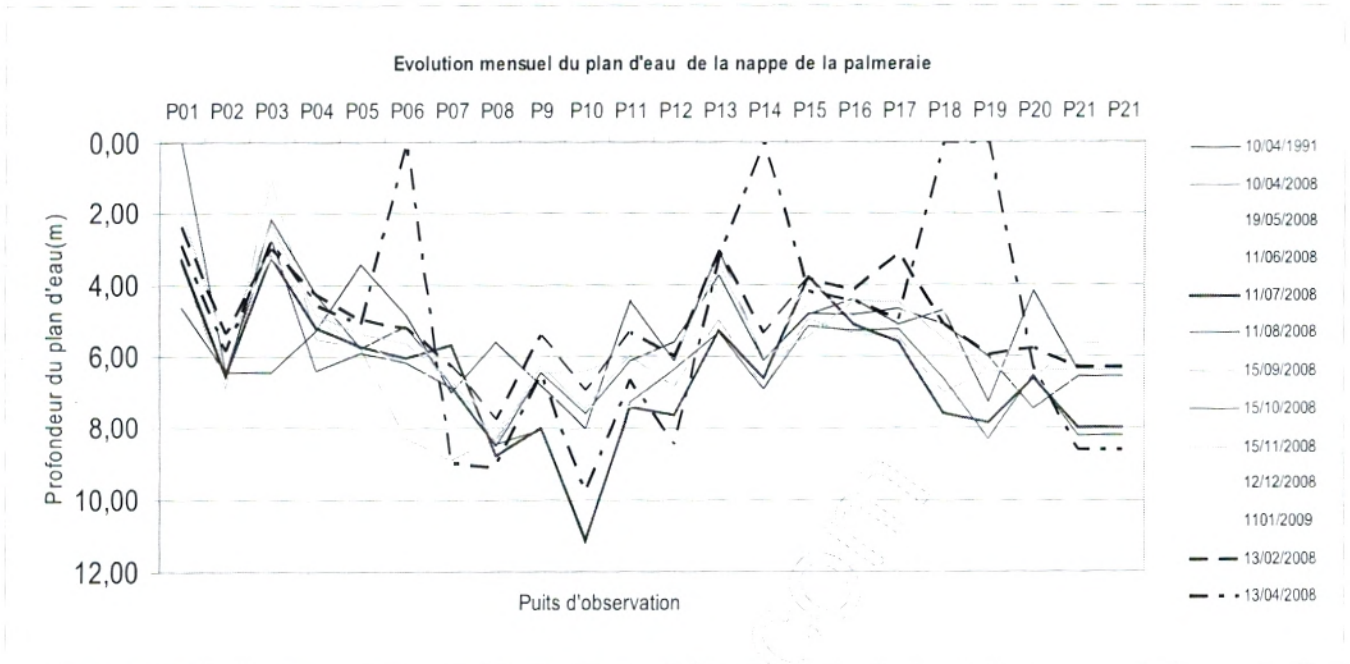


Figure 73: Evolution mensuel de la piézométrie de la nappe de la palmeraie

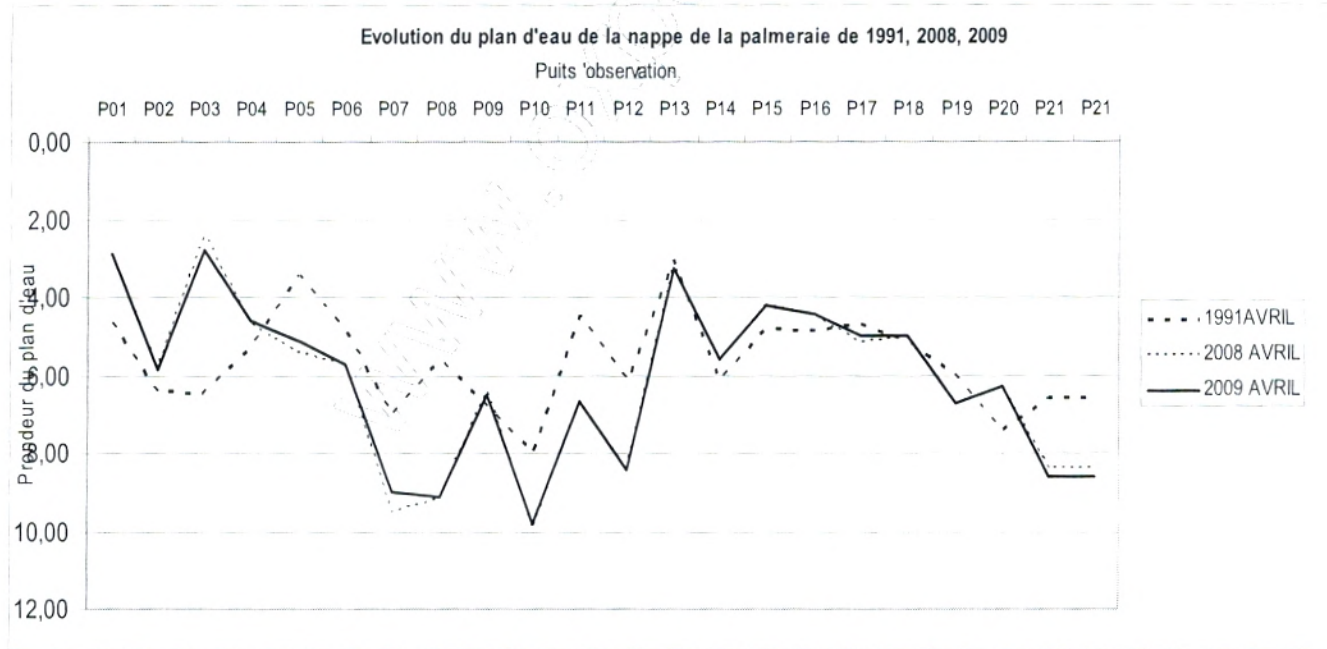


Figure 74: Evolution piézométrique de la nappe de la palmeraie

L'interprétation des résultats de l'étude de la piézométrie et de la salinité de la nappe de l'aquifère alluviale de la palmeraie permet de dégager les conclusions suivantes :

- Les dômes piézométriques observées au nord et au sud du ksar se sont accentués avec le temps sous l'effet de la recharge des eaux d'irrigation de la source et la remontée locale du toit du substratum imperméable ;
- Ces zones se caractérisent par des faibles valeurs en salinité et en chlorures ;
- L'intrusion du biseau salé, consécutive à la surexploitation des eaux souterraines de la nappe des terrasses alluviales est démontrée ;
- L'intense évaporation des eaux d'irrigation concentre en sels les eaux infiltrées sous les cultures : la réutilisation multiple des eaux de la nappe pour l'irrigation augmente en effet continuellement la salinité, puisque la même eau chargée est extraite, concentrée dans la zone racinaire par l'évapotranspiration et percolée de nouveau vers la nappe. Le retour de ces eaux induit la chute de rendement des cultures maraîchères et du palmier dattier dans la palmeraie, principale production agricole dans la région.
- La nature fluviale des dépôts des formations réservoirs alluviales de la palmeraie constitue également une des sources principales de la salinité des eaux souterraines.
- Les pollutions anthropiques proviennent de sources multiples : rejets des eaux usées non raccordées au réseau d'assainissement, formation des marées d'eau usées et l'utilisation intensive des engrais dans les surfaces irriguées au niveau de l'aquifère.

2- Résultat du modèle et aménagement de la palmeraie de Béni Abbès

Pour les dernières simulations qui ont abouti au calage du modèle, nous avons modélisé les perméabilités de façon à retrouver les traits principaux de la piézométrie (fig.75). Vu la sensibilité de cette dernière à ce paramètre, cette appréciation de la sensibilité est le résultat de la conduite du processus d'identification par essais et erreurs. On a conclu que la charge hydraulique varie continuellement avec la perméabilité, autrement dit que le rapport des accroissements Dh/DT caractérise la sensibilité de h à T . Ce rapport permet de décrire l'effet de l'incertitude sur la piézométrie, le champ des vitesses et les conditions aux limites.

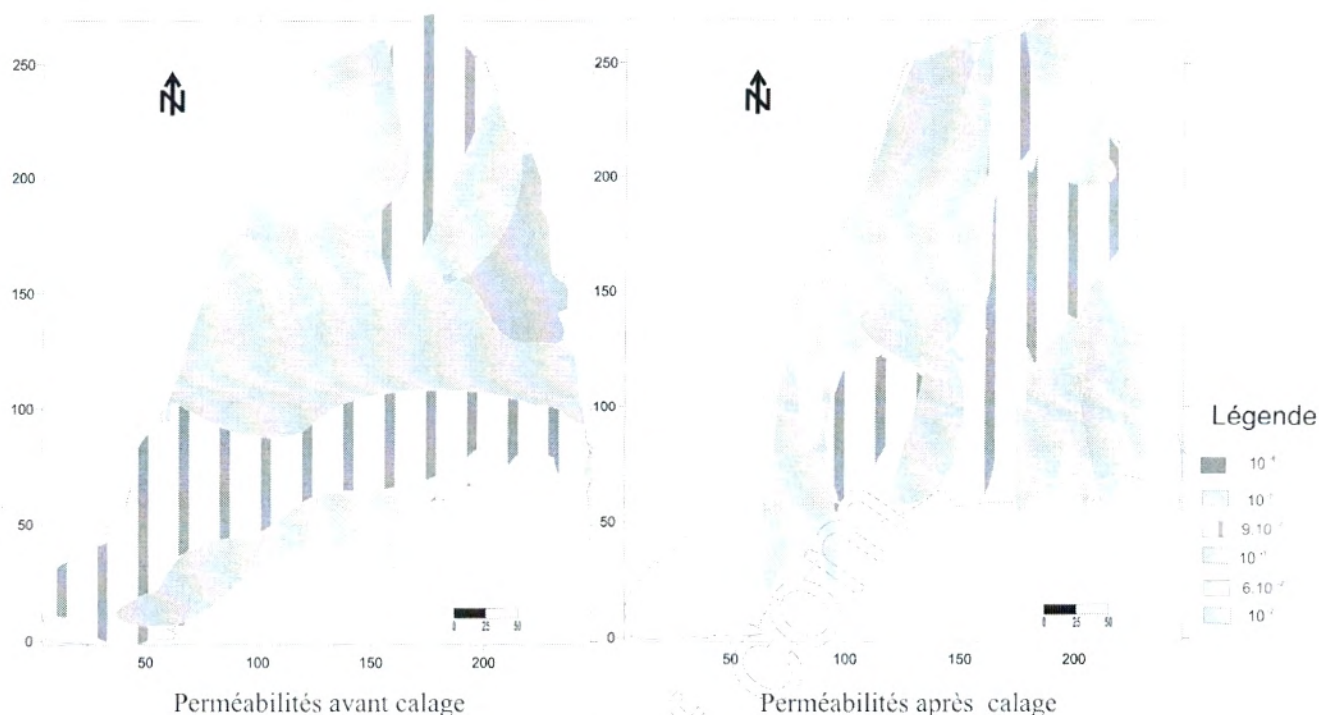


Figure 75 : Carte de perméabilité de la palmeraie de Béni Abbès

La qualité d'un calage peut être appréciée en examinant successivement les points suivants :

- Reproduction de la piézométrie : les figures donnent pour notre modèle, la piézométrie calculée au stade final du calage en regard de la piézométrie de référence. L'écart entre les deux ne dépasse jamais 1 m et est même dans la plus part des mailles inférieur à 1 m. Ce qui correspond à peu près à la marge d'incertitude affectée aux relevés piézométriques et à la notion même de « piézométrie moyenne » et représente 5% de la piézométrie totale. De ce point de vue, l'accord est donc excellent.

- Répartition des débits aux limites ou bilan : le modèle d'ensemble donne pour les débits aux limites les résultats dans le tableau 22 répartie comme suite :

Un Bilan global avec des entrées de $0,089 \text{ m}^3/\text{s}$, entièrement fournis par le drain naturel des eaux de l'erg et le retour des infiltrations des eaux d'irrigation et la recharge par les eaux de pluie et des sorties d'une somme de $0.102 \text{ m}^3/\text{s}$ se répartissent comme suite:

Drainage par le talus hamadien(eaux de l'erg) 0.080 m^3 et par les eaux de la grande source et les foggaras $0.009 \text{ m}^3/\text{s}$.

Vidange dans le coté Ouest (l'Oued) $0.01 \text{ m}^3/\text{s}$

Prélèvement par puits de l'ordre de $0.052 \text{ m}^3/\text{s}$

Perte par évapotranspiration de $0.041 \text{ m}^3 / \text{s}$

Tableau 22: Bilan de la nappe de l'aquifère alluvial de la palmeraie de Beni Abbés

	Drain naturel	Puits	Vidange de la nappe	évaporation	Recharge	TOTAL
Entrées m^3/s	0.08				0.009	0.089
Sorties m^3/s		0.052	0.01	0.041		0.102
Déficit						0.013

Pour un praticien les perméabilités constituent le résultat le plus important car leurs cartes permettent d'orienter l'implantation des puits d'exploitations

- Une zone de très faible perméabilités de l'ordre $1.2 \cdot 10^{-4}$
- Une zone de faible perméabilités de l'ordre $4 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2 / \text{s}$ dans la moitié de partie Ouest du ksar
- Une zone de forte perméabilités de l'ordre de $0.11 - 0.11 \text{ m}^2/\text{s}$,

Au terme du calage définitif de la simulation en régime permanent, le modèle a permis de restituer un bilan hydrologique de la nappe alluviale de la palmeraie de Béni Abbés à savoir la recharge, les apports latéraux et la quantité d'eau extraite des puits.

2.1 Evolution de la piézométrie et les rabattements de la nappe alluviale de 2008 jusqu'à 2030

Parmi les problèmes posés c'est que nous n'avons pas pri en considération les pertes par évaporation dans l'élaboration de notre modèle, inconvénient du modèle ASM, d'une part et d'autre part les réponses à apporté:

- La réalisation d'un barrage souterraine et son impact, dans le changement du comportement de la nappe ;
- L'influence de la recharge artificielle par les eaux traités en module annuel.
- Les rabattements de la nappe et l'influence de chaque dispositif de recharge, pour minimiser le risque de la salinité par la suite

Sur la nappe alluviale, la précision du calage est affectée par l'imprécision des prélèvements dans la nappe le peu aussi que données de perméabilités et de Transmisivités de l'aquifère alluvial. Le calage a consisté à visualiser une baisse de niveau entre 0 et 2 mètre.

2.2. Simulation des exploitations futures

A l'horizon 2020 la consommation d'eau potable et industrielle de la ville de Béni Abbès est estimée à $50 \text{ hm}^3/\text{an}$

On propose un premier scénario dans lequel les eaux issues de la grande source et destinées pour l'irrigation soient détournées pour l'AEP. De ce fait la nappe alluviale se verra diminuée d'un débit non négligeable qu'il faut remplacer. Pour ce faire deux solutions peuvent être envisagées:

- ✓ La construction d'un barrage souterrain qui permettra un stockage d'eau en provenance de la nappe du grand erg
- ✓ La recharge artificielle dans des puits ou des bassins de décantation dans les zones dégradées de la palmeraie, cette solution plausible, permettrait à la fois une régularisation de la quantité et une amélioration de la qualité du volume d'eau dans l'aquifère alluvial de la palmeraie

2.2.1 Fonctionnement de la nappe avec le barrage et la recharge

a) Sans barrage

L'écoulement est drainé vers l'oued ou l'évaporation est intense. La profondeur de l'eau est de 3 à 9 m du sol en amont (lisière du talus hamadien), par contre à moins de 2 m en aval (près d'oued).

b) Avec Barrage

L'exploitation de la nappe dans la palmeraie doit tenir compte des considérations suivantes

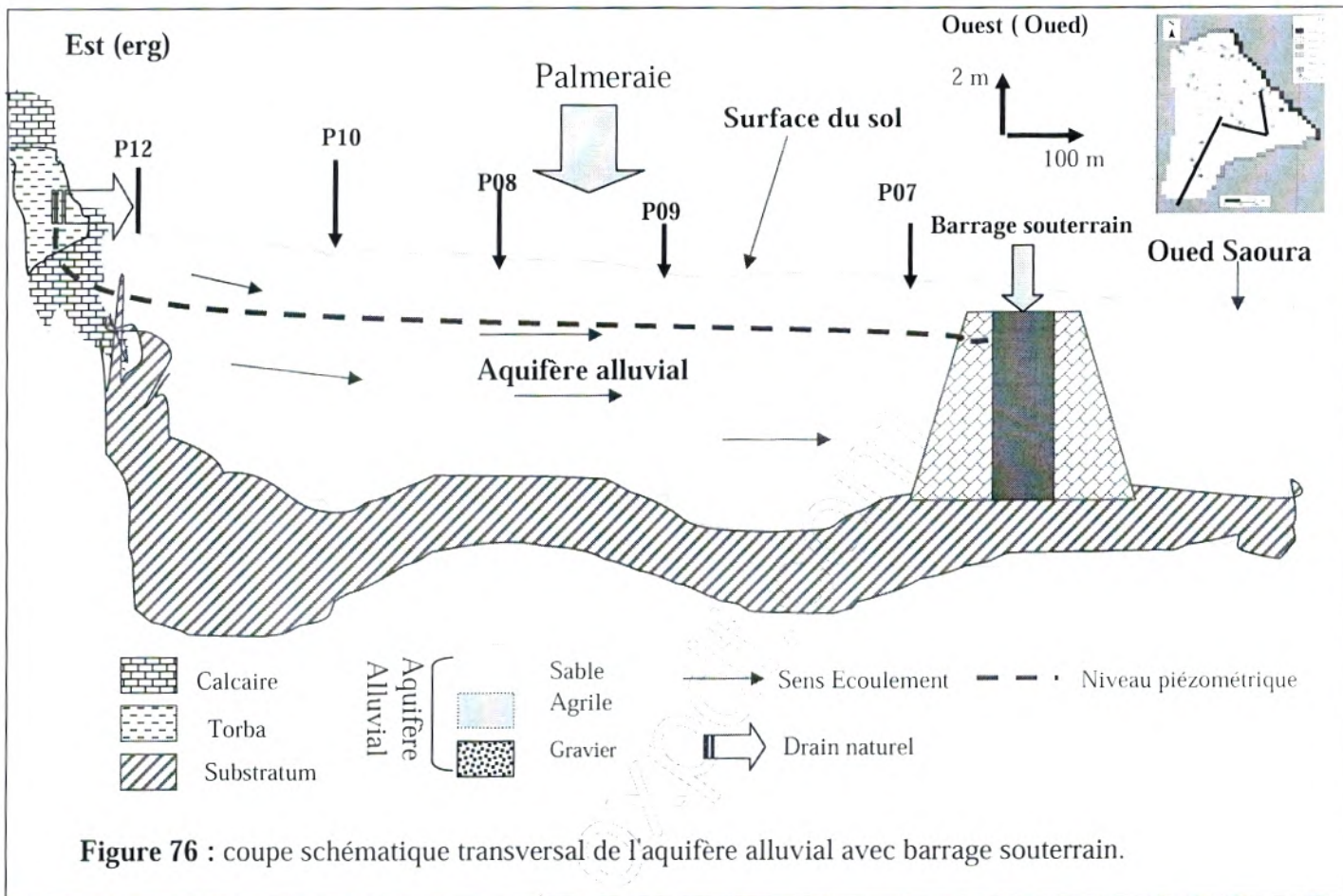
- Récupérer de l'eau qui se perd vers l'oued
- Emmagasiné une eau de bonne qualité sans recharge par les eaux usées épurées.
- Emmagasiné un grand volume d'eau et d'une profondeur critique à partir de laquelle la reprise évaporatoire n'est pas active.
- Elle se fera en élaborant un plan d'exploitation des réserves régulatrices.

Le schéma suivant illustre cette méthode:

Le système de nappe et l'oued (inféro-flux) constitue une unité aquifère alluvionnaire. Cette dernière se vidange naturellement soit par exploitation par puits soit par un écoulement Nord Sud de la nappe qui se perd vers l'oued et par évaporation par conséquent.

1. L'action combinée du barrage et de l'exploitation intensive de la nappe permettra de diminuer les pertes naturelles d'eau qui s'évaporerait à la suite de remontée du plan d'eau.
2. La réserve sera reconstituée grâce à l'action du barrage et par une recharge artificielle par épandages d'eaux usées épurées par stockage et infiltration en retenant et freinant l'écoulement souterrain vers l'oued.

Ce schéma doit s'appuyer sur un dispositif de surveillance et de contrôle du niveau piézométrique et de la qualité de l'eau pompée (Fig.76)



c) Avec recharge et sans barrage

La meilleure solution c'est de construire de bassins de décantations avec de l'argile, qui seront remplis de sable de dunes du grand erg occidental et de gravier, d'un volume de 400 m³ chaqu' un (Fig.77).

Ces bassins seront implantés dans les zones dégradées des terres de la palmeraie. L'objectif de ces étangs, est de servir de surface dépendage à la fois une des eaux usées épurées pour une recharge artificielle de la nappe. Cette eau usée déjà épurée sera affectée par une autoépuration d'une part, et une diminution de la salinités des eaux dans cette partie de l'aquifère endommagée.

3. Recommandations pour la préservation des ressources en eaux

L'étude piézométrique nous a permis de déterminer la direction de l'écoulement, les domaines d'influence du cône de dépression, ainsi que la localisation des zones de recharge des eaux souterraines.

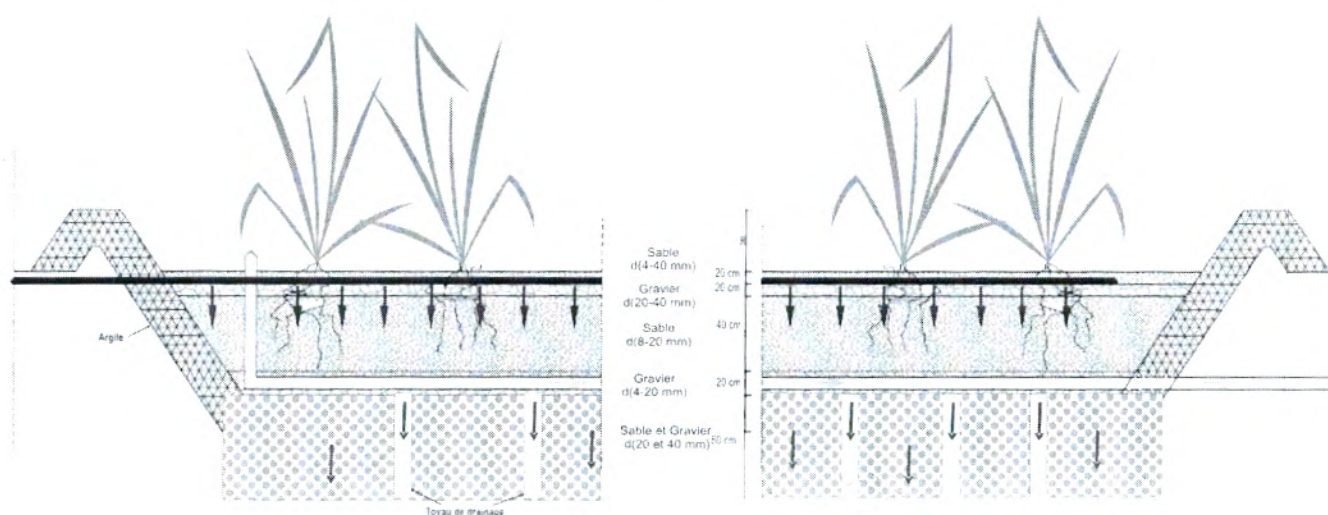


Figure 77 : Composition d'un Bassin d'épandage à filtre.

3.1 Estimation des risques

L'estimation des risques de salinité dans les deux tiers de la surface de l'aquifère alluvial et le site de captage de la grande source est un élément important de l'identification d'une zone de protection.

3.2 Réalisation du plan de gestion

Le degré de flexibilité de la réalisation du plan par une commune comme l'oasis de Beni Abbés est élevé mais la réalisation doit s'orienter vers l'objectif que l'opération de l'AEP et AEI publique garantisse l'approvisionnement de la population et la palmeraie de manière sûre et en quantité suffisante.

La commune de Béni Abbés doit établir un plan de gestion décrivant entre autres les prescriptions et réglementations locales, les exigences de zonages et programme de suivi incluant les autres initiatives locales lors de la réalisation du plan de gestion. Le plan devrait avoir des mécanismes de réglementation définissant et surveillant les distances minimales pour les canalisations, étudier l'apport d'eau sur les parcelles agricoles qui permet le lessivage des sels accumulés dans les sols.

Il s'agit également de vérifier si et dans quelle mesure l'eau peut être captée dans les foggaras à réhabiliter dans l'extrémité amont de la palmeraie et si elle peut être utilisée pour l'irrigation des parcelles menacées par la salinisation. Pour ce faire un barrage souterrain perpendiculaire au sens d'écoulement de la nappe alluviale pourrait résoudre le problème

3.4 Développement d'une banque de donnée des eaux pour Béni Abbès

Les données sur les observations des nappes (piézométrie, qualité) ainsi que sur les précipitations et les écoulements des crues de l'oued Saoura sont disponibles à l'ANRH de Bechar. Ces données et informations pertinentes pour l'oasis de Beni Abbès sont indispensables pour l'estimation des ressources en eau sont disponible sous forme SIG.

Les informations suivantes, entre autres sont déjà requises :

Carte géologique et hydrogéologique de la région de Beni Abbès, les points d'eaux de mesure, paramètres hydrodynamique des aquifères (T, K,S), données sur la gestion de barrage Djorf Torba(volumes mensuels, apports, écoulements et lâchés), données hydrologiques du bassin versant de la Saoura(Guir, Zouzfana et Saoura), données pluviométriques, ces données seront importées de la banque de données du projet (Base de données Béni Abbès) et servent de base pour les investigations ultérieures de l'oasis de Beni Abbès.

3.5 La méthode de recharge artificielle dans des bassins d'épandages

La recharge artificielle par épandages des eaux usées épurées, présente une solution plausible et économique. Cette action sert à l'alimentation de l'aquifère alluvial par infiltration de l'eau épurées dans les zones d'épandage. Ces eaux soulignent aussi en une autoépuration, avec une augmentation du rendement de la station d'épuration et par conséquent une diminution de la salinité les deux tiers de l'aquifère alluvial endommagés. Une étude de réalisation d'une station d'épurations des eaux usées pour la commune de Beni Abbès est déjà disponible.

3.6 Réalisation d'un barrage souterrain

Comme le montre les résultats de la simulation, le fonctionnement de la nappe de la palmeraie en présence du barrage souterrain, présente une solution durable pour une bonne gestion de l'aquifère alluviale. L'ouvrage s'étend sur une longueur de 400 m et une hauteur de 10 mètres. Les matériaux locaux l'argile et la pierre seront utilisés dans la construction de ce barrage.

3.7 Amélioration du système d'irrigation traditionnel

Une amélioration du système d'irrigation traditionnelle « Tighira », par la réalisation de quatre grands bassins de stockage. Une amélioration de l'hydraulique traditionnelle, de façon à moderniser ce système, en gardant le partage de la quantité d'eau hérité de chaque propriétaire de la palmeraie

3.8 La mise en œuvre d'un modèle de gestion intégrée des eaux (fg.78)

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 oeuvre 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.

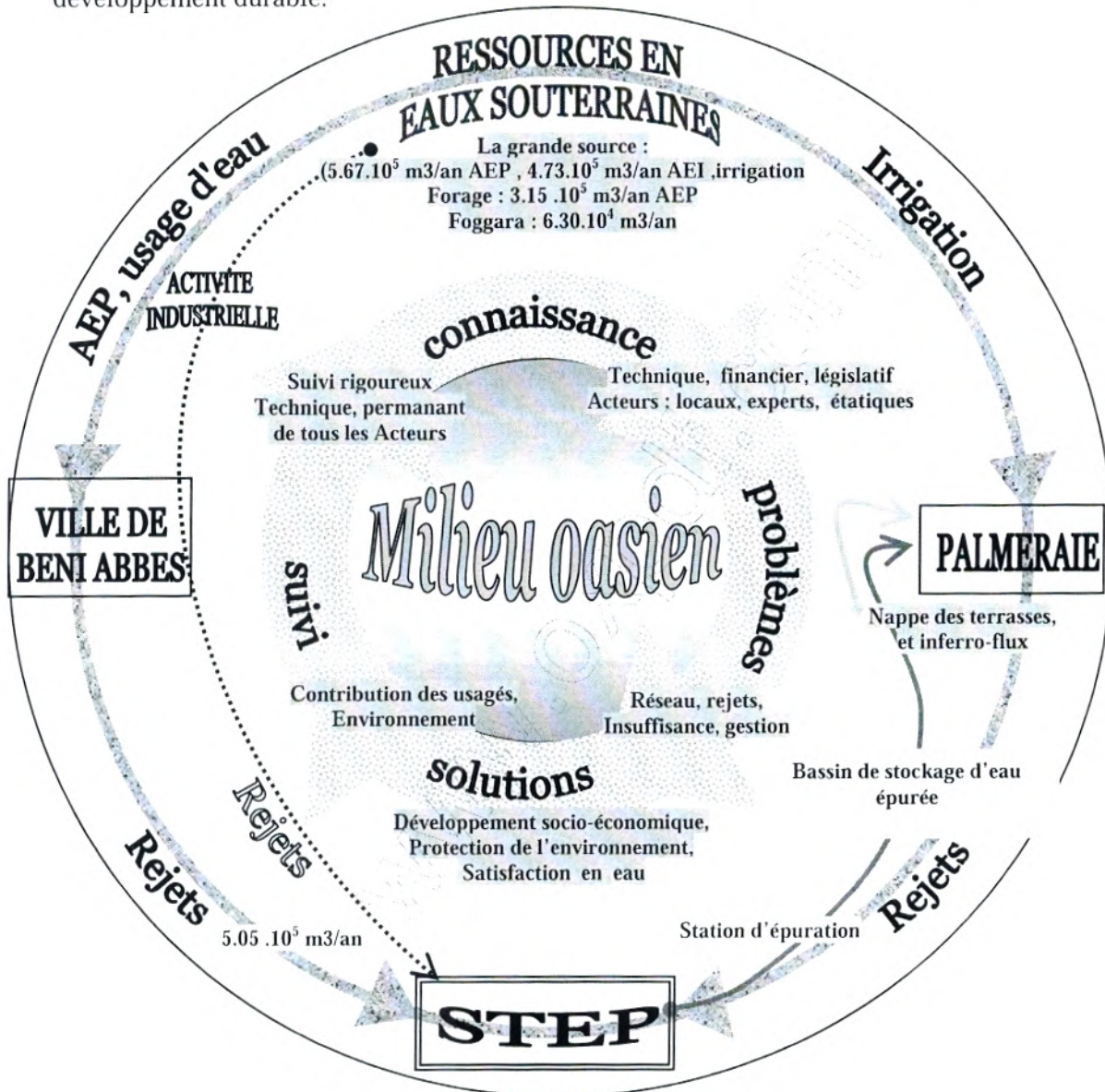


Fig. 78 : Schéma du cycle de la gestion intégrée des ressources en eau pour L'Oasis de Beni Abbés (modèle Oasien).-(Merzougui, 2008)

Conclusion

Les conditions climatiques et pédologiques de la nappe alluviale de la palmeraie sont à l'origine d'une exploitation intensive des eaux souterraines aux fins d'irrigation. Ceci pose le problème de la protection de la nappe contre l'invasion saline de l'inféro-flux et la contamination des masses d'eaux douces, son exutoire principal, l'aquifère du complexe terminal (nappe du grand erg occidental); Malgré le peu de fiabilité de certaines données recueillies, la modélisation de la nappe de la palmeraie de Béni Abbés, nous a permis d'identifier et d'analyser grossièrement le comportement du niveau piézométrique. Cette étape de modélisation de l'aquifère alluviale de la palmeraie, n'est qu'une première approche à la connaissance de son comportement, dont nous espérons que quelqu'un s'y intéresse de plus près.

Quatre scénarios de simulation ont été exécutés, une exploitation avec le même régime sur 20 ans, une recharge artificielle par d'épandages des eaux usées après traitement, la construction d'un barrage souterrain, et une recharge avec barrage.

Un schéma de gestion des ressources en eau est proposé afin d'assurer l'équilibre entre l'offre et la demande pour les différents usages afin de garantir un développement durable;

www.oxpdt.com

Conclusion générale

Conclusion générale

L'Oasis de Béni Abbès est située à 240 km de Bechar. Cette oasis appartient aux chapelets oasiens de la vallée de la Saoura, cette dernière est formée par la confluence de deux oueds principaux, l'oued Guir et l'oued Zousfana.

Cette oasis comporte une palmeraie de 40 hectares, d'une longueur d'environ 1 km occupant la rive gauche de la vallée de la Saoura.

Le climat de cette oasis est aride, caractérisé par une pluviométrie moyenne annuelle de 30 à 40 mm, l'été chaud et sec, l'hiver froid et sec. L'évaporation annuelle est importante de 2012 mm/an.

A l'échelle régionale la région est attachée aux monts de l'Ougarta, elle est constituée d'un substratum dévonien, surmonté par les formations tertiaires et quaternaires.

Une étude géologique et géophysique au niveau de la palmeraie a confirmé que le remplissage du Quaternaire de l'aquifère alluvial est constitué de graviers, d'argile et de sable, d'une épaisseur de 15 à 20m.

Les ressources souterraines s'organisent dans un système aquifère interconnecté, dont on connaît les grands traits de sa dynamique et son fonctionnement, il comporte quatre nappes différentes, régies par des facteurs géologiques et climatiques.

L'aquifère alluvial et l'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).. L'inféro - flux de la vallée de la Saoura constitue le niveau de base des eaux souterraines au niveau de la palmeraie de Béni Abbès. A partir d'Octobre et Novembre, période de crues de la Saoura, le niveau piézométrique remonte d'un à deux mètres et par conséquent un équilibre s'établit alors, entre l'évaporation, la profondeur de ce niveau et l'apport latéral de la nappe du grand erg. En revanche, pour le reste de l'année, cet équilibre est complètement rompu. Les cartes piézométriques montrent un sens d'écoulement général d'Est vers l'Ouest (de l'erg vers l'oued). Par conséquent, les terrasses alluviales sont alimentées par un drain naturel par les eaux de la nappe du grand erg (Transmissivité : 6.10^{-4} m²/s à 4.10^{-2} m²/s et coefficient d'emmagasinement : 1,3 à 6 %). La nappe du Hamada du Guir ne contribue pas ou très peu à l'alimentation de l'inféro-flux de la Saoura et les nappes paléozoïques ne sont guère impliquées dans ce circuit.

Les séries de données hydrochimiques recueillies sont discontinues, mais elles s'avèrent très utiles 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 la

migration exogène de la salinité. En effet, ce problème 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. En revanche, ceux situés au bord de la Saoura sont très salés (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'analyse géostatistique des paramètres géométriques et hydrodynamiques de l'aquifère nous ont permis de réaliser une bonne répartition spatiale des paramètres (piézométrie, transmissivité, coefficient d'emménagement, mur toit et épaisseur de l'aquifère). Les résultats forment la base des données pour le modèle mathématique.

Une modélisation mathématique du système aquifère a été réalisée en régime permanent et transitoire. Le calage en régime permanent et transitoire, a permis de réaliser une distribution des transmissivités. Les simulations mathématiques des différents scénarios d'exploitation ont révélé qu'au fur et à mesure que l'on intensifie les débits de captage, l'abaissement piézométrique augmente, et que les tendances climatiques influencent le comportement de la nappe

Le bilan de la nappe est déficitaire, où l'influence de l'alea climatique sur la recharge de la nappe est peu important, par contre le drain naturel qui alimente en permanence l'aquifère alluviale présente un facteur limitant de la recharge.

Des scénarios de simulation ont été visionnés montrent une étroite liaison entre l'hydrologie de la Saoura et l'aquifère alluvial de la palmeraie de Béni Abbès. En période humide, on constate une remontée du plan d'eau, au contraire dans la période sèche. La multiplication des ouvrages hydrauliques engendre en effet une surexploitation de la nappe de la palmeraie et un rabattement important du niveau piézométriques.

Au terme de ce travail on suggère succinctement :

- Dans le sens de mener une stratégie efficace dans la gestion de la ressource en eau, il est souhaitable, d'établir une surveillance de la quantité et la qualité des eaux souterraines de la palmeraie.
- Utilisation des différentes méthodes de recharge artificielle par épandages des eaux usées épurées dans l'aquifère alluviale,
- La construction d'un barrage souterrain perpendiculaire au sens d'écoulement des eaux de la palmeraie, il faut noter que cette solution est coûteuse.
- Un modèle de gestion intégré des ressources en eau a été recommandé afin d'assurer l'équilibre entre l'offre et la demande. Ce modèle de gestion conduit à établir un schéma de gestion des eaux, basé sur la surveillance et l'amélioration de la connaissance de la ressource en eau souterraines et l'avantage d'aménager les réseaux de distribution de

l'alimentation en eau potable, d'améliorer le système d'irrigation traditionnel et de réutiliser après le traitement des eaux usées pour des fins d'irrigation.

Le présent modèle doit être mis en oeuvre et constitue une base essentielle pour une gestion efficace de l'eau dans les milieux oasiens et permet de prendre conscience de la nécessité de gérer et préserver la ressource en eau souterraine de façon à concilier un développement socio-économique, une préservation de la palmeraie de Béni Abbès et à équilibrer les différents usages pour garantir un développement durable

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- 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
- Ait Kaci, A. (1990)** Evolution litho stratigraphique et sédimentologie des Monts d'Ougarta pendant le Cambrien (Sahara algérien nord occidental). These 3^{ème} cycle IST (USTHB) Alger
- 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. ;
- 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.
- Blondel T. (2002)** : Modélisation numérique avec Visuel Modflow v. 3.0. Rapport Cabinet Conseil Blondel.
- Bonnet (1983)**. Méthodologie des modèles de simulation en hydrogéologie BRGM., Orléans.
- Bouhouche Z, Ghazi F (1993)** Contribution à l'étude hydrogéologique de la région de Béni-Abbès. Thèse Ing État, USTHB. Alger, p146 p.
- 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.
- 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.
- Chavaillon J.(1964)** Les Formations quaternaires du Sahara nord-occidental (de Colomb-Béchar à Reggane). Géologie et préhistoire. Paris: Publ CNRS, série Géol.; 393p.
- Choubert, G. et Lavocat, R. 1950**. Les déformations et plis de la Hamada du Draa. C.R. Acad. Sc. t.231, pp. 451-453.
- Chikhaoui, M. (1974)**. Les ignimbrites et les roches basiques du Précambrien supérieur des Monts d'Ougarta (Soura). 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.
- 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. & Fontes J.C. (1970):** Hydrologie isotopique du Sahara Nord-Occidental. "Isotope Hydrology 1970", A.I.E.A., Proceed. Symp. Vienne, pp405-419.
- 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.
- 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,*
- 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
- Collomb, P. et Donzeau, M. (1974).** Relation entre Kink-bands décamétriques et fractures du socle dans l'Hercynien des Monts d'Ougarta (Sahara occidental, Algérie). Tectonophysiques, 24, p. 213-242.
- Demarsily G. (1981)** Hydrogéologie quantitative- Edition MASSON – Paris- 215 p.
- Derdour A. (2010)** Modélisation hydrodynamique de la nappe des grès crétacés du Synclinal de Remtha –Monts des ksour- Algérie, mémoire Magister, université de Tlemcen 101p.
- Donzeau, M. (1971).** Etude structurale dans le Paléozoïque des Monts d'Ougarta. Thèse. Doct. 3^{ème} cycle, Fac. Sci. Orsay.
- 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, 275 p.
- Dubief, J. (1953).**Essai sur l'hydrologié superficielle au Sahara. Direction du Service de la colonisation et de l'hydraulique, Service des Etudes Scientifiques, clairbois, Birmandreis, (Alger), 457 p.
- Fabre, J. (1983).** Introduction à la géologie du Sahara algérien.- Ed. SNED, Alger, 422 p.

- Gauttier Y. (1997)** Estimation de paramètres géostatistiques à partir de tests de puits, thèse de Doctorat, Université de Paris 06, Paris, France. 167p
- Gauttier, E, F. (1906).** Contribution à l'étude géologique du Sahara (Saoura, Gourara, Touat), Bull. Soc. Géol. France (4), 6, pp. 729-767.
- 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.
- Hamddidouche.R (2009)** Le bassin intra cratonique de l'Ougarta(Sud Ouest Algérie): évolution géodynamique au Paléozoïque, thèse de doctorat d'état, USTHB. 220p.
- 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.
- 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)** Grondwater modellling and impljcation for groundwater protection: Case study of the Abidjan aquifer Cote d'Ivoire (in Applied droundwater studies in Africa: seum MA Adelana et Alan M. MacDonald N° 13, chapitre 27, pp458-472)
- Lagribi A. (2006)** Impact d'un système d'épuration sur le schéma directeur d'eau de la ville de Béni Abbès et sa palmeraie. Centre universitaire de Béchar. P82
- 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 ouvre des mesures agro-environnementales.revue géologues N°159 .P85-91
- Laroussi C., Habaleb H., (1986)** Gestion des ressources en eau en conditions d'aridité, cas de la Tunisie, INAT.
- 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.
- Mansour H. (1993)** Les isotopes dans l'eau du Sahara Nord Occidental Algérien (Grand Erg Occidental - Hammada du Guir). 2éme 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, retroperspectives, enjeux et réalités. Adrar.
- Mekideche D., Sain., Touat S. et Younsi N. (1995).** Carte hydrogéologique de la région de Béchar. Notice explicative, p 73.

- Menckekoff, 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. Poucyto, A. (1952).** Les chaînes d'Ougarta et de la Saoura. 19^{ème} Congr. Géol. Inter., Alger, Mongr. Région, 1ère série, Algérie n. 15.
- Merzougui T. (1998).** Valorisation des ressources en eau de la haute Vallée de la Saoura (entre Taghit et kerzaz) memoire Ing état, Univ d'Oran Algérie, 175 p.
- 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.
- 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 et a. Graine G, (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 » Paris, 12 et 13 juin 2007
- 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
- Meddi, M. (1998).** Etude des pluies annuelles et journalières dans le Sahara algérien. Cahier Sécheresse, Vol.9, Numéro 3, page 193-199,.
- 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
- Partenariat Mondial Pour L'eau/Comité Technique Consultatif (2000).** La gestion intégrée des ressources en eau, document no 4
- Philippe Verjus.A (2008)** Gestion de la nappe du Champaigne (Ile de France p91, revue géologues N°159
- Paryen, C. (1961).** Les massifs carbonifères du Sahara sud-oranais. Edit. C.N.R.S. , 1, 325 p., 2 c. H.t.
- Rose Ben Simon. (2006).** Simulation numérique 3D du transfert de polluant au sein d'un aquifère bicouche hétérogène, Mémoire de Master des sciences de l'univers, environnement et écologie, Université Pierre et Marie Curie.
- 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

- O.R.G.M, (1998).** Rapport final de prospection régionale de l'Argent dans les Monts d'Ougarta. (TomeI).
- Roche MA. (1973).** Hydrogéologie de la Haute Saoura (Sahara nord-occidental). Paris: Publ CNRS, série Géol.; 91p.
- Scholler H. (1945).** L'hydrogéologie d'une partie de la vallée de Saoura et du grand d'erg occidental, bull, soc, géol.fr.5 .T.XV, page 563-585.
- Roche MA. (1973)** Hydrogéologie de la Haute Saoura (Sahara nord occidental). Paris: Publ CNRS, série Géol, 91p.
- 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)
- 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
- 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 N et Ait-Ahmed C (1992)** Contribution à l'étude hydro-géologique de la Grande Source et de la palmeraie de Béni-Abbès (Sahara occidental). Memoire Ing Etat, Univ Sci Tech d'Oran-Algérie, p 440.

LISTES DES FIGURES

- Figure.1: Situation de Béni Abbès
Figure.2 : Vue satellite de Beni Abbès.
Figure.3: Les domaines pédologiques de la palmeraie centrale.
Figure.4: Synthèse des contraintes de développement agricole dans la palmeraie De Béni Abbès.
Figure.5: Les besoins et disponibilités en eau dans l'oasis de Béni Abbès
Figure.6 : Carte toponymique de la chaîne d'Ougarta (ORGM).
Figure.7 : Carte photogéologique des monts d'Ougarta
Figure.8 : Schéma géologique et structural des chaînes d'Ougarta (In T. Bouïma, 1986)
Figure.9 : Esquisse photo géologique de Béni Abbès.
Figure.10: Coupe du Gara Diba (Roche, 1973)
Figure.11: Coupe schématique du Quaternaire (Chavaillon, 1964)
Figure.12-a : Coupe à travers la vallée de la Saoura à Hemama, près de Beni Abbès montrant les terrasses Guiriennes (CHAVAILLON, 1964)
Figure.12-b : Coupe à travers la vallée de la Saoura à Hemama, près de Beni Abbès montrant les terrasses Saouriennes de la rive gauche (J-CHAVAILLON, 1964)
Figure.13 : Esquisse tectonique des monts d'Ougarta (M. Donzeau, 1971)
Figure.14 Schéma des axes des plis et des flexures des synclinaux et anticlinaux des monts de l'Ougarta. (Schéma élaboré à l'aide des travaux de M, Donzeau. 1971&1972).
Figure.15 : Situation du bassin versant de la Saoura
Figure.16 : Cartes pluviométriques du Sud Ouest algérien (pluviométrie en mm/an)
Figure 17: Histogramme des précipitations mensuelles de la station de Beni Abbès
Figure.18.: Répartition des précipitations saisonnières la station de Béni Abbès
Figure.19 Histogramme de répartition des précipitations annuelles.
Figure.20 Carte piézométrique de la nappe du grand erg (M. Roche, 1973)
Figure.21 : Schéma de la nappe de la hamada de Guir
Figure.22 : Esquisse schématique du système aquifère de Béni Abbès.
Figure.23: Coupe hydrogéologique dans la région de Béni Abbès, à travers la Saoura (Rohe 1973, Modifié Merzougui 2010)
Figure.24 : Coupe géo électrique à travers Oued Saoura près de Béni Abbès, 2001
Figure.25 : Coupe lithologique quelques puits creusés dans la palmeraie (enquête sur terrain 2008)
Figure.26: Présentation, en 3D, du mur du remplissage quaternaire.
Figure.27 : Présentation, en 3D, du toit du remplissage quaternaire
Figure.28 : Carte positionnement des puits d'observation dans la palmeraie
Figure.29 : Carte piézométrique de nappe de la palmeraie avril 1991
Figure.30: Carte piézométrique de la palmeraie en 3D (Année 1991)
Figure.31: Carte piézométrique de la nappe de la palmeraie 2008
Figure .32: fluctuation de la piézométrie mensuel dans la palmeraie haute eaux et basse eaux
Figure. 33: Evolution piézométrique de la nappe de la palmeraie dans 20 ans.
Figure.35: Synthèse des paramètres hydrochimique des eaux de surface du bassin versant de la Saoura
Figure. 36: Représentation graphique selon piper des analyses chimiques de la nappe de la palmeraie
Figure. 37: diagramme du Scholler de la potabilité des eaux de la région de Beni Abbès.
Figure.38 : Etat des eaux de la palmeraie (Merzougui et et al, 2007)

Figure.:39 Cartes d'égale valeur des paramètres physico- chimique de la palmeraie de Beni Abbès

Figure 40 : Carte d'égales valeurs du résidu sec en mg/l de la palmeraie.

Figure 41: Carte d'égales valeurs de la minéralisation en mg/l des eaux de la palmeraie.

Figure 42 : Carte d'égales valeurs des Nitrates en mg/l des eaux de la palmeraie.

Figure 43 (a): Carte d'égale valeur de paramètres chimiques des eaux de la palmeraie

Figure 43 (b): Carte d'égale valeur de paramètres chimiques des eaux de la palmeraie

Figure 44: Représentation graphique selon Piper des eaux de la palmeraie.

Figure 39 : Synthèse des paramètres hydrochimiques des eaux de surfaces du bassin versant de la Saoura

Figure 45: Diagramme du Scholler de la potabilité des eaux de la palmeraie de Béni Abbès.

Figure46 : état des eaux de la palmeraie (Merzougui et et al, 2007))

Figure 47 : Evolution du résidu sec des eaux des nappes de la région de Béni Abbès

Figure 48 : Carte de zonage selon la qualité des eaux de la nappe de la palmeraie 2008.

Figure 49 : Taille et forme des mailles (ROCHE, 2005)

Figure 50: Utilisation et rôle des modèles dans la résolution des problèmes hydrogéologiques (Konikow, 2000).

Figure..50 Taille et forme des mailles (P.A. ROCHE, 2005)

Figure .51 : Utilisation et rôle des modèles dans la résolution des problèmes hydrogéologiques (L.F. KONIKOW, 1996 in L.F. KONIKOW 2000).

Figure. 52 : Maillage recommandé

Figure 53 : Conditions aux limites de la nappe alluviale de la palmeraie de Beni Abbès

Figure.54 :La répartition des débits de pompage des puits de la palmeraie de Béni Abbès.

Figure. 56: Les variogrammes des phénomènes étudiés et ces équations.

Figure. 57 : Variogramme expérimental de la piézométrie mesurée (1991)

Figure .58 Carte piézométrique krigée.

Figure.59. Carte de piézométrie calculée

Figure 51 Carte de transmissivité

Fiig 51 : Potentiels mesurés (AVRIL. 1991).

Figure.52: Potentiels calculés après le calage du modèle en régime permanent.

Figure 53: Carte des transmissivités (m^2/s) adoptées pour le calage du modèle en régime permanent.

Figure 51: Discrétisation et conditions aux limites du modèle.

Figure 52 La répartition des débits de pompage des puits de la palmeraie

Figure 53 : Répartition des différentes valeurs de perméabilités dans le modèle

Figure 54 : Les variogrammes des phénomènes étudiés et ces équations.

Figure 55 : Variogramme expérimental de la piézométrie mesurée (2008)

Figure 56 : Carte Potentiels mesurés krigée (Avril. 2008)..

Figure57. Comparaison entre les potentiels mesurés et calculés après calage du modèle en régime permanent

Figure 58: Comparaison de la piézométrie calculé et mesurée en régime permanent

Figure 59 : Carte des perméabilités (m^2/s) adoptées pour le calage du modèle en régime permanent.

Figure 60 .Comparaison entre les potentiels mesurés et calculés après calage du modèle en Régime transitoire

Figure 61. Carte des potentiel entre calcule et mesure de la simulation de l'état 2009.

Figure 62. Carte des écarte (ΔH) de la simulation de l'état 2009. (H09- H08)

Tableau 21 : Bilan de la nappe calculé par le modèle en régime transitoire.

Figure 63 : Carte de distribution des valeurs du coefficient d'emmagasinement adoptées pour le calage du modèle en régime transitoire.

Figure 64 : Evolution piézométrique de la première simulation dans différentes mailles.

Figure 66 : carte des rabattements de la nappe (simulation en 2030)

Figure 67 : Carte piézométrique avec barrage souterraine sans recharge.
Figure 68 : Carte piézométrique avec barrage et avec recharge artificielle dans des puits.
Figure. 69: Représentation graphique des différents scénarios simulés (recharge avec barrage).
Figure70: Carte piézométrique de nappe de la palmeraie, recharge sans barrage
Figure 71: Représentation graphique des différents scénarios simulés (recharge sans barrage).
Figure 72 : Condition et gisement des aquifère alluviale de la palmeraie
Figure 73: Evolution mensuel de la piézométrique de la nappe de la palmeraie
Figure 74: Evolution piézométrique de la nappe de la palmeraie
Figure 75 : Carte de perméabilité de la palmeraie de Béni Abbès
Figure 76 : coupe schématique transversal de l'aquifère alluvial avec barrage souterrain
Figure 77 : Composition d'un Bassin d'épandage à filtre.
Figure. 78 : Schéma du cycle de la gestion intégrée des ressources en eau pour L'Oasis de Beni Abbès (modèle Oasien).-(Merzougui, 2008)

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Schémas de Multicouches et la Relation stratigraphique- aquifères de la région de Béni Abbès

Tableau 2: Répartition mensuelle des moyennes (°C) de la station de Beni Abbés (1926- 1950), (1980 -2005) et (1973-2008)

Tableau 3: Evaporation moyenne mensuelle station de Beni Abbés (1973-2008)

Tableau 4: Répartition mensuelle des précipitations (mm) de la station de Beni Abbés (1926- 1950) et (1973-2008)

Tableau 5 : Moyenne pluviométriques annuelles (mm)

Tableau 6: Précipitations jour de période de retour donnée station de Béni Abbés (ANRH, 1995)

Tableau 7 : Répartition saisonnière des précipitations

Tableau 8 : Fréquence des crues de forte importance 1901-1907 (M I Roche 1973)

Tableau 09 : évaluation de débit de la ressource

Tableau 10 : valeurs de transmisivités de quelques puits dans la palmeraie.

Tableau 11 : Synthèses des analyses physico chimiques des eau de surfaces dans la bassin de la saoura.

Tableau 12 : Potabilité des eaux en fonction de la dureté (OMS) de la nappe de la palmeraie

Tableau 13: Les rapports caractéristiques

Tableau 14 : caractéristiques Hydrochimiques des différentes nappes du de Béni Abbés.

Tableau .15 : Paramètre hydrodynamiques initiaux introduites T

Tableau 16 : débit d'exploitation et évaluation de la ressource

Tableau 17: Différentes valeurs de la perméabilité introduites et leurs zones d'attribution.

Tableau 18: Ecart entre les potentiels mesurés et calculés après calage du modèle en régime permanent.

Tableau 19 : Bilan de la nappe calculé par le modèle.

Tableau 20 : Ecart entre les potentiels mesurés et calculés après calage du modèle en régime transitoire.

Tableau 21 : Bilan de la nappe calculé par le modèle en régime transitoire.

Tableau 22 : Bilan d'eau de la nappe alluviale de la palmeraie de Beni Abbés

Annexes

ANNEXE 1: synthèse des données hydrodynamique des points d'eaux de la palmeraie.

Nom	X	Y	Z	T m ² /s	K m/s	S	Q l/s	E Mur		Nom du puits
								m	m	
P01	02°10'32.17"W	30°07'31.15"N	453,09	0,0001	2E-05		3	6	20	OUED
P02	02°10'32.2"W	30°07'27.7"N	456,18	0,00012	1E-05		2	10	14	PIEZOMETRE
P03	02°10' 29.12"W	30°07'28.3"N	464,6	0,12	0,012	0,059	1,8	10	12	BENAISSA
P04	02°10' 30.85"W	30°07'14.51"N	458,32	0,0002	3E-05	0,004	2	8	16	MANSORI
P05	02°10'12.96 "W	30°07'31.75"N	452,6	0,05	0,0063		2	8	15	OTHMANI
P06	02°10'31.31"W	30°07' 18.9"N	451,28	0,05	0,0063		2	8	18	INCONU
P07	02°10'27.84"W	30°07'8.35" N	450,5	0,05	0,005		2	10	15	HMAN
P08	02°10'19.42 "W	30°07'17.71"N	448,83	0,12	0,01	0,02	2	12	14	BENALLAL B
P9	02°10'20.97"W	30°07'17.62"N	468,62	0,04	0,0057		1,5	7	13	BENDJABOUR
P10	02°10'12.43"W	30°07'20.49"N	467,05	0,11	0,011	0,001	2	10	20	BENALLAL A
P11	02°10'19.23"W	30°07'21.47"N	457,3	0,05	0,0063		2	8	15	BENMOULOU
P12	02°10'14.55"W	30°07'24.21"N	469,55	0,05	0,0083		2	6	7	TAIBI
P13	02°10'16.47"W	30°07'23.15"N	466,76	0,05	0,0083		2	6	15	MOULOUDI
P14	02°10'18.95"W	30°07'25.23"N	461,35	0,05	0,0063		1	8	15	BANI
P15	02°10'23.39"W	30°07'22.33"N	459,8	0,05	0,0063		1	8	15	OTAMANI
P16	02°10'28.46"W	30°07'23.92"N	454,54	0,05	0,0063		1	8	15	BOUANINI
P17	02°10'23.15"W	30°07'25.31"N	452,83	0,0002	2E-05		2	10	14	MANSORI
P18	02°10'24.19"W	30°07'30.60"N	457,95	0,05	0,005		2	10	15	MERZOUGUI
P19	02°10'21.79"W	30°07'31.82"N	482,25	0,05	0,0056		2	9	11	CHADLI
P20	02°10'22.79"W	30°07'33.34"N	461,68	0,05	0,0056		2	9	18	BENAISSA
P21	02°10'26.85"W	30°07'33.34"N	470,6	0,002	0,0002	0,02	1,5	12	14	KFBIR
p22	02°10'13.09"W	30°07'33.34"N		0,04	0,0025		8	16	25	PI 11 Piscine
p23	02°10'16.86"W	30°07'11.53"N		0,11	0,0055		1,5	20	20	PIEZOMETRE
Moy				0,114262	0,0122	3E-04		9,95	15,4783	

Annexe 2: données des puits de la nappe de palmeraie de Béni Abbès

N	Nom du puits	X	Y	Z	NP 1991	NP 2008	T m ² /s	K m/s	S	Q l/s	E m	Mur m	Débit m ³ /l
P01	OUED	02°10'32.17"W	30°07'31.15"N	453,09	452,35	454,09				3	6	20	0,003
P02	PIEZOMETRE	02°10'32.2"W	30°07'27.7" N	456,18	455,57	456,18	0,00012	0,000015		2	8	14	0,002
P03	BENAISSA	02°10' 29.12"W	30°07'28.3" N	464,60	460,54	464,60	0,12	0,012	0.059	1,8	10	12	0,0018
P04	MANSORI	02°10' 30.85"W	30°07'14.51"N	458,32	457,70	458,32				2	8	16	0,002
P05	OTHMANI	02°10'12.96 "W	30°07'31.75"N	452,60	454,56	452,60				2	8	15	0,002
P06	INCONU	02°10'31.31"W	30°07' 18.9"N	451,28	452,15	451,28				2	8	18	0,002
P07	HMAN Dris	02°10'27.84"W	30°07'8.35" N	450,50	452,98	450,50				2	10	15	0,002
P08	BENALLAL B	02°10'19.42 "W	30°07'17.71"N	448,83	456,34	452,83				2	12	14	0,002
P9	BENDJABOUR	02°10'20.97"W	30°07'17.62"N	468,62	454,34	454,62				1,5	7	13	0,0015
P10	BENALLAL A	02°10'12.43"W	30°07'20.49"N	467,05	469,00	459,05				2	10	20	0,002
P11	BENMOULOU	02°10'19.23"W	30°07'21.47"N	457,30	456,50	454,30				2	8	15	0,002
P12	TAIBI	02°10'14.55"W	30°07'24.21"N	469,55	467,85	465,55				2	6	7	0,002
P13	MOULOUDI	02°10'16.47"W	30°07'23.15"N	466,76	466,98	466,76				2	6	15	0,002
P14	BANI	02°10'18.95"W	30°07'25.23"N	461,35	457,85	458,35				1	8	15	0,001
P15	OTAMANI	02°10'23.39"W	30°07'22.33"N	459,80	456,17	456,80				1	8	15	0,001
P16	BOUANINI	02°10'28.46"W	30°07'23.92"N	454,54	454,15	454,54				1	8	15	0,001
P17	MANSORI	02°10'23.15"W	30°07'25.31"N	452,83	453,14	452,83				2	10	14	0,002
P18	MERZOUGUI	02°10'24.19"W	30°07'30.60"N	457,95	471,91	471,96				2	10	15	0,002
P19	CHADLI	02°10'21.79"W	30°07'31.82"N	482,25	468,00	467,25				2	9	11	0,002
P20	BENAISSA	02°10'22.79"W	30°07'33.34"N	461,68	460,54	461,68				2	9	18	0,002
P21	KEBIR	02°10'26.85"W	30°07'33.34"N	470,60	459,41	457,60				1,5	12	14	0,0015
P22	PUIT Piscine	02°10'13.09"W	30°07'33.34"N	470,00	456,00	452,00	0,04	0,0027	0,002	8	15	20	0,008
P23	PIEZOMETRE	02°10'16.86"W	30°07'11.53"N	467,00	460,00	460,00	0,11	0,0055	0,003	1	20	20	0,001

ANNEXE 3 : résultats des analyses physico chimique de la palmeraie de Béni Abbés 2009

DATE	1991 Avril	10/04/2008			19/05/2008			11/06/2008			11/07/2008			11/08/2008		
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

ANEXE 3 : LA SUITE

DATE	15/09/2008			15/10/2008			15/11/2008			12/12/2008			11/01/2009			13/02/2008			13/04/2008		
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 4 : Lithologie et épaisseur en mètre de quelques puits creusés dans la palmeraie (enquête sur terrain 2008).

puits	El Kbir	Benallal	Puits piscine	OBID	MERZ OUCUI	TAIBI	Nadjib 1	Nadjib 2	B E M LOUD	Othman	Ben alla oued B	Othman	Bouanin	DRIS
N° PUIITS	-	P10	P22	P20	P18	P12	P21	-	P11	P15	P8	P16	P15	P07
Torba	0	0	0	0	0	0,3	0	0	0	0	0	0		0
Sable fin	1	0	0	5	0	0	0	0	1	8	0	0		2
sable	2	3	10		5		4		6		4	3	1	2
Sable et gravier	0	0	0	0	0	0	0	5,5	0	0	0	0		0
Argile rouge	4	5		3	4	2,7	4	4,5	6	2	4	4	1	5
Argile sableux	1,50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0
Sable gravier	3,5	3	4	5	0	0	0	0	0	0	0	0		0
Gravier	0,5		2		5			1	1	1		1		
Bloc calcaire + sable	0	1,5	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	3	0
Gravier	0	1,5	0	0	0	1	5	0	0	0	6	0	2	0
Schiste	0	1		0	0	1	0,5	0	0	0	0	0		3
TOTAL PROF	11	15	16	13	14	7	13,5	11	14	11	14	8	7	12

Remarque : les valeurs des épaisseurs dans le tableau ci dessus est en mètre.

Planches

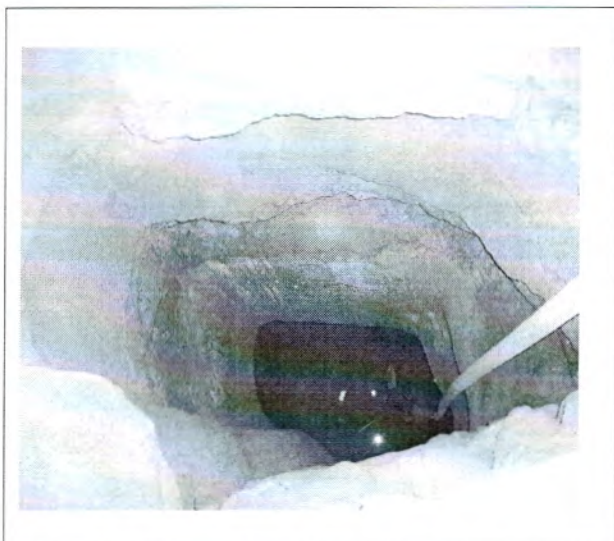


Photo n°01 : puits d'une foggara dans la palmeraie



Photo n°02 : Foggara de Benamour



Photo n°03 : la seguia de la palmeraie (1/3 de la grande source)



Photo n°04 : un puits dans la palmeraie (P14)



Photo n°05 : l'oued Saoura en crue (avril 2008)

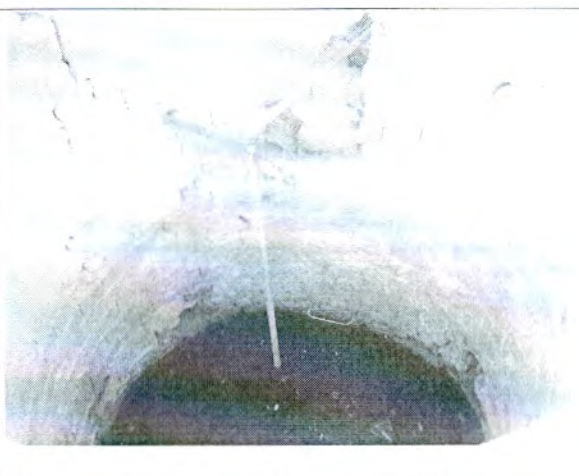


Photo n°06 : puits salé dans la palmeraie



Photo n°07 : vue du talu hamadien e la palemarie



Photo n°08 : falaise du talu hamadien (Iorba)

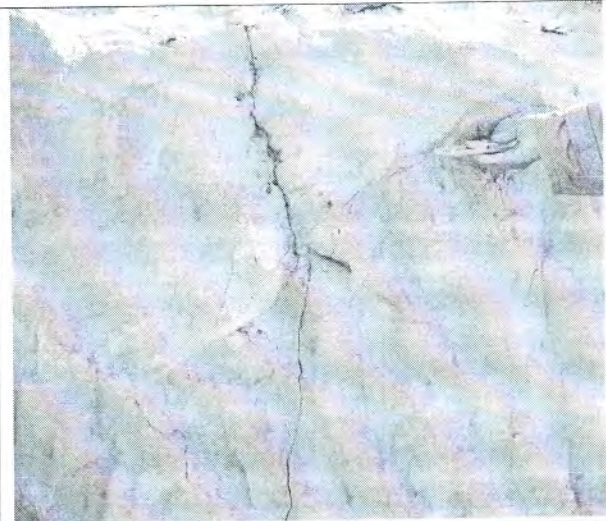
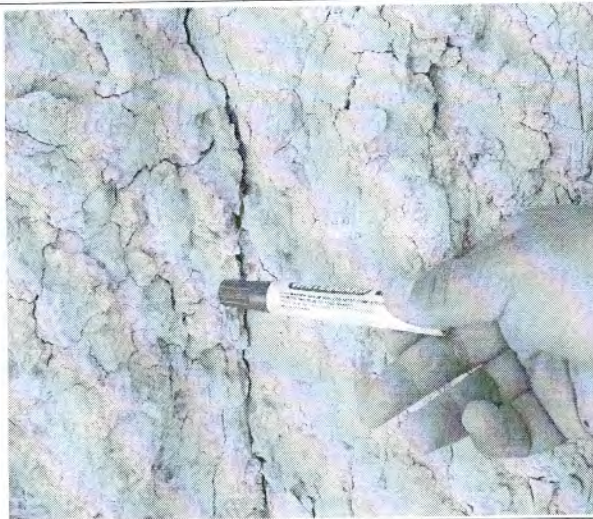


Photo n°09 : des fissuration dans les calcaires et Torba du talu hamadien



Photo n°10: Vue panoramique de l'Oasis de Béni Abbès



Photo n°11: campagne piézométrique dans la palmeraie (avril 2008)



Photo n°12: la palmeraie de Béni Abbès et un jardin en bon état.



Photo n°13: l'oued Saoura en crue (octobre 2008)