

TABLE DES MATIERES

Résumé	4
INTRODUCTION GENERALE	5
CHAPITRE I : GENERALITES SUR LA ZONE D'ETUDE	7
I- 1 Cadre physique	7
I-1.1 Situation géographique de la zone étudiée	7
I.1.2 la climatologie.....	8
I.1.2.1 Mécanismes généraux du climat.....	8
I.1.2.2 Analyse des différents paramètres climatiques.....	8
I.1.2.2.1 Pluviométrie	9
I.1.2.2.2 Température.....	11
I.1.2.2.3 Evaporation	11
I.2 Géologique et Hydrogéologique	13
I.2.1 Géologie	13
I.2.1.1 Géologie du bassin côtier.....	13
I.2.1.2 Géologie de la zone d'étude.....	14
I.2.1.2.1 Le socle antécambrien	15
I.2.1.2.2 Le continental terminal	16
I.2.1.2.3 Les formations du Quaternaire.	16
I.2.2 Hydrogéologie.	18
I.2.2.1 Hydrogéologie du bassin côtier.....	18
I.2.2.2 Hydrogéologie de la zone d'étude.....	18
I.2.2.2.1 Travaux de reconnaissance réalisés sur la zone d'étude	18
I.2.2.2.2 Forme de la surface de la nappe.....	19
I.2.2.2.3 Limites de la nappe douce.....	21
I.2.2.2.4 Ecoulements de la nappe.....	24
I.2.2.2.5 Alimentation de la nappe.....	24
I.2.2.2.6 Alimentation par le socle.....	25
I.2.2.2.7 Contact eau douce eau salée	25
I.3 Conclusion	25
CHAPITRE II : MATERIELS ET METHODES DE L'ETUDE.....	26
II.1 Travaux de réalisation des forages (D. E et F).	26
II.1.1 Matériel utilisé.....	26
II.1.1.1 Matériel de forage	26

II.1.1.2 Matériel de pompage.....	26
II.1.1.3 Matériel carottier électrique	26
II.1.2 Méthodes de forage	27
II.1.2.1 Technique du forage rotary	28
II.1.2.1.1 Principe	28
II.1.2.1.2 Les fluides de forage.....	28
II.1.2.2 Equipement des forages	29
II.1.2.2.1 Les diagraphies.....	29
II.1.2.2.2 Le choix du tubage	30
II.1.2.2.3 Le Captage	30
II.1.2.2.4 Equipement des forages et coupes techniques	33
II.1.2.3 Développement des forages	33
II.1.2.3.1 Méthodes de développement	33
II.1.2.3.2 Travaux de développement	34
II.1.2.4 Essai de pompage	35
II.1.2.4.1 Essai de puit.....	35
II.1.2.4.2 Essai de nappe	35
II.2 Travaux de réhabilitation des forages.....	38
II.2.1 Principe	38
II.2.1 Consistance des travaux	39
II.2.3 Acquisition des données hydrochimiques	39
II.2.3.1 Phase de terrain.....	39
II.2.3.2 Phase de laboratoire.....	40
II.3 Conclusion.....	40
CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS	41
III.1 Caractérisation lithologique	41
III.2 Caractérisation piézométrique de la nappe du continental terminal de Bennichab	46
III.3 Caractérisation hydrodynamique	49
III.3.1 Caractérisation hydrodynamique des nouveaux forages.....	49
III.3.2 Caractérisation hydrodynamique du forage A réhabilité.....	53
III.3.2.1 Etat initial.....	53
III.3.2.2 Après réhabilitation.....	53
III.3.3 Rayon d'influence	57

III.4 La chimie des eaux souterraines.....	58
III.4.1 Caractères chimiques généraux des eaux souterraines.....	58
III.4.2 Etude de l'agressivité des eaux souterraines	59
III.4.2.1 Equilibre calco-carbonique.....	59
III.4.2.2 Détermination du pH d'équilibre ou pH de saturation des eaux.....	59
III.4.2.3 Calcule des indices de saturations des phases minérales	63
III.5 Conclusion	63
CONCLUSIONS GENERALES.....	66
REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE	69
Liste des Figures	71
Liste des Tableaux	73
Abréviations	73
ANNEXES	74

RESUME

Notre zone d'étude Bennichab, est située au nord Est de Nouakchott, entre les coordonnées 15°23 et 15°31 longitudes Ouest et 19°23 et 19°32 latitudes Nord.

L'aridité du climat (faible taux de pluviosité moins de 100mm.an⁻¹) et l'absence de réseau hydrographique permanent dans la zone d'étude, pose le problème de gestion durable et rationnel des ressources en eau souterraines. Afin de contribuer à la préservation de ce système aquifère cette étude a été entamée dans le cadre du projet d'alimentation en eau de la mine d'akjoujt, réalisé par l'entreprise ELMA -Forages.

Les données lithologiques et diagraphiques sur la zone révèlent un système complexe constitué par une succession de fines couches de perméabilité différente ,que l'on peut repartir généralement en deux niveaux aquifères. Cette lithologie rend l'étape de développement des forages très délicate.

L'aquifère de bennichab s'étend sur une superficie d'environ 1200km² et se trouve dans des formations de grès argileux du continental terminal (rubéfiés).

Le niveau piézométrique dans la zone se trouve entre -13 et -18 m en dessous du niveau de la mer et la surface piézométrique présente une faible pente vers le sud et le Sud Est.

Les paramètres hydrodynamiques calculés sont, concernant la transmissivité de l'ordre de 10^{-4} à 10^{-3} m².s⁻¹ pour les nouveaux forages (D.E.F), et de 10^{-3} à 10^{-2} m²/s pour les forages réhabilités (A.C : ancien forages). La conductivité hydraulique est de l'ordre de 10^{-4} à 10^{-5} m.s⁻¹ et le coefficient d'emmagasinement est de l'ordre de 10^{-6} à 10^{-5} , en prenant en considération aussi les conclusions tirées des données piézométrique, on en déduit que la nappe présente les caractéristiques d'une nappe localement captive et libre généralement.

L'analyse des données de l'hydrochimie détermine une eau douce, moyennement minéralisée, agressive et sous-saturé en la calcite, aragonite et en dolomite. Généralement les eaux des forages de bennichab présentent deux faciès chimiques : bicarbonaté calcique et magnésien (forage D.E.F) et bicarbonaté sodique et potassique (forage B).

Mots clés : Nappe de Bennichab, lithologie, forage, réhabilitation, diagraphie, paramètres hydrodynamiques, développement, système aquifère, hydrochimie.

INTRODUCTION GENERALE

Le climat saharien qui règne sur la zone d'étude (Bennichab) provoque un phénomène de faible pluviosité, et un taux important d'évaporation contribuent à l'absence de réseau hydrographique permanent dans la zone, ce qui met en exergue l'importance de cette source en eau souterraine, et accentue le problème de sa gestion durable et rationnelle.

La rationalisation de cette source en eau souterraine (système aquifère de Bennichab) nécessite d'abord une très bonne connaissance de ses caractéristiques hydrodynamiques et hydrochimiques. Cette caractérisation est le résultat escompté de l'interprétation des données collectées lors des travaux de réalisation de trois forages (D, E et F) et diagraphies (PS, SPR et Gamma rays).

Ces forages (D, E et F) captent l'aquifère de Bennichab qui se trouve dans les grès argileux du Continental Terminal et, la réhabilitation de deux anciens forages (A et C) et, aussi l'inventaire des points d'eau dans la zone d'étude, les travaux de développement, les essais de pompages et l'analyse chimique des échantillons prélevés lors des pompages sur les forages D, E, F et B. ces travaux entre dans le cadre du projet d'alimentation en eau de la mine et ville d'akjoujt.

Les travaux ont été réalisés par l'entreprise mauritanienne ELMA- Forages pour le compte de la Société Australienne M.C.M (Mauritanian Copper Mine) charge de l'extraction du minerai de cuivre, argent et d'or. Il préexiste, dans la zone, des forages et piézomètres réalisés par le B.R.G.M.en 1964 et d'autres forages réalisés en 1968 – 1969 par l'entreprise Intrafor-Cofor.

Ces dans le but d'atteindre ces objectifs que j'ai accepter le présent travail qui m'a été convié par la société en charge de ces travaux.

Cette étude se veut une contribution à la connaissance des caractéristiques lithologiques, hydrogéologiques et hydrochimiques de la nappe du Continental Terminal (CT) de Bennichab

C'est ainsi que nous proposons un plan de travail en trois chapitres :

- ◆ dans le premier chapitre, nous allons replacer le secteur concerné par cette étude dans son contexte géographique, climatologique, géologique et hydrogéologique ;
- ◆ dans le deuxième chapitre, nous allons aborder la méthodologie d'acquisition et de traitement des données hydrogéologiques et hydrochimiques du secteur étudié ;

♦ dans le troisième chapitre, nous présenterons les résultats obtenus dans le cadre de cette étude. Enfin, nous terminerons cette étude par une conclusion générale et des recommandations.

Chapitre I :

**GENERALITES SUR LA
ZONE D'ETUDE**

Chapitre I : GENERALITES SUR LA ZONE ETUDIEE

I.1- CADRE PHYSIQUE

I.1.1- Situation géographique de la zone étudiée

Notre zone d'étude Bennichab est située à environ 160 km au Nord-est de la ville de Nouakchott, capitale de la Mauritanie et à 565 km au Nord-est de Dakar, capitale du Sénégal, entre les longitudes 15°23' et 15°31' Ouest et les latitudes 19°23' et 19°32' Nord (Fig. 1).

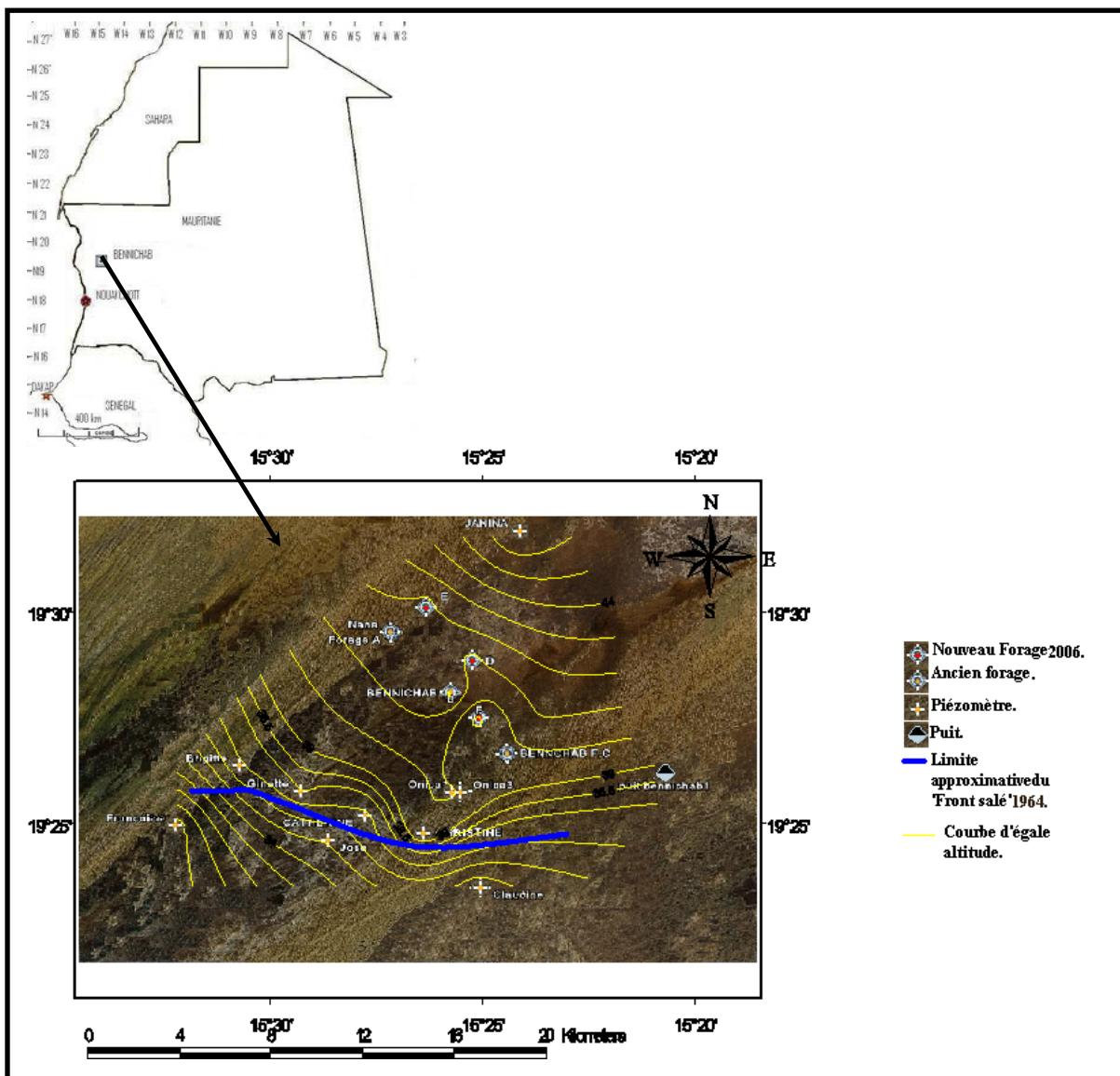


Figure 1 : situation géographique de la zone de Bennichab

Cette zone de Bennichab correspond à une plaine entourée de deux cordons dunaires : au Nord-ouest, le cordon d'Akchar et au Sud-est, les dunes de Touefilit. Sur le plan administratif, la zone d'étude Bennichab dépend de la région d'Inchirie qui s'étend sur une superficie de 46800 km².

I.1.2- Climatologie

I.1.2.1- Mécanismes généraux du climat

Ce sont les anticyclones des Açores, de Sainte Hélène et du Sahara et la ceinture des basses pressions équatoriales, qui contrôlent l'ensemble des mécanismes généraux du climat en Afrique de l'Ouest (Dacosta, 1989).

L'anticyclone des Açores est situé dans l'Atlantique nord, la pression qui y varie de 1020 à 1025 Hpa, en fait un centre d'action permanent.

L'anticyclone de Sainte Hélène est situé au sud, où la pression varie de 1018 à 1021 Hpa. Sa proximité de l'équateur et son parcours océanique en font également un centre d'action important.

L'anticyclone sud libyen, sa pression est variable et en été il est remplacé dans les basses couches par une dépression thermique qui constitue un centre d'appel du flux provenant de Sainte Hélène.

En ces zones de hautes pressions se développe, une ceinture de basse pression où convergent les masses d'air des différents anticyclones, c'est la zone intertropicale de convergence ou front intertropical (FIT) qui se déplace de part et d'autre de l'équateur.

I.1.2.2- Analyse des différents paramètres climatiques

Les paramètres climatiques jouent un rôle important dans les transferts hydriques en zones déficitaires et seront analysés à partir des données recueillies aux stations météorologiques d'Akjoujt et de Nouakchott par les services de la météorologie nationale de 1970 à 2004.

I.1.2.2.1- Pluviométrie

a)- Pluviométrie moyenne mensuelle

L'analyse de la variation saisonnière de la pluviométrie (Figure 2) montre que les précipitations sont essentiellement groupées sur une période de cinq mois (juillet à novembre) dans l'année. En dehors de cette période, il existe des pluies sporadiques et, généralement provoquées par des phénomènes aléatoires, tels les remontées d'air chaud tropical qui induisent la formation de nébulosité pouvant être à l'origine des pluies hors hivernage ou « Heug » (Ndiaye, 1978 *in* Faye, 1983).

Deux saisons sont observées dans le secteur d'étude :

- une longue saison sèche marquée par la rareté des précipitations et des températures très élevées qui jouent un grand rôle dans l'évaporation ;
- une courte saison humide pluvieuse au cours de laquelle les pluies se produisent sous forme d'averses parfois violentes, on note également une diminution considérable des températures durant cette saison.

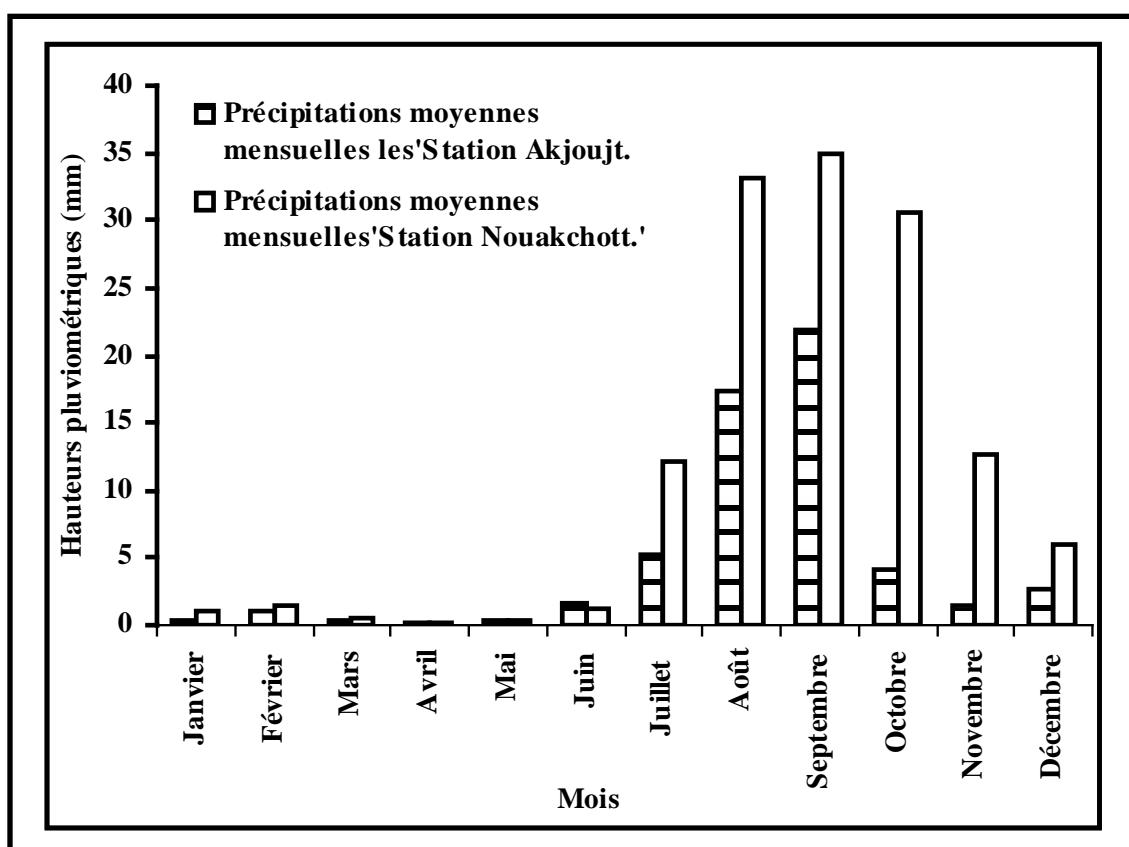


Figure 2 : Variations des moyennes mensuelles de la pluviométrie (1970 à 2004)

A Akjoujt comme à Nouakchott, le mois de septembre est le plus pluvieux. C'est ainsi que la moyenne mensuelle de la hauteur pluviométrique enregistrée à ce mois est de 23 mm à Akjoujt et de 34 mm à Nouakchott. L'analyse des enregistrements sur les deux stations, permet de dire que pluviométrie diminue de l'océan vers le continent.

b)- Pluviométrie annuelle

L'évolution interannuelle de la pluviométrie enregistrée aux stations d'Akjoujt et de Nouakchott, montre une courbe dont l'allure est plus ou moins cyclique (Figure 3). Ceci montre une certaine régularité de ce paramètre en fonction du temps.

En plus de l'évolution interannuelle de la pluviométrie, nous avons également représenté pour la station d'Akjoujt l'écart pluviométrique annuelle sur une période de trente huit ans, (fig.3) on constate une période (d'années) déficitaires de 1970 à 1986, cette période est communément appelée la sécheresse des années soixante dix.

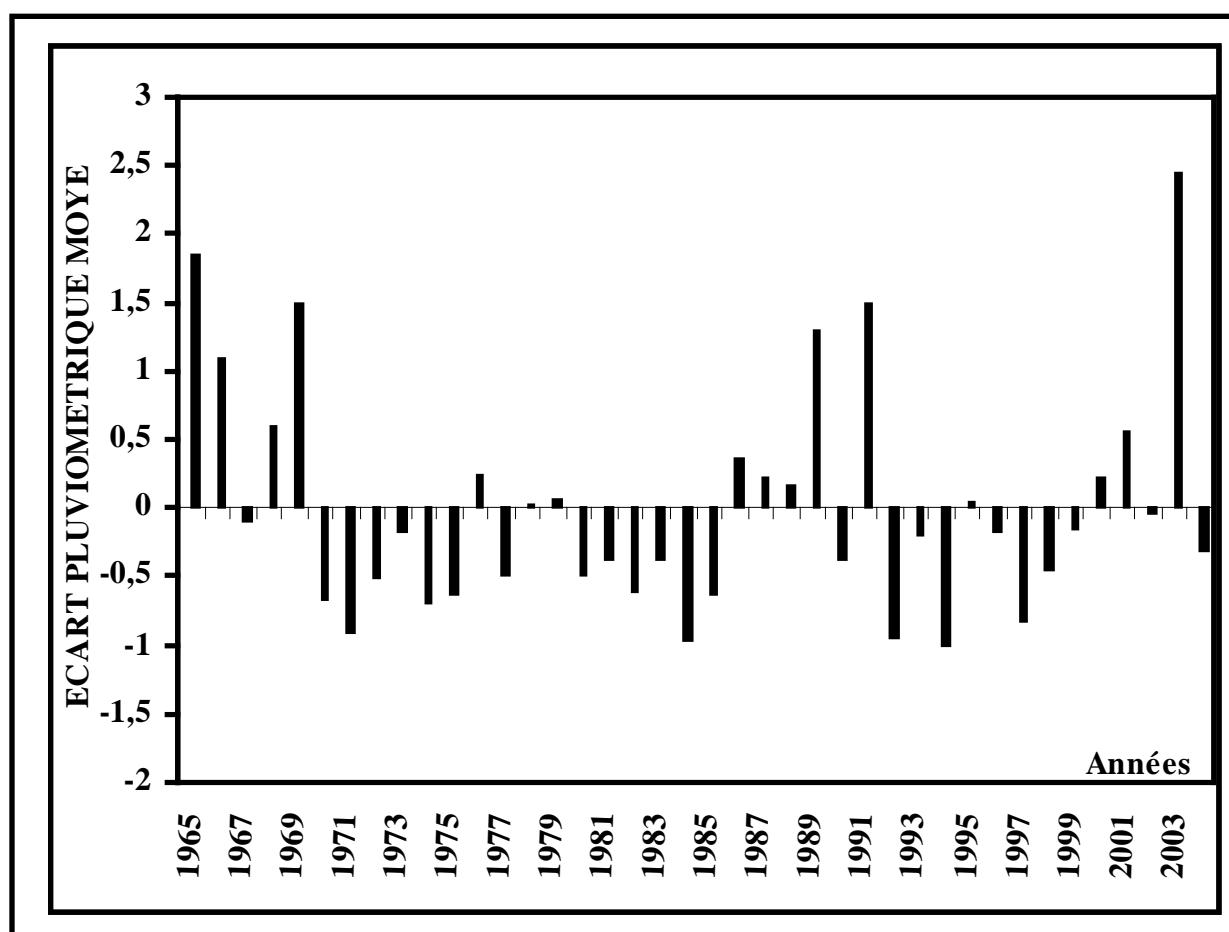


Fig.3 : Ecart pluviométrique annuelle sur la station d'Akjoujt et Nouakchott (1970 à 2004)

Cependant le nombre d'année ayant une pluviométrie annuelle inférieure à la moyenne interannuelle (57.7mm) est plus important en cette station d'Akjoujt . A partir de 1999 le taux de pluviosité est supérieur à la moyenne pluviométrique annuelle.

I.1.2.2- Température

La température de l'air est un paramètre climatique très important, qui constitue le moteur essentiel des échanges d'eau entre l'air et la surface du sol.

Les moyennes mensuelles augmentent de janvier à mai. Les températures les plus élevées sont enregistrées pendant les mois d'avril, mai et juin avec un maximum de 35°C au mois de juin (Fig. 4). On note ensuite une légère diminution de juin à septembre. En octobre, survient une faible augmentation suivie d'une baisse significative de novembre à février ($t < 25^{\circ}\text{C}$). C'est ainsi qu'on a un régime thermique avec deux maxima absolu en juin et en octobre.

D'après les données de la température, les mois de mai, juin et octobre sont les mois les plus chauds de l'année avec des températures moyennes mensuelles qui varient de 34 à 35 °C.

I.1.2.3- Evaporation

L'évaporation et l'évapotranspiration correspondent à des phénomènes de perte d'eau sous forme de vapeur. L'évaporation dépend essentiellement de la température, mais aussi du vent et de l'humidité atmosphérique par des relations plus complexes.

L'évaporation aux stations d'Akjoujt et de Nouakchott a été mesurée à l'évaporomètre Piche et les courbes des moyennes mensuelles de la période allant de 1970 à 2004 sont portées sur la figure 5. Au niveau de cette figure, les deux courbes présentent pratiquement la même allure. On note une augmentation de l'évaporation de janvier à mars suivie d'une baisse d'avril à août. Proportionnellement à la température, l'évaporation de Piche est moins forte en saison pluvieuse qu'en saison sèche. Cela montre que ces deux paramètres évoluent dans le sens inverse.

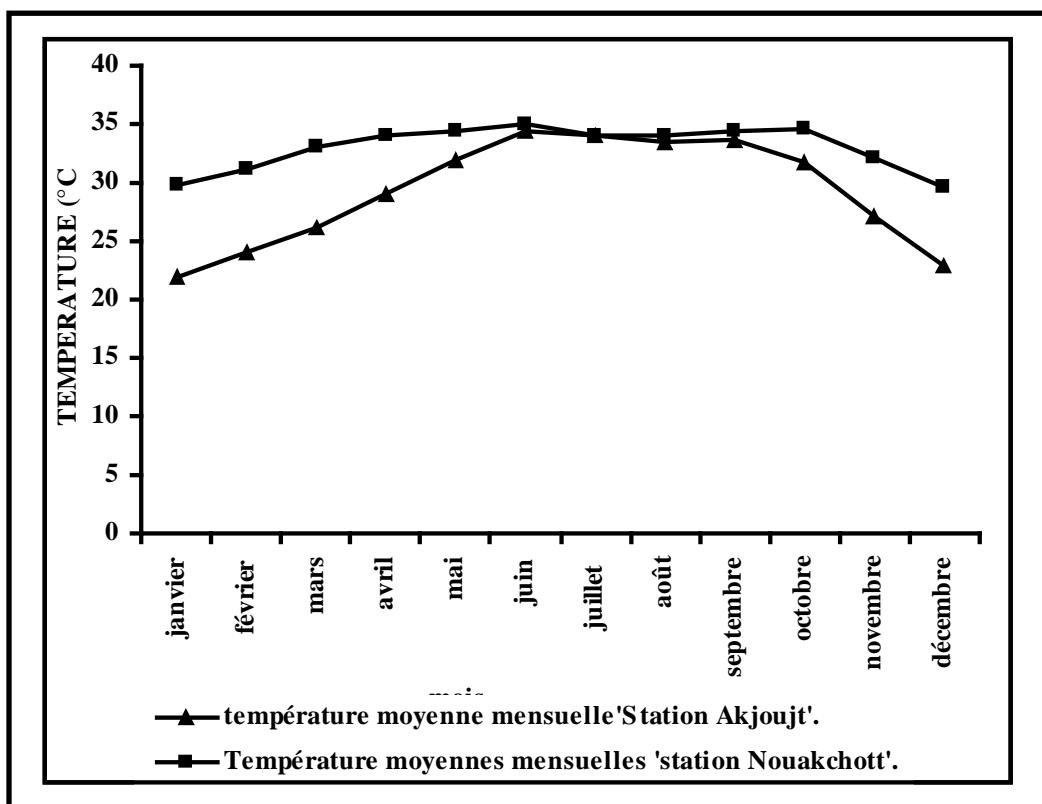


Figure 4 : Variations mensuelles de la température à Akjoujt et à Nouakchott (1970 à 2004)

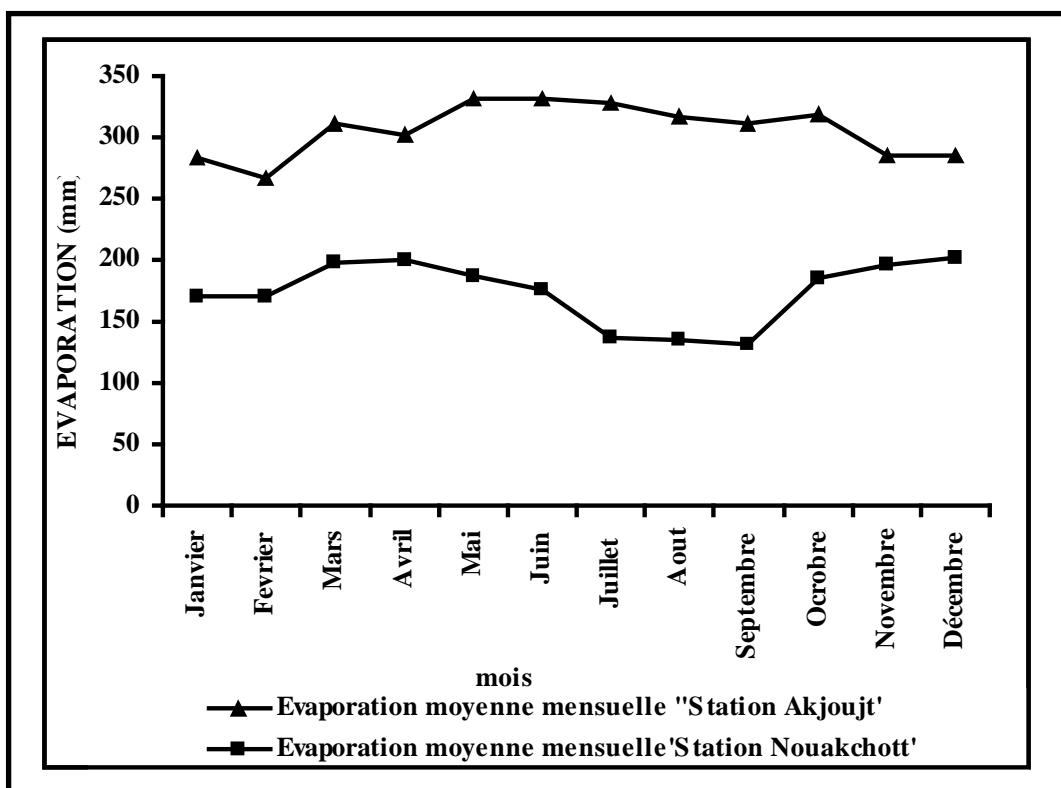


Fig.5 : Evaporation moyenne mensuelle (1970 à 2004)

L'évolution de l'évaporation est en fonction de la température et de la vitesse des vents, elle est accentuée par l'arrivée des vents chauds (harmattan).

Dans l'ensemble l'évaporation de Piche est plus importante à Akjoujt qu'à Nouakchott. Donc ce paramètre augmente de la côte vers l'intérieur des terres. Ce phénomène est lié à l'effet de continentalité observé à Akjoujt contrairement à Nouakchott où la proximité de la mer à tendance à ralentir le flux évaporatoire. La figure 5 illustre l'évaporation atteinte sur les deux stations, avec une valeur maximum de 200mm à Nouakchott (mai) et, de 325mm à la station d'akjoujt (mars et avril) suivi d'un abaissement coïncidant avec une partie de la période des précipitations.

I.2- Géologie et Hydrogéologie

I.2.1- Géologie

I.2.1.1- Géologie du bassin côtier

La Mauritanie se subdivise en cinq grands ensembles géologiques (Caruba, 1991) :

- le socle cristallin représenté par la dorsale Reguibat au Nord ;
- le bassin de Tindouf ;
- la chaîne hercynienne des Mauritanides ;
- le bassin paléozoïque et secondaire de Taoudenni à l'Est ;
- le bassin côtier secondaire et tertiaire sénégalo-mauritanien, orienté vers l'océan Atlantique (Fig. 6).

Dans le cadre de la présente étude, nous mettrons un accent particulier sur le bassin côtier, dans lequel se trouve notre zone d'étude (Bennichab). Le bassin côtier secondaire et tertiaire sénégalo-mauritanien orienté vers l'atlantique, s'épaissit vers l'ouest. On y distingue les formations du Maastrichtien (Secondaire) de l'Eocène et du Continental Terminal (Tertiaire) du Tafaritien et du Nouakchottien (Quaternaire).

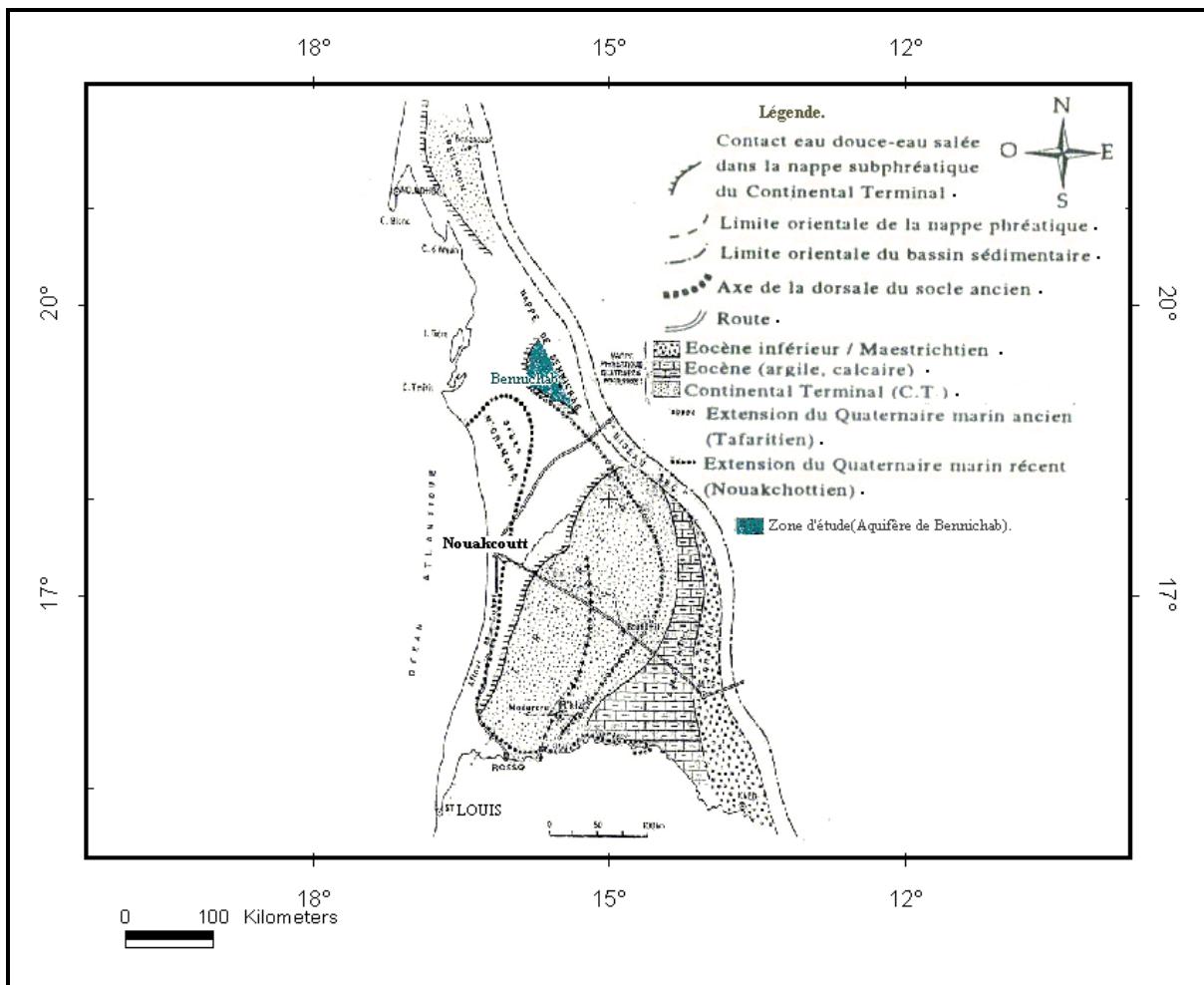


Figure 6 : Carte géologique et hydrogéologique du bassin côtier (B.R.G.M 1986)

I.2.1.2- Géologie de la zone d'étude

La zone Bennichab se trouve au centre de la bordure orientale du bassin côtier mauritanien. L'étude géologique de l'Inchiri a été esquissée puis précisée par plusieurs auteurs (Monod. 1945 ; Blanchot. 1957 et Elouard. 1964 in Gravost. 1964). Les forages de la campagne de 1964 n'ont apporté que quelques compléments aux connaissances disponibles.

Les données acquises montrent qu'en allant du nord est vers le sud ouest, on rencontre des terrains de plus en plus récents (Fig. 7,11) :

- le socle antécambrien ;
- les grès tertiaires du Continental Terminal ;
- les diverses formations rattachées au Quaternaire.

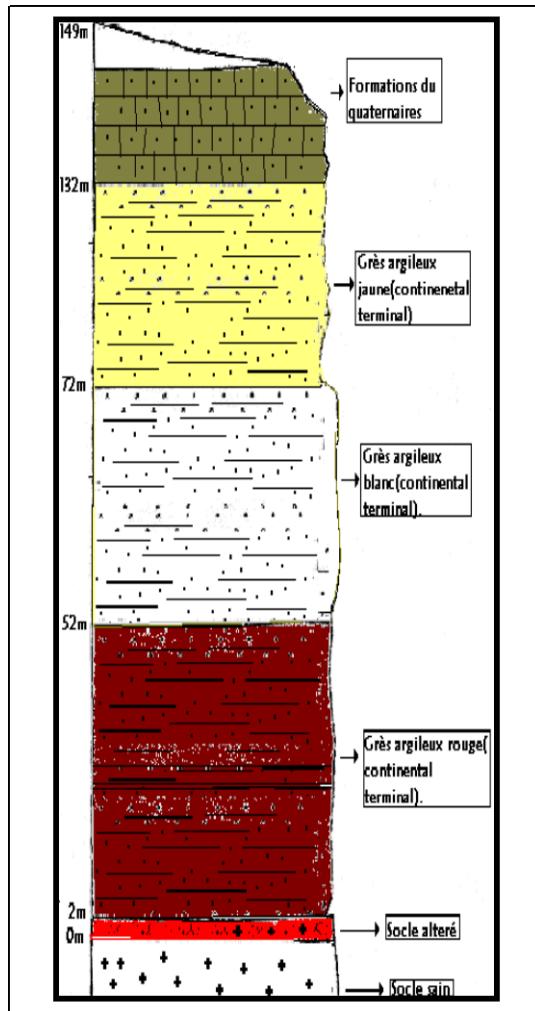


Figure 7 :_Coupe synthétique des formations géologiques de Bennichab.

I.2.1.2.1 Le Socle

Rapporté à l'antécambrien, il affleure dans la région de temagot (40km NE) et de tourarine sous forme de quartzite à magnétite et s'enfonce sous les terrains sédimentaires.

On le trouve dans les sondages de bennichab à des profondeurs allant de 90m au Nord Ouest (Jannina) à 218m au Sud Ouest (Françoise). Il s'agit alors de gneiss à biotite verte, avec des passées d'amphibolite à allure migmatitique.

A l'aplomb de la région étudiée, il forme un vaste plan, incliné N E- S W avec une pente de l'ordre de 6 à 7%, marqué sous les dunes de touefilit d'un léger bombement de quelques mètres de haut. Laissant penser que sa pente diminue au Nord Est ou à l'Est de jannina. (Gravost, 1964).

I.2.1.2.2- Le Continental Terminal

Le Continental Terminal affleure plus ou moins nettement au nord est de Bennichab. Il est d'abord couvert d'une croûte ferrigineuse, ensuite calcaire lorsqu'on descend vers le sud-ouest. Il est constitué essentiellement par une série continentale d'épaisseur croissante du nord-est au sud ouest, ce sont des grès argileux tendres à granulométrie très variable, diversement colorés par des oxydes de fer (Gravost 1964).

A Bennichab, les sondages ont permis de distinguer trois ensembles superposés, de bas en haut (Gravost 1964) :

- des grès argileux (Kaolinique) rouges ou roses, surmontant par fois un niveau de sable. On y rencontre à différents niveaux des lentilles d'argiles d'épaisseurs variables (quelques décimètres à plusieurs mètres). Ces formations sont généralement indurées, mais de façon irrégulière leur épaisseur dans la région étudiée varie entre une vingtaine de mètres à Janina et 80 mètres à Françoise. Elles passent plus ou moins brusquement à des grès argileux blancs dans lesquels on trouve de temps à autre sous forme de lentilles ou de poches, parfois associées à des gravillons ferrugineux ;

- des grès blancs comportant quelques lentilles de sables argileux fins ou moyens, intercalées dans un ensemble plus compact et plus argileux (kaolinite). Différentes carottes prélevées lors des campagnes de 1954 et 1964, ont mis en évidence la présence dans ces formations de canalicules de $\frac{1}{2}$ à 1 cm de diamètre et d'origine douteuse. Il faudrait certainement leur attribuer la bonne perméabilité des zones supérieure de l'aquifère. Ils fonctionnent probablement comme un drain naturel au sein de grès argileux peu perméable par nature. La puissance de cet ensemble oscille entre 20 et 50 m il semble s'amincir ou disparaître vers le sud ;

- enfin des grès colorés en jaune, épais de 50 à 70 m assez grossiers à la base et se terminent par un niveau argileux très continu dans la région sauf pour cet horizon, les corrélations entre les principaux niveaux argileux sont peut être peu hardies (Gravost, 1964).

I.2.1.2.3- Les formations du Quaternaire

On leur rattache des grès calcaires qui s'enfoncent vers le sud ouest sous un banc coquillé (plage à *Arcasenilis*), lui-même recouvert par les argiles gypseuses de la sebkha de N'dramcha. A toutes ces formations se superposent des ergs de dunes vives (Akchar et Toufilit) disposées en longs cordons NE – SO, qui forment un relief surimposé (Fig. 8 à 11).

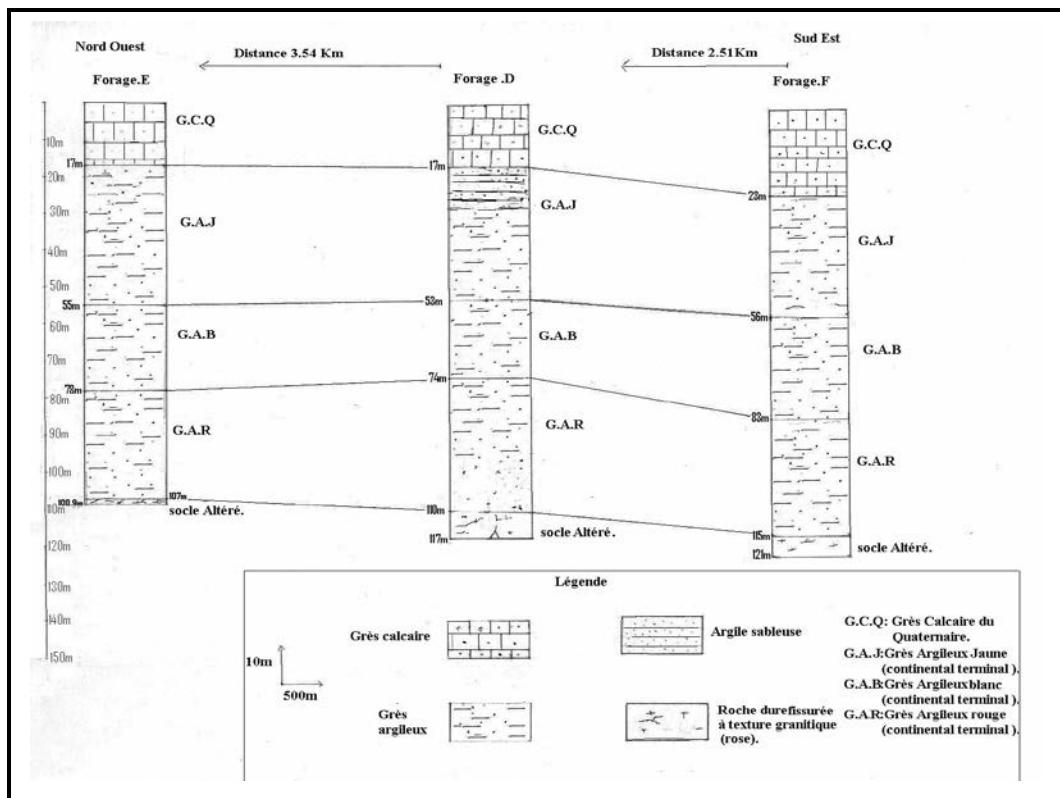


Figure 8 : corrélation lithologique entre les nouveaux forages (D.E.F).

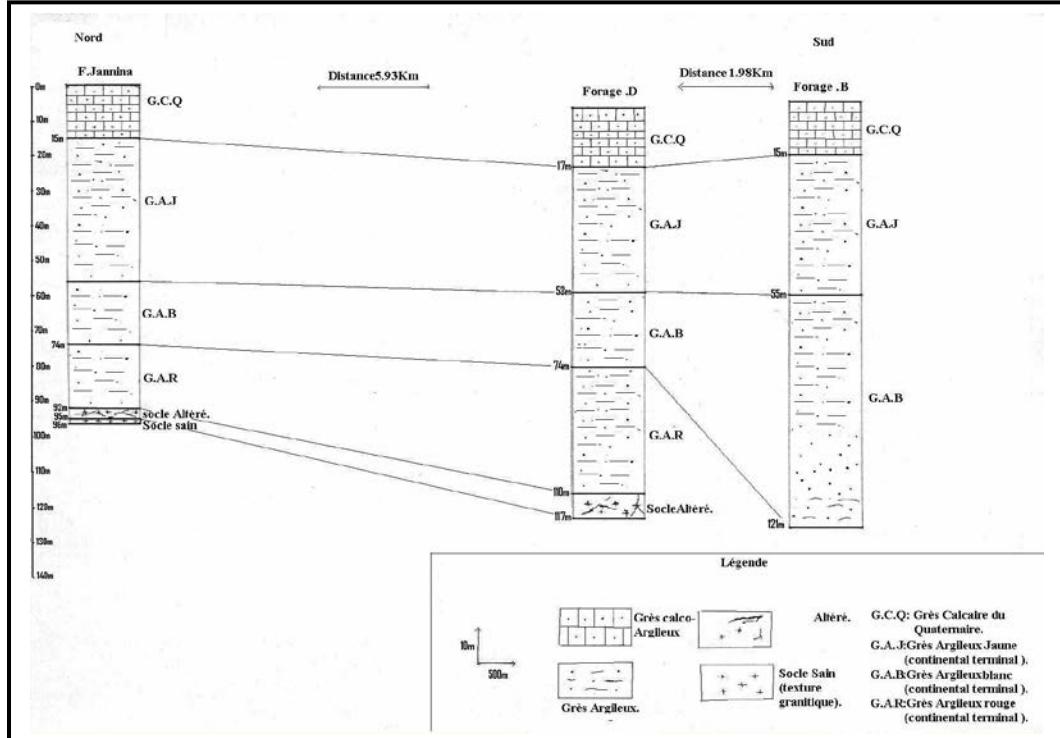


Figure 9 : corrélation lithologique Nord- Sud (Bennichab).

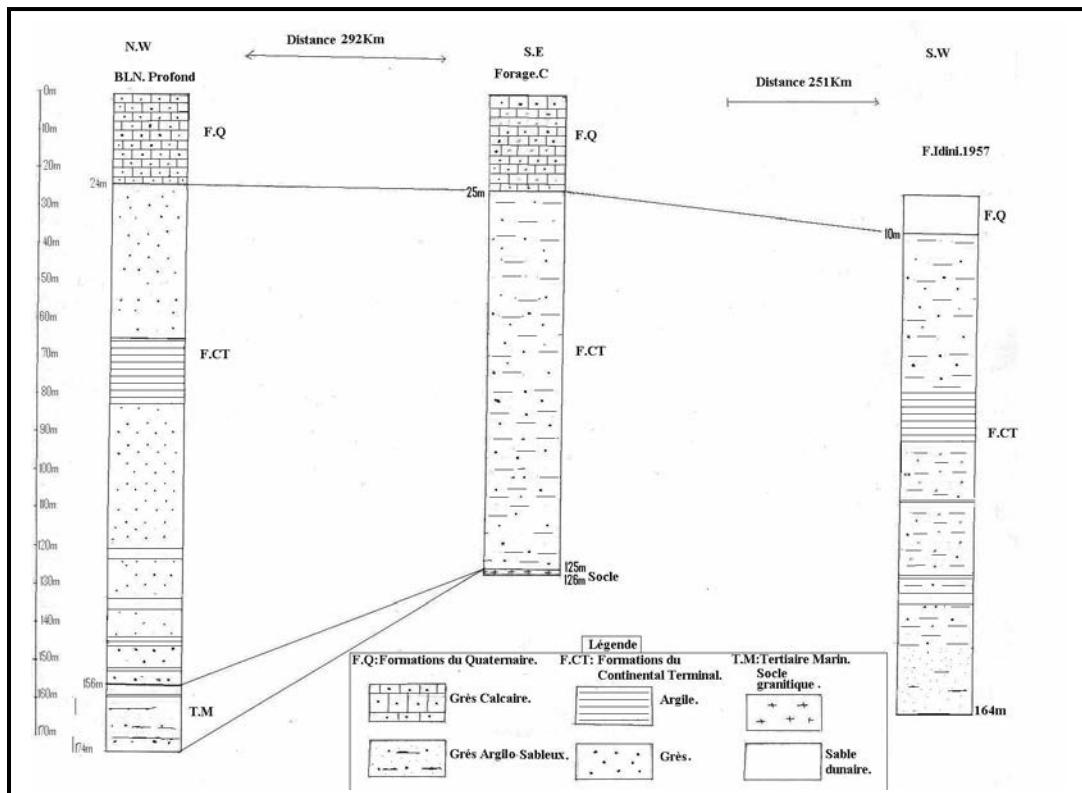


Figure 10 : Corrélation lithologique entre les aquifères du bassin côtier

I.2.2- HYDROGEOLOGIE

I.2.2.1- Hydrogéologie du bassin côtier (Fig. 6)

Dans ce bassin, les aquifères sont continus du Nord au Sud, variable latéralement, déterminant ainsi, au niveau actuel des connaissances, trois ensembles : Boulenoir au nord, Bennichab au centre et celui du Trarza au Sud (COLLOQUE INTERNATIONAL .Nouakchott.1994).

I.2.2.2- Hydrogéologie de la zone d'étude

I.2.2.2.1- Travaux de reconnaissances réalisés sur la zone d'étude

D'avril à septembre 1964 une campagne de reconnaissance hydrogéologique par sondage électrique et mécanique effectué par le B.R.G.M (travaux de sondage électrique confié à la C.C.G et les travaux de cinq sondages de calage, et travaux de deux stations d'essais de débit exécutés par la société HYDRAF) en vue de l'alimentation en eau de la mine de cuivre d'Akjoujt .et d'octobre 1968 à fevrier1969, les travaux de réalisation de trois

forages d'exploitation (A, B et C) et cinq piézomètres pour le suivi de l'avancement du front salé (Brigitte, Ginette, Christine, Catherine et Claudine). Ces travaux ont été réalisés pour l'adduction d'eau d'Akjoujt et réalisé par l'entreprise Intrafor-Cofor. Il existe dans la zone plusieurs puits indigène et forage privés.

Depuis 1964, la nappe de Bennichab est exploitée par la société (SOMIMA), et après la fermeture de la mine d'Akjoujt (arrêt de l'extraction du minerai de cuivre), l'exploitation de la nappe de Bennichab a continué pour l'approvisionnement en eau potable de la ville d'Akjoujt (capitale de la région d'Inchiri). Il existe dans la zone en 1969 quatre stations de pompage (Nana la douce et les Forages A, B et C). à cause des pannes survenues lors de l'exploitation, il ne reste plus en état de marche que le forage B et, cette exploitation était jusqu'en 2006 a un débit moyen de $1500 \text{ m}^3.\text{j}^{-1}$.

I.2.2.2.2- Forme de la surface de la nappe (Fig.11)

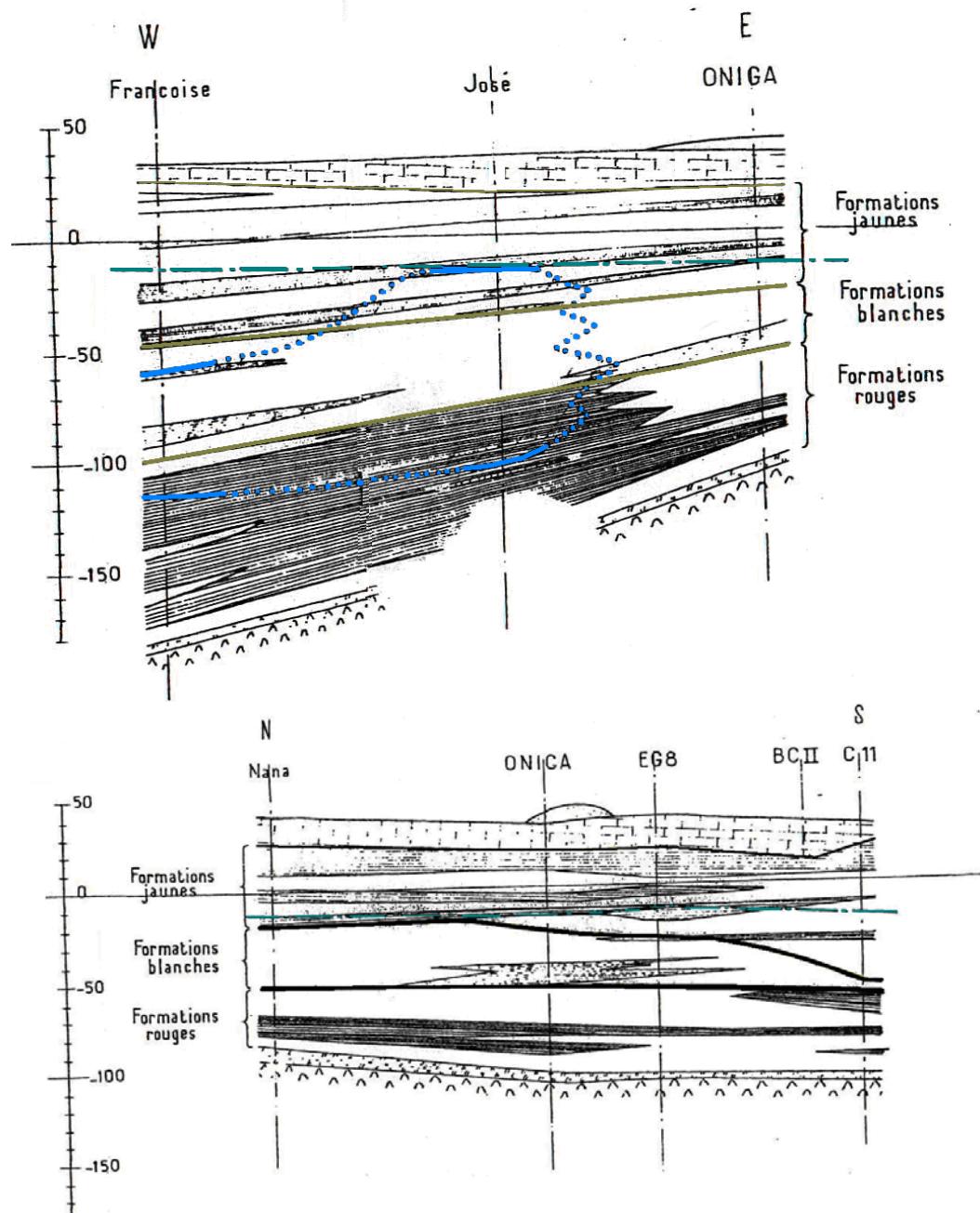
Selon M.Gravost (1964), la surface de la nappe entre les dunes de l'Akchar et du Touefilit, à l'allure d'un quart de cône centré sur le puits de Bennichab Rhir avec une pente très faible 0,25 ‰ (1 m pour 4 km) du NW vers SE.

Relativement plate au Nord des dunes du Touefilit, la surface de la nappe présente au Sud un bombement axé sur les forages G14 et G8. Cette anomalie (bombement) coïncide avec la limite des terrains salés tracée par Elouard (1964), ainsi qu'avec la forme de l'anomalie résistante mise en évidence par la géophysique.

Selon M. Gravost. (1964), cette forme est due à des lentilles d'argiles scindant localement l'aquifère. On note une augmentation du gradient hydraulique vers le sud. Ce phénomène peut être en relation avec une disparition du faciès grès à canalicules ou avec l'augmentation de la teneur en argile des terrains (Elouard, 1964). Des travaux de pompes antérieurs sur la zone d'étude réalisés par le B.R.G.M. en 1964 ont montré que l'aquifère de Bennichab est anisotrope verticalement et des couches imperméables séparant les niveaux producteurs.

Les formations de la zone révèlent par les résultats des travaux antérieur (Gravost ,1964) de carottage sur la zone, que la granulométrie est très variée, mais en moyenne une porosité efficace de 1 %.

BENNICHAB - COUPES GÉOLOGIQUES SCHÉMATIQUES



ECHELLE DES DISTANCES 1:100.000

ECHELLE DES PROFONDEURS 1:2.000

Allure supposée du "front salé"

- | | | |
|--|--|---|
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | Niveau à gravillons latéritiques |
| | | Ligne de limite entre formations de couleur différentes |
| | | Niveau hydrostatique |

Figure 11 : Evolution spatiale de l'épaisseur de l'aquifère du CT (Gravost, 1964)

Les pompages antérieurs sur la zone, ont révélé : un niveau supérieur de 57 à 106 m avec T (Transmissivité) = $54 \text{ m}^2.\text{h}^{-1}$ et S (coefficient d'emmagasinement) = $4 \cdot 10^{-5}$ et un niveau inférieur de 107 à 132 m, avec $T = 1.2 \text{ m}^2.\text{h}^{-1}$ et $S = 9 \cdot 10^{-5}$.

La forme des courbes isopièzes fait apparaître nettement une ligne de partage des eaux passant par Françoise, José, G14. Au nord de cette ligne, l'écoulement se fait grossièrement Sud Ouest puis SW - NE vers l'Est. Au sud il est franchement N-S.

I.2.2.2.3- Limite de la nappe douce

De l'Ouest de la zone étudiée, au Sud, la nappe douce entre en contact avec une nappe saumâtre. A l'Est et Nord Est, elle rencontre le socle cristallin sur lequel elle se termine en biseau sec (Gravost., 1964).

Selon Huot in (Gravost,1964), le front salé devait suivre à peu près la ligne de résistivité 15 ohm.m (en AB = 400 m) en fait les sondages Françoise et José, implantés sur la ligne 20 ohm.m, ont montré qu'il s'avance en partie jusqu'à la nappe. Pour le biseau sec, la limite tracée par la géophysique est valable. La nappe douce a une superficie d'environ 1200 km^2 , mais la partie reconnue par sondage mécanique ne s'étend que sur 300 km^2 environ (Fig. 12).

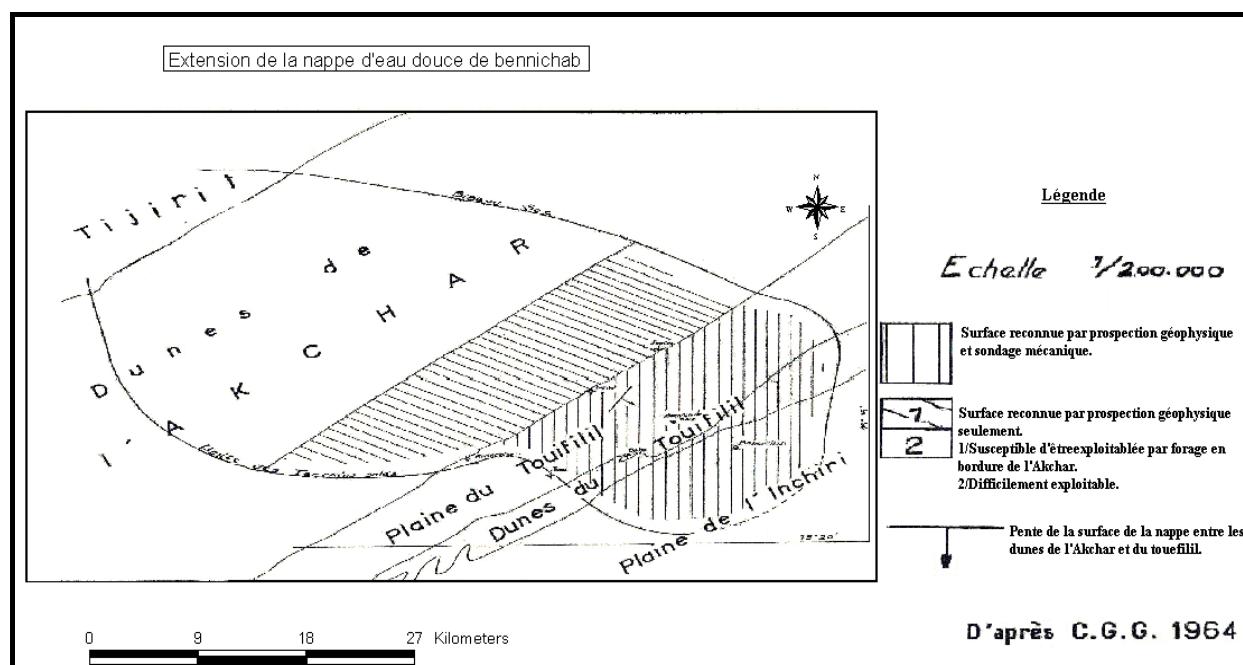


Figure 12 : Extension de la nappe de Bennichab (in Gravost, 1964)

a)- Toit de l'aquifère

D'après les enregistrements diagraphiques, l'observation des cuttings, l'interprétation des données sur la vitesse de foration et les travaux antérieurs sur la zone, le toit de l'aquifère coïncide avec la base des grès argileux jaunes, rencontré à -12 m au Nord (Jannina) et vers -22 m à l'aplomb du forage C, avec une pente de 1 pour mille qui augmente à l'Est sur le triangle B.C.D (Fig. 13).

b)- Substratum de l'aquifère

L'aquifère est délimité à sa base par le socle sain, et le substratum a une pente de 4 % vers le Nord Est de la zone d'étude, alors que la pente devient plus importante au Sud et au Sud ouest en étant de l'ordre de 7 % (Fig. 14).

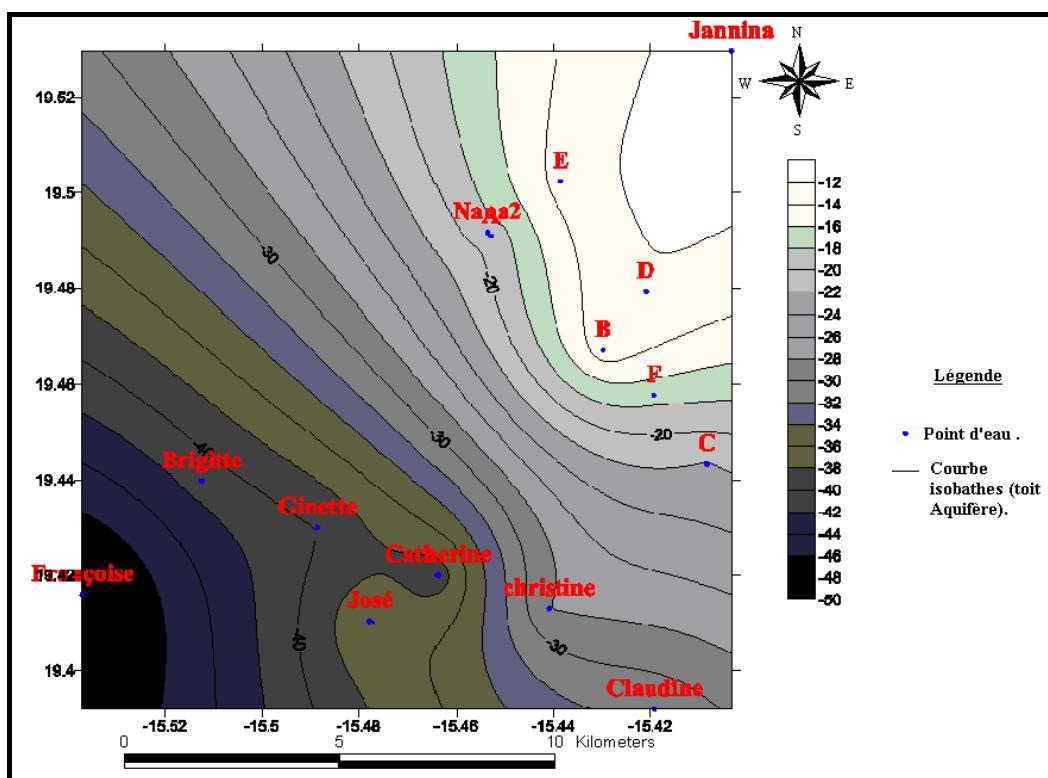


Figure 13 : Carte isobathe du toit de l'aquifère

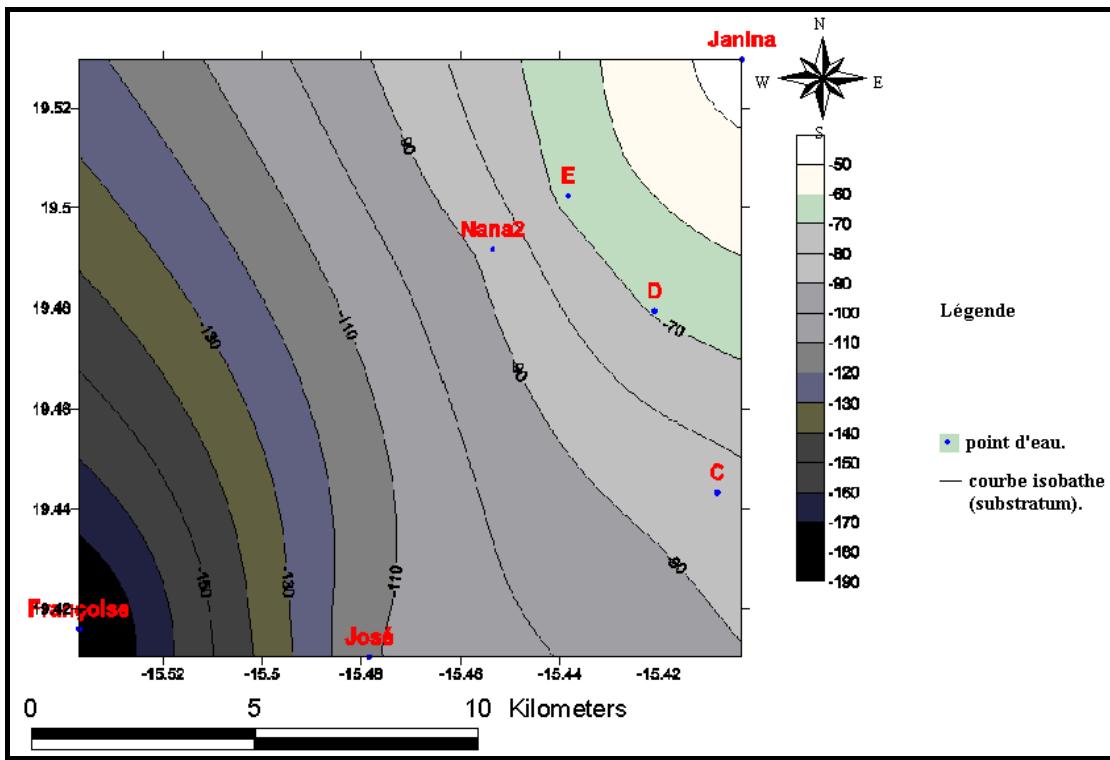


Figure 14 : Carte isobathe du substratum de l'aquifère du Bennichab

c)- Epaisseur de l'aquifère

La figure 15 reflète un certain épaisseissement de l'aquifère de Bennichab du NE vers le SW, en allant de moins de trente cinq mètres (35 m) au nord (Jannina) à plus de 130 m d'épaisseur vers Françoise au sud-ouest, ce qui donne une épaisseur moyenne de 80 m (Fig.15).

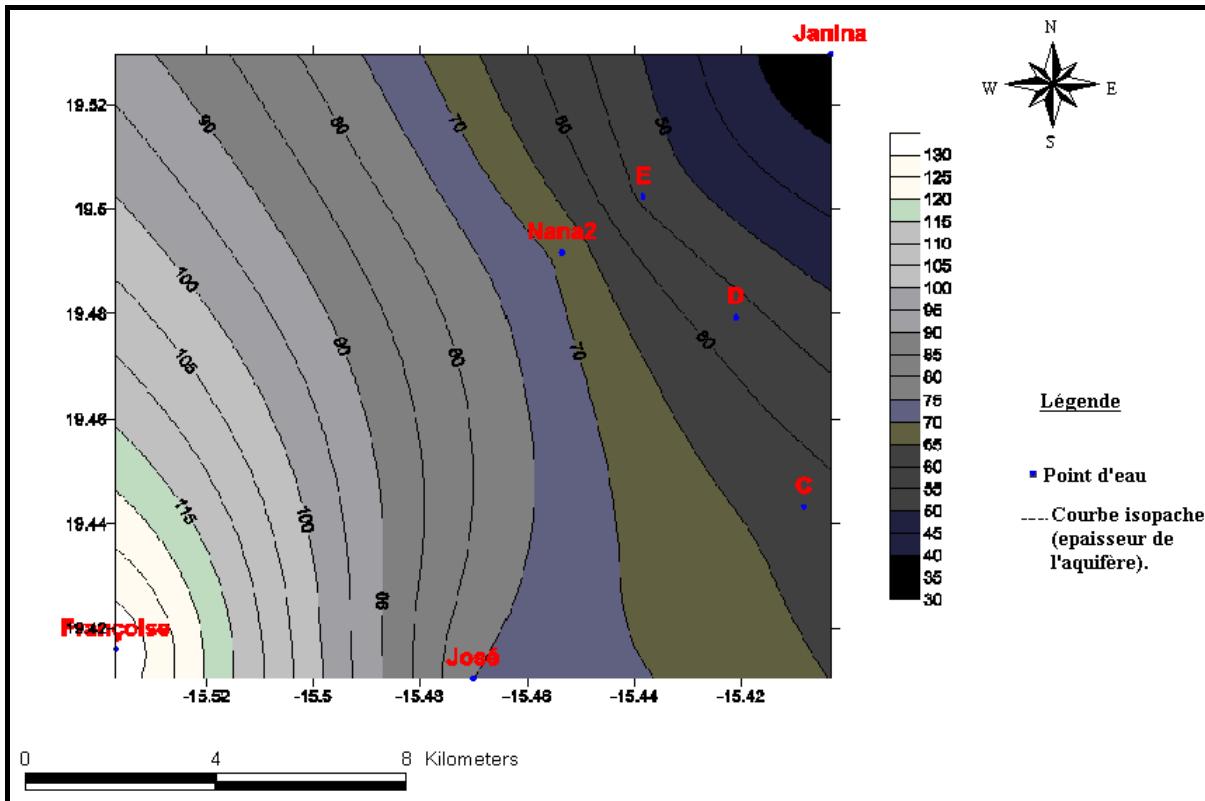


Figure 15 : Carte isopache de l'aquifère du Bennichab

I.2.2.2.4- Ecoulement de la nappe

L'épaisseur de l'aquifère dans toute cette région va de 0m au Nord Est à 150m au Sud-Ouest, et une pente de la surface de la nappe de 0,25 % de l'Ouest et Nord-Ouest vers l'Est et le Sud-est de la zone étudiée. Donc l'écoulement est en provenance des dunes de l'Akchar.

I.2.2.2.5- Alimentation de la nappe

A priori l'alimentation peu avoir trois origines : l'impluvium direct, l'écoulement le long du socle et par le socle lui-même.

L'impluvium direct :les conditions de pluviosité actuelle de 100 mm par an en moyenne et la percolation d'un terrain sec sur 50 à 60 m d'épaisseur et en grande partie argileux annule l'hypothèse d'une alimentation direct par percolation des eaux des précipitations dans ces conditions actuelles.

Par les oueds qui coulent sur le socle affleurant au Nord Est de Bennichab, s'ils parvenaient jusqu'à la nappe, celle-ci devrait accuser un relèvement aux abords du biseau sec, or les courbes isopiézométriques indiquent plutôt le contraire.

I.2.2.2.6- Alimentation par le socle

L’Alimentation par le socle est assez improbable, un tel processus ne pourrait avoir lieu qu’à travers un réseau de fractures en relation avec la zone affleurante donc se marquait par une pente de la nappe inverse aux abords du biseau sec(Gravost, 1964).

Le nivellation des forages et piézomètres rattachés au zéro de Dakar, capitale du Sénégal, montre que la nappe se trouve entre 13 et 18 m au-dessous du niveau de la mer.

I.2.2.2.7- Contact eau douce - eau salée

Au sud, le contact est sous une forme classique de biseau (l’eau douce surmontant l’eau salée) et cette forme d’après (Elouard, 1964) coïncide avec une augmentation de la teneur en argile des terrains.

Au Sud Ouest le carottage électrique du sondage José montre que toute la partie supérieure de l’aquifère est saumâtre, mais qu’à partir de 125 ou 130 m, il existe des niveaux doux. A l’Ouest, au sondage Françoise, il ne subsiste qu’une langue saumâtre comprise entre deux niveaux doux (Gravost, 1964).

I.3. CONCLUSION

Une saison chaude qui s’étale de mai à octobre et couvre en sa première partie la période où l’évaporation est la plus forte (mai – juillet) et en sa deuxième partie la saison pluvieuse (juillet à octobre).

La lithologie révèle la succession suivante des formations de bas en haut : le socle, les formations du continental terminal (grès argileux rouges, grès argileux blancs et grès argileux jaunes) et les formations calcaires du quaternaire .L’aquifère se trouve dans les formations du continental terminal. A Bennichab 300km² sont connus par la reconnaissance mécanique et, la reconnaissance électrique couvre une superficie d’environ 1200km².le niveau piézométrique dans la zone se trouve entre -13 à-18m en dessous du niveau moyen de la mer.

Chapitre II :

MATERIELS ET METHODES DE

L'ETUDE

Chapitre II : MATERIELS ET METHODES DE L'ETUDE

II.1- TRAVAUX DE REALISATION DES FORAGES (D, E et F)

Les travaux consistaient en l'exécution de trois forages (D, E et F), le diamètre de la chambre de pompage est de 10 pouces, et le diamètre des crépines de 8''1/2. La durée des travaux de forage varie entre deux à trois semaines pour chaque forage et les forages D, E et F ont leurs profondeurs de foration respectives de 117 m, 109 m et 121 m. La méthode utilisée pour l'exécution de ces forages est le rotary à la boue bentonitique. L'exécution des forages passe par plusieurs étapes : reconnaissance, alésage, équipement, développement, pompage d'essai. La suite des travaux consistait en la réhabilitation de deux anciens forages (A et C).

II.1.1- Matériel utilisé

II.1.1.1- Matériel de forage

Le matériel avec lequel les forages ont été réalisés, se compose d'une foreuse LMP précision DTH500, accessoires, émulseur, désableur, tiges, lot de tricônes de différents diamètres, deux camions d'accompagnement à grue, un véhicule de liaison, atelier de soudure (Fig. 16).

II.1.1.2- Matériel de pompage

Le matériel utilisé pendant les opérations de pompage est constitué des pompes submersibles de 8'', 4'' et 3'' KSB ; d'une cuve de 2 m³ ; de 2 groupes électrogènes diesels de 100 et 25 KVA refroidissant à l'air, de 2 sondes électriques lumineuses et sonores OTT - KL010 (longueur 150 m) ; d'un conductivimètre WTW – (315 i) et de 2 GPS Garmine de 4^{ème} génération.

II.1.1.3- Matériel du carottier électrique

L'ensemble des équipements utilisés pour l'enregistrement des diagraphies comprend :

- un treuil volumineux et puissant sur le tambour autour duquel est enroulé plusieurs centaines de mètres de câble. Le câble a un rôle mécanique et électrique ;
- les circuits de contrôle et de commande des appareils de mesure (logger ASC II Standard), ainsi que les équipements de traitement de l'information ;

- les outils, ce sont les appareils que l'on descend dans le trou de forage, à l'extrémité du câble ;
- un système d'enregistrement de l'avancement du film ou du papier est synchrone du déroulement du câble et l'enregistrement se fait en fonction de la profondeur.

II.1.2- Méthodes de forage

Un forage passe par différentes phases qui vont de la reconnaissance (préciser les positions des différentes couches de terrains traversés, leur nature et caractéristique, leur possibilité hydraulique), en passant par l'alésage et la diagraphie (pour le rotary à la boue) jusqu'à l'équipement de captage, gravillonnage, développement et l'essai de pompage.

Pour la réalisation des forages d'eau, les méthodes les plus utilisées sont les suivantes : le rotary, le carottage, la percussion ou marteau fond de trou et la tarière. Dans la suite, nous allons présenter la technique du forage au rotary à la boue bentonitique car c'est cette méthode qui a été utilisée dans la zone d'étude.

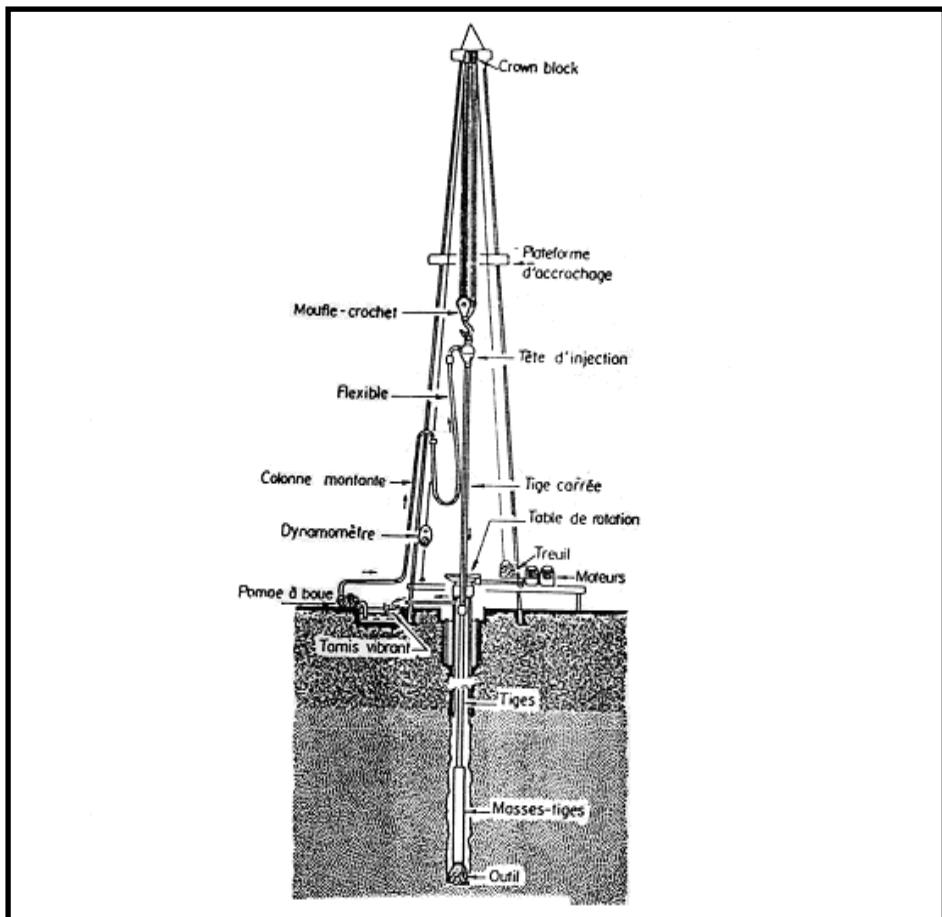


Figure 16: Dispositif général d'un atelier de forage au rotary (Mabillot, 2005)

II.1.2.1- Technique du forage au rotary

Cette méthode est très utilisée son avantage est de permettre d'utiliser le même matériel pour la reconnaissance et l'exécution du forage définitif par alésage, le forage au rotary nécessite généralement l'utilisation d'une boue bentonitique comme fluide de forage, pour les roches tendres ou de dureté moyenne alors que dans les roches dures et stable (tel que les roches métamorphiques ou igné) il y'a lieu d'utilisé spécialement l'air comprimé.

II.1.2.1.1- Principe

Un outil (tricône) est monté au bout d'une ligne de sonde qui comprend des tiges vissées les unes des autres, une tête d'injection et des masses tiges.

Cet outil est animé d'un mouvement de rotation de vitesse variable et d'un mouvement de translation vertical sous l'effet d'une partie du poids de la ligne de sonde ou d'une pression hydraulique. Le mouvement de rotation est assuré par un moteur situé sur la machine de forage en tête du puits. Les tiges étant creuses, permettent l'injection de la boue au fond du forage dont la circulation se fait en circuit fermé en passant par des bacs de décantation.

II.1.2.1.2- Les fluides de forage

Actuellement on peut distinguer deux grandes familles de fluides de forage : fluide à base d'eau et fluide à base d'air.

Le fluide de forage joue un rôle important lors de l'exécution d'un forage : l'évacuation des débris de forage, le refroidissement de l'outil de forage, la soutenance des parois de forage, de protéger contre le gonflement de certaines couches, le contrôle des pertes de fluide dans les formations perméables et des venues d'eau dans le cas de nappe artésiennes.

Le choix du fluide de forage dépendra principalement de la nature des terrains à traverser, des possibilités d'équipement et d'approvisionnement en produit et en eau, et des qualifications de l'équipe de foreurs.

Les principales caractéristiques d'une boue doivent être vérifiées en permanence et modifier selon les cas pour conserver les qualités rhéologiques qui lui sont nécessaires (densité, viscosité, filtrat, cake, pH, teneur en sable).

II.1.2.2- Equipement des forages

La phase d'équipement des forages passe indispensablement par la réalisation de diagraphies. C'est à travers l'interprétation des enregistrements diagraphiques, des cuttings et des données granulométriques que le plan d'équipement approprié est établi.

II.1.2.2.1- les diagraphies

La diagraphie est la mesure continue d'un paramètre physique ou chimique en fonction de la profondeur, il existe différents types d'appareils avec différentes options d'enregistrement. Dans le cadre de cette étude, les paramètres enregistrés sont la SPR(single point résistance),la Gamma rays (ou rayons gamma) et le potentiel spontané(PS).

a)- Vitesse d'avancement

La vitesse d'avancement consiste à mesurer la vitesse à laquelle l'outil de forage traverse les formations du sous-sol, en fixant les paramètres de foration (vitesse de rotation, pression sur l'outil, volume du fluide de forage).

b)- Carottage électrique (diagraphie différée)

Il existe différents appareils en fonction des paramètres à enregistrer (objectifs) et dans le cadre de cette étude les paramètres à enregistrer sont :

- la single pointe résistance (SPR), mesure la résistance en ohms entre une électrode descendue dans le forage et une électrode de référence en surface ;

- la polarisation spontanée (PS), la variation du potentiel dépend de deux phénomènes distincts l'électrofiltration et l'électro-osmose (potentiel de membrane, potentiel de jonction liquide). La PS permet :

- de mettre en évidence les bancs poreux et perméable.
- de localiser certains niveaux imperméable.
- de calculer le pourcentage d'argile contenu dans la roche réservoir par la formule suivante :

$$V_{sh} = ([P.S.S - P.S. \text{ au point X}]) / P.S.S. \text{ (CHAPELLIER ,2002)}$$

Avec :

V_{sh} = volume d'argile en %.

P.S.S = valeur maximum de la déflexion P.S dans l'intervalle considéré, valeur qui correspond à la ligne de base des sables.

P.S. au point X = valeur de la déflexion P.S à la profondeur choisie.

- **le rayonnement gamma rays**, est une mesure de la radioactivité naturelle existante dans certaines roches. (CHAPELLIER ,2002)

II.1.2.2.2- Choix du tubage

Le tubage utilisé est en acier galvanisé dix pouces pour les trois (3) forages. Le choix des tubes de forage se porte essentiellement sur :

- le diamètre «le choix des diamètres d'une colonne est souvent conditionné par l'encombrement de la pompe et celui-ci est fonction du débit, il est recommandé de laisser un pouce de jeu entre la pompe et le tubage (Mabillot, 2005).
- la résistance mécanique : les tubes sont exposées à différents efforts parmi lesquels on peut citer : effort de traction, d'écrasement, d'éclatement, de flambage et de flexion.

Tableau 1 : Diamètres intérieurs par rapport aux débits prévus (Mabillot, 2005)

Diamètres intérieurs de tubes (pouce)	Débits maxima prévus (m ³ /h)
- 4"	3
- 6"	50
- 8"	140
- 10"	250

II.1.2.2.3- Le captage

a)- Le choix des crêpines

Un bon forage donne un maximum d'eau pour de longues années avec un coût d'exploitation minimum. Deux éléments contribuent à ce succès :

- une crêpine robuste qui résiste à la corrosion et dont les ouvertures sont adaptées à la formation et ou au massif de gravier ;

- l'installation de la crépine avec ou sans le massif filtrant qui doit être suivie d'un développement soigné.

Le vieillissement prématûre des forages d'eau est souvent simultanément causé par la mauvaise détermination des caractéristiques techniques des captages et de la surexploitation.

L'ouverture des crépines doit permettre le passage et l'élimination pendant le développement du forage des éléments les plus fins de la formation mais, elle doit également être inférieure à la plus faible granulométrie du gravier.

Certains auteurs fixent l'ouverture maximale des crépines à D_{10} , mais pour :

- TERZAGHI (1943) : e (épaisseur des crépines) = d_{85} ;
- JOHNSON (USA) : $e = D_0 = 7d_{10}$;
- JOHNSON (FRANCE) : $e = d_{60}$.

Avec le D qui représente un diamètre des grains de l'aquifère et le d qui représente un diamètre des grains du massif filtrant

Afin d'éviter un régime turbulent de l'eau pouvant entraîner une mobilisation des éléments solides du terrain, il est souhaitable que la surface des vides des crépines soit la plus grande possible.

Les crépines utilisées dans ces forages sont de marque Johnson avec fentes continues de slot 40 (1 mm) qui sont fabriquées avec de l'acier inoxydable. Elles présentent une grande résistance à la corrosion inter cristalline et sont bien adaptées aux formations aquifères peu épaisses et fines ou très fines.

b)- Le choix des niveaux captés

Le choix du niveau à capter est déterminé en fonction des changements des caractéristiques (viscosité de la boue), les pertes des fluides des forages (boue bentonitique). Mais la complexité du terrain qui est constituée d'une succession de fines couches peu perméables et imperméables, a conduit au choix délicat du niveau capté en prenant en considération deux critères : capter le maximum possible de l'aquifère et une longueur de la colonne de crépine inférieure à la limite au delà de laquelle, il y a un risque d'écrasement. Les niveaux captés se trouvent entre les côtes 74 et 108 m pour les forages E et D et entre 78 et 114 m pour le forage F (Tableau 2).

Tableau 2 : choix des longueurs à crépiner en fonction des types d'aquifères (Mabillot, 2005)

Types de nappes	Pourcentage crépine de l'épaisseur de l'aquifère
Nappe artésiennes en terrains homogènes non stratifiés	80 à 90 % de l'épaisseur de l'aquifère
Nappes artésiennes en terrains hétérogènes stratifier	80 à 90% des couches les plus perméables
Nappe libre en terrains homogènes	Couche de puissance inférieure à 45 m crépine le tiers inférieur jusqu'à 50 % Couche de puissance supérieure à 45m crépine le tiers inférieur jusqu'à 80%
Nappe libre en terrains hétérogènes stratifiés	La couche crépinée est de l'ordre du tiers de l'épaisseur de l'aquifère dans le cas où les couches soient importantes. Dans le cas échéant, il existe plusieurs schémas : <ul style="list-style-type: none"> - 1) sable fin surmontant une épaisse couche de sable gros, ou gravier crépiné 70 à 80 % du sable grossier ; - 2) une épaisse couche de sable fin surmontant une mince couche de gros sable ou gravier, il faudrait crépiner toute la couche grossière et la moitié de la couche de sable fin ; - 3) sable grossier surmontant une couche d'égale épaisseur de sable fin crépine tout le sable fin et la moitié au moins de la couche supérieur ; - 4) sable fin en sandwich entre deux couches de matériaux grossiers, il faudrait alors crépiner entièrement les couches inférieures et le tiers ou la moitié de la couche supérieure avec des ouvertures appropriées.

c)- Gravier additionnel et cimentation

Le massif filtrant utilisé est de type siliceux, propre à élément arrondi dépourvu d'éléments fins argileux ou calcaire. Son diamètre se situe entre 1 à 2 mm. Ce gravier doit permettre de limiter les pertes de charges et éviter tout risque de cimentation ou de dissolution au contact avec l'eau ou durant la phase d'acidification.

La mise en place du gravier est effectuée par gravité à travers une colonne de tube munie d'une trémie entonnoir à sa partie supérieure, descendue dans l'espace annulaire chasser par une quantité d'eau. Au dessus du gravier additionnel, l'espace annulaire est obstrué par du tout venant du top gravier (côte 60 m) jusqu'à 2 m en dessous du sol. Du top du tout venant jusqu'au sol, l'espace annulaire (2,5 pouces) est cimenté avec du béton de dosage 350 kg.

La cimentation consiste à remplir, par un mélange à base de ciment, tout ou partie de la hauteur de l'espace annulaire entre le tubage et les parois du forage.

Le but à atteindre par la cimentation est le suivant :

- rendre étanche cet espace annulaire et empêcher la pollution par les eaux de surface ;
- ancrer les colonnes du tubage au terrain et les protéger ainsi contre les attaques corrosives de certaines eaux.

Avant d'effectuer cette opération, il faut calculer le volume de mélange de ciment à injecter. Il est donné par la formule suivante (LAUGA, 1990):

$$V = H/2 (d_1^2 - d_2^2)$$

H = hauteur de cimentation ;

d₁ = diamètre de foration ;

d₂ = diamètre du tubage.

II.1.2.2.4- Equipement des forages et coupes techniques

Les coupes techniques des forages D, E et F se trouvent en annexe.

II.1.2.3- Développement des forages

Le développement des forages a pour but : d'accroître la perméabilité naturelle de la formation en créant autour de la crête une zone graduée des matériaux granulaires du sol et la porosité d'une formation rocheuse du type grès ou d'ouvrir la fissuration d'un calcaire karstique ; d'améliorer la capacité spécifique du forage ; d'éliminer le cake ou fluide de forage qui protège sa paroi et tout ce qui a pénétré dans la formation et dans la zone critique, les éléments fines indésirables, de stabiliser la formation et de produire après développement une eau exempte de matières solides avec un débit spécifique maximum.

II.1.2.3.1- Méthodes de développement

Les procédés de développement connus sont :

- le développement chimique, par utilisation d'agents chimiques (acides, polyphosphate, solution chlorhydrique).

- le surpompage, pour extraire l'eau à l'aide d'une pompe prévue à cet effet, dans le forage avec un débit nettement supérieur à celui qui a été fixé pour son exploitation.
- le développement par pompage alterné, par le renversement de la direction du courant les ponts de sable sont détruits et il existe trois méthodes différentes d'exécution :
 - le développement par pistonnage : on applique à la colonne d'eau dans le forage un mouvement de 'va et vient' au moyen d'un piston actionné verticalement.
 - le développement pneumatique : ce procédé utilise le même principe que le développement par pistonnage avec deux procédés, soit à forage ouvert et soit à forage fermé.
 - le développement par lavage au jet (jetting) : cette méthode consiste à projeter un puissant jet d'eau horizontal dans la formation au travers de la crête.

II.1.2.3.2- Travaux de développement

Dans ce milieu peu perméable, la phase du développement revêt une très grande importance car elle conditionne la productivité des forages, paradoxalement ce milieu peu perméable donne des débits très importants, en l'occurrence les anciens forages (A : $78 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$, B : $85 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$ et C : $78 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$) et cette bonne productivité ne peut être atteinte qu'au bout d'un développement délicat et assez long, malheureusement certaines méthodes n'ont pas été exécutées par manque de matériel.

Sur le forage D, il y a eu alternance de procédé de développement (23 heures 30 minutes de soufflage à l'air lift, développement chimique par trois injections de solution d'hexamétaphosphate à 25 % mélangé avec du chlore à 10 % de la quantité d'hexamétaphosphate. L'injection se fait par la méthode du jetting à une pression de sept bars, après chaque injection 12 à 13 heures de repos et agitation pendant 5 minutes) et chaque injection est chassée par 2 à 3 m^3 d'eau.

Sur le forage E, il y a eu alternance de procédé de développement (27 heures 50 minutes de soufflage à l'air lift, 20 heures de jetting à l'eau sous pression, développement chimique par quatre injection de solution d'hexamétaphosphate à 25 % mélangé avec du chlore à 10 % de la quantité d'hexamétaphosphate. L'injection se fait par la méthode du jetting à une pression de sept bars, après chaque injection 12 à 13 heures de repos, et agitation pendant dix minutes) et chaque injection est chassée par 2 à 3 m^3 d'eau.

Sur le forage F, il y'a eu alternance de procédé de développement (13 heures 30 minutes de soufflage à l'air lift, 20 heures de jetting à l'eau sous pression, développement chimique par deux injections de solution d'hexamétaphosphate à 25 % mélangé avec du chlore à 10% de la quantité d'hexamétaphosphate. L'injection se fait gravitairement, après chaque injection 12 à 13 heures de repos, et agitation pendant 10 minutes), et chaque injection est chassée par 2 à 3 m³ d'eau.

II.1.2.4- Essais de pompage

Par des essais simplifiés, mais rationnels, on se propose de définir (Mabillot, 2005) : les réglages optimum d'exploitation d'un forage ; le débit et temps de pompage ; la position optimum de la pompe ; les caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère au voisinage du forage et dans les régions où il a été réalisé (perméabilité, transmissivité, étendue et coefficient d'emmagasinement). Les pompages d'essais selon leurs objectifs sont de deux types :

II.1.2.4.1- Essais de puits

Ces essais visent à déterminer et suivre par l'établissement de la courbe caractéristique l'état de santé du forage, le débit d'exploitation du forage, débit critique, le débit spécifique, débit spécifique relatif, rabattement spécifique, les constantes de perte de charge ainsi que la productivité (la méthode d'interprétation utilisée est celle de Jacob).

II.1.2.4.2- Essais de nappe

Ce sont les pompages de longue durée, avec un seul palier de débit constant durant l'essai. La durée de l'essai doit être au minimum 42 heures avec un optimum de 72 heures et ces essais de nappe ont pour objectif de déterminer les paramètres hydrodynamiques de l'aquifère (transmissivité, perméabilité, coefficient d'emmagasinement, les conditions aux limites...). Theis (1935) en comparant, par analogie, l'écoulement des eaux souterraines à la propagation de la chaleur dans un milieu continu et isotope a mis l'expression générale de l'écoulement des eaux souterraines (les méthodes semi-logarithmiques utilisées sont celles de Jacob et Berkaloff) :

$$S: (Q/4\pi T) \int_u^{\infty} (e^{-u} du)/u ; u = x^2 S/4Tt.$$

$$\int_u^{\infty} (e^{-u} du)/u = W(u) = -0,577216 - \log u + u - u^2/2,2 + u^3/3,3 + u^4/4,4 + \dots$$

Toutefois pour pouvoir appliquer la théorie et obtenir des solutions analytiques aisément formulables, les auteurs qui ont travaillé dans ce domaine, ont défini très strictement des schémas d'aquifères impliquant des conditions plus ou moins simplificatrices par rapport aux cas réels.

Il existe en général trois modèles selon l'allure des courbes expérimentales et pour chaque modèle, il existe deux méthodes (semi-logarithmique et bilogarithmique) :

a)- Modèle de Théis

La solution particulière de cette équation différentielle est valable pour les hypothèses suivantes :

- la couche aquifère est homogène ;
- les épontes sont imperméables (nappe captive) ;
- le puit est parfait et complet ;
- le diamètre du puit est faible ;
- l'eau est libérée instantanément par le réservoir à mesure de l'abaissement de la charge hydraulique.

A ces hypothèses définies, initialement pour une nappe captive, on peut ajouter celles conditionnant l'applicabilité de l'expression pour les nappes libres ; à s'avoir : la surface piézométrique horizontale ou sub-horizontale et le rabattement faible par rapport à l'épaisseur de l'aquifère.

Ce modèle se compose de deux méthodes :

- la méthode bilogarithmique de Théis : $T = 0,08Q/s \cdot W(u)$, $S = 4Tt/x^2u'$;
- et la méthode semi-logarithmique de Jacob valable pour des valeurs de u très petites ($u < 0,01$) : $T = (0.183Q/s) \cdot \log(2.25Tt/x^2S)$.

b)- Modèle pour nappe semi captive avec emmagasinement négligeable de l'éponge

Le modèle propose de représenter l'influence de la drainance lors d'un pompage. Il suppose maintenues pour la couche principale, toutes les conditions du régime d'écoulement de Théis. Mais on devra y ajouter les conditions particulières portant sur l'éponge semi-perméable. Jacob et Hantush supposent que l'éponge provient d'un débit retardé proportionnel au rabattement et que ce débit est permanent.

L'équation générale du rabattement dans la nappe semi captive, selon Hantush et Jacob est :

$$S = Q/4\pi T \cdot W(u, x/B) = 0,08Q/T \cdot W(u, x/B) \text{ avec } B = \sqrt{(Tb'/K')}.$$

B : Facteur de drainance

b' : épaisseur de l'éponte.

K' : perméabilité verticale de l'éponte semi - perméable.

• Méthode d'interprétation bilogarithmique (modèle de Walton)

On construit la courbe expérimentale sur un graphique bilogarithmique et on la superpose sur une des courbes -type de l'abaque de Walton dont chaque courbe correspond à une valeur de x/B.

$$T = (0,08Q/s) \cdot W(u', x/B); \text{ avec } u' = 1/u; S = 4Tt/x^2u'; B = x/(x/B); x = r.$$

• Méthode du point d'inflexion de Hantush

Le modèle hydrogéologique est le même que celui de Walton .la méthode consiste à construire la courbe semi-logarithmique [s = f(log t)] pour un piézomètre et à chercher quelques points caractéristiques de cette courbe.

Elle utilise les fonctions $k_0(x)$ et $e^x k_0(x)$ qui sont données par les tables (Hantush). La procédure est la suivante : sur le graphique [s = f (log t)], on extrapole s_{max} et on situe le point d'inflexion de la courbe s_i qui est égal à :

$$s_i = 1/2 * s_{max} = (Q/4\pi T) * K_0(r/B), \text{ avec } r = \text{distance du piézomètre de l'axe du puit.}$$

On détermine la pente i de la courbe au point d'inflexion et le temps t correspond à ce point. s_i et i sont liés par la relation suivante :

$$(2,3 * s_i)/i = e^{r/B} * K_0(r/B)$$

Connaissant $e^{r/B} K_0(r/B)$, on peut grâce à la table de Hantush déterminer r/B , ensuite calculer :

$$B = r/(r/B); T = (0,183Q/i) \cdot e^{-r/B}; S = (2 \cdot T \cdot t_i)/B \cdot r; k'/b' = T/B^2.$$

c)- Modèle pour nappe semi captive avec effet retardé de l'emmagasinement de l'éponte

Un débit retardé proportionnel au rabattement est supposé provenir de l'éponte contrairement au modèle précédent, ce débit n'est pas constant et le coefficient d'emmagasinement de l'éponte semi perméable S' n'est plus négligeable. Pour ce modèle, il existe deux méthodes :

- la méthode bilogarithmique de Boulton, d'abord superpose sur l'une des courbes de la famille A : $T = 0,08Q/s \cdot W(u', x/B')$, $S = 4Tt/x^2u'$, et ensuite sur l'une des courbes de la famille B : $T = 0,08Q/s \cdot W(u_1', x/B)$, $S = 4Tt/x^2u_1'$.

- la méthode semi-logarithmique de Berkloff, on calcule les paramètres à partir du diagramme semi-logarithmique : $T = 0,183Q/i$, où i est la pente des asymptotes ; $S = 2,25 Tt_0/x^2$, où t_0 est le point d'intersection de l'asymptote (1) avec l'axe t. $S+S' = 2,25Tt_0'/x^2$, où t_0 est le point d'intersection de l'asymptote (2) avec l'axe t correspondant au rabattement zéro ;

$$S' = (S+S') - S.$$

II.2- TRAVAUX DE REHABILITATION DES FORAGES

II.2.1- Principe

La diminution des capacités spécifiques d'un forage exige sa réhabilitation et ce phénomène peut être dû à diverses causes : obstruction, colmatage, incrustation ou corrosion. Et ces différents phénomènes peuvent être la conséquence de :

- processus chimiques, par précipitation du carbonate de choux ou magnésie ou par précipitation de composés ferreux ou manganèse (par leur forme oxyde ou hydrate) ;
- processus biologiques, par les boues bactériennes (bactéries ferrugineuses) ;
- processus mécanique : par entraînement dans le filtre d'éléments fins (silts et/ou argiles) ;
- processus physico-chimiques, par colmatage ;
- venue de sable.

II.2.2- Consistance des travaux

Sur le forage C lors de la visite, il a été constaté une mauvaise odeur et la présence d'objets qui bouchent le forage vers 76,7 m (vers le top crépine), donc 125 g de chlore ont été injecté pour désinfecter le forage, après agitation pendant 1heure, un temps de réaction de 12 heures, soufflage pendant 30 minutes, descente de la camera et le constat que le niveau statique est égal à 56,6 m et que l'eau est claire.

Sur le forage A, en faisant descendre la camera, on remarque que le forage est complètement enseveli. Par la suite, nous avons descendu un tricône diamètre 6'1/2 et effectuer une réhabilitation. Après un certain temps, le gravier a commencé à sortir. En mesurant la profondeur la conclusion est que l'une des crépines est endommagées. En suite nous avons effectué une cimentation au fond du forage en vue de sa récupération (diminution de 13m de la profondeur du forage). Les pompages d'essais ont été entamés par la suite.

II.2.3- ACQUISITION DES DONNEES HYDROCHIMIQUES

La méthode de récolte des données hydrochimiques de la nappe du CT dans le secteur de Bennichab, se résume autour de deux phases : de terrain et de laboratoire.

II.2.3.1- Phase de terrain

La phase de terrain a consisté dans un premier temps à la réalisation des ouvrages hydrauliques captant l'aquifère du Continental Terminal dans le secteur de Bennichab. Ces ouvrages sont trois nouveaux forages d'exploitation (D, E et F) et deux anciens forages (A et C) réhabilités.

Après l'implantation de ces ouvrages hydrauliques la seconde phase de terrain a consisté aux pompages d'essais et le prélèvement d'échantillons d'eau après 23h50min de pompage, dont le but principal est de caractériser les eaux de la nappe du Continental terminal. Sur le terrain les niveaux d'eau et les hauteurs de la margelle par rapport au sol des puits villageois et des piézomètres ont été mesurés à l'aide d'une sonde lumineuse et sonore ainsi que la localisation géographique des ouvrages avec un GPS. Parallèlement au suivi piézométrique, des paramètres physico-chimiques *in-situ* (température, pH, TDS et conductivité électrique) ont été mesurés et des échantillons d'eaux de la nappe prélevés dans des bouteilles bien étanches pour des fins d'analyses chimiques au laboratoire.

II.2.3.2- Phase de laboratoire

Les échantillons d'eau des forages (B, D, E et F) recueillis sur le terrain ont été transportés au laboratoire d'Hydrologie et Hydrochimie du département de Géologie de l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar.

Sur les eaux de la nappe du Continental Terminal dans le secteur de Bennichab, les analyses suivantes ont été effectuées :

- les ions Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} et Mg^{2+} par chromatographe ionique ;
- les ions (HCO_3^-) et (CO_3^{2-}) par titrimétrie.

II.3- Conclusion

La technique de forage utilisée dans le cadre de ces travaux est le rotary à la boue benthonique, cette technique est adaptée au terrains argileux.

Le matériel utilisé dans le cadre de ce travail est en bonne état ce qui a permis la réalisation des travaux sans beaucoup d'interruptions.

Le choix de l'équipement de captage est soldé sur des tubes en inox assez chère mais donne des résultats à long terme satisfaisants en terme de durée de vie et maintenance, le choix des longueurs captées s'est basé principalement sur deux critères (capter le maximum de l'aquifère dans la limite du budget prévu et une longueur de crête ne diminuant pas dangereusement la résistance de la colonne de captage).

D'après le développement réalisé sur les nouveaux forages (D, E et F), il a été remarqué qu'à plus de deux injections du produit d'hexamétaphosphate (à raison de 2 % de l'eau contenue dans le forage), il n'y a plus d'effet positif sur la productivité du forage. Dans la zone de Bennichab, il serait souhaitable de procéder au développement à la pompe précédé d'un soufflage à l'air lift ne dépassant pas dix heures d'affilées : le procédé le plus adéquat est le développement à la pompe.

La durée des essais de pompage ainsi que leur nature sont limité par le budget disponible

Chapitre III :

RESULTATS ET

DISCUSSIONS

Chapitre III : RESULTATS ET DISCUSSIONS

III.1- Caractérisation lithologique

Dans notre travail de reconstitution lithologique des milieux traversés, nous avons eu recours au carottage électriques, vitesse d'avancement (perforation) et de plus la description macroscopique des échantillons du cutting et, ces travaux de diagraphe ont été réalisé sur les trois nouveau forages (D, E et F) et portent sur la mesure du PS, la SPR (single point resistance) ainsi que gamma rays, avec une vitesse de $7\text{m}.\text{min}^{-1}$ (Fig.17 à 19).

Pour le forage E, entre 2 - 40 m, une succession de banc d'épaisseur et teneur en argile différente selon l'allure des paramètres enregistrés (gamma ray,SPR et SP) combiné avec la vitesse d'avancements de l'outil de forage .

40 - 45 m, une déflexion vers la gauche de gamma ray et la PS ainsi que la SPR, milieux moins argileux.

45 - 50 m, milieux peu argileux.

50 - 55 m, déflexion de la PS vers la gauche et aussi SPR, ainsi que le gamma ray (milieux moins argileux.

55 - 85 m, la PS oscille entre (-50 à -70 mv) ,aussi gamma ray et SPR ,indiquant des fines couches de teneur en argile variable et, de couleurs différentes(passées très argileuse et compacte entre 78-80,83-85m).

85 - 95 m, diminution de la PS pour atteindre une valeur de (-180) à 100 m de profondeur, une diminution de la SPR, ce là indique une diminution de la teneur en argile.

95 - 110 m, augmentation de la PS et SPR, avec des grès argileux rouges dans les cuttings.

Pour le forage D, entre 0 – 1.5 m, les enregistrements faits dans ce niveau sont perturbés par le tube métallique de protection.

2 - 25 m, la PS s'élève dans ce niveau de (-200 mv) à environ (-140 mv) pour une vitesse d'avancement et gamma qui s'élèvent respectivement à ($40\text{min}.\text{m}^{-1}$, -35 API), et une SPR qui oscille entre (110 et 90 ohm) ce-là indique une augmentation de la teneur en argile.

25 - 30 m, une petite déflexion vers la gauche coïncidant avec une diminution du gamma ray et de la vitesse d'avancement , cette couche montre un cutting de grés sablo argileux.

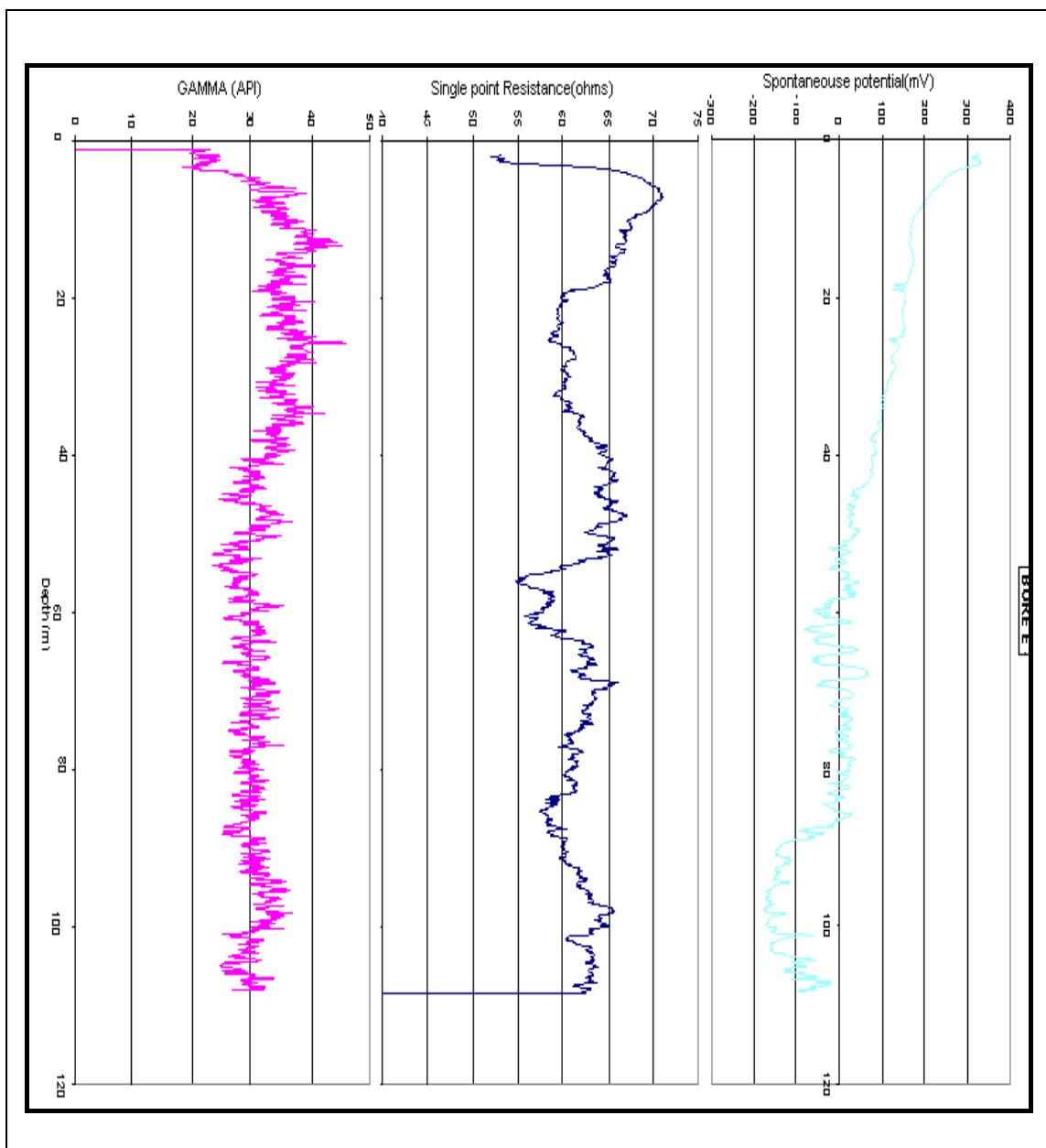


Figure 17 : Enregistrements diagraphiques du Forage E

30 - 35 m, on observe une mince couche qui se traduit par une PS plus élevée et un gamma élevé et la présence dans le cutting de grès et d'argile.

35 - 45 m, l'allure des enregistrements des courbes reflète une lentille de teneur en argile plus importante dans la partie supérieur (35-40m).

45 - 50 m, une mince couche plus dure avec une augmentation de la teneur en argile.

50 - 88 m, la PS est constante (-150) ainsi que le rayonnement gamma ray (55 API) et une vitesse d'avancement qui varie entre ($5 - 20 \text{ m}.\text{min}^{-1}$). Le cutting révèle un milieux de grès sablo-argileux modérés à peu cimentés (zone hydrogéologiquement importante).

88 - 95 m, on observe une légère déflexion vers la droite des courbes (SP et gamma) avec un avancement lent de la foration, ainsi qu'une augmentation de la SPR zone à grès argileux rubéfié, de cimentation forte

95 - 105 m, une petite déflexion vers la gauche de la PS ainsi qu'une diminution de la vitesse d'avancement ; le cutting révèle des grés argileux à grains sub-arrondis (zone hydrogéologiquement importante).

105 - 120 m, une augmentation de la PS qui coïncide avec une augmentation de gamma ray et une diminution de la vitesse d'avancement donc une augmentation de la teneur en argile.

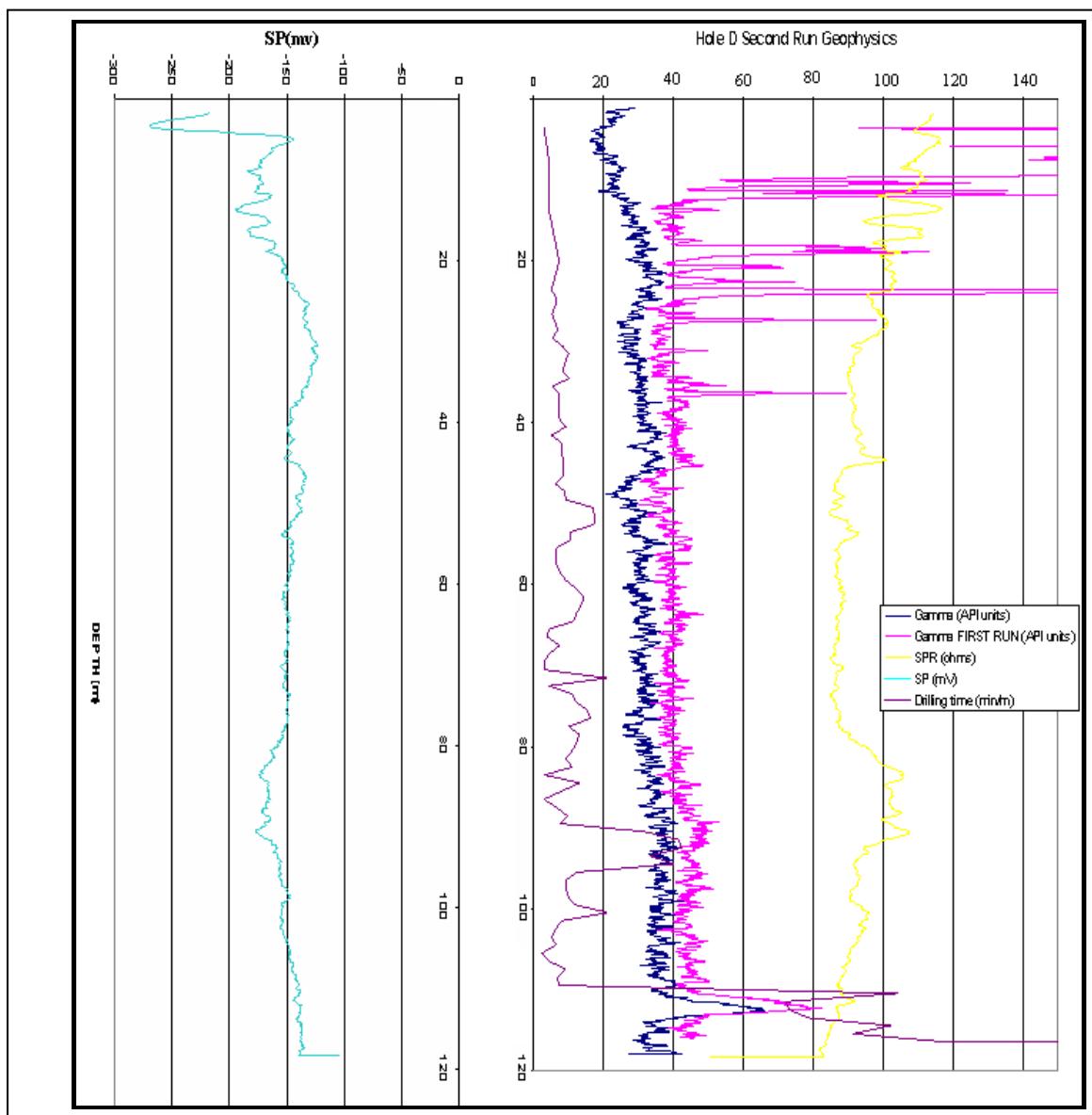


Figure 18 : Enregistrements diagraphiques du Forage D

Pour le forage F : entre 0 – 1,5 m, les enregistrements faits dans ce niveau sont perturbés par le tube métallique de protection.

2 – 7m, on a une petite déflexion de la PS et du gamma vers la gauche.

7 – 8, on observe une légère augmentation de la PS et gamma.

8 – 20 m, on observe une déflexion vers la gauche de la PS et, vers la gauche de gamma ray (10 - 35 API), le cutting révèle la présence du calcaire.

20 – 60 m, on note une augmentation de la PS ainsi que le gamma ray, les indices d'une augmentation de la teneur en argiles.

60 - 80 m, une déflexion vers la gauche de la PS coïncidant avec la diminution du gamma ray qui atteint son maximum à 80 m (24API) avec une diminution de la SPR et du cutting composé de sable gréseux (jaune).

80 - 95 m, une déflexion vers la gauche mais moins importante que la déflexion précédente.

95 – 120 m, une diminution de la PS et gamma ray signalant une augmentation de la teneur en argiles.

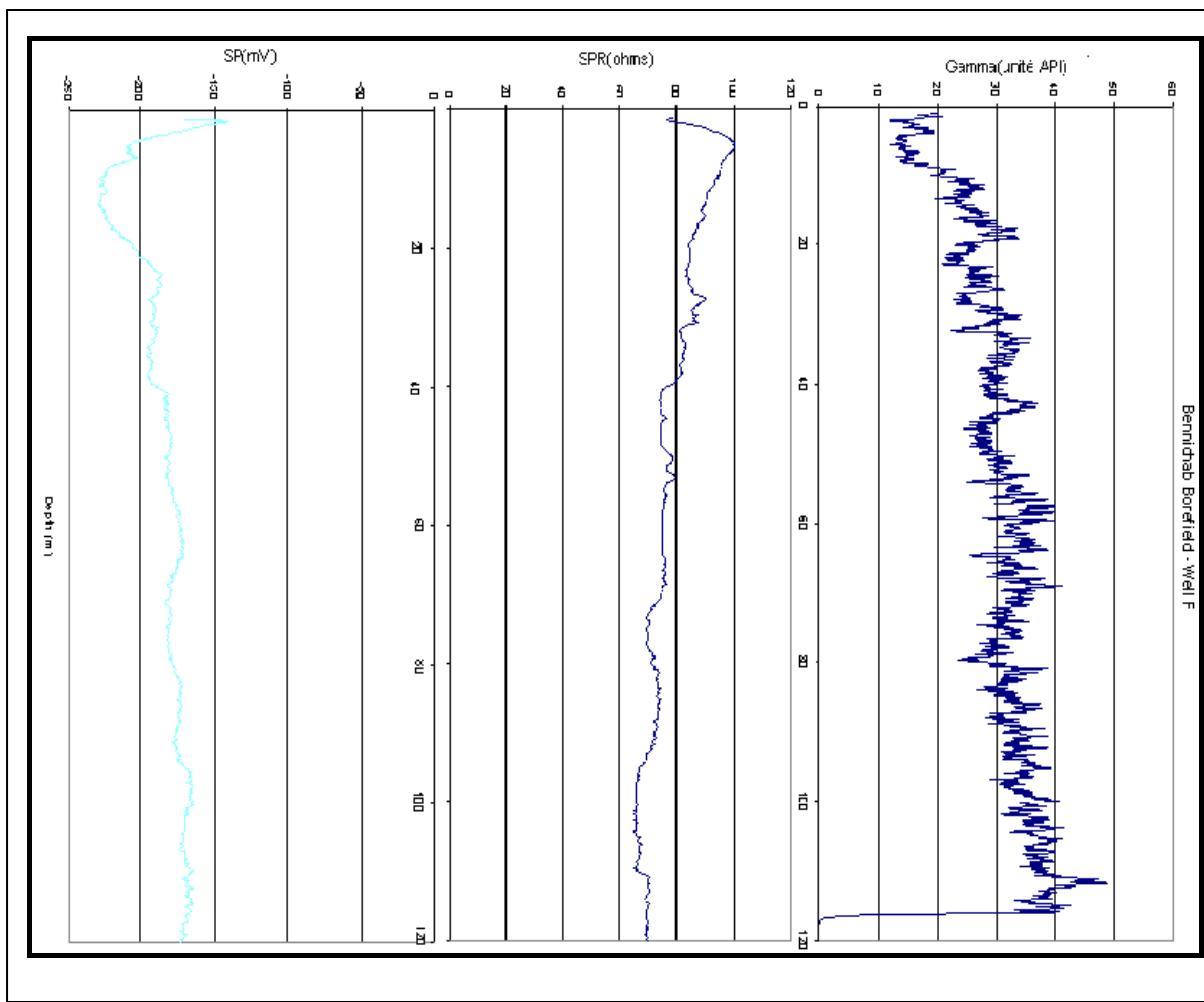


Figure 19 : Enregistrements diagraphiques du forage F.

L’interprétation des données de la diagraphie différée indique que ces milieux sont constitués par une succession de couches ou de lentilles de puissances variables et de teneur en argile différente. D’après la comparaison de différents enregistrements des paramètres diagraphiques, les zones les plus importantes hydrogéologiquement pour le forage D sont : 70 – 79 m, 86 – 88 m, 95 – 99 m, 101 – 110 m (Tableau 3).

D’après la comparaison des enregistrements diagraphiques, la vitesse d’avancement du forage et la composition des cuttings, on remarque que le milieux est formé d’une succession des fines lames de différentes teneurs en argiles, dont les niveaux les plus importants hydrogéologiquement pour le forage E se trouvent entre 71 – 78 m et 85 – 103 m.

Les zones les plus importantes hydrogéologiquement au niveau du forage F se trouvent entre : 73 – 81 m, 97 – 99 m et 105 - 108 m.

Tableau 3 : Récapitulatif des niveaux aquifères et des épaisseurs crépines

Forages	Niveaux producteurs localisés.	Epaisseurs crépines.	Top Crépine.	% Capté de l'aquifère.	Profondeur du forage (m).
D	Niveau 1 :(70 - 79 m, 86-88 m). Niveau 2 : (95 – 99 m, 101 – 110 m)	36m	74.16	83	117
E	Niveau 1 : 71-78m. Niveau 2 :85-103m.	36m	73.98	88	109
F	Niveau 1 :73-81m. Niveau 2 :(97-99m, 105-108m).	36m	78	69	121

III.2- CARACTERISATION PIEZOMETRIQUE DE LA NAPPE DU CONTINENTAL TERMINAL DE BENNICHAB

La figure 20 illustrant la surface piézométrique en 1969(d'après l'entreprise Intrafor-cofor) de la nappe du Continental Terminal de Bennichab, montre d'une part qu'il existe globalement deux axes d'écoulement : le premier axe se trouve dans la partie nord de la zone de direction N-SE et le deuxième axe se trouve au sud de la zone de direction Ouest - Est. D'autre part, la zone est dominée par deux dômes l'un au niveau des piézomètres Ginette et Brigitte au sud ouest et l'autre au niveau du forage B au nord. On note aussi la diminution des gradients hydrauliques dans les parties nord ouest et sud est de la zone.

En mars 1971, la surface piézométrique met en évidence la présence de deux dômes : un dôme au niveau des piézomètres Brigitte et Ginette qui coïncide normalement avec le front salé (Gravost, 1964) et un deuxième dôme qui se trouve au niveau du puits Bennichab II, alors qu'il y'a une dépression au niveau du piézomètre Nana 2. Cette dépression résulte probablement de la mise en exploitation du forage A qui se trouve à 110m au Sud-est du piézomètre Nana 2 . Le sens de l'écoulement est en général vers le Sud Est de la zone, le rabattement maximum en général dans cette période avoisine les 2m (Fig. 21).

La surface piézométrique en mars 2006, révèle toujours un dôme situé au niveau du front salé et une dépression au niveau du forage E. On remarque que le sens de l'écoulement est du Nord vers le Sud Est dans le compartiment nord de la zone d'étude, alors que dans le compartiment sud, l'écoulement est franchement de l'Ouest vers le Sud Est, Cependant le rabattement maximum en cette période (mars 2006)est moins important qu'en 1971 (Fig. 22).

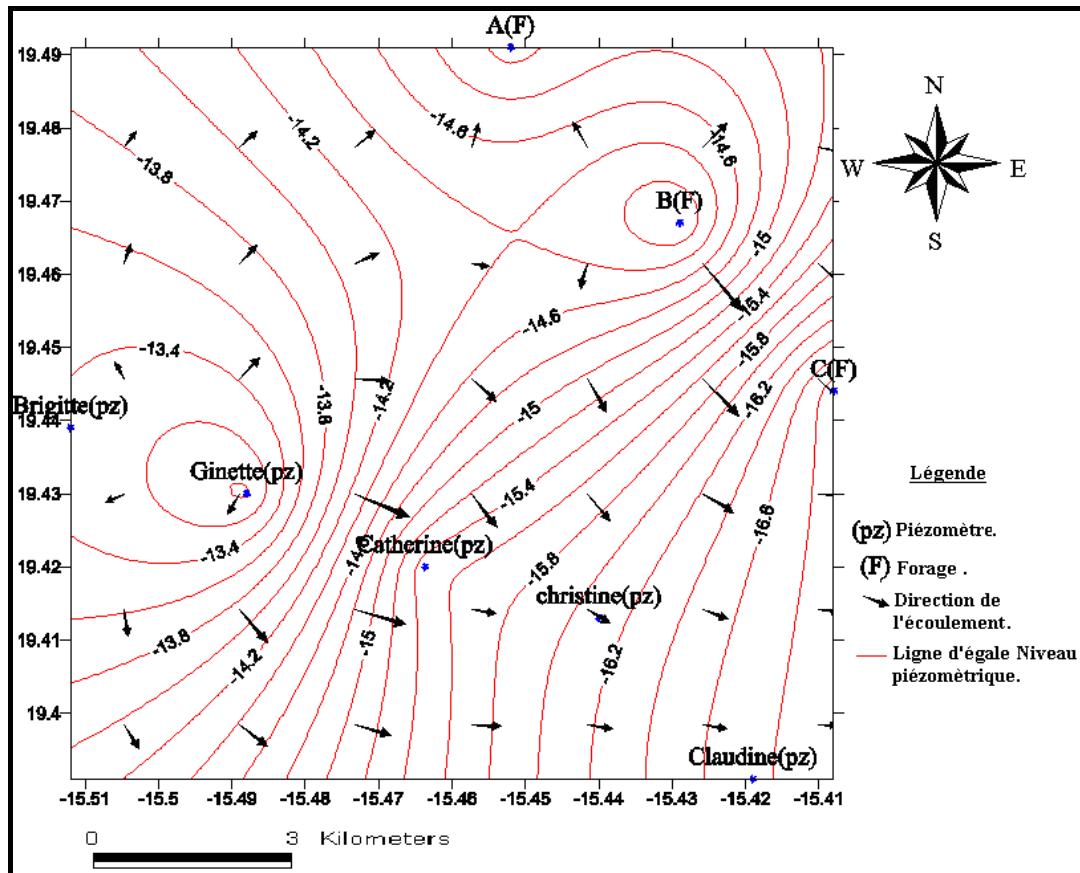


Figure 20 : Piézométrie de la nappe de Bennichab (d'après Intrafor-Cofor, janvier 1969)

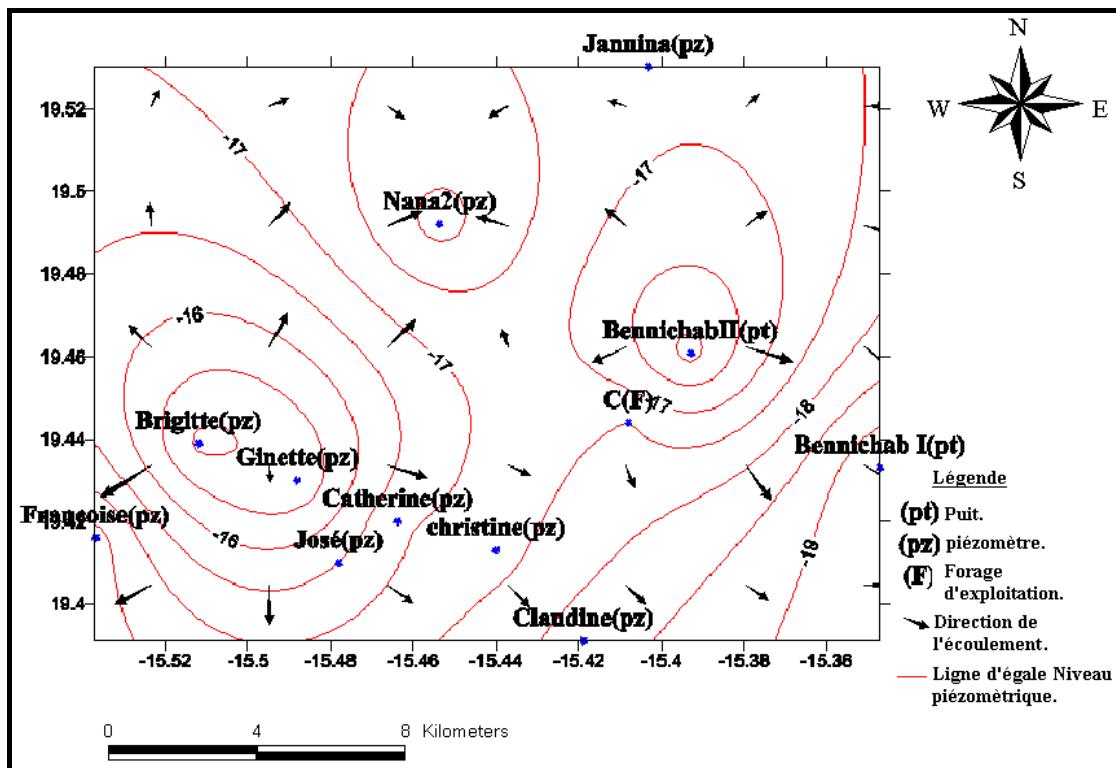


Figure 21 : Piézométrie de la nappe du Continental Terminal (d'après MCM, 1971)

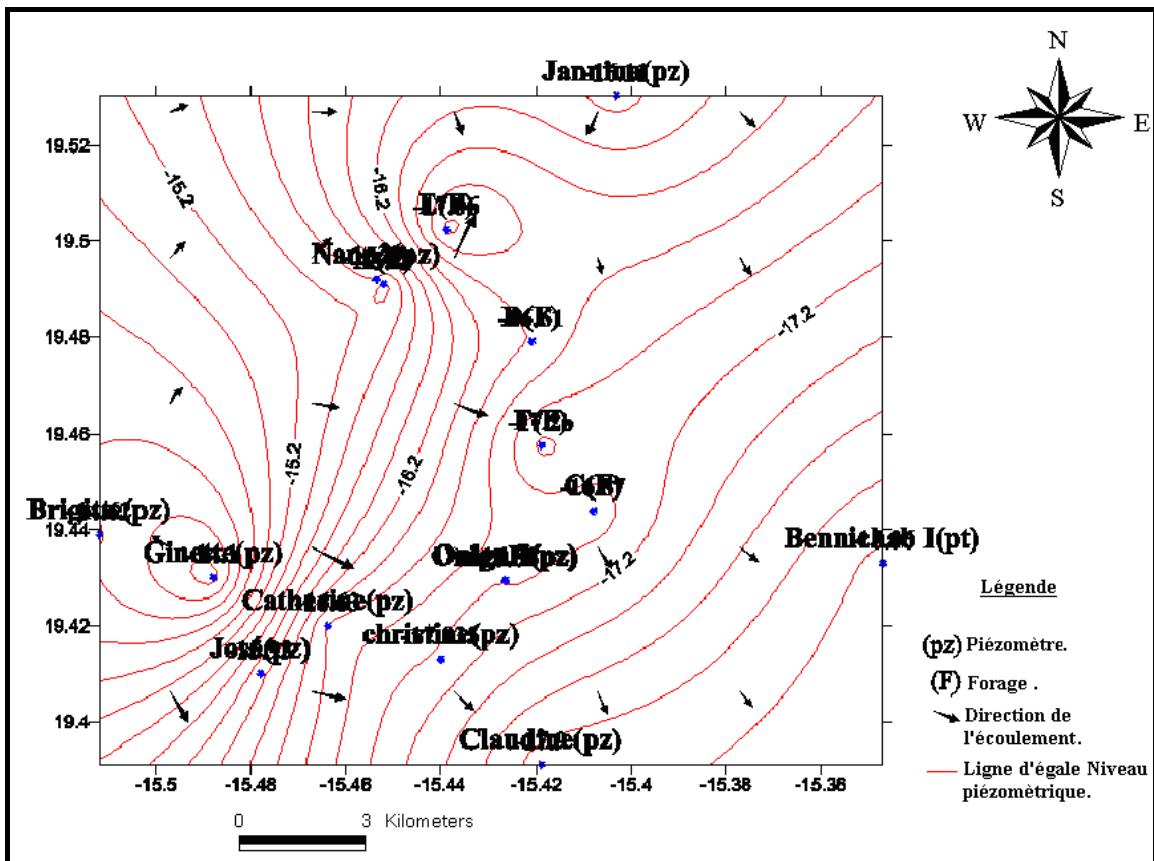


Figure 22 : Piézométrie de la nappe du Continental Terminal (mars 2006)

L'aquifère du Continental Terminal de Bennichab était exploité avec un débit global d'exploitation de $1500 \text{ m}^3 \cdot \text{j}^{-1}$ en moyenne avant mars 2006 et ce débit est passé à $7000 \text{ m}^3 \cdot \text{j}^{-1}$ après cette date.

En général la surface piézométrique présente une pente moyenne de 0.1 pour mille. Le niveau d'eau s'est rabattu dans le forage A de 18 cm avant mars 2006 et de 49 cm entre mars et décembre 2006 sur le même forage. Sur le forage B, il n'y a pas eu de mesure du niveau statique, car il était en exploitation tout au long de cette période. Sur le Forage C de janvier 1969 à mars 1971, le niveau s'est rabattu de 60 cm et entre mars 1971 et mars 2006 le niveau d'eau s'est élevé probablement à cause des conditions climatiques (précipitation, sécheresse) et de mars 2006 à décembre 2006, le niveau s'est rabaissé de 47 cm. Sur le forage D en 9 mois d'exploitation le niveau s'est rabattu de 60 cm, alors que sur le forage E le niveau d'eau s'est élevé de 63 cm probablement par decolmatage des pores qui étaient obstrués par la boue de forage (boue bentonitique), donc le rabattement de la nappe en 9 mois d'exploitation est aussi important que le rabattement sur 35 ans d'exploitation, ce qui reflète un degré d'exploitation probablement à risque pour l'aquifère (Fig. 23).

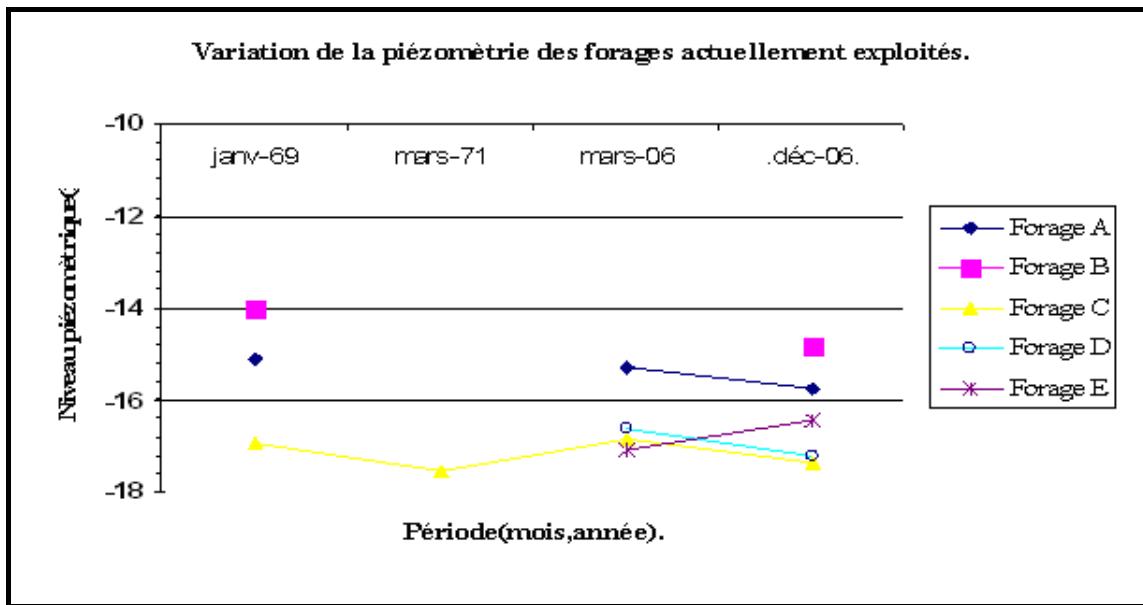


Figure 23 : Variation de la piézométrie des forages en exploitation dans le secteur de Bennichab (janvier 1969 à dec.2006)

III.3- CARACTERISATION HYDRODYNAMIQUE

III.3.1- Caractérisation hydrodynamique des nouveaux forages

Les pompages d'essais réalisés sur les forages (D, E et F) consistent en (Fig. 24 et 25) :

(Les essais de puits n'ont pas été réalisés pour les trois nouveaux forages car il a été jugé que le débit au soufflage est suffisant comme référence).

Pour les essais de nappe ,les paramètres ont été calculés en appliquant les formules de transmissivité (Jacob) et la perméabilité est calculée avec une épaisseur de 36 m, mais le coefficient d'emmagasinement n'a pas pu être calculé par manque de piézomètre à proximité du forage pompé. À noter que la transmissivité la plus précise est celle de la remontée confirmée par les autres méthodes (Hantusch et Théis).

Pour le forage D le pompage de longue durée a duré 24heures avec un débit constant de $14,4 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$ et un rabattement de 3,71 m. Le niveau s'est stabilisé après la première heure, et après 12 heures de stabilisation, on remarque que le niveau commence à remonter probablement un decolmatage. L'analyse l'échantillon d'eau prélevé après 23h50minutes de pompage, donne une conductivité $310 \mu\text{S.cm}^{-1}$, température de l'eau $32,4^\circ\text{C}$ et un résidu sec 154 ppm .Les paramètres hydrodynamiques ont été calcules par la méthode de Jacob; en appliquant les formules de transmissivité et, la perméabilité est calculée avec une épaisseur de 36 m ($T_{\text{descente}} = 0,183 * Q/C = 3,6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$; $T_{\text{remontée}} = 4,8 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$; $K = T/b = 1,3$

10^{-4} m.s $^{-1}$) (Fig 24 et 25). Le coefficient d'emmagasinement n'a pas pu être calculé par manque de piézomètre à proximité du forage pompé, le forage a une perméabilité à la limite des formations semi – perméable. Il est à noter que la transmissivité la plus exacte est celle de la remontée confirmée par les autres méthodes (Hantusch et Théis).

Pour le forage E, le débit de longue durée pour 24 heures de pompage à débit constant est $18 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$ et le rabattement égal à 4,4 m (stabilisé après environ 1 heure de pompage). L'eau de ce forage donne une conductivité de $428 \mu\text{S.cm}^{-1}$, une température de l'eau 26.8°C et un résidu sec de 213 ppm. Le pompage de longue durée était de 24 heures à débit constant de $18 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$, et donne un rabattement de 3,9 m. La transmissivité de la descente calculée avec la méthode de Jacob est de $T=1.5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$ (Fig 24 et 25).

Pour le forage F, l'exécution d'un pompage de longue durée de 24 heures à débit constant de $18 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$, a donné et donne un rabattement de 14,2 m, une conductivité électrique de $334 \mu\text{s.cm}^{-1}$, une température de $31,7^\circ\text{C}$ et un résidu sec de 170 mg.l^{-1} à $30,9^\circ\text{C}$.

D'après l'allure de la courbe F on constate qu'il est plus approprié d'utiliser la méthode de Jacob ; en appliquant les formules de transmissivité et perméabilité calculé avec une épaisseur moyenne de 36 m , avec la méthode de Jacob ($T_{\text{desc}} = 0,183 * Q/C = 2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$; $T_{\text{rem}} = 9 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$; $K = T/b = 2,5 \cdot 10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$), mais le coefficient d'emmagasinement n'a pas pu être calculé par manque de piézomètre à proximité du forage pompé, une perméabilité dans le domaine du semi perméable(tableau 4) . (Fig 24 et 25)

Si la transmissivité d'un aquifère a une valeur inférieur à $12 \text{ m}^2.\text{j}^{-1}$.on ne pourra l'utiliser que pour un usage domestique .lorsque la transmissivité est égale ou supérieur à $125 \text{ m}^2.\text{j}^{-1}$, on ne pourra l'utiliser pour une alimentation municipale ou pour une irrigation. Le coefficient d'emmagasinement dans les nappes libres se situent entre 1 et 30% et dans les nappes captives de 10^{-5} à 10^{-3} . (LAUGA, R.1990)

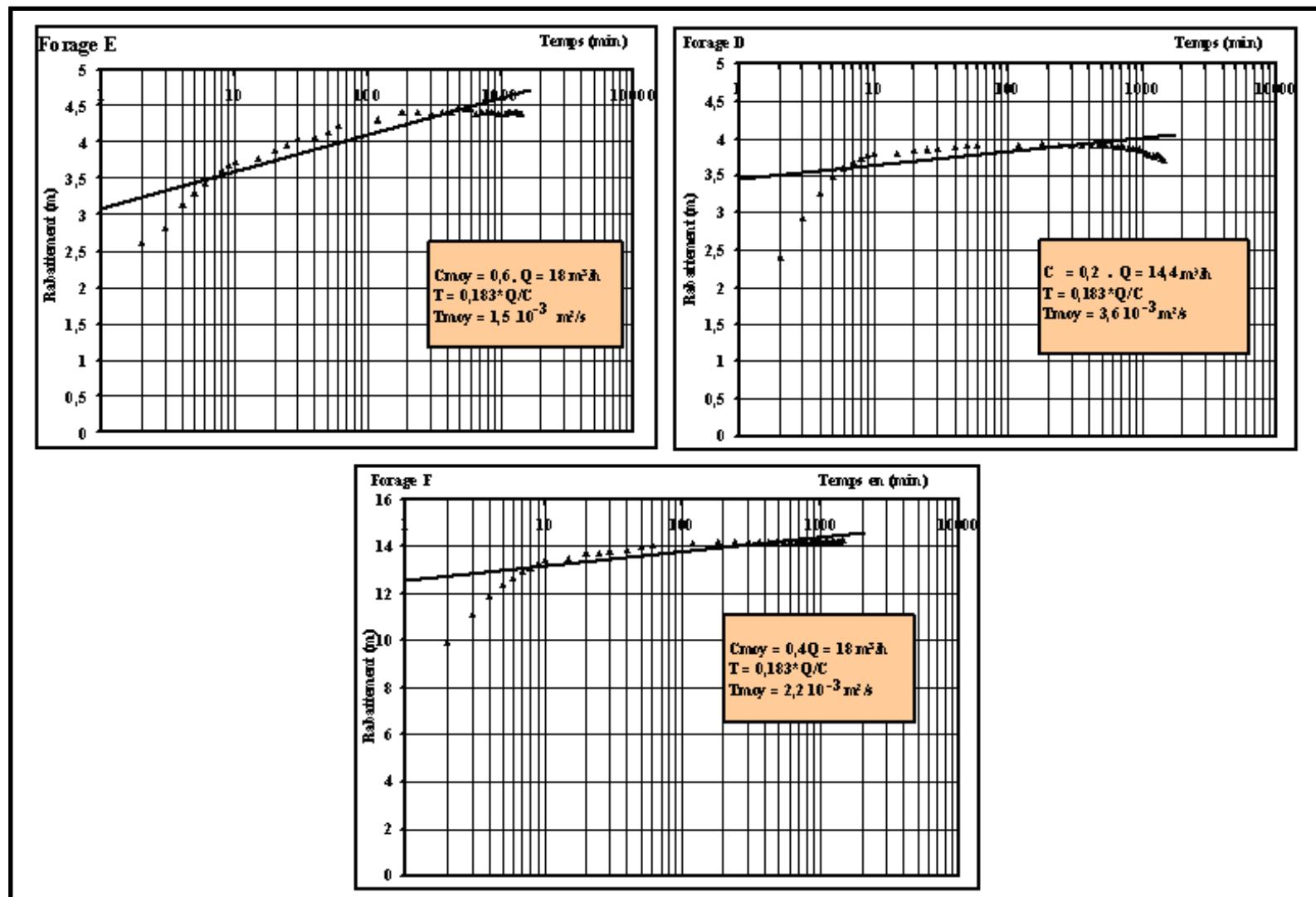


Figure 24 : Courbes de pompage (descente) des nouveaux forages captant l'aquifère de Bennichab

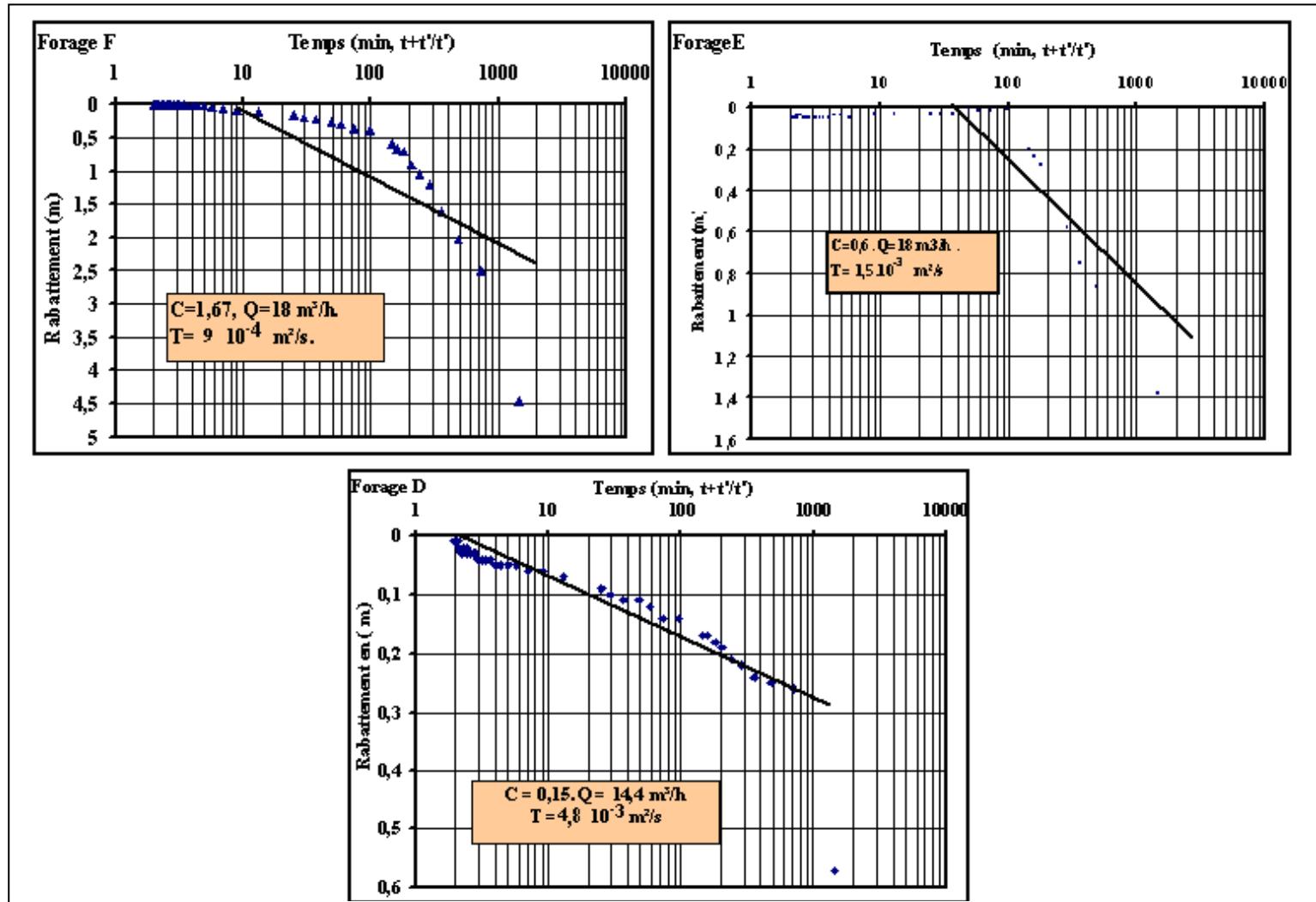


Figure 25 : Courbes de pompage (remontée) des nouveaux forages captant l'aquifère de Bennichab

III.3.2- Caractérisation hydrodynamique du forage A réhabilité

III.3.2.1- Etat initial (Fig. 26)

Sur le forage A le 08 février 1969, fut la date de réalisation de l'essai de pompage, par l'entreprise INTRAFOR-COFOR. Cet essai consistait en la réalisation de trois paliers d'une heure de pompage chacun ($Q_1 : 51 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$ avec un rabattement $s : 10,2 \text{ m}$; $Q_2 : 71 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$ avec rabattement $s : 14,58 \text{ m}$; $Q_3 : 81 \text{ m}^3/\text{h}$ avec un rabattement $s : 16,92 \text{ m}$) et un pompage de longue durée à $Q : 77 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$; avec un rabattement $s : 16,17 \text{ m}$. D'après les données le Débit d'exploitation retenu pour le forage A est de $81 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$. D'après le graphique des essais de longue durée il existe deux niveaux producteurs (aquifère bicouche) caractérisés par des formations semi perméable de l'ordre 1.10^{-5} à $1.10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$.

Sur le forage C par manque d'éléments nécessaires à une étude comparative fiable, les données sur les essais de pompage réalisés, n'ont pas été traitées dans le sous titre concernant les résultats des travaux de réhabilitation.

III.3.2.2- Après réhabilitation (Fig. 27)

Les essais de pompage par palier réalisés le 21 décembre 2005 à 08 h 00 (quatre paliers chacun d'une heure de pompage et 1 heure de remontée) sont : $Q_1 = 32 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$, $s = 5,14 \text{ m}$, $Q_2 = 46 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$, rabattement $s = 7,77$; $Q_3 = 60 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$, rabattement $s = 10,1 \text{ m}$; $Q_4 = 72 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$, rabattement $s = 12,3 \text{ m}$).

concernant l'évaluation de l'essai de puit ,selon Castany 1982(principe et méthode de l'hydrogéologie) le débit d'exploitation peut être supérieur au débit critique en considérant le rabattement ($s = 0,75 \cdot h$, où h est la hauteur d'eau dans le forage et s le rabattement) tolérable pour les nappes captives, en prenant aussi en considération la conditions du rapport entre pertes de charges linéaires et pertes de charges quadratiques qui doit être inférieur à 25%, on peut constater que les débits des essais de puits réalisés sur le forage A(après réhabilitation) sont assez faibles par rapport aux capacités du forage (donc Débit maximum d'exploitation est supérieur à $72 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$). Le débit spécifique relatif est plus important en 2006 ($6,42 \text{ m}^3.\text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$) qu'en 1969 ($5,6 (\text{m}^3.\text{h}^{-1}) \cdot \text{m}^{-1}$) donc les capacités du forage après réhabilitation sont plus importantes qu'à l'état initial, probablement par le phénomène d'auto développement.

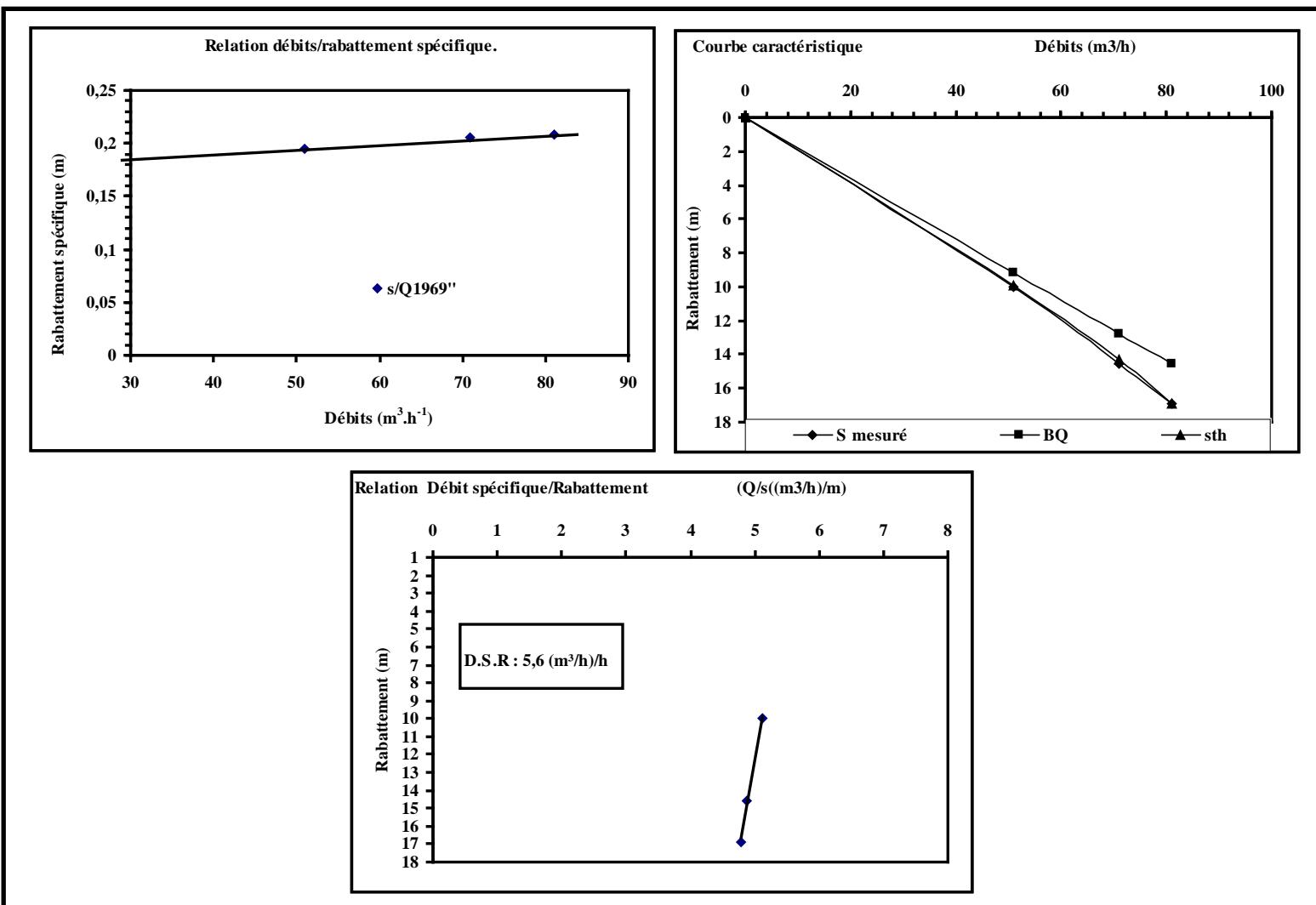


Figure 26 : Courbes caractéristiques du forage A avant la réhabilitation

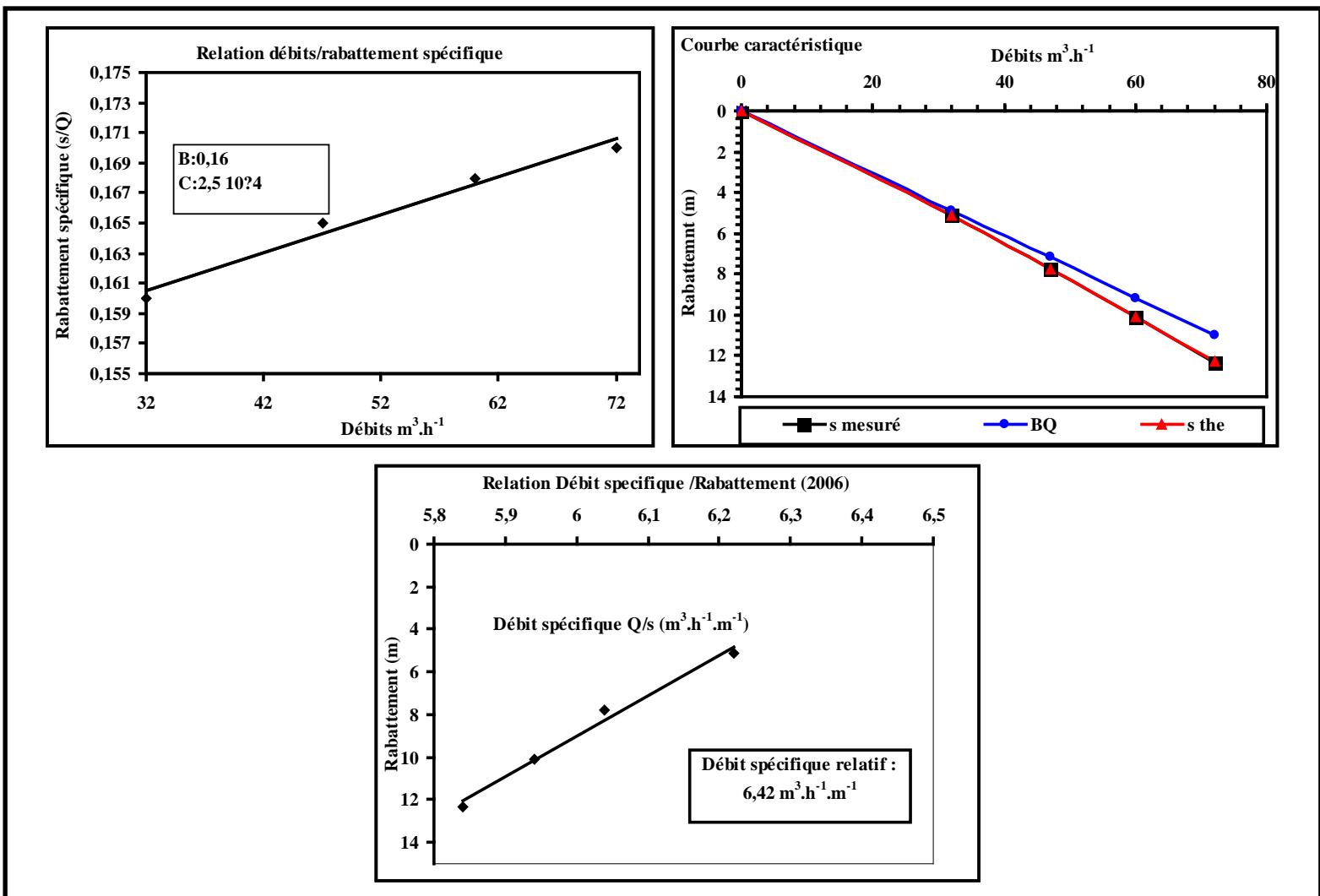


Figure 27: Courbes caractéristiques du forage A après la réhabilitation

Le pompage de longue durée à $Q = 65 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$, rabattement $s = 11,5 \text{ m}$ mesuré sur le forage A , et au niveau du piézomètre (Nana II) qui se trouve à 110 m Nord-est du forage A le rabattement après 24 h de pompage est de 0,375 m, selon l'allure de la courbe, la méthode la plus indiquée est celle de Berkaloff .car On remarque que c'est le cas d'un effet de retard par l'éponge (présence de deux couches productrices), en appliquant les formules du model semi logarithmique et en déduisant la pente (i) des asymptotes, la transmissivité est $T = (0,183 * Q).i^{-1} = 2 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$, (coefficient d'emmagasinement) $S = (2.25.T.t_0).(x^2)^{-1} = 9.3 \cdot 10^{-6}$, $S'=(2.25.T.t_0').(x^2)^{-1}=6.1 \cdot 10^{-5}$ (cette nappe réagie comme une nappe captive coefficient d'emmagasinement entre 10^{-6} et 10^{-5}) ,cependant avec une épaisseur de 36 m, la perméabilité est de $K = T/b = 5.5 \cdot 10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$, selon la classification de Castany 1982 , ce milieu est de la gamme des formations semi perméable (tableau 4). (Fig. 28)

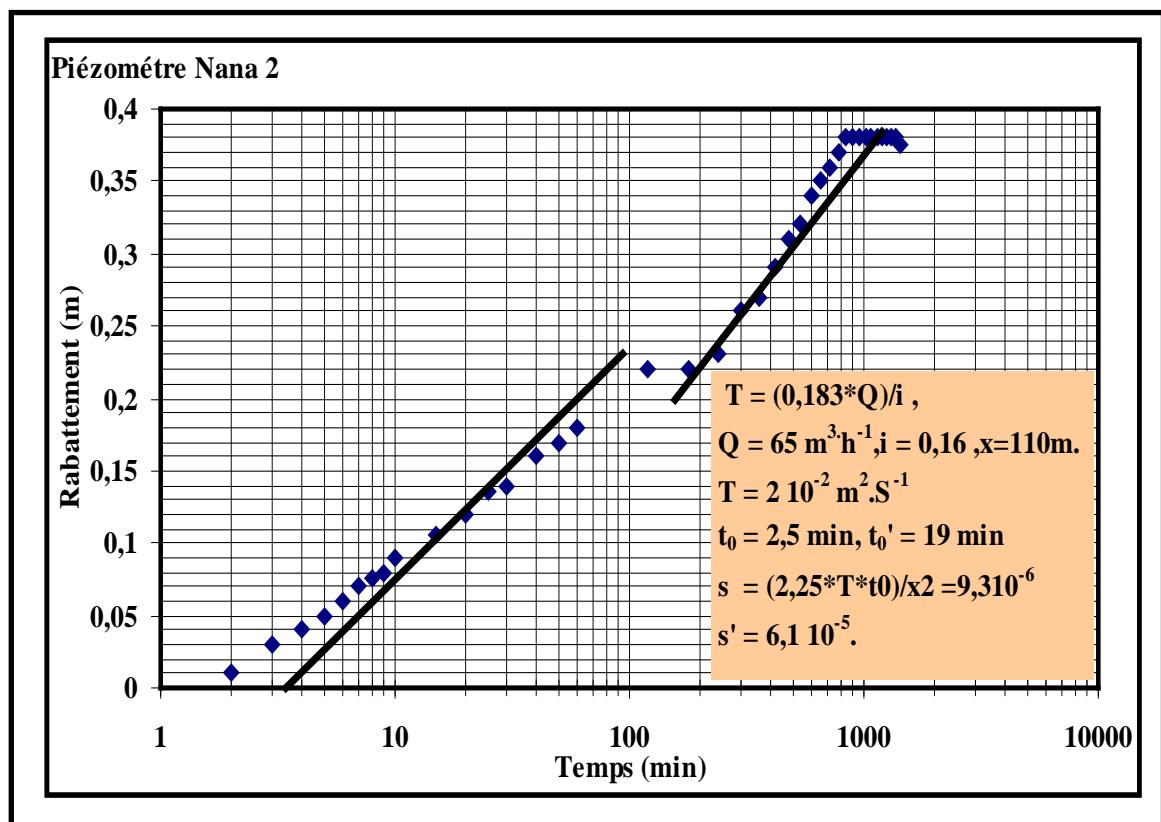


Figure 28 : Pompage de longue durée du forage A (2006).

Tableau 4 : Valeurs du coefficient de perméabilité (Castany, 1982)

K(m/s)		10^1	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}	10^{-10}	10^{-11}
GRANULOMETRIE	Homogène	Gravier pur	Sable pur		Sable très fin		Silt		Argile				
	Variée	Gravier grossier moyen	Gravier et sable	Sable et argile limons									
DEGRES DE PERMEABILITE		TRES BONNE	BONNE	MAUVAISE				NULLE					
TYPE DE FORMATIONS		PERMEABLE				SEMI-PERMEABLE				IMPERMEABLE			
↓ limites conventionnelles ↓													

III.3.3- Rayon d'influence

En supposant le milieu homogène horizontalement et Après 24 heures de pompage à débit constant ($65 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$) au niveau du forage A, le rayon d'influence était de 120 m (Fig. 29).

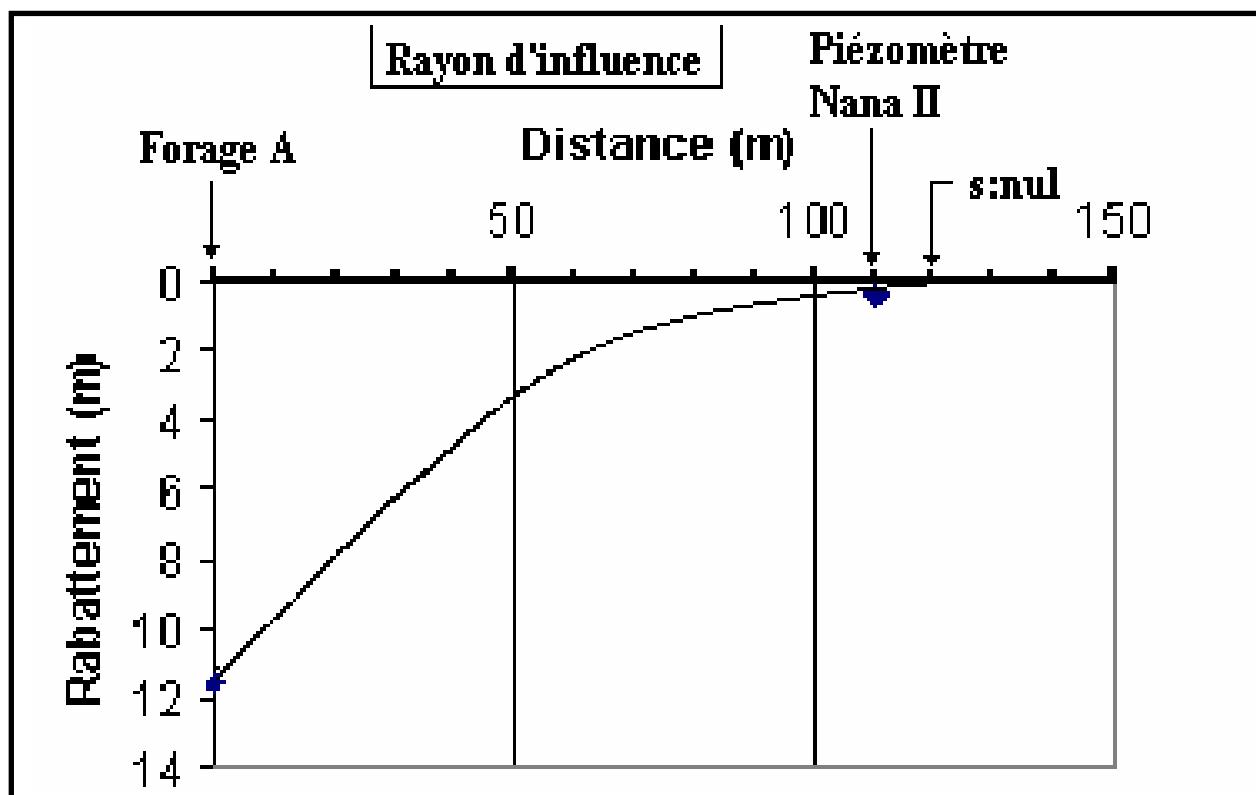


Figure 29 : Rayon d'influence autour du forage A de Bennichab

III.4- LA CHIMIE DES EAUX SOUTERRAINES

III.4.1-. Caractères chimiques généraux des eaux souterraines

Dans l'ensemble, les eaux souterraines dans le secteur de Bennichab sont moyennement minéralisées avec des valeurs de conductivité électrique comprises entre 281 et 428 $\mu\text{S.cm}^{-1}$ et sont dans l'ensemble douces ($\text{TDS} < 1000 \text{ mg.l}^{-1}$) (Banton et al., 1997). Les valeurs des pH des eaux souterraines oscillent entre 6,92 et 7,17 et indiquent que l'alcalinité des eaux est essentiellement contrôlée par les ions bicarbonates (HCO_3^-) qui constituent les ions prédominants au niveau des anions. Les températures des eaux varient de 26,8 à 32,4 °C.

La représentation des données des analyses chimiques des échantillons d'eaux souterraines des forages sur les diagrammes triangulaires de Piper (Figure 30), montre deux types de faciès chimiques : Bicarbonaté calcique et magnésien (Forages D, E et F) et bicarbonaté sodique et potassique (Forage B).

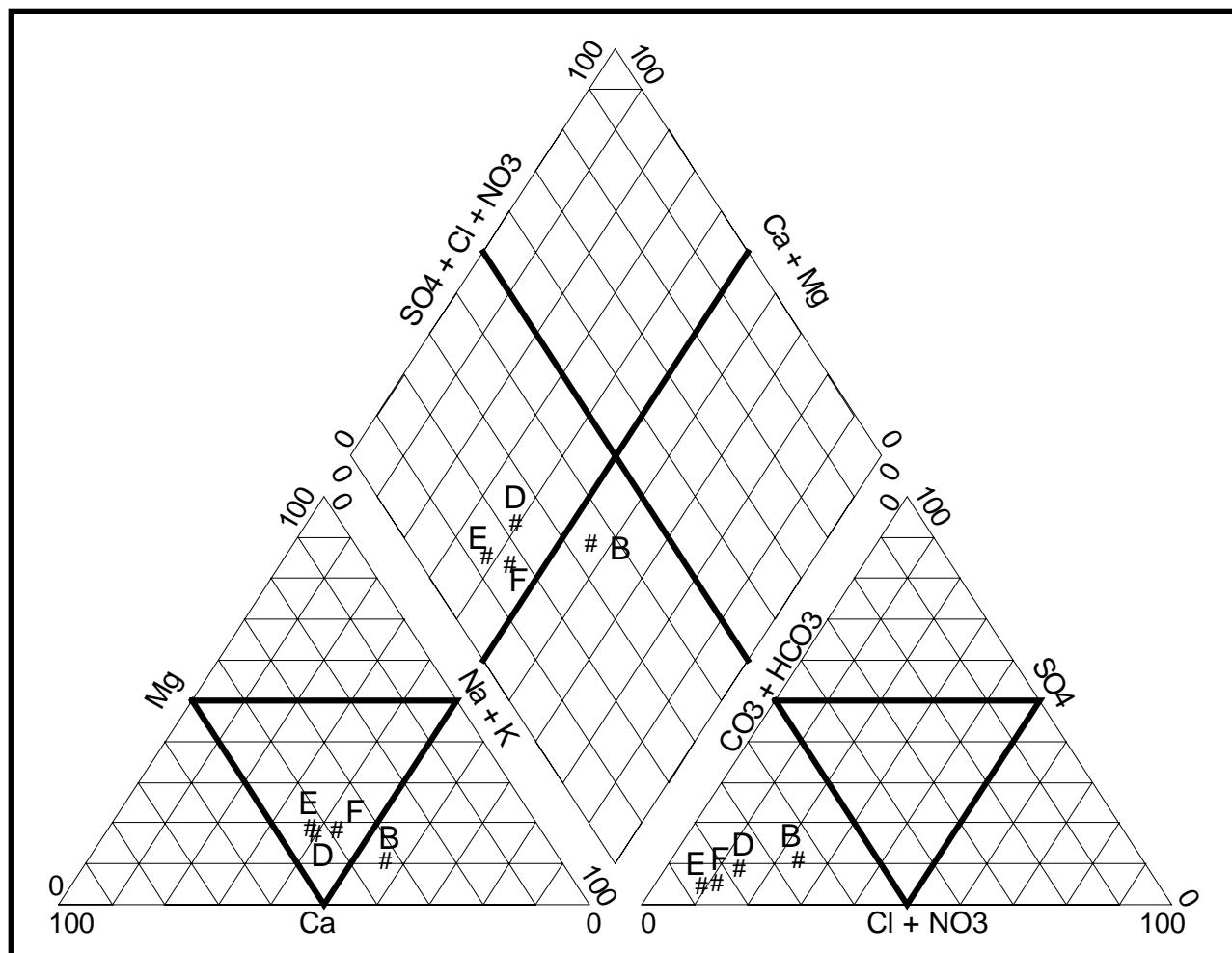
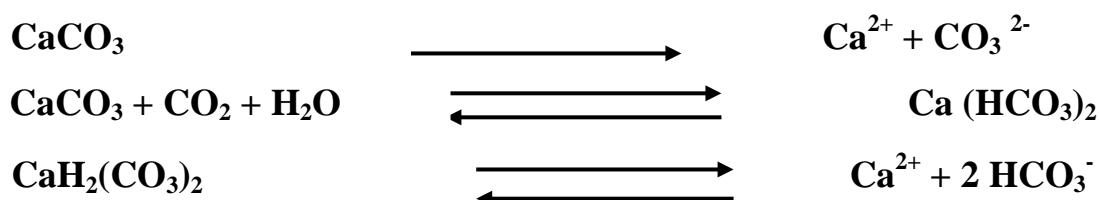


Figure 30 : Diagramme de Piper des eaux des forages de Bennichab (campagne de 2006)

III.4.2- Etude de l'agressivité des eaux souterraines

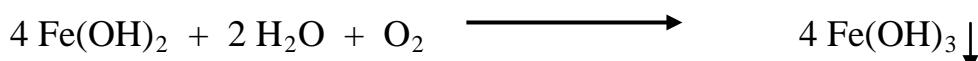
III.4.2.1- Equilibre calco - carbonique

Les caractéristiques physico-chimiques des eaux jouent un rôle important dans le choix du matériel d'équipement des forages. C'est ainsi que la mesure de certains paramètres tels que le pH d'équilibre, le CO₂ libre, peut nous aider à choisir le matériel adéquat pour l'équipement des ouvrages de captage. Le principal paramètre est le carbonate de calcium (CaCO₃) dont l'équilibre dans l'eau est soumis à des interactions avec le dioxyde de carbone (CO₂) suivant les réactions ci-dessous :



D'après les réactions ci-dessus, les bicarbonates et les carbonates ne peuvent exister en solution qu'en présence d'une certaine quantité de gaz carbonique libre, suffisante pour maintenir cet équilibre : c'est le gaz carbonique équilibrant. Si le CO₂ libre est supérieur au CO₂ équilibrant, l'eau est agressive et peut attaquer les conduites. Si le CO₂ est partiellement éliminé (variation de la température, de la pression, dégazage) la concentration en CO₂ peut devenir inférieure à celle du CO₂ équilibrant : l'équilibre est alors rompu, le bicarbonate se décompose en donnant du carbonate et si la concentration en celui-ci atteint la valeur du produit de solubilité, il va précipiter : l'eau est incrustante ou entartante.

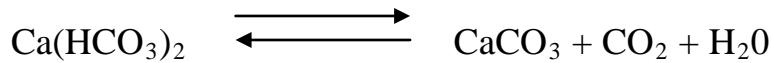
Le dégagement du gaz carbonique au passage du massif de gravier ou des crépines peut modifier les équilibres carboniques et d'oxydo-réduction de l'eau. Il fait également varier la solubilité de l'oxygène et du fer. C'est ainsi que des dépôts ferrugineux peuvent se mélanger à ceux du calcaire obstruant davantage les crépines, selon l'équation :



III.4.2.2- Détermination du pH d'équilibre ou pH de saturation des eaux

Le pH d'équilibre d'une solution est le pH que la solution devrait avoir à l'équilibre avec la même composition chimique. Une eau en équilibre sur le plan calco-carbonique est une eau exactement saturée en CaCO₃ ; au contact de CaCO₃, cette eau n'aura donc pas plus tendance à en dissoudre qu'elle n'a en déposer. Elle contient la quantité de CO₂ nécessaire et juste suffisante

pour maintenir en solution le Ca²⁺ qu'elle contient sous forme de bicarbonate, ce que l'on exprime en général par l'équilibre (Bontoux, 1983 *in* Sy Tapsoba, 1991).



Expression qui résume sous forme simplifiée les équations fondamentales du système.

Le pH d'équilibre est obtenu par la formule simplifiée de Bakalowicz (1980) (*in* Sy Tapsoba, 1991) :

$$\text{pH}_{\text{éq}} = \text{pK}_2 - \text{pK}_{\text{Ca}} - \log [\text{HCO}_3^-] - [\text{Ca}^{2+}]$$

La différence ΔpH (pH mesuré – pH_{éq}) permet d'apprécier l'implication de la qualité chimique de l'eau dans la destruction prématuée des crépines et des pompes.

Si ΔpH < 0, l'eau est acide ; le fer est attaqué et solubilisé par ionisation : il y a consommation d'ions H⁺ et le pH augmente ; une crépine en fer dans une eau agressive risque donc d'être corrodée et ne sera plus en mesure de retenir les grains de sables.

Si ΔpH > 0, il y a précipitation des carbonates qui vont colmater la crépine : l'eau est calcifiante ou incrustante.

On peut également déterminer graphiquement le pH d'équilibre et le CO₂ libre en reportant les résultats des analyses chimiques sur le diagramme de Schoeller et Berkaloff (Fig. 31).

Le pH d'équilibre est l'intersection entre la droite joignant les deux points représentant la concentration en Ca et en carbonates et bicarbonates.

Les eaux souterraines des forages (B, D, E et F) dans le secteur de Bennichab, ont des pH d'équilibre qui sont supérieurs aux de pH mesurés (ΔpH < 0). Ces eaux sont donc agressives et peuvent attaquer les équipements métalliques des forages. C'est pourquoi les aciers inox ont été choisis pour équiper les nouveaux forages.

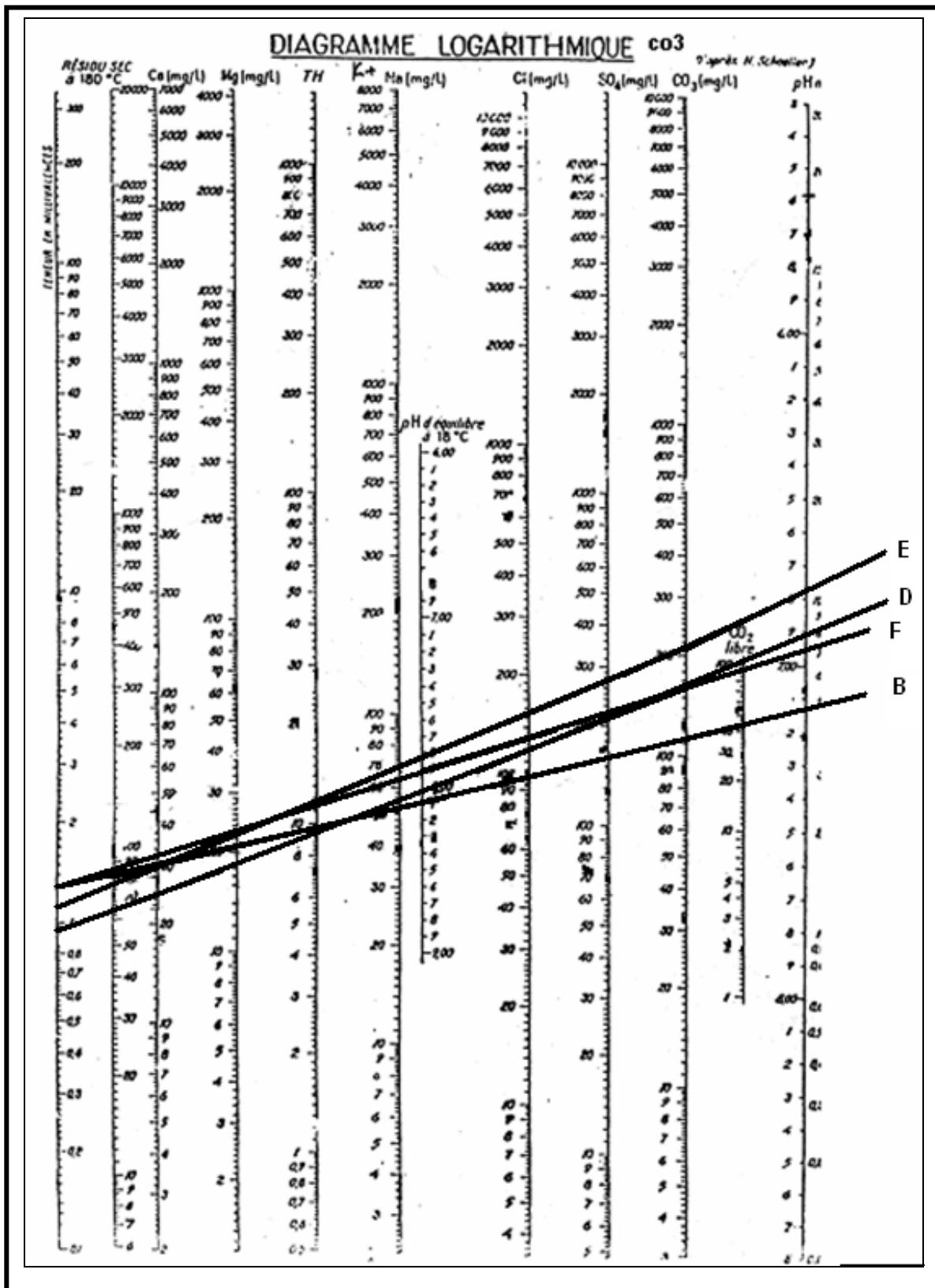


Tableau 5 : Valeurs des paramètres physiques et des indices de saturation des eaux souterraines de Bennichab

Echantillons	C.E. ($\mu\text{S.cm}^{-1}$)	TDS (mg.l^{-1})	pH mesurés	pH d'équilibre	ΔpH	Anhydrite	Aragonite	Calcite	Dolomite	Gypse	Magnésite
Forage B	281		7,17	8,10	-0,93	-3,058	-1,217	-1,077	-2,476	-2,889	-1,779
Forage D	310	154	6,98	8,00	-1,02	-2,846	-1,798	-1,659	-3,564	-2,696	-2,287
Forage E	428	213	6,92	7,80	-0,88	-3,121	-1,722	-1,579	-3,385	-2,913	-2,178
Forage F	334	170	6,99	7,90	-0,91	-3,126	-1,840	-1,701	-3,557	-2,967	-2,238

III.4.2.3- Calcul des indices de saturation des phases minérales

L'équilibre eau – minéral est souvent exprimé par l'indice de saturation (IS) déterminé par la formule :

$$IS = \log(PAI/K_s) \text{ avec,}$$

PAI : Produit d'activité ionique des ions concernés,

K_S : Constante d'équilibre.

Quand IS = 0, l'eau est alors en équilibre avec le minéral. En revanche, l'eau est sous-saturée ou sursaturée vis-à-vis du minéral dans le cas où IS serait inférieur ou supérieur à zéro. Toutefois, dans la pratique, il faut tenir compte des erreurs de précision dans la mesure de teneurs en éléments majeurs. Par conséquent, il est recommandé de considérer que le domaine de saturation est obtenu pour des valeurs comprises entre -1 et 1 (Plummer et *al.*, 1976).

Les indices de saturation (IS) des eaux vis-à-vis des phases minérales (anhydrite, aragonite, calcite, dolomite, magnésite et gypse) présentes dans la matrice de l'aquifère du Continental Terminal dans le secteur de Bennichab, ont été calculés à partir du programme Wateq (Tableau 5) (Truesdel et Jones, 1974 ; Plummer et *al.*, 1976). Ils sont utilisés pour évaluer le degré d'équilibre entre l'eau et le minéral afin de mettre en évidence les différents stades de l'évolution géochimique des eaux qui se traduisent par une variation de ces indices.

Les résultats des calculs d'indices de saturation IS des eaux souterraines vis-à-vis de certains minéraux sont reportés sur le tableau 5 et montrent que les eaux des forages de Bennichab, sont sous-saturées vis-à-vis de la calcite, de l'aragonite, de la dolomite, du gypse et de la magnésite. Ainsi, il peut y avoir des réactions de dissolution des minéraux carbonatés (calcite, aragonite et dolomite), dans ce cas l'eau est dite agressive.

III.5- CONCLUSION

Les données des cuttings, des diagraphies et la vitesse d'avancement globalement, ont révélé la présence du haut vers le bas : une formation de grès argileux calcaire du Quaternaire ; une formation de grès argileux de trois couleurs (successivement jaune, blanche et rouge) du Continental Terminal, ces formations reposent sur le socle. La zone importante hydrogéologiquement est constituée globalement de deux niveaux conducteurs et chaque niveau est formé d'une succession de fines lames (de grès argileux différemment colorés)

peu perméables et imperméables pour les deux niveaux. Le premier niveau se trouve entre 72 et 82 m et le deuxième, entre 86 et 108 m de profondeur. Il y a lieu de remarquer que les zones importantes hydrogéologiquement indiquent des PS entre -50 et -150 mV et des résistances entre 50 et 90 ohm, environ 25 API pour les rayonnements gamma rays et une vitesse de perforation inférieure à $10 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ pour des paramètres de forages ayant les valeurs suivantes : vitesse de rotation de $80 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$ et une pression de 8 bars.

La surface piézométrique en générale montre deux dômes à l'aplomb du forage B au Nord de la zone d'étude, et à l'aplomb des forages Brigitte et Ginette au sud, on remarque aussi qu'il y'a en gros deux axes d'écoulements (un axe de direction Sud-est dans la partie Nord de la zone , un deuxième axe de direction carrément De L'Ouest vers l'Est dans la partie sud de la zone d'étude), il y'a une inclinaison de la surface piézométrique du NW vers SE de 0.1 %, et aussi du terrain NW vers SE d'une part ;et d'autre part on remarque que le toit de l'aquifère coïncide en générale avec la base des grès argileux jaune et ,à sa base se trouve le socle à structure granitique(antécambrien) ;l'aquifère s'épaissie du NE vers le SW,avec moins de quarante mètres (35m) au Nord (Jannina) à plus de 130 m d'épaisseur vers Françoise au Sud Ouest.

L'analyse et l'interprétation du cutting et données des diagraphies ont permis de déterminer les milieux importants hydrogéologiquement à capturer.

* le développement a permis d'améliorer la productivité des forages réalisés (D.E.F), et d'avoir une idée sur les débits à prendre dans les pompages d'essais.

* Les essais de pompages sont de deux manières :

- les essais de puit qui ont pour but de déterminer les pertes de charges, débits critiques et les débits d'exploitation.

- les essais de nappe ont permis de déterminer les paramètres hydrodynamiques de la nappe (transmissivité et perméabilité, les travaux de pompage par palier sur les nouveaux forages (D.E.F) n'ont pas été réalisés suivant les directives du maître d'œuvre en se referant au débit au soufflage.

- les travaux de la réhabilitation des forages (A.C, réalisés en 1969 par l'entreprise Safor - Intrafor) ont permis de récupérer et d'améliorer les capacités des forages Les résultats des pompages confirme la présence de deux horizons producteurs (milieux horizontalement hétérogène), la transmissivité des nouveaux forages (D, E et F) est de l'ordre de 10^{-3} à 10^{-4}

$\text{m}^2.\text{s}^{-1}$ (bonne transmissivité), et une perméabilité de l'ordre de 10^{-5} m.s^{-1} (milieu semi perméable) , et les transmissivités enregistrées sur les anciens forages varient entre $10^{-3} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$ et $10^{-2} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$, donc il y a lieu de remarquer l'existence du phénomène de l'auto développement et c'est ce phénomène d'auto développement d'ailleurs qui explique l'augmentation du débit spécifique relatif du même forage avec le temps (forage A), à l'aplomb du forage C les deux couches aquifères superposées se distinguent nettement ,en générale la transmissivité est bonne (LAUGA,R, 1990).

- les résultats des analyses chimiques des échantillons des forages de Bennichab ont révélés une eau douce et moyennement minéralisée, et mettent aussi en évidence la présence d'un faciès bicarbonaté calcique magnésien au Nord ouest, ainsi qu'à l'Est alors qu'au centre de la nappe(forage B) le faciès chimique est bicarbonaté sodique potassique .

CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS

Notre zone d'étude (Bennichab) se situe au Nord Est de la capitale mauritanienne (Nouakchott) à environ 160km , entre les longitudes $15^{\circ}23'$ et $15^{\circ}31'W$, et les latitudes $19^{\circ}23$ et $19^{\circ}32 N$, cette zone correspond à une plaine entourée de deux cordons dunaires Akchar au Nord-Ouest et Touefilit au Sud-Est, il règne sur cette région un climat subdésertique (très faible taux de pluviosité moins de 100 mm.an^{-1}), avec une longue périodes sèche allant d'octobre à juillet , et la saison humide de juillet à octobre.

Le système aquifère de Bennichab se trouve dans le bassin côtier, il est sans nul doute la source en eau potable la plus importante dans toute la région de l'inchiri.

Cet aquifère est exploité depuis 1964 pour subvenir aux besoins en eau de l'industrie minière et des populations de la région. Afin de contribuer a la préservation de ce système aquifère il est indispensable de mieux connaître les caractéristiques (hydrodynamiques et hydrochimiques) de ce système aquifère, cette étude se veut une contribution a l'étude hydrogéologique de l'aquifère de Bennichab.

La zone d'étude est connue sur environ 1200km^2 par la reconnaissance électrique et sur 300 km^2 par reconnaissance mécanique(forage),la reconstitution lithologique à révéler une succession de couches de bas en haut : socle cristallin antécambrien , les formations du continental terminal (grès argileux de couleur différentes) et les formations du quaternaires (grès calcaire),le socle présente une pente et s'approfondi en allant vers l'ouest sous des formations de plus en plus récentes et, de plus en plus épaisses en progressant vers le sud ouest.

Les données diagraphiques (SPR, PS, Gamma rays, vitesse d'avancement....) révèle qu'il existe deux niveaux producteurs séparés par une couche moins perméable, chaque niveau aquifère se présente comme une succession de fine couche de différentes perméabilité, en général le premier niveau se trouve entre 72 et 82 m et le deuxième, entre 86 et 108 m de profondeur. Il y a lieu de remarquer que les couches importantes hydrogéologiquement indiquent des PS entre -50 et -150 mV et des résistances entre 50 et 90 ohm, environ 25 API pour les rayonnements gamma et une vitesse de perforation inférieure à $10 \text{ min}^{-1}.\text{m}$ pour des paramètres de forations fixes (vitesse de rotation de $80 \text{ tr}.\text{min}^{-1}$ et une pression de 8 bars). On remarque que le toit de l'aquifère coïncide en générale avec la base des grès argileux jaune et à sa base se trouve le socle à structure

granitique(antécambrien) ;l'aquifère à une épaisseur moyenne de 80m et s'épaissi vers le sud ouest.

Les données piézométriques montrent que les conditions climatiques ont un certain impact sur le niveau piézométriques ,car le rabattement maximum de la surface piézométrique coïncide avec la période de très grand déficit pluviométrique (sécheresse des années soixante dix), cependant La surface piézométrique en générale se trouve entre -13 à-18m de profondeur en dessous du niveau de la mer ,aussi la surface reflète deux dômes l'un à l'aplomb du forage B au Nord de la zone d'étude probablement à cause de la structure du sous sol, et le deuxième dôme à l'aplomb des forages Brigitte et Ginette au sud (limite probable du front salé), on remarque aussi qu'il y'a en général deux axes d'écoulements (un axe de direction Sud Est dans la partie Nord de la zone , un deuxième axe de direction carrément De L'Ouest vers l'Est dans la partie sud de la zone d'étude), la surface piézométrique de la nappe de Bennichab présente une pente du NW vers SE de 0,1 %o.

Le développement a permis d'améliorer les capacités des forages.

Les paramètres hydrodynamique sont de l'ordre de 10^{-4} à $10^{-3}\text{m}^2.\text{s}^{-1}$ pour les transmissivité des nouveaux forages et de l'ordre de 10^{-3} à $10^{-2}\text{m}^2.\text{s}^{-1}$ pour les transmissivité des anciens forages (forages réhabilités) ,probablement cette évolution est causées par le phénomène d'auto développement et en générale la transmissivité est bonne à moyenne ,le coefficient de perméabilité est de l'ordre 10^{-5}m.s^{-1} à 10^{-4}m.s^{-1} ,(formation semi perméables) ,et le coefficient d'emmagasinement est de l'ordre de 10^{-6} à 10^{-5} (nappe captive) .En prenant en considération ces données hydrodynamiques appuyées par le fait que l'aquifère est surmonté par environ 60m de formations sec et peu perméables (souvent argileuses) ,en plus du faible taux de pluviosité(moins de 100mm an^{-1}) d'un coté(nappe captive) et , d'un autre coté les données de la piézométrie (nappe libre) tout cela nous conduit à l'hypothèse que la nappe est généralement libre et ponctuellement captive notamment dans la zone d'étude .Le rayon d'influence en supposant que la zone est homogène horizontalement est de 120m après 24 heures de pompage à un débit de $65\text{m}^3.\text{h}^{-1}$.

La réhabilitation à permis de récupérer les forages (A, C).

Les données de l'hydrochimie déterminent une eau douce et moyennement minéralisée et, les eaux de l'aquifère de bennichab sont agressives et sous-saturées vis-à-vis de la calcite, de l'aragonite, de la dolomite, du gypse et de la magnésite .Ainsi il peut y avoir des réactions de dissolutions des minéraux carbonatés (calcite, aragonite et dolomite). L'eau de bennichab

présente deux faciès chimiques, bicarbonaté calcique et magnésien (forage D.E.F), et bicarbonaté sodique et potassique (forage B).

Il est impérativement recommandé de mettre au point l'outil nécessaire au suivi de l'évolution hydrochimique et hydrodynamique de la nappe ,sur une période assez longue et de façon régulière pour avoir les éléments nécessaires à une bonne appréciation du comportement de la nappe, ce suivi nécessite la réhabilitation et le renforcement des piézomètres de suivi de la nappe particulièrement vers la zone du front salé('avancement du front salé) .Il est recommandé ,de concevoir des fermetures étanches et d'élever les têtes des forages (margelles) et le suivi des débit pompé , l'installation des électrodes de sécurité pour éviter le dénoyages des pompes. Il est souhaitable que l'extension de la prospection électrique et mécanique dans le futures soie vers la zone Nord ouest, il est suggère que les prochains stations de pompages soient espacer d'au moins 500m les une des autre et équipés en acier inoxydable, pour les travaux de développement il est judicieux de combiner plusieurs méthode de développements particulièrement le développement par pompe immergée, le getting à l'eau, soufflage à l'air lift entrecoupées par des injections chimique (hexaméthaphosphat, chlore).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BANTON O et BANGOY M** (1997.) : Hydrogéologie, Multi science environnementale des eaux souterraines .Presses de l'université du Québec/AUPELF, 460p.
- BRGM (1986)** : Alimentation en eau potable de Nouakchott : étude pour le renforcement et l'extension du champ captant d'Idini, carte de la géologie et l'hydrogéologie du bassin côtier, page 96.
- CASTANY G. (1982)** : Principes et méthodes de l'hydrogéologie. Ed. Dunod, Paris, France, 238 p.
- CARUBA R.1991** : Géologie de la Mauritanie 321p.
- CHAPELLIER B.** :(2002) diagraphie des aquifères. Pages 12, 13, 36, 50,85.
- COLLOQUE INTERNATIONAL.** 1994: Eau, environnement, développement, Nouakchott 20 – 22 mars 1994, pp. 57 - 60.
- DACOSTA H.** : 1989. Précipitations et écoulements sur le bassin de la casamance. Thèse de 3^{ème} cycle, Departement de géogr., Fac, Sett. Sci. Hum.- UCAD, Dakar.
- DUNOD (1997)** : Analyse de l'eau 8° édition, diagramme de shoeller.
- ELOUARD P. (1964)** : Synthèse des travaux de recherches d'eau dans la nappe aquifère du continental terminal de bennichab. Rapport n°8.
- GRAVOST M. (1694)** : Reconnaissance Hydrogéologique de la nappe de Bennichab,34 p,pl I et pl II .
- INTAFOR-COFOR (1968-1969)** : projet (Mauritanie adduction d'eau d'Akjoujt), rapport de construction à Bennichab de 3 forages et 5 piézomètres, d'octobre 1968 à février 1969, 5 coupes technique des forages 14 graphiques, 4 tableaux
- LAUGA R. (1990)** : pratique du forage d'eau .16 chapitres.
- MABILLOT A. (2005)** : Le forage d'eau, guide pratique, édition 2005 (237 pages).
- M.C.M (mauritanian copper mine) (département de l'environnement 2007)** : synthèse des travaux sur bennichab, pages 12.
- PLUMMER L. N., JONES B. F., TRUESELL A. H. (1976)**. WateqF, a Fortran IV version of Wateq, a computer program for calculating chemical equilibrium of natural waters. *US Geol Survey Water Res Invest.*, 76 (13).

SY TAPSOBA A. (1990) : Géologie et hydrogéologie du bassin sédimentaire côtier de la Côte d'Ivoire. Recharge et qualité des eaux dans l'aquifère côtier (Région de Jacqueville). Mémoire de DEA, Département de Géologie, Univ. CAD, Dakar, Sénégal, 65 p.

Liste des figures

	Pages
Fig. 1 : Situation géographique de la zone de Bennichab	7
Fig. 2 : Variations des moyennes mensuelles de la pluviométrie (1970 à 2004) .	9
Fig. 3 : Variations interannuelles de la pluviométrie à Akjoujt et à Nouakchott (1970 à 2004)	10
Fig. 4 : Variations mensuelles de la température à Akjoujt et à Nouakchott (1970 à 2004)	12
Fig. 5 : Evaporation moyenne mensuelle (1970 à 2004)	12
Fig. 6 : Carte géologique et hydrogéologique du bassin côtier (PNUD, 1975 modifiée)	14
Fig7 :_Coupe synthétique des formations géologiques de Bennichab.	15
Fig. 8 : Corrélation lithologique entre les nouveaux forage (D.E.F)	17
Fig. 9 : Corrélation lithologique à Bennichab du Nord au Sud	17
Fig. 10 : Corrélation lithologique entre les aquifères du bassin côtier	18
Fig.11 : Evolution spatiale de l'épaisseur de l'aquifère du CT (Gravost, 1964) .	20
Fig.12 Extension de la nappe de Bennichab (Gravost, 1964)	21
Fig. 13 : Carte isobathe du toit de aquifère	22
Fig. 14 : Carte isobathe du substratum de l'aquifère du Bennichab	23
Fig. 15 : Carte isopache de l'aquifère du Bennichab	24
Fig. 16: Dispositif général d'un atelier de forage au rotary (Mabillot, 1971)	27
Fig. 17 : Enregistrements diagraphiques du Forage E	42
Fig. 18 : Enregistrements diagraphiques du Forage D	43
Fig. 19 : Enregistrements diagraphiques du forage F	45
Fig. 20 : Piézomètre de la nappe du Continental Terminal (Intrafor-cofor,1969)	47
Fig. 21 : Piézomètre de la nappe du Continental Terminal (MCM , 1971)	47
Fig. 22 : Piézomètre de la nappe du Continental Terminal (mars 2006)	48
Fig. 23 : Variation de la piézomètre des forages en exploitation dans le secteur de	

Bennichab	49
Fig. 24 : Courbes de pompage (descente) des forages captant l'aquifère de Bennichab	51
Fig. 25 : Courbes de pompage (remontée) des forages captant l'aquifère de Bennichab	52
Fig. 26 : Courbes caractéristiques du forage A avant la réhabilitation.....	54
Fig. 27: Courbes caractéristiques du forage A après la réhabilitation	55
Fig. 28 : Pompage de longue durée au forage A (2006).	56
Fig. 29 : Rayon d'influence autour du forage A de Bennichab	57
Fig. 30 : Diagramme de Piper des eaux des forages de Bennichab (campagne de 2006)	58
Fig. 31 : Détermination des pH d'équilibre des eaux de la nappe de Bennichab sur Le diagramme de Schoeller	61

ANNEXES

Fig. 32 : coupe technique forage D.....	annexe 3
Fig. 33 : coupe technique forage E.....	annexe 3
Fig. 33 : coupe technique forage F.....	annexe 3
Fig. 34 : Variation latérale de la lithologie à Bennichab (Gravost .1964)...	annexe 3

Liste des tableaux

TABLEAUX	PAGES
Tableau 1 Diamètres intérieurs par rapport aux débits prévus	30
Tableau 2 Choix des longueurs à crépiner en fonction des types d'aquifère.....	32
Tableau 3 Récapitulatif des niveaux des niveaux aquifères et des épaisseurs s de crépines	46
Tableau 4 Valeurs des coefficients de perméabilité	57
Tableau 5 Valeur des paramètres physiques et des indices de saturations des eaux souterraines de Bennichab	62

ANNEXES

Annexe I Tableau 6 données du rabattement en fonction du temps de pompage A.
Annexe I Tableau 7 données du rabattement en fonction du temps de pompage D.
Annexe I Tableau 8 données du rabattement en fonction du temps de pompage E.
Annexe I Tableau 9 données du rabattement en fonction du temps de pompage F.
Annexe I Tableau 10 données du rabattement en fonction du temps de pompage C.
Annexe II Tableau 11 Données piézométrique de Bennichab.
Annexe II Tableau 12 Récapitulatif des distances entre les différents forages.
Annexe IV Tableau 13 Résultats des analyses physico-chimiques

.Abréviations :

F.I.T	: Front inter tropical.
C.G.G	: Compagnie générale de géophysique.
Hydraf	: société de forage.
M.C.M	: Mauritanian copper mine.
SOMIMA	: société des mines de mauritanie.
P.S	: potentiel spontané.
S.P.R	: Single pointe Résistance.
C.T	: Continental Terminal.
D.S.R	: Débit Spécifique Relatif.

I ANNEXE DES DONNEES DE POMPAGES

Nouveaux Forages

- FORAGE D.
- FORAGE E.
- FORAGE F.

Anciens Forages

- FORAGE A.
- FORAGE C.

Forage D			Remontée	
Pompage	Rabattement	Débit ($m^3.h^{-1}$)	Temps(min)	Rabattement resid
t(min)				
2	2,42	14,4	1441	0,57
3	2,94		721	0,26
4	3,27		481	0,25
5	3,49		361	0,24
6	3,61		289	0,22
7	3,68		241	0,21
8	3,73		206,7	0,19
9	3,78		181	0,18
10	3,8		161	0,17
15	3,81		145	0,17
20	3,83		97	0,14
25	3,85		73	0,14
30	3,87		58,6	0,12
40	3,89		49	0,11
50	3,9		37	0,11
60	3,9		29,8	0,1
120	3,91		25	0,09
180	3,92		13	0,07
240	3,9		9	0,06
300	3,91		7	0,06
360	3,91		5,8	0,05
420	3,9		5	0,05
480	3,91		4,42	0,05
540	3,9		4	0,05
600	3,9		3,66	0,04
660	3,89		3,4	0,04
720	3,89		3,18	0,04
780	3,88		3	0,04
840	3,88		2,84	0,03
900	3,87		2,71	0,03
960	3,85		2,6	0,03
1020	3,83		2,5	0,03
1080	3,81		2,41	0,02
1140	3,79		2,3	0,02
1200	3,77		2,26	0,03
1260	3,78		2,2	0,03
1320	3,78		2,14	0,02
1380	3,74		2,09	0,01
1440	3,71		2,043	0,01
			2	0,01

Forage E			REMONTEE	
POMPAGE				
Temps(min)	Rabattement	Débit($m^3.h^{-1}$)	Temps(min)	Rab,residuel
2	2,61	18	1441	1,38
3	2,81		721	0,96
4	3,13		481	0,86
5	3,3		361	0,75
6	3,43		289	0,58
7	3,52		241	0,43
8	3,61		206,7	0,32
9	3,68		181	0,28
10	3,73		161	0,24
15	3,78		145	0,2
20	3,88		97	0,01
25	3,95		73	0,02
30	4,04		58,6	0,02
40	4,08		49	0,02
50	4,15		37	0,03
60	4,23		29,8	0,03
120	4,3		25	0,03
180	4,41		13	0,03
240	4,42		9	0,03
300	4,4		7	0,04
360	4,41		5,8	0,05
420	4,42		5	0,04
480	4,44		4,42	0,04
540	4,45		4	0,05
600	4,44		3,66	0,05
660	4,4		3,4	0,05
720	4,41		3,18	0,05
780	4,41		3	0,06
840	4,41		2,84	0,05
900	4,41		2,71	0,05
960	4,4		2,6	0,05
1020	4,4		2,5	0,05
1080	4,4		2,41	0,04
1140	4,41		2,3	0,04
1200	4,42		2,26	0,05
1260	4,42		2,2	0,05
1320	4,41		2,14	0,05
1380	4,4		2,09	0,05
1440	4,4		2,043	0,05
			2	0,05

Forage F		Pompage		Remontée	
t(min)	Rabattement	Débit ($m^3.h^{-1}$)		Temps(min)	Rabattement resid
2	9,95	18		1441	4,47
3	11,08			721	2,5
4	11,87			481	2,03
5	12,35			361	1,61
6	12,67			289	1,2
7	12,9			241	1,05
8	13,08			206,7	0,9
9	13,3			181	0,7
10	13,4			161	0,67
15	13,47			145	0,6
20	13,71			97	0,4
25	13,76			73	0,35
30	13,8			58,6	0,3
40	13,88			49	0,26
50	14			37	0,22
60	14,05			29,8	0,2
120	14,12			25	0,16
180	14,18			13	0,09
240	14,2			9	0,07
300	14,21			7	0,05
360	14,21			5,8	0,04
420	14,19			5	0,02
480	14,19			4,42	0,01
540	14,18			4	0,01
600	14,19			3,66	0,01
660	14,19			3,4	0
720	14,19			3,18	0
780	14,2			3	0
840	14,21			2,84	0
900	14,21			2,71	0
960	14,23			2,6	0
1020	14,25			2,5	0
1080	14,26			2,41	0
1140	14,26			2,3	0
1200	14,26			2,26	0
1260	14,26			2,2	0
1320	14,26			2,14	0
1380	14,26			2,09	0
1440	14,28			2,043	0
				2	0

Palier Forage A 2006					
Q	0	32	46	60	72
s mesur	0	5,14	7,77	10,1	12,32
s/Q	0	0,160625	0,16891304	0,16833333	0,17111111
Q/s	0	6,22568093	5,92020592	5,94059406	5,84415584
Paramètres	0	B:0,1525	C:0,00025		
s theo: 0,2080	0	5,13	7,72	10,05	12,27
BQ	0	4,88	7,17	9,15	10,98
%BQ	0	95	93	91	89
CQ ²	0	0,25	0,55	0,9	1,29
%CQ ²	0	5	7	9	11
Rendement		99,6	98,7	98,6	98,2
Piézomètre Nana II					
Pompage de longue durée		Remontée			
t(min)	Rabattement(Débit ($m^3.h^{-1}$))	Temps(min)	Rabattement résiduel		
2	0,01	1441	0,4		
3	0,03	721	0,39		
4	0,04	481	0,365		
5	0,05	361	0,36		
6	0,06	289	0,35		
7	0,07	241	0,335		
8	0,075	206,7	0,33		
9	0,08	181	0,32		
10	0,09	161	0,315		
15	0,105	145	0,315		
20	0,12	97	0,29		
25	0,135	73	0,26		
30	0,14	58,6	0,26		
40	0,16	49	0,25		
50	0,17	37	0,24		
60	0,18	29,8	0,23		
120	0,22	25	0,22		
180	0,22	13	0,17		
240	0,23	9	0,14		
300	0,26	7	0,11		
360	0,27	5,8	0,09		
420	0,29	5	0,08		
480	0,31	4,42	0,07		
540	0,32	4	0,07		
600	0,34	3,66	0,07		
660	0,35	3,4	0,06		
720	0,36	3,18	0,06		
780	0,37	3	0,06		
840	0,38	2,84	0,05		
900	0,38	2,71	0,05		
960	0,38	2,6	0,04		
1020	0,38	2,5	0,04		
1080	0,38	2,41	0,03		
1140	0,38	2,3	0,03		
1200	0,38	2,26	0,03		
1260	0,38	2,2	0,03		
1320	0,38	2,14	0,03		
1380	0,38	2,09	0,03		
1440	0,375	2,043	0,03		
		2	0,03		

Forage C				
Pompage de longue durée			Remontée	
t(min)	Rabattement	Débit ($m^3.h^{-1}$)	Temps(min)	Rabattement résiduel
1	6,73	80	1441	2,75
2	7,78		721	2,21
3	7,9		481	1,9
4	8,5		361	1,77
5	8,9		289	1,6
6	8,94		241	1,53
7	9,07		206,7	1,45
8	9,18		181	1,37
9	9,26		161	1,3
10	9,33		145	1,25
15	9,57		97	1,05
20	9,72		73	0,91
25	9,78		58,6	0,81
30	9,83		49	0,73
40	9,89		37	0,61
50	9,92		29,8	0,54
60	9,97		25	0,47
120	9,99		13	0,4
180	10,03		9	0,25
240	10,12		7	0,2
300	10,19		5,8	0,16
360	10,13		5	0,13
420	10,2		4,42	0,11
480	10,1		4	0,1
540	10,16		3,66	0,09
600	10,2		3,4	0,09
660	10,21		3,18	0,09
720	10,34		3	0,08
780	10,4		2,84	0,08
840	10,46		2,71	0,07
900	10,58		2,6	0,07
960	10,45		2,5	0,07
1020	10,45		2,41	0,06
1080	10,45		2,3	0,06
1140	10,48		2,26	0,06
1200	10,48		2,2	0,05
1260	10,48		2,14	0,05
1320	10,43		2,09	0,05
1380	10,55		2,043	0,04
1440	10,59		2	0,04

II ANNEXE DES DONNEES PIEZOMETRIQUES

TABLEAU 11 : DONNEES PIEZOMETRIQUES

X	Y	nam	Z	N Piéz1/6	N Piéz3/7	N Piéz3/0	N Piéz12/0
-15,452	19,491	A(F)	41,406	-15,094		-15,27	-15,76
-15,429	19,467	B(F)	42,119	-13,98			-14,81
-15,408	19,444	C(F)	39,88	-16,92	-17,52	-16,87	17,34
-15,512	19,439	Brigitte(pz)	36,907	-13,39	-14,89	-14,62	
-15,488	19,43	Ginette(pz)	38,032	-12,96	-15,06	-14,1	
-15,4637	19,42	Catherine(pz)	36,787	-15,51	-16,91	-16,63	
-15,44	19,413	christine(pz)	39,905	-16,09	-17,29	-17,035	
-15,419	19,391	Claudine(pz)	34,239	-16,76	-18,26	-17,9	
-15,421	19,479	D(F)	40,767			-16,61	-17,21
-15,4387	19,5024	E(F)	41,805			-17,06	-16,43
-15,419	19,4576	F(F)	38,735			-17,26	
-15,4032	19,5303	Jannina(pz)	46,862		-17,13	-16,11	
-15,4536	19,492	Nana2(pz)	41,592		-18,2	-15,63	
-15,478	19,41	José(pz)	35,137		-16,51	-15,93	
-15,537	19,416	Françoise(pz)	29,576		-17,72		
-15,347	19,433	Bennichab I(pz)	38,481		-19,51	-18,06	
-15,393	19,4609	BennichabII(pz)	41,183		-15,81		
-15,4264	19,4295	Oniga I(pz)	39,818			-16,88	
-15,4265	19,4293	Onigall(pz)	40,096			-17,04	

TABLEAU 12 : RECAPITULANT DES DISTANCES ENTRE LES DIFFERENT FORAGES

DESIGNATION (distance entre)	DISTANCE EN KM
Entre Jannina - C	9.58 Km
Entre puit bennichab1- C	6.46km
Entre C –F	1.9km
Entre F-B	1.56km
Entre B-D	1.62km
Entre B-A	3.41 KM
Entre A-E	1.91km
Entre E- Jannina	4.9km
Entre Jannina -Françoise	18.89km
Entre Françoise -Brigitte	3.65 km
Entre Françoise – José	6.29km
Entre José -Claudine	6.5km
Entre B- onica	4.3km
Entre A-Cathérine	8km

**III ANNEXE DES COUPES TECHNIQUES DES FORAGES
(D.E.F) ET GEOLOGIQUE SW-NE (Bennichab)**

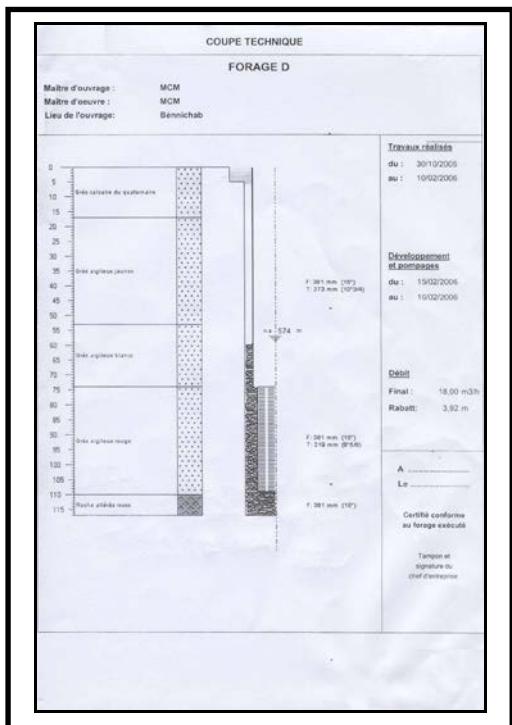


Figure 32 : coupe technique forage D

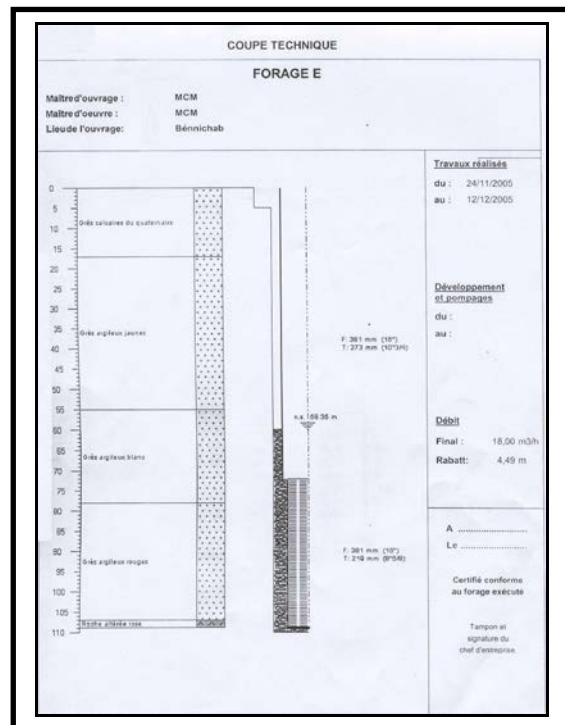


Figure 33 : coupe technique forage E

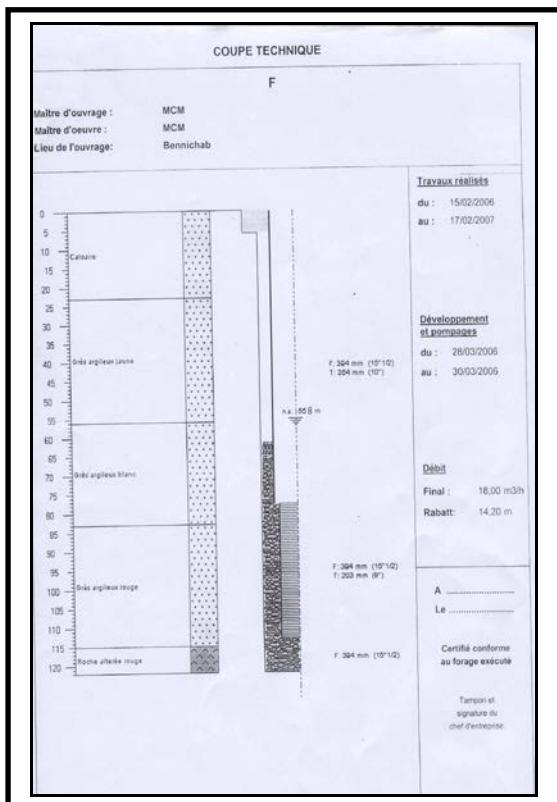


Figure 33 : coupe technique forage F

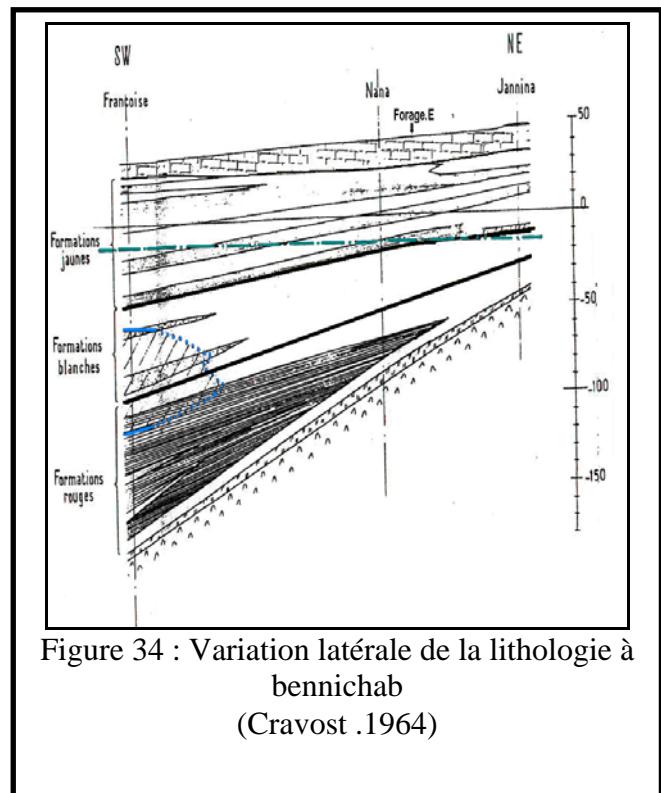


Figure 34 : Variation latérale de la lithologie à bennichab
(Cravost .1964)

DÉROULEMENT DES TRAVAUX ET VITESSE D'AVANCEMENT SUR

1. DÉROULEMENT DES TRAVAUX DU 22/10/2005 AU 23/01/2006

1- Le forage D (coordonnées GPS : N19°28'48,2" ; W15°25'17,9")

- Reconnaissance à diamètre ($\varnothing:8\frac{1}{2}$) du 06/11/2005 au 09/11/2005, réalisé à 100 .

- Avant trou : forer à $\varnothing : 22"$, mise en place de tube guide de diamètre $18"$ et cimentation, avant trou réalisé le 29/12/2005 à 100 .
- Alésage : \varnothing à $15\frac{1}{2}$ du 30/12/2005 au 01/01/2006, profondeur 100 .
- Equipement de captage du 03 au 04/01/2006 : réalisé à100 .
- . Tubes pleins : à diamètre ($\varnothing10"$).
- . Crépines : à enroulement continu (inox), $\varnothing : 8"$.
- . Tope crêpine à 72m de profondeur.
- . Niveau statique : 57.4 m de profondeur.
- Gravillonnage : fait le 04/01/2006 à 100 , avec du gravier $\varnothing 1-2mm$.
- Tope gravier à 54m de profondeur.
- Développement : Après développement pendant 10,15heures à l'air lift plus injection de 71kg du produit" chlore lent à 86%" ,le débit était de 3.2m³ d'eau, le débit après 12h de soufflage est de 5,1 m³ d'eau .
- . Niveau statique : 57.4m de profondeur.

(La coupe technique est en annexe).

2- Le forage E (coordonnée GPS : N19°30'08.7" ; W15°26'19.6")

-reconnaissance : du 25/11/2005 au 26/11/2005 de diamètre ($\varnothing:8\frac{1}{2}$).

-avant trou² forer à $\varnothing : 22"$, mise en place de tube guide de diamètre $18"$ et cimentation, avant trou réalisé le 28/11/2005 à 100 .

-alésage : \varnothing à $15"$ du 30/11/2005 au 03/01/2006, profondeur 100

-Equipement de captage du 03 au 04/12/2006 : réalisé à100 .

- . Tubes pleins : à diamètre ($\varnothing10"$).
- . Crépines : à enroulement continu (inox), $\varnothing : 8"$.

. Tope crêpine à 72m de profondeur

-gravillonnage: fait le 05/12/2006 à 100 , avec du gravier $\varnothing 1-2mm$.

-tope gravier : est de profondeur de 53m/tube.

-développement le 08et 09/12/2005 à l'air lift, injection de 100 kg de l'hexamétoposphate, le forage donné au début du développement un débit de 5 m³ d'eau et après 11h de soufflage le débit a atteint 11m³d'eau.

. Niveau statique : 58.85/tube.

-Aménagement tête forage : réalisé à 100 .

(La coupe technique est en annexe).

.8")

3-1 Travaux réalisés :

*27/12/2005TM à 17h25 installation du chantier sur le forage C

- Développement par Soufflage.

- Pompage test. - Pompage par palier (cinq paliers, chaque palier est d'une heure de pompage et une heure de remontée) ; - Pompage de longue durée ,24h de

Tableau de vitesse d'avancement du forage E

From	To	Time (min)	From	To	Time (min)	From	To	Time (min)
0	1	5	37	38	8,51	74	75	5,05
1	2	5,3	38	39	7,05	75	76	4,09
2	3	6	39	40	6,02	76	77	4,57
3	4	6	40	41	6,02	77	78	6,51
4	5	5	41	42	6	78	79	20,17
5	6	5	42	43	6,07	79	80	19,38
6	7	3,29	43	44	7,23	80	81	6,03
7	8	3,31	44	45	6,54	81	82	7,3
8	9	3,58	45	46	4,02	82	83	10
9	10	4,26	46	47	6,12	83	84	10,57
10	11	5,55	47	48	5,42	84	85	13,32
11	12	9,29	48	49	6,46	85	86	6,29
12	13	9,44	49	50	6,46	86	87	8,38
13	14	8,47	50	51	8,33	87	88	8,27
14	15	7,02	51	52	7,27	88	89	3,33
15	16	7,22	52	53	9,48	89	90	3
16	17	7,54	53	54	7,05	90	91	3,31
17	18	3,45	54	55	7,06	91	92	4,27
18	19	4,51	55	56	8,57	92	93	5,19
19	20	5,05	56	57	7,58	93	94	6,29
20	21	5,02	57	58	7,1	94	95	9
21	22	5,51	58	59	10,26	95	96	7,41
22	23	5,22	59	60	7,05	96	97	7,3
23	24	4,23	60	61	7,55	97	98	8
24	25	5,19	61	62	6,19	98	99	3,5
25	26	5,22	62	63	6	99	100	3,24
26	27	5,06	63	64	7,36	100	101	3
27	28	7,05	64	65	6,43	101	102	3,17
28	29	7,31	65	66	9,32	102	103	3,16
29	30	4,34	66	67	15,07	103	104	15
30	31	9,23	67	68	11,19	104	105	16,3
31	32	6,41	68	69	11	105	106	17
32	33	6,25	69	70	12	106	107	57
33	34	7,38	70	71	14,11	107	108	51,07
34	35	7,04	71	72	8	108	108,85	51,07
35	36	5,17	72	73	6,21			
36	37	5,14	73	74	6,13			85

ANNEXES IV DONNEES HYDROCHIMIQUES

Tableau13 : des résultats d'analyses des eaux des forages(B.D.E.F) de la nappe du CT de Bennichab

Echantillons	conductivité µs/cm	PH	HCO3(mg/l)	Cl(mg/l)	NO3(mg/l)	SO4(mg/l)	Na(mg/l)	K(mg/l)	Mg(mg/l)	Ca(mg/l)
B06	281	7,17	109,8	20,6	6,62	14,61	31,31	2,93	3,24	16,49
D	297	6,98	161,65	14,88	5,27	14,91	28,59	3,93	6,92	28,49
E	362	6,92	216,55	10,86	5,48	8,79	30,65	3,83	8,33	31,54
F	322	6,99	161,65	10,39	5,91	8,23	33,36	3,54	7,69	26,48