

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	1
Chapitre I : PRESENTATION GENERALE DE LA REGION DU TRARZA	
1. MILIEU PHYSIQUE.....	3
1.1. Situation géographique.....	3
1.2. Topographie et géomorphologie de la zone d'étude	3
1.3. Végétation	5
1.4. Contexte climatique	5
2. CADRE GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE.....	9
2.1. Géologie.....	9
2.2. Hydrogéologie.....	13
3. CONCLUSION.....	24
Chapitre II : RESULTATS EST DUSCUTIONS	
1. METHODES ET MATERIELS D'ETUDE	26
1.1. Matériel de foration	26
1.2. Acquisition des données hydrochimiques	27
2. RESULTATS ET DISCUSSIONS.....	28
2.1. Exécution des forages.....	28
2.2. Caractéristiques hydrochimiques des eaux du Continental Terminal	41
2.2.1. Caractérisation physico-chimique des eaux	41
2.2.1.1. Caractéristiques physiques des eaux.....	41
2.3. Qualité des eaux souterraines	48

3- CONCLUSION49

CONCLUSION GENERALE

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ANNEXES

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

L'eau est la matière origine des êtres vivants et la seule ressource vitale indispensable à la vie. La consommation d'eau par les ménages, l'agriculture, le secteur de l'énergie et l'industrie, devrait rester en forte augmentation jusqu'à la fin du siècle et au-delà. Et si, les ressources de notre planète dépassent la demande prévisible, elles ne sont pas malheureusement réparties de manière égale. Certaines régions souffrent d'insuffisances de ressource et dans d'autres, l'approvisionnement est sujet à des fortes fluctuations en termes de qualité.

Dans ce contexte et particulièrement en Mauritanie, il y a 30 ans, l'état s'est engagé à améliorer desserte en eau des populations rurales. Près du tiers des aides bilatérales à notre pays a été consacré aux programmes d'hydraulique villageoise et pastorale, constituant des sommes considérables investies dans la construction de puits et la réalisation de forages.

L'étude que nous entreprenons est localisée sur la nappe du Trarza dans laquelle des centaines de puits villageois et de forages hydrauliques, ont été réalisés bien que les conditions hydrogéologiques et hydrodynamiques montrent un risque permanent d'une intrusion marine.

Ainsi pour une gestion durable de cette ressource, il serait nécessaire de comprendre les processus contrôlant le comportement hydrogéologique (caractéristiques hydrodynamiques et hydrochimiques) de la nappe du Continental Terminal à l'est de la région du Trarza et de dégager les mécanismes d'acquisition et de l'évolution de la minéralisation des eaux souterraines.

La portion d'aquifère étudiée est située entre les latitudes 16°30' et 18°00' Nord et les longitudes 14°15' et 15°40' Ouest (entre Boutilimit et R'kiz). Le mémoire est structuré en deux parties :

- dans la première partie, nous présenterons la zone dans son contexte climatique, géologique et hydrogéologique;

- la deuxième partie est consacrée aux résultats et discussions après traitement des données hydrogéologiques et hydrochimiques. Cette partie s'articule autour de deux points. Le premier point, présente les résultats de l'exécution des forages et le deuxième point, la caractérisation hydrochimique de la nappe du Continental Terminal.

Pour terminer, les conclusions concernant les caractéristiques hydrodynamiques et hydrochimiques, l'exploitation des forages et leurs contraintes techniques d'exécution seront tirées.

Première partie :

PRESENTATION GENERALE DE

LA REGION DU TRARZA

Première partie : PRESENTATION GENERALE DE LA REGION DU TRARZA

1. MILIEU PHYSIQUE

1.1. Situation géographique

La région du Trarza correspond à la pénéplaine du sud ouest de la Mauritanie qui se localise entre les latitudes 16°30' et 18°40' Nord et les longitudes 14°00' et 16° 30' Ouest (Fig. 1). Elle est limitée au nord par le sebkha de D'Ramcha, à l'ouest par l'océan atlantique et à l'est par la chaîne des Mauritanides. Cette région est située à environ 150 km au sud est de la ville de Nouakchott sur la route de l'espoir qui relie le pays d'ouest en est.

1.2. Topographie et géomorphologie de la zone d'étude

Le sud ouest mauritanien est un espace plat, en légère déclivité vers l'océan atlantique : la dénivellation d'est en ouest, est de l'ordre d'une soixantaine de mètres. Il est en grande partie recouvert par des formations dunaires parallèles orientées NNE et SSO (BRGM 1965).

La topographie caractérisée par la présence de dunes fixées, parallèles, orientées N-NE et S-SO. Ces dunes sont séparées par des vallées à fond plat argileux de 500 m à 2 km appelées «gouds» ou plus vastes de 5 à 20 km appelées "*Aftouts*".

La géomorphologie est caractérisée par l'extension des dunes protubérantes dont la hauteur absolue varie de 20 à 50 m et celle relative de 15 à 30 m. Les dunes sont modelées suivant une direction NE 40° et s'étendent en général sur une dizaine de km chacune. Les vallées allongées entre les dunes ont généralement une largeur de 300 à 1000 m et exceptionnellement de quelques kilomètres (BRGM, 1967).

Le réseau hydrographique est pratiquement inexistant sur la plus grande partie de la zone d'étude. Il est désorganisé sous l'influence du climat aride et de la mobilisation des dunes de sables. Le réseau hydrographique actuel connaît des écoulements locaux pendant la saison de pluie.

1.2.1. Aftout Ech Chargui

C'est une longue dépression entre les dunes du Trarza, qui débute à proximité du fleuve Sénégal par le lac R'kiz qui coupe la terminaison ouest de l'Aftout Ech Chergui. Sa superficie maximale est de 333 km², et se poursuit dans la direction NNE sur 200 km de long. Sa largeur n'est que de 10 km.

1.2.2. Aftout El Sahéli

C'est une longue dépression derrière le cordon littoral atlantique, formée de terrains quaternaires couverts de nombreuses sebkhas. Son altitude est souvent inférieure à celle du niveau marin. Sa largeur, de 30 km dans le delta du fleuve Sénégal, s'amenuise jusqu'à 5 km au sud de Nouakchott et s'élargit au nord de Nouakchott pour atteindre 80 km dans son secteur le plus large.

1.2.3. Trarza

Une grande partie du pays est recouverte de dunes et d'épais dépôts sableux éoliens. Les crêtes des dunes y dominent couramment de plusieurs dizaines de mètres les creux interdunaires dans lesquels sont creusés les puits. Les cordons dunaires allongés bien délimités, composés de sables vifs ou semi-fixés (Akchar, Azefal, Amatlich, Hamami), et parfois en massifs beaucoup plus vastes : (Makteir, Ouarane, Adhafer, El Mreye, Aouker du Hodh).

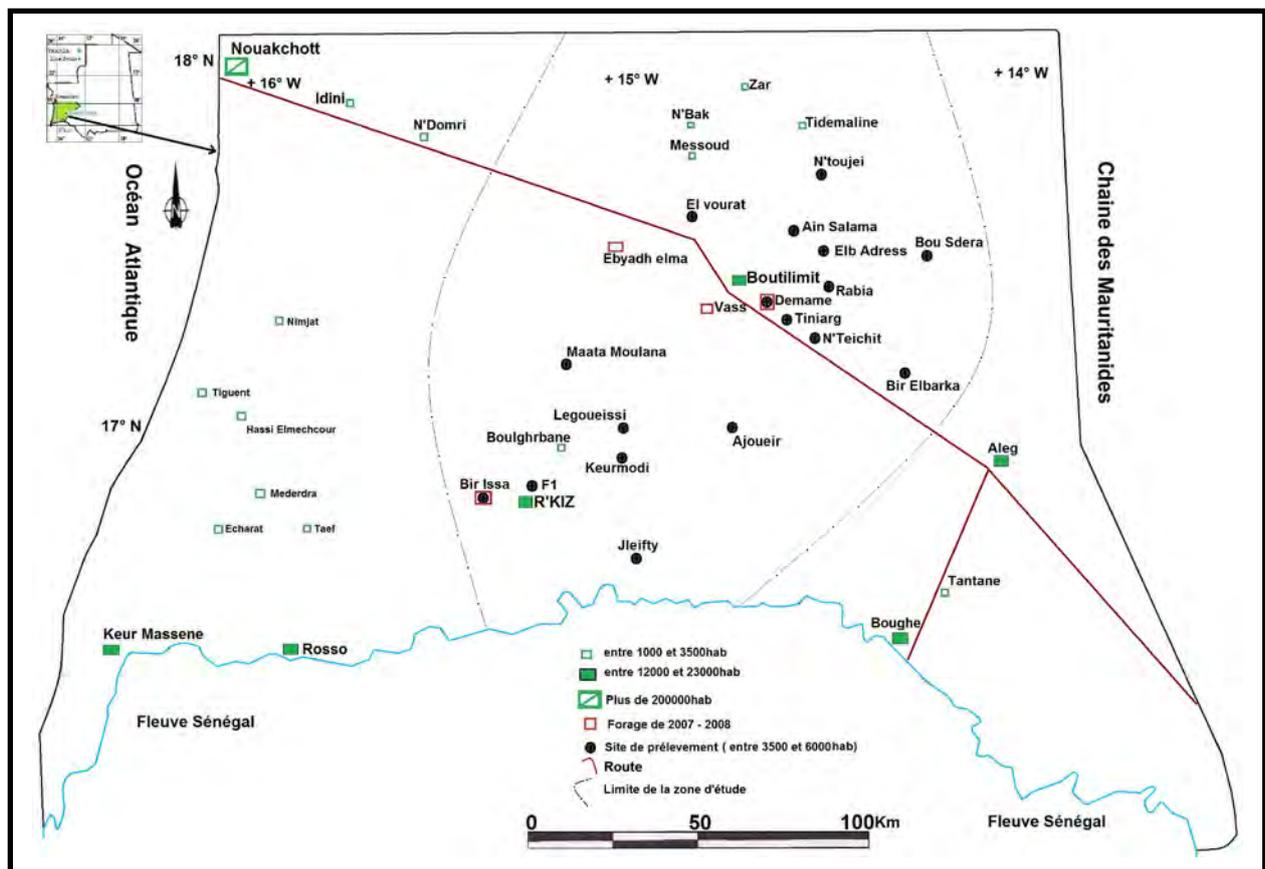


Figure 1 : Localisation de la zone d'étude (l'est de la région du Trarza)

1.2.4. Chamama

C'est une plaine alluviale du Sénégal et sa largeur varie de 5 à 20 km.

1.3. Végétation

Dans la vallée du fleuve Sénégal vivent le Gonakier (*Acacia scropioides*) et le Talh (*Acacia radina*). La flore est essentiellement constituée de végétation arbustive et épineuse.

En dehors de la vallée, deux *Acacia* dominent la végétation : le gommier (*Acacia senegalensis*) et Talh. Le Gommier formait au sud-est du Trarza une couverture végétale importante.

Le Titarek (*Leptadenia spartum*) connaît un grand développement dans toutes les zones sableuses principalement au ESE de Nouakchott, au nord d'Aleg et à l'est de R'kiz. Les *Balanites aegyptiaca* appelés localement Teichet et le Tourja (*Calotropis procera*) se trouvent sur la majorité de la zone d'étude.

1.4. Contexte climatique

Le climat de la région du Trarza se caractérise par une appartenance à deux domaines climatiques, à savoir le domaine sahélien au sud du parallèle de Nouakchott et le domaine saharien au nord de cette limite. Le climat de type sahélien est caractérisé par une pluviométrie annuelle supérieure à 100 mm. Le climat de type saharien est caractérisé par un domaine aride où les précipitations sont relativement peu abondantes. Cette double influence se manifeste par l'existence de deux saisons bien contrastées (Finaud, 1974 ; Gaucher, 1974).

Les données climatiques (pluviométrie, température, humidité relative, évaporation) ont été recueillies au niveau des services de la météorologie nationale de l'ASECNA à Nouakchott. Elles concernent les stations synoptiques de Boutilimitt et Rosso situées dans la région du Trarza.

1.4.1. Pluviométrie

Les précipitations sont de faibles intensités et irrégulières dans le temps et dans l'espace. Leurs régimes, malgré la proximité de l'océan, reste entièrement commandé par les fluctuations du front intertropical (FIT). La montée vers le nord du FIT, atteint la région du Trarza et donne lieu à une saison de pluies de type «mousson» provoquée par la pénétration d'air humide sous l'influence de l'anticyclone de Sainte-Hélène. Les phénomènes pluvio-orageux qui proviennent de l'est, c'est - à - dire du continent, sont responsables des précipitations irrégulières et violentes séparées par des périodes où l'évaporation est intense (Finaud, 1974 ; Gaucher, 1974).

L'observation des courbes moyennes mensuelles de précipitations, permet de dire que la zone est caractérisée par la présence d'une saison pluvieuse qui s'étend de juillet à octobre avec un maximum de 87 mm (moyenne mensuelle) de pluies enregistré au mois d'août et une saison sèche plus longue qui dure tout le reste de l'année (Fig. 2).

L'évolution interannuelle de la pluviométrie entre 1968 et 2007, montre une courbe en dents de scie caractéristique d'une irrégularité des précipitations (Fig. 3), mettant ainsi en évidence une succession des périodes à pluviométrie déficitaire et des périodes à pluviométrie excédentaire avec une tendance générale à la baisse de la pluviométrie ces dernières années. Cette baisse de la pluviométrie à sans aucun doute une implication directe sur les régimes des cours d'eau et surtout sur la recharge des nappes.

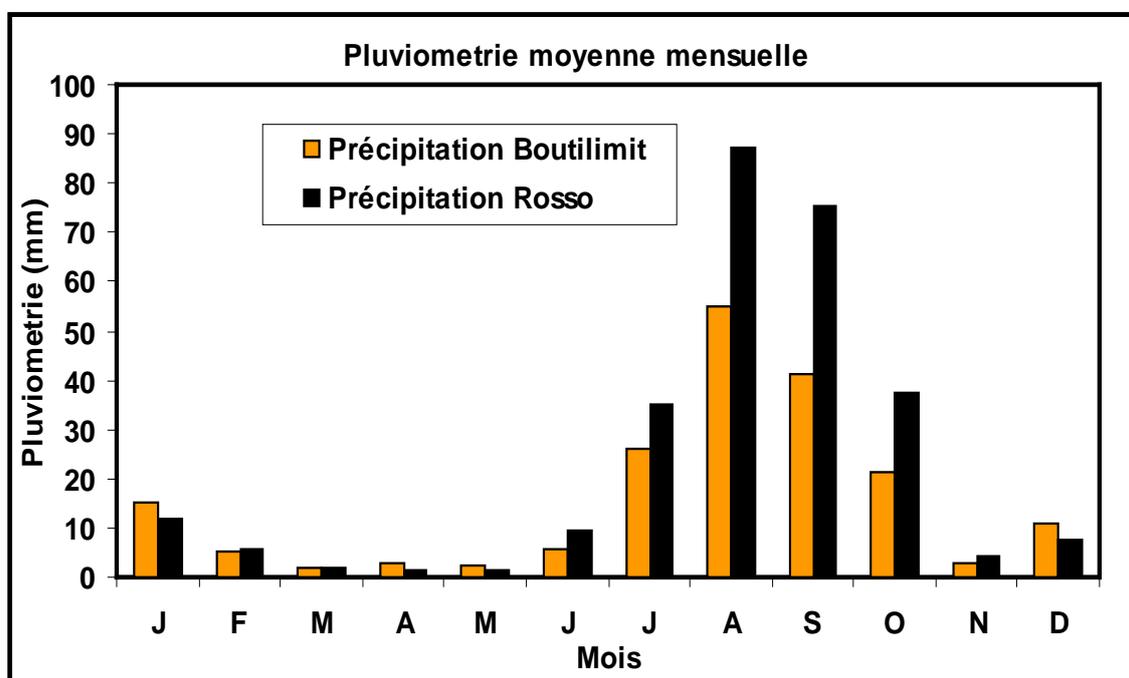


Figure 2 : Pluviométrie moyenne mensuelle aux stations de Boutilimit et de Rosso (1968 - 2007)

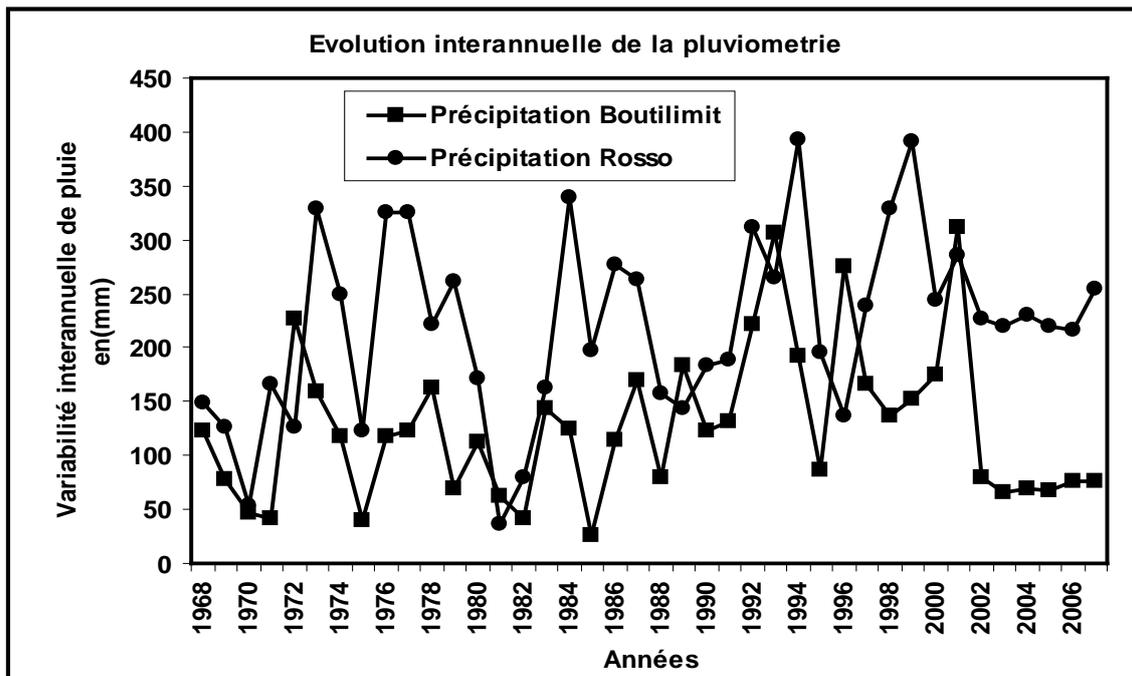


Figure 3 : Evolution interannuelle de la pluviométrie aux stations de Boutilimit et de Rosso (1968 - 2007)

1.4.2. Température

Les températures journalières dans la région sont généralement assez élevées et les maxima sont observés en juin et octobre (Fig. 4).

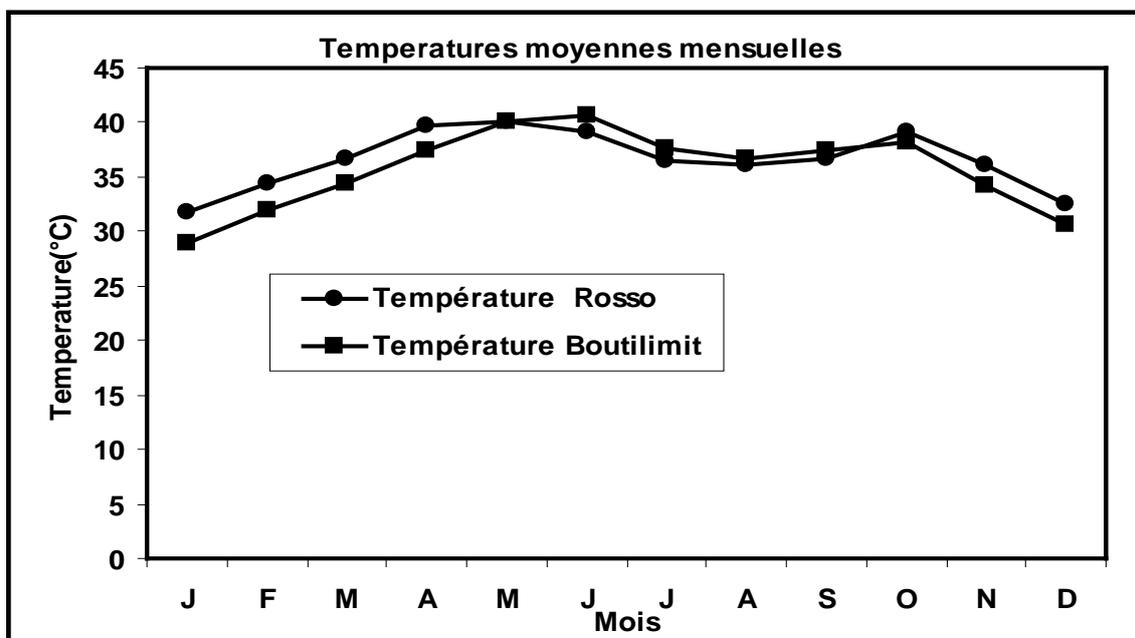


Figure 4 : Températures moyennes mensuelles aux stations de Boutilimit et de Rosso (1968 - 2007).

Pour la station de Boutilimit la température maximale en juin est plus élevée que celle enregistrées en octobre, par contre pour la station de Rosso la situation est inverse.

1.4.3. Evaporation

L'évaporation correspond à des phénomènes de perte de l'eau sous forme de vapeur. L'évaporation dépend essentiellement de la température, mais aussi du vent et de l'humidité atmosphérique par des relations complexes. Les valeurs de l'évaporation ont été mesurées à l'aide de l'évaporimètre de Piche. Elles sont accentuées par l'arrivée du vent chaud (Harmattan) entre le mois du mars et juin. Pendant la saison pluvieuse, on note une baisse régulière de cette évaporation (Fig. 5).

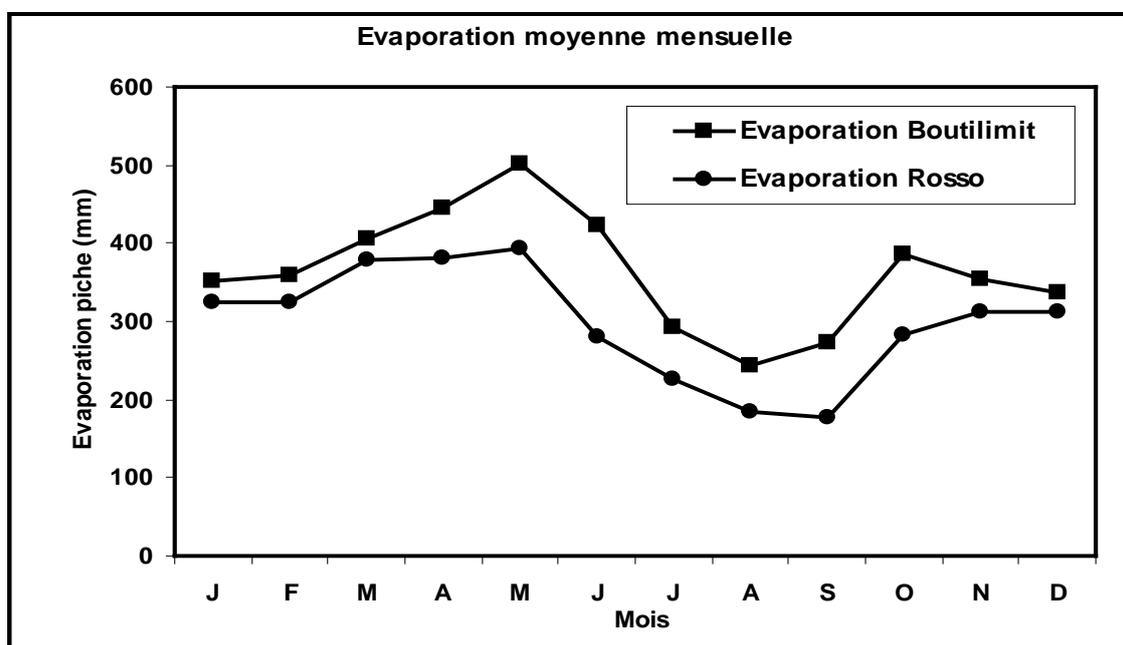


Figure 5 : Evaporation moyenne mensuelle aux stations de Boutilimit et de Rosso (1968 - 2007)

1.4.4. Humidité relative

Les courbes de l'humidité relative montrent une évolution inverse à celle de l'évaporation. Les valeurs de l'humidité relative les plus élevées sont enregistrées entre juillet et septembre alors que les plus faibles, entre mars et juin (Fig. 6).

Les valeurs de l'humidité relative les plus importantes enregistrées pendant la saison pluvieuse (juillet - septembre), montrent la dépendance de ce paramètre de la pluviométrie.

Le climat se distingue aussi par une très faible humidité relative. Ces caractéristiques climatiques entraînent un bilan hydrologique négatif et une sécheresse importante avec leurs

conséquences sur le couvert végétal, la reconstitution des réserves des aquifères et sur l'existence des cours d'eau permanents.

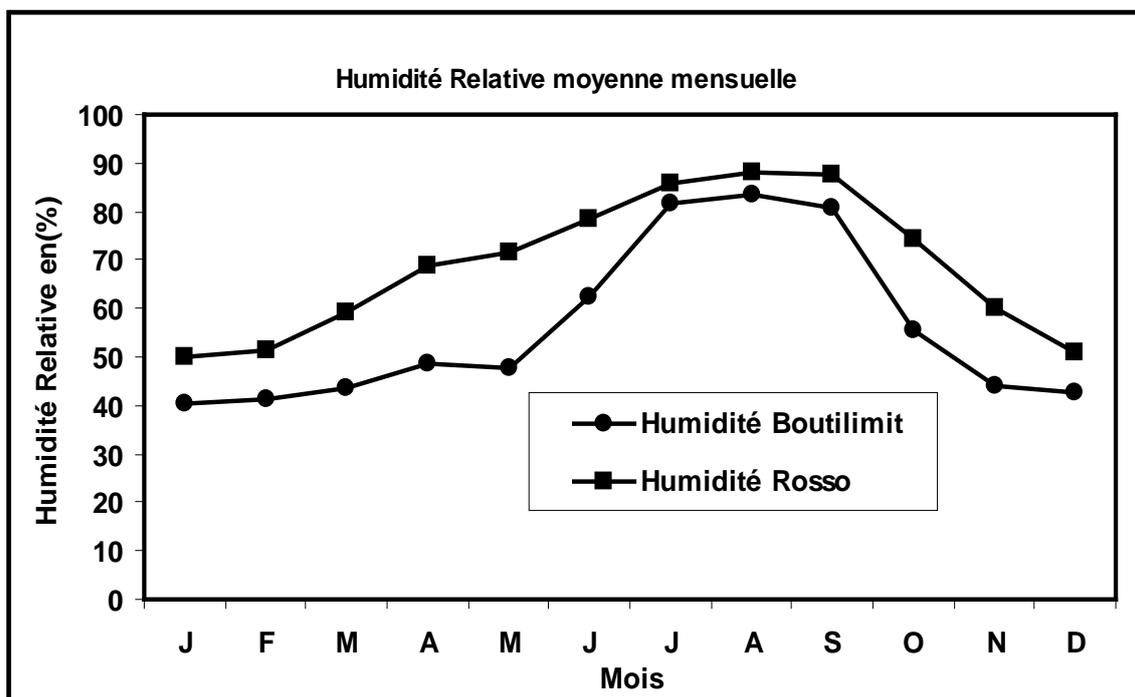


Figure 6 : Humidité relative moyenne mensuelle aux stations de Boutilimit et de Rosso (1968 - 2007)

2. CADRE GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE

2.1. Géologie

2.1.1. Contexte géologique général de la Mauritanie

Les formations géologiques de la Mauritanie sont représentées essentiellement par 5 grands ensembles lithologiques (Caruba et Dars, 1991) (Fig. 7) :

- la dorsale Réguibat d'âge 1,6 Ga (1 Ga = 1 milliard d'années) ; elle correspond à un vaste bombement de socle que l'érosion a réduit à l'état d'une plaine, parsemée de pitons granitiques, elle s'étend sur toute la partie nord-est de la Mauritanie;

- le bassin paléozoïque de Taoudéni formé entre 1 et 0,295 Ga et représenté par une couverture sédimentaire, occupe la moitié ouest de la Mauritanie. A l'ouest, il est constitué de plateaux grés-quartzitiques comme le plateau du Tagant, de l'Adrar et de l'Assaba ;

- le bassin de Tindouf, dans l'extrême nord de la Mauritanie, est représenté par un remplissage sédimentaire dont les dépôts sont progressivement plus anciens en se dirigeant vers l'ouest ;

- la chaîne des Mauritanides (800 - 250 Ma), est constituée de collines, de reliefs isolés et de crêtes d'une centaine de kilomètres de large. Elle s'étend de l'extrémité nord du pays au fleuve Sénégal et comprend des terrains cristallins, métamorphiques et sédimentaires ;

- le bassin sédimentaire côtier mauritanien, formé il y a 245 Ma, est situé dans la partie occidentale du territoire et orienté suivant la côte atlantique. Il renferme des dépôts constitués par des formations du Secondaire (Maastrichtien), du Tertiaire (Paléocène, Eocène et Continental Terminal) et du Quaternaire (Tafaritien et Nouakchottien). En effet, c'est dans ce dernier ensemble géologique que se localise la région du Trarza, objet de la présente étude.

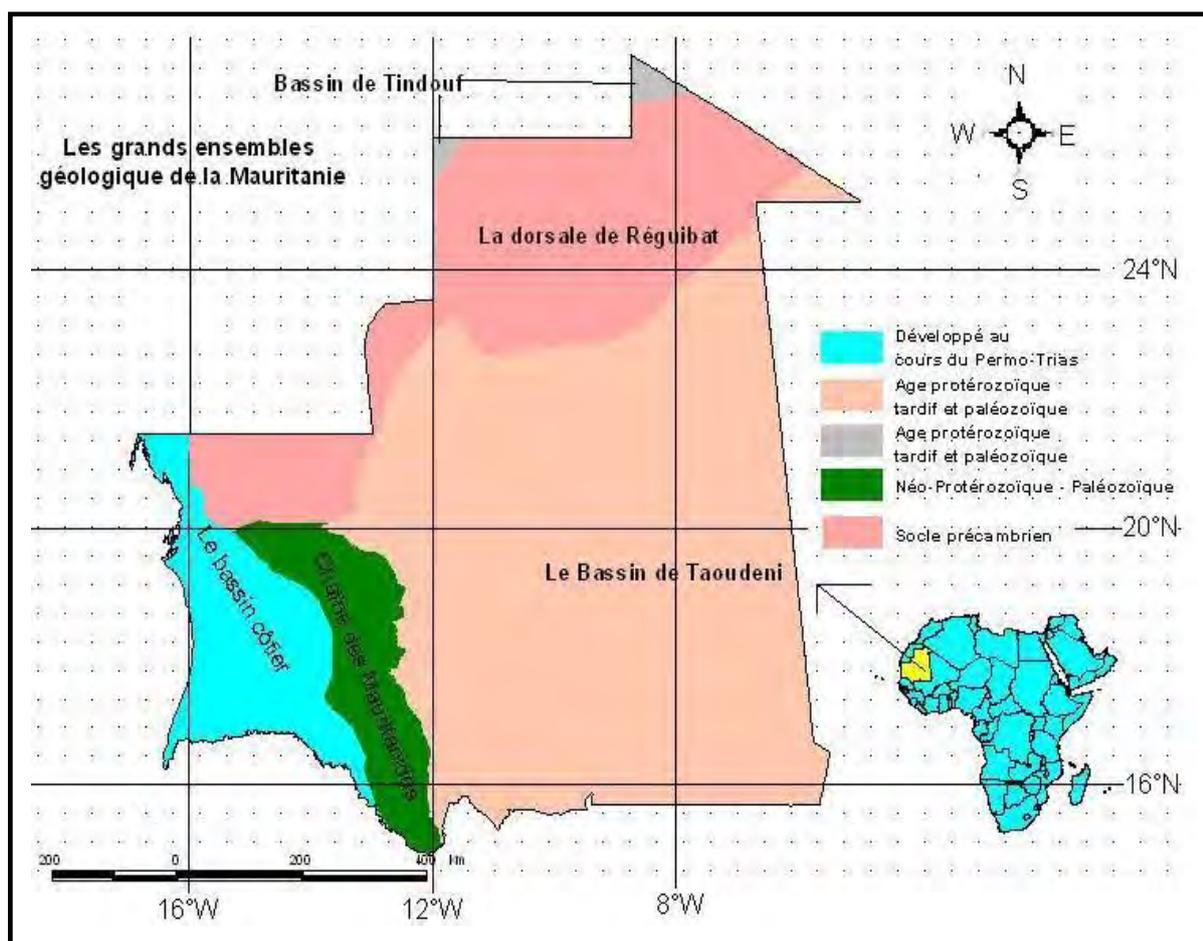


Figure 7 : Schéma de localisation des grands ensembles géologiques de la Mauritanie (Caruba et Dars, 1991 modifié).

2.1.2. Géologie de la région du Trarza

Le bassin sédimentaire côtier occupe la dépression du golf sénégalo-mauritanien, en bordure de la plate-forme africaine et renferme des dépôts détritiques marins et continentaux. Sa largeur est de 250 km à la latitude de Nouakchott. La série lithostratigraphique de ce bassin marginal subsidant, formée par des formations grès-argileuses et carbonatées, s'échelonne du

Crétacé au Quaternaire. Le substratum de ces dépôts détritiques à l'est, est constitué par le socle précambrien, fortement faillé en direction du nord - sud, et qui s'enfonce vers l'ouest suivant une structure en marches d'escalier. Cette pente générale est conservée par le Continental Terminal qui est moins épais à l'est et qui s'enfonce progressivement vers l'océan à l'ouest (Caruba et Dars, 1991) (Fig. 8).

2.1.2.1. Maastrichtien

En Mauritanie, le maastrichtien est représenté par une formation argilo-sableuse azoïque rencontrée en forage. Un changement de faciès se produit de part et d'autre de Rkiz. A l'est, dans l'Amechtil et le Brakna proches du bord du bassin, il est sableux et son épaisseur est faible, 10 à 50 m. A l'ouest dans le Trarza, des sables fins à grossiers alternent avec les argiles, pyriteuses et ligniteuses parfois, et il s'épaissit fortement, dépassant 200 m à 18 km à l'ouest de Rkiz (PNUD, 1974 in Caruba et Dars, 1991 ; Guiraud, 1991) et 500 m à l'ouest du méridien 16° ouest par comparaison avec son épaisseur dans le forage Toundou Besset (BT 1), au Sénégal. Cette série s'amincit vers le nord (60 m dans le forage d'Idini) (Caruba et Dars, 1991 ; Guiraud, 1991).

2.1.2.2. Paléocène et Eocène

Le Paléocène et l'Eocène sont de sédimentation à caractère essentiellement chimique. Ils sont constitués d'une série marine de calcaires marneux et d'argiles surmontés par des marnes gréseuses et sableuses. Cette formation géologique existe localement sur le bassin avec une épaisseur très variable. Elle est totalement absente au nord de Bénichab et présente une épaisseur d'environ 300 m à Idini, 210 m à Toundou Besset et dans la région de R'kiz l'Eocène atteint 50 m (Caruba et Dars, 1991).

Le toit de l'Eocène passe de +40 m à Mibidane à -154 m à Idini. Le pendage à l'est de la dorsale de R'kiz est d'environ 0,6‰ alors qu'à l'ouest, il augmente pour atteindre 1‰ (Caruba et Dars, 1991 ; Guiraud, 1991).

2.1.2.3. Mio pliocène (ou Continental Terminal)

Le Mio-Pliocène est représenté par une série détritique continentale d'extension généralisée sur le bassin, mais d'épaisseur variable. Elle est composée de niveaux d'argiles, sables grossiers, sables fins argileux, grès, grès argileux versicolores disposés en lentilles ou un niveau localement continu, que l'on regroupe sous le terme du Continental Terminal (Caruba et Dars, 1991 ; Guiraud, 1991).

Le Continental Terminal (CT) est un ensemble de grès bariolés plus ou moins argileux, de sables fins à grossiers et d'argiles. Ces faciès sont très hétérogènes et lenticulaires avec des variations latérales rapides. Il affleure en une large bande centrale nord - sud ; il est présent sur les 4/5 du bassin. La base du CT est facilement identifiée par les argiles jaunes caractéristiques du toit de l'Eocène (Caruba et Dars, 1991).

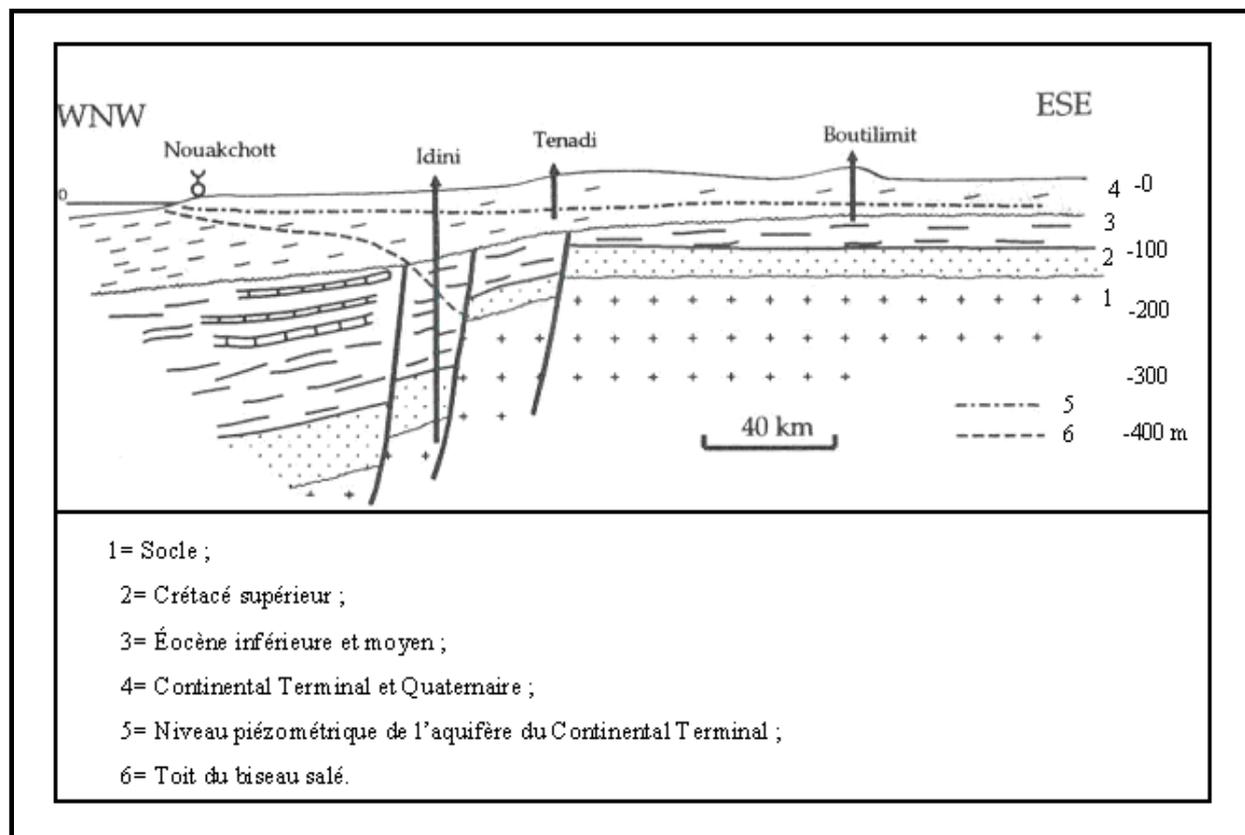


Figure 8 : Coupe géologique et hydrogéologique du bassin côtier entre Nouakchott et Boutilimit (Guiraud, 1988)

2.1.2.4. Quaternaire

Le Quaternaire est formé de dépôts marins et lacustres (grès glauconieux, grès ferrugineux, sable et faluns) et des formations éoliennes anciennes (Tafritien) et récentes (Nouakchottien) bien développées dans les vastes sebkhas côtières. Il a laissé dans le bassin des dépôts en général peu épais mais qui peuvent atteindre 50 m. On distingue (Riser, 1991) :

- des formations argileuses salifères et gypsifères à l'ouest recouvrant une terrasse marine à coquillage (bande étroite en bordure de mer appelé "Aftout El Sahéli") ;
- des formations lacustres dans l'Aftout Chergui (prolongement vers le nord - est du lac R'kiz) : calcaire du lac Rkiz et de fond de Goud ;

- des formations alluviales sablo-argileuses de la vallée du fleuve Sénégal, de ses affluents et de lac d'Aleg ;

- des formations éoliennes sableuses : dunes rouges du Trarza.

2.2. Hydrogéologie

2.2.1. Contexte hydrogéologique de la Mauritanie

Les unités hydrogéologiques sont définies sur la base des critères essentiellement géologiques : conditions de dépôt pour les bassins sédimentaires, critères structuraux pour les zones métamorphiques et cristallines (Fig. 9).

Deux grands types d'aquifères peuvent être distingués :

- les aquifères discontinus se rencontrent dans les terrains de socle granitique ou métamorphique, des formations gréseuses, calcaires et pélitiques; essentiellement fracturées, les débits obtenus sont généralement faibles, et les eaux sont souvent de plus mauvaises qualités.

- les aquifères continus ou généralisés se localisent dans le faciès en perméable du bassin sédimentaire côtier, dans la cuvette dunaire récente de l'Assaba, dans les alluvions quaternaires, dans les grès d'Aioun ainsi que dans le continental intercalaire du bassin secondaire de Taoudeni. Ces aquifères produisent des débits soutenus et les eaux sont souvent de bonnes qualités (BRGM, 1986).

2.2.2. Structure de l'aquifère du Continental Terminal (CT)

L'aquifère du CT est géographiquement limité au nord-ouest par la sebkha de N'Drahmcha, au sud par le fleuve Sénégal et à l'est par les formations métamorphiques précambriennes des Mauritanides (Illy, 1973).

Situé dans le bassin côtier mauritanien (Fig. 10), l'aquifère du Trarza est constitué de plusieurs nappes superposées (système multicouche) contenues dans des sédiments d'âge mio-pliocène, regroupés sous le nom de Continental Terminal. Ces sédiments souvent discontinus et d'épaisseur variable, reposent localement sur d'autres séries sédimentaires de l'Eocène - Paléocène ou du Maastrichtien qui renferment aussi des niveaux aquifères. Le substratum de ces dépôts détritiques est constitué par le socle précambrien, fortement faillé en direction nord-sud, et qui s'enfonce vers l'ouest suivant une structure en marches d'escalier. Le pendage général est conservé par le Continental Terminal qui est moins épais à l'est et qui s'enfonce progressivement vers l'océan à l'ouest (BURGEAP, 1978 ; BRGM, 1986).

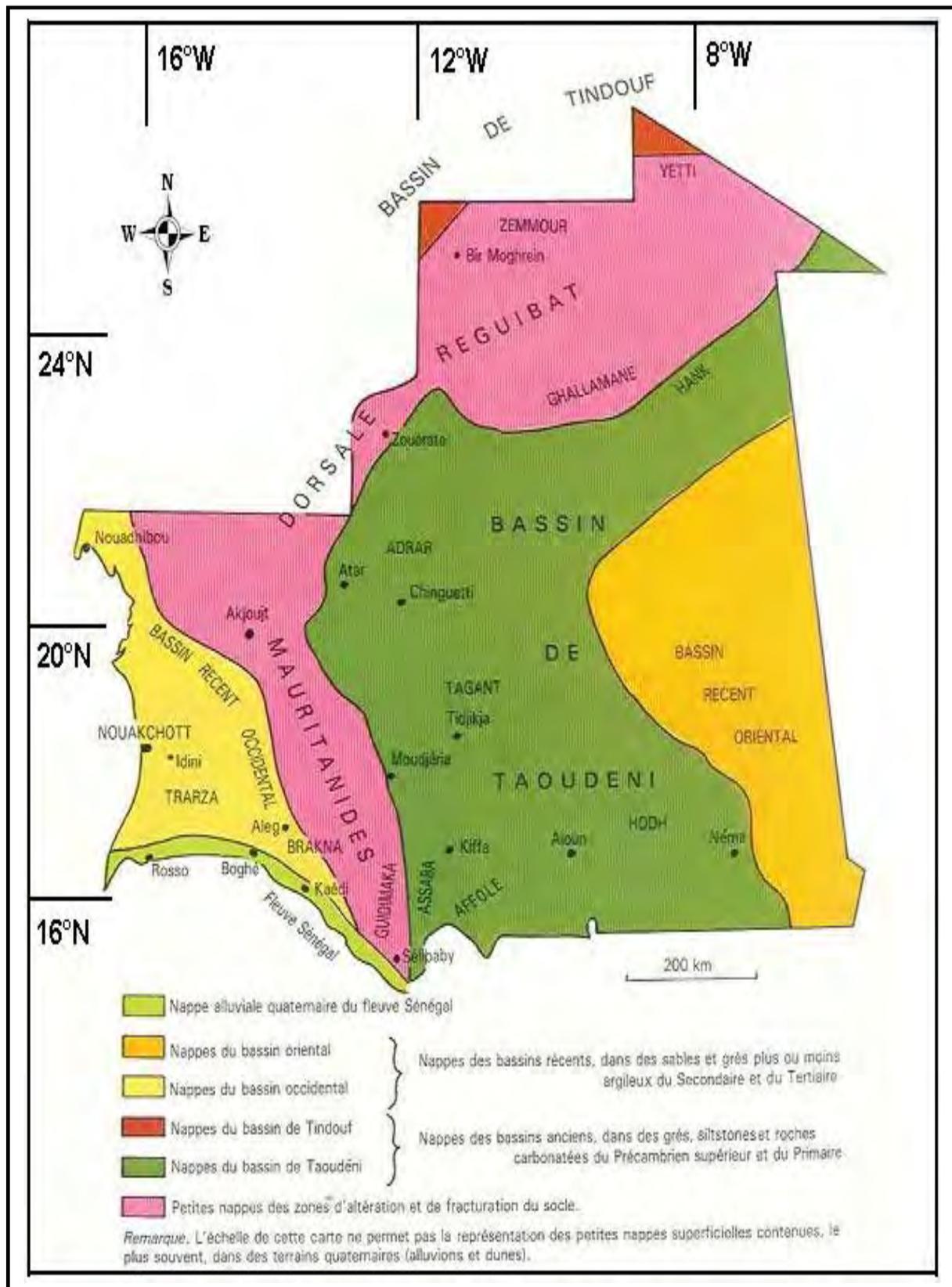


Figure 9 : Carte hydrogéologique schématique de la Mauritanie (Carité, 1989)

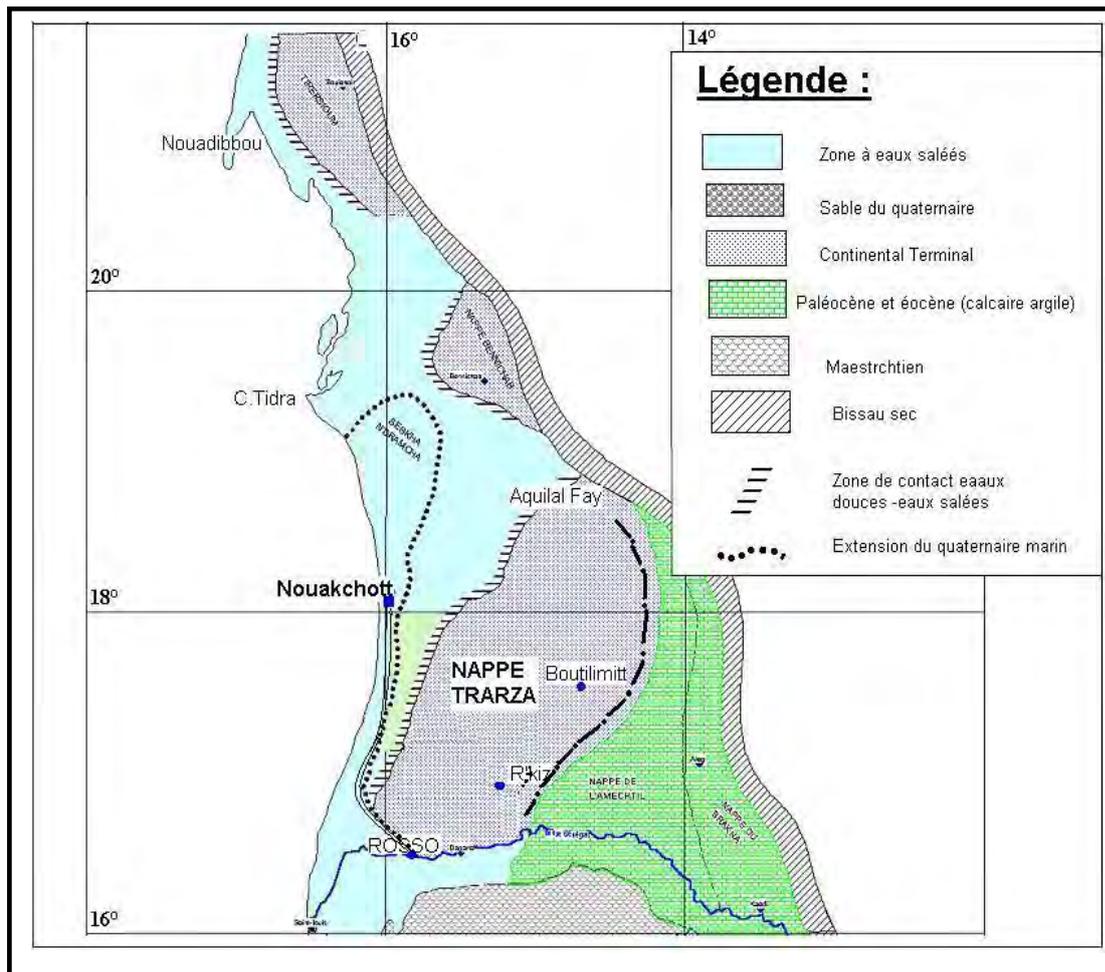


Figure 10 : Nappe Continental Terminal Du Trarza (Illy, 1973 modifié)

La nappe du CT est constituée par des eaux douces continentales en contact avec des eaux côtières fortement minéralisées dont l'origine marine (parfois par l'intermédiaire de vaste sebkha côtière) paraît évidente. Ces eaux sont considérées comme fossiles et leur accumulation daterait d'entre les deux dernières périodes de l'Ogolien et de l'Actuel (soit entre 12000 et 4000 BP) qui coïncident en outre avec la dernière transgression marine du Nouakchotien dont la sebkha de N'Dramcha et l'Aftout El Sahéli sont les reliques (BURGEAP, 1978 ; BRGM, 1986).

2.2.3. Identification de l'aquifère du CT

Les formations géologiques du CT sont très hétérogènes et présentent des variations latérales très rapides et verticales assez brutales. Aussi, la description des coupes lithologiques d'un forage à l'autre est généralement assez différente. Le Continental Terminal est représenté globalement par les grès de Kaédi à la base et les grès du Trarza au sommet (BRGM, 1965, 1986 et 1990; BURGEAP, 1978).

La composition chimique des eaux souterraines du C T, est intimement liée à divers facteurs (lithologie et nature des terrains, géographiques et climat de la région, profondeur des niveaux d'eau, etc.). Au Trarza, les facteurs géographiques et hydrogéologiques correspondent essentiellement à la proximité de la mer et à l'existence d'une nappe déprimée (BRGM, 1986).

La nappe du Trarza circule dans les formations sablo-argileuses du Continental Terminal. Dans la nappe il y a de niveaux supérieurs situés entre 10 et 40 m de profondeur, elle est relativement chargée (0,5 à 1 g.l⁻¹). Cette nappe captée par des puits dans des formations de sables gréseux, en bordure de littoral, est constituée par des dépôts récents et variés avec l'hétérogénéité comme caractéristique principale la plus remarquable (gypse, argiles, sables et coquillages) ; et de niveau moyen se trouve dans les sables supérieur du Continental Terminal au dessus des grès argileux qui forment son mur. Le toit est constitué par une couche argileuse à caractère lenticulaire (possibilité d'échange). L'absence locale du toit rend la nappe sub-phréatique par mise en contact avec la nappe phréatique sus-jacente. Cette nappe est captée par des forages à des profondeurs de 60 à 100 m avec une salinité variant entre 150 à 500 mg.l⁻¹. L'épaisseur de l'aquifère sub-phréatique est variable, de 8 à 23 m et peut atteindre 40 m à l'est de la nappe du Trarza. Dans la localité de Tenadi, l'aquifère sub-phréatique devient le premier niveau aquifère rencontré, légèrement captif d'abord, il devient libre au delà de Ndoumri. C'est l'aquifère sub-phréatique qui est exploité pour l'alimentation en eau potable de la ville de Boutilimit.

La nappe du Trarza passe au sud-est à la nappe de l'Amechtil (réseau aquifère de l'Amechtil) qui la sépare de la nappe du Brakna.

Dans le polygone (Boutilimit, R'kiz, Idini et Rosso), l'aquifère du CT est séparé par des niveaux de grès argileux ou d'argiles sableuses semi-perméables à caractère lenticulaire (BRGM, 1986). Les puits et forages d'ouest en est de la région du Trarza captent pour la plupart des niveaux aquifères du Quaternaire ; le niveau supérieur du CT ou des lentilles d'eaux douces dans les sables superficiels des alluvions fluviales. Les coupes hydrogéologiques du bassin sédimentaire dans cette zone, montrent successivement (Fig. 11a et b) :

- un recouvrement superficiel de dépôts quaternaires très hétérogènes (épaisseur maximum 50 m). On distingue les faciès argileux salifères et gypsifères recouvrant la terrasse marine à coquillages de l'Aftout El Sahéli, les formations lacustres calcaires du lac de R'Kiz et fond de goud, les formations alluviales sablo argileuses de la vallée du fleuve Sénégal et de ses affluents et les formations éoliennes sableuses des dunes rouges du Trarza ;

- une série sédimentaire d'âge mio-pliocène (ou Continental Terminal) à niveaux d'argiles, sables grossiers, sables fins argileux, grès argileux versicolores et lentiformes ;
- des argiles jaunes ("formation jaune"), caractéristiques du toit de l'Eocène.

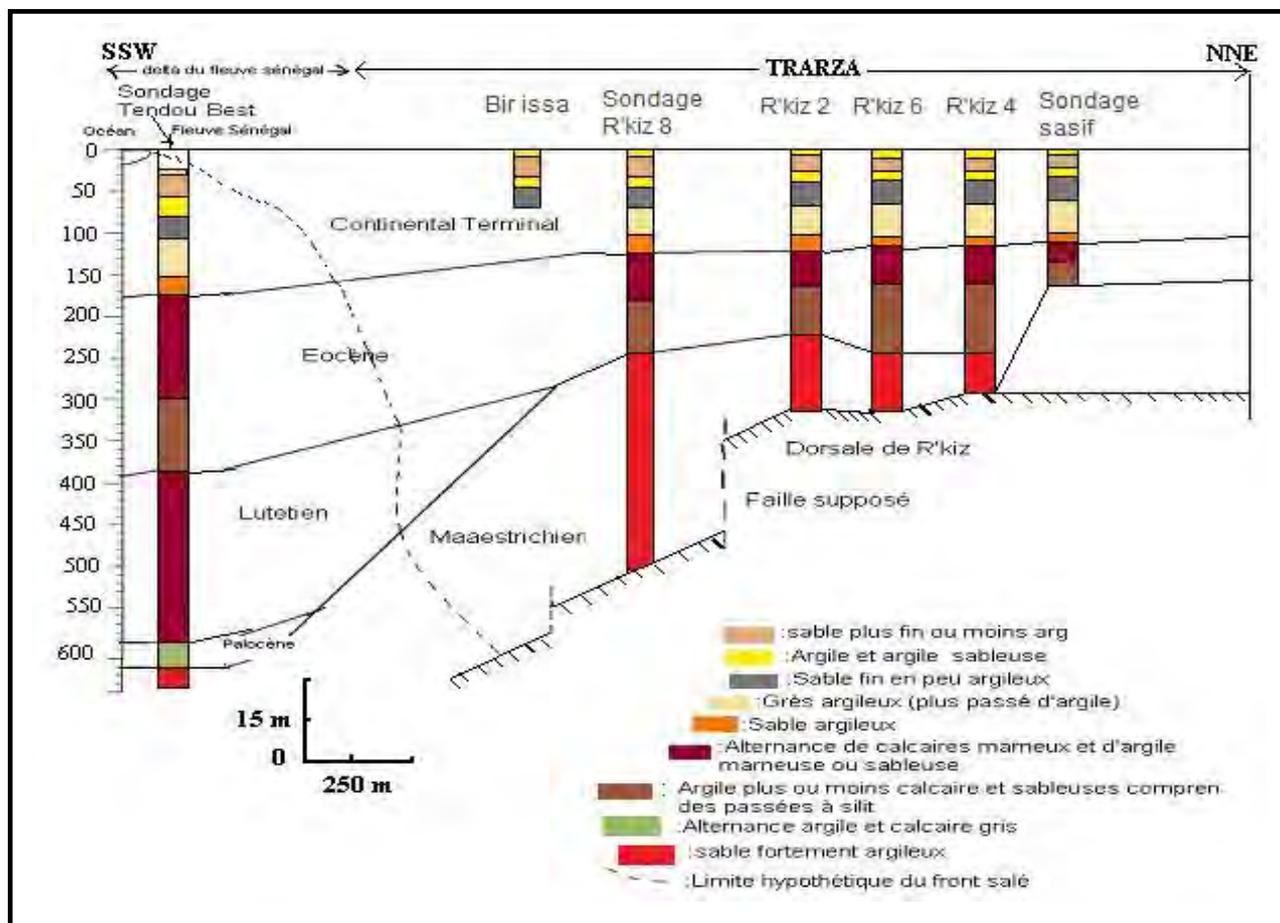


Figure 11a : Coupe hydrogéologique du CT dans le sud-ouest de la région du Trarza
(BRGM, 1993 modifié)

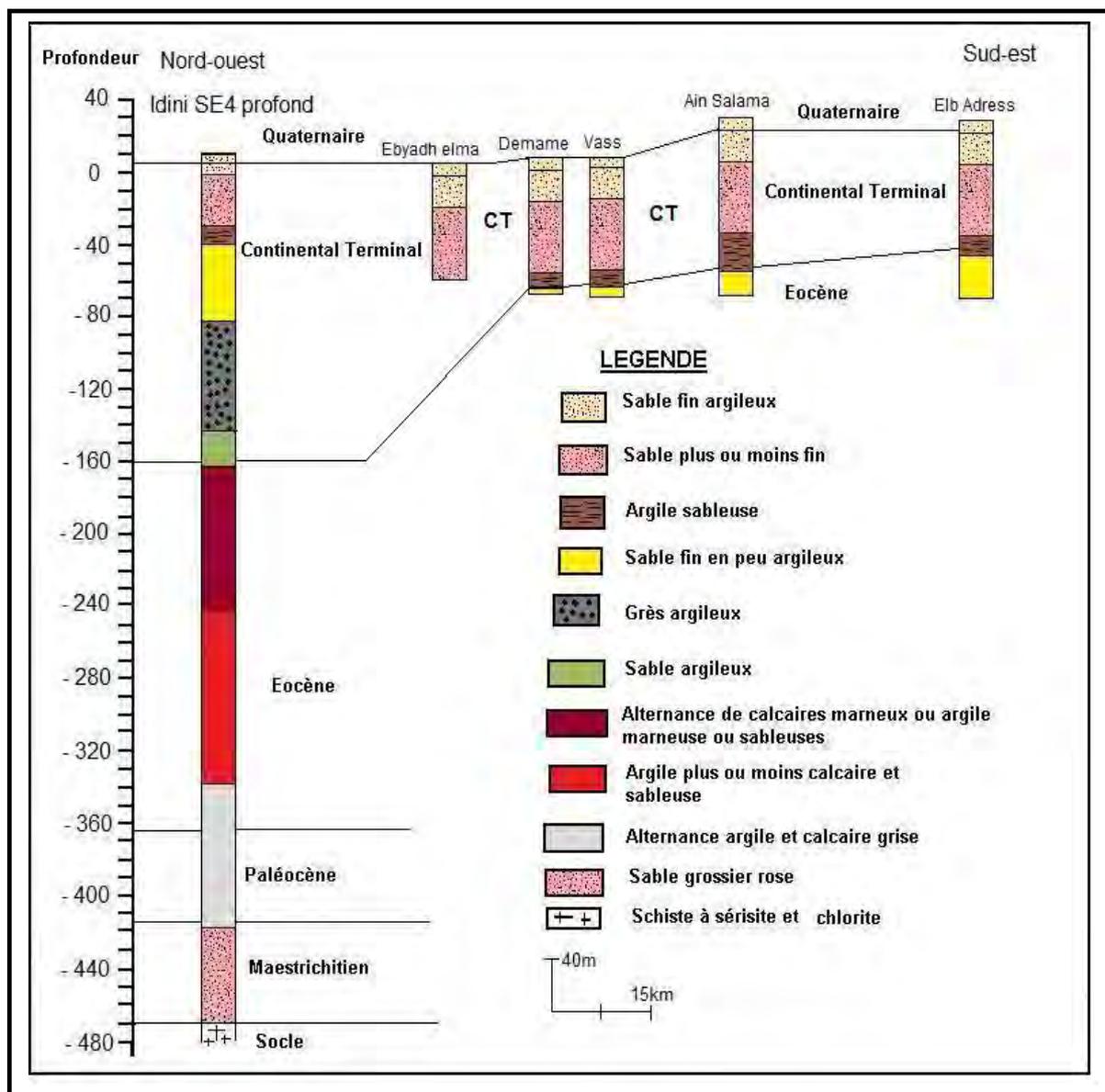


Figure 11b : Coupe hydrogéologique dans la nappe du Trarza entre Idini et Boutilimit

(BRGM, 1986 modifié)

2.2.3.1. Géométrie de l'aquifère CT

Des études hydrogéologiques issues des campagnes de forages (BRGM, 1967 ; BURGEAP, 1978 ; Mission Chinoise de Coopération de BEIJING, 1982 et BRGM, 1986) et différents travaux bibliographiques (Dieng, 1987 ; Archambault, 1987 ; Arranyossy, 1989) confèrent à la nappe une disposition en creux.

L'épaisseur du CT varie du nord au sud et de l'est à l'ouest de la dorsale de R'kiz. Dans la région de R'kiz, le Continental Terminal présente, sur une épaisseur de 60 à 70 m.

La sédimentation a un caractère lenticulaire et il est très difficile de corréler les horizons sableux sur l'ensemble du bassin. Seules des études détaillées d'un grand nombre de forages sur une petite superficie, permettent de connaître la structure lithologique du CT. Le toit du CT s'approfondit de façon régulière de l'est vers l'ouest.

La surface libre de la nappe du Trarza se raccorde au niveau de la mer à l'ouest et s'abaisse régulièrement en direction de l'est suivant une pente hydraulique d'environ 0,3‰ pour remonter aux abords du socle cristallin. Le niveau piézométrique des trois horizons aquifères du CT, est toujours inférieur au niveau marin. La dépression atteint son maximum à Aquilal Faye (situé à environ 115 km au nord de Boutilimit) à 40 m en dessous du niveau moyen de la mer (Clouet d'Orval, 1981).

Selon Dieng (1987), la dépression piézométrique des nappes de l'Afrique de l'Ouest, est le résultat des processus paléohydrogéologiques qui correspondent à des variations du niveau marin et du climat dans les bassins littoraux. D'autres auteurs comme Archmbault (1987) et Arranyosy (1993) avancent des hypothèses suivant lesquelles, la dépression piézométrique dans les nappes est le résultat de la conjugaison de plusieurs facteurs :

- climatiques où prédominent des températures élevées de l'air, du sol et du sous-sol, une siccité importante de l'atmosphère (évaporation considérable) et une absence d'alimentation des nappes par infiltration des eaux de pluie ;

- géologiques : formations sédimentaires à faible perméabilité latérale, dépôts détritiques tels que les argiles, les limons, les sables et les sables argileux résultant de l'érosion de reliefs environnants et accumulés dans des bas-fonds ;

- géographiques : présence de zones d'alimentation en bordure de l'aquifère.

Au nord-est, le réservoir est limité par le biseau sec et au nord par les eaux saumâtres de la sebkha de N'Dramcha qui constituent la frange salée nord. Ces eaux peuvent se déplacer suivant une pente de 0,1 à 0,3‰ vers la dépression de la nappe (Mission chinoise de BEIJING, 1982).

a)- Situation du contact eau douce/eau salée

La limite entre l'eau douce et l'eau salée a été déterminée avec précision à l'issue d'une étude géophysique menée par la C.G.G. en 1954.

La nappe du CT comporte une frange d'eaux douces continentales en contact avec une frange côtière d'eaux fortement minéralisées dont l'origine marine (parfois par l'intermédiaire de vastes sebkha côtières) paraît évidente (BURGEAP, 1978 ; BRGM, 1986).

Les eaux du voisinage immédiat de la mer sont chargées et les eaux continentales relativement douces. Une zone de mélange met donc en contact les eaux salées marines et les eaux douces continentales. Le mouvement général dans ces deux phases, favorisé par la dépression de la nappe, conduit depuis la mer vers le rivage, les eaux salées dans les nappes douces et au déplacement de l'eau de ces aquifères. Ce processus entraîne une pénétration du biseau salé et une augmentation de la salinité des eaux (Séméga et *al*, 1994).

Cette pénétration d'eau salée limite à l'ouest les eaux douces du Trarza et une bande côtière dont la langue (1 g.l^{-1}) en contact avec l'eau douce, constitue le front salé (Cf. Fig. 10). La position du front salé dépend de l'horizon considéré de l'aquifère, et on s'accorde à la situer à quelques dizaines de kilomètres de la côte atlantique (DHR, 1990).

Le front salé concerne cet aquifère et a été localisé à plus de 40 km de la mer, entre Hassi El Bagra et Ouad Naga. Dans le sud du Trarza, ce contact a été situé en bordure d'Aftout El Sahéli à environ 20 km de la mer (C.G.G., 1964).

La largeur de la frange salée est variable selon sa position géographique. Elle peut atteindre 80 km au nord de Nouakchott, dans la région de la sabkha N'dramcha, environ 45 km au niveau du champ captant d'Idini, environ 20 km plus au sud jusqu'à la rencontre avec la bande salée fluviale. Elle s'élargit considérablement jusqu'à plus de 160 km de la mer au niveau du fleuve. Le front a été étudié dans la région d'Idini à cause de la proximité des captages et la menace qu'il constitue pour la pérennité du champ captant (C.G.G., 1964).

b)- Biseau sec

C'est une frange de 15 à 30 km de large à l'extrême est du bassin, qui s'étend sur une superficie de 16 000 km². Au voisinage du socle, les formations du CT ou de l'Eocène situées au-dessus de la ligne de contact entre le niveau d'eau souterraine du bassin et du socle, dépourvu d'eau et incliné, ne présentent plus d'aquifères. Venant de l'ouest, les horizons aquifères se sont biseautés progressivement vers l'Est et disparaissent complètement avec le socle ancien métamorphique et granitique des Mauritanides (Mission chinoise de BEIJING, 1982 ; BRGM, 1990).

2.2.3.2. Paramètres hydrodynamiques

Les paramètres hydrodynamiques (transmissivité, perméabilité, coefficient d'emménagement) de l'aquifère du CT sont hétérogènes et leurs variations sont liées à celles des caractéristiques hydrauliques et hydrogéologiques dont l'épaisseur du niveau aquifère. Ils sont donc variables suivant le secteur et l'horizon aquifère considéré. Le CT, du fait de son

épaisseur relativement faible dans l'est du Trarza, comporterait un seul niveau aquifère (BRGM, 1990).

La transmissivité du CT est variable ; elle varie de 10^{-2} à 10^{-4} $m^2.s^{-1}$. Les variations de la transmissivité sont liées à l'épaisseur de l'aquifère et la teneur en argiles. Les valeurs de transmissivités de cet aquifère obtenues dans les environs de Boutilimit sont de l'ordre de 7.10^{-3} à 10^{-2} $m^2.s^{-1}$ et beaucoup plus faibles de l'ordre de 10^{-4} $m^2.s^{-1}$ à R'Kiz (Tableau 1) (BRGM, 1990).

Le coefficient d'emmagasinement est rarement mesuré car les forages d'exploitation ne possèdent pas de piézomètres d'observation à l'exception de la région d'Idini et certains forages dispersés.

La perméabilité des sédiments hétérogènes du Continental Terminal varie de $0,25.10^{-5}$ à $3,1.10^{-5}$ $m.s^{-1}$ à travers le bassin. Cette perméabilité est très faible aux abords de l'océan Atlantique et à certains endroits, en raison de la présence de conglomérats coquilliers cimentés à semi cimentés, comporte une forte étanchéité (Mission chinoise de Beijing, 1982).

Tableau 1 : caractéristiques hydrodynamiques des forages captant le CT dans le sud - est du Trarza (BRGM, 1990)

Localités	T ($m^2.s^{-1}$)	Localités	T ($m^2.s^{-1}$)
Bir Elbarka	$1,5.10^{-3}$	Ribat elveth	6.10^{-3}
Elghame tagnet	$1,0.10^{-2}$	Rabia	$6,5.10^{-3}$
El meteyene	$1,5.10^{-3}$	Keur Moundi	$2,0.10^{-3}$
El meteyenne er	$2,8.10^{-3}$	Loumbour	$4,4.10^{-3}$
Bir selama	3.10^{-2}	Begumone	4.10^{-3}
El henna	5.10^{-3}	R'Kiz	$0,5.10^{-4}$
Naïmat	$5,0.10^{-3}$	Ehel habibou R	4.10^{-3}
Ebydh elma	7.10^{-3}	Ibelghane	2.10^{-3}
Ouhaitou	1.10^{-3}	Boulanoir	4.10^{-3}
El Goueissi	$6,0.10^{-3}$	Echiva	$2. 10^{-3}$

2.2.3.3. Piézométrie

Les directions d'écoulement convergent vers l'intérieur du territoire, le point le plus bas se trouve à 35 m en dessous de la mer.

Dans l'est du Trarza, l'aquifère du CT est essentiellement captif ; il est captif et parfois semi captif dans la région de Boutilimit. Les eaux s'écoulent, entre le biseau salé et le biseau sec vers la dépression piézométrique. Le niveau d'eau dans les argiles rencontrées dans des forages au voisinage de R'kiz, est inférieur de 1 à 2 m par rapport au plan d'eau du fleuve et, est également différent du niveau d'eau dans les sables (Fig. 12).

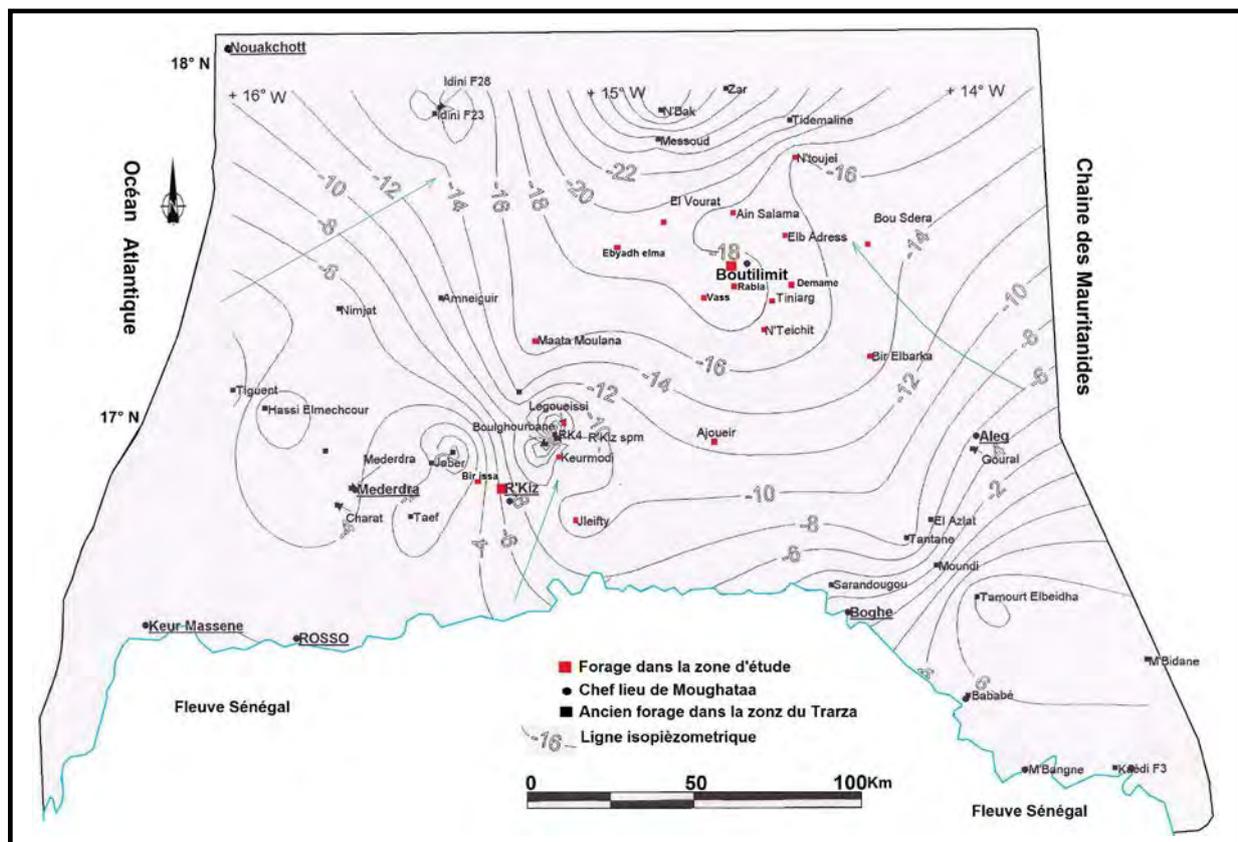


Figure 12 : Carte piézométrique de la nappe du CT au sud-est du Trarza (CNRE, 2002 modifié)

a)- Ecoulement des eaux dans l'est de la région du Trarza

Les courbes d'isoprofondeur de la nappe par rapport au niveau de la mer dans cette région présentent un gradient d'abaissement de direction SW-NE, entre le biseau salé à l'ouest et le biseau sec à l'est. A partir de l'océan et de l'extrême sud - ouest du fleuve Sénégal, les eaux s'écoulent vers la dépression piézométrique de Aquilal Faye avec une pente relativement importante (Depagne, 1963).

b)- Alimentation de l'aquifère du CT

La nappe du Trarza a été considérée comme une nappe fossile dont la recharge serait effectuée à une période où la mer était à un niveau très inférieur au niveau actuel. La réalimentation directe par la pluie est négligeable car la pluie précipitée est inférieure à 400 mm.an⁻¹. L'eau de la pluie serait entièrement reprise par les phénomènes évaporatoires. Mais en 1993 une forte pluie de 185 mm enregistrés dans la région d'Idini durant le mois d'août et septembre a perturbé cette hypothèse ; il a été constaté une remontée du niveau piézométrique sur les piézomètres périphériques qui sont les plus éloignés du champ captant d'Idini (BRGM, 1965).

La nappe peut être alimentée par la crue du fleuve Sénégal et de ces affluents, le lac d'Aleg et le lac de R'kiz. Il est possible que la nappe soit alimentée par des infiltrations marines, par un processus d'intrusion lent et continu à travers des sédiments perméables ou semi-perméables de la cote, et en mesure d'entraîner le déplacement du front salé (BRGM, 1965).

L'alimentation de la nappe se trouve potentiellement commandée par quatre processus :

- les phénomènes pluviométriques qui peuvent assurer, par infiltration directe des eaux de pluie, une alimentation. Cependant, la faible pluviométrie actuelle, inférieure au seuil de 400 mm de pluviosité efficace en zone subsaharienne, les températures élevées et la forte évaporation, sont défavorables à cette alimentation (Archambaut, 1987) ;

- les drainages des nappes voisines du Brakna et de l'Amchetil qui reçoivent les eaux de ruissellement en provenance des régions du socle précambrien. Ces drainages peuvent être peu conséquents à l'image de la pluviométrie, souvent faible et irrégulière (Archambaut, 1987) ;

- les phénomènes d'infiltration horizontale de l'océan Atlantique et/ou du fleuve Sénégal, qui convergent vers la dépression piézométrique de la nappe. La perméabilité, relativement faible, des faciès argileux, des alluvions fluviales et le colmatage des berges par des limons, ont conduit à minimiser la participation du fleuve dans ces phénomènes (Clouet D'Orval et *al.*, 1980 - 1981 ; BRGM, 1986).

- les communications entre niveaux aquifères par interruption de l'horizon argileux de séparation. Au niveau d'Idini, l'aquifère profond du CT semble être bien isolé de la nappe sub-phréatique sus-jacente par de grès argileux épais de 80 m. En effet, depuis 1958, son niveau piézométrique est resté stationnaire malgré les pompages de plus en plus intensifs effectués sur la nappe sub-phréatique. Par contre, cette dernière est en contact direct en plusieurs endroits avec la nappe phréatique (BRGM, 1986)

Les eaux de la nappe du Trarza se seraient emmagasinées durant une période humide du Quaternaire (12 000 - 5 000 B.P.) où le niveau de la mer était supérieur au niveau actuel (Elouard, 1967 ; Dieng, 1965). La nappe étant en creux avec sa dépression maximale à Aquilal Faye à -40 m, les écoulements naturels des masses d'eau avoisinantes convergeraient vers ce secteur suivant des pentes relativement faibles de 0,1‰ en bordure du fleuve Sénégal.

3. CONCLUSION

Le secteur étudié est caractérisé par un climat de type saharien, qui détermine un domaine aride où les précipitations sont relativement peu abondantes (100 mm.an⁻¹).

Le secteur concerné est situé dans le bassin sédimentaire côtier mauritanien. La série lithologique essentiellement formée de séries grés-argileuses, s'échelonne du Crétacé supérieur (Maastrichtien, Paléocène, Eocène et Continental Terminal) au Quaternaire (Tafaritien et Nouakchottien).

Les descriptions lithologiques du secteur étudié ont permis de mettre en évidence plusieurs nappes superposées dans des sédiments d'âge mio-pliocène, regroupés sous le nom du Continental Terminal.

Les forages d'exploitation d'eau potable de Boutilimit, captent la nappe subphréatique du Continental Terminal.

Sur le plan hydrogéologique, différents types d'aquifères sont rencontrés et exploités dans la zone d'étude pour l'approvisionnement en eau potable des populations. Parmi ceux-ci on peut citer : les aquifères du Paléocène, de l'Eocène et surtout celui du Continental Terminal, qui fait l'objet des essais de pompage et des prélèvements des échantillons d'eau pour des fins d'analyses hydrochimiques dont les résultats sont présentés dans la deuxième partie de cette étude.

Chapitre II : RESULTATS ET DISCUSSIONS

Deuxième partie : RESULTATS ET DISCUSSIONS

1. METHODES ET MATERIELS D'ETUDE

1.1. Matériel de foration

Dans cette partie, on a fait une présentation du matériel de forage afin de faire la lumière sur les résultats hydrogéologiques obtenus après l'exécution des forages (Bir issa, Ebyadh Elma, Demame et Vass). Nous avons utilisé la technique du rotary à la boue bentonite en fonction de la nature des terrains à forer. Signalons que la technique de forage au rotary, équipement de forage, développement et essai de pompage sont détaillés dans l'annexe 2.

Ce matériel est constitué d'une machine : foreuse de type STENUICK 1500 avec tous ses accessoires (Fig.13) : (vibrateur, câbles, désableur, pompe à boue, outils de forage, tiges et groupes électrogènes, émulseur, etc.).

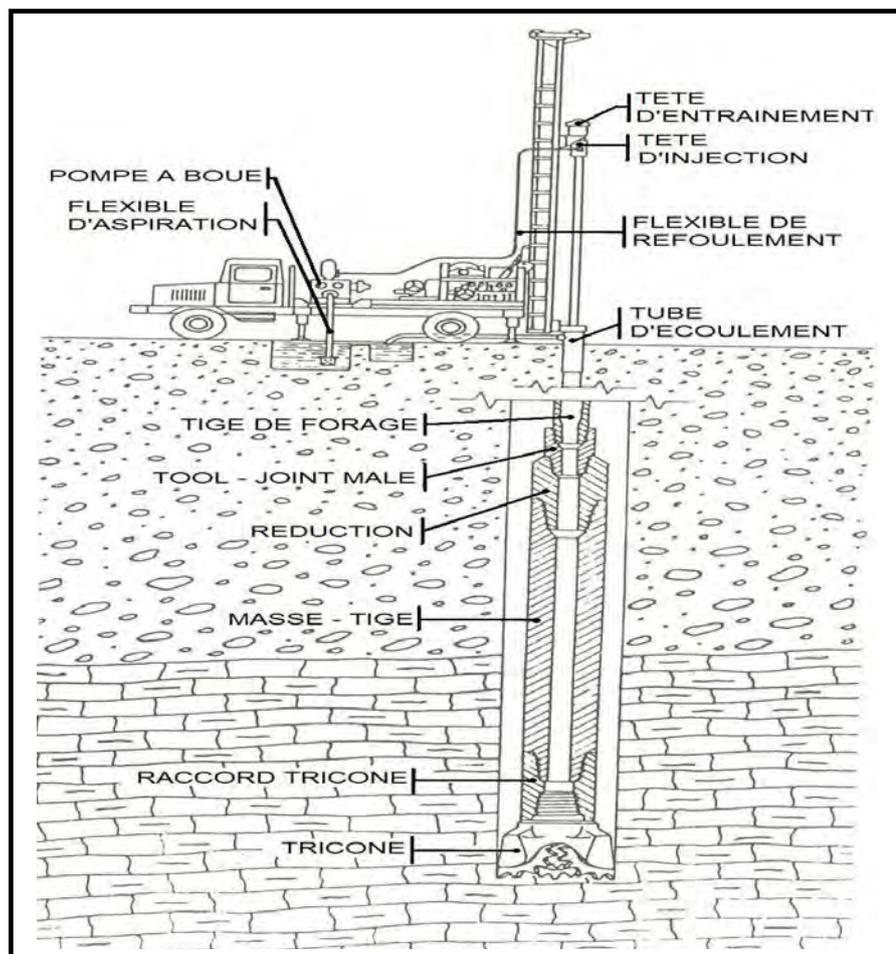


Figure 13 : Dispositif d'un atelier de forage au rotary (*in ketchemen, 1988*)

Le matériel utilisé pour les essais de nappe et puits est le suivant :

- une pompe de type CAPRARI E8 S55/4A remplie d'une solution de refroidissement et de lubrifiant et munie d'un système de clapet de retenue relié au moteur par un arbre ;
- un groupe électrogène relié à une armoire permettant de contrôler la tension du courant fourni ;
- un tuyau de refoulement muni d'une vanne réglant le débit et d'un tube de Pitot à son extrémité pour mesurer ce débit ;
- un bac de 60 litres permettant de vérifier les mesures de débit ;
- une sonde lumineuse et sonore pour les mesures de niveau d'eau dans le forage.
- un électropompe immergée de type SP 46 de puissance $65 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$.
- GPS pour mesurer les coordonnées des ouvrages.

1.2. Acquisition des données hydrochimiques

1.2.1. Prélèvements

De décembre 2007 à février 2008, trois campagnes de prélèvements mensuels de 17 forages d'eau captant l'aquifère du CT dans le sud-est de la région du Trarza, ont été réalisées.

Les échantillons d'eau ont été prélevés à partir des robinets, après un écoulement suffisant pour s'assurer de la venue d'eau du forage en régime de pompage.

1.2.2. Mesures physico-chimiques

Les paramètres physiques comme le pH, la température et la conductivité électrique ont été mesurés sur le terrain à partir d'un pH-mètre à microprocesseur WTW 196 et d'un conductimètre à microprocesseur WTW196 LF.

Au laboratoire, les analyses des échantillons d'eau ont été effectués systématiquement sur les éléments chimiques : Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ et K^+ pour les cations et Cl^- , HCO_3^- , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} , NO_3^- pour les anions par des méthodes volumiques et spectrométriques :

- le calcium et le magnésium sont dosés simultanément par la méthode volumique complexométrique à l'E.D.T.A. ;
- les chlorures par la méthode volumique argentimétrique de Moher ;
- les teneurs carbonates et en bicarbonates par un dosage volumique acido-basique ;

- les sulfates sont dosés par la méthode néphélométrique au chlorure de baryum sur un spectrophotomètre Spectronic 20 D Milton Roy Compagny ;

- les concentrations en sodium et en potassium, par spectrophotomètre de flamme sur un photomètre JENWAY PEP 7 ;

- le dosage des nitrates, de nitrites, de l'ammoniaque, et du fer est réalisé par colorimétrie, respectivement au salicylate de sodium, au réactif de Zambelli, à l'hypochlorite de Sodium et à l'orthophénanthroline. Les concentrations de ces éléments sont déterminées avec une précision comprise entre 2 et 4 %. Les mesures colorimétriques et néphélométriques sont effectuées sur un spectrophotomètre Spectronic 20 D Milton Roy Compagny qui présente une erreur de mesure de l'ordre 2%.

2. CARACTERISTIQUES HYDROGEOLOGIQUES ET HYDROCHIMIQUES DE L'AQUIFERE

2.1. Exécution des forages

2.1.1. Reconstitution de terrains traversés

La reconstitution des formations géologiques traversées est faite essentiellement à partir des descriptions macroscopiques des cuttings (Fig. 14a et b).

Pour le forage de Vass, la description montre que les terrains traversés sont moyennement argileux jusqu'à 100 m de profondeur.

Alors que pour le forage de Demame, la description montre que les terrains traversés sont peu sablo argileux jusqu'à 104 m de profondeur.

Pour forage de Bir issa, la description montre que les terrains traversés sont argileux jusqu'à 66 m de profondeur.

Pour forage de Ebyade Elma, la description montre que les terrains traversés sont très sableux jusqu'à 94 m de profondeur.

La description lithologique des formations aquifères et de la détermination des profondeurs des ouvrages ont été faites sur quatre forages : Bir Issa, Vass, Ebyadh Elma et Demame.

Dans le cas du forage de Bir Issa, on observe que les premiers horizons traversés sont constitués de sables fins suivi successivement de cinq horizons d'argiles suivie d'une autre du sable et la dernière est d'argile jaunâtre.

Ainsi on constate que la majorité des couches superposées du forage de Vass sont constituées essentiellement de sables variés (sable fin rose, sable fin argileux jaune,.....) sur une longueur de 71 m de sables en remarquant que ces couches sont séparées parfois par une ou deux autres argileuses sur une longueur de 29 m d'argiles.

Alors que pour le forage de Ebyadh Elma sa première couche est constituée d'argiles sableuses (4 m) et les autres couches par des variétés de sables (fins à moyens) sur une profondeur de 90 m de sables.

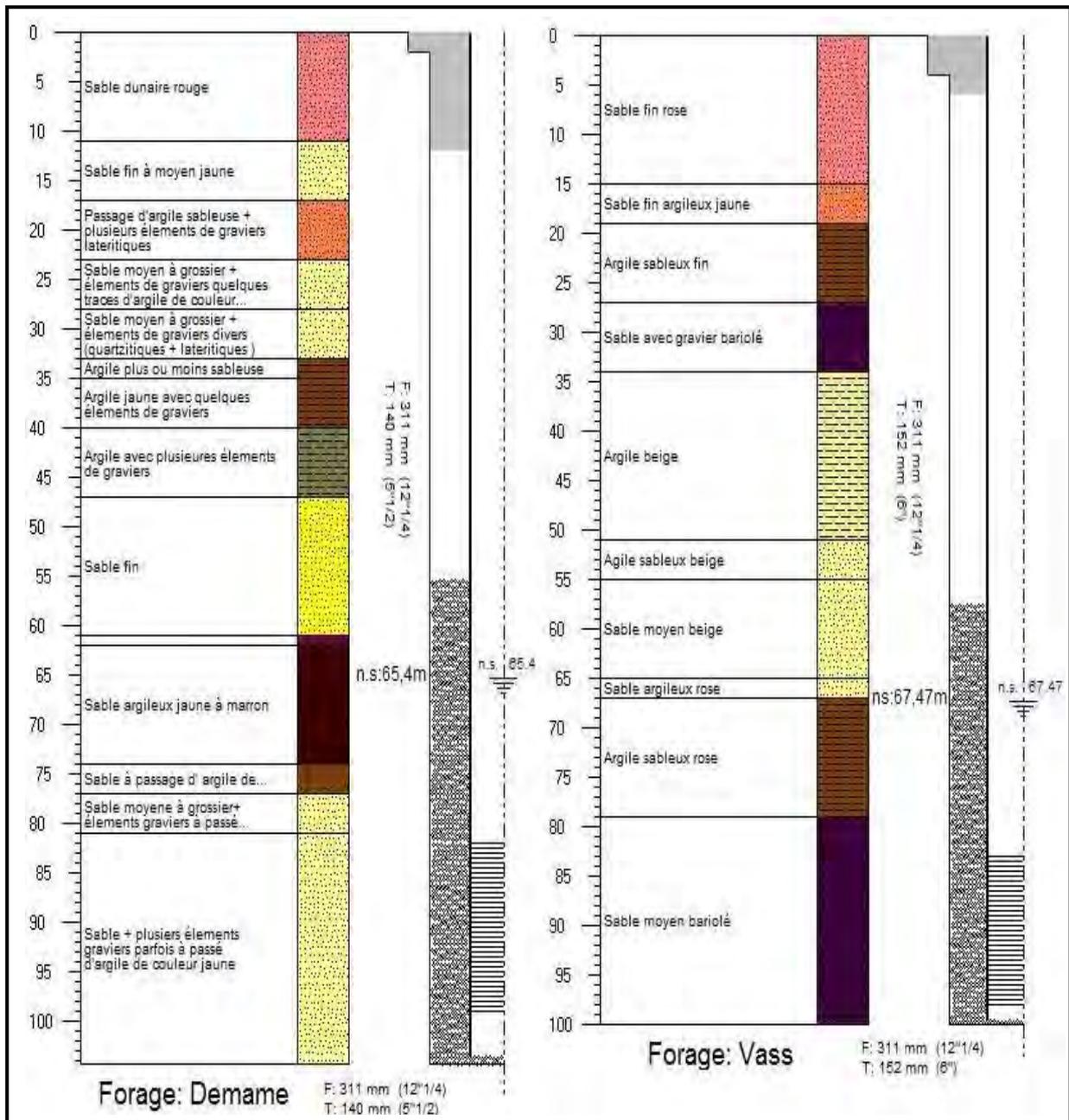


Figure 14a : Coupes lithologiques des forages de Demame et Vass.

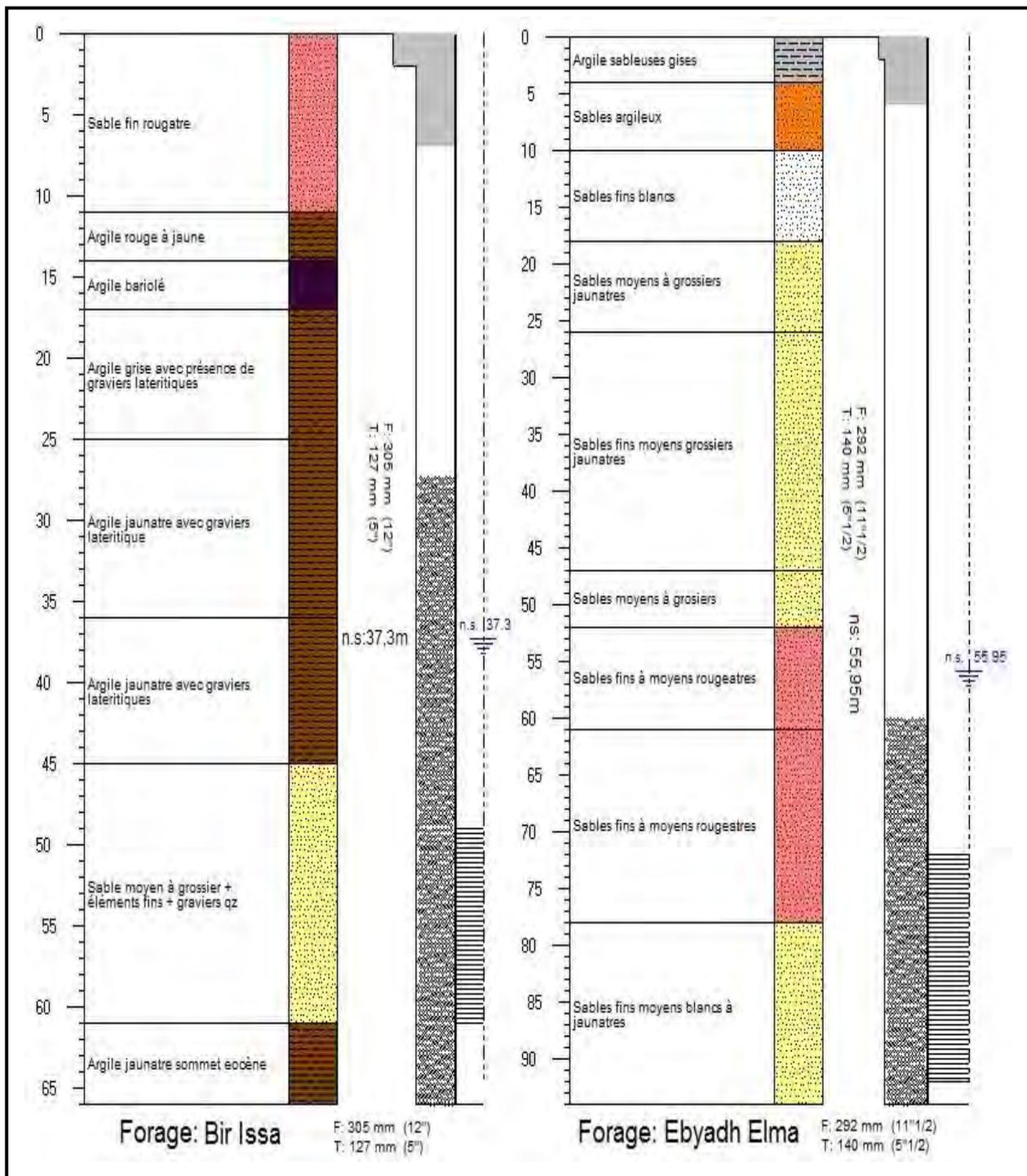


Figure 14b : Coupes lithologiques des forages de Bir issa et Ebyadh Elma.

Enfin pour le forage de Demame la description montre que la majorité des couches sont sableuses (83 m) (sables, sables argileux, sables + éléments de gravier) et d'autres couches par les argiles (21 m) (argiles plus ou moins sableuses, argiles jaunes avec quelques éléments de gravier). Entre les différentes couches de sables (deuxième et troisième, neuvième et dixième) on remarque l'existence de deux passages d'argiles.

En dépit de nombreuses études effectuées sur l'aquifère du Continental Terminal, le choix du niveau à capter au forage Bir issa a été arrêté à 66m dans les formations Argileuses. L'analyse des cuttings montre que les formations argileuses se situent entre 61 et 66m soit une épaisseur de 5m. Donc la zone comprise entre 49 m et 61 m devrait être crépiné soit 12 m de crépine.

Le forage de Demame a été arrêté à 104,4m dans les formations Sableuses. L'analyse des cuttings montre que la formation sableuse + plusieurs élément de gravier se situe entre 81 et 104 m soit une épaisseur de 23 m. Puisque les crépines ont été déjà commandées avant l'exécution de l'ouvrage, la longueur crépinée s'élève à 16 m.

Le forage de Vass a été arrêté à 100 m dans les formations sableuses bariolées. L'analyse des cuttings montre que la formation sableuses moyen bariolé se situe entre 79 et 100 m soit une épaisseur de 21 m. Puisque les crépines ont été déjà commandées avant l'exécution de l'ouvrage, la longueur crépinée s'élève à 15 m.

Le forage d'Ebyadh Elma a été arrêté à 94 m dans les formations de sables fins à moyens blancs. L'analyse des cuttings montre que la formation sableuse fine moyenne blanche se situe entre 77 et 94m soit une épaisseur de 17 m. Puisque les crépines ont été déjà commandées avant l'exécution de l'ouvrage, la longueur crépinée s'élève à 20 m.

2.1.2. Interprétation des essais de pompage

Les données expérimentales des pompages qui font l'objet de cette interprétation sont consignées dans les tableaux 1, 2 et 3 en annexe (2).

2.1.2.1. Essai de puits

a)- Courbe caractéristique [s=f(Q)]

Elle constitue une fiche d'identification ultérieure des améliorations ou de s détériorations suite à l'exploitation de l'ouvrage. Elle permet de déterminer le débit maximum d'exploitation, fonction d'un rabattement maximum admissible (Castany, 1982). Elle est obtenue en portant le couple de données de chaque palier (débit en $m^3.h^{-1}$ et le rabattement en m) sur un pa pier millimétré (Tableau 2). Les points obtenus permettent de tracer la courbe [s= f(Q)].

Tableau 2 : Essais de puits par paliers de débit de courtes durées des forages

Forages	Q (m ³ .h ⁻¹)	S _{obs} (m)	s/Q (m.m ⁻³ .h ⁻¹)	Q/s (m ³ .h ⁻¹ .m ⁻¹)
VASS	2,5	1,33	0,53	1,87
	5	2,76	0,55	1,81
	7,5	4,35	0,58	1,72
	9	5	0,55	1,8
DEMAME	3	1	0,33	3
	6	2	0,33	3
	8,8	2,96	0,336	2,97
	12	3,96	0,33	3,03
BIR ISSA	4,1	0,39	0,095	10,51
	8	0,75	0,093	10,66
	11,1	1,1	0,099	10,09
	14	1,5	0,107	9,33
ABYADH ELMA	4,47	0,5	0,111	8,92
	8,12	0,91	0,112	8,92
	10,6	1,16	0,109	9,13
	12,67	1,4	0,11	9,05

b)- Détermination du débit critique et validation de l'expérimentation

Le débit critique représente la valeur au-delà de laquelle, il apparaît des pertes de charges dans l'ouvrage (Castany, 1982). Il correspond au point où la courbe quitte l'allure linéaire pour prendre une forme parabolique, et est noté Q_{cr} . Il s'exprime en m³.h⁻¹.

Les courbes obtenues sur les quatre forages (Fig. 15) ne sont pas homogènes. Les courbes caractéristiques des forages de Bir Issa et Ebyadh Elma présentent une allure convexe. De plus, elles ne se superposent pas complètement à la courbe théorique de Jacob. Ces observations traduisent que l'expérimentation est valable mais a été moins bien réalisée aux forages de Bir issa et Ebyadh Elma.

Pour les forages de Demame et Vass, les courbes obtenues présentent une allure linéaire. De plus, elles se superposent parfaitement à la courbe théorique de Jacob. Ces observations traduisent que l'expérimentation a été très bien réalisée aux forages de Demame et Vass.

Pour tous ces forage, les courbes caractéristiques ne font pas apparaître un débit critique par ce que celles - ci ont une allure linaire. Ce pendant pour les forages Ebyadh Elma et Bir Issa on note une légère concavité de courbes caractéristiques ; on note que l'augmentation de débit est proportionnellement à celle du rabattement. Ce qui nous a poussé à ne pas déterminer les débits

critiques. Pour les forages Demame et Vass les courbes se superposent cela veut dire que les pertes de charges sont négligeables dans l'ensemble. Mais pour les forages Bir Issa et Ebyadh Elma, il y a un décalage entre les courbes. En effet, vu le faible rabattement correspondant (0,6 m à Ebyadh Elma et 0,8 m à Bir Issa), les formes convexes des courbes caractéristiques seraient liées à des erreurs lors de la prise des mesures et cela pourrait se justifier par la séparation de la courbe théorique de Jacob avec celle expérimentale. Cette séparation traduit des pertes de charges qui ne peuvent être attribuées qu'à l'expérimentation (mesures directement effectuées dans le forage). Donc, on pourrait dire que les débits critiques n'ont pas été atteints aux forages Bir Issa, Ebyadh Elma, Demame et Vass.

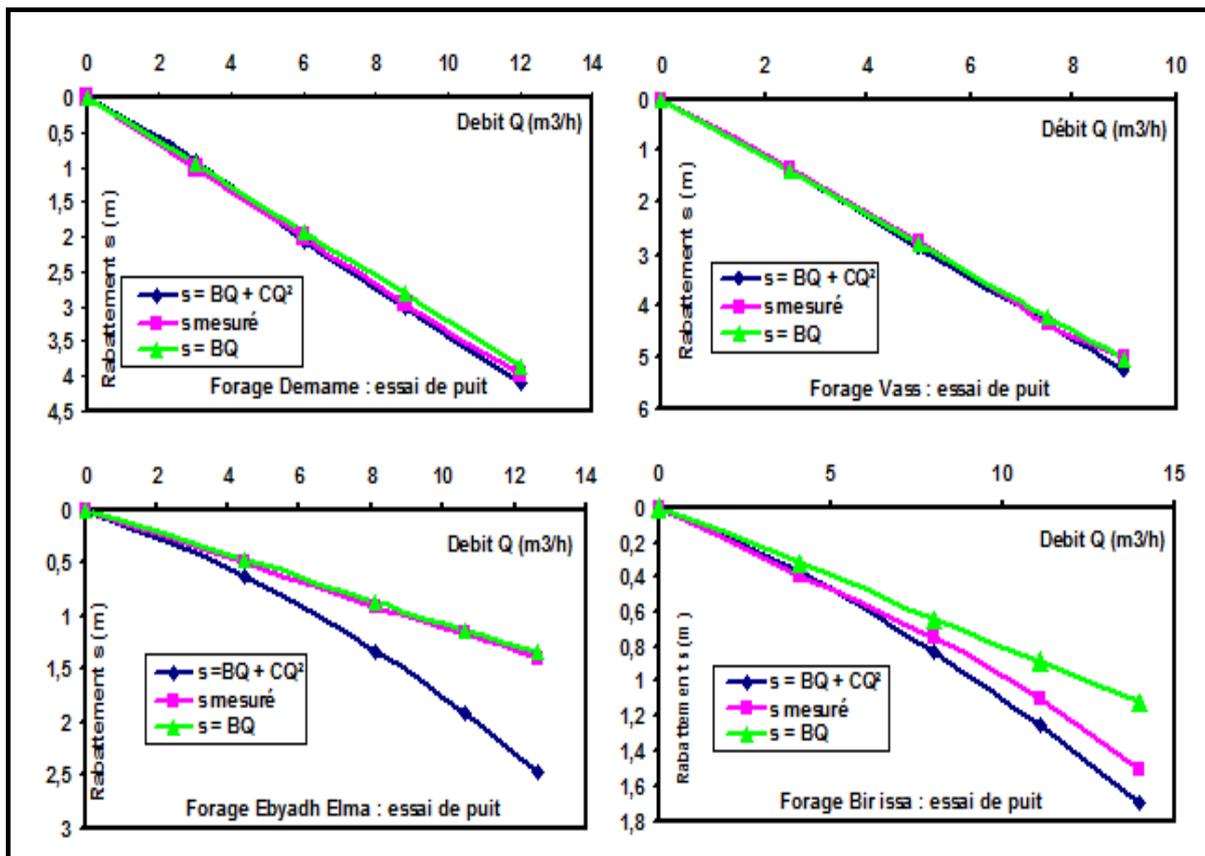


Figure 15 : Courbes caractéristiques des forages (Demame, Vass, Ebyadh Elma et Bir issa) :
 rabattement en fonction du débit : $[s = f(Q)]$

c)- Evaluation des pertes de charges par la méthode de Jacob [courbe $S/Q = f(Q)$]

La réalisation technique d'un forage et de son dispositif de captage perturbe l'écoulement au voisinage de l'ouvrage. Ces diverses perturbations entraînent l'apparition, en période de pompage, d'une perte de charge supplémentaire qui s'ajoute à la perte de charge théorique qui serait imposée par le milieu poreux supposé capté dans les conditions idéales (Forkasiewicz, 1972).

L'évaluation du débit exploitable maximal d'un puits ou forage et le calcul des caractéristiques à donner à l'ouvrage, passe obligatoirement par le calcul des pertes de charge qui seront provoquées par le pompage d'exploitation.

Parmi ces pertes de charges, on distingue celles qui sont dues à la formation aquifère et celles causées par l'équipement du puits.

Au sud-est de Trarza puisque l'alimentation en eau des populations se fait par des forages peu profonds, le calcul des pertes de charges ne doit être toujours effectué pour apprécier la rentabilité des ouvrages de captage.

La figure 16 montre le report sur coordonnées cartésiennes des rabattements spécifiques (s/Q = débit de pompage pour chaque forage).

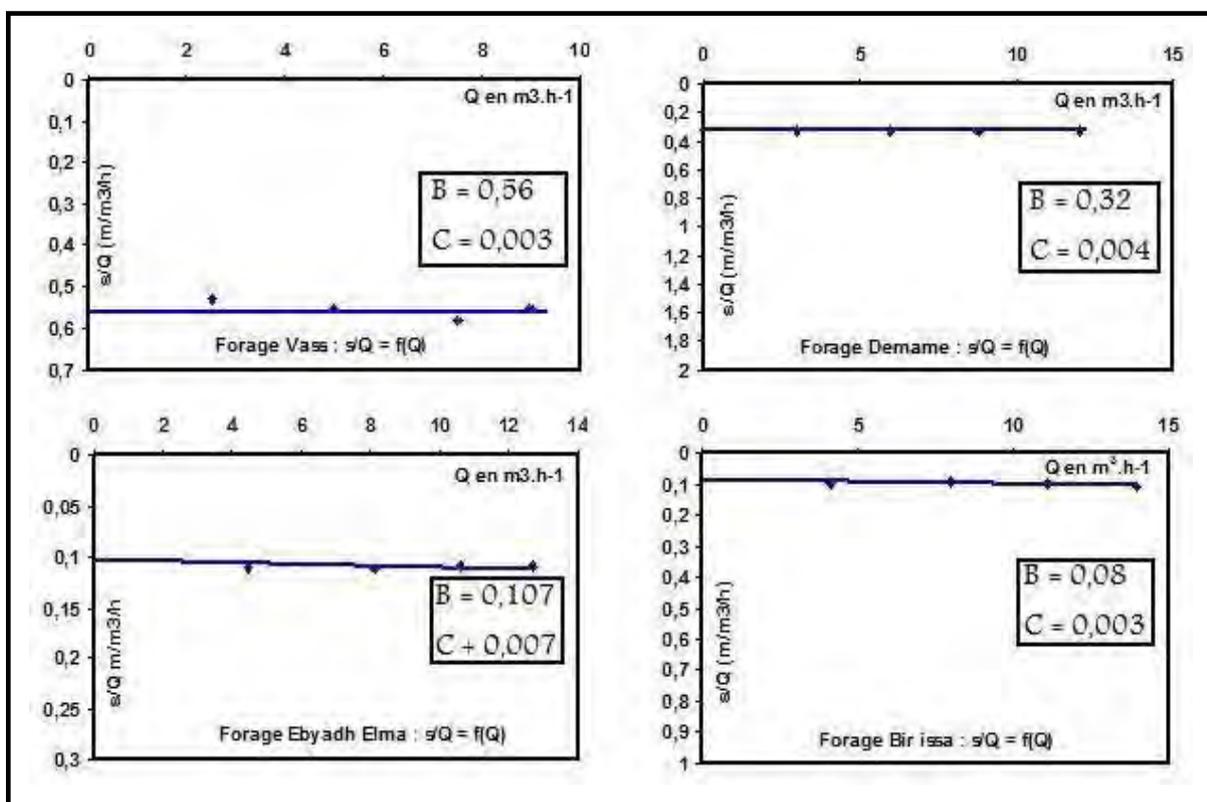


Figure 16: Détermination des constantes de Jacob (B et C) sur les forages de Demame, Vass, Ebyadh Elma et Bir issa.

L'équation générale de la droite obtenue est de la forme : $[s/Q = B + CQ]$.

Le coefficient B est donné par l'intersection de la droite avec l'axe s/Q et le coefficient C représente la pente de la droite.

Le calcul des pertes de charges montre que l'essentiel du rabattement observé au niveau des forages Demame, Vass, Ebyadh Elma et Bir issa est due aux pertes de charges linéaires (BQ). Les

pertes de charge quadratiques (CQ^2) interviennent pour 0,6 à 13 % (Demame), pour 1,2 à 4,5 % (Vass), pour 13 à 34% (Bir issa) et pour 21 à 45% (Ebyadh Elma) du rabattement total observé. L'importance des pertes de charge linéaires liées à la nappe au niveau du forage Demame et Vass, peut être causée par la boue de forage utilisée lors de foration et qui n'a pas été éliminée. Ceci avait poussé le contrôleur à prolonger les opérations de développement.

Ces résultats expliquent respectivement la présence de la pente observée sur la courbe caractéristique de Bir issa et Ebyadh Elma et l'absence de cette pente sur celle de Demame et Vass. Dans les quatre forages, les pertes de charges linéaires croissent en fonction du débit de pompage. (Tableau 3a).

Tableau 3a: Récapitulation des essais par palier des quatre forages

Forages	Q	B	C	BQ	CQ^2	sth	BQ/s (%)	$CQ^2/BQ(\%)$	$CQ^2/s(\%)$
VASS	2,5	0,56	0,003	1,4	0,018	1,41	98,67	1,33	1,2
	5			2,8	0,075	2,87	97,39	2,67	2,6
	7,5			4,2	0,168	4,36	96,13	4,01	3,8
	9			5,04	0,24	5,28	95,4	4,82	4,5
DEMAME	3	0,32	0,004	0,96	0,036	0,9	96,38	3,75	4
	6			1,92	0,014	2,06	93,02	7,5	0,6
	8,8			2,9	0,309	3,12	92,9	10,6	9,9
	12			3,91	0,57	4,41	88,6	14,5	12,9
BIR ISSA	4,1	0,08	0,003	0,32	0,05	0,37	86,67	15,3	13,5
	8			0,64	0,19	0,83	76,92	30	22,8
	11,1			0,88	0,36	1,25	70,6	41,6	28,8
	14			1,12	0,58	1,7	65,57	52,5	34,11
ABYADH ELMA	4,47	0,107	0,007	0,47	0,13	0,61	77,37	29,2	21,31
	8,12			0,86	0,46	1,33	65,3	53,1	34,5
	10,6			1,13	0,78	1,92	59,05	69,3	40,6
	12,67			1,35	1,123	2,47	54,67	82,8	45,4

d)- Débit d'exploitation maximum des ouvrages

Le débit maximum d'exploitation (Q_{max}) que l'on peut prélever dans l'ouvrage pendant un temps donné et dans des conditions données doit être inférieur au débit critique Q_c . Par conséquent, le rabattement maximum doit être inférieur au rabattement critique.

Les courbes caractéristiques obtenues montrent que les débits critiques n'ont pas été atteints sur les quatre forages exécutés (Demame, Vass, Bir issa et à Ebyadh Elma). Les débits

d'exploitation maximum seraient donc supérieurs aux débits de pompage des derniers essais par palier soit, $9 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ à Vass, $12 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ à Demame, $14 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ à Bir issa et $12,67 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ à Ebyadh Elma.

Toutefois pour être dans des conditions économiques données, la perte de charge quadratique ne doit pas être élevée par rapport à la perte de charge linéaire (Castany, 1982). En général, on prend CQ^2 de sorte qu'il représente 25% de BQ.

Il reviendrait donc à évaluer d'une part, le pourcentage des deux types de pertes de charge par rapport aux pertes de charges totales, d'autre part, les pertes de charges quadratiques par rapport aux pertes des charges linéaires.

L'extrapolation raisonnable à partir de l'équation de Jacob [$s = BQ + CQ^2$] montre que cette condition est valable pour un débit de $14 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ à Bir Issa. Cependant, le fait que le rabattement du forage Bir Issa soit (1,7 m), il serait judicieux d'estimer le débit d'exploitation maximum à $14 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$.

Au forage Ebyadh Elma, le débit obtenu ($4,2 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$) est contradictoire à l'hypothèse selon laquelle le débit d'exploitation maximum serait supérieur au débit du dernier essai par palier. En effet, ce manque d'homogénéité des résultats aurait pour origine les causes évoquées ci-dessus. Les perturbations liées à l'expérimentation s'observent également sur la courbe [$s/Q = f(Q)$] par une dispersion des points qui rend aléatoire la détermination des valeurs de B et de C. Toute fois, nous retiendrons que le débit d'exploitation maximum au forage d'Ebyadh Elma serait de $13 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ (Tableau 3b).

Tableau 3b : Récapitulation des essais puits pour les quatre forages

Forages	Q	B	C	BQ	CQ^2	s_{th}	BQ/s (%)	CQ^2/BQ (%)
VASS	25	0,56	0,003	14	1,875	15,875	88,18	13,4
DEMAME	20	0,32	0,004	6,4	1,6	8	80	25
BIR ISSA	14	0,08	0,003	1,12	0,58	1,7	65,5	52,5
EBYAD ELMA	13	0,107	0,007	1,39	1,83	2,57	54,04	85,04

Aux forages de Demame et Vass, les essais étant bien réalisés, on pourrait proposer après extrapolation raisonnable un débit de $30 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ pour un rabattement de 18 m. L'exploitation de ces forages a été limitée à $25 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ pour un rabattement de 15,8 m à Vass et de $20 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ pour un rabattement de 8 m à Demame pour éviter tout risque de l'ouvrage. Ces débits couvrent largement les besoins des villages à court et moyen terme (Tableau 5b).

e)- Productivités des forages

La productivité d'un puits (P_r) est le débit d'exploitation maximum d'un ouvrage correspondant au débit qui peut être pompé dans l'ouvrage, pendant une durée définie, sans que le rabattement induit par le pompage ne dépasse le rabattement maximum admissible (Forkasiewicz, 1978) (Tableau 4).

$$P_r = q_s * s_{\max}$$

Tableau 4 : Déterminations les productivités des ouvrages

Forage	q_s (m ³ /h.m)	s_{\max} (m)	P_r (m ³ .h ⁻¹)
Vass	1,87	5	9,35
Demame	2,63	3,96	10,41
Bir issa	10,51	1,5	15,76
Ebyadh Elma	8,94	1,4	12,51

2.1.2.2. Essais de nappe

On suppose que les forages sont complets et captent la totalité de la nappe qui est captive. Toutes les méthodes d'interprétation des pompages d'essai, sont basées sur la comparaison des expérimentaux avec une expression analytique, solution particulière d'une équation différentielle.

Les forages de Demame, Vass, Bir issa et Ebyadh Elma, sont interprétés par la méthode bilogarithmique et semi-logarithmique de Jacob (modèle Theis).

Les raisonnements suivis pour choisir cette méthode sont :

La couche aquifère est homogène, isotrope et d'extension latérale infinie ensuite les épontes sont imperméables (nappe captive), les diamètres des forages aussi sont faibles : effet de capacité de forage négligeable (Massy, 1993). Donc les hypothèses de Theis lui sont applicables.

a)- Interprétation par la méthode bilogarithmique

Elle consiste à reporter les rabattement s observés en fonction du temps en coordonnées bi-log et à superposer la courbe obtenue avec la courbe théorique [$u' = W(u)$], de même module (Fig. 17a). On choisit ensuite un point à l'endroit où la courbe expérimentale coïncide avec la courbe de Theis. Cette identification fournit un couple de points (s, t) et ($W(u), u'$), qui permet de calculer les paramètres hydrodynamiques de la nappe (Tableau 5a).

$$T = \frac{0,08.Q}{s} W(u)$$

$$S = \frac{4.Tt}{X^2.u'}$$

Tableau 5a : valeurs de transmissivités obtenues avec la méthode bi-logarithmique

Forage	Méthode bi-logarithmique						
	s (m)	t (min)	W (u)	u'	T (m ² .s ⁻¹)	S	Q (m ³ .h ⁻¹)
Vass	3,98		2,02		1,2.10 ⁻²		9
Demame	3,95		1,02		6,9.10 ⁻³		12
Bir issa	1,24		2,86		7,2.10 ⁻³		14
Ebyadh Elma	1,45		3,5		7.10 ⁻³		13

b)- Interprétation par la méthode semi-logarithmique de JACOB

Rappelons que le rabattement dû au pompage d'un voisin en un point quelconque est :

$$T = \frac{0,183Q}{S} \lg \frac{2,25Tt}{x^2S}$$

Le report sur coordonnées semi-logarithmiques des couples rabattement /temps

[s = f (t)] des pompages (Fig. 17b) a permis de déterminer des valeurs de transmissivités par la méthode approximative de Jacob (Tableau 5b).

$$T = \frac{0,183.Q}{A}$$

$$S = \frac{2,25.T.t_0}{X^2}$$

Les valeurs de transmissivités calculées par les méthodes du modèle Theis sont dans la gamme des valeurs trouvées par le BRGM entre 1990 et 1992 et de Ould Elymène (2007) dans la zone comprise entre Tiguent et Rosso.

Les coefficients d'emménagement n'ont pas pu être déterminés pour les raisons suivantes :

- aux forages de Demame, Vass et Ebyadh Elma par manque d'un ouvrage d'observation (puits villageois ou piézomètre) aux alentours du site ;

- pour le forage Bir Issa, un ancien forage datant de 1958 existe mais son équipement ne nous permettait pas de prendre des mesures de niveaux lors du pompage.

Pour l'ensemble de la zone d'étude, le coefficient d'emmagasinement de la nappe est compris entre 10^{-3} et 10^{-2} (BRGM, 1990)

Tableau 5b : valeurs de transmissivité obtenues avec la méthode semi-logarithmique

Forage	Méthodes semi-logarithmique de Jacob				
	A : pente	Q (m ³ .h ⁻¹)	T (m ² .h ⁻¹)		S
			Décente	Remontée	
Vass	0,038	9	1.10^{-2}	1.10^{-2}	
Demame	0,27	12	7.10^{-3}	7.10^{-3}	
Bir issa	0,036	14	7.10^{-3}	1.10^{-3}	
Ebyadh Elma	0,034	13	$7,03.10^{-3}$	$7,9.10^{-3}$	

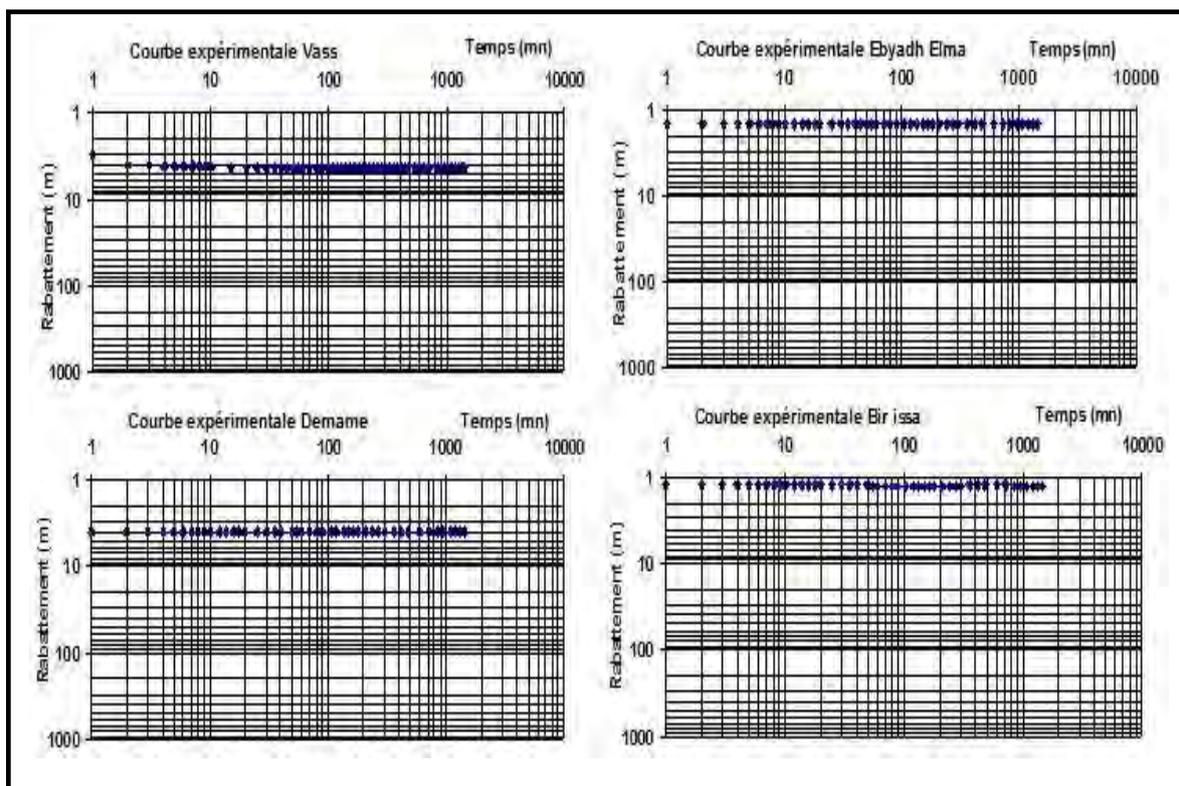


Figure17a : Détermination des transmissivités par la méthode bi-logarithmique (modèle Theis)

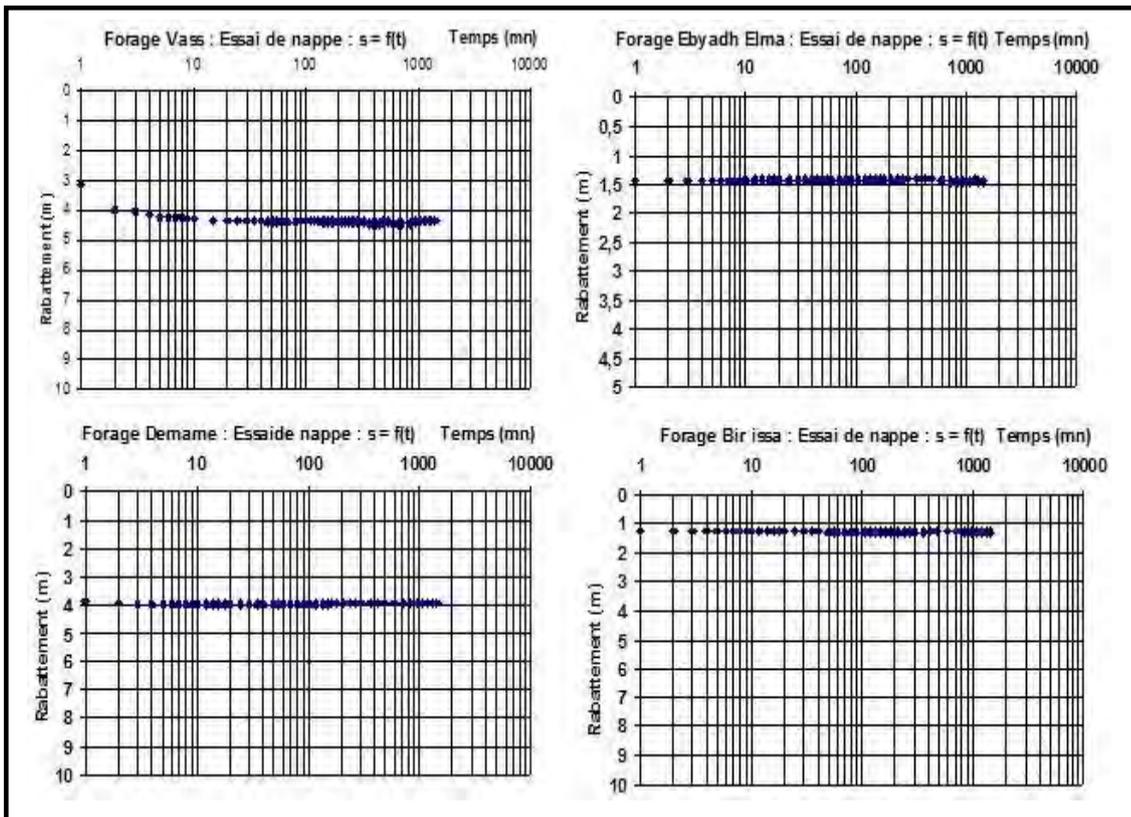


Figure 17b : Détermination des transmissivités par la méthode semi-logarithmique de Jacob (Descente)

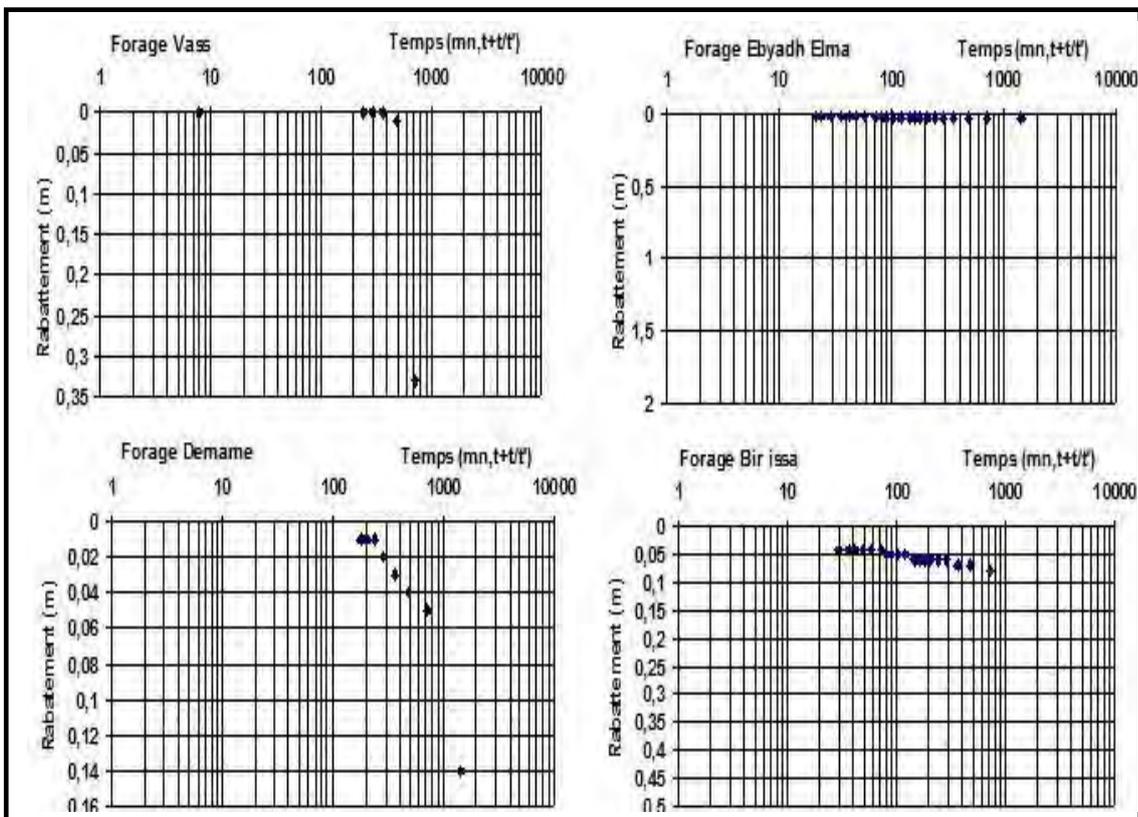


Figure 17c : Détermination des transmissivités par la méthode semi-logarithmique de Jacob

(Remontée)

2.2. Caractéristiques hydrochimiques des eaux du Continental Terminal

2.2.1. Caractérisation physico-chimique des eaux

2.2.1.1. Caractéristiques physiques des eaux

La composition chimique des eaux souterraines du CT est intimement liée à un certain nombre de paramètres tels que le pH, la température et la conductivité électrique. Les mesures de ces paramètres ont été réalisées *in situ* en même temps que les prélèvements d'échantillons d'eau pour les analyses chimiques au laboratoire. Les résultats de ces paramètres physico-chimiques, représentant la moyenne des différentes campagnes d'échantillonnage, sont consignés en annexes (Tableau 1, annexe 3).

a)- Températures

Les températures varient de 27,5°C (Bir Elbarka) à 30,1°C (Tiniarg). La température pourrait contribuer à la variation de la minéralisation des eaux car les températures élevées favorisent les phénomènes d'évaporation entraînant la dissolution de certaines phases minérales présentes dans les formations aquifères.

b)- pH

Les valeurs de pH des eaux enregistrées dans la partie est de la nappe du Trarza sont comprises entre 7 (El Vourate) et 8,05 (Maatamoulana). Ces valeurs de pH indiqueraient que les eaux souterraines sont neutres à légèrement basiques et que l'alcalimétrie des eaux serait essentiellement contrôlée par les ions bicarbonates (HCO_3^-).

c)- Conductivité électrique et minéralisation totale

La minéralisation d'une eau peut être évaluée par sa conductivité électrique ou par le taux de solides dissous (TDS). Les valeurs de conductivités électriques sont comprises entre 280 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ (Bir Elbarka) et 1214 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ (FJleufty). Ces eaux sont faiblement à moyennement minéralisées.

La minéralisation totale des eaux souterraines de la nappe du Continental Terminal dans la zone d'étude varie globalement de 164 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ (Bousdera) à 844 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ (Jleifty). Ces eaux sont dans l'ensemble douces ($\text{TDS} < 1000 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$).

Des corrélations établies (Tableau 8) entre les différentes variables chimiques des eaux de la nappe du CT, indiquent que les ions majeurs (Cl^- , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} et SO_4^{2-}) sont bien corrélés avec la minéralisation totale et sont donc déterminants dans la minéralisation des eaux.

Toutefois, la bonne corrélation entre les teneurs en ions majeurs (Cl^- , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} et SO_4^{2-}) montre que la minéralisation totale des eaux est essentiellement due à ces éléments et dès lors, participeraient significativement à l'augmentation de la charge saline des eaux. Les teneurs en HCO_3^- et en NO_3^- sont assez constantes dans l'ensemble et ne sont pas déterminantes dans l'augmentation de la charge saline.

Tableau 6 : Matrices de corrélations des données physico-chimiques des eaux de la nappe du CT dans le sud-est du Trarza.

	C.E	HCO_3^-	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+
C.E	1								
HCO_3^-	0,45	1							
Cl^-	0,88	0,61	1						
NO_3^-	0,31	0,41	0,36	1					
SO_4^{2-}	0,6	-0,21	0,17	-0,11	1				
Ca^{2+}	0,93	0,36	0,77	0,27	0,66	1			
Mg^{2+}	0,71	-0,1	0,42	0,009	0,85	0,71	1		
Na^+	0,93	0,62	0,88	0,35	0,43	0,78	0,55	1	
K^+	0,65	0,22	0,54	0,29	0,44	0,49	0,5	0,72	1

2.2.1.2. Classification chimique des eaux CT

Pour faire ressortir les différents faciès chimiques des eaux de la nappe du Continental Terminal dans, les données des analyses chimiques acquises au cours des deux campagnes de prélèvements des années 2008 dans la partie est et 2006 dans la partie ouest de la région du Trarza, ont été reportées sur les diagrammes triangulaires de Piper (1944) (Fig. 18). Pour les deux campagnes, les eaux de nappe du Trarza sont caractérisées généralement par des faciès chimiques où dominant, les chlorures, les sulfates, le sodium, le calcium et le magnésium. Dans le détail, ces eaux se répartissent en plusieurs faciès chimiques :

- pour la campagne 2008 à l'est de la région du Trarza :

- le faciès chloruré sodique et potassique (14 points d'eau pour la campagne 2008) ;
- le faciès chloruro-sulfaté mixte (03 points d'eau pour la campagne 2008) ;

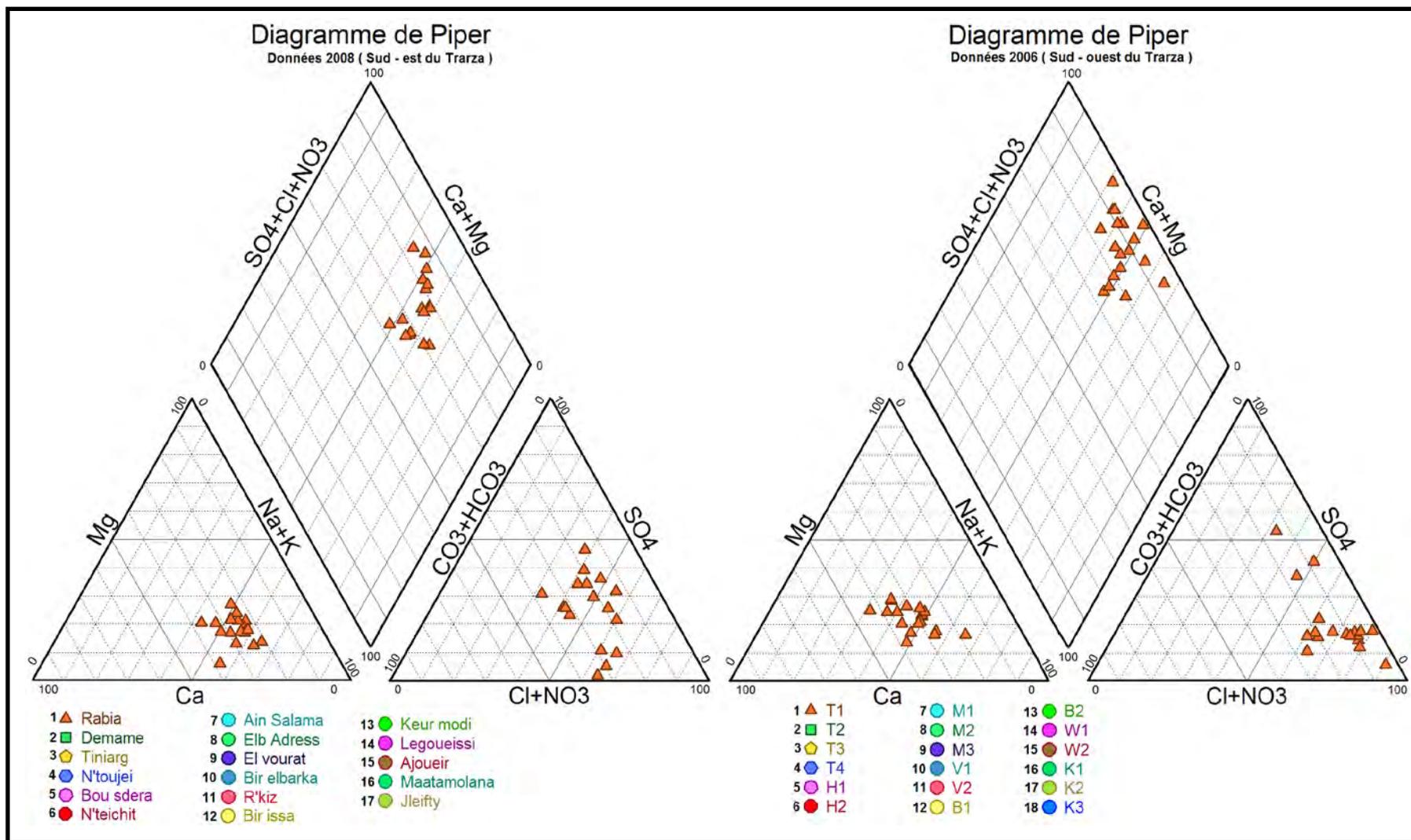


Figure 18 : Diagramme de Piper pour les eaux du CT de Trarza (campagnes 2008 et 2006 à l'ouest du Trarza)

- pour la campagne 2006 à l'est de la région du Trarza :

- le faciès chloruro-sulfaté mixte (14 points d'eau) ;
- le faciès chloruré sodique et potassique (03 points d'eau) ;
- le faciès sulfaté mixte (1 point d'eau) ;

La comparaison des deux diagrammes de Piper des campagnes 2008 et de 2006 des eaux du Continental Terminal de la région du Trarza, fait ressortir que les eaux souterraines à l'ouest de la région du Trarza, sont plus enrichies en chlorures et en calcium que celles de l'est de la partie est de la région. En effet, le calcul des I.E.B. donne des valeurs positives pour tous les forages d'eau de la nappe du CT, à l'exception des forages Bir Elbarka et eau de fleuve qui à un I.E.B. négatif. Un indice d'échange de base positif, indique une fixation des alcalins (Na^+ ; K^+) et la solubilisation des alcalino-terreux (Ca^{2+} ; Mg^{2+}). Par contre, un I.E.B. négatif, indique que l'échange cationique s'effectuera inversement c'est-à-dire une fixation des alcalino-terreux (Ca^{2+} ; Mg^{2+}) et une solubilisation des alcalins (Na^+ ; K^+). Ces échanges cationiques sont symbolisés par les réactions suivantes : ($2 \text{Na}^+ \Leftrightarrow \text{Ca}^{2+}$ et $2 \text{Na}^+ \Leftrightarrow \text{Mg}^{2+}$) (Tableau 7). Ces phénomènes d'échange cationiques pourraient bien expliqués un enrichissement en calcium et en magnésium et à un appauvrissement en sodium et/ou en potassium des eaux du Continental Terminal dans la partie est de la région (fixation du sodium et/ou du potassium et une solubilisation du calcium et/ou du magnésium). Cependant, l'enrichissement en chlorures des eaux souterraines dans l'ouest de la nappe du Trarza, pourrait expliqué par la proximité de l'océan Atlantique ;

Tableau 7 : Rapports caractéristiques et indices d'échange de base (I.E.B.) des eaux de la nappe du CT dans la région du Trarza

Données récentes (entre Boutilimit et R'Kiz)				Données Ould Elymène (2007) (entre Tiguent et Rosso)			
Ouvrages	SO ₄ ²⁻ /Cl ⁻	Mg ²⁺ /Ca ²⁺	I.E.B.	Ouvrages	SO ₄ ²⁻ /Cl ⁻	Mg ²⁺ /Ca ²⁺	I.E.B.
Rabia	0,88	0,93	0,55	T1	0,25	0,47	0,58
Demame	0,63	0,77	0,32	T2	0,2	0,5	0,62
Tiniarg	0,62	0,67	1,58	T3	0,22	0,49	0,57
N'toujei	1,03	0,85	0,83	T4	0,23	0,54	0,51
Bou Sdera	0,53	0,66	0,96	H1	0,07	0,34	0,77
N'Teichit	0,61	1	1,07	H2	0,24	0,39	0,51
Ain Salama	0,46	0,8	3,22	M1	0,24	0,52	0,52
Elb Adress	0,81	0,76	0,91	M2	0,16	0,5	0,68
El Vourat	0,57	0,62	4,02	M3	0,38	0,42	0,38
Bir Elbarka	0,96	1,1	-0,42	V1	0,25	0,21	0,5
R'kiz F1	0,81	0,56	3,43	V2	0,17	0,29	0,47
Bir issa	0,15	0,44	5,22	B1	0,26	0,37	0,56
Keur modi	0,19	0,65	3,62	B2	0,28	0,32	0,5
Legoueissi	0,37	0,57	3,38	W1	0,87	0,49	0,4
Ajoueir	0,08	0,51	3,48	W2	0,89	0,41	0,43
Matamolana	0,03	0,16	3,44	K1	0,32	0,35	0,35
Jleifty	1,22	0,53	3,44	K2	0,26	0,39	0,38
				K3	1,66	0,41	-0,03
Eau fleuve	0,68	1	-0,74	Eau fleuve	0,68	1	-0,74
Eau de mer	0,09	5	624,2	Eau de mer	0,09	5	624,2

2.2.2. Origine et processus de minéralisation des eaux : Diagramme de Chadha (1999)

Pour classer et identifier les processus hydrochimiques intervenant dans la minéralisation des eaux souterraines, un diagramme de Chadha (1999) a été construit (Fig. 18). Ce nouveau diagramme diffère des diagrammes de Piper et de Durov étendu par le fait que les triangles équilatéraux sont éliminés et que la forme du principal domaine d'étude est différente. Il est

construit à partir de la différence en pourcentage des milliéquivalents entre les alcalino-terreux ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$) et les alcalins ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$), exprimés comme des teneurs en pourcentage réactionnel sur l'axe des abscisses, et de la différence en pourcentage des milliéquivalents entre les anions d'acides faibles ($\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$) et les anions d'acides forts ($\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-}$), exprimés aussi comme des teneurs en pourcentage réactionnel sur l'axe des ordonnées. Les différences en pourcentage des milliéquivalents des abscisses et ordonnées sont par la suite étendues dans les principaux sous domaines d'étude du diagramme de Chadha, qui définit le caractère de l'ensemble des eaux. Le nouveau diagramme présente tous les avantages du domaine central du diagramme de Piper et permet d'identifier la typologie des eaux souterraines et les différents processus hydrogéochimiques comme les réactions d'échange de base cationique ($2 \text{Na}^+ \Leftrightarrow \text{Ca}^{2+}$ et $2 \text{Na}^+ \Leftrightarrow \text{Mg}^{2+}$), la pollution, le mélange des eaux naturelles, la réduction des sulfates et l'intrusion saline. Les huit sous domaines du diagramme proposé par Chadha (1999) sont définis ainsi :

- sous domaine 1, où les ions alcalino-terreux dominant les métaux alcalins ;
- sous domaine 2, où les métaux alcalins dominant les alcalino-terreux ;
- sous domaine 3, où les anions d'acides faibles dominant les anions d'acides forts ;
- sous domaine 4, où les anions d'acides forts dominant sur les anions d'acides faibles ;
- sous domaine 5, où les alcalino-terreux et les anions d'acides faibles dominant à la fois les métaux alcalins et les anions d'acides forts. Dans ce sous domaine, les eaux ont une dureté temporaire et les points représentent des eaux de type bicarbonaté calcique et magnésien où le processus responsable de la minéralisation est la recharge ;
- sous domaine 6, où les alcalino-terreux dominant les métaux alcalins et les anions d'acides forts dominant les anions d'acides faibles. Dans ce sous domaine, les eaux ont une dureté permanente et ne favorisent pas le dépôt de résidus de carbonates de sodium en cas d'irrigation. Ces eaux qui sont de type chloruré calcique et magnésien résultent soit de la pollution, soit des processus d'échange inverse de base ;
- sous domaine 7, où les métaux alcalins dominant les alcalino-terreux et les anions d'acides forts dominant les anions d'acides faibles. Dans ce sous domaine, les eaux créent généralement des problèmes de salinité aussi bien pour l'irrigation que pour la boisson, et sont généralement chloruré sodique ou sulfaté sodique résultant des phénomènes d'intrusion saline ;
- sous domaine 8, où les métaux alcalins dominant les alcalino-terreux et les anions d'acides faibles dominant les anions d'acides forts. Ce type d'eau provoque un dépôt de carbonate de

sodium pour l'irrigation et cause des problèmes d'écumage. Le faciès des eaux est du type bicarbonaté sodique et le processus de minéralisation est l'échange de base cationique.

Les données des analyses chimiques des eaux souterraines du Continental Terminal des compagnes 2008 et 2006 sont reportées dans le diagramme de Chadha (1999) et se répartissent de la manière suivante (Fig. 19) :

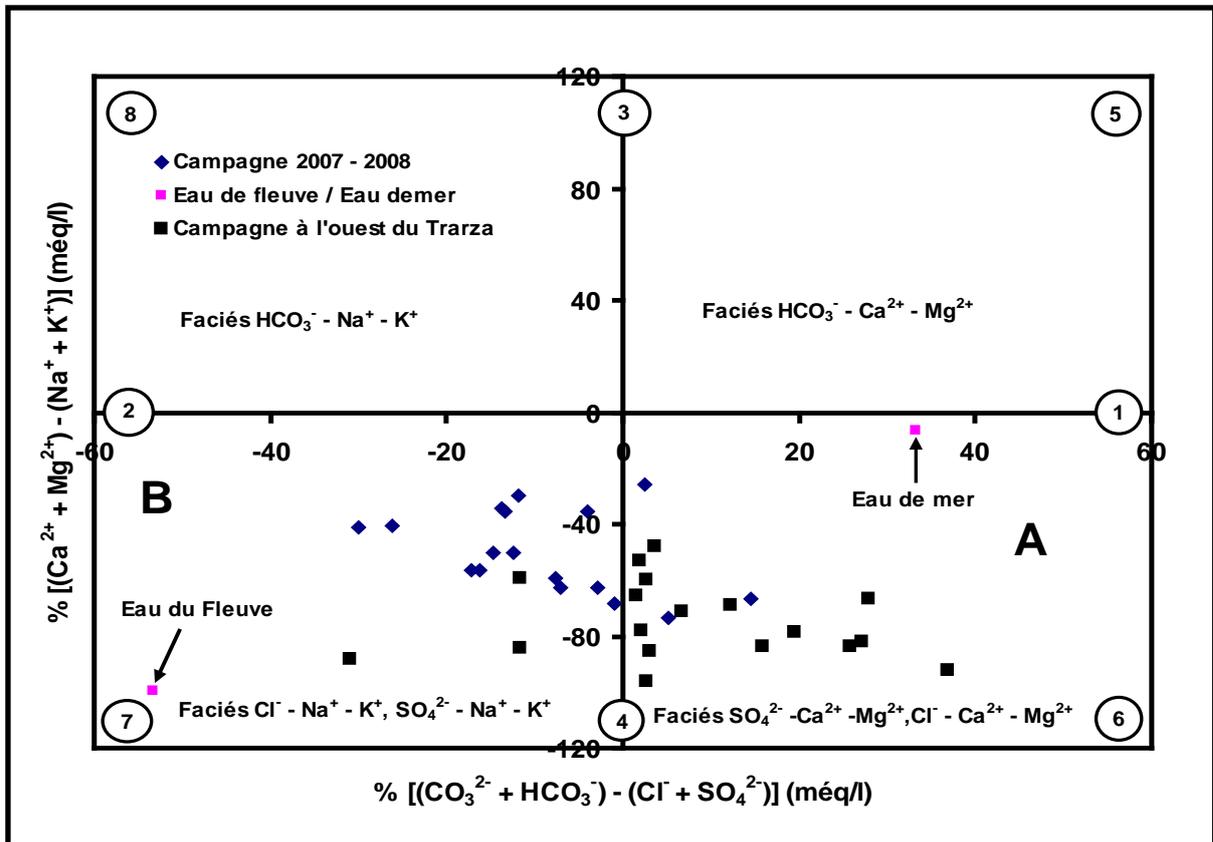


Figure 19 : Classification et processus de minéralisation des eaux souterraines par le diagramme de Chadha (campagnes 2008 et 2006 à l'ouest du Trarza)

- les eaux du groupe A sont localisées dans le sous domaine 6, où les alcalino-terreux ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$) dominent les métaux alcalins ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$) et les anions d'acides forts ($\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-}$) dominent les anions d'acides faibles ($\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$). Le faciès chimique de ces eaux est chloruré calcique et magnésien et sont moyennement minéralisées (TDS : (222 - 661 mg l^{-1}). Ces points d'eaux pourraient représenter très probablement pollution ponctuelle ou les processus de réactions d'échange de base inverse entre l'eau et l'aquifère est prépondérant (le sodium s'attache aux argiles et le calcium est libéré dans l'eau) ;

- les eaux du groupe B localisées dans le sous domaine 7, où les métaux alcalins ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$) dominent les alcalino-terreux ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$) et les anions d'acides forts ($\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-}$) dominent les anions d'acides faibles ($\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$), Le faciès chimique de ces eaux est chloruré sodique et potassique à l'exception des forages N'toujei et Jleifty où le faciès est sulfaté sodique et potassique

($rSO_4^{2-}/rCl > 1$), et sont moyennement minéralisées (TDS : (298 - 842 $mg.l^{-1}$). Elles proviendraient très probablement des phénomènes d'échange de base inverse entre l'eau et l'aquifère (le sodium s'attache aux argiles et le calcium est libéré dans l'eau) pour les eaux moyennement minéralisées ou résulteraient des phénomènes d'intrusion saline ou de lessivage des embruns et des aérosols marins au cours de l'infiltration des eaux de pluie pour les eaux fortement minéralisées. Par contre les points d'eau dont la minéralisation totale (TDS > 1000 $mg.l^{-1}$) de la partie ouest de la nappe de Trarza, résulteraient soit des phénomènes d'intrusion saline ou soit du lessivage des embruns et des aérosols marins au cours de l'infiltration des eaux de pluie.

2.3. Qualité des eaux souterraines

Pour l'étude de la qualité des eaux de la nappe du Continental Terminal du Trarza, nous nous limiterons à l'étude comparative de certains éléments chimiques aux normes de qualités requises pour une eau potable car les analyses bactériologiques n'ont pas été réalisées.

Les normes de potabilité de l'Organisation Mondiale de la Santé (O.M.S., 1993) relatives à la qualité chimique des eaux et les résultats chimiques (minimum et maximum) de la nappe du CT sont représentées dans le tableau 10.

Tableau 8: Normes de potabilité de l'O.M.S. (1993) et paramètres physico-chimiques de la nappe du Continental Terminal dans le sud-est du Trarza entre Boutilimit et R'kiz

Paramètres et substances chimiques	Concentrations maximales admissibles (O.M.S.)	Teneurs chimiques dans les eaux de la nappe du Continental Terminal (Données 2007 - 2008)	
		Minimum	Maximum
T (°C)	25	27,6	30,1
pH	9,6	7	8,05
CE ($\mu S.cm^{-1}$)	2000	280	1214
Cl ($mg.l^{-1}$)	200	37	218
SO ₄ ²⁻ ($mg.l^{-1}$)	250	6,95	282
NO ₃ ⁻ ($mg.l^{-1}$)	50	0	22
Na ⁺ ($mg.l^{-1}$)	100	30	138
K ⁺ ($mg.l^{-1}$)	12	9	20
Mg ²⁺ ($mg.l^{-1}$)	50	4,86	27
Ca ²⁺ ($mg.l^{-1}$)	100	15	84

L'aquifère du CT présente une potabilité permanente entre les qualités bonne, passable, médiocre et mauvaise. La majorité des points d'eau dépassent les normes de potabilité en certains éléments, notamment en chlorures, sodium et potassium. Ceci peut être dû à la proximité de cette région de l'océan atlantique (action des embruns marins et des aérosols et par endroit l'intrusion saline). D'autre part, les variations climatiques marquées par un déficit pluviométrique ces dernières années sont également responsables de la dégradation de la qualité aboutissant à une concentration en éléments chimiques.

3- CONCLUSION

L'utilisation des matériels hydrogéologique et hydrochimique à l'investigation des eaux souterraines de l'aquifère du Continental Terminal dans le sud-est du Trarza, a permis d'obtenir les renseignements suivants :

Les données des cuttings, et la vitesse d'avancement globalement, ont révélé la présence du haut vers le bas a permis de reconstituer la nature des terrains traversés pendant la foration, de localiser les différents aquifères et de faire le choix du niveau à capter.

Les valeurs des paramètres hydrodynamiques calculées, sont variables d'un forage à un autre. Ces valeurs montrent des différences des ouvrages pompés, les variations des épaisseurs, la variation des conditions des pompages (les débits et le temps de pompage très différents). Les transmissivités calculées par la méthode de Jacob, entrent dans la gamme d'une nappe captive.

Du point de vue hydrochimique, l'étude des paramètres physico-chimiques a montré que les valeurs de pH des eaux sont neutres à légèrement basiques. Les eaux sont moyennement minéralisées avec des valeurs de conductivité électriques variant de 280 à 1214 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. La comparaison des deux diagrammes de Piper des campagnes 2008 et de 2006 des eaux du Continental Terminal de la région du Trarza, fait ressortir que les eaux souterraines à l'ouest de la région du Trarza, sont plus enrichies en chlorures et en calcium que celles de l'est de la partie est de la région

Le report des points d'eau dans les diagrammes de Chadha (1999) a permis d'une part de faire ressortir les différents faciès chimiques : chloruré sodique et potassique, sulfaté sodique et potassique et chloruré calcique et magnésien les différents processus contrôlant la minéralisation des eaux dans le Sud-est du Trarza.

**CONCLUSION GENERALE ET
PERSPECTIVES**

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

La zone d'étude est caractérisé par un climat de type saharien, qui détermine un domaine aride où les précipitations sont relativement peu abondantes (100 mm.an^{-1}).

Le secteur concerné par cette étude est situé dans le bassin sédimentaire côtier mauritanien. La série stratigraphique essentiellement formée de formations grés-argileuses, s'échelonne du Crétacé au Quaternaire. La géologie du secteur d'étude est connue grâce aux nombreux sondages de recherches d'eau. Elle présente d'importantes variations latérales et horizontales de faciès sédimentologiques et, est caractérisée par les dépôts de nature variée, témoignant des changements de conditions de sédimentation au cours des différentes périodes géologiques.

Les descriptions lithologiques du secteur étudié ont permis de mettre en évidence plusieurs nappes superposées dans des sédiments d'âge mio-pliocène, regroupés sous le nom de Continental Terminal.

Les forages d'exploitation dans la zone d'étude entre Boutilimit et R'kiz, captent la nappe subphréatique du Continental Terminal.

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

- le développement a permis d'améliorer la productivité des forages réalisés 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.

La réalisation des ouvrages si coûteux comme les forages hydrauliques, doit au moins s'accompagner de dispositions nécessaires permettant de bien les équiper afin de permettre le bon déroulement des développements et des essais de nappe.

L'étude de la chimie des eaux souterraines, a montré que les valeurs des températures des eaux sont proches de celles de la température atmosphérique ambiantes ainsi l'ouverture du système aquifère étudié. Les eaux ont des valeurs de pH neutres à légèrement basiques indiquant

que l'alcalimétrie est essentiellement contrôlée par les ions bicarbonates (HCO_3^-). Ces eaux sont moyennement minéralisées avec des conductivités électriques variant de 280 à 1214 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ et sont douces ($\text{TDS} < 1000 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$) (TDS entre 222 à 842).

La comparaison des deux diagrammes de Piper des campagnes 2008 et de 2006 des eaux du Continental Terminal de la région du Trarza, fait ressortir que les eaux souterraines à l'ouest de la région du Trarza, sont plus enrichies en chlorures et en calcium que celles de l'est de la partie est de la région

Le report des points d'eau dans les diagrammes de Chadha (1999) de dilution de l'eau de mer a permis d'une part de faire ressortir les différents faciès chimiques : chloruré sodique et potassique, sulfaté sodique et potassique et chloruré calcique et magnésien et d'autre par les différents processus contrôlant la minéralisation des eaux dans le Sud - est du Trarza.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ARANYOSSY J. F. (1989)** - Quelques exemples pratiques d'application des isotopes de l'environnement aux études hydrogéologiques. *Journal Hydrogéologie*. n° 3, pp. 159-166.
- ARANYOSSY J. F. (1993)** - Étude et modélisation de la formation des dépressions piézométriques. *Revue des Sciences de l'eau*, 6, pp.81-96
- ARCHAMBAULT J. (1987)** - Réflexions sur l'alimentation et l'évaporation des nappes phréatique en Afrique subsaharienne. *Journal Hydrogéologie*, n°2, pp.69-78.
- BRGM (1965)** - Études de la frange de transition entre les douces et les eaux saumâtre sur la bordure de la nappe du Trarza. *Edition BRGM*, 92p
- BRGM (1967)** - Études géochimiques des eaux souterraines de l'Afrique de l'ouest : nappes du sud-ouest Mauritanien. *Rapport BRGM*, 13-21p.
- BRGM (1986)** - Alimentation en eau potable de Nouakchott : étude pour le renforcement et l'extension du champ captant d'Idini. *Rapport de la SONELEC/Direction hydraulique*, 91 p.
- BRGM (1990)** - Alimentation en eau potable de R'kiz et de Magta-Lahjar : localisation des ressources en eaux souterraines. *Rapport Direction Hydraulique*, 23-45 p.
- BURGEAP (1978)** - Alimentation en eau potable de Nouakchott : étude préliminaire. *Rapport RIM/Direction Hydraulique*, 15-83 p.
- CARITE D. (1989)** - Géologie en Mauritanie. Document, *Edition EDISUD*, Paris, 284 p.
- CARUBA. R., DARS R. (1991)** - Géologie de la Mauritanie. *Edition CRDP Université de Nice Sofia Antipolis, France*. 302-313 p. pp. 19-22.
- CASTANY G. (1982)** - Principes et méthodes de l'hydrogéologie. *Edition Dunod*, Paris, France, 229-238 p.
- CGG. (1964)** - Étude de reconnaissance hydrogéologique dans la région du Trarza. *Rapport Direction de l'Hydraulique*. 43-75 p.
- CLOUET D'ORVAL M. (1981)** - Entre l'océan et le désert, à quel prix la capitale mauritanienne peut-elle assurer son alimentation en eau. *Bull. BRGM.*, (2) III, n° 4, pp. 357-368.
- DEING B. (1987)** - Les nappes déprimées d'Afrique de occidentale : une explication paléohydrogéologique. *Journal Hydrogéologie*, n° 3, pp. 99-108.

- DEMASSIEUX L. (1989)** - Les fondements de l'hydraulique. Evolution et gestion des ressources en eaux, 29 p.
- DEPAGNE J. (1963)** - Exploitation et interprétation des mesures piézométriques effectuées de juillet 1961 à mai 1963 dans le sud-ouest mauritanien, la vallée du fleuve Sénégal, le lac de R'kiz et le lac d'Aleg. *Rapport BRGM*, DAKAR 63A14 Orléans, France.
- DH/RIM (1990)** - Eaux souterraines de Mauritanie. *Rapport Direction Hydraulique*, 25-28p.
- DINDANE K.; BOUCHAOU L.; HSISSOU Y.; KRIMISSA M. (2003)** - Hydrochemical and isotopic characteristics of groundwater in the Souss Upstream Basin, southwestern Morocco. *Journal of African Earth Sciences* 36 (4), pp. 315 – 327
- DOUMOUYA I (1988)** - Synthèse des propriétés de recevoir des électrofaciès et de faciès sédimentologique de l'aquifère maastrichtien : établissement d'un outil d'équivalence. *Thèse de 3^{ème} cycle U.C.A.D*, Dakar, 123p
- ELOUARD P. (1962)** - Étude géologique et hydrogéologique des formations sédimentaires du Guebla mauritanien et de vallée du Sénégal. *Mémoire BRGM*, 102p.
- FINAUDE L. (1974)** - Traitement automatique des données e vent en altitude. *Publication ASECNA*. Série 1, n° 36.
- FORKASIEWICZ J. (1978)** - Essai de puits et par paliers de débit. Analyse et interprétation des données. *Rapport BRGM*, 28-31 p.
- GARCIA M. G.; DEL V.; HIDALGO M.; BLESIA M. A. (2001)** - Geochemistry of groundwater in the alluvial plain of Tucuman province, Argentina. *Hydrogeology Journal*, vol. 9(6), pp597.610.
- GAUCHER L. (1974)**- Pluies provoquées, consignes d'opération. *Rapport ASECNA*, 78 p.
- GUIRAUD R. (1988)** - L'hydrogéologie de l'Afrique. *Journal African Earth Sciences*, vol 7, n° 3, pp 519-523.
- KETCHEMEN B. (1988)** - Analyse des données hydrogéologiques du forage F7- 1 de Bignona (région de Ziguinchor). *Mémoire de DEA*, Département de Géologie, Univ. CAD, Dakar, Sénégal, pp 66.
- ILLY P. (1973)** - Etude hydrogéologique et géologique de la vallée du fleuve Sénégal. *Thèse de doctorat ès Sciences*, Univ. Avignon (France). 263 p.
- MASSY V. (1993)** - Eléments hydrogéologiques pour la caractérisation et la définition des conditions aux limites de l'aquifère sédimentaire du bassin du Trarza (Mauritanie). *Diplôme de 3^{ème} cycle postgrade*. Université de Neuchâtel (Suisse) 126-130 p.

- MISSION CHINOISE BEIJING (1982)** - Etude du deuxième champ de captage d'Idini pour l'alimentation en eau de Nouakchott. *Rapport interne MCB/MH*, 88 p.
- OMS (1993)** - Directives de qualité pour l'eau de Boisson. Volume 1-recommandations 2^{ème} Edition. Genève, 85 p.
- OULD ELYMENE (2007)** - Contribution à l'étude hydrogéologique et hydrochimique de l'aquifère du CT dans le sud-ouest du Trarza, *Mémoire de DEA*, Département de Géologie, Univ. CAD, Dakar, Sénégal, pp 99.
- PLUMMER L. N.; JONES B. F. ; TRUESDELL 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) pp.
- RISER J. (1991)** - Quaternaire alluvial éolien et littoral en Mauritanie, une riche trilogie, Géologie de Mauritanie. *CRDP* Université de Nice, France, 313 p.
- SEMEGA B. M. ; VIALANT A. ; J., OULD CHEIKH AABDALLAHI B. (1994)** - Approche hydrochimique et hydrogéologique de la nappe du Trarza (Mauritanie), étude du champ captant d'Idini. Colloque International "Eau, Environnement, Développement", Nouakchatt 20-22 mars 1994, pp. 46-56.
- SOLAGES S. (1979)** - Choix et caractéristiques des colonnes de captage. *Rapport BRGM*, 74 p.
- 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 Jacqueline). *Mémoire de DEA*, Département de Géologie, Univ. CAD, Dakar, Sénégal, 59-65 p.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE	1
Chapitre I : PRESENTATION GENERALE DE LA REGION DU TRARZA	
1. MILIEU PHYSIQUE.....	3
1.1. Situation géographique	3
1.2. Topographie et géomorphologie de la zone d'étude	3
1.2.1. Aftout Ech chargé	3
1.2.2. Aftout El Sahéli.....	4
1.2.3. Trarza	4
1.2.4. Chamama	5
1.3. Végétation.....	5
1.4. Contexte climatique.....	5
1.4.1. Pluviométrie	5
1.4.2. Température	7
1.4.3. Evaporation Piche	8
1.4.4. Humidité relative.....	8
2. CADRE GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE	9
2.1. Géologie	9
2.1. 1. Contexte géologique général.....	9
2.1.2. Géologie du secteur d'étude	10
2.1.2.1. Maastrichtien	11
2.1.2.2. Paléocène et Eocène.....	11

2.1.2.3. Mio-pliocène (ou Continental Terminal)	11
2.1.2.4. Quaternaire.....	12
2.2. Hydrogéologie	13
2.2.1. Contexte hydrogéologique général	13
2.2.2. Structure de l'aquifère du Continental Terminal (CT).....	13
2.2.3. Identification de l'aquifère du CT	15
2.2.3.1. Géométrie de l'aquifère du CT	18
a)- Situation du contact eau douce/eau salée	19
b)- Biseau sec.....	20
2.2.3.2. Paramètres hydrodynamiques	20
2.2.3.3. Piézométrie.....	22
a)- Ecoulement des eaux dans le sud du Trarza	22
b)- Alimentation de l'aquifère du CT.....	23
3. CONCLUSION.....	24
 Chapitre II : MATERIEL ET METHODES D'ETUDE	
1. METHODES ET MATERIELS D'ETUDE	26
1.1. Matériel de foration	26
1.2. Acquisition des données hydrochimiques	27
1.2.1. Prélèvements	27
1.2.2. Mesures physico-chimiques.....	27
2. RESULTATS ET DISCUSSIONS	28
2.1. Exécution des forages.....	28
2.1.1. Reconstitution de terrains traversés.....	28

2.1.2. Interprétation des essais de pompage.....	31
2.1.2.1. Essai de puits.....	31
a)- Courbe caractéristique [s=f (Q)]	31
b)- Détermination du débit critique et validation de l'expérimentation.	32
c)- Evaluation des pertes de charges par la méthode de Jacob [courbe S/Q = f(Q)].....	33
d)- Débit d'exploitation maximum des ouvrages	35
e)- Productivités des forages.....	37
2.1.2.2. Essais de nappe	37
a)- Interprétation par la méthode bilogarithmique	37
b)- Interprétation par la méthode semi-logarithmique de JACOB.....	38
2.2. Caractéristiques hydrochimiques des eaux du Continental Terminal	41
2.2.1. Caractérisation physico-chimique des eaux	41
2.2.1.1. Caractéristiques physiques des eaux	41
a)- Températures	41
b)- pH.....	41
c)- Conductivité électrique et minéralisation totale	41
2.2.1.2. Classification chimique des eaux CT.....	42
2.2.2. Origine et processus de minéralisation des eaux : Diagramme de Chadha (1999).....	45
2.3. Qualité des eaux souterraines	48

3- CONCLUSION..... 49

CONCLUSION GENERALE

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ANNEXES

LISTE DES FIGURES

- Figure 1 :** Localisation de la zone d'étude (le sud-est de la région du Trarza).....
- Figure 2 :** Pluviométrie moyenne mensuelle aux stations de Boutilimit et de Rosso (1968 - 2007).....
- Figure 3 :** Evolution interannuelle de la pluviométrie aux stations de Boutilimit, et de Rosso (1968 - 2007).....
- Figure 4 :** Températures moyennes mensuelles aux stations de Boutilimit et de Rosso (1968 - 2007).
- Figure 5 :** Evaporation moyenne mensuelle aux stations de Boutilimit et de Rosso (1968 - 2007).....
- Figure 6 :** Humidité relative moyenne mensuelle aux stations de Boutilimit et de Rosso (1968 - 2007).
- Figure 7 :** Schéma de localisation des grands ensembles géologiques de la Mauritanie. (Caruba et Dars, 1991 modifié).....
- Figure 8 :** Coupe géologique et hydrogéologique du bassin côtier entre Nouakchott et Boutilimit (Guiraud, 1988).....
- Figure 9 :** Carte hydrogéologique schématique de la Mauritanie (Carité, 1989).....
- Figure 10 :** Nappe Continental Terminal Du Trarza (Illy, 1973 modifié)
- Figure 11a:** Coupe hydrogéologique du CT dans le sud-ouest du Trarza (BRGM, 1993 modifié).....
- Figure 11b:** Coupe hydrogéologique dans la nappe du Trarza entre Idii et Boutilimit (BRGM, 1986 modifié).....
- Figure 12 :** Carte piézométrique de la nappe du CT au sud-est du Trarza (CNRE, 2002 modifié).....
- Figure 13 :** Dispositif d'un atelier de forage au rotary (*in ketchemen, 1988*)
- Figure14 a :** Coupes lithologiques des forages de Demame et Vass.
- Figure14 b :** Coupes lithologiques des forages de Bir issa, Ebyadh Elma
- Figure 15 :** Courbe caractéristique des forages (Demame, Vass, Ebyadh Elma et Bir issa) : rabattement en fonction du débit : $s = f(Q)$
- Figure16 :** Détermination des constantes de Jacob (B et C) sur les forages de Demame, Vass, Ebyadh Elma et Bir issa.
- Figure 17a :** Détermination de la transmissivité par la méthode bi-logarithmique (module Theis).....

- Figure 17b** : Détermination de la transmissivité par la méthode semi-logarithmique de Jacob (Descente).....
- Figure 17c**: Détermination de la transmissivité par la méthode semi-logarithmique de Jacob (Remontée)
- Figure 18** : Diagramme de Piper pour les eaux du CT de Trarza (campagnes 2008 et 2006 à l'ouest du Trarza)
- Figure 19**: Classification et processus de minéralisation des eaux souterraines par le diagramme de Chadha (campagnes 2007 et 2008).....
- Figure 20**: Rapport $\text{SO}_4^{2-} / \text{Cl}^-$ en fonction de la teneur en Cl^- (méq/l) des différent points d'eau.....
- Figure 21**: Rapport $\text{Mg}^{2+} / \text{Ca}^{2+}$ en fonction de la teneur en Cl^- (méq/l) des différent points d'eau.....

LISTE DES TABLEAUX

- Tableau 1 :** Caractéristiques hydrodynamiques des forages captant le CT dans le sud-est du Trarza (BRGM, 1990).....
- Tableau 2 :** Essais de puits par paliers de débits courts durés dans les quatre forages.....
- Tableau 3a:** Récapitulation des essais par palier des quatre forages
- Tableau 3b:** Récapitulation des essais puits pour les quatre forages
- Tableau 4:** Déterminations les productivités des ouvrages.....
- Tableau 5a:** valeurs de transmissivités obtenues avec la méthode bi-logarithmique
- Tableau 5b:** valeurs de transmissivité obtenues avec la méthode semi-logarithmique
- Tableau 6:** Matrices de corrélations des données physico-chimiques des eaux de la nappe du Continental Terminal dans le Sud-est du Trarza.....
- Tableau 7:** Rapports caractéristiques et indices d'échange de base (I.E.B.) des eaux de la nappe du CT dans la région du Trarza
- Tableau 8:** Normes de potabilité de l'O.M.S. (1993) et paramètres physico-chimiques de la nappe du Continental Terminal dans le sud-est du Trarza entre Boutilimit et R'kiz.....

ANNEXE 1 : Logs des forages utilisés dans les coupes hydrogéologique

Idini SE4 profond

Altitude	Epaisseur	Mur	Lithologie
Quaternaire			
9	7	7	Sable fins argileux de surface
-4	13	20	Sables blancs grossiers et graveleux
Continental Terminal			
-10	6	26	Idem plus fin
-14	4	30	Sables roux fin à graveleux
-25	11	41	Sable ocre fin
-26	1	42	Argile sableuse ocre
-64	38	80	Sable très fin un peu argileux
-66	2	82	Sable à gravillons de latérites
-80	14	96	Grès argileux (argiles blanche carmin à ocre)
-87	7	103	Argile sableuse bleue noire à passées gréseuses
-92	5	108	Argile sableuse (argile bleue à grise)
-94	2	110	Argile bariolée carmin
-112	18	128	Grès argileux (argile grise – jaune) et gravillons latéritiques abondants
-114	2	130	Argile grise
-132	18	148	Grès argileux plus argileux vers la base (argile noire au sommet devenant progressivement grise vers la base)
-164	14	162	Sable assez grossier argileux
-154	8	170	Alternance argile et sable grossier
Eocène			
-229	75	245	Alternance calcaire marneux et argile sableuse ou marneux
-365	140	385	Argile plus ou moins calcaire et sableuse (gréseuse) à passées de silix
Paléocène			
-408	39	424	Alternance argile grise et calcaire gris
Maastrichtien			
-412	4	428	Sable rose grossier
-416	4	432	Argile ocre extrêmement collante
-464,6	48,6	480	Sable rose grossier au sommet puis très fin fortement argileux
Socle			
-464,6		480	Schiste

Ain Salama

Altitude	Epaisseur	Mur	Lithologie
Quaternaire			
44	1	1	Sable fins rose
42	2	3	Sables rougeâtre moyen
41	1	4	Grès
40	1	5	Sables moyen rose
35	5	10	Argile jaune
31	4	14	Gravier siliceux
Continental Terminal			
-3	34	48	Argile jaune sableuse
-5	2	50	Sables rougeâtre moyen
-6	1	51	Argile jaune
-10	4	55	Sables rougeâtre moyen
-15	5	60	Argile jaune sableuse
-24	9	69	Argile rose rouge et blanche
-29	5	74	Sable fin rose
-32	3	77	Sable très argileux
-36	4	81	Sable ocre jaune moyen

-38	2	83	Sable ocre fin avec traces d'argiles
-40	2	85	Sable moyen à grossier jaune
-46	6	91	Sable ocre fin avec traces d'argiles
Eocène			
-55	9	100	Argile blanche

Elb Adress

Altitude	Epaisseur	Mur	Lithologie
Quaternaire			
36	4	4	Grès blanchâtre tendre
31	5	9	Sable grossier et gravier siliceux latérisé
28	3	12	Sable et graviers quartzeux
Continental Terminal			
23	5	17	Sable argileux ocre
22	1	18	Latérite et sable
13	9	27	Argile très sableuse
12	1	28	Sables argileux
9	3	31	Argile sableuse jaune
-2	11	42	Argile sableuse et latérite
-7	5	47	Sable fin jaune et latérite
-11	4	51	Non récupéré (foration en perte totale)
-13	2	53	Sable fin rose
-15	2	55	Argile rose et blanche
-27	12	67	Argile jaune et rose vers 63m
-37	10	77	Sable moyen plus grossier à 73 et 74m
Eocène			
-51	14	91	Argile jaune
-56	5	96	Calcaire
-73	17	113	Argile plastique grise bleue
-78	5	118	Calcaire (dur)
-80	2	120	Argile jaune foncée

Forage Rkiz 4

Quaternaire			
20	10	10	Sable
Continental Terminal			
-25	5	15	Sable argileux
Eocène			
-70	45	60	Argile
Maastrichtien			
-100	30	90	Argile silteuses
-110	10	100	Socle

Forage Rkiz 6

Continental Terminal			
-20	40	40	Sable argileux
Eocène			
-80	60	100	Argileux
Maastrichtien			
-300	220	320	Argile silteuses
-310			Socle

ANNEXE 2 : RESULTATS DES ESSAIS DE POMPAGE

1.. Méthodes utilisées pour l'exécution des forages

En fonction de la nature des terrains à forer, nous avons utilisé la technique du rotary à la boue bentonite.

1..1. Technique de forage au rotary

C'est la technique la plus utilisée et son procédé repose sur le broyage et l'abrasion des roches par l'outil. Il permet de forer de grandes profondeurs par jour et de faire des «logs» de diagraphies avant le tubage.

1.1.1. Principe

Un outil (tricône) est monté au bout d'une ligne de sonde qui comprend 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 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.

1.1.2. Boue bentonitique

Elle est constituée principalement par une argile montmorillonite. La bentonite joue un rôle important dans l'exécution des forages hydrauliques notamment par leur propriété de s'hydrater et d'augmenter considérablement de volume lorsqu'elle est dispersée dans l'eau.

Les caractéristiques de cette boue (viscosité, pH, etc.) peuvent être mesurées au cours de la foration. Une bonne viscosité permet d'avoir un outil bien dégagé et de réduire les pertes de charges dans le train de tige. Elle est mesurée par un viscosimètre.

La boue peut avoir comme fonction :

- l'évolution et l'entraînement des débits de forage ;
- le maintien des paroi du trou de sonde : c'est le "cake", dépôt consolidant les parois du trou ;
- le nettoyage et le refroidissement de l'outil ;
- la mise en évidence des venues d'eau ;

- le maintien des venues d'eau intempestive dans les terrains.

1.2.. Equipement des forages

1.2.1. Echantillonnage des cuttings

Le prélèvement d'échantillons intacts s'effectue lors d'un carottage continue. Généralement, le suivi des roches forés s'effectue lors de l'examen des cuttings issus du broyage des roches par l'outil de tête du forage et remontés en surface par la boue qui circule dans le trou. Lorsque celui-ci est réalisé des appareils de mesure peuvent être introduits et servent à mesurer en continu le long des parois les caractéristiques physiques des roches forées.

L'échantillonnage consiste à prélever lors de la foration chaque 2 m, ou parfois chaque 3 m, les cuttings sortant jusqu'au dernier mètre de foration (dernière tige) et finalement reconstituer une coupe lithologique de forage par l'ensemble des échantillons prélevés. C'est ainsi que le prélèvement des échantillons réalisés dans ces forages permet de connaître en particulier la position du réservoir, la nature des formations imperméables et le type de réservoir : libre, confiné, etc.

1.2.2. Choix du tubage

Le tubage utilisé pour ces quatre forages est en PVC de diamètre compris entre 5" (140 mm) et 6" (152 mm). La longueur de la chambre de pompage dépend du niveau maximum rabattu prévisionnel ; elle doit dépasser de quelques mètres le niveau dynamique de l'eau dans le forage.

Il est souhaitable de respecter les règles suivantes (Solage, 1979) :

- laisser au moins un espace de un (1) pouce (25,4 mm) entre le diamètre de pompe et le diamètre intérieur du tubage ;
- laisser également de l'espace entre les parois nues du trou et le tubage plein, notamment en prévision de l'espace annulaire pour une cimentation future.

En fonction du dé bit escompté et compte tenu des groupes électropompes à moteur immergé utilisé, le tableau 2 permet de choisir le tubage de la chambre de pompage. La colonne d'exhaure doit être de même diamètre que la crépine. Pour éviter la corrosion d'origine électrique, le tube d'exhaure est séparé de la crépine par un raccord diélectrique.

Tableau : Diamètres des chambres de pompage utilisés en forage d'eau (Doumouya, 1988)

Débit (m ³ /h)	5 - 20	20 - 50	50 - 150	150 - 200	200 - 250	250 - 300	300-400
Diamètres des pompes	95 mm 3 ^{3/4}	188 mm 7 ^{3/32}	241 mm 9 ^{1/2}	241 mm 9 ^{1/2}	241 mm 9 ^{1/2}	318 mm 12 ^{1/2}	318 mm 12 ^{1/2}
Diamètres de la chambre de pompage	113 mm 4 ^{1/2}	216 mm 8 ^{5/8}	269 mm 10 ^{3/4}	294 mm 11 ^{3/4}	334 mm 13 ^{3/8}	400 mm 16"	400 mm 16"

1.2.3. Le captage

a)- Le choix des crépines

L'ouverture des crépines doit permettre le passage et l'élimination pendant le développement du forage des éléments les plus fins de 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} ;
- JOHONSON (USA) : $e = D_0 = 7d_{10}$;
- JOHONSON (FRANCE) : $e = d_{60}$.

«D» représente un diamètre des grains de l'aquifère

«d» 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 de vides des crépines soit la plus grande possible.

Les crépines utilisées dans ces forages sont de type PVC et présentent une résistance à la corrosion intercrystalline et sont bien adaptées aux formations aquifères peu épaisses et fines ou assez fines.

b)- Gravier additionnel et cimentation

Le massif filtrant est de type siliceux, propre à élément arrondi dépourvu d'éléments fins argileux. Son diamètre se situe entre 1 à 1,6 mm. Ce gravier joue les rôles de limiter les pertes de charges et d'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 supérieur, descendue dans l'espace annulaire.

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

$$V = H/2 (d^2_1 - d^2_2)$$

H = hauteur de cimentation ;

d₁ = diamètre de foration ;

d₂ = diamètre du tubage.

1.2.4. Equipement des forages et coupes techniques

Les caractéristiques des forages sont résumées dans les figures des coupes lithologiques et techniques (Figure 14a et b). Les coupes techniques définitives sont différentes des coupes techniques prévisionnelles. Cela est dû aux énormes difficultés rencontrées au cours de l'exécution de ces ouvrages.

1.3. Développement et essais de pompage

On a procédé à un développement et à un essai de pompage de réception provisoire après l'équipement des forages.

1.3.1. Développement

Le développement d'un forage d'eau consiste entre autre d'améliorer la perméabilité de la formation aquifère située autour de la crépine, la capacité spécifique de l'ouvrage, d'éliminer le « cake » et tout ce qui a pénétré dans le forage et d'éviter les venues de sables pouvant endommager la crépine, la pompe dues souvent au colmatage par le sable et le tassement du massif filtrant. Divers méthodes de développement existent mais les plus utilisées sont les suivantes :

a)- Traitement chimique

Aussitôt après le gravillonnage et la cimentation, trois traitements à l'hexamétaphosphate de sodium ont été effectués. Pour chaque traitement, on a utilisé une solution à 25 %. Ces traitements permettent la défloculation de la boue colmatée au fond et autour du trou et la dispersion des argiles du terrain.

b)- Développement par pompage alterné

On met le forage en production par pompage et on provoque des arrêts brusques de la pompe. Il se crée ainsi des variations brutales de pression qui ont pour effet de nettoyer la formation.

c)- Développement par pistonnage

On utilise un piston actionné verticalement dans les deux sens à l'intérieur d'un forage tubé et crépiné.

Dans un mouvement de descente, le piston comprime la nappe. Il refoule dans le terrain les fines particules qui n'ont pas été entraînées par l'opération.

Dans un mouvement de remontée, le piston crée une dépression qui attire l'eau et le sable fin de la formation vers la crépine. Ce sable qui va traverser la crépine pourra être extrait par cuillérage ou par air lift.

d)- Développement à l'air lift

Il consiste à introduire une colonne d'eau et une couche d'air dans le captage. A l'aide d'un compresseur, de l'air est introduit à travers la colonne d'air ce qui crée une pression résiduelle au font de l'ouvrage. Cette pression permet de remonter l'eau et les sédiments à la surface.

e)- Développement à la pompe immergée

Dans ce cas, on peut mesurer le débit et le rabattement en même temps. Ce procédé s'effectue après le dévisage du filetage droite gauche ou la baïonnette et le désherbage des tubes de largage.

1.3.2. Essais de pompage

Un pompage d'essai consiste à p relever dans un ouvrage un débit et à suivre simultanément les variations de niveau de la nappe sollicitée dans un ou plusieurs ouvrages satellites, située à diverses distances de l'axe du puits d'essai, et généralement dénommés « piézomètre ». Il n'est pas interdit, bien au contraire, de suivre également les variations de niveau dans l'ouvrage de prélèvement (Demassieux, 1989).

Son but essentiel est de s'assurer de la bonne réalisation des travaux avant toute acceptation de la part des commanditaires. Ainsi deux types d'essai sont à distinguer : les essais de puits et les essais de nappe.

a)- Essais de puits

Ces essais sont exécutés pour obtenir des renseignements sur les caractéristiques de l'ouvrage. On peut ainsi déterminer le débit d'exploitation pour choisir le type de pompe et estimer le coût du pompage.

Quatre paliers de débit d'une heure de pompage chacun suivi d'une heure de remontée ont été effectués. A la fin de chaque palier, on note le débit (Q) et le rabattement mesuré (annexe 2 Tableau 2).

b)- 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 de 42 h. Les rabattements sont mesurés aussi bien pendant la descente que la remontée (annexe 2 Tableau 3a).

Ils permettent de déterminer les caractéristiques hydrodynamiques d'un aquifère comme les conditions aux limites, les hétérogénéités, la drainance, la transmissivité et le coefficient d'emmagasinement.

A cause de l'étroitesse des sites et de faibles quantités d'eau souterraine dans la région du Trarza, il a été difficile d'exécuter un pompage de longue durée. Néanmoins, on est

parvenu à réaliser un essai de 24 heures aux forages de Vass, de Demame, de Bir issa et d'Ebyadh Elma (voir annexe 2, Tableau 3b).

Tableau 1 : Données des forages d'Hydroconseil 2007 2008 dans le sud- est du Trarza

Forage	Longitudes	Latitudes	Altitude	N.S	Con.µS.cm ⁻¹	T°C	pH	Date
Vass	14°38'54"	17°31'10"		67,47	675	29,1	7,44	20/11/2007
Demame	14°36'58"	17°29'57"		65	434	28,2	7,2	02/11/2007
Bir issa	15°22'34"	17°01'1,3"		37,3	1000	28,7	7,5	17/12/2007
Ebyadh elma	15°06'51"	17°36'52"		55,95	230	30,2	6,77	17/01/2008

Tableau 2 : Résultats des mesures de terrain des essais de puits sur les différents forages

Forages	1érepalier		2émepalier		3émepalier		4émepalier	
	Q(m ³ .h ⁻¹)	s (m)	Q(m ³ .h ⁻¹)	s (m)	Q (m ³ .h ⁻¹)	s(m)	Q(m ³ .h ⁻¹)	s (m)
Vass	2,5	1,33	5	2,76	7,5	4,35	9	4 ,35
Demame	3	1,14	6	2,24	8,8	2,96	12	3,96
Bir issa	4,1	0,49	8	0,84	11,1	1,04	14	1 ,3
Ebyadh elma	4,47	0,5	8,12	0,91	10,6	1,16	12,67	1,4

Tableau 3a : Résultats des meures de terrain d'essai de nappe sur les différents forages

Résultas des essais de pompage	Débit de pompage (constant) (m ³ /h)	Niveau statique/sol (m)	ND/sol (m)	s(m)
Vass	9	67,47	71,84	4,37
Demame	12	65	69	4
Bir issa	14	37,7	39,6	1,3
Ebyadh elma	13	55,95	57,39	1,44

Tableau 3b : Résultats des meures de terrain des essais de nappe sur les différents forages (Descente)

Vass		Demame		Bir issa		Ebyadh elm	
t (mn)	s (m)	t (mn)	s (m)	t (mn)	s (m)	t (mn)	s (m)
0	0	0	0	0	0	0	0
1	3,13	1	3,85	1	1,23	1	1,45
2	3,98	2	3,94	2	1,24	2	1,45
3	4,06	3	3,95	3	1,24	3	1,45
4	4,17	4	3,95	4	1,24	4	1,45
5	4,25	5	3,96	5	1,25	5	1,45
6	4,25	6	3,97	6	1,25	6	1,45
7	4,27	7	3,97	7	1,25	7	1,45
8	4,23	8	3,97	8	1,25	8	1,44
9	4,29	9	3,97	9	1,25	9	1,44
10	4,31	10	3,97	10	1,25	10	1,43
15	4,33	12	3,97	12	1,25	12	1,43
20	4,33	14	3,97	14	1,25	14	1,43
25	4,33	16	3,97	16	1,25	16	1,43
30	4,33	18	3,97	18	1,25	18	1,43
35	4,33	20	3,97	20	1,25	20	1,43
40	4,35	25	3,96	25	1,25	25	1,43
45	4,38	30	3,96	30	1,26	30	1,43
50	4,38	35	3,96	35	1,26	35	1,43
55	4,38	40	3,96	40	1,26	40	1,43
60	4,38	50	3,96	50	1,27	45	1,43
70	4,38	55	3,96	55	1,28	50	1,43
80	4,38	60	3,96	60	1,28	55	1,43
90	4,36	70	3,96	70	1,28	60	1,43
100	4,36	80	3,96	80	1,28	70	1,43
110	4,36	90	3,96	90	1,28	80	1,43
120	4,36	105	3,96	105	1,28	90	1,43
130	4,36	120	3,96	120	1,28	105	1,43
140	4,38	135	3,96	135	1,29	120	1,43
150	4,38	150	3,95	150	1,29	135	1,43
165	4,38	165	3,94	165	1,29	150	1,43
180	4,38	180	3,94	180	1,29	165	1,43
210	4,38	210	3,93	210	1,29	180	1,43
240	4,38	240	3,93	240	1,29	210	1,43
270	4,38	270	3,93	270	1,29	240	1,42
300	4,38	300	3,92	300	1,28	270	1,42
360	4,38	360	3,92	360	1,27	300	1,41
420	4,38	420	3,91	420	1,26	360	1,41
480	4,41	480	3,9	480	1,26	420	1,41
600	4,41	600	3,9	600	1,26	480	1,41
720	4,41	720	3,9	720	1,26	600	1,42

840	4,41	840	3,9	840	1,28	720	1,44
960	4,44	960	3,9	960	1,28	840	1,45
1080	4,44	1080	3,9	1080	1,29	960	1,45
1200	4,44	1200	3,9	1200	1,29	1080	1,44
1320	4,44	1320	3,9	1320	1,3	1200	1,43
1440	4,41	1440	3,9	1440	1,3	1320	1,45

ANNEXE 3 : RESULTATS DES ANALYSES CHIMIQUES DES EAUX SOUTERRAINES

Tableau 1 : Moyennes des résultats hydrochimiques des eaux souterraines entre Boutilimit et R'kiz (campagnes 2007 - 2008) (les ions en méq.l⁻¹)

Longitudes	Latitudes	Localités	Désignation	pH	T(C°)	C.E ($\mu\text{S.cm}^{-1}$)	M20 (mg.l ⁻¹)	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻
14°39'13"	17°31'42"	Boutilimit	Rabia	7,4	29,5	530	246	1,28	1,2	2,75	0,43	2,08	1,3	1,84	0,16
14°36'58"	17°29'57"		Demame	7,2	30	434	296	1,08	0,84	2,25	0,28	1,76	1,4	1,12	0,01
14°35'58"	17°29'37"		Tiniarg	7,4	30,1	619	455	1,6	1,08	3,2	0,52	2,88	1,3	1,8	0,09
14°25'09"	17°47'59"		N'toujei	7,1	29,7	625	403	1,6	1,36	3,1	0,35	2,32	1,2	2,4	0,2
14°13'00"	17°34'00"		Bou Sdera	7,1	29,3	535	164	1,44	0,96	2,85	0,29	2,32	1,7	1,24	0,06
14°36'07"	17°23'16"		N'Teichit	7,1	28,9	535	382	1,4	1,4	2,78	0,25	2,36	1,8	1,44	0
14°39'07"	17°37'10"		Ain Salama	7,2	29,1	761	481	2,04	1,64	3,55	0,35	4,16	1,4	1,92	0
14°26'50"	17°35'24"		Elb Adress	7,2	28,1	573	371	1,36	1,04	3,08	0,32	2,36	1,2	1,92	0,14
14°47'17"	17°37'39"		El Vourat	7	29	928	571	3	1,88	4,03	0,37	4,92	1,2	2,84	0
14°12'34"	17°15'55"		Bir Elbarka	7,2	27,6	280	222	0,76	0,84	1,3	0,22	1,04	1,2	1	0
15°12'36"	16°55'48"		R'kiz	R'kiz F1	7,5	28,2	988	670	3,84	2,16	4,05	0,42	4,44	1,6	3,6
15°22'34"	17°01'1,3"	Bir issa		7,5	28,7	1000	653	2,96	1,32	5,3	0,45	6,16	2,35	0,96	0,29
15°04'47"	16°59'53"	Keur modi		7,4	29,4	845	534	1,84	1,2	5,2	0,45	4,8	2,4	0,92	0,35
15°03'53"	17°05'20"	Legoueissi		7	29	767	490	2,24	1,28	3,7	0,36	4,32	1,35	1,6	0,12
15°52'51"	17°11'59"	Ajoueir		7,4	30	702	432	1,72	0,88	4,05	0,4	4,48	2,05	0,36	0
15°08'42"	17°18'43"	Maatamolana		8,05	29,5	708	397	2,5	0,4	3,43	0,25	4,3	2,4	0,14	0,24
15°02'00"	16°49'50"	Jleifty		7,6	29,1	1214	844	4,16	2,24	6	0,52	4,8	2	5,88	0
		Eau de fleuve		7,69	30	74	69	0,3	0,3	0,2	0,1	0,29	0,43	0,2	0
		Eau de mer				45125	38275	24	120	462	12	625	2,3	58	

Tableau 2 : Moyennes des résultats hydrochimiques des eaux souterraines entre Tiguent et Rosso 2006 (les ions en méq.l⁻¹)

Longitudes	Latitudes	Localités	Désignation	pH	T(C°)	C.E (µS.cm ¹)	M20 (mg.l ⁻¹)	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Br ⁻	NO ₃ ⁻
16°03'58"	17°13'50"	TIGUENT	T1	6,37	29,4	1591	1207	4,85	3,9	7,98	0,3	13,2	0,32	3,01	0,022	0,38
16°2'55"	17°10'38"		T2	6,82	28,8	1536	1165	4,97	4,2	6,27	0,4	11,8	1,26	2,28	0,014	0,39
15°59'17,8"	17°11'10,8"		T3	7,17	28,3	1224	929	3,6	3	5,92	0,3	9,54	0,93	2,07	0,015	0,24
16°02'44"	17°11'42"		T4	7,03	29	615	512	1,74	1,6	3	0,2	4,38	0,67	1,03	0,007	0,14
16°3'38"	17°7'27"	HASY TURK	H1	7,35	27,7	3538	2683	17,2	9,9	12	0,5	35,2	1,53	2,25	0,04	0,31
16°3'32"	17°7'38"		H2	7,25	28,2	956	725,1	2,58	1,7	5,1	0,3	7,38	0,77	1,74	0,014	0,12
16°6'35"	16°51'1"	TIIGOMATINE	M1	6,81	28,7	905	687	2,21	2	7,8	0,2	7,11	0,54	1,68	0,012	0,16
16°2'28"	16°55'15"		M2	7,92	27,7	3168	2403	12,3	10	12	0,8	26,2	2,97	4,12	0,034	0,96
16°4'27"	16°53'57"		M3	7,76	29	1478	1122	4,95	3,5	7,5	0,7	9,11	2,64	3,51	0,012	0,69
16°3'46"	16°41'55"	TAWVIQ	V1	6,61	28,6	525	520	1,94	0,7	2,4	0,1	3,34	1,05	0,82	0,005	0,04
16°3'38"	16°42'16"		V2	7,67	28,6	550	512	2,01	1	2,6	0,2	3,72	1,53	0,63	0,005	0,03
16°1'42"	16°40'29"	LBEIRDI	B1	7,29	29,4	697	449,6	2,46	1,7	2,6	0,2	4,28	0,64	1,08	0,004	0,67
16°1'49"	16°40'17"		B2	7,44	28,1	874	664	3,19	1,8	3,7	0,2	5,25	1,23	1,49	0,006	0,53
15°56'42"	16°37'54"	TENWERAT	W1	7,96	29,2	729	522	2,92	2,4	2,7	0,3	3,44	1,28	2,98	0,005	0,3
15°54'10,08"	16°36'39"		W2	7,28	29	880	667	3,93	2,5	3,5	0,3	4,55	0,76	4,03	0,008	0,2
15°51'23"	16°34'1"	PK 10 DE ROSSO	K1	7,67	28,7	1767	1240	5,57	3,3	10	1,2	12,2	4,03	3,47	0,032	0,41
15°51'1"	16°34'23"		K2	7,58	29	1167	885	3,79	2,5	5,45	0,6	6,84	2,66	1,8	0,009	0,06
15°51'12"	16°34'2"		K3	7,04	27,9	1029	781	2,77	2,6	4,09	0,6	3,21	1,43	5,32	0,006	0,06
		Fleuve Sénégal	Rf	7,69	26,2	74	69	0,3	0,3	0,2	0,1	0,29	0,43	0,2	0	0
		Eau de mer				45125	38275	24	120	462	12	625	2,3	58	1,85	

