

# SOMMAIRE

<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>1</b>
<b>CHAPITRE I : CADRE PHYSIQUE DE LA ZONE D'ETUDE .....</b>	<b>3</b>
I.1. SITUATION GEOGRAPHIQUE.....	3
I.2. RELIEF.....	3
I.3. SOLS.....	5
I.4. VEGETATION.....	5
I.5. HYDROGRAPHIE.....	5
I.6. CLIMATOLOGIE.....	6
I.7. CONCLUSION.....	11
<b>CHAPITRE II : SYNTHESE GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE .....</b>	<b>12</b>
II.1. GEOLOGIE.....	12
II.2. HYDROGEOLOGIE.....	18
II.3. CONCLUSION .....	22
<b>CHAPITRE III : HYDROCHIMIE DE LA NAPPE DES SABLES DU PALEOCENE/EOCENE DE KAEDI.....</b>	<b>23</b>
III.1. ACQUISITION DES DONNEES.....	23
III.2. DISCUSSIONS DES RESULTATS.....	25
III.3. CONCLUSION .....	48
<b>CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES.....</b>	<b>50</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>52</b>
<b>LISTES DES FIGURES ET DES TABLEAUX</b>	
<b>ANNEXES</b>	

# **INTRODUCTION GENERALE**

# INTRODUCTION GENERALE

Dans beaucoup de régions arides comme la Mauritanie, les nappes continentales sont soumises aux effets de la dégradation de la qualité chimique des eaux dus à une surexploitation et aux conditions climatiques défavorables. On peut également ajouter les phénomènes de pollution anthropique dus à l'action de l'homme sur l'environnement (occupation des sols et activités agropastorales). De nos jours, la pollution devient de plus en plus un facteur contraignant dans la gestion des ressources en eau souterraine dans les grandes villes des pays en développement. Le problème est plus ressenti dans les régions du sud de la Mauritanie à fortes densités de populations et d'activités agropastorales.

La ville de Kaédi, capitale de la région du Gorgol est située au sud de Nouakchott à 437 km des cotes mauritaniennes. L'approvisionnement en eau des populations est assuré essentiellement à partir des eaux souterraines (nappes de la vallée du fleuve Sénégal et des sables du Paléocène/Eocène de Kaédi) présentes dans cette partie du bassin et ceci par le biais de puits villageois et forages.

Depuis 1996, aucune étude hydrochimique significative des eaux souterraines n'a été entreprise dans le secteur de la ville de Kaédi. C'est dans cette optique que le Centre national des Ressources en Eau (CNRE) de la Mauritanie a inclut un volet hydrochimique dans le cadre du projet amélioration de la connaissance des localités et des points d'eau et de disposer d'une banque de données dans la région du Gorgol.

Le but principal de cette étude est de contribuer à la connaissance du comportement hydrochimique de la nappe des sables du Paléocène/Eocène dans le secteur de la ville de Kaédi. Elle s'est assignée pour objectifs spécifiques de préciser :

- l'origine et l'évolution de la minéralisation des eaux de la nappe ;
- et la qualité chimique des eaux de la nappe.

Cette étude est structurée en trois chapitres :

- dans le premier chapitre, nous présenterons de façon exhaustive le cadre physique du milieu d'étude. La situation géographique, les facteurs climatiques, la géomorphologie et

l'hydrologie sont décrits en se basant essentiellement sur les travaux antérieurs et sur les données climatiques fournies par les services de la direction nationale de la météorologie ;

- le deuxième chapitre est consacré à la synthèse des connaissances géologiques et hydrogéologiques locales en s'appuyant sur les études antérieures menées sur le système aquifère des sables du Paléocène/Eocène dans la région du Gorgol ;

- enfin, le chapitre 3 présentant les différents résultats de cette étude, se divise en deux points : le premier point résume les différentes méthodes et techniques d'analyses et de collectes utilisées, pour les campagnes de terrain, les travaux de laboratoire et le traitement des données et le deuxième point présente la caractérisation physico-chimique, les origines et processus de la minéralisation et qualité chimique des eaux de la nappe sont discutés.

Pour terminer, nous réunirons tous les enseignements tirés de cette étude sous forme de conclusion générale et les perspectives d'extension de ces travaux pour une gestion rationnelle et durable des eaux souterraines de la ville de Kaédi présentées.



**Chapitre I :**  
**CADRE PHYSIQUE DE LA**  
**ZONE D'ETUDE**

# **CHAPITRE I : CADRE PHYSIQUE DE LA ZONE D'ETUDE**

## **I.1. SITUATION GEOGRAPHIQUE**

La ville de Kaédi, capitale régionale de la région du Gorgol, est située à 437 km au sud de Nouakchott, entre les latitudes 15°35' et 16°30' Nord et les longitudes 12°56' et 13°44' Ouest (Fig. 1).

Elle est limitée au sud par le département de Maghama, au nord-ouest et au nord par la région de Brakna, à l'ouest par le fleuve Sénégal et à l'est par les départements de M'bout et de Mouguel.

## **I.2. LE RELIEF**

Du point de vue morphologique, on distingue deux grands ensembles morphologiques (Michel, 1956).

### **I.2.1. la vallée du fleuve Sénégal et ses affluents**

Elle correspond à l'entaille par le fleuve des formations du Continental Terminal. Cette entaille atteint parfois l'Eocène moyen. La zone non inondable est connue sous le nom de Diéri et correspond à un entablement Eocène, tandis que la zone inondable est connue sous le nom de Walo et correspond à une accumulation d'alluvions au dessus de l'Eocène.

De façon générale, la vallée du fleuve constitue une région déprimée sans relief. Il existe parfois des dunes témoins en bordure de la plaine alluviale. Les seuils rocheux n'affleurent que dans le lit mineur et le recouvrement d'alluvions forme un manteau uniforme dans toute la vallée.

### **I.2.2. la région des plateaux et hauteurs tabulaires du Gorgol**

Cette zone correspond à un plateau légèrement entaillé par les vallées des oueds. Parfois, ce démantèlement est très accentué et le plateau ne subsiste que sous forme de collines tabulaires.

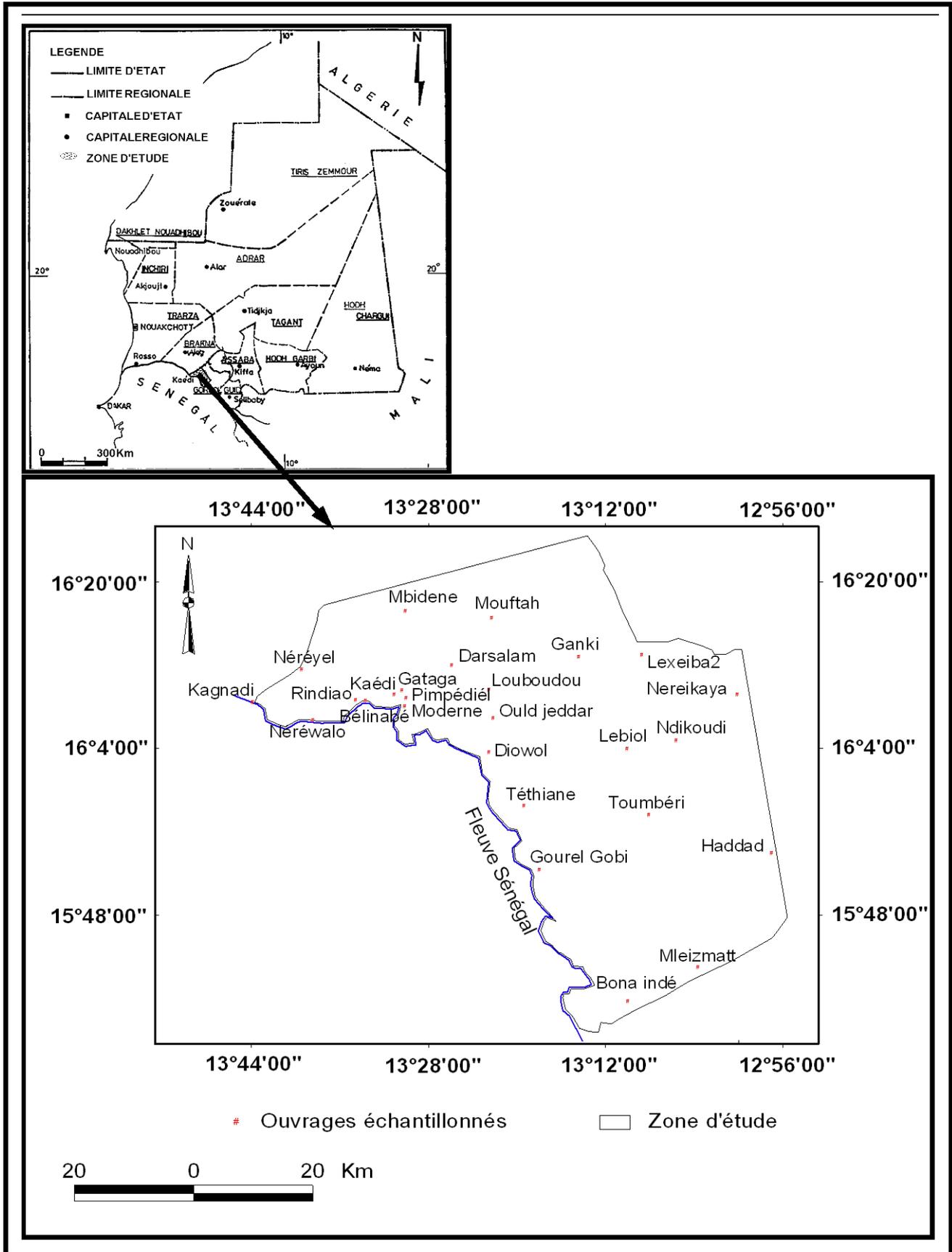


Figure 1 : Carte de situation de la zone d'étude

### **I.3. SOLS**

Dans la zone d'étude, nous trouvons différents types de sols (Elouard, 1973) dont :

- les vertisols, caractérisés par une forte teneur en argile de type 2/1, une teneur en matière organique élevée par rapport à la couleur foncée ;
- les sols hydromorphes, avec l'existence de fentes de retraits lorsque le sol est sec dont l'évolution est dominée par l'effet d'un excès d'eau en permanence comme les gley ou temporaires comme le cas des pseudo-gley.

### **I.4. VEGETATION**

La végétation est tributaire de la saison des pluies. L'arbre dominant caractérisant toute la région est l'acacia, les espèces en diffèrent suivant la pluviométrie et l'habitat.

Dans la vallée du fleuve Sénégal, les espèces varient en fonction de l'inondation. Dans les zones d'inondation vit le Goniaker (*acacia scopioi des var pubescens*). Après défrichement de ces zones s'installe une prairie de *Vétiver nigrifolia*. Sur les levées naturelles sableuses inondées aux crues (Fondé) vivent deux plantes : *Indigofera oblongifolia* et *Salvadora persica*. En bordure de la vallée sur les terrains exceptionnellement inondés poussent le Sourour (*acacia stenocarpa*) et le Soump ou Teichot (*belanites aegyptiaca*). Enfin, la zone hors des limites d'atteinte de la crue (Diéri) est le domaine du Talha ou Sing (*acacia raddiana*). En dehors de la vallée deux acacia dominant : le gommier (*acacia vavilae*) et le talha (*acacia raddiana*) (Elouard, 1973).

### **I.5. HYDROGRAPHIE**

La région de Kaédi est l'une des rares en Mauritanie à bénéficier d'un réseau hydrographique assez dense, ce dernier est tributaire de la pluviométrie avec une moyenne de 360 mm.an<sup>-1</sup>. Les principaux cours d'eau dans la zone d'étude sont (Michel, 1956) :

#### **I.5.1. Le fleuve Sénégal**

C'est un cours d'eau permanent dont le régime est caractérisé par une période de crue de trois à quatre mois (juillet à octobre) et une longue période de basses eaux de novembre à juin, mais avec la mise en fonction des barrages de Diama et Manantali, le niveau du fleuve est contrôlé. Son bassin versant couvre une superficie de 384 000 km<sup>2</sup>.

### **I.5.2. Le Gorgol**

Il se subdivise en deux, le Gorgol noir, long de 180 km, il coule sur 100 km dans la direction Nord-Sud et 80 km Est-Ouest. Il reçoit beaucoup d'affluents dont : les oueds Gseiguel, Kow et Siluol et le Gorgol blanc qui coule dans la direction Nord-Sud sur une longueur de 100 km et reçoit deux affluents : les oueds Thiombel et Boularat. Ils couvrent une superficie de 11 250 km<sup>2</sup>.

### **I.5.3. Le Savalel**

Long de 110 km à partir du lac de Mal, il couvre une superficie de 3500 km<sup>2</sup>.

### **I.5.4. Le Garfa**

Il prend naissance au pied de l'Assaba, long de 125 km, il couvre une superficie de 4 800 km<sup>2</sup> et reçoit un important cours d'eau : l'oued Boudané, long de 80 km.

## **I.6. CLIMATOLOGIE**

### **I.6.1. Mécanismes généraux du climat**

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

L'anticyclone des Açores est situé dans l'atlantique nord, la pression qui y varie entre 1 025 et 1 020 Hpa, en fait un centre d'action permanent.

L'anticyclone de Saint Hélène au sud, où la pression varie entre 1 018 et 1 021 Hpa. Sa proximité de l'équateur et son parcours océanique en font également un centre d'action important.

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

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

## **I.6.2. Analyse des différents paramètres climatiques**

Le climat est du type soudano-sahélien et se particularise par l'alternance de deux saisons :

- une saison sèche qui dure en moyenne sept mois (novembre à mai) dont la plus grande partie est chaude ;
- une saison pluvieuse courte de cinq mois (juin à octobre) malgré quelques irrégularités observées récemment, aussi bien dans la durée que dans la répartition.

Les paramètres climatiques jouent un rôle important dans les transferts hydriques en zones déficitaires et seront analysés à partir des données recueillies à la station météorologique de la ville de Kaédi par les services de la météorologie nationale de l'ASECNA de 1983 à 2000.

### **I.6.2.1. La température**

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

Les moyennes mensuelles augmentent de janvier à mai. Les températures les plus élevées sont notées pendant les mois d'avril, mai, juin avec un maximum de 36,5 °C au mois de mai (Fig. 2). On note ensuite une légère diminution de juin à septembre. En octobre, survient une faible augmentation suivie d'une baisse significative de novembre à février ( $t < 30$  °C). C'est ainsi qu'on a un régime thermique avec deux maxima absolu en mai et en octobre.

### **I.6.2.2. L'humidité relative**

Ce paramètre climatique dépend de la température de l'air et de la continentalité de la station considérée. L'évolution annuelle de l'humidité relative de l'air est aussi tempérée par l'influence maritime (Gaye, 1990).

L'évolution mensuelle de l'humidité relative montre une courbe en cloche (Fig. 3). On note une augmentation progressive de l'humidité de janvier à août. Entre août et septembre, la valeur optimale (63 %) est atteinte puis une baisse régulière est amorcée de septembre à décembre. Les valeurs les plus importantes de l'humidité relative notées entre juin et octobre montrent une dépendance de ce paramètre vis à vis de la pluviométrie. Ceci montre une évolution opposée entre évaporation et humidité relative au cours de l'hivernage.

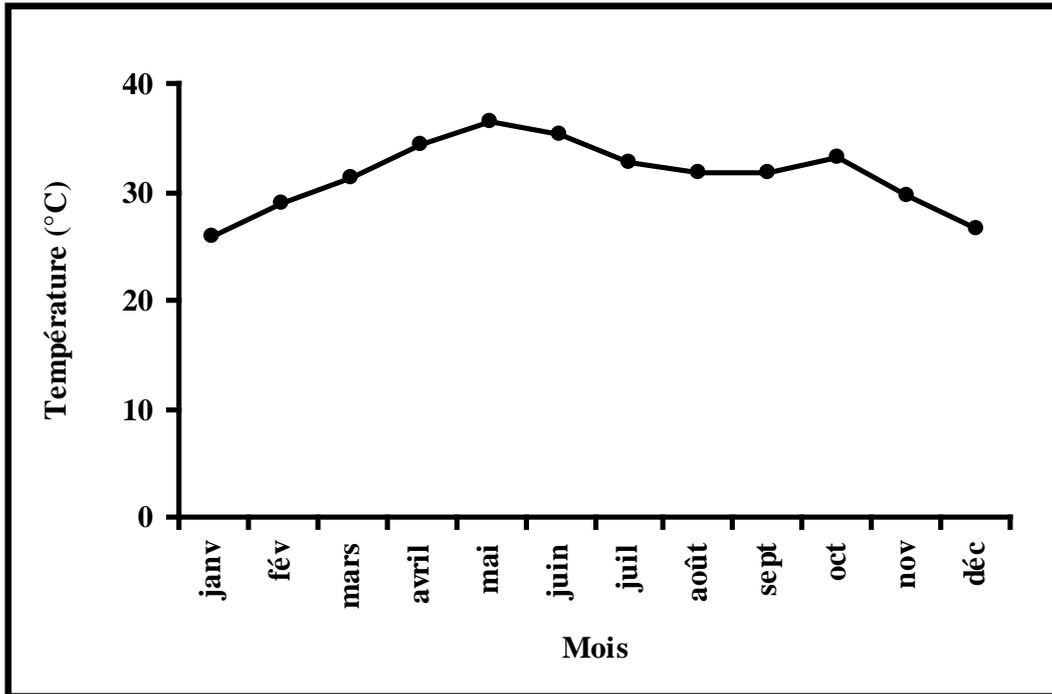


Figure 2 : Moyenne mensuelle des températures à la station de Kaédi. Source services de la météorologie nationale de l'ASECNA (1983 - 2000)

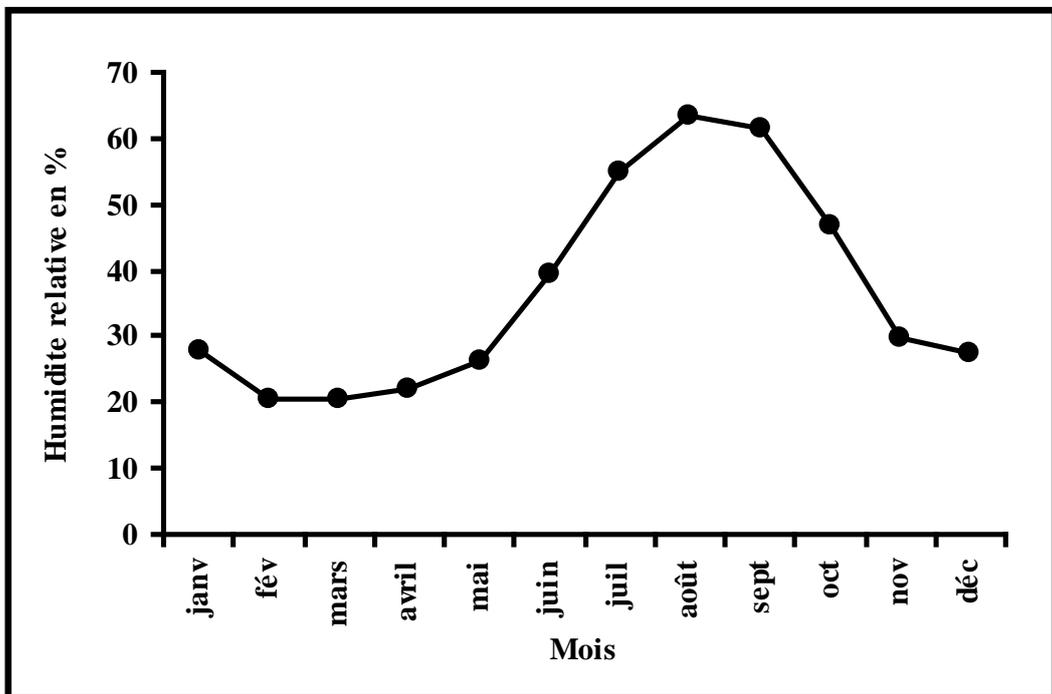


Figure 3 : Moyenne mensuelle des humidités relatives à la station de Kaédi. Source services de la météorologie nationale de l'ASECNA (1983 - 2000)

### I.6.2.3. Les Vents

La vitesse des vents croît régulièrement entre le mois d'octobre et de février (3,53 à 5,21 m.s<sup>-1</sup>) puis, diminue au mois de mars (4,56 m.s<sup>-1</sup>), s'ensuit une augmentation jusqu'au mois de juin (5,11 m.s<sup>-1</sup>) qui est immédiatement suivie d'une diminution jusqu'au mois de septembre (4,18 m.s<sup>-1</sup>).

L'analyse des données recueillies à la station de Kaédi (Fig. 4) permet de faire une synthèse sur le régime des vents, caractérisé par l'existence de trois types de vents :

- un vent d'origine continental appelé Harmattan qui accentue les conditions de sécheresse entre mars et mai. Ce vent caractérise le secteur nord-nord-est avec une tendance plus nette en saison sèche (novembre à juin), l'évaporation est plus élevée ;
- l'alizé maritime, qui est un vent frais et humide, qui s'installe au nord ouest à ouest ;
- la mousson, il s'agit des vents de saison de pluie qui se manifestent de juin à octobre. Ces vents sont humides avec des vitesses relativement faibles.

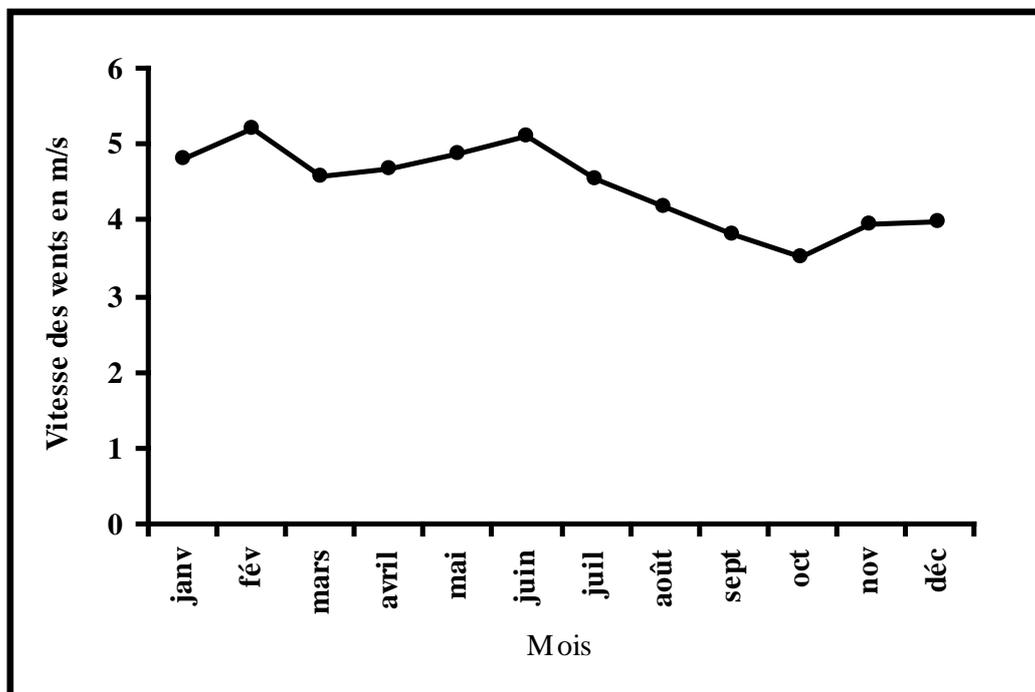


Figure 4 : Moyenne mensuelle de la vitesse des vents à la station de Kaédi.  
Source services de la météorologie nationale de l'ASECNA (1983 - 2000)

### I.6.2.4. L'évaporation et l'évapotranspiration

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

L'évolution mensuelle de l'évaporation est la même que celle observée pour la température. Les valeurs de l'évaporation les plus fortes sont notées aux mois de mars, avril et mai (210,9 mm par mois). Ceci est dû à l'installation de l'harmattan. Pendant la saison pluvieuse, on note une baisse de l'évaporation pouvant aller jusqu'à une valeur de 74,9 mm par mois, avec l'installation de la mousson (Fig. 5). Au delà du mois de septembre, on a une augmentation régulière de l'évaporation jusqu'au mois d'avril.

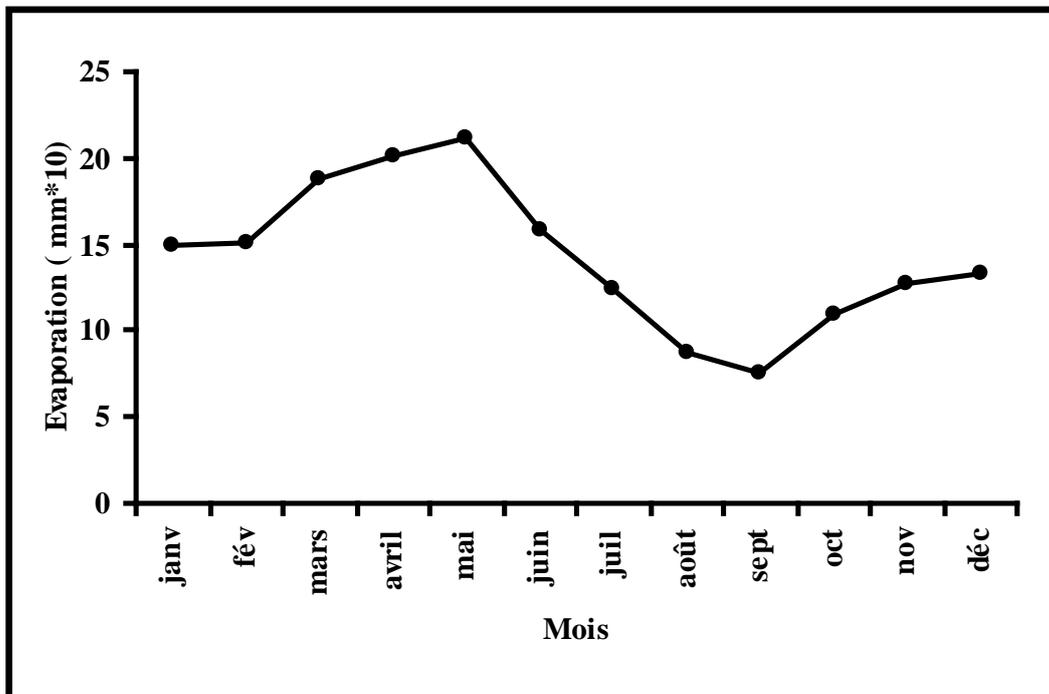


Figure 5 : Moyenne annuelle de l'évaporation Piche à la station de Kaédi.  
Source services de la météorologie nationale de l'ASECNA (1983 - 2000)

### I.6.2.5. Pluviométrie

L'alimentation des nappes phréatiques est directement tributaire de la variabilité pluviométrique. Une bonne maîtrise de ce paramètre s'avère nécessaire, afin d'assurer une gestion rationnelle des ressources en eaux souterraines.

Les relevés pluviométriques ont débuté en 1983 au niveau de la station de Kaédi. Les données enregistrées sur une période de 18 ans, ont permis de tracer la figure 6.

L'observation des histogrammes des précipitations permet de dire que la zone d'étude est caractérisée par la présence de deux types de saisons :

- une saison pluvieuse qui s'étend de juin à octobre, avec un maximum de pluie au mois d'août et une saison sèche beaucoup plus longue qui dure tout le reste de l'année ;
- il arrive parfois qu'on ait de faibles quantités de pluies pendant l'hiver, mais elles sont sans grande importance sur le plan hydrologique car elles n'atteignent pas les nappes du fait de la forte évaporation.

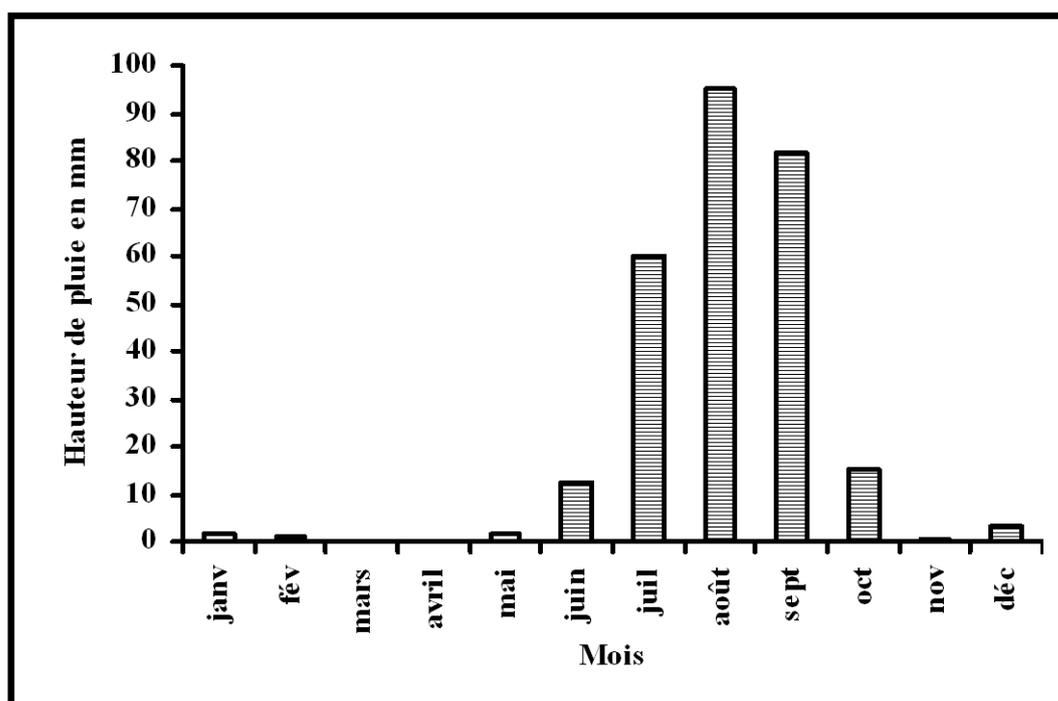


Figure 6 : Précipitations moyennes mensuelles à la station de Kaédi. Source services de la météorologie nationale de l'ASECNA (1983 - 2000)

## I.7. CONCLUSION

La ville de Kaédi appartient à l'ensemble géographique du sud ouest de la Mauritanie. Elle est ceinturée au sud et sud ouest par le fleuve Sénégal et ses affluents. De façon générale, la vallée du fleuve constitue une zone déprimée sans relief, le sol est à dominance argileux et l'arbre dominant est l'acacia. Le climat est de type soudano – saharien caractérisé par quatre à cinq mois pluvieux. La moyenne annuelle de la pluviométrie est environs 360 mm par an et la température moyenne de l'air est de l'ordre de 33 °C.

**Chapitre II :**  
**SYNTHESE GEOLOGIQUE ET**  
**HYDROGEOLOGIQUE**

# **Chapitre II : SYNTHÈSE GÉOLOGIQUE ET HYDROGÉOLOGIQUE**

## **II.1. GÉOLOGIE**

### **II.1.1. Présentation générale du bassin mauritanien**

La zone d'étude se situe dans la partie occidentale du bassin sédimentaire sénégal-mauritanien. Ce bassin qui est le plus vaste de la marge ouest africaine (Fig. 7) s'étend sur 1 400 km du nord (Cap des Barbaries en Mauritanie) au sud (Bissau en Guinée), à travers la Mauritanie. Il occupe une dépression en bordure de la plate forme africaine entre les affleurements du socle ancien métamorphique et granitique à l'est et l'océan atlantique à l'ouest. Il correspond à un affaissement produit à la faveur des lignes tectoniques d'orientation générale nord - sud, parallèle à la chaîne de plissement paléozoïque des mauritanides (Bellion, 1987).

Dans le bassin sud-ouest mauritanien, la série s'amincit vers l'Est, suivant une disposition en marche d'escalier. Ce bassin a connu des transgressions et régressions qui sont à l'origine des formations géologiques déposées et reconnues par les puits et forages hydrauliques dans la zone d'étude (Chudeau, 1911).

### **II.1.2. Lithostratigraphie**

La description des formations géologiques a nécessité une synthèse des travaux de : Elouard (1962), Michel (1956), Illy (1973), Burgeap (1983) et Diagana (1994).

On s'appuiera également sur les coupes géologiques des différents sondages réalisés dans le cadre du projet OMVS/USAID de 1988 à 1990 dans la vallée du fleuve Sénégal (Fig. 8).

#### **II.1.2.1. Le Maastrichtien**

Le Maastrichtien (Sénonien supérieur) n'affleure pas, mais se trouve à faible profondeur et repose directement sur le socle. Il correspond à des dépôts transgressifs de la plate-forme continentale faiblement immergée, représentés par des sables, et plus rarement de grès tendres, quelques fois pyriteux, glauconieux ou micacés, de granulométrie fine à grossière,

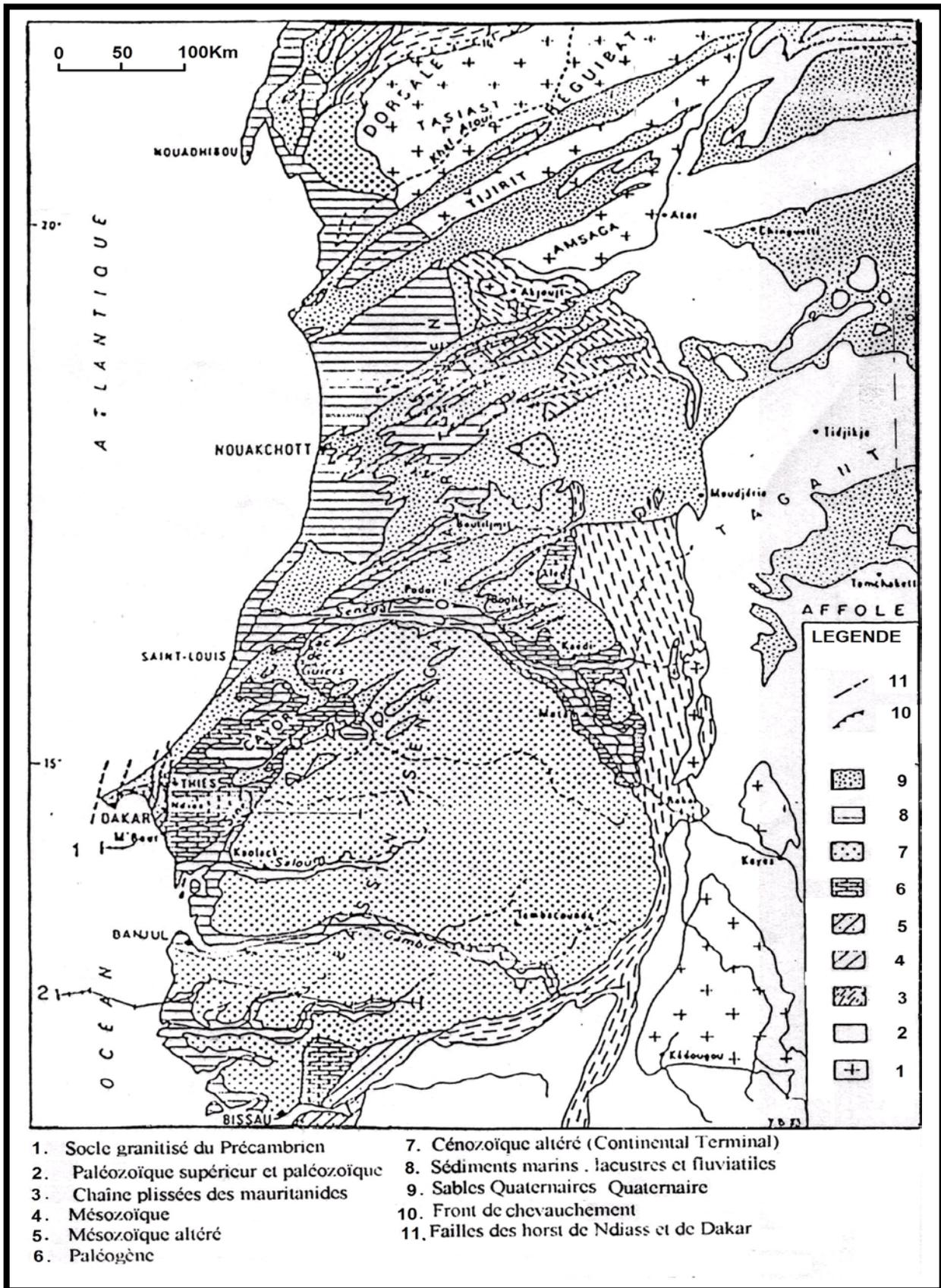


Figure 7 : Carte géologique simplifiée du bassin sédimentaire sénégalo-mauritanien (Nahon (1976) modifiée in Bellion (1987))

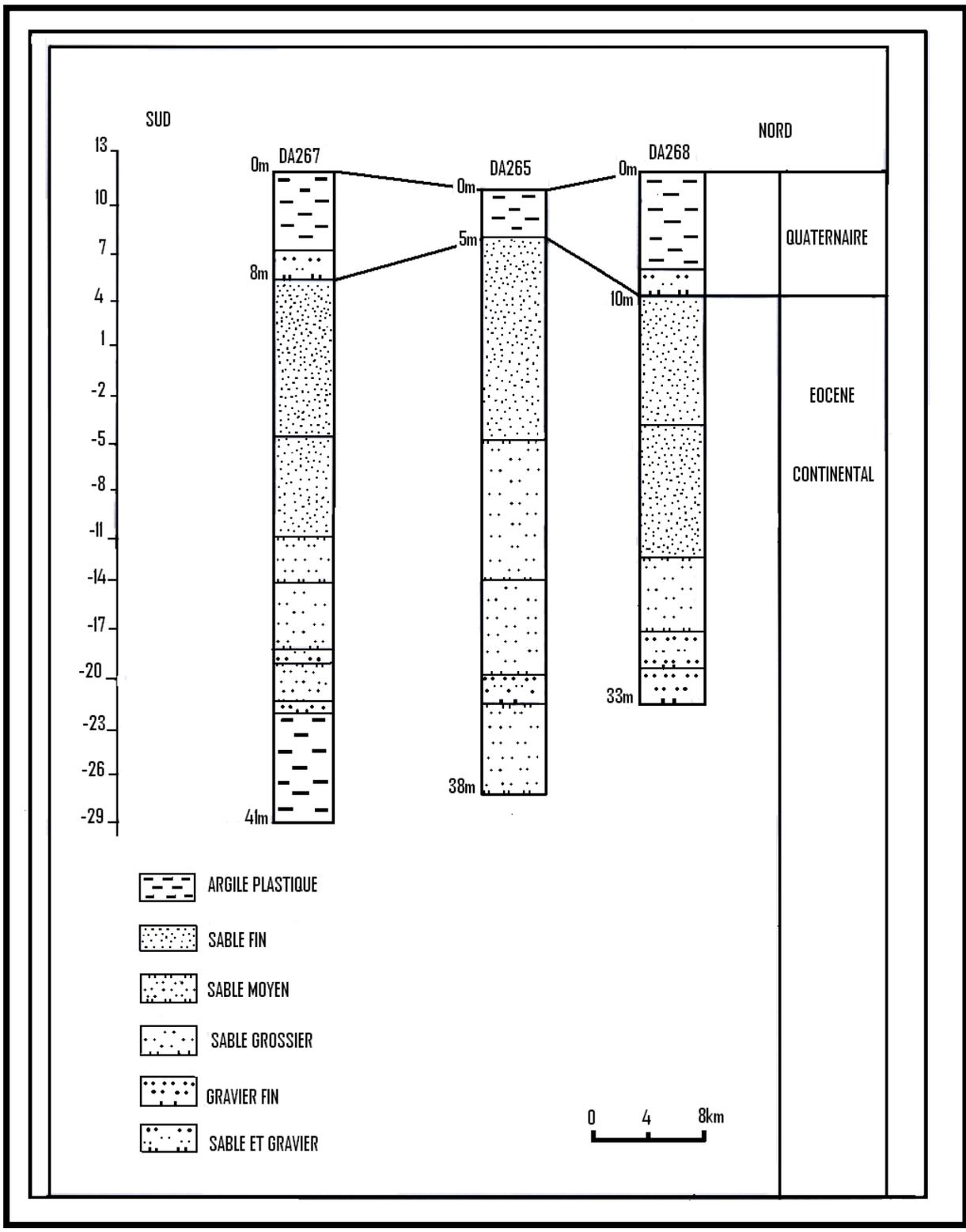


Figure 8 : Coupe géologique de direction Sud-Nord (OMVS/USAID, 1990)

plus ou moins bien classés, parfois argileux, de couleur variée, claire souvent rosé. C'est seulement au sondage de Niabina, au nord de Kaédi, en bordure du bassin qu'on a trouvé un niveau de sables à graviers et galets. Ces niveaux renferment de rares couches lenticulaires pouvant dépasser 30 m, d'argiles généralement rouge lie de vin, souvent sableuse. Ces sables du Maastrichtien ont une épaisseur généralement comprise entre 100 et 200 m (Elouard, 1973).

### **II.1.2.2. Le Paléocène**

Il présente le plus large éventail de faciès et, est constitué surtout de marnes et marno-calcaires, mais également de calcaires, d'argiles en général noires, feuilletées et fréquemment à la base de grès calcaires ou sables (Michel, 1956).

### **II.1.2.3. L'Eocène**

Son épaisseur maximale est de 100 m environ dans la moyenne vallée, elle augmente vers le sud et dans le centre du bassin. On distingue les dépôts franchement marins des faciès de bordure du bassin dans la partie amont de la vallée. Les dépôts marins de faciès néritique de l'Eocène sont transgressifs sur ceux du Maastrichtien. Leur constitution lithologique est très variée, les argiles et marnes sont dans l'ensemble prédominants (Illy, 1973).

#### **II.1.2.3.1. L'Eocène inférieur (Yprésien)**

Il est surtout calcaire et marneux, d'aspect souvent crayeux, avec des niveaux oolithiques, coquilliers et glauconieux. Les phénomènes de dolomitisation et de silicification y sont fréquents. Il est parfois phosphaté et sa puissance augmente d'Est en Ouest où elle dépasse 20 m avant de disparaître par érosion (Hubert, 1920).

#### **II.1.2.3.2. L'Eocène moyen (Lutétien)**

Il montre une très grande variabilité de faciès. Les argiles et marnes, le plus souvent jaunâtres prédominent, localement les calcaires sont plus abondants. La limite supérieure avec le Continental Terminal sus-jacent se manifeste nettement en bordure du bassin par une formation jaune, constituée de grès argileux fossilifères ou glauconieux, phosphatés à passées de cherts (Baud, 1936).

### **II.1.2.3.3. L'Eocène supérieur**

Il est formé principalement de sables ou grès tendres, parfois quartzitiques, de granulométrie variée, plus ou moins ferrugineux, à intercalation d'argiles souvent kaoliniques, rouge ou lie de vin. En se rapprochant de la bordure sédimentaire vers l'Est et le Nord du bassin où elles affleurent, les formations éocènes deviennent caractéristiques de dépôts détritiques côtiers, avec apports continentaux. Les niveaux de sables ou grès apparaissent, et les calcaires disparaissent. Les différents étages de l'Eocène ne peuvent plus être distingués comme ils sont azoïques. Plus loin de la limite du bassin, l'Eocène repose sur les sables du Maastrichtien et la limite entre ces deux formations n'est pas toujours nette (Chudeau, 1911).

### **II.1.2.4. Le Continental Terminal**

Une exondation générale conduit à une érosion partielle du sommet de la série éocène avant que ne s'accumulent les dépôts du Continental Terminal, pendant les périodes oligocène et miocène et peut être pliocène. Ce sont des sables ou grès très tendres généralement argileux hétérométriques en majorité fins bariolés et des argiles kaoliniques souvent sableuses, bariolées, rouges, lie de vin, blanches. Le Continental Terminal contient des passés de gravillons ferrugineux, et se termine souvent par une cuirasse ferrugineuse compacte, de plus d'un mètre d'épaisseur renfermant de nombreux grains de quartz. Son épaisseur augmente d'Est en Ouest à peu près jusqu'au niveau de Boghé où elle atteint 34 m. Elle augmente également vers le Sud (Elouard, 1962).

### **II.1.2.5. Le Quaternaire**

Un bas glacis de sables argileux renfermant de gravillons d'oxydes de fer datant du Quaternaire moyen, atteint plusieurs mètres en bordure de la vallée. En aval, c'est un glacis polygénique, couvert par une cuirasse ferrugineuse secondaire, à texture gravillonnaire, elle même masquée par des sables éoliens colluviaux. Au début du Quaternaire récent, une vaste zone de dunes rouges, maintenant fixées, datant de l'Ogolien s'étend au nord du fleuve, en aval de la ville de Kaédi (Burgeap, 1983).

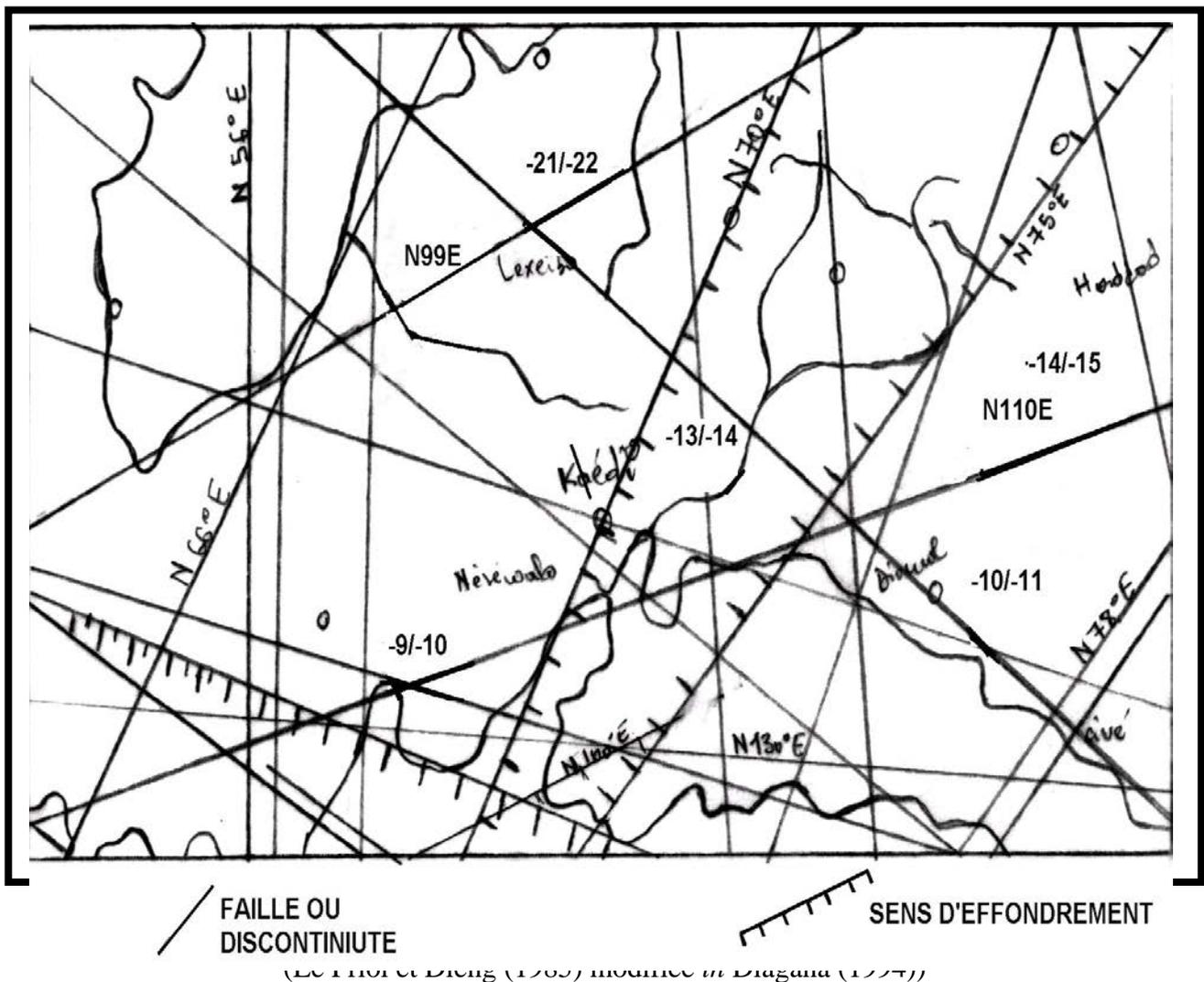
Principalement dans la partie amont du bassin, la plus arrosée, des "tiangols" creusés par les eaux de ruissellement ont été comblés par des dépôts alluviaux et colluviaux, constitués souvent par des sables à la base (Diagana, 1994).

### II.1.3. La tectonique

Les études de terrain et photo-satellites et la photo-interprétation ont permis de préciser la structure d'ensemble du bassin sénégalo-mauritanien.

Elle montre que le bassin est affecté par de nombreux accidents de directions différentes. Cependant dans l'ouest du bassin, les structures faillées sont sensiblement parallèles à la direction du rivage (Le Priol et Dieng, 1985).

Dans la zone d'étude, les failles et fractures s'alignent à peu près dans toutes les directions mais avec une dominance suivant deux directions, Nord-Sud et Est-Nord (Fig. 9). Ces mouvements tectoniques se sont produits à diverses époques avec rejeu des failles jusqu'à une époque très récente. Le Guelb mauritanien s'est affaissé après l'Eocène, alors que la bordure du bassin a été légèrement relevée. C'est pourquoi près de celles-ci, les couches montrent un léger plongement de 2 à 3° vers le Sud-Ouest, et le Continental Terminal y a été érodé (Diagana, 1994).



## **I.2. HYDROGEOLOGIE**

### **II.2.1. Principaux aquifères**

Les formations aquifères dans le bassin côtier sont les suivants (Audibert, 1960) (Fig. 10) :

- l'aquifère du Continental Terminal ;
- l'aquifère des sables du Paléocène/Eocène ;
- l'aquifère du Maastrichtien ;
- l'aquifère des alluvions du fleuve Sénégal.

Dans le secteur de la ville de Kaédi, les aquifères les plus exploités sont ceux des alluvions du fleuve Sénégal à faible profondeur et la nappe sub-phréatique des sables du Paléocène/Eocène.

#### **II.2.1.1. La nappe des sables du Paléocène/Eocène**

Elle est constituée de sables et de grès tendres de l'Eocène à faciès continental sur une épaisseur moyenne de 25 m. Sa limite supérieure est marquée par l'apparition d'une couche de faible épaisseur de sables et de graviers du Quaternaire ancien. Sa limite inférieure est constituée par une épaisse couche d'argiles bariolées, la séparant du Maastrichtien (Burgeap, 1983).

##### **II.2.1.1.1. Nature et géométrie de l'aquifère**

###### **a). Limites**

Dans la zone d'étude, l'aquifère s'étend sur des centaines de kilomètres. A partir des données de quelques forages d'eau, on a pu constater que la nappe est limitée à l'est et au nord par le biseau sec, au sud par le fleuve Sénégal et à l'ouest par les formations calcaires de l'Amechtil. Le mur de l'aquifère mieux connu, présente un enfoncement d'Ouest en Est au niveau de la ville de Kaédi. Il est atteint à 32 m à l'ouest, 33,7 m au centre et 41 m à l'est de Kaédi (IWACO, 1996) (Fig. 11). Cette nappe est libre en certains endroits (IWACO, 1996), dans d'autres elle est semi-captive du fait qu'elle est surmontée d'une éponte semi-perméable de sables fins (OMVS/USAID, 1990).

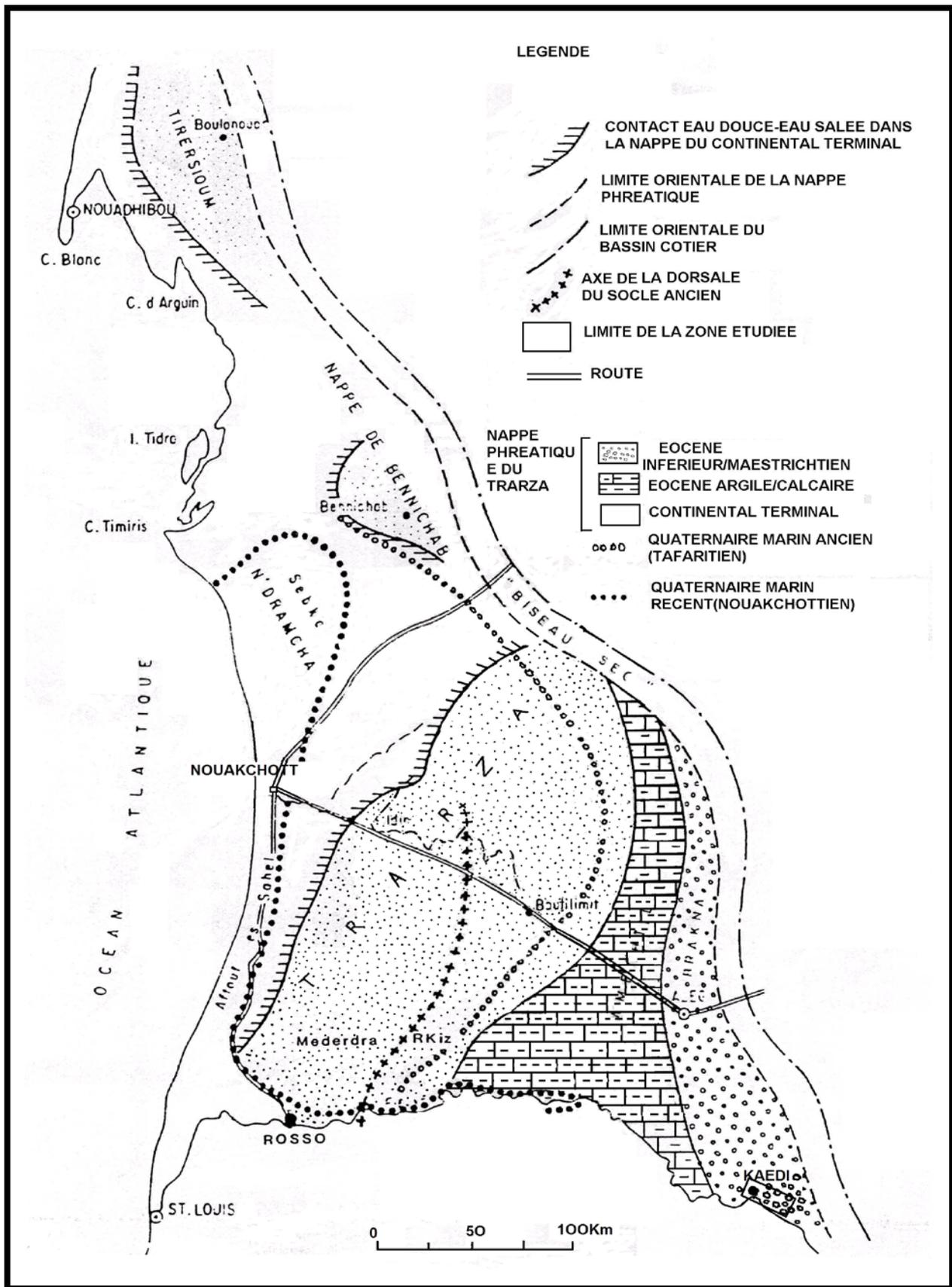


Figure 10 : Carte hydrogéologique simplifiée du bassin sud-ouest mauritanien (Illy, 1973)

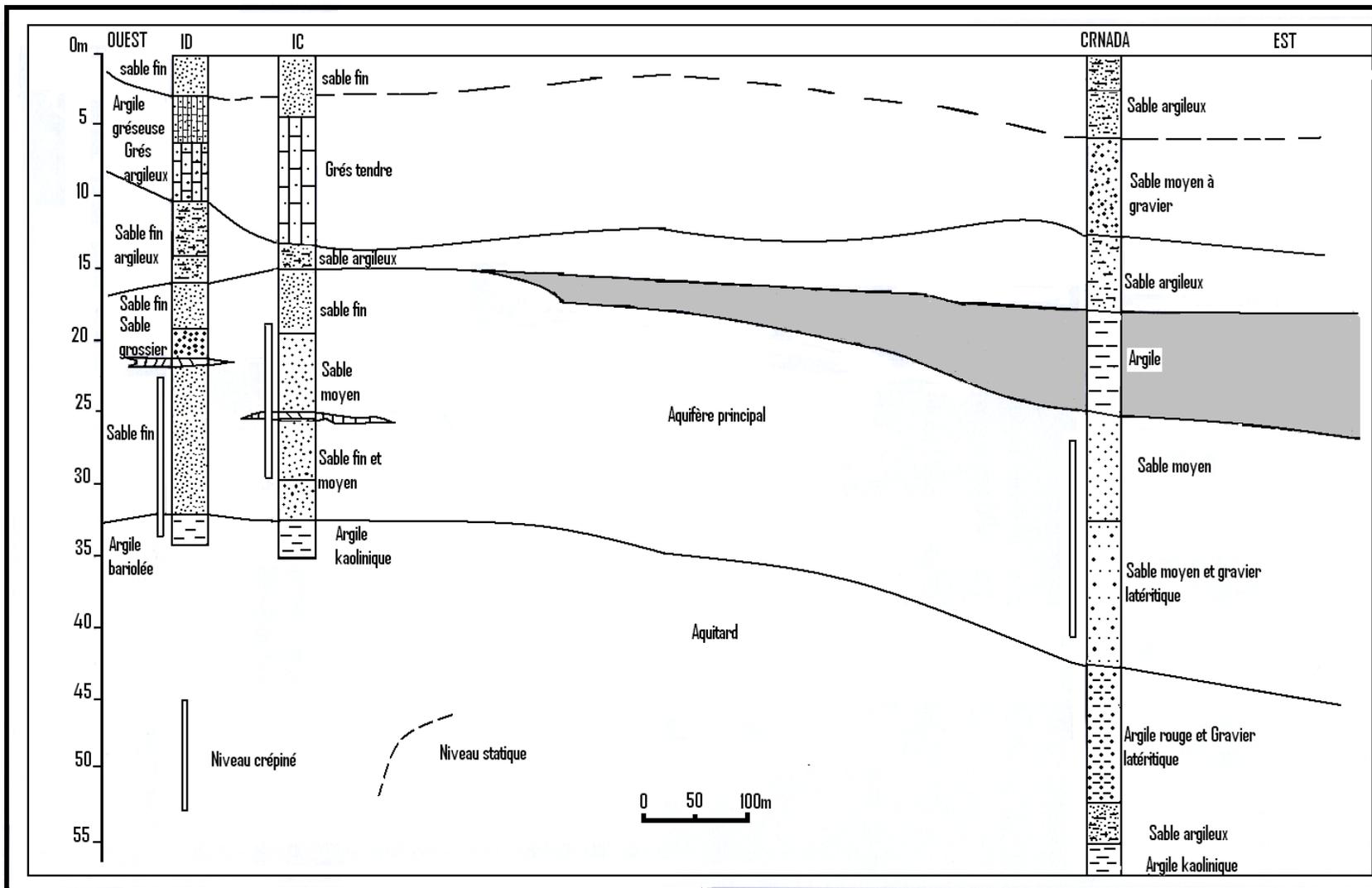


Figure 11 : Coupe hydrogéologique de direction Est-Ouest de la ville de Kaédi (IWACO, 1996)

## b). La lithologie et l'épaisseur

L'observation des coupes géologiques met en évidence la dominance des sables fins, grès moyens et tendres. La nappe étant continue, l'épaisseur des couches, ainsi que la teneur en argile peuvent varier sur des distances relativement courtes (Burgeap, 1983).

### II.2.1.1.2. Les paramètres hydrodynamiques

Les quelques rares données sur les paramètres hydrodynamiques disponibles ne sont que localement dans le secteur de la ville de Kaédi, et ont été obtenues à partir des rapports de forages du Centre nationale des Ressources en Eaux (CNRE) (Tableau 1).

Dans le secteur de la ville de Kaédi, les valeurs de transmissivités obtenues sont comprises entre 1,1 et  $11,57 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ . Malgré le nombre très insuffisant de données, nous observons une variabilité spatiale des valeurs de transmissivités.

Les valeurs de la perméabilité sont comprises entre  $0,118 \cdot 10^{-5}$  et  $17,2 \cdot 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Les débits d'exploitations sont variables et compris entre 3 et  $50 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  avec une moyenne de  $32 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  (Audibert, 1960 *in* IWACO, 1996). La productivité est maximale à l'ouest de la ville de Kaédi. Les quelques valeurs des paramètres hydrodynamiques obtenues dans la région de Gorgol, indiquent qu'au sein de l'aquifère des sables du Paléocène/Eocène, la vitesse d'infiltration des eaux de pluies est très élevée dans le secteur de la ville Kaédi.

**Tableau 1** : Paramètres hydrodynamiques de la nappe des sables du Paléocène/Eocène (Audibert, 1960 *in* IWACO, 1996)

Localités	Transmissivité ( $\times 10^{-2} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )	Perméabilité ( $\times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	Débit ( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )
Gataga	08,10	11,80	41,60
Pimpédiél	19,50	42,60	50
Kilinkharé	01,10	03	12,73
Ould jeddar	09,25	04,75	07,80
Diowol	07,20	17,20	24,70
Rindiao	11,57	19,70	19,60

### **II.2.1.1.3. Piézométrie**

Les études antérieures de l'OMVS/USAID (1988), de la direction de l'Hydraulique (D.H., 1990 *in* CNRE, 2004), de IWACO (1996) et de Diagana (1994), nous ont permis d'avoir une idée de la piézométrie dans notre zone d'étude.

L'existence d'une dépression à Rindiao à l'ouest de la ville de Kaédi (D.H., 1990 *in* CNRE 2004).

L'alimentation de la nappe à partir du fleuve confirmée lors des pompages d'essai (OMVS/USAID, 1988). L'écoulement de la ressource en eau à deux directions ; du fleuve vers la nappe et parallèlement au fleuve du nord vers le sud (IWACO, 1996). Une zone de recharge au droit de l'oued Garfa (Diagana, 1994).

Les données piézométriques de la présente étude n'ont pas été traitées du fait que les points de mesure ne sont pas nivelés.

### **II.2.1.2. La nappe alluviale du fleuve Sénégal**

La vallée moyenne du fleuve Sénégal est constituée d'alluvions (sables argileux, argiles). Leur épaisseur peut atteindre une dizaine de mètres localement et la profondeur de la surface piézométrique dans la vallée du fleuve est comprise entre 5 et 10 m. Cette nappe n'est pas toujours à surface libre. L'eau est localement en charge sous les argiles limono-sableuses et parfois sous les argiles gonflantes des cuvettes. L'alimentation se fait verticalement par les eaux de pluies et latéralement à partir du fleuve Sénégal. La nappe est sollicitée par les puits villageois de faibles profondeurs (Diagana, 1994).

## **II.3. CONCLUSION**

Du point de vue stratigraphique les séries s'échelonnent du Maastrichtien à l'actuel avec des formations détritiques composées essentiellement de sables fins à grossiers avec des intercalations d'argiles. Le mur du Quaternaire est constitué de sédiments de l'Eocène à faciès continental. Ces sédiments formés par une alternance de niveaux sableux et argileux d'âge Paléocène/Eocène constituent la nappe sollicitée par le Champ captant de la ville de Kaédi (IWACO, 1996). L'épaisseur de l'aquifère varie entre 20 et 25 m et le niveau sableux le plus important est compris entre 12 et 33 m.

**Chapitre III :**  
**HYDROCHIMIE DE LA NAPPE**  
**DES SABLES DU**  
**PALEOCENE/EOCENE**

# **Chapitre III : HYDROCHIMIE DE LA NAPPE DES SABLES DU PALEOCENE/EOCENE**

## **III.1. ACQUISITION DES DONNEES**

### **III.1.1. Campagnes et réseau des mesures**

Dans le cadre de cette étude, nous avons utilisé deux types de données hydrochimiques issues des campagnes de mars 1996 et de juin 2004. En mars 1996, le bureau d'étude IWACO avait effectué une campagne d'échantillonnage sur un réseau de 16 points d'eau dans le cadre du programme de réhabilitation et renforcement du système d'alimentation en eau potable (AEP) de la ville de Kaédi pour le compte de la Société nationale d'Eau et d'Electricité (SONELEC). En juin 2004, nous avons effectué une campagne de mesures et de prélèvements sur un réseau de 31 points d'eau constitués de 2 forages et 29 puits villageois dans le secteur la ville de Kaédi (Fig. 12). Au niveau de chaque point d'eau échantillonné, les coordonnées géographiques ont été déterminées à l'aide d'un GPS ; le pH, la température, la conductivité électrique, et l'alcalinité de l'eau ont été mesurés *in-situ*.

### **III.1.2. Analyses Chimiques, fiabilité et traitement des données**

Les analyses chimiques des ions  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$  des eaux échantillonnées lors de la campagne 2004 ont été effectuées par chromatographie ionique et celles des ions carbonates ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) et bicarbonates ( $\text{HCO}_3^-$ ) par titrimétrie au laboratoire d'Hydrologie et Hydrochimie du département de Géologie de l'université Cheikh Anta Diop de Dakar (Sénégal).

Les analyses biologiques et bactériologiques n'ont pas été faites dans le cadre de cette étude.

La précision des analyses chimiques est liée aux méthodes analytiques et aux concentrations. Les méthodes utilisées et les limites de détection varient selon le laboratoire d'analyse. Le calcul de la balance ionique qui est l'écart relatif entre la somme des cations et la somme des anions permet de vérifier la précision des méthodes analytiques mises en œuvre et la validité des déterminations chimiques (Kirchmer, 1983 ; Fetter, 1994). Si l'écart relatif est inférieur à 5 %, les analyses peuvent être considérées comme bonnes. Lorsque sa valeur est comprise entre 5 % et 10 %, les analyses peuvent à la rigueur être retenues. Au-delà de 10 %, les analyses doivent être

rejetées. Deux causes peuvent dans ce cas être invoquées : les méthodes analytiques sont peu précises ou un ou plusieurs éléments en solution n'ont pas été dosés.

Un contrôle systématique de la balance ionique a été réalisé au laboratoire pour l'ensemble des analyses. Les erreurs sont inférieures ou égales à 5 % ; ce qui témoigne d'une bonne qualité des mesures.

En effet, seul le point d'eau (Pts-13) très pollué avec une conductivité électrique égale à  $4\,110\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ , a été écarté lors du traitement des données chimiques ; parce que se trouvant dans un secteur de la ville où la majorité des puits d'eau sont abandonnés et très souvent transformés en fosses septiques et en dépôts d'ordures ménagères de nature variée. Les données des analyses chimiques des deux campagnes (mars 1996 et juin 2004) ont fait l'objet d'un traitement à partir des différentes méthodes d'interprétation en hydrogéologie, dont on peut citer :

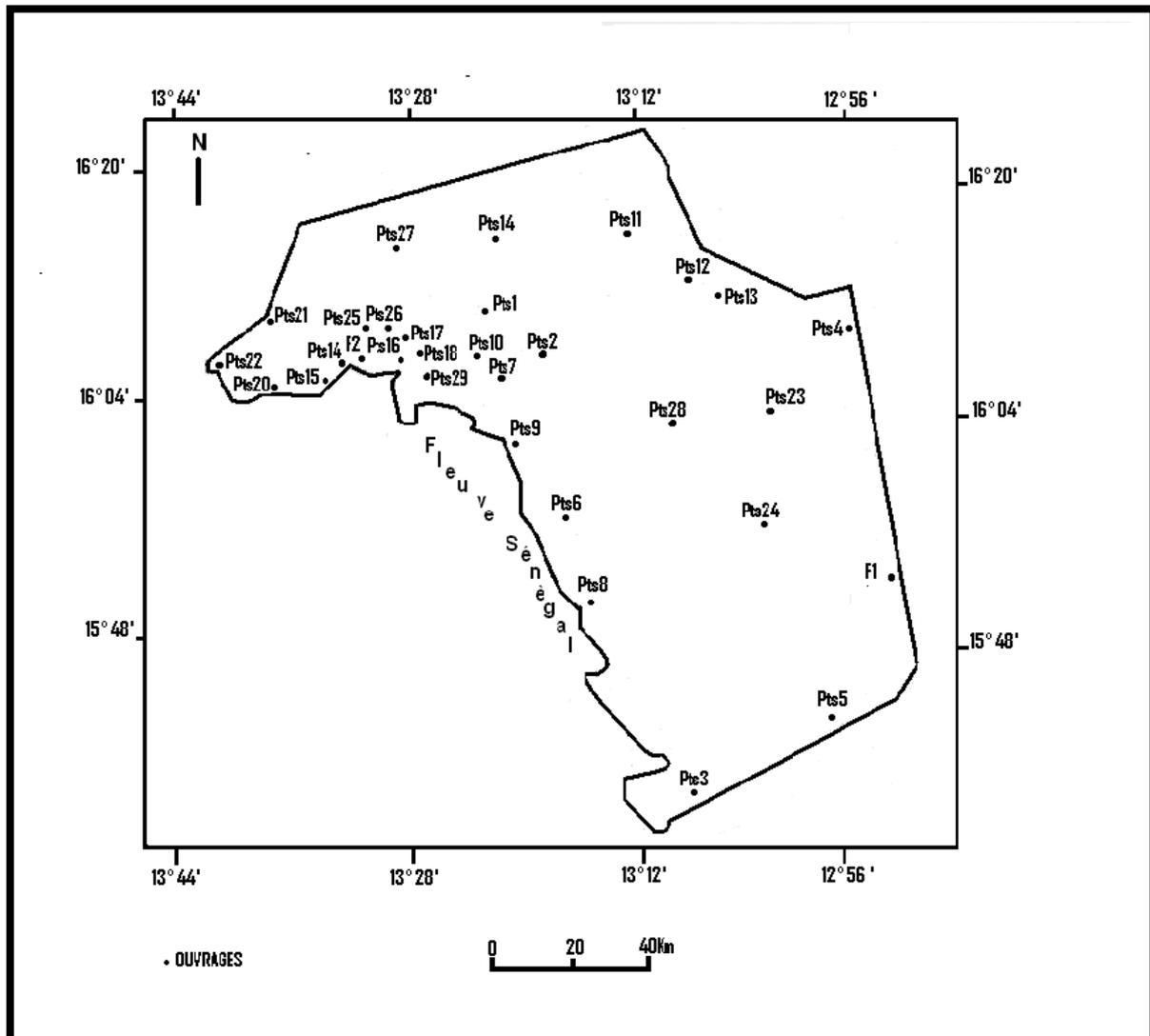


Figure12 : Carte de localisation des points d'eau échantillonnés (campagne 2004)

- les diagrammes de Piper qui permettent d'estimer les pourcentages des éléments chimiques et leur classification et de vérifier s'il y a des phénomènes de concentration ou de dilution de certains éléments d'une campagne de prélèvement à l'autre ;
- les diagrammes binaires permettant de comprendre l'origine des eaux et d'identifier les processus géochimiques responsables de la variation de la minéralisation des eaux de la nappe. Ils sont d'autant plus valables lorsque le coefficient de corrélation  $R^2$  est proche de 1 ;
- les indices d'échange de base, nous permettent d'apprécier l'ampleur des phénomènes d'échange de base des cations (alcalins et alcalino-terreux) entre certaines formations dites permutolites de la matrice aquifère (minéraux argileux, minéraux zéolitiques, hydroxyde de fer et substances organiques "humus") et l'eau de la nappe, tandis que les rapports caractéristiques, nous permettent cependant de situer les zones d'apports des cations et des anions au sein de l'aquifère des sables du Paléocène/Eocène.

Ces différentes méthodes, nous ont permis d'obtenir avec l'aide de l'outil informatique (logiciels de traitement des données hydrogéologiques et des cartes), les résultats discutés dans la partie résultats de cette étude.

## **III.2. DISCUSSION DES RESULTATS DE L'ETUDE**

Dans la région de Gorgol, une première description physico-chimique des eaux de la nappe des sables du Paléocène/Eocène a été faite par le bureau d'étude IWACO en 1996. Cette description avait montré que les eaux de la nappe sont faiblement minéralisées, de l'ordre de centaine  $\text{mg.l}^{-1}$ , de type bicarbonaté calcique et magnésien, bicarbonaté sodique et potassique chloruré calcique et magnésien et chloruré sodique et potassique.

Cette présente étude, traite les données de la campagne de mesures et de prélèvements de juin 2004. Les données obtenues par le bureau d'étude IWACO en 1996, sont reprises dans l'optique d'une estimation de l'évolution spatiale et temporelle de la minéralisation des eaux de l'aquifère des sables du Paléocène/Eocène dans la ville de Kaédi.

### **III.2.1. Caractéristiques physiques et chimiques des eaux**

Le tableau 2 ci-dessous, présente les paramètres statistiques (minimum, maximum, moyenne, médiane et coefficient de variation (C.V.)) calculés pour chacune des variables physiques et chimiques des eaux souterraines de la nappe des sables du Paléocène/Eocène dans le secteur de la

ville de Kaédi pour les données de la campagne de juin 2004. Les données des analyses chimiques complètes sont reportées en annexes.

Globalement les eaux souterraines du Paléocène/Eocène dans le secteur de Kaédi, sont faiblement à moyennement minéralisées et douces sur la base des valeurs de la minéralisation (C.E. comprise entre 78 et 1158  $\mu\text{S.cm}^{-1}$ ). La variabilité des éléments en solution, exprimée par le coefficient de variation (C.V.), rapport entre l'écart type et la moyenne arithmétique, est assez importante (C.V. > 50 %) et montre que les eaux souterraines présentent de fortes différences de qualité chimique d'un point à l'autre dans le secteur de la ville de Kaédi. Toutefois la variabilité de la température et du pH reste faible. Les nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ) à des teneurs exceptionnellement élevées, mesurés au niveau de certains puits villageois proviendraient très probablement des pollutions localisées au droit de ces ouvrages.

Tableau 2 : Paramètres physico-chimiques des eaux de la nappe des sables du Paléocène/Eocène (campagne 2004)

Paramètres	Minimum	Maximum	Moyenne	Médiane	C.V. (%)	Etendue
T (°C)	28,00	36,00	32,60	33,00	06,00	08,00
pH	06,90	08,30	07,33	07,20	04,80	01,40
CE ( $\mu\text{S.cm}^{-1}$ )	78,00	1158,00	376,06	305,50	79,43	1080,00
$\text{Na}^+$ ( $\text{mg.l}^{-1}$ )	02,87	111,33	22,45	18,73	94,12	108,46
$\text{K}^+$ ( $\text{mg.l}^{-1}$ )	01,19	51,13	11,07	04,90	117,32	49,94
$\text{Ca}^{2+}$ ( $\text{mg.l}^{-1}$ )	00,00	88,14	26,20	21,45	82,25	88,24
$\text{Mg}^{2+}$ ( $\text{mg.l}^{-1}$ )	00,20	45,88	11,33	08,00	93,12	45,86
$\text{Cl}^-$ ( $\text{mg.l}^{-1}$ )	02,16	142,47	26,69	22,14	98,98	140,31
$\text{SO}_4^{2-}$ ( $\text{mg.l}^{-1}$ )	00,65	57,74	12,99	05,06	123,55	57,90
$\text{HCO}_3^-$ ( $\text{mg.l}^{-1}$ )	09,15	232,32	99,29	80,82	66,34	223,17
$\text{NO}_3^-$ ( $\text{mg.l}^{-1}$ )	00,00	365,65	67,34	20,37	138,87	365,39
$\text{F}^-$ ( $\text{mg.l}^{-1}$ )	0,00	1,42	0,53	0,41	80,00	1,42

### III.2.1.1. Caractéristiques physiques des eaux

#### III.2.1.1.1. pH

Le pH joue un rôle très essentiel dans la détermination de la composition chimique de l'eau, puisqu'il contrôle les teneurs relatives des carbonates, des bicarbonates et des acides carboniques

responsables de l'alcalinité des eaux de la nappe. Toutes les mesures de juin 2004 varient de 6,90 au puits (Pts-12) à 8,30 au puits (Pts-24), avec une moyenne de 7,30. Ces valeurs de pH enregistrées, indiquent que les eaux sont neutres à légèrement basiques et que l'alcalinité des eaux de la nappe des sables du Paléocène/Eocène dans le secteur de la ville de Kaédi, est contrôlée essentiellement par les ions bicarbonates ( $\text{HCO}_3^-$ ).

### **III.2.1.1.2. Température**

Les valeurs de température reflètent aussi bien la température ambiante au moment de la collecte des échantillons mais elles reflètent également le climat de la saison. Les valeurs de températures de 28 °C représentent le plus souvent les eaux des puits villageois échantillonnés en début de matinée tandis que celles comprises entre 32 °C et 36 °C en milieu d'après midi.

### **III.2.1.1.3. Conductivité électrique (CE)**

Les fluctuations globales de la charge chimique de l'eau peuvent être traduites par la détermination de la conductivité électrique (C.E.) qui est une fonction linéaire des ions dissous. C'est un paramètre qui permet de déterminer le degré de minéralisation et de salinité des eaux. La valeur de la conductivité est d'autant plus élevée que l'eau est minéralisée. Les valeurs de la conductivité électrique mesurées en 2004, varient de 78  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  au puits (Pts-14) à 1158  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  au puits (Pts-17). Les eaux de la nappe des sables du Paléocène/Eocène sont donc faiblement à moyennement minéralisées. Pour les données de mars 1996, les valeurs de conductivités électriques varient de 71  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  au puits du village Mouftah à 970  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  au puits du village Gataga. Elles sont dans la même gamme de variations que celles de juin 2004.

## **III.2.1.2. Caractéristiques chimiques des eaux**

### **III.2.1.2.1. Classification des eaux**

Pour faire ressortir les différents faciès chimiques des eaux de nappe des sables du Paléocène/Eocène dans le secteur de la ville de Kaédi, les données des analyses chimiques acquises au cours des deux campagnes de prélèvement de juin 2004 et mars 1996 ont été reportées sur les diagrammes triangulaires de Piper (1944) (Fig. 13 et 14). Durant les deux campagnes de prélèvement, les eaux de nappe des sables du Paléocène/Eocène sont caractérisées généralement par des faciès chimiques où dominant les bicarbonates, les chlorures, le calcium, le sodium et le

magnésium. Dans le détail, ces eaux souterraines de la campagne de juin 2004, se répartissent entre les pôles suivants :

- dans le losange quadrangulaire, les eaux de la nappe se répartissent en trois grandes familles chimiques :

- les eaux chlorurées calciques et magnésiennes (F-01, Pts-04, Pts-06, Pts-07, Pts-09, Pts-10, Pts-11, Pts-12, Pts-13, Pts-15, Pts-16, Pts-17, Pts-18 et Pts-29). Ces ouvrages sont localisés le long du fleuve Sénégal, mais également au sud-est de la région. Ces eaux sont faiblement minéralisées et indiqueraient une zone de recharge de la nappe par le fleuve ;

- les eaux bicarbonatées calciques et magnésiennes (Pts-01, Pts-02, Pts-03, Pts-05, Pts-08, Pts-14, Pts-19, Pts-20, F-02, Pts-21, Pts-22, Pts-23, Pts-24, Pts-25 et Pts-28). Ces ouvrages sont situés à l'ouest et sur une bande allant du nord au sud de la région, où la description géologique faite par Baud (1936), révèle la présence des plaques de calcaires ;

- les eaux bicarbonatées sodiques et potassiques (Pts-26 et Pts-27). Ces deux points d'eau ont une minéralisation moyennement élevée ;

- dans le diagramme triangulaire des anions, les points d'eaux montrent une prédominance des points à évolution vers le pôle bicarbonaté (55 %), des points qui sont décalés vers le pôle chloruré nitraté (35 %) et des points d'eau à évolution vers le pôle à faciès mixtes (aucune prédominance d'un anion sur l'autre) (10 %) ;

- dans le diagramme triangulaire des cations, les points d'eaux se répartissent en quatre groupes : le premier à évolution vers le pôle sodique et potassique (Pts-26 et Pts-27), le deuxième vers le pôle calcique (19 %), le troisième vers le pôle magnésien (Pts-18) et le quatrième vers la zone centrale mixte de non prédominance des différents cations (71 %).

Pour la campagne de mars 1996, la classification des eaux à partir du diagramme de Piper, montre au contraire quatre familles d'eau dans le losange quadrangulaire : chlorurée calcique et magnésienne, bicarbonatée calcique et magnésien, bicarbonatée sodique et potassique et chlorurée sodique et potassique.

L'observation des diagrammes de Piper de 2004 et de 1996 des eaux de l'aquifère des Sables du Paléocène/Eocène, montre qu'il y a eu changement de classification de faciès chimiques, des anions et des cations des eaux entre les deux campagnes d'échantillonnage (2004 et 1996). Les

points d'eau qui se répartissaient d'une manière générale en trois faciès (faciès chloruré calcique et magnésien, bicarbonaté calcique et magnésien et bicarbonaté sodique et potassique) en juin 2004, se répartissent en quatre faciès chimiques (faciès chloruré sodique et potassique, chloruré calcique et magnésien, bicarbonaté calcique et magnésien et chloruré sodique et potassique) en mars 1996. Cette séparation est le résultat au cours de la campagne de 2004, soit d'un enrichissement en bicarbonates et en sodium et d'un appauvrissement en calcium (Pts-1, Pts-2, Pts-13 et Pts-14) ou soit d'un enrichissement en chlorures et en calcium et appauvrissement en bicarbonates et en sodium (Pts-11).

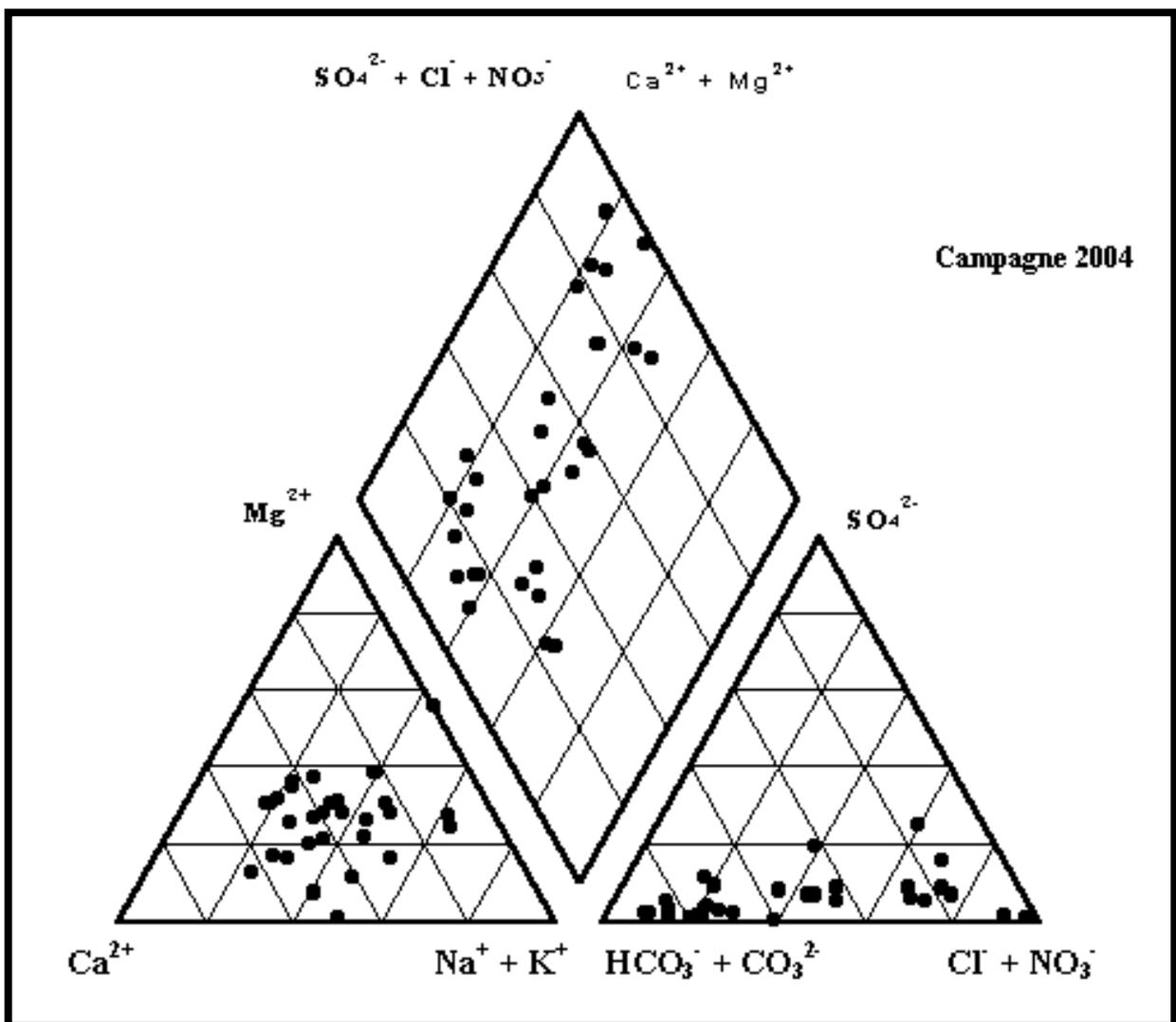


Figure 13 : Diagramme triangulaire de Piper pour l'aquifère des sables du Paléocène/Eocène de Kaédi (campagne 2004)

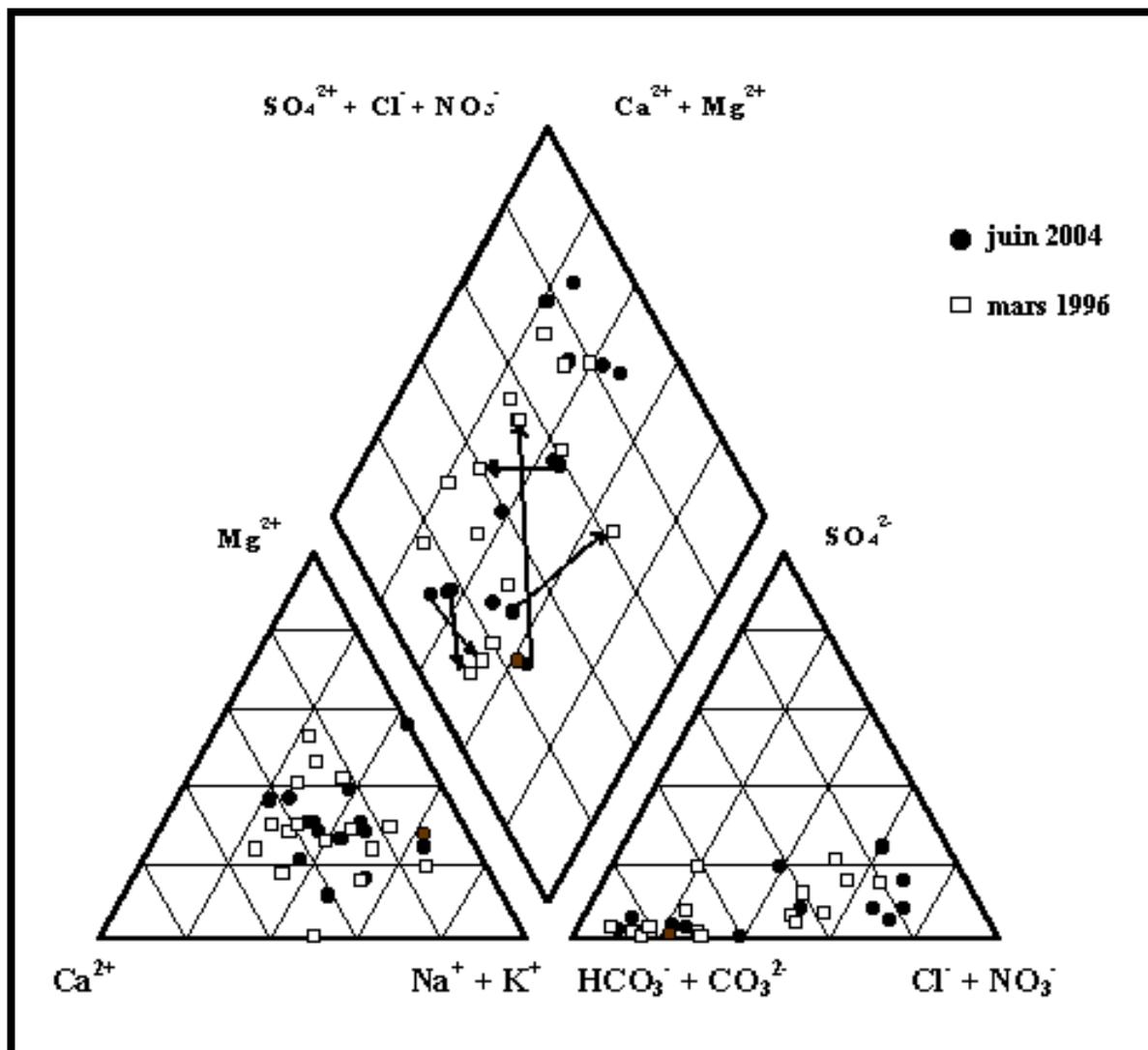


Figure 14 : Diagramme triangulaire de Piper pour l'aquifère des sables du Paléocène/Eocène de Kaédi (campagnes 2004 et 1996)

L'évolution du faciès bicarbonaté calcique et magnésien vers un faciès bicarbonaté sodique et potassique, serait dû à un enrichissement en sodium et/ou en potassium et à un appauvrissement en calcium et en magnésium des eaux de l'aquifère des sables du Paléocène/Eocène entre les deux campagnes par des phénomènes d'échanges de base (fixation du calcium et/ou du magnésium et une solubilisation du sodium et/ou du potassium) (Tableau 3). Selon Duchauffour (1997), les cations monovalents ( $\text{Na}^+$  et  $\text{K}^+$ ) présents dans la solution sont mobilisés par le complexe absorbant en période d'étiage alors qu'on assiste au relâchement des ions bivalents ( $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$ ) qui passent en solution.

L'évolution du faciès bicarbonaté calcique et magnésien vers le faciès chloruré sodique et potassique, serait liée à une diminution de la pression partielle en  $\text{CO}_2$  ou à une dilution des eaux de la nappe des sables du Paléocène/Eocène de la ville de Kaédi.

Tableau 3 : Rapports caractéristiques et des indices d'échange de base (I.E.B.) des points d'eau de la nappe des sables du Paléocène/Eocène (campagne 2004)

Ouvrages	Ca/Mg	Ca/Na	Mg/Na	K/Na	Na/Cl	Ca/Cl	Mg/Cl	SO <sub>4</sub> /Cl	HCO <sub>3</sub> /Cl	NO <sub>3</sub> /Cl	I.E.B.
Pts-01	1,21	1,02	0,84	0,10	5,94	6,06	5,00	0,88	12,65	0,71	-3,36
Pts-02	1,20	1,80	1,50	0,63	5,00	9,00	7,50	0,33	15,00	0,50	-5,65
F-01	1,47	0,89	0,60	0,23	1,66	1,47	1,00	0,31	2,34	1,16	-0,48
Pts-03	1,81	3,17	1,75	0,67	2,00	6,33	3,50	0,17	11,67	2,00	-1,88
Pts-04	1,22	5,29	4,35	1,71	0,47	2,50	2,06	0,39	1,04	3,65	-0,20
Pts-05	7,40	1,52	0,21	0,19	2,35	3,58	0,48	0,39	2,90	0,84	-1,01
Pts-06	2,35	1,47	0,63	0,06	1,33	1,96	0,84	0,24	1,08	1,77	0,05
Pts-07	3,52	0,89	0,25	0,06	1,85	1,65	0,47	1,04	0,65	1,56	-0,31
Pts-08	3,43	2,82	0,82	0,29	2,43	6,86	2,00	0,43	10,71	0,57	-1,35
Pts-09	1,15	0,73	0,63	0,04	2,19	1,59	1,38	0,44	0,90	2,67	-0,51
Pts-10	1,66	3,31	2,00	0,21	0,58	1,91	1,15	0,07	0,27	2,60	0,49
Pts-11	1,10	1,08	0,98	0,09	1,33	1,43	1,30	0,35	1,08	1,78	0,01
Pts-12	1,41	1,21	0,86	0,03	1,52	1,84	1,31	0,35	2,58	1,26	-0,04
Pts-14	2,00	1,63	0,81	0,31	1,78	2,89	1,44	0,11	6,67	0,00	-0,85
Pts-15	0,99	2,61	2,64	0,83	0,81	2,12	2,15	0,78	0,75	2,62	-0,26
Pts-16	1,57	2,34	1,49	0,76	0,51	1,20	0,77	0,04	0,07	1,94	0,24
Pts-17	1,15	3,77	3,26	0,97	0,29	1,10	0,95	0,13	0,59	0,78	0,50
Pts-18	0,00	0,00	1,65	0,29	0,83	0,00	1,37	0,24	1,22	0,41	0,20
Pts-19	0,74	0,46	0,63	0,07	4,91	2,27	3,09	0,36	6,36	0,82	-2,58
Pts-20	0,77	0,65	0,84	0,27	1,67	1,08	1,41	0,81	1,74	0,64	-0,58
Pts-21	5,00	2,52	0,50	0,03	1,70	4,29	0,86	0,74	4,79	0,11	-0,08
F-02	48,00	1,16	0,02	0,16	0,67	0,77	0,02	0,08	2,42	0,00	0,45
Pts-22	0,56	0,67	1,19	0,19	2,57	1,71	3,05	0,33	13,28	0,05	-1,18
Pts-23	1,50	2,61	1,74	0,13	0,79	2,07	1,38	0,07	5,67	0,29	0,37
Pts-24	1,62	3,61	2,23	0,39	0,39	1,40	0,86	0,56	4,46	0,35	0,58
Pts-25	0,50	0,34	0,68	0,80	4,08	1,40	2,78	0,25	5,80	0,65	-5,25
Pts-26	1,85	0,68	0,37	0,22	2,18	1,48	0,80	0,15	3,64	0,28	-0,95
Pts-27	0,38	0,22	0,58	0,29	2,70	0,60	1,57	0,13	6,05	0,71	-1,63
Pts-28	0,57	0,86	1,50	0,48	0,72	0,62	1,09	0,03	3,05	1,00	0,08
Pts-29	3,33	3,33	1,00	0,92	0,26	0,86	0,26	0,16	1,30	0,51	0,57

### III.2.1.3. Origines et processus de minéralisation des eaux

Afin de mettre en évidence l'origine de la minéralisation des eaux souterraines de l'aquifère des sables du Paléocène/Eocène dans le secteur de Kaédi, nous avons établi, d'une part, les

différentes relations entre les principaux éléments majeurs ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$ ) aboutissant à l'acquisition de la salinité des eaux, et entre ces éléments majeurs et la minéralisation totale d'autre part (Fig. 15).

Les différentes relations entre les valeurs du TDS et les concentrations en éléments majeurs ne montrent pas de bonnes corrélations. Ceci indique que la minéralisation totale des eaux de la nappe des sables du Paléocène/Eocène dans le secteur de la ville de Kaédi, n'est pas acquise en grande partie par les phénomènes d'altération des roches encaissantes et/ou de dissolution des minéraux argileux présents dans le réservoir aquifère et que d'autres phénomènes comme l'évaporation et la pollution pourraient intervenir dans cette minéralisation.

Les rapports entre le chlorure, considéré comme élément conservatif, et les autres éléments majeurs permettent de s'affranchir des effets de dilution ou de concentration. L'étude de ces rapports peut fournir des informations sur les processus d'acquisition de la minéralisation des eaux souterraines de l'aquifère des sables du Paléocène/Eocène dans le secteur de la ville de Kaédi.

### **III.2.1.3.1. Rapports $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$ et $\text{K}^+/\text{Cl}^-$**

Les concentrations en  $\text{Na}^+$  varient de 2,87 (Pts-04) à 274,57  $\text{mg.l}^{-1}$  (Pts-09) avec une moyenne de 27,35  $\text{mg.l}^{-1}$ . Le digramme binaire  $\text{Cl}^-$  contre  $\text{Na}^+$  donne une corrélation non significative à cause de la diversité chimique des eaux. Sur l'ensemble des échantillons analysés plus de 63 % ont des rapports  $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$  supérieurs à 1 (Fig. 16). Les rapports  $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$  supérieurs à 1, montrent un enrichissement en  $\text{Na}^+$  et un appauvrissement en ions  $\text{Cl}^-$ . Des échanges cationiques avec des éventuelles argiles du réservoir, la dégradation de rares minéraux silicatés d'origines atmosphériques et la concentration par évaporation, peuvent être évoqués comme des explications à l'excès en  $\text{Na}^+$  dans la nappe des sables du Paléocène/Eocène dans le secteur de la ville de Kaédi. Les points d'eau situés sur la droite de pente 1, témoignent une dissolution des minéraux évaporitiques et carbonatés présents dans le réservoir. Par contre les points d'eau placés sous la droite de pente indiquent soit les échanges de bases inverses c'est à dire rétention des alcalins et solubilisation des alcalino-terreux, soit des phénomènes de dilution.

Les ions  $\text{K}^+$  ont des concentrations qui varient de 1,19 à 51  $\text{mg.l}^{-1}$  avec une moyenne de 11  $\text{mg.l}^{-1}$ . Les ions  $\text{K}^+$  sont moins représentés dans les eaux de la nappe.

Le rapport  $\text{K}^+/\text{Cl}^-$  sont inférieurs à 1 (Fig. 17) sauf au niveau des puits villageois Pts-02, Pts-03 et Pts-25 qui se placent au dessus de la droite de pente 1, montrant des rapports  $\text{K}^+/\text{Cl}^-$

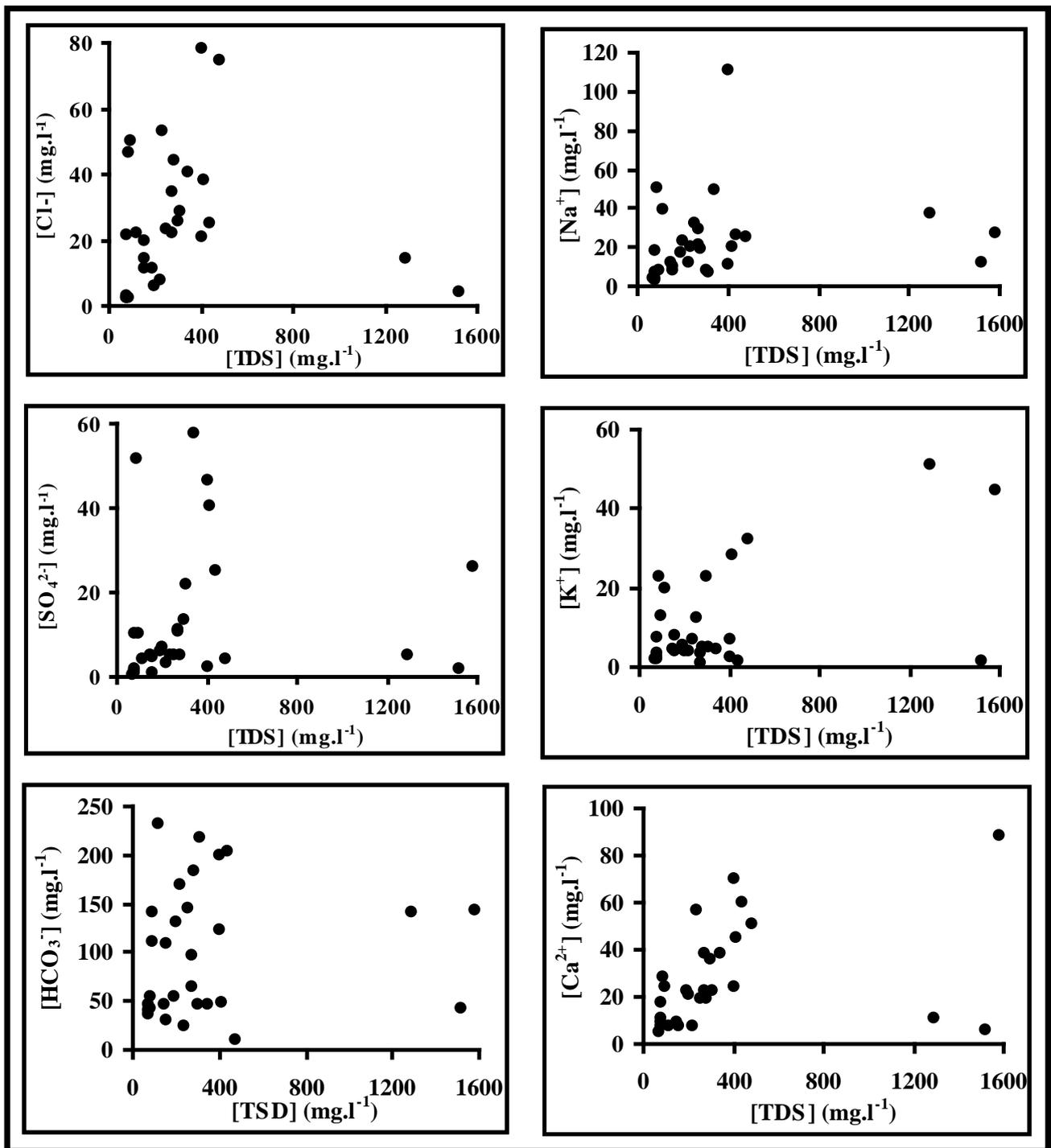


Figure 15 : Relation entre les éléments majeurs et le TDS des eaux du Paléocène/Eocène dans le secteur de Kaédi (campagne 2004)

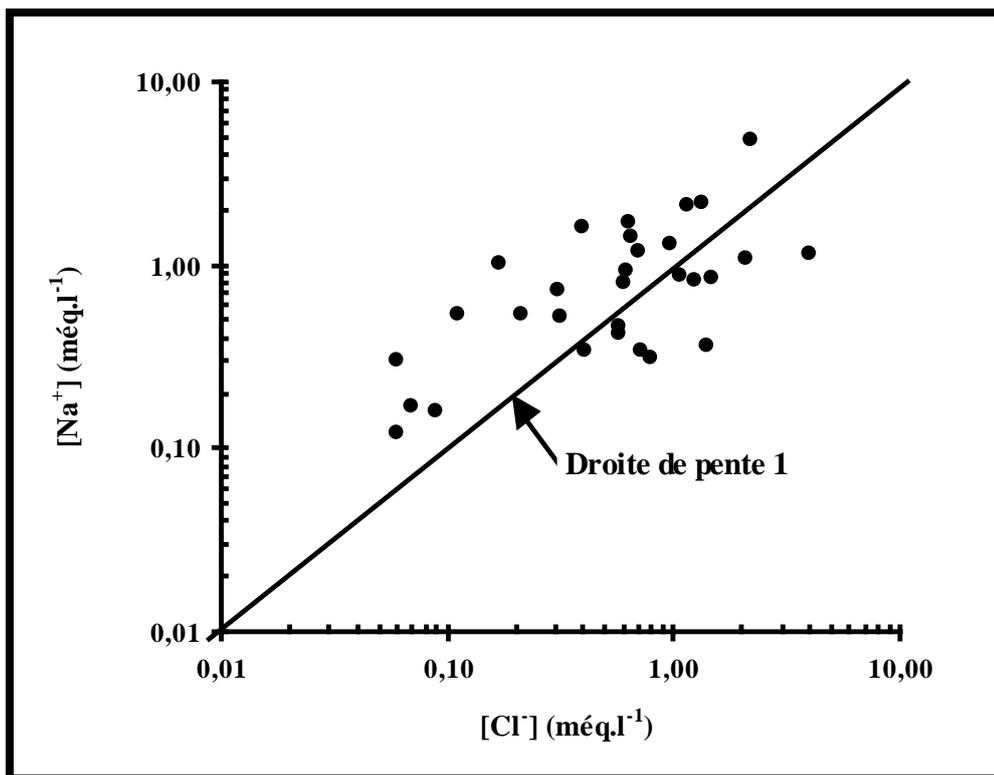


Figure 16 : Rapport  $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$  des eaux de la nappe du Paléocène/Eocène de Kaédi (campagne de juin 2004)

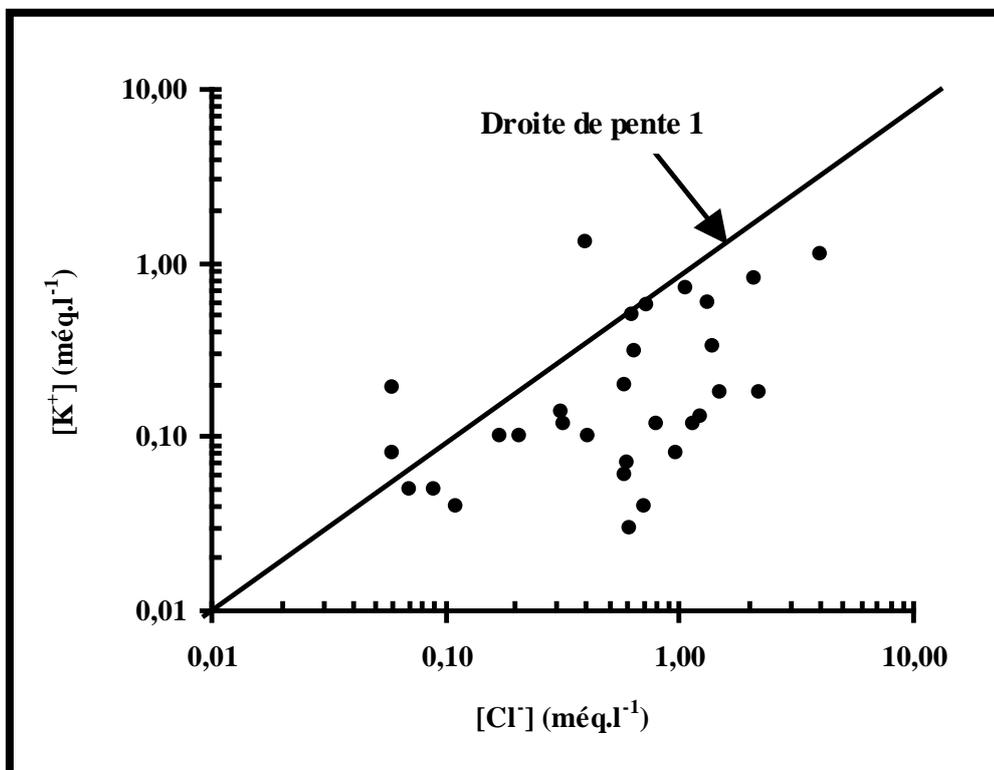


Figure 17 : Rapport  $\text{K}^+/\text{Cl}^-$  des eaux de la nappe du Paléocène/Eocène de Kaédi (campagne de juin 2004)

supérieurs à 1. Cette augmentation des teneurs en  $K^+$  au niveau de ces trois puits semble liée aux échanges de base entre la nappe et les minéraux argileux du réservoir qui retiennent ions  $Ca^{2+}$  et  $Mg^{2+}$  et libèrent leurs ions  $Na^+$  et  $K^+$  dans la solution. En effet, ces puits ont des valeurs des I.E.B. négatives (Cf. tableau 3). Les points d'eau situés en dessous de la droite de pente 1 sont plus appauvries en potassium probablement à cause de la forte consommation de cet élément par les plantes dans la zone non saturée mais également par des phénomènes de substitution qui ont lieu au sein des formations argileuses, ou le sodium a toujours tendance à remplacer le potassium et d'échanges de base inverse, c'est à dire fixation de  $Na^+$  et  $K^+$  et solubilisation de  $Ca^{2+}$  et  $Mg^{2+}$ .

Le rapport  $K^+/Na^+$  montre des valeurs inférieures à 1, indiquant la prédominance des ions sodium sur les ions potassium sur l'ensemble des points d'eau (Cf. tableau 3). La non corrélation entre l'ion  $Na^+$  et l'ion  $K^+$ , permet d'envisager des sources différentes de minéralisation des eaux de la nappe en ces deux ions. Les phénomènes d'absorption et d'échange de base peuvent jouer en faveur d'une diminution des ions potassium dans les eaux.

### **III.2.1.3.2. Rapports $Ca^{2+}/Cl^-$ et $Ca^{2+}/Na^+$**

Les concentrations en  $Ca^{2+}$  dans les eaux de la nappe varient de 5,71 à 268,97  $mg.l^{-1}$  avec une moyenne de 32  $mg.l^{-1}$ . Les rapports  $Ca^{2+}/Cl^-$  représentés par la figure 18, montre trois groupes d'eaux. Les eaux qui se placent au dessus de la droite théorique de dissolution des minéraux argileux met en évidence soit les phénomènes de concentration par évaporation et soit des processus d'échange de bases, les points d'eau qui se situent sur la droite de pente 1, montrent des phénomènes de dissolution des minéraux argileux (calcite et dolomite) et les eaux qui se mettent en dessous de la droite de pente 1, montrant un excès de calcium par les échanges de base avec les minéraux argileux.

Les rapports  $Ca^{2+}/Na^+$  sont supérieurs à 1 dans les 2/3 des échantillons analysés (Fig. 19). Cette prédominance des ions  $Ca^{2+}$  dans le secteur de la ville de Kaédi est due à la nature lithologique des terrains et aux processus d'échanges de base où le  $Ca^{2+}$  est remplacé par Na dans la matrice argileuse.

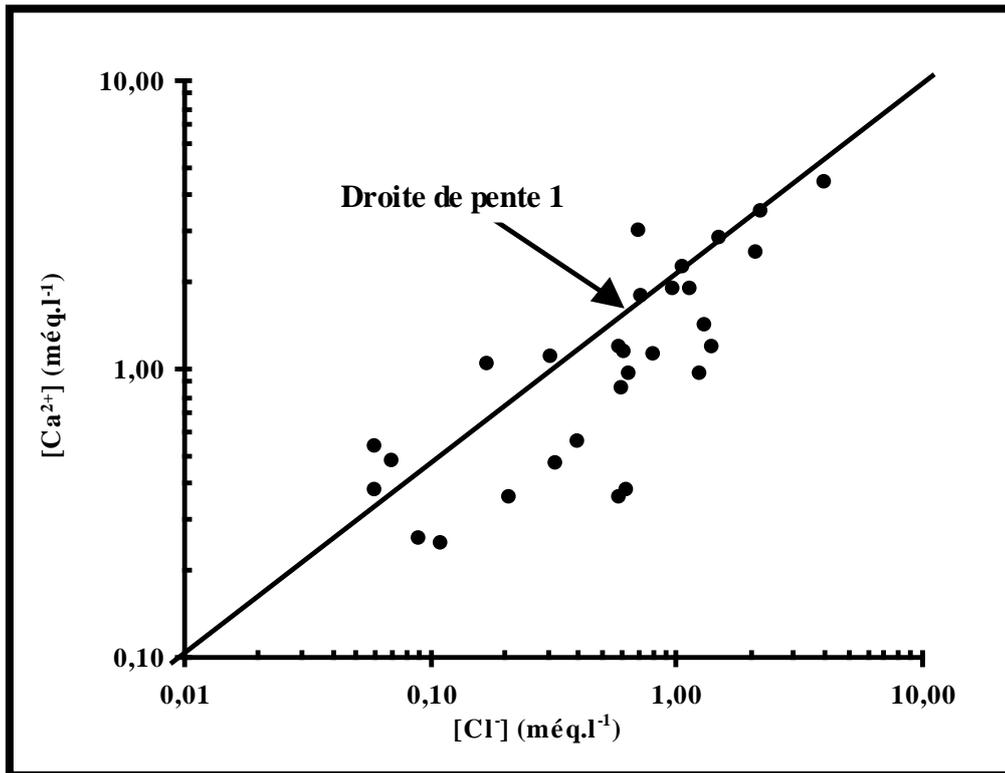


Figure 18 : Rapport  $\text{Ca}^{2+}/\text{Cl}^-$  des eaux de la nappe du Paléocène/Eocène de Kaédi (campagne de juin 2004)

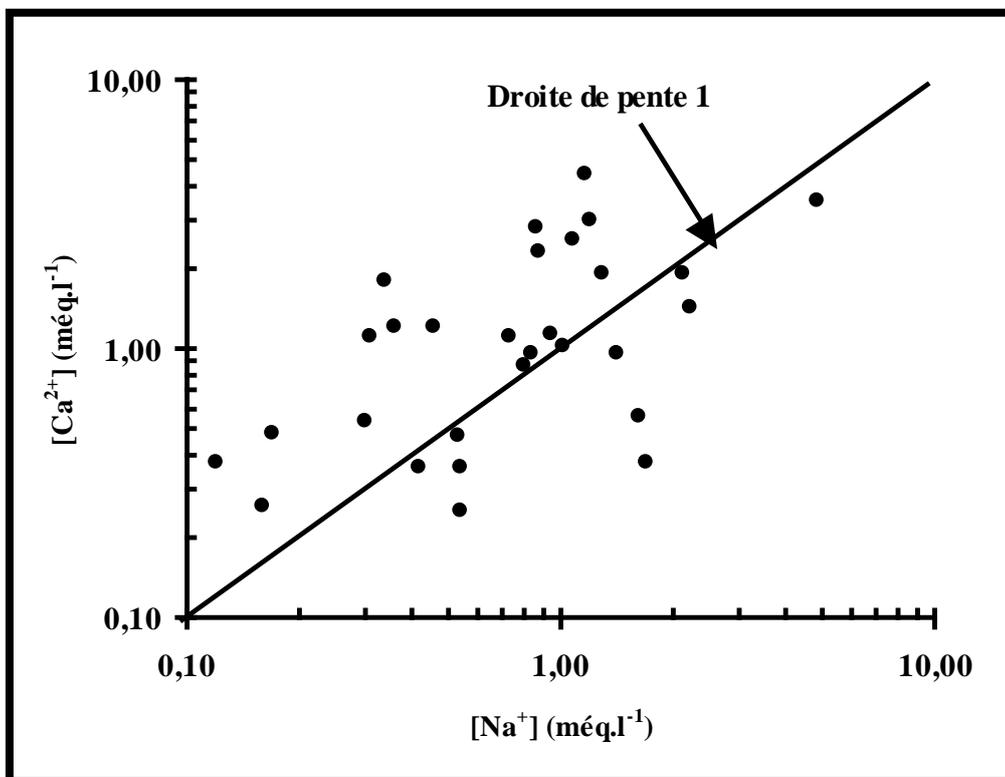


Figure 19 : Rapport  $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$  des eaux de la nappe du Paléocène/Eocène de Kaédi (campagne de juin 2004)

### III.2.1.3. 3. Rapports $Mg^{2+}/Cl^-$ et $Mg^{2+}/Ca^{2+}$

Les eaux de la nappe des sables du Paléocène/Eocène dans le secteur de la ville de Kaédi sont plus chargées en chlorures et relativement appauvries en  $Mg^{2+}$  (Fig. 20). Les concentrations en  $Mg^{2+}$  oscillent entre 0,2 et 143,3  $mg.l^{-1}$  avec une moyenne 15  $mg.l^{-1}$

Le rapport  $Ca^{2+}/Mg^{2+}$  est inférieur à 1 (Fig. 21). Cela suppose une prédominance des ions  $Ca^{2+}$  par rapport aux ions  $Mg^{2+}$ . Cette augmentation des teneurs en  $Ca^{2+}$  serait liée à une libération des ions  $Ca^{2+}$  suite à la dissolution des coquilles ou des tests d'organismes fossiles contenus dans les sables constitutifs du réservoir aquifère des sables du Paleocene/Eocene ou bien à une fixation des ions  $Mg^{2+}$  par le complexe absorbant. En période de basses eaux et de chaleur, les cations bivalents sont libérés et les monovalents fixés d'où la prédominance du Ca dans les eaux étudiées (Duchaufour, 1997).

### III.2.1.3.4. Rapports $HCO_3^-/Cl^-$ et $HCO_3^-/Ca^{2+}$

Les concentrations en  $HCO_3^-$  varient de 9,15 à 232  $mg.l^{-1}$  avec une moyenne de 110,1  $mg.l^{-1}$ . L'évolution de la minéralisation des  $HCO_3^-$  est différente des autres ions. Les concentrations les plus élevées se trouvent essentiellement à l'ouest avec des valeurs supérieures à 100  $mg.l^{-1}$ . Ce qui permet de différencier les eaux faiblement minéralisées au nord, au centre et au sud. Ces fortes teneurs en  $HCO_3^-$  sont liées certainement à une forte influence de la diffusion du  $CO_2$  atmosphérique et biogénique.

Dans la figure 22, la faible corrélation entre les bicarbonates et les chlorures ( $R^2 = 0,01$ ) montre que la dissolution des minéraux carbonatés est limitée. Elle est uniquement observée dans quelques échantillons qui se placent sur la droite de pente 1 dite droite théorique de dissolution des minéraux argileux présents dans le réservoir aquifère. Néanmoins, la position de la majorité des échantillons au dessus et en dessous de la droite de pente 1, indique vraisemblablement que le processus de dissolution est mineur dans la minéralisation des eaux de la nappe des sables du Paléocène/Eocène de Kaédi. Ceci est bien confirmé par le rapport  $HCO_3^-/Ca^{2+}$  (Fig. 23) qui illustre trois groupes d'eaux.

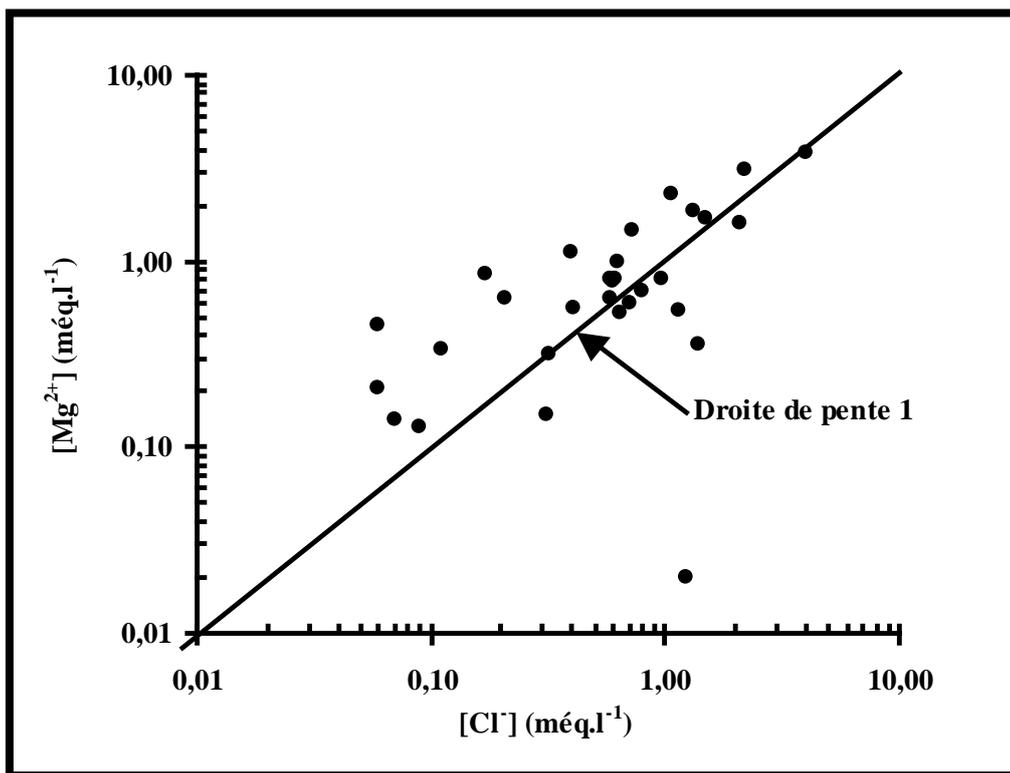


Figure 20 : Rapport  $Mg^{2+}/Cl^-$  des eaux de la nappe du Paléocène/Eocène de Kaédi (campagne de juin 2004)

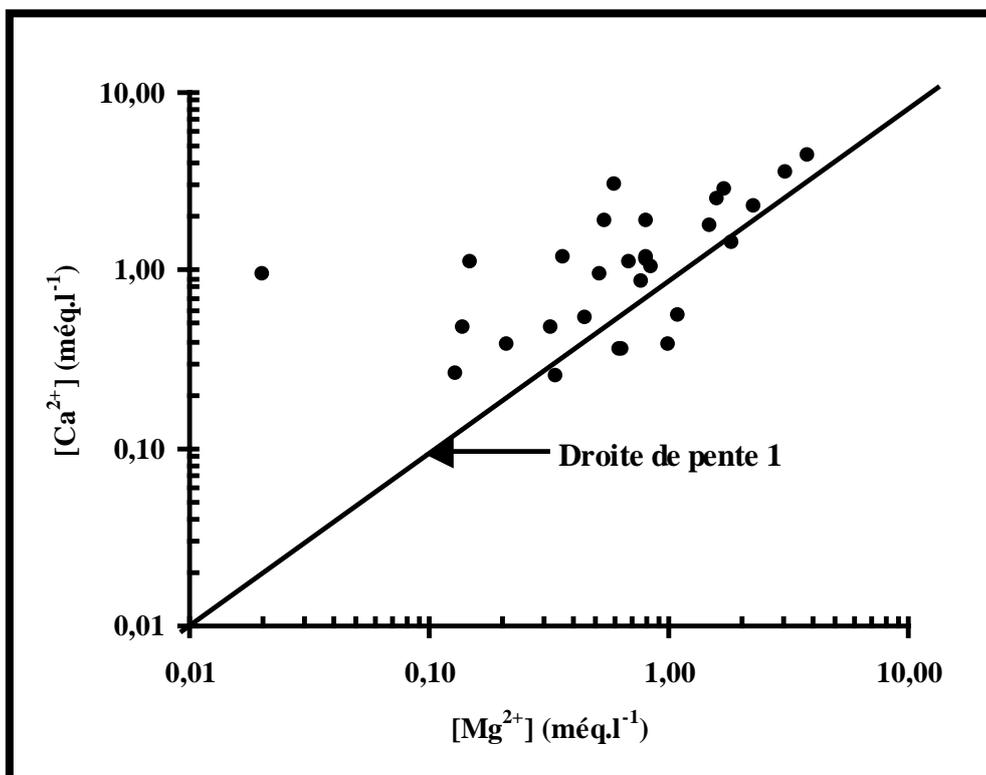


Figure 21 : Rapport  $Ca^{2+}/Mg^{2+}$  des eaux de la nappe du Paléocène/Eocène de Kaédi (campagne de juin 2004)

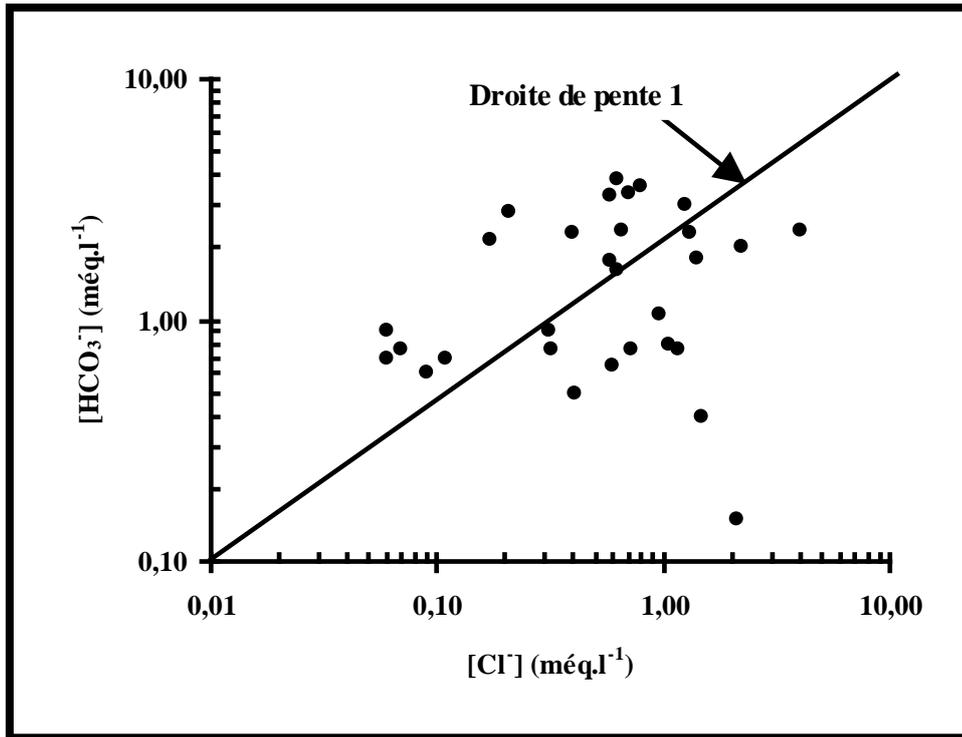


Figure 22 : Rapport  $\text{HCO}_3^-/\text{Cl}^-$  des eaux de la nappe du Paléocène/Eocène de Kaédi (campagne de juin 2004)

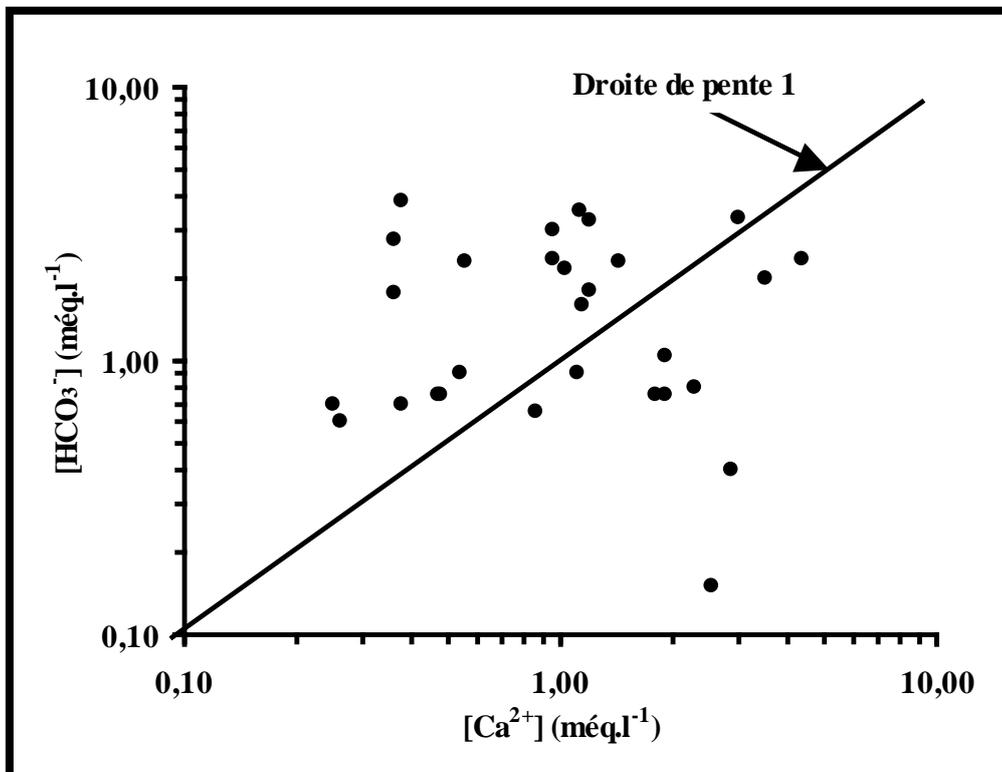


Figure 23 : Rapport  $\text{HCO}_3^-/\text{Ca}^{2+}$  des eaux de la nappe du Paléocène/Eocène de Kaédi (campagne de juin 2004)

Les eaux qui se placent au dessus de la droite théorique de dissolution des minéraux argileux (de pente 1) met en évidence les phénomènes de concentration par évaporation et/ou de la dissolution partielle du CO<sub>2</sub> issu de la dégradation de la matière organique dans le milieu d'étude qui est caractérisé par une forte activité biologique mais aussi du CO<sub>2</sub> atmosphérique, les points d'eau qui se situent sur la droite de pente 1, montrent des phénomènes de dissolution des minéraux argileux (calcite et dolomite) et les eaux qui se mettent en dessous de la droite de pente 1, montrant un excès de calcium par les échanges de base avec les minéraux argileux.

#### III.2.1.3.4. Rapports SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/Cl<sup>-</sup> et SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/Ca<sup>2+</sup>

Les ions sulfates varient de 0,65 à 222,7 mg l<sup>-1</sup> avec une moyenne de 21,74 mg l<sup>-1</sup>. En l'absence de pollution industrielle et de formations gypsifères, les teneurs élevées en SO<sub>4</sub> dans les eaux de type chloruré calcique localisées le long du fleuve ne peuvent être que d'origine continentale.

Le rapport SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/Cl<sup>-</sup>, illustré dans la figure 24, montre que la presque totalité des points d'eau échantillonnés se placent en dessous de la droite de pente 1, à l'exception d'un seul point d'eau qui se situe sur celle-ci. Ceci plaide en faveur d'un effet composé, dans lequel interviennent le processus de précipitation des minéraux carbonatés (calcite et dolomite) ou de réduction des sulfates pour les échantillons présentant un déficit en sulfates et le phénomène d'évaporation qui intéresse les échantillons situés sur la droite de pente 1. Cette figure montre également que les eaux de la nappe des sables du Paléocène/Eocène dans le secteur de la ville de Kaédi, sont moins chargées en sulfates qu'en chlorures.

Le rapport SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/Ca<sup>2+</sup> montre également des valeurs inférieures à 1 indiquant que l'enrichissement en calcium des eaux de la nappe des sables du paléocène/Eocène se fait indépendamment des sulfates. La réduction du SO<sub>4</sub> par la matière organique en présence du CO<sub>2</sub> peut être une source. On obtient de l'Hydrogène sulfuré par la formule suivante :



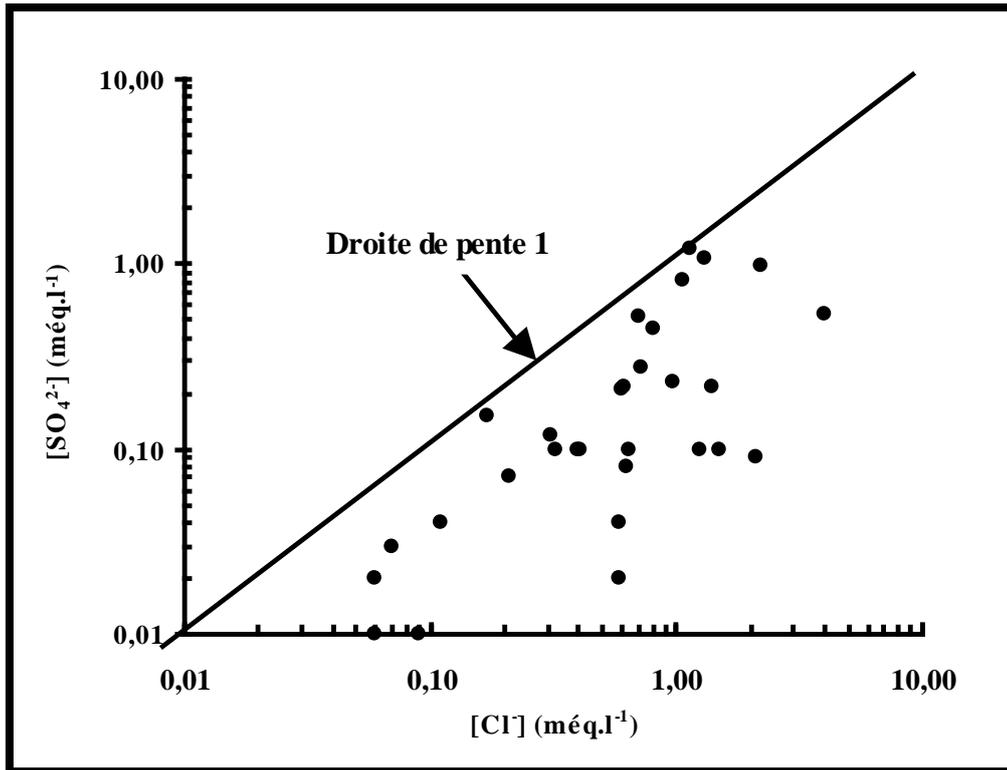


Figure 24 : Rapport  $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$  des eaux de la nappe du Paléocène/Eocène de Kaédi (campagne de juin 2004)

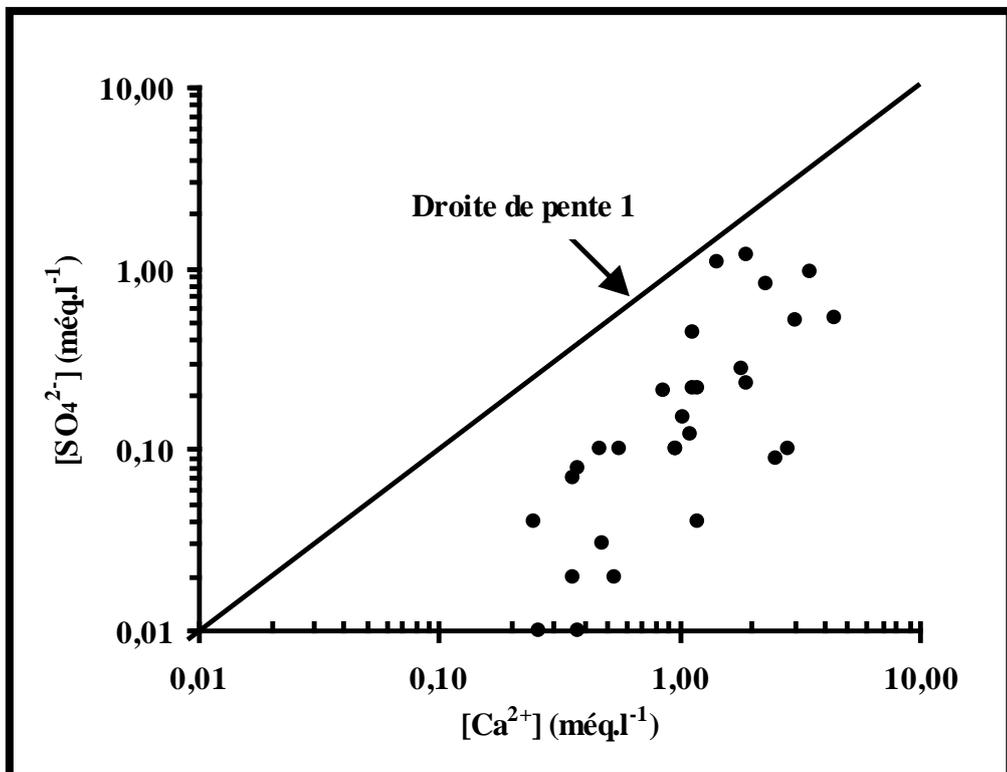


Figure 25 : Rapport  $\text{SO}_4^{2-}/\text{Ca}^{2+}$  des eaux de la nappe du Paléocène/Eocène de Kaédi (campagne de juin 2004)

### III.2.1.3.5. Rapport $\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-$

Les teneurs en  $\text{NO}_3^-$  des eaux de la nappe varient de 0,2 à 365,65  $\text{mg l}^{-1}$  avec une moyenne de 65,8  $\text{mg l}^{-1}$ . Les concentrations les plus élevées sont observées à l'Est et à l'ouest le long du fleuve Sénégal. Elles sont relativement faibles dans le reste de la zone et ne dépassent pas 40  $\text{mg l}^{-1}$ . Les fortes teneurs en  $\text{NO}_3^-$  observées au niveau de certains ouvrages (365  $\text{mg l}^{-1}$  à Diowol, 240  $\text{mg l}^{-1}$  à Weinatt, 194,73  $\text{mg l}^{-1}$  à Gataga, 172  $\text{mg l}^{-1}$  à Rindiao, 163  $\text{mg l}^{-1}$  à Nereika) indiquent une pollution ponctuelle de la nappe au droit de ces ouvrages. Donc la majorité de ces échantillons montre une prédominance des ions  $\text{Cl}^-$  par rapport aux ions  $\text{NO}_3^-$  (Fig. 26). Contrairement aux ions chlorures, l'augmentation de la teneur des nitrates dans ces eaux résulterait d'une décomposition de la matière organique et/ou d'une pollution anthropique à partir de la zone non saturée.

Le diagramme binaire  $\text{NO}_3^-$  contre  $\text{Cl}^-$  montre une assez bonne 2004 ( $R^2=0,91$ ) et la similitude de la distribution spatiale montrent une origine commune entre ces deux ions. Nous pouvons donc évoquer la pollution anthropique au droit de ces points d'eau comme responsable de l'apport en  $\text{NO}_3^-$ . En effet, ces points d'eau sont soit au voisinage de puits villageois transformés en fosses sceptiques ou dépôts d'ordures soit dans des jardins maraîchers.

### III.2.1.3.6. Rapport $[\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}]/[\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}]$

L'effet de la dissolution des évaporites et des minéraux carbonates peut être mis en évidence par la relation entre  $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$  et  $(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ . Cette relation est illustrée dans la figure 26, montre nettement que ce sont quelques points d'eau de l'aquifère des sables du Paléocène/Eocène de la ville de Kaédi placés sur la droite de pente 1, qui sont concernés par l'effet de la dissolution.

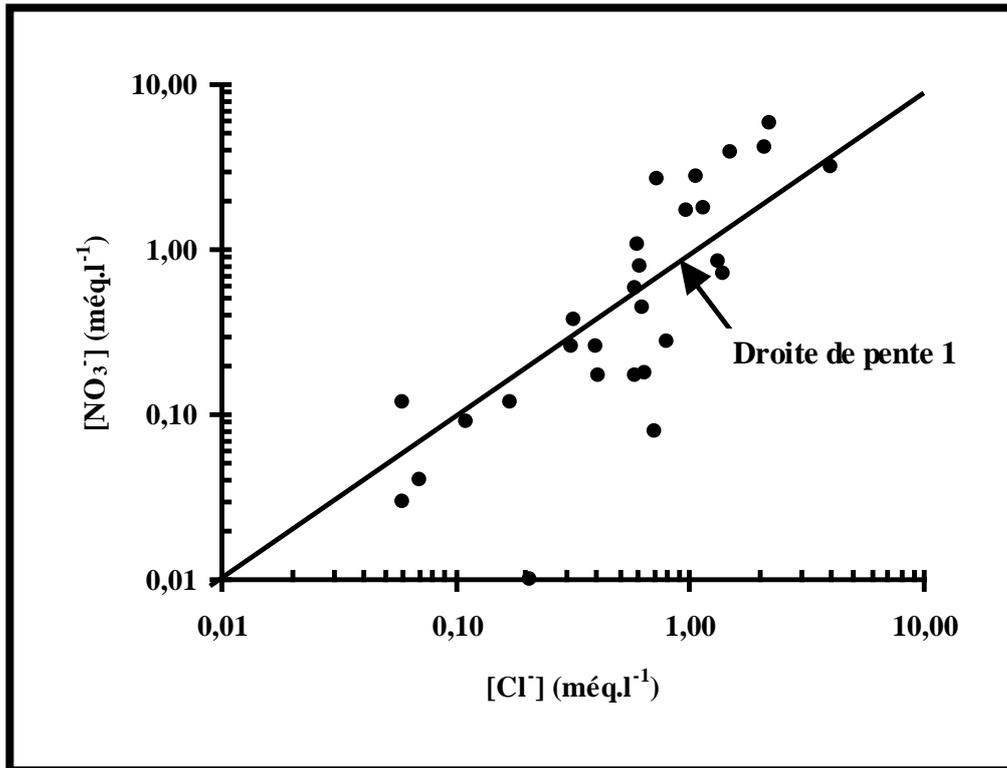


Figure 26 : Rapport  $\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-$  des eaux de la nappe du Paléocène/Eocène de Kaédi (campagne de juin 2004)

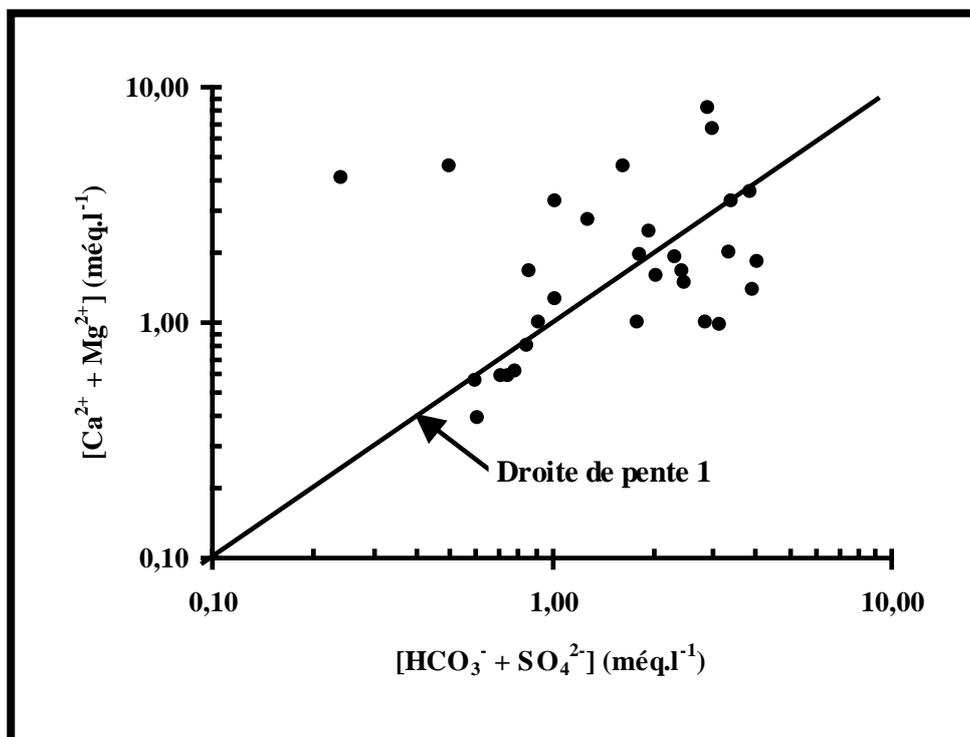


Figure 27 : Diagramme binaire  $[\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}]$  vs  $[\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}]$  des eaux (campagnes juin 2004 et 1996)

### III.2.1.3.7. Rapport $[(Ca^{2+} + Mg^{2+}) - (HCO_3^- + SO_4^{2-})] / [(Na^+ + K^+) - Cl^-]$

On parle souvent des échanges de base avec les minéraux argileux qui existent dans les formations aquifères et les eaux souterraines. Ces échanges caractérisent les minéraux argileux ayant la possibilité de fixer des ions par adhésion et de libérer d'autres selon la charge électrique existant entre les feuillets des minéraux argileux et l'état de saturation de la solution.

L'indice d'échange de base (I.E.B.), encore appelé indice de déséquilibre calco-alcalin, peut être également calculé par les formules suivantes (Schoeller, 1962 *in* Sy Tapsoba, 1990) :

- si  $r Cl^- > r (Na^+ + K^+)$ , dans ce cas l'eau de la nappe échange ces alcalins ( $Na^+$ ,  $K^+$ ) contre les alcalino-terreux ( $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ) des permutolites c'est-à-dire une fixation des alcalino-terreux ( $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ) et une solubilisation des alcalins ( $Na^+$ ,  $K^+$ ). Cet échange cationique est symbolisé par les réactions suivantes :  $(2 Na^+ \Leftrightarrow Ca^{2+}$  et  $2 Na^+ \Leftrightarrow Mg^{2+})$ . L'indice d'échange de base est positif et s'écrit :

$$I.E.B. = \frac{r Cl^- - r (Na^+ + K^+)}{r Cl^-}$$

- si  $r Cl^- < r (Na^+ + K^+)$ , dans ce cas l'eau de la nappe échange ses alcalino-terreux ( $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ) contre les alcalins ( $Na^+$ ,  $K^+$ ) des permutolites, c'est-à-dire fixation des alcalins ( $Na^+$  ;  $K^+$ ) et la solubilisation des alcalino-terreux ( $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ). L'indice d'échange de base est négatif et s'écrit :

$$I.E.B. = \frac{r Cl^- - r (Na^+ + k^+)}{r (SO_4^{2-} + HCO_3^- + NO_3^-)}$$

Dans le cadre de cette étude, les échanges de base qui caractérisent les différents réservoirs aquifères, sont mis en évidence par la relation  $[(Ca^{2+} + Mg^{2+}) - (HCO_3^- + SO_4^{2-})]/[(Na^+ + K^+) - Cl^-]$ , présentée dans la figure 27 (*in* Garcia et al., 2001). Cette relation met l'accent, uniquement sur les réactions pouvant exister entre les minéraux argileux et la solution, en se débarrassant des ions issus éventuellement d'autres réactions de dissolution des minéraux carbonatés et

évaporitiques. Cette figure met en évidence les échanges de base avec les minéraux argileux qui affectent les eaux des sables du Paléocène/Eocène de Kaédi pendant l'infiltration des eaux de pluies et durant leur séjour au sein de l'aquifère lui-même. Dans cette figure, zones sont énumérées :

- les zones 1 et 2 , où la différence entre les ions ( $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$ ) et les ions ( $\text{HCO}_3^-$  et  $\text{SO}_4^{2-}$ ) est positive, montre que dans ces deux zones c'est le processus d'échange inverse de bases qui domine. Les rapports négatifs sont dus à la rétention des alcalins au niveau des argiles et les rapports positifs à un apport d'ions  $\text{Na}^+$  et  $\text{K}^+$ . Cet apport reste cependant faible à cause des fortes perméabilités ;
- les zones 3 et 4, où la différence entre les ions ( $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$ ) et les ions ( $\text{HCO}_3^-$  et  $\text{SO}_4^{2-}$ ) est négative, indique c'est le processus d'échange de base qui domine. Dans ces zones, on a libération des ions  $\text{Na}^+$  et  $\text{K}^+$  et une rétention des alcalino-terreux au niveau des argiles.

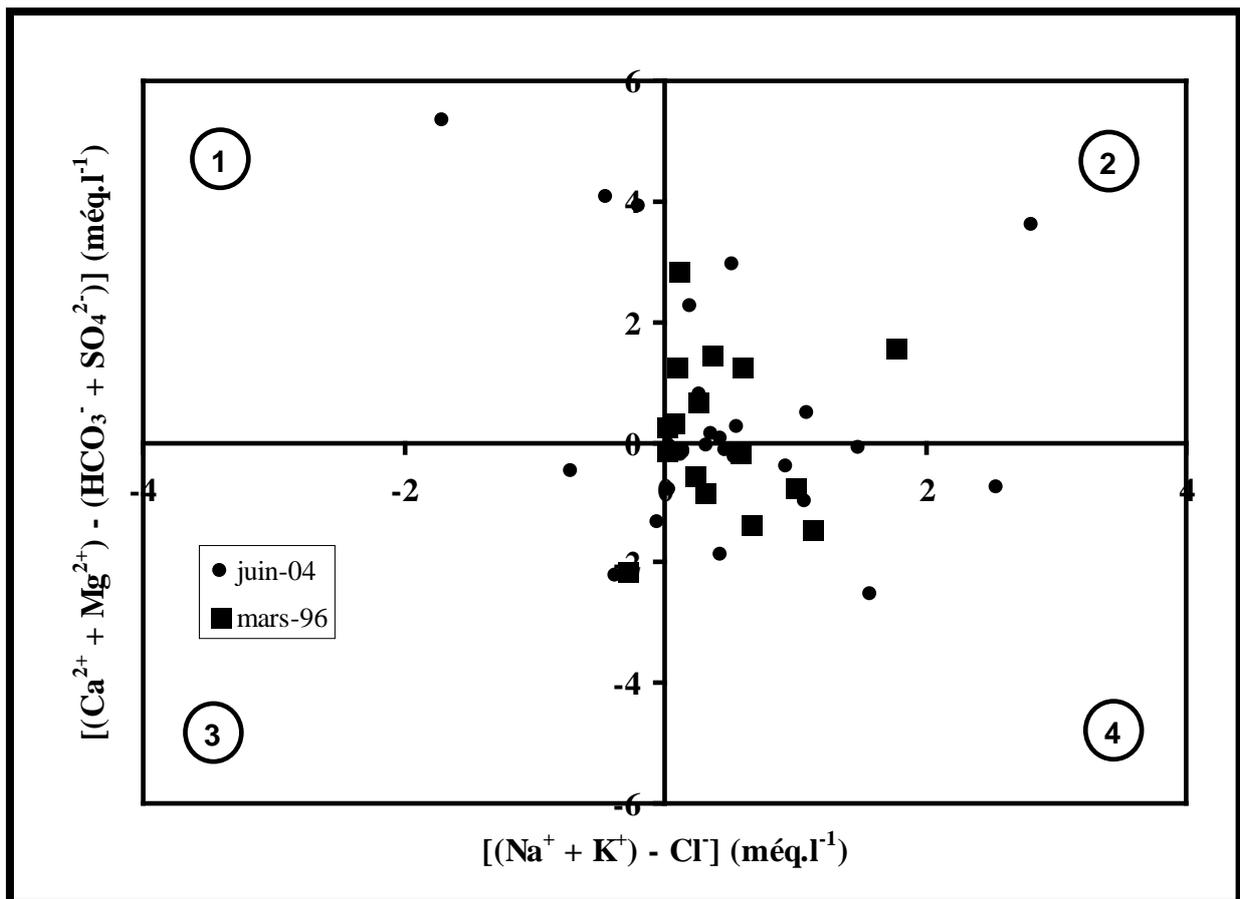


Figure 28 : Diagramme binaire  $[(\text{Na}^+ + \text{K}^+) - \text{Cl}^-]$  vs  $[(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) - (\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})]$  des eaux (campagnes 2004 et 1996)

### III.2.2. Qualité des eaux de la nappe des sables du Paléocène/Eocène

D'après l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS, 1993), l'eau de boisson ou eau potable peut être définie comme une eau ne renfermant en quantités dangereuses ni substances chimiques ni germes nocifs pour la santé.

Les normes définissant la potabilité de eaux diffèrent d'un pays à l'autre. On se réfère habituellement aux normes de l'OMS (1993) ou de la Communauté Economique Européenne (CEE, 1980).

La relativité de ces normes est due aux moyens (médicaux, analytiques, économiques, ...) du pays qui les a dictées, de l'exigence de sa population, et bien sûr des possibilités de la satisfaire. En effet, un pays où l'eau est rare sera moins regardant quant à sa qualité. Le souci quantité primera alors largement le souci qualité. D'autre part, sa population est en général rendue plus résistante par immunisation naturelle suite à une longue accoutumance à des eaux de qualité médiocre.

Il est donc difficile d'établir des normes strictes de qualité chimique et bactériologiques des eaux. Aussi, les limites indiquées par les différentes classifications sont considérées comme admissibles (souhaitables) et données à titre indicatif.

En ce qui concerne cette étude, les analyses microbiologiques n'ont pas été réalisées, nous nous limiterons à l'étude comparative de certains éléments chimiques par rapport aux normes de qualités requises pour une eau potable.

Le tableau 4 présente les normes de l'Organisation Mondiale de la Santé (O.M.S., 1993) concernant quelques caractéristiques chimiques de l'eau potable et les teneurs chimiques (minimum, maximum et moyenne) dans les eaux de l'aquifère des sables du Paléocène/Eocène dans le secteur de Kaédi.

L'analyse des résultats (Tableaux 4 et annexes), nous permet de dire que la bonne potabilité des eaux de la nappe des sables du Paléocène/Eocène dans le secteur de la ville de Kaédi, est remise en cause par la présence des nitrates dans certains points d'eau à des teneurs dépassant parfois largement la norme admise par l'O.M.S. de  $50 \text{ mg.l}^{-1}$  pour l'eau de boisson.

Les conductivités électriques des eaux sont relativement faibles ( $78 - 1158 \mu\text{S.cm}^{-1}$ ) sur l'ensemble de la zone d'étude. Ces valeurs de conductivité électrique sont inférieures à la valeur

maximale admissible de 2000  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  pour l'eau de boisson par l'Organisation Mondiale de la santé (O.M.S., 1993). Ces eaux sont globalement douces.

Pour les ions majeurs  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$  et  $\text{SO}_4^{2-}$ , l'ensemble des points d'eau analysés présentent des concentrations inférieures aux normes admises pour l'eau de boisson par l'O.M.S.

En ce qui concerne les nitrates, sur la totalité des points d'eau échantillonnés dans la zone de Kaédi, 10 points d'eau ont montré des teneurs en nitrates (50,84 – 365,36  $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ ) supérieures à la norme admise par l'O.M.S. (50  $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ ). La présence, dans ces points d'eau, de concentrations excessives en nitrates constitue un indice de pollution et, par conséquent, un risque pour la santé des nourrissons (moins de 6 mois). Elle peut causer des troubles circulatoires : méthémoglobinémie ou *blue baby syndrome* (Rajagopal et Graham, 1989), comme elle peut provoquer le cancer de l'estomac (El Tayeb El Saddig, 1982). Les nitrates peuvent aussi provoquer l'hypertension et sont les précurseurs de nitrosamines cancérigènes (Castany, 1982).

Tableau 4 : Normes de potabilité de l'O.M.S. (1993) et teneurs en éléments chimiques dans les eaux de la nappe des sables du Paléocène/Eocène de Kaédi (campagne 2004)

Paramètres et substances chimiques	Concentrations maximales admissibles (O.M.S.)	Teneurs chimiques dans les eaux de l'aquifère des sables du Paléocène/Eocène de Kaédi (juin 2004)		
		minimum	maximum	moyenne
T ( $^{\circ}\text{C}$ )	25	28,00	36,90	32,60
pH	9,60	6,9	8,30	07,33
CE ( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ )	2000	78,00	1158,00	376,00
$\text{Cl}^-$ ( $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ )	200	2,16	142,47	26,69
$\text{SO}_4^{2-}$ ( $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ )	250	0,65	57,74	12,99
$\text{NO}_3^-$ ( $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ )	50	0,00	365,39	67,34
$\text{Mg}^{2+}$ ( $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ )	50	0,20	45,88	11,33
$\text{Na}^+$ ( $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ )	100	1,19	111,33	22,45
$\text{Ca}^{2+}$ ( $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ )	100	0,00	88,24	26,20
$\text{F}^-$ ( $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ )	1,50	0,00	1,42	0,53

Cette pollution en nitrates des eaux souterraines dans le secteur de la ville de Kaédi, est essentiellement due à la transformation des puits villageois abandonnés en fosses sceptiques ou dépôts d'ordures de nature variée, associée aux activités de teintures (d'où le nom bleu Kaédi) et agropastorales avec l'utilisation des engrais chimiques dans la région.

Il est aussi important de faire savoir que le fluor est aussi présent sur la presque totalité des points d'eau échantillonnés, mais à des teneurs inférieures à la valeur limite de  $1,50 \text{ mg.l}^{-1}$  définie pour l'eau de boisson par l'O.M.S.

### **III.3. Conclusion**

Les données hydrochimiques des eaux des puits villageois et des forages collectées dans le secteur de la ville de Kaédi au sud de Nouakchott, ont été utilisées pour évaluer la qualité chimique des eaux de la nappe des sables du paléocène /Eocène dans le secteur de la ville de Kaédi et déterminer les processus chimiques responsables de ces variations.

L'étude hydrochimique a montré que les eaux sont faiblement minéralisées avec des valeurs de conductivités électriques comprises entre 78 et  $1158 \mu\text{S.cm}^{-1}$ . Les pH des eaux sont neutres à légèrement basiques, et indiquent que l'alcalimétrie est essentiellement contrôlée par les ions bicarbonates ( $\text{HCO}_3^-$ ). Les valeurs des températures des eaux sont proches de celles de la température atmosphérique ambiante, témoignant ainsi l'ouverture du système aquifère étudié.

Elle a également permis d'individualiser dans le secteur de la ville de Kaédi trois types de faciès chimiques : chloruré calcique et magnésien, bicarbonaté calcique et magnésien et bicarbonaté sodique et potassique.

Les relations établies entre les différents éléments majeurs et la minéralisation totale, ont montré que les phénomènes de dissolution sont mineurs dans l'acquisition de la charge saline des eaux. La minéralisation des eaux dans le secteur de la ville de Kaédi semble être principalement contrôlée par les processus d'échanges de base cationique, l'évaporations et la pollution anthropique mise en évidence par la présence des nitrates à des teneurs relativement élevées. En effet, les processus d'échange s de base avec les minéraux argileux jouent u rôle très important dans le système aquifère de la ville de Kaédi. Ces processus participent à l'acquisition de la minéralisation totale des eaux de la nappe des sables du Paléocène/Eocène dans le secteur de la ville de Kaédi. Par libération des ions  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$ .

Du point de vue qualitatif, les eaux de cette nappe sont menacées par la pollution anthropique due aux nitrates résultant de la transformation des puits abandonnés en fosses septiques et en dépôts d'ordure ménagère. Cette pollution est déjà ressentie au niveau de certains puits traditionnels qui ont révélé des teneurs supérieures à la norme de  $50 \text{ mg.l}^{-1}$  pour l'eau de boisson recommandée par l'OMS.

# **CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES**

## CONCLUSION GENERALE

Le secteur de la ville de Kaédi, capitale de la région du Gorgol, est située à 437 km au sud de Nouakchott, entre les latitudes 15°35' et 16°30' Nord et les longitudes 12°56' et 13°44' Ouest. Le climat de type sahélien, est caractérisé par une longue saison sèche et une courte saison humide avec des précipitations qui varient de 200 à 520mm par an. L'évolution des chroniques de précipitations montre généralement une tendance à la baisse au cours de ces dernières décennies.

Les études géologiques et hydrogéologiques antérieures ont montré que les formations du Paléocène et Eocène dans la région de Gorgol, constituait un système aquifère complexe, renfermant deux à trois niveaux aquifères bien différenciés et constitués de sables, de grés et de calcaires. Ces aquifères sont libres à l'ouest et semi-captifs à l'est de la ville de kaédi. Les paramètres hydrodynamiques sont variables dans le secteur de la ville de Kaédi. Les perméabilités varient de 0,118 à  $42,6 \cdot 10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$ , tandis que les valeurs de transmissivités sont comprises entre 1,1 et  $19,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$ . La piézométrie révèle la recharge de l'aquifère par le fleuve Sénégal, l'existence d'un dôme au droit de l'oued Garfa et une dépression à Rindiao. De nombreux puits villageois et deux forages exploitent cet aquifère dans le secteur de la ville de Kaédi. Dans ces conditions, se pose alors un problème de gestion rationnelle et de protection des ressources en eau.

L'étude hydrochimique a montré que les eaux sont faiblement minéralisées avec des valeurs de conductivités électriques comprises entre 78 et  $1158 \mu\text{S.cm}^{-1}$ . Les pH des eaux sont neutres à légèrement basiques, indiquant que l'alcalimétrie est essentiellement contrôlée par les ions bicarbonates ( $\text{HCO}_3^-$ ). Les valeurs des températures des eaux sont proches de celles de la température atmosphérique ambiante, témoignant ainsi l'ouverture du système aquifère étudié.

Elle a également permis d'individualiser dans le secteur de la ville de Kaédi trois types de faciès chimiques : chloruré calcique et magnésien, bicarbonaté calcique et magnésien et bicarbonaté sodique et potassique.

Les relations entre les différents éléments majeurs et la minéralisation totale, ont montré que les phénomènes de dissolution sont faiblement impliqués dans l'acquisition de la charge saline des eaux. La minéralisation des eaux dans le secteur de la ville de Kaédi semble être principalement contrôlée par les processus d'échanges de base, les phénomènes évaporatoires et de pollution anthropique.

Sur le plan qualitatif, les eaux de cette nappe sont menacées par la pollution anthropique due aux nitrates résultant de la transformation des puits abandonnés en fosses septiques et en dépôts d'ordure ménagère. Cette pollution est déjà ressentie au niveau de certains puits traditionnels qui ont révélé des teneurs supérieures à la norme de  $50 \text{ mg.l}^{-1}$  pour l'eau de boisson recommandée par l'OMS.

Au vu de l'état de pollution en nitrates et l'insuffisance de données dans la nappe des sables du Paléocène/Eocène de la ville de Kaédi, une étude doit être mise au point par l'Etat Mauritanien. Son objectif sera de contribuer à la reconnaissance structurale, géométrique, hydrodynamique et hydrochimique du système aquifère des sables Paléocène/Eocène de Kaédi en vue de dégager les conditions optimales de son exploitation durable et d'une gestion rationnelle des ressources en eau disponibles. Des mesures doivent être prises pour l'obtention de données fiables et scientifiquement valables.

Enfin, la tenue de campagnes de sensibilisation par les autorités locales pour un meilleur traitement sanitaire des puits abandonnés qui doivent être bien refermés en béton et non pas utilisés comme des fosses septiques ou des dépôts d'ordures.

# **REFERENCES**

# **BIBLIOGRAPHIQUES**

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AUDIBERT, M. (1960)**- Interprétation des variations naturelles du niveau des nappes aquifères du Sud-Ouest Mauritanien. Rapport BRGM, 217 p ; 28 fig. ; 12 tab.
- BAUD, L. (1936)**- Rapport sur le gisement de phosphates de la région de Kaédi. Arch. Mines Dakar, 47 p.
- BELLION, Y. (1987)**- Histoire post-paléozoïque de l'Afrique de l'ouest d'après l'étude de quelques bassins sédimentaires (Sénégal, Taoudenni, Iullenuden, Tchad). Thèse ès Sciences, univ. d'Avignon et des pays du Vaucluse, France, 269 p ; 126 fig. ; 13 tab.
- BURGEAP (1983)**- Etude hydrogéologique du bassin sud-ouest Mauritanien. Rapport final 231 p ; 52 fig. ; 22 tab.
- CASTANY, G., (1982)**. Principes et méthodes de l'hydrogéologie. *Edit. Dunod*, Paris, 236 p.
- CASTANY, G. (1967)** - Traité pratique des eaux souterraines. *Edit. Dunod*, Paris. 2<sup>é</sup> édition. 661p.
- C.C.E./E.C.C.,(1980)** - Guidelines for drinking water quality. European Community Commission.
- CHUDEAU, R. (1911)** - Note sur la géologie en Mauritanie. Rapport BSGT, tome 4, pp. 317-332, 10 tab.
- CNRE (2004)** - Etude de mise en place de périmètre de protection du champ captant de la ville de Kaédi. Rapport, 22 p ; 12 fig. ; 4 tab.
- DACOSTA, H. (1989)** - Précipitation et écoulement sur le bassin de Casamance. Thèse de 3<sup>éme</sup> cycle, départ de Géog., univ. CAD, Dakar, 278 p ; 69 fig. ; et 54 tab.
- DIAGANA, A. (1994)** - Etude hydrogéologique dans la vallée du fleuve Sénégal de Bakel à Podor : relation eaux de surface et eaux souterraines. Thèse 3<sup>éme</sup> Cycle, départ. De Géol., univ. CAD, Dakar, 126 p ; 65 fig.; 26 tab.

- DUCHAUFOR, P. (1997)** - Abrégé de pédologie. *Edit. Masson*, Paris, 291 p.
- ELOUARD, P. (1962)**- Etude hydrogéologique et géologique de la vallée du fleuve Sénégal. Rapport BRGM, tome 1, 356 p ; 39 fig.; 16 tab.
- ELOUARD, P. (1973)**- Etude hydrogéologique et géologique de la vallée du fleuve Sénégal. Rapport BRGM, tome 2 423 p; 29 fig. ; 23 tab.
- EL TAYEB EL SADDIG, M. (1993)** - Les systèmes de la région de Génina-Adré (confins soudano-tchadiens): hydrogéologie, hydrochimie et géochimie isotopique. Thèse de doctorat, univ. Avignon, France, 152 p.
- FETTER, C. W. (1994)**- Applied hydrogeology. Prentice Hall Inc., New Jersey (USA), 691 p.
- GARCIA M.G. ; DEL, V. ; HIDALGO, M. ; BLESIA, M. A. (2001)**– Geochemistry of groundwater in the alluvial plain of Tucuman province, Argentina. *Hydrogeol.J.*, vol. 9(6). Pp597.610.
- GAYE, C. B. (1990)**- Etude isotopique et géochimique du mode de recharge par les pluies et de décharge évaporatoire des aquifères libres sous climat semi-aride au nord du Sénégal. Thèse de Doctorat d'Etat, Départ. de Géol, Univ. C.A.D., Dakar, Sénégal, 245 p.
- HUBERT, H. (1920)**- Notice de la carte géologique au 1/1000000 de l'AOF. Feuille 5, 18– 26 p;
- ILLY, P. (1973)**- Etude hydrogéologique et géologique de la vallée du fleuve Sénégal. Thèse de doctorat ès Sciences, Univ. Avignon .263 p.
- IWACO. (1996)** - Etude de réhabilitation et de renforcement du système AEP des villes de Kaédi et de Mederdra. Rapport final DH, 89 p; 16fi g; 11 tab.
- KIRCHMER J. C., (1983)** - Quality control in water analyses. *Environmental Science and Technology*, 17 (4), pp 178-181.
- LE PRIOL, J. et DIENG, B. (1985)** - Etude hydrogéologique structurale par photo interprétation, géométrie et limites des aquifères souterrains. Rapport de synthèse, Dir. Ministère de l'Hydraulique 01/85/MH/DEH, 77p.

- MICHEL, P. (1956)** - Etude sur la morphologie de la vallée du Gorgol et de ses bordures .Arch. MAS 67 p ; 21 fig. ; 5 tab.
- O.M.S./W.H.O. (1993)** - Guidelines for drinking water quality. Geneva, Suisse
- OMVS/USAID (1988)** - Eau souterraine de la vallée du fleuve Sénégal, Projet OMVS/USAID 625-0958 ; 156p ; 18 fig. ; 11tab.
- OMVS/USAID (1989)** - Rapport dispositif de pompage RIM/DA264 : résultats et interprétations, Projet OMVS/USAID 625-0958; pp. 45-57.
- OMVS/USAID. (1990)** - Répertoire hydrogéologique. Projet OMVS/USAID 625 - 0958 ; 189 p ; 43 fig ; 36 tab.
- PIPER, A M. (1944)** – A graphical procedure in the geochemical interpretation of water analyses, Trans. Am. Geophys. Union, 25 : 914-923.
- RAJAGOPAL ; GRAHAM T., (1989)** - Expert opinion and groundwater quality protection. The case of nitrate drinking water. *Groundwater*, 27 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 Jacquville). Mémoire de DEA, Département de Géologie, univ. CAD, Dakar, Sénégal, 65 p.

# **TABLE DES MATIERES**

# TABLE DES MATIERES

<b>INTRODUCTION GENERALE.....</b>	<b>1</b>
<b>CHAPITRE I : CADRE PHYSIQUE DE LA ZONE D'ETUDE .....</b>	<b>3</b>
<b>I.1. SITUATION GEOGRAPHIQUE .....</b>	<b>3</b>
<b>I.2. RELIEF.....</b>	<b>3</b>
I.2.1. La vallée du fleuve Sénégal et ses affluents .....	3
I.2.2. La région des plateaux et hauteurs tabulaires du Gorgol.....	5
<b>I.3. SOLS .....</b>	<b>5</b>
<b>I.4. VEGETATION .....</b>	<b>5</b>
<b>I.5. HYDROGRAPHIE.....</b>	<b>5</b>
I.5.1. Le fleuve Sénégal.....	6
I.5.2. Le Gorgol.....	6
I.5.3. Le Savalel .....	6
I.5.4. Le Garfa.....	6
<b>I.6. CLIMATOLOGIE.....</b>	<b>6</b>
I.6.1. Mécanisme généraux du climat .....	7
I.6.2. Analyse des différents paramètres du climat .....	7
I.6.2.1. Température .....	8
I.6.2.2. Humidité relative .....	9
I.6.2.3. Vents .....	10
I.6.2.4. Evaporation et Evapotranspiration.....	10
I.6.2.5. Pluviométrie.....	11
<b>I.7. CONCLUSION .....</b>	<b>11</b>
<b>CHAPITRE II : SYNTHESE GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE .....</b>	<b>12</b>
<b>II.1. GEOLOGIE .....</b>	<b>12</b>
II.1.1. Présentation générale du bassin Sénégal-mauritanien.....	12
II.1.2. Lithostratigraphie .....	12
II.1.2.1. Le Maastrichtien.....	12
II.1.2.2. Le Paléocène.....	15
II.1.2.3. L'Eocène.....	15
II.1.2.4. Le Continental Terminal.....	16
II.1.2.5. Le Quaternaire .....	16
II.1.3. La Tectonique.....	17
<b>II.2. HYDROGEOLOGIE .....</b>	<b>18</b>

II.2.1. Principaux aquifères .....	18
II.2.1.1. Nappe des sables du Paléocène/Eocène de Kaédi .....	18
II.2.1.1.1. Nature et géométrie de l'aquifère .....	18
II.2.1.1.2. Paramètres hydrodynamiques.....	21
II.2.1.1.3. Piézométrie .....	22
II.2.1.2. Nappe alluviale du fleuve Sénégal .....	22
II.3. CONCLUSION .....	22

## **CHAPITRE III : HYDROCHIMIE DE LA NAPPE DES SABLES DU PALEOCENE/EOCENE ..... 23**

### **III.1. ACQUISITION DES DONNEES..... 23**

III.1.1. Campagnes et réseau des mesures.....	23
III.1.2. Analyses chimiques, fiabilité et traitement des données.....	23

### **III.2. DISCUSSION DES RESULTATS ..... 25**

III.2.1. Caractéristiques physiques et chimiques des eaux.....	25
III.2.1.1. Caractéristiques physiques des eaux .....	26
III.2.1.1.1. pH.....	27
III.2.1.1.2. Température .....	27
III.2.1.1.3. Conductivité électrique .....	27
III.2.1.2. Caractéristiques chimiques des eaux.....	27
III.2.1.2.1. Classification des eaux.....	27
III.2.1.3. Origines et processus de minéralisation des eaux .....	31
III.2.1.3.1. Rapports $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$ et $\text{K}^+/\text{Cl}^-$ .....	31
III.2.1.3.2. Rapports $\text{Ca}^{2+}/\text{Cl}^-$ et $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ .....	35
III.2.1.3.3. Rapports $\text{Mg}^{2+}/\text{Cl}^-$ et $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ .....	37
III.2.1.3.4. Rapports $\text{HCO}_3^-/\text{Cl}^-$ et $\text{HCO}_3^-/\text{Ca}^{2+}$ .....	37
III.2.1.3.4. Rapports $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$ et $\text{SO}_4^{2-}/\text{Ca}^{2+}$ .....	40
III.2.1.3.5. Rapport $\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-$ .....	42
III.2.1.3.6. Rapport $[\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}]/[\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}]$ .....	42
III.2.1.3.7. Rapport $[(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) - (\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})]/[(\text{Na}^+ + \text{K}^+) - \text{Cl}^-]$ ..	44
III.2.2. Qualité des eaux de la nappe des sables du Paléocène/Eocène de la ville de Kaédi.....	46
III.3. CONCLUSION.....	48

## **CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES..... 50**

## **BIBLIOGRAPHIE..... 52**

## **LISTES DES FIGURES ET TABLEAUX**

## **ANNEXES**

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure 1</b> : Carte de situation de la zone d'étude.....	4
<b>Figure 2</b> : Moyenne mensuelle de la Temperature a la station de kaedi. Source services de la météorologie nationale de l'ASECNA (1983-2000).....	8
<b>Figure 3</b> : Moyenne mensuelle des humidités relatives a la station de Kaedi. Source services de la météorologie nationale de l'ASECNA (1983-2000) .....	8
<b>Figure 4</b> : Moyenne mensuelle de la vitesse des vents a la station de Kaedi. Source services de la météorologie nationale de l'ASECNA (1983-2000) .....	9
<b>Figure 5</b> : Moyenne annuelle de l'évaporation de Piche a la station de Kaedi. Source services de la météorologie nationale de l'ASECNA (1983-2000) .....	10
<b>Figure 6</b> : Precipitations moyennes a la station de Kaedi. Source services de la météorologie nationale de l'ASECNA (1983-2000) .....	11
<b>Figure 7</b> : Carte géologique simplifiée du bassin sédimentaire sénégal-mauritanien (Nahon(1976) modifiée in Bellion (1987)).....	13
<b>Figure 8</b> : Coupe géologique de direction Sud-Nord (OMVS/USAID, 1990).....	14
<b>Figure 9</b> : Carte tectonique interprétative de la zone d'étude (Le Priol (1985) modifiée in Diagana (1994)).....	17
<b>Figure 10</b> : Carte hydrogéologique simplifiée du bassin Sud-Ouest mauritanien (Illy, 1973).....	19
<b>Figure 11</b> : Coupe hydrogéologique de direction Est-ouest de la Ville de Kaédi (IWACO, 1996).....	20
<b>Figure 12</b> : Carte de localisation des points d'eau échantillonnés (campagne 2004) .....	24
<b>Figure 13</b> : Diagramme triangulaire de Piper pour l'aquifère des sables du Paléocène/Eocene de Kaédi (campagne 2004) .....	29
<b>Figure 14</b> : Diagramme triangulaire de Piper pour l'aquifère des sables du Paléocène/Eocene de Kaédi (campagnes 2004 et 1996).....	30
<b>Figure 15</b> : Relation entre les éléments majeurs et le TDS des eaux de la nappe des sables du Paléocène/Eocene de Kaédi (campagne 2004) .....	33
<b>Figure 16</b> : Rapport $Na^+/Cl^-$ des eaux de la nappe des sables du Paléocène/Eocene de Kaédi (campagne juin 2004) .....	34
<b>Figure 17</b> : Rapport $K^+/Cl^-$ des eaux de la nappe des sables du Paléocène/Eocene de Kaédi (campagne juin 2004) .....	34

<b>Figure 18</b> : Rapport $\text{Ca}^{2+}/\text{Cl}^-$ des eaux de la nappe des sables du Paléocène /Eocène de Kaédi (campagne de juin 2004).....	36
<b>Figure 19</b> : Rapport $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ des eaux de la nappe du Paléocène/Eocène de Kaédi (campagne de juin 2004).....	36
<b>Figure 20</b> : Rapport $\text{Mg}^{2+}/\text{Cl}^-$ des eaux de la nappe des sables du Paléocène/ Eocène de Kaédi (campagne de juin 2004).....	38
<b>Figure 21</b> : Rapport $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ des eaux de la nappe des sables du Paléocène/ Eocène de Kaédi (campagne juin 2004) .....	38
<b>Figure 22</b> : Rapport $\text{HCO}_3^-/\text{Cl}^-$ des eaux de la nappe des sables du Paléocène/ Eocène de Kaédi (campagne de juin 2004).....	39
<b>Figure 23</b> : Rapport $\text{HCO}_3^-/\text{Ca}^{2+}$ des eaux de la nappe des sables du Paléocène / Eocène de Kaédi (campagne de juin 2004).....	39
<b>Figure 24</b> : Rapport $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$ des eaux de la nappe des sables du Paléocène/ Eocène de Kaédi (campagne de juin 2004).....	41
<b>Figure 25</b> : Rapport $\text{SO}_4^{2-}/\text{Ca}^{2+}$ des eaux de la nappe des sables du Paléocène / Eocène de Kaédi (campagne de juin 2004).....	41
<b>Figure 26</b> : Rapport $\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-$ des eaux de la nappe des sables du Paléocène / Eocène de Kaédi (campagne de juin 2004).....	43
<b>Figure 27</b> : Diagramme binaire [ $\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$ ] vs. [ $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ ] des eaux de la nappe des sables du Paléocène / Eocène de Kaédi (campagnes de juin 2004 et mars 1996) .....	43
<b>Figure 28</b> : Diagramme binaire [ $(\text{Na}^+ + \text{K}^+) - \text{Cl}^-$ ] vs. [ $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) - (\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ ] des eaux de la nappe des sables du Paléocène / Eocène de Kaédi (campagnes de juin 2004 et mars 1996).....	45

## LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau.1</b> : Paramètres hydrodynamiques de la nappe des sables du Paléocène/ Eocène de Kaédi (Audibert (1960) <i>in</i> IWACO (1996).....	21
<b>Tableau.2</b> : Paramètres physico-chimiques des eaux de la nappe des sables du Paléocène/ Eocène de Kaédi (campagne 2004) .....	26
<b>Tableau.3</b> : Rapports caractéristiques et indices d'échanges de bases I.E.B des points d'eau de la nappe des sables du Paléocène/ Eocène de Kaédi (campagne 2004) .....	31
<b>Tableau.4</b> : Normes de potabilités de l'O.M.S (1993) et teneurs en éléments chimiques des eaux de la nappe des sables du Paléocène/ Eocène de Kaédi (campagne 2004) .....	47

# **ANNEXES**

**Tableau 1 : Résultats des paramètres physiques et analyses chimiques des eaux de la campagne de juin 2004 en mg.l<sup>-1</sup>**

OUVRAGES	LOCALITES	LATITUDE	LONGITUDE	T°C	pH	CE (µS/cm)	Na	K	Ca	Mg	HCO3	SO4	Cl	NO3	F
Pts-01	Darsalam	16°12'00"	13°26'00"	28,00	7,30	260,00	23,20	3,91	20,70	10,16	131,15	7,12	6,22	7,48	0,14
Pts-02	Louboudou	16°9'36"	13°22'48"	30,00	7,00	86,50	6,95	7,49	10,78	5,45	54,90	1,29	2,17	2,07	0,10
F-01	Haddad	15°45'57"	12°56'58"	32,00	7,30	159,00	12,28	4,70	9,55	3,83	45,75	5,00	11,45	23,38	0,10
Pts-03	Bonaindé	15°39'45"	13°10'20"	32,00	7,50	84,00	2,87	3,34	7,62	2,47	42,70	0,73	2,16	7,77	0,11
Pts-04	Nereikaya	16°09'12"	13°00'00"	34,00	7,10	424,00	7,99	22,77	36,15	17,75	45,75	13,66	25,71	163,00	0,34
Pts-05	Mleizmatt	15°42'58"	13°03'36"	28,00	7,30	248,00	16,79	5,61	22,21	1,82	54,90	6,00	11,16	16,30	0,17
Pts-06	Téthiane	15°58'29"	13°19'19"	33,00	8,10	383,00	29,63	3,30	38,07	9,79	64,05	11,14	34,69	106,91	0,48
Pts-07	Ouldjeddar	16°06'55"	13°22'04"	33,00	8,00	480,00	49,03	4,61	38,15	6,44	45,75	57,74	40,88	111,29	0,29
Pts-08	Gourelgobi	15°52'21"	13°17'51"	31,00	7,10	80,00	4,03	2,16	9,58	1,70	45,75	1,63	2,63	2,58	0,11
Pts-09	Diowol	16°03'39"	13°22'26"	33,00	7,60	560,00	111,33	7,02	70,36	36,74	122,00	46,50	78,50	365,39	1,30
Pts-10	Weinatt	16°08'41"	13°23'55"	31,00	7,00	305,00	19,95	7,03	57,03	20,65	24,40	5,13	52,99	240,63	0,00
Pts-11	Ganki	16°12'47"	13°14'12"	33,00	7,10	80,00	18,34	2,65	17,35	9,36	39,65	10,27	21,29	66,30	0,17
Pts-12	Lexeiba	16°12'54"	13°08'54"	36,00	6,90	381,00	21,59	1,19	22,83	9,78	97,60	10,79	21,97	48,33	0,35
Pts-14	Mouftah	16°16'32"	13°22'11"	33,00	7,10	78,00	3,83	2,07	5,16	1,52	36,60	0,65	3,19	0,00	0,24
Pts-15	Rindiao	16°08'38"	13°34'31"	31,00	7,50	581,00	20,11	28,08	45,38	27,60	48,80	40,66	38,19	172,87	0,42
Pts-16	Bélinabé	16°08'31"	13°33'35"	32,00	7,10	671,00	24,82	32,02	50,52	19,42	9,15	4,19	74,70	252,85	0,39
Pts-17	Gataga	16°09'35"	13°30'17"	31,00	7,10	1158,00	27,03	44,40	88,24	45,88	143,35	26,19	142,47	194,73	1,27
Pts-18	Kilinkharé	16°09'03"	13°30'00"	33,00	7,50	165,00	7,81	3,84	0,00	6,78	30,50	4,80	14,62	10,81	0,08
Pts-19	Moderne	16°08'54"	13°30'05"	33,00	7,20	1114,00	12,33	1,64	5,71	4,03	42,70	1,87	3,90	5,59	0,10
Pts-20	Néréwalo	16°06'43"	13°38'19"	35,50	7,10	92,50	50,92	22,89	28,62	22,39	140,30	51,56	46,82	51,84	0,00
Pts-21	Néréyel	16°11'33"	13°39'20"	36,00	7,20	610,00	25,72	1,42	60,08	7,09	204,35	25,00	25,07	5,18	1,42
F-02	Pimpédiél	16°08'52"	13°29'54"	32,00	7,10	306,00	19,12	5,05	19,20	0,20	183,33	5,00	44,09	0,20	0,33
Pts-22	Kagnadi	16°08'48"	13°42'24"	34,00	7,60	290,00	12,54	3,89	7,20	7,70	170,09	3,25	7,54	0,80	0,86
Pts-23	Ndikoudi	16°04'48"	13°05'36"	35,00	7,10	565,00	10,66	2,44	24,00	9,70	200,54	2,11	20,76	10,50	1,05
Pts-24	Toumbéri	15°32'48"	13°06'24"	31,00	8,30	435,00	7,21	4,76	22,40	8,30	217,77	22,00	28,65	17,36	0,24

<b>Pts-25</b>	Kaédi1	16°08'36"	13°30'03"	33,00	7,80	945,00	37,55	51,13	11,20	13,40	141,41	5,00	14,18	16,00	0,49
<b>Pts-26</b>	kaédi2	16°08'56"	13°30'29"	33,00	7,60	353,00	32,66	12,32	19,30	6,30	144,50	5,00	23,11	11,21	0,12
<b>Pts-27</b>	Mbidane	16°17'12"	13°28'00"	34,00	7,10	123,00	39,11	19,65	7,60	11,90	232,32	4,07	22,31	28,00	0,48
<b>Pts-28</b>	Lebiol	16°04'00"	13°10'00"	33,00	7,40	166,00	9,80	8,09	7,20	7,60	108,08	1,12	19,43	36,00	0,25
<b>Pts-29</b>	Kaédi3	16°09'10"	13°30'59"	35,00	6,90	99,00	8,32	12,88	24,05	4,40	110,75	10,37	49,88	45,00	0,10

**Tableau 2 : Résultats des paramètres physiques et analyses chimiques des eaux de la campagne de juin 2004 en méq.l<sup>-1</sup>**

<b>OUVRAGES</b>	<b>LOCALITE</b>	<b>LATITUDE</b>	<b>LONGITUDE</b>	<b>Na</b>	<b>K</b>	<b>Ca</b>	<b>Mg</b>	<b>SO<sub>4</sub></b>	<b>Cl</b>	<b>NO<sub>3</sub></b>	<b>I.E.B.</b>
<b>Pts-01</b>	Darsalam	16°12'00"	13°26'00"	1,01	0,10	1,03	0,85	0,15	0,17	0,12	-5,55
<b>Pts-02</b>	Louboudou	16°9'36"	13°22'48"	0,30	0,19	0,54	0,45	0,02	0,06	0,03	-5,50
<b>F-01</b>	Haddad	15°45'57"	12°56'58"	0,53	0,12	0,47	0,32	0,10	0,32	0,37	-1,03
<b>Pts-03</b>	Bonaindé	15°39'45"	13°10'20"	0,12	0,08	0,38	0,21	0,01	0,06	0,12	-2,33
<b>Pts-04</b>	Nereikaya	16°09'12"	13°00'00"	0,34	0,58	1,80	1,48	0,28	0,72	2,63	-0,27
<b>Pts-05</b>	Mleizmatt	15°42'58"	13°03'36"	0,73	0,14	1,11	0,15	0,12	0,31	0,26	-1,80
<b>Pts-06</b>	Téthiane	15°58'29"	13°19'19"	1,29	0,08	1,90	0,81	0,23	0,97	1,72	-0,41
<b>Pts-07</b>	Ouldjeddar	16°06'55"	13°22'04"	2,13	0,12	1,90	0,54	1,20	1,15	1,79	-0,95
<b>Pts-08</b>	Gourelgobi	15°52'21"	13°17'51"	0,17	0,05	0,48	0,14	0,03	0,07	0,04	-2,14
<b>Pts-09</b>	Diowol	16°03'39"	13°22'26"	4,84	0,18	3,51	3,06	0,97	2,21	5,89	-1,27
<b>Pts-10</b>	Weinatt	16°08'41"	13°23'55"	0,86	0,18	2,85	1,72	0,10	1,49	3,88	-0,30
<b>Pts-11</b>	Ganki	16°12'47"	13°14'12"	0,80	0,07	0,86	0,78	0,21	0,60	1,07	-0,45
<b>Pts-12</b>	Lexeiba	16°12'54"	13°08'54"	0,94	0,03	1,14	0,81	0,22	0,62	0,78	-0,56
<b>Pts-14</b>	Mouftah	16°16'32"	13°22'11"	0,16	0,05	0,26	0,13	0,01	0,09	0,00	-1,33
<b>Pts-15</b>	Rindiao	16°08'38"	13°34'31"	0,87	0,72	2,27	2,30	0,83	1,07	2,80	-0,48
<b>Pts-16</b>	Bélinabé	16°08'31"	13°33'35"	1,08	0,82	2,53	1,61	0,09	2,10	4,08	0,09
<b>Pts-17</b>	Gataga	16°09'35"	13°30'17"	1,17	1,14	4,41	3,82	0,54	4,01	3,14	0,42

<b>Pts-18</b>	Kilinkharé	16°09'03"	13°30'00"	0,34	0,10	0,00	0,56	0,10	0,41	0,17	-0,07
<b>Pts-19</b>	Moderne	16°08'54"	13°30'05"	0,54	0,04	0,25	0,34	0,04	0,11	0,09	0,00
<b>Pts-20</b>	Néréwalo	16°06'43"	13°38'19"	2,21	0,59	1,43	1,86	1,07	1,32	0,84	-1,12
<b>Pts-21</b>	Néréyel	16°11'33"	13°39'20"	1,19	0,04	3,00	0,60	0,52	0,70	0,08	-0,75
<b>F-02</b>	Pimpédiél	16°08'52"	13°29'54"	0,83	0,13	0,96	0,02	0,10	1,24	0,00	0,92
<b>Pts-22</b>	Kagnadi	16°08'48"	13°42'24"	0,54	0,10	0,36	0,64	0,07	0,21	0,01	-2,04
<b>Pts-23</b>	Ndikoudi	16°04'48"	13°05'36"	0,46	0,06	1,20	0,80	0,04	0,58	0,17	-0,10
<b>Pts-24</b>	Toumbéri	15°32'48"	13°06'24"	0,31	0,12	1,12	0,69	0,45	0,80	0,28	0,46
<b>Pts-25</b>	Kaédi1	16°08'36"	13°30'03"	1,63	1,31	0,56	1,11	0,10	0,40	0,26	-4,57
<b>Pts-26</b>	kaédi2	16°08'56"	13°30'29"	1,42	0,31	0,96	0,52	0,10	0,65	0,18	-1,66
<b>Pts-27</b>	Mbidane	16°17'12"	13°28'00"	1,70	0,50	0,38	0,99	0,08	0,63	0,45	-2,49
<b>Pts-28</b>	Lebiol	16°04'00"	13°10'00"	0,42	0,20	0,36	0,63	0,02	0,58	0,58	-0,07
<b>Pts-29</b>	Kaédi3	16°09'10"	13°30'59"	0,36	0,33	1,20	0,36	0,22	1,40	0,72	0,50

**Tableau 3 : Résultats des paramètres physiques et analyses chimiques des eaux en mg.l<sup>-1</sup> (IWACO, 1996)**

N°	Ouvrages	Longitudes	Latitudes	T °C	pH	CE (μS/cm)	Na	K	Ca	Mg	HCO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub>	Cl	NO <sub>3</sub>	F
1	Ould jeddar	16° 06' 44"	13° 21' 45"	30,50	7,30	395,00	27,34	2,76	21,21	9,73	21,65	12,37	23,65	27,98	0,11
2	Ganki	16° 12' 30"	13° 15' 00"	30,00	7,70	73,00	8,19	1,67	11,47	2,47	19,89	8,88	13,43	17,90	0,13
3	Mouftah	16° 16' 30"	13° 21' 52"	31,00	7,10	71,00	1,09	1,10	3,21	0,87	22,30	0,21	2,10	0,00	0,21
4	Rindiao	16° 08' 35"	13° 34' 39"	33,00	7,20	381,00	17,12	7,33	32,14	13,12	42,98	25,60	20,23	44,98	0,36
5	kilinkhare	16° 09' 05"	13° 29' 58"	33,00	7,10	128,00	5,76	1,78	8,11	3,32	18,65	2,14	7,77	6,78	0,03
6	Moderne	16° 08' 47"	13° 30' 09"	29,00	7,50	785,00	7,43	1,21	7,87	10,11	31,12	2,76	3,43	4,12	0,10
7	Nerewalo	16° 06' 51"	13° 37' 54"	30,00	6,80	87,00	11,27	8,25	13,12	14,21	123,30	31,12	14,25	17,33	0,01
8	Gataga	16° 08' 45"	13° 30' 12"	34,00	7,10	970,00	17,98	37,45	45,76	33,33	121,54	11,47	57,76	36,50	0,56
9	Gataga1	16° 08' 37"	13° 29' 58"	33,50	7,09	85,50	21,43	21,12	37,21	17,34	112,00	9,65	49,21	41,31	0,37
10	Gataga2	16° 08' 46"	13° 30' 18"	30,00	7,20	538,50	27,00	19,11	7,13	5,75	117,11	17,43	19,17	139,98	0,59
11	Pinpediel	16° 08' 52"	13° 29' 54"	31,00	7,10	360,00	19,00	5,00	19,00	0,20	183,00	5,00	44,00	0,20	0,33
12	Dar salam	16° 12' 00"	13° 21' 12"	32,00	7,30	136,00	16,89	1,17	7,20	4,21	121,32	3,76	3,33	4,12	0,10
13	M'bidane	16° 17' 18"	13° 27' 43"	35,00	7,10	98,00	21,76	12,27	8,12	8,41	108,00	3,65	9,13	6,21	0,11
14	Lebiol	16° 04' 06"	13° 09' 56"	27,00	7,10	112,00	8,21	7,44	6,60	7,73	93,50	0,78	11,11	21,65	0,15
15	Diowol	16° 03' 38"	13° 22' 07"	28,50	7,45	396,00	59,97	11,18	34,76	22,71	96,75	23,54	39,75	48,97	0,87
16	Louboudou	16° 09' 22"	13° 29' 39"	29,00	7,50	82,00	13,11	3,76	7,83	2,32	44,50	0,78	3,32	1,08	0,08