

## SOMMAIRE

DEDICACES.....	I
REMERCIEMENTS.....	II
SOMMAIRE.....	III
LISTE DES ACRONYMES.....	V
LISTE DES FIGURES.....	VI
LISTE DES TABLEAUX.....	VI
RESUME.....	VII
ABSTRACT.....	VIII
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE I: CADRE PHYSIQUE DE LA ZONE D'ETUDE ET CONTEXTES GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE.....	3
1.1 Cadre physique et géographique.....	3
1.1.1 Localisation de la zone d'étude.....	3
1.1.2 Géomorphologie.....	4
1.1.3Végétation et sols.....	5
1.2Contexte climatique.....	6
1.2.1La pluviométrie.....	7
1.2.3 Evapotranspiration.....	9
1.3 Contexte géologique et hydrogéologique.....	9
1.3.1Contexte géologique.....	9
1.3.2 Contexte hydrogéologique.....	15
CHAPITRE 2 : METHODOLOGIE.....	21
2.1. Compilation et constitution de la base de données.....	21
2.2. Statistique descriptive et multivariée.....	21
2.3. Interpolation spatiale et génération des cartes de distribution spatiale des paramètres.....	22
2.3. Indice de Qualité d'Eau (IQE) .....	23
CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS.....	25
3.1. Typologie des eaux.....	25
3.1.2. Matrice de corrélation.....	26
3.1.3. Statistique multivariée.....	27
3.1.3.2. Classification Hiérarchique Ascendante.....	30

3.2Cartographie de la qualité de l'eau.....	33
3.2.1. Interpolation et distribution spatiale des éléments chimiques.....	33
3.2.2. Pondération des critères et normalisation.....	38
3.2.3. Calcul de la déviation des paramètres par rapport à la norme (Q) .....	39
CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....	41
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE.....	43

## LISTE DES ACRONYMES

- CAH:** Classification Ascendante Hiérarchique
- ACP:** Analyse des Composantes Principales
- AEP:** Alimentation en Eau Potable
- BD:** Base de Données
- Ca:** Calcium
- CE:** Conductivité Electrique
- Cl:** Chlorure
- CSE :** Centre de suivi écologique
- DGPRE:** Direction de la Gestion et de la Planification des Ressources en Eau
- ETP:** Evapotranspiration Potentielle
- F:** Fluor
- GWQI:** Groundwater quality Index
- HCO<sub>3</sub>:** Bicarbonate
- INP :** Institut national de pédologie
- K:** Potassium
- KMS3:** Keur Momar Sarr Trois
- Mg:** Magnésium
- Na:** Sodium
- NO<sub>3</sub>:** Nitrate
- OMS:** Organisation Mondiale de la Santé
- PADEPA:** Projet Accès Durable à l'Eau Potable et à l'Assainissement
- PAGIRE BA:** Plan de Gestion Intégrée des Ressources en Eau dans le Bassin Arachidier
- PARPEBA:** Projet d'Amélioration et de Renforcement des Points d'Eaux dans le Bassin Arachidier
- PEAMIR:** Projet Eau et Assainissement en Milieu Rural
- PEAMU:** Projet Eau et Assainissement en Milieu Urbain
- PEPAM BA:** Programme d'Eau Potable et Assainissement du Millénaire dans le Bassin Arachidier
- PSE:** Plan Sénégal Emergent
- SIG:** Système d'Information Géographique
- SO<sub>4</sub>:** Sulfate
- UTM:** Universal Transverse Mercator

## LISTE DES FIGURES

Figure 1: Etendu de la zone d'étude .....	3
Figure 2: Relief et réseau hydrographique .....	4
Figure 3: Répartition spatiale de la végétation.....	5
Figure 4: Carte des différentes zones climatiques du Sénégal (Malou, 2004).....	8
Figure 5: Bassin sédimentaire sénégal-mauritanien (in Siby, 1997).....	10
Figure 6: Coupe schématique du bassin du Sénégal (modifié d'après Spengler et al. 1966)...	11
Figure 7: carte des aquifères du Sénégal (source DGPRES).....	17
Figure 8: Coupes géologiques Est-Ouest sur le bassin (DGPRES, 2014).....	20
Figure 9: Organigramme de calcul de l'IQE .....	24
Figure 10: Matrice de corrélation entre les paramètres. Seules les coefficients de Pearson significatives (p-value <0,05) sont indiqués. ....	26
Figure 11: projection des deux premiers composants par ACP .....	29
Figure 12: Identification des groupes dans le dendrogramme .....	30
Figure 13: a) Piper de tous les échantillons en fonction des Clusters, (b)Piper de la composition chimique moyenne des Clusters (diamètre des cercles = TDS*10) .....	31
Figure 14: Box plot des paramètres physico-chimiques .....	32
Figure 15: Répartition spatiale du TDS et des cations .....	36
Figure 16: Répartition spatiale du TDS et des anions.....	37
Figure 17: Distribution spatiale de l'IQE de la nappe maastrichtienne .....	40

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Récapitulatif synthétique des aquifères du Sénégal (PSE, 2001).....	16
Tableau 2 : Résumé statistique des paramètres chimiques de la nappe .....	25
Tableau 3 : variance et cumule de chaque paramètre physico-chimique.....	27
Tableau 4: Composantes principales et variance explicative.....	29
Tableau 5: Modèle d'interpolation des éléments chimiques.....	34
Tableau 6: Pondération des paramètres.....	38
Tableau 7: Classification des eaux selon leur indice de qualité (Herojet et al ,2016).....	39

## RESUME

Le bassin sénégal-mauritanien est l'un des plus grands bassins de l'Afrique de l'Ouest avec une superficie de 340 000km<sup>2</sup>. Au Sénégal, elle occupe  $\frac{3}{4}$  du territoire national et renferme d'importantes unités aquifères notamment le Maastrichtien avec une réserve de 30 à 40 milliards de m<sup>3</sup>. Malgré l'importance de sa réserve, la demande en eau n'est toujours pas satisfaite surtout dans les grands centres urbains (Dakar ; Thiès ; Touba, etc...). En effet la qualité de l'eau est détériorée par des processus naturels et/ou anthropiques, avec l'occurrence d'une bande centrale salée caractérisée par des eaux saumâtres jugées souvent impropres à la consommation humaine. C'est dans ce cadre que s'inscrit cette présente étude régionale de la qualité de la nappe maastrichtienne réalisée par le biais d'analyses statistiques et d'Indice de Qualité d'Eau (IQE) sur plus de 382 échantillons et 10 paramètres physicochimiques. Les concentrations moyennes des paramètres chimiques sont conformes aux normes de l'OMS, à l'exception du Na, Cl et Fe de la CE qui présentent des valeurs moyennes largement supérieures aux normes. En effet, la distribution spatiale de ces paramètres montre une forte minéralisation dans la bande centrale salée pour le TDS, CE, Na<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>, F<sup>-</sup> ; parfois le calcium (Ca<sup>2+</sup>) et sulfate (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) dépassant les directives de l'OMS dans la partie Nord. Dans la partie orientale et occidentale, les eaux sont relativement douces et respectent pour la plupart les normes. Les processus de minéralisation de la nappe identifiés par l'analyse des composantes principales sont essentiellement représentés par l'interaction eaux-roche, notamment la dissolution des minéraux carbonatés, gypses et/ou fluorés ; les échanges de bases responsables et en fin l'impact anthropique noté dans certains ouvrages où les valeurs en NO<sub>3</sub> dépassent 180mg/L. La Classification Hiérarchique Ascendante regroupe les eaux en 3 familles bien distinctes (C1, C2 et C3). C1 est caractérisé par des eaux très douces de faciès mixte HCO<sub>3</sub>, C2 par des eaux saumâtres de faciès mixte-sodique (Na-HCO<sub>3</sub>/Cl), enfin C3 par des eaux salées fortement minéralisées de faciès chloruré sodique (Na/Cl) très riches en F, Na et Cl. La distribution spatiale de l'IQE identifie des eaux impropres à la consommation correspondant à 20% de la superficie totale de la nappe localisée dans la bande centrale salée, tandis que les eaux de bonne à excellente qualité représentent respectivement 29.3% et 25% situées dans la partie occidentale (Horst de Diass) et orientale du bassin. L'aquifère maastrichtien renferme ainsi une importante ressource d'eau de bonne qualité représentant plus de 54.3% de sa superficie au Sénégal.

**Mots clés : Nappe Maastrichtienne ; Indice de qualité de l'eau ; statistique multivariées ; bassin sénégal-mauritanien**

## ABSTRACT

The Senegal-Mauritanian basin is one of the largest basins in West Africa with a surface area of 340,000km<sup>2</sup>. In Senegal, it occupies  $\frac{3}{4}$  of the national territory and contains important aquifer units notably the Maastrichtian with a reserve of 30 to 40 billion m<sup>3</sup>. Despite the importance of its reserve, the demand for water is still not satisfied, especially in the large urban centres (Dakar; Thies; Touba, etc.). In fact, the quality of water is deteriorated by natural and/or anthropic processes, with the occurrence of a central salty strip characterised by brackish water often judged unfit for human consumption. It is within this framework that this regional study of the quality of the Maastricht water table is being carried out by means of statistical analyses and the Water Quality Index (WQI) on more than 382 samples and 10 physicochemical parameters. The average concentrations of the chemical parameters comply with WHO standards, with the exception of Na, Cl and F, which have average values well above the standards. Indeed, the spatial distribution of these parameters shows a strong mineralisation in the central salt band for TDS, CE, Na<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>, F<sup>-</sup>; sometimes calcium (Ca<sup>2+</sup>) and sulphate (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) exceeding the WHO guidelines in the northern and south-eastern part, respectively. In the eastern and western part, the waters are relatively soft and mostly respect the nomes. The groundwater mineralisation processes identified by the analysis of the main components are mainly represented by the water-rock interaction, in particular the dissolution of carbonate, gypsum and/or fluorinated minerals; the responsible base exchanges and finally the anthropogenic impact noted in some works where NO<sub>3</sub> values exceed 180mg/L. The Ascending Hierarchical Classification groups waters into 3 distinct families (C1, C2 and C3). C1 is characterised by very fresh waters of mixed HCO<sub>3</sub> facies, C2 by brackish waters of mixed-sodium facies (Na-HCO<sub>3</sub>/Cl), and finally C3 by highly mineralised salt waters of sodium chloride facies (Na/Cl) very rich in F, Na and Cl. The spatial distribution of the WQI identifies waters unfit for consumption corresponding to 20% of the total surface area of the water table located in the central saline band, while waters of good to excellent quality represent respectively 29.3% and 25% located in the western (Horst de Diass) and eastern part of the basin. The Maastrichtian aquifer thus contains an important resource of good quality water representing more than 54.3% of its surface area in Senegal.

**Keywords:** Maastrichtian aquifer; Water quality index; multivariate statistics; Senegalese Mauritanian basin

## INTRODUCTION

Au Sénégal, bien que les quantités d'eau des nappes et des eaux de surface soient importantes, il demeure que la qualité constitue une contrainte de taille. Cette dernière qui résulte de la détérioration par processus naturel et/ou anthropique réduit la disponibilité des sources d'eau potable pour les populations et leurs activités. Cette problématique qui concerne toutes les parties du Sénégal, est plus accentuée dans les grands centres urbains tels que Dakar, le Littoral Nord, les villes de Thiès, Touba, Mbacké, Diourbel, Kaolack, Fatick etc....

Face à cette situation et à la surexploitation des nappes supérieures (Sables Quaternaire et Calcaire du Lutétien fortement exploité dans le Littoral Nord, le Paléocène dans le Horst de Dias, le Continental Terminal dans le bassin arachidier etc...), de nombreuses études de prospection hydrochimiques ont été réalisées ou en cours de réalisation sur la nappe profonde du Maastrichtien pour identifier de nouvelles ressources d'eau douce et répondre ainsi à la demande. C'est ainsi que l'état du Sénégal a initié de nombreux projets et programmes ci-après listés PEAMIR, PEAMU, PEPAM BA, PEPAM AQUA, PARPEBA, PAGIRE-BA, PADEPA, KMS3 en sus des projets PSE, Sine Gambie, stratégie d'amélioration de la qualité de l'eau, AEP des îles du Saloum).

Cette nappe Maastrichtienne, constitue le plus grand réservoir d'eau souterraine du Sénégal avec des réserves estimées entre 300-500 milliards  $m^3$  (Audibert, 1962) permettant un potentiel d'exploitation de 30-40 milliards  $m^3$  d'eau (Banque Mondiale, 2020). Toutefois, les caractéristiques physico-chimiques de cette nappe dépassent souvent les normes édictées par l'OMS surtout dans sa bande centrale salée et fluorée (Résidu sec supérieur à 1,5g/l et teneur en fluor supérieur à 2mg/l). Ceci impacte fortement sur le bien-être sanitaire des populations avec des cas de fluoroses dentaires et osseuses pouvant aller jusqu'à 66% dans des zones de fluoroses endémiques (Cissé et al 2010).

C'est dans ce contexte que s'inscrit cette présente étude qui vise à réactualiser les connaissances sur la qualité chimique de la nappe Maastrichtienne à l'échelle nationale à travers les outils cartographiques et géostatistiques. Ces outils sont souvent combinés avec des indices numériques de qualité telle que le GWQI (Groundwater Quality Index) afin d'apprécier la qualité chimique des nappes (Sadat-Noori et al., 2013 ; Selvam et al., 2013 ; Tiyagi et al., 2013 ; El-Fadel et al., 2013 ; Jhariya et al., 2017 ; Gnanachandrasamy et al., 2018 ; Karakus et al., 2018 ; Kawo et al., 2018 ; Huag et al., 2019 ; Prisca 2020 ; Verma et al., 2020).

La cartographie de cet indice et la répartition spatiale de ces classes permettent d'identifier les zones de bonne qualité chimiques pour la consommation humaine.

De façon spécifiques, il s'agira dans cette étude de :

- Compiler les données physico-chimiques issues des projets antérieurs et des missions de suivi de la DGPRE ;
- Déterminer la typologie des eaux à travers une statistique descriptive et multivariée (ACP, ACH) ;
- Cartographier et identifier les zones de bonne qualité pour la consommation humaine à travers l'Indice de Qualité d'Eau.

Ce présent document est subdivisé en trois (3) chapitres :

- Le premier chapitre présente le cadre physique de la zone d'étude et les contextes géologiques et hydrogéologiques ;
- Le second correspond à la méthodologie ;
- Le troisième présente les résultats et discussions.

# CHAPITRE I: CADRE PHYSIQUE DE LA ZONE D'ETUDE ET CONTEXTES GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE

## 1.1 Cadre physique et géographique

### 1.1.1 Localisation de la zone d'étude

Le bassin Sénégal-mauritanien est un bassin transfrontalier entre le Sénégal, la Mauritanie et la Guinée Conakry (Figure1). Formé durant la période Méso-Cénozoïque, le bassin s'est mis en place lors de la distanciation de deux plaques de l'Afrique et de l'Amérique du Sud au Jurassique. Il est limité au Nord par la Dorsale de Réguibat en Mauritanie, à l'Est par les Mauritanides et en fin au Sud par le bassin Paléozoïque de Bové (Sarr, 2019). Il s'étend sur environ 1400 km du Nord du Cap Barbas en Mauritanie, au Sud de Bissau en Guinée-Bissau, à travers le Sénégal et la Gambie. Sa plus grande largeur se situe à la latitude de Dakar (560 km) et sa superficie est de l'ordre de 340 000 km<sup>2</sup> (Bellion, 1987).

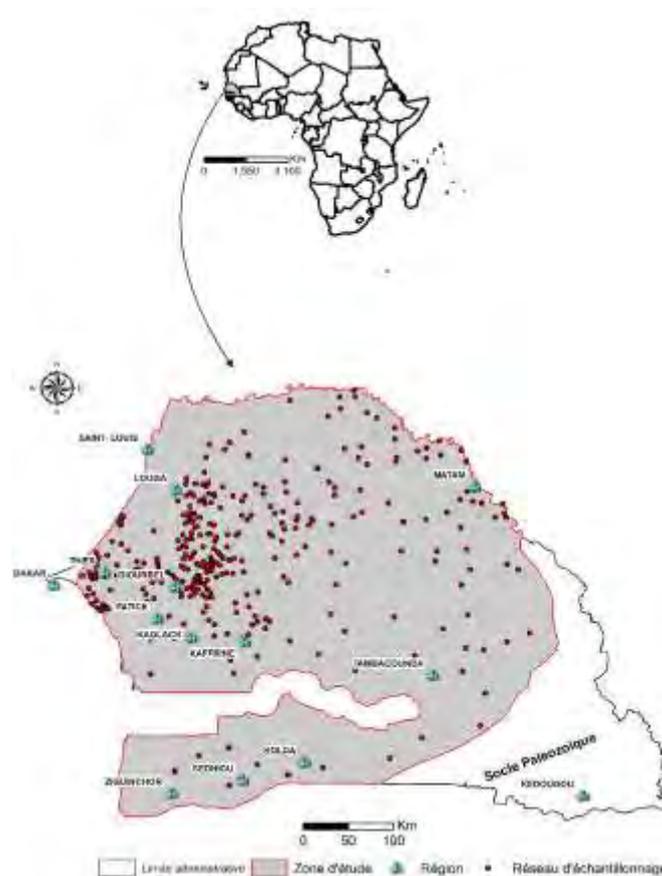


Figure 1: Etendu de la zone d'étude

## 1.1.2 Géomorphologie

Le Sénégal est un pays plat dans l'ensemble car une bonne partie de sa superficie est située en dessous de 50 mètres. Les altitudes maximales sont enregistrées au Sud-Est du pays sur le contrefort du Fouta Djalon, à la frontière avec la Guinée Conakry où les monts Bassari culminent à 581 mètres. La côte est généralement basse et sablonneuse sur laquelle débouche quatre estuaires importants (Sénégal, Sine Saloum, Gambie et Casamance). On note la présence des systèmes dunaires du littoral qui forment avec les estuaires, les niayes et les mangroves la zone attractive du littoral (figure 2).

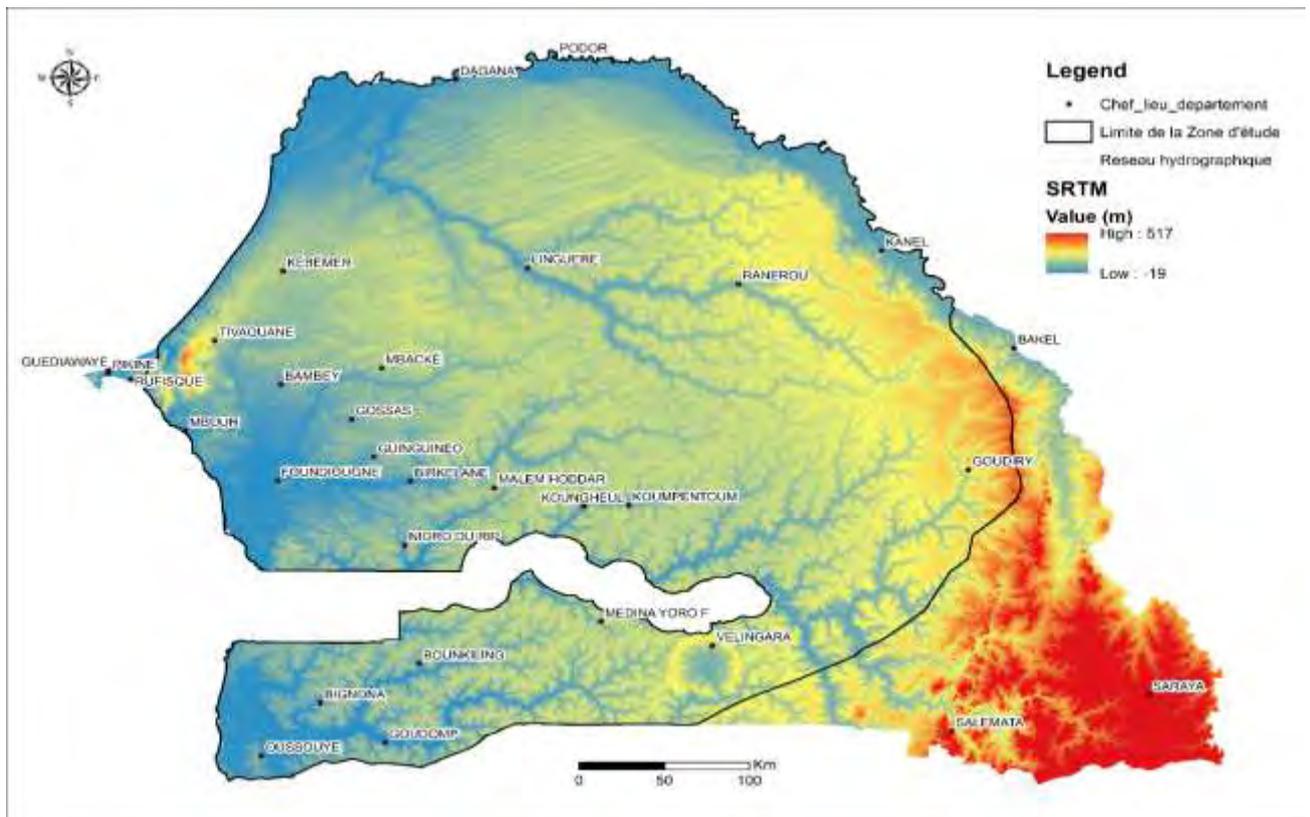


Figure 2: Relief et réseau hydrographique (INP, 2013)

### 1.1.3 Végétation et sols

La végétation naturelle est liée aux conditions climatiques. Au Sénégal, elle varie du Nord au Sud en formant des bandes d'orientation Est-Ouest (Figure 3) :

- Dans la zone Sahélienne (au Nord), la végétation est dominée par une steppe arbustive avec des acacias et quelques baobabs. Cette végétation est fortement soumise à la dégradation et à la désertification ;
- Dans la bande allant de Dakar à Matam, on trouve une savane arborée avec des acacias, des baobabs et des fromagers ;
- Dans la bande allant de Kaolack à Tambacounda, la savane se densifie ;
- Au Sud (région de la Casamance), la forêt devient importante ; on y trouve en plus le filao et le rônier.

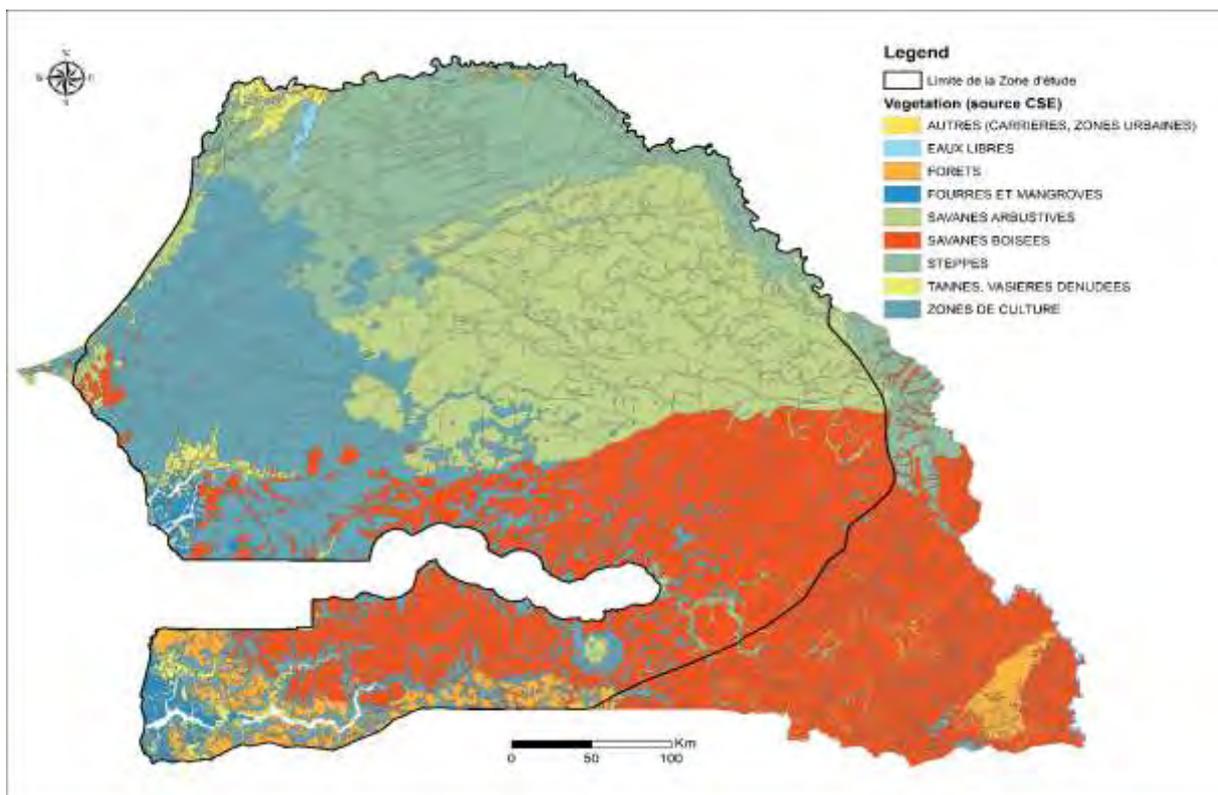


Figure 3: Répartition spatiale de la végétation (source CSE)

La variété de ces conditions bioclimatiques et la diversité de son substratum géologique font que le Sénégal recèle plusieurs types de sols aux aptitudes inégales :

- Les formations sableuses littorales : constituées par les sols des terrasses, des dunes du littoral et surtout de la Grande Côte entre Dakar et Saint Louis ;
- Les sols de vallées et de bas-fonds : constitués par des sols halomorphes formés sur des alluvions deltaïques, et des sols hydromorphes, caractérisés par la présence d'un excès d'eau, d'une grande profondeur ;
- Les sols ferrugineux : constitués de sols ferrugineux tropicaux lessivés sur grès sablo-argileux. Ces sols occupent la majeure partie du pays ;
- Le groupe des sols ferralitiques de Casamance : regroupe les meilleurs sols du Sénégal.

## 1.2 Contexte climatique

Le climat du Sénégal est influencé par l'alternance de trois flux dont les déplacements sont facilités par la platitude du relief.

- Le premier flux est représenté par l'alizé maritime issu de l'anticyclone des Açores, de direction nord à nord-est. L'alizé maritime est constamment humide, frais voire froid en hiver, et marqué par une faible amplitude thermique diurne. Son domaine est une frange côtière qui s'amenuise au Sud avec la remontée de la mousson, mais qui se maintient pendant presque toute l'année au nord du Cap-Vert ;
- L'harmattan, de direction Est dominante, branche finissante de l'alizé continental sahélien, est caractérisé par une grande sécheresse liée à son long parcours continental, et par des amplitudes thermiques très accusées ; frais ou froid la nuit, il est chaud à torride le jour. Il transporte souvent en suspension de fines particules de sable et des poussières qui constituent la "brume sèche" ;
- Le troisième flux, la mousson, provient de l'alizé issu de l'anticyclone de Sainte-Hélène dans l'Atlantique Sud. Elle bénéficie d'un très long trajet maritime qui la rend particulièrement humide. Elle pénètre dans le pays en période estivale selon une direction sud-est - nord-ouest et elle s'assèche relativement en fonction de sa pénétration vers l'intérieur. Elle est marquée par une faible amplitude thermique, mais avec des températures généralement plus élevées que celles de l'alizé maritime.

Le climat est caractérisé par l'alternance d'une saison sèche (de Novembre à Mai) et d'une saison pluvieuse (de Juin à Octobre). Pendant la saison pluvieuse ou humide souffle le flux de la mousson. Elle correspond à une période chaude sur l'étendue du territoire, surtout dans la partie Sud du pays. En outre, la saison sèche est caractérisée par la prédominance des alizés du Nord.

### **1.2.1 La pluviométrie**

La saison des pluies s'étend de Juin à Octobre avec un pic en Aout-Septembre et varie selon les latitudes. Elle varie au plan spatial de 300 mm au Nord à plus de 1400 mm au Sud. Deux phénomènes provoquent des précipitations sur le pays ; il s'agit d'une part des lignes de grains et d'autre part de la partie active de l'équateur météorologique, marquée par l'ascendance de l'air humide qui se refroidit en altitude et se condense en pluies. La pluviométrie moyenne annuelle suit un gradient croissant du Nord au Sud du pays. Ce gradient Hydro-climatique entre le Sud humide et le Nord sec permet de distinguer deux grandes régions climatiques de part et d'autre de l'isohyète 500mm (Figure 4).

- La région sahélienne au-dessus de l'isohyète 500 mm comprend deux régimes climatiques : le régime Nord sahélien avec une pluviométrie inférieure à 300mm au Nord (Matam, Podor) et le régime Sud sahélien avec une pluviométrie comprise entre 300 mm et 500 mm au niveau des régions Louga, Diourbel, Thiès et le littoral Nord ;
- La région soudanienne au Sud de l'isohyète 500 mm avec elle aussi deux régimes climatiques : la région Nord soudanien entre 500 mm et 800 mm dans les régions de Tambacounda, la petite côte, le Sine-Saloum, les bassins versants amont de la Gambie, de la kayanga et de la Casamance ; le régime Sud soudanien en base Casamance avec plus de 800 mm.

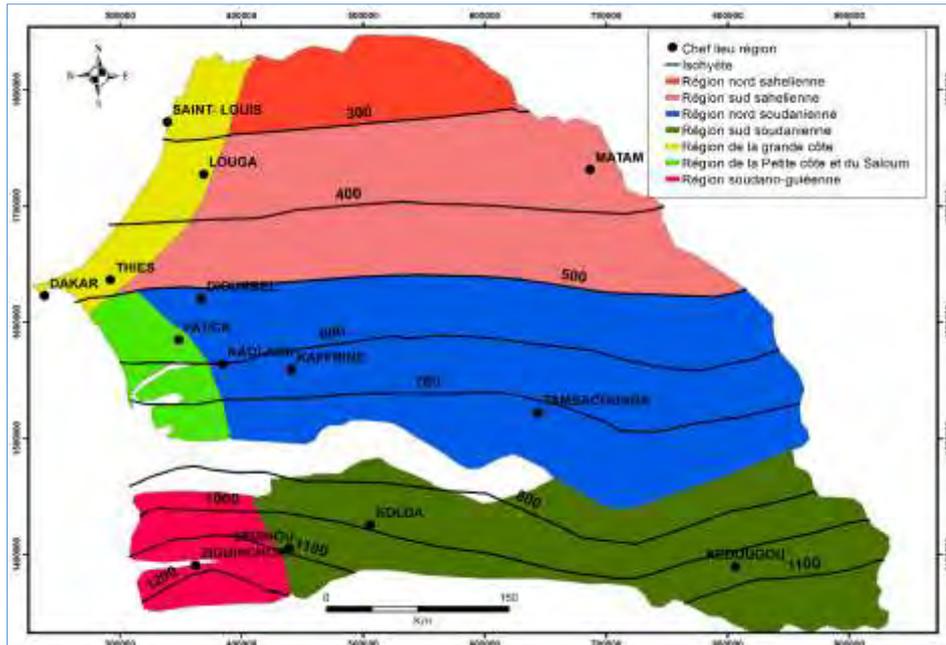


Figure 4: Carte des différentes zones climatiques du Sénégal (Malou, 2004)

### 1.2.2 La température

A l’instar de la pluviométrie, la température suit également un rythme saisonnier. Leurs évolutions et distributions résultent de conjonction des facteurs cosmiques, météorologiques et géographiques. Le régime thermique est scindé en deux parties :

- Les basses températures qui surviennent durant le mois de Janvier et Février (20°C à 35°C). C’est une période fraîche voir froide surtout dans les régions côtières comme le littoral Nord et une partie de la région casamançaise. Les alizés maritimes soufflent le long de la côte et font baisser les températures, les régions deviennent humides. Cependant le gradient thermique augmente de plus en plus qu’on s’éloigne du littoral ;
- Les hautes températures commencent à souffler à partir du mois de Mars et atteignent leur maximum d’avril au début de Juin, avant l’arrivée de la mousson. Elles varient entre 38 et 45°C. Cette variation de la température s’accompagne d’un gradient décroissant du Nord vers le Sud avec une influence de la mer à l’Ouest. Les pics de chaleur sont remarquables entre Juillet et Octobre avec une moyenne de 45°C.

### 1.2.3 Evapotranspiration

Elle correspond à la quantité d'eau transférée vers l'atmosphère, par l'évaporation au niveau du sol et au niveau de l'interception des précipitations, et par la transpiration des plantes. L'évapotranspiration intervient sur l'ensemble du pays avec des moyennes comprises entre 1700mm et 3200mm. Cette variation dépend de la saison (sèche ou pluvieuse). Au niveau des régions côtières, la présence de l'alizé maritime diminue l'évapotranspiration (1700mm). Néanmoins, plus on va s'éloigner du littoral, plus l'évaporation augmente. En effet, au niveau de la zone du Ferlo et du bassin du Sine-Saloum, l'évaporation varie entre 2300mm et 2500mm avant d'atteindre 3139mm sur l'axe Nioro-Tambacounda. Ces valeurs peuvent s'expliquer par la présence de l'harmattan.

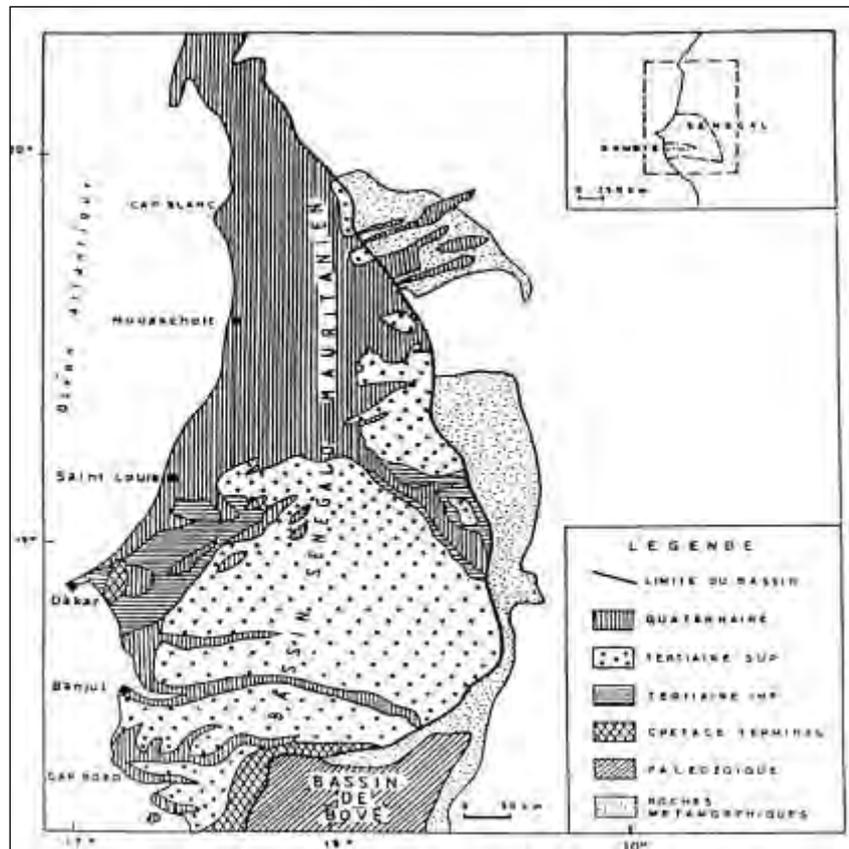
## 1.3 Contexte géologique et hydrogéologique

### 1.3.1 Contexte géologique

Le bassin sénégalo-mauritanien d'environ 340 000 km<sup>2</sup> est le plus vaste des bassins de la marge passive de la côte Ouest atlantique de l'Afrique. Il s'étend sur près de 1 400 km entre le Cap Barbas en Mauritanie et le Cap Roxo en Guinée Bissau couvrant ainsi 4/5 du territoire sénégalais (Figure 5). Il se dépose en discordance sur le substratum anté-mésozoïque déformé, dont les témoins sont représentés dans la chaîne des Mauritanides d'âge panafricain à hercynien. Son origine est directement liée à l'ouverture de l'atlantique, dont les premières manifestations sont enregistrées au Trias-Lias (Bellion et Guiraud, 1984).

Le bassin forme une vaste structure monoclinale à faible pendage Ouest (Spengler *et al.* 1966). A l'Est, il est limité par la chaîne des Mauritanides d'âge Pan Africain à Hercynien et les formations Paléo protérozoïques de la boutonnière de Kédougou. Il est généralement recouvert par une formation sablo-argileuse du Continental Terminal, des calcaires lacustres et des sables éoliens du Quaternaire. Les affleurements se rencontrent principalement dans les régions du Cap-Vert et de Thiès, et dans les vallées du fleuve Sénégal et du Ferlo. L'histoire de cette marge passive peut être subdivisée en trois stades :

- Le stade pré-rift serait représenté par les formations du substratum ;
- Le stade syn-rift est associé aux dépôts évaporitiques du Trias et aux épisodes volcaniques du jurassique très important de la Province magmatique de l'Atlantique Central encore appelé CAMP) ;
- Le stade post-rift est caractérisé par les épais dépôts des couvertures sédimentaires méso-cénozoïques du Jurassique supérieur au Pléistocène.



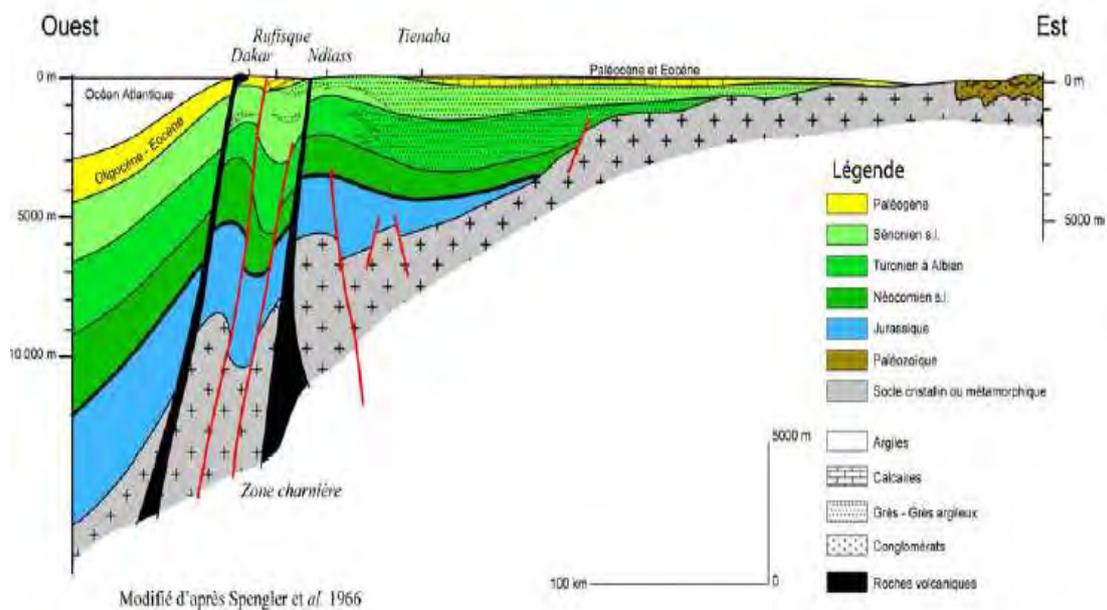
**Figure 5: Bassin sédimentaire sénégalo-mauritanien (Bellion, 1987 in Siby 1997)**

Les résultats de la géophysique et des forages pétroliers ont permis de mettre en évidence une accentuation du pendage du substratum à partir de Kolobane vers l'Ouest. Ainsi, on peut distinguer deux domaines structuraux (Figure 6) séparés par une flexure de direction Nord-Sud (Liger, 1980 ; Ritz et Flicoteaux, 1985 ; Latil-Brun et Flicoteaux, 1986 ; Latil-Brun, 1987) :

- Un domaine à l'Est du méridien  $15^{\circ} 30' W$ , caractérisé par une couverture sédimentaire d'âge Crétacé supérieur et Cénozoïque de quelques centaines de mètres surmonte un socle faiblement incliné, métamorphique et granitique. La limite Ouest de ce domaine ( $15^{\circ} 30' W$  et  $16^{\circ} 30'' W$ ) est marquée par le plongement progressif du soubassement cristallin vers l'Ouest qui est affecté par des failles normales généralement concordantes. La puissance de la couverture sédimentaire devient de plus en plus puissante vers l'Ouest pour dépasser 4000 m à Diourbel ;
- La zone de flexure : C'est la partie qui sépare le domaine oriental de l'occidental. Elle est comprise entre la longitude  $15^{\circ}30'W$  et  $16^{\circ}30' W$ . La zone de flexure est marquée par un prolongement progressif du socle vers l'Ouest ainsi que par des accidents de

même direction. Du point de vue sédimentologique, l'épaisseur de la couverture sédimentaire augmente vers l'Ouest pour dépasser 4200 m à Diourbel. Cette direction Ouest comprend également des terrains Cénozoïques d'âges différents, Crétacé supérieur puis inférieur et en fin du Jurassique supérieur à l'extrême occidental ;

-Le domaine Ouest s'étend du méridien 16° 30' W jusqu'à la pente du talus continental. Il est caractérisé par une série sédimentaire Méso-Cénozoïque très épaisse et pouvant dépasser 10 000 m à 12 000 m. Les terrains les plus anciens reconnus par forages au Sud du Cap-Vert datent du Bathonien au Callovien. Ce domaine est marqué dans les régions du Cap-Vert et de Thiès par un réseau de failles méridiennes N 20° E, parallèles à la direction du littoral Nord entre Dakar et Saint-Louis. Ces failles normales listriques, sont de grandes extensions spatiales et concaves en profondeur, elles délimitent des horsts (Dakar et Diass) et des grabens (Rufisque).



**Figure 6: Coupe schématique du bassin du Sénégal (Spengler et al. 1966, modifiée)**

Des manifestations magmatiques sont reconnues dans le bassin, il s'agit de magmatisme tholéitique précoce qui serait associé à l'ouverture de l'océan Atlantique centrale (Bertrand et Villeneuve, 1989 ; Ndiaye, 2012) et de volcanisme alcalin d'âge cénozoïque qui s'étend de l'Eocène moyen (Lutétien) au Quaternaire (Crévola et al. 1994). Des diapirs de sels d'âge Trias ou Lias, ont « recoupé » la couverture sédimentaire du plateau continental casamançoguinéen au Sud, et celle du talus continental mauritanien au Nord.

Le substratum correspond aux terrains situés sous la discordance à la base du Mésozoïque, son âge s'étend du Protérozoïque au Paléozoïque. Certains forages l'ont atteint en Haute Casamance, dans le Ferlo, le Sine-Saloum et la région de Diourbel.

### **Lithostratigraphie**

La série sédimentaire du bassin sénégalais débiterait par des dépôts détritiques continentaux du Permo-Trias, époque contemporaine du stade syn- rift de l'Atlantique Central (Bellion & Guiraud, 1984 ; Bellion, 1987).

Dans ce qui suit, nous décrivons de façon succincte la lithostratigraphie des formations du Trias-Lias au Crétacé qui renferme le réservoir de la nappe Maastrichtienne.

#### **Le Trias et le Lias**

Pendant cette période, des conditions nécessaires à la précipitation de solutions salines sont réunies : les bassins du rift proto-atlantique sont peu étendus permettant le confinement de la transgression marine et les conditions climatiques déshydratantes sont assurées par la position sub-équatoriale du bassin. Les dépôts sont constitués d'une association de sels, de gypse, d'anhydrite et d'argiles vertes à noires dans un bassin salifère large d'environ 60 km situé à environ 200 km au large de la ligne de côte actuelle du bassin. Ils sont reconnus par forages au Cap Vert, au large de la Casamance et de la Mauritanie jusqu'à la latitude Sud de Saint-Louis (Diédhiou, 2003).

#### **Le Jurassique moyen et supérieur**

Cette période qui marque le début du stade post-rift est marquée par une importante tectonique salifère qui remobilise les dépôts d'évaporites sous forme de diapirs et perturbe la sédimentation post-rift. Le Jurassique a été traversé dans le Cap-Vert par les forages DKM2 et Diass 1 (DS1) et probablement à Diourbel et Diana Malari (Castelain, 1965 ; Spengler et al. 1966 ; Sarr, 2019).

#### **Le Crétacé**

##### **Le Crétacé inférieur**

Le passage du Jurassique au Crétacé est marqué par l'arrivée de matériel détritique à l'Ouest du bassin où les dépôts carbonatés restent dominants. La plateforme carbonatée créée au Jurassique s'épaissit jusqu'à l'Aptien (environ 1,2 km au Nord et environ 1,6 km au Nord de la Casamance) (Bellion 1987).

## **Le Crétacé supérieur**

### **Le Cénomanién**

Le Cénomanién est également formé d'alternances d'argiles, d'argiles silteuses et de calcaires, de sables et de grès. Les sondages dans le Cap-Vert l'ont entièrement traversé (960 m à CVM1 ; 101 m à Rufisque 1), dans la région de Thiès (630 m à DS1 ; 322 m à Gadiaga 1). Le Cénomanién a été partiellement recoupé à Mont Rolland 2 (Rd2), Pout 2 (Pt2) et Tiénaba 1 (Ti1). Dans le Centre du bassin, le Cénomanién correspond à une alternance d'argiles, de grès à passages de graviers quartzeux intercalés de grès à ciment calcaro-dolomitique, d'argiles rouges et de niveaux dolomitiques et de fins niveaux de lignite. Son épaisseur atteint plus de 443 m à Diourbel.

### **Le Turonien**

Le Turonien est un bon repère lithologique pour son faciès argileux homogène. Dans l'Ouest du bassin, il correspond à une argile noire parfois bitumeuse, avec de rares passées de calcaire argileux. Son épaisseur est de 180 m à TB1, 210 m à DKM1, 40 m à DS1, 58 m à Mbour (Br1). Vers le Centre, le Turonien est argilo-sableux et gréseux versicolore, avec des intercalations de niveaux calcaires gréseux et glauconieux fossilifères à Tiénaba. Son épaisseur atteint 88 m à Diourbel. A l'Est, les argiles sont versicolores avec des niveaux de grès de plus en plus grossiers, épais de 60 m à Ndiodori F1.

### **Le Sénonien inférieur**

Le Coniacien et le Santonien sont formés de dépôts argilo-sableux. Sur la marge occidentale, on trouve des argiles à intercalations de calcaires à la base et des niveaux argilo-sableux. Dans le Cap-Vert et la région de Thiès l'épaisseur atteint 930 m à Mont Rolland 2 (Rd2), 400 m à CV1 et Mbour. Au Centre et à l'Est les argiles sont plus ou moins versicolores et les sables deviennent grossiers, avec des niveaux de graviers, de galets et de débris de lignite par endroits. L'épaisseur des dépôts diminue vers l'Est (497 m) à Diourbel.

## **Le Campanien**

Vers la limite Campanien-Maastrichtien se situe la mise en place du dôme de syénite de Léona au Sud de Saint-Louis. Dans le Cap-Vert et la région de Thiès, le Campanien est formé d'argiles silteuses et de sables ou de grès à intercalations de calcaires. L'épaisseur est de 110 m à TB1, 165 m à Pout 1 (Pt1), 210 m à Diamniadio 2 (DN2) et By1, 470 m à Gadiaga 1 et 486 m à Cayar off-shore 1 (Co1). Dans le horst de Diass le sommet du Campanien affleure au Cap de Naze sous forme d'argiles noires feuilletées surmontées par un banc de calcarénite jaune bioturbé. Le Campanien supérieur affleure probablement dans la carrière de Paki sous forme de grès quartzites coquilliers. Dans le Centre et l'Est du bassin le Campanien est formé d'argiles sableuses et silteuses et ne peut être distingué du Sénonien inférieur.

## **Le Maastrichtien**

Il est marqué par des processus de régression et d'érosion associés à des soulèvements locaux. Au Maastrichtien, une nette régression a lieu alors que des soulèvements locaux érodent le dôme de Diass, le dôme de Léona, la presqu'île du Cap Vert et le dôme Flore dans la partie offshore de la Casamance créant une lacune partielle. Ce soulèvement associé aux mouvements de blocs faillés est la conséquence de la phase tectonique Laramienne. A l'Ouest du horst de Diass, les faciès sableux passent latéralement à des faciès sablo-argileux dans le secteur de Diamniadio/Sangalkam, puis à des faciès entièrement argileux au lac Retba (Rt1 et Wayambam 1). Cette variation de faciès s'accompagne d'un épaissement considérable des dépôts au lac Retba où ils dépassent virtuellement 2250 m. Ce phénomène peut s'expliquer par le jeu de failles synsédimentaires bordières du horst. L'épaisseur du Maastrichtien est plus forte dans la zone du lac Retba (Rt1 : 1120 m ; Wayambam 1 : 1295 m ; DN5 : 1746 m). Elle est plus faible au Nord-Ouest du Sénégal (TB1 : 480 m), dans la région de Thiès (Mbour : 404 m). Les sables dominent à l'Est du horst de Diass où ils admettent des passages argileux, des niveaux de lignite au sommet et des passées conglomératiques à la bordure orientale du bassin. L'épaisseur des dépôts diminue vers l'Est, passant de 303 m à Diourbel. Le Maastrichtien repose directement sur le socle à la bordure Nord-Est du bassin (confins sénégal-mauritaniens). Il affleure bien dans le massif de Diass, en particulier sur le littoral entre Yène et Guéréo où il forme des falaises sablo-gréseuses et silto-argileuses.

### 1.3.2 Contexte hydrogéologique

Le contexte hydrogéologique du Sénégal est caractérisé par deux grands ensembles hydrogéologiques en fonction des configurations géologiques : les aquifères généralisés de type intergranulaire, karstique des formations sédimentaires perméables et les aquifères fissurés de type discontinu à semi-continu des nappes du substratum ancien (socle) dont les potentiels exploitables sont limités et difficiles à trouver. Ainsi, les ressources en eaux souterraines du Sénégal sont représentées par des nappes associées aux formations allant du Quaternaire au Maastrichtien (aquifères généralisés) d'une part et des nappes de formations d'altération superficielles du Sénégal oriental (aquifères de socle) d'autre part. La série stratigraphique simplifiée (PSE, 2001), résumant les principales caractéristiques lithologiques et hydrogéologiques, est présentée sur le tableau 1. On distingue :

« *L'ensemble supérieur* » regroupe les assises géologiques de l'Oligocène du Néogène et du Quaternaire. Dans cet ensemble, le système aquifère dénommé « *Complexe Terminal* » comprend tous les niveaux plus ou moins productifs des formations détritiques et biochimiques

de l'Oligocène, du Miocène, du Pliocène ainsi que les dépôts sableux du Pleistocène et de l'Holocène. Il couvre en conséquence la quasi-totalité du bassin sédimentaire sénégalais ;

« *L'ensemble intermédiaire* » correspond aux formations du Paléogène (Eocène, Paléocène). Cet ensemble formé principalement d'assises carbonatées (marnes, marno-calcaires, calcaires), ne présente des caractéristiques hydrogéologiques intéressantes que dans les parties ayant subi des phénomènes de karstification et de fissuration (non colmatées par la suite) ;

La dénomination générale de « *l'aquifère Maastrichtien* », englobe tous les niveaux productifs à dominante sableuse compris dans les étages du Crétacé supérieur : Maastrichtien *sensus stricto*, Campanien, Sénonien inférieur, jusqu'au toit du Turonien. Cet étage, formé d'argiles

noires imperméables, constitue d'ailleurs un repère stratigraphique très utile du fait de son extension quasi généralisée dans le bassin sénégalais ;

« *Les aquifères de socle* » renferment des ressources en eau considérées comme faibles car les puits sont généralement implantés dans la frange d'altération des roches cristallines et métamorphiques du Sénégal oriental. Il s'agit d'aquifères discontinus ou semi-continus représentés par les franges altérées des roches saines et / ou par les réseaux de fractures et de fissures affectant la partie supérieure de ces roches.

Des facteurs stratigraphiques et structuraux affectent de manière indiscutable l'emplacement de l'eau dans cette région où la nappe phréatique est en relation avec les roches cristallines, métamorphiques et méta-sédimentaires

**Tableau 1 : Récapitulatif synthétique des aquifères du Sénégal (PSE, 2001)**

ERE	Syst	Epoque	Etage	Regroupement Strat.	Zone Nord		système Aquifère	Zone Sud		
					Lithologie dominante	Aqui..		Lithologie dominante	Aqui..	
QUATERNAIRE					Sables éoliens alluvions tufs volcaniques	Aquifère	"Complexe Terminal"	Sables marins et éoliens	Aquifère	
TERTIAIRE	NEOGENE	PLIOCENE	« CONTINENTAL TERMINAL »		Sables coquilliers sables +/- argileux	Aquitard		sables ou grès argileux et argiles	Aquitard	
		MIOCENE			marno calcaire	Aquitard	sables avec bancs d'argile et calcaires		Aquifère	
	PALEOGENE	OLIGOCENE			marnes et argiles	Aquitard		calcaires karstifiés	Aquifère	
		EOCENE		mo	LUTETIEN SUP.	Calcaires marno-calcaires	Aquiclude			
			inf	LUTETIEN INF.	sables	Aquifère				
	SECONDAIRE	CRETACE	PALEOCENE	PALEOCENE sup. à moyen		Marnes et argiles	Aquiclude	marno calcaires passés sables	Aquitard	
						Marno-calcaires calcaires karstifiés marnes	Aquifère		sables, calcaires coquilliers ou karstifiés	Aquifère
			CRETACE Supérieur	SENONIEN	DANIEN		Marno calcaires argiles	Aquitard	marno calcaires argiles	Aquitard
					MAASTRICHTIEN		sables grès, sables gréseux sables argileux	Aquifère	sableux avec passées d'argile	Aquifère
					CAMPANIEN		Grès Sables argileux	Aquifère	sables argileux	Aquifère
					SENONIEN INF		sables argileux et argiles sableuses	Aquitard	argile sableuse	Aquitard
			TURONIEN		argiles noires	Aquiclude	Argiles noires	Aquiclude		
			CRETACE moyen	CENTOMANIEN		calcaires argiles sableuses	Aquiclude	Aquiclude	marno calcaire	Aquiclude
					ALBIEN	calcaire, marno calcaire sables argileux			Marno calcaires, argiles sableuses	
APTIEN					calcaire, marno calcaire argiles sableuses	Marno calcaires, argiles sableuses				
CRETACE Inférieur	NEOCOMIEN		calcaire dolomitique			calcaires et bancs de dolomie	Aquiclude			
JURASSIQUE					calcaires, calcaires dolomitiques	Aquiclude	calcaires et bancs de dolomie	Aquiclude		
TRIAS					couche salifère	Aquiclude	couche salifère	Aquiclude		
PRIMAIRE					argiles silteuses grès quartzites conglomérats	Aquiclude	argiles silteuses grès quartzites conglomérats	Aquiclude		
Socle cristallin					granites, diorites, roches métamorphiques		Aquifère dans les zones superficielles fracturées et arénisées			

En définitive, on distingue quatre (04) grands systèmes aquifères selon les critères stratigraphiques et sédimentologiques susmentionnés (figure 7) :

- (i) le système aquifère superficiel dit « complexe terminal » qui regroupe les formations à dominante sablo-argileuse et sableuse du Quaternaire (QT), du Continental Terminal (CT) et de l'Oligo-miocène (OM) ;
- (ii) le système aquifère intermédiaire qui regroupe les formations essentiellement calcaires, karstiques par endroits, et marno-calcaires de l'Eocène (EO) et du Paléocène (PA) ;
- (iii) le système aquifère profond qui regroupe les horizons du Maastrichtien, du Campanien et du Sénonien inférieur. C'est une nappe captive d'une épaisseur moyenne de 250 m qui s'étend sur la quasi-totalité de la partie sédimentaire du Sénégal (Travi, 1988) ;
- (iv) le système aquifère inférieur ou aquifères de socle qui regroupe les aquifères discontinus à semi-continu de fissures et d'altération des formations granitiques et métamorphiques du Sénégal oriental.

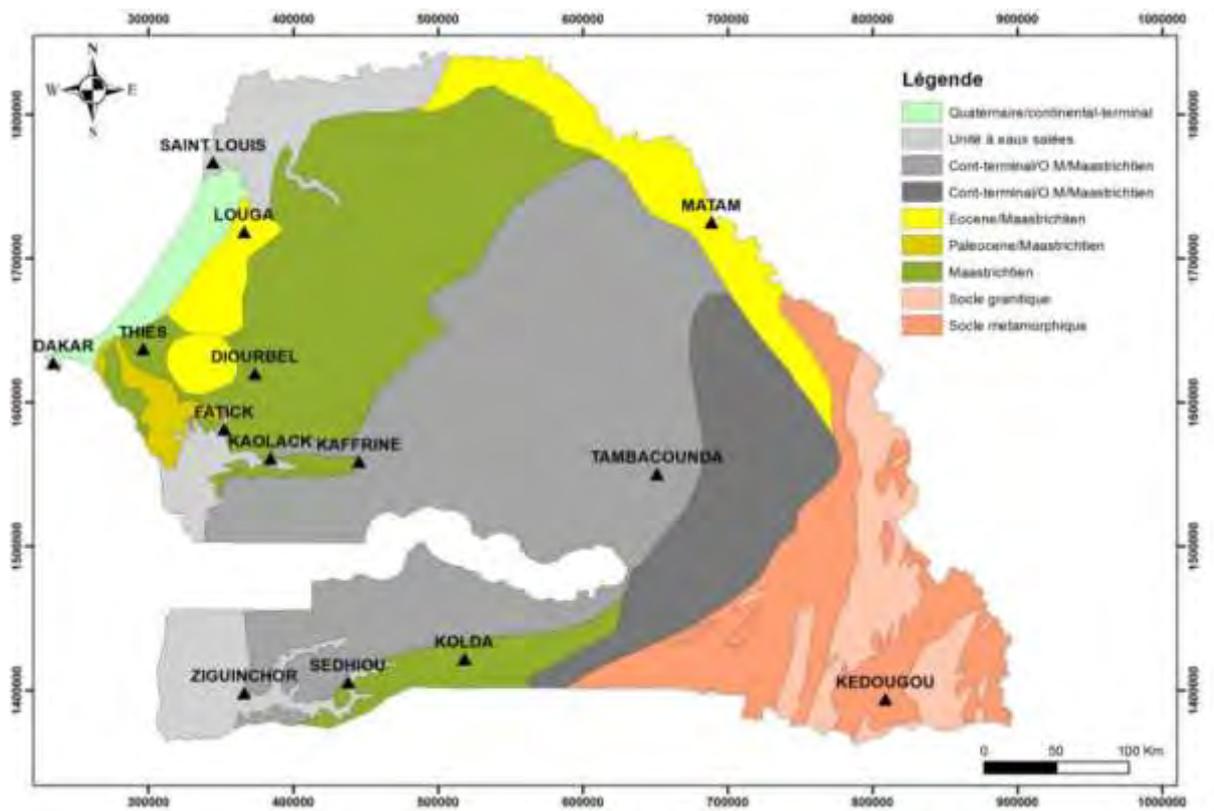
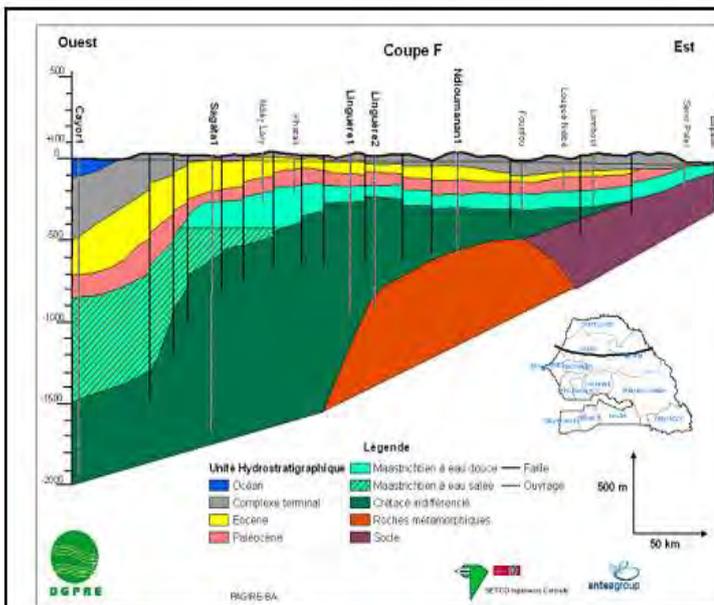


Figure 7: carte des aquifères du Sénégal (source DGPRES)

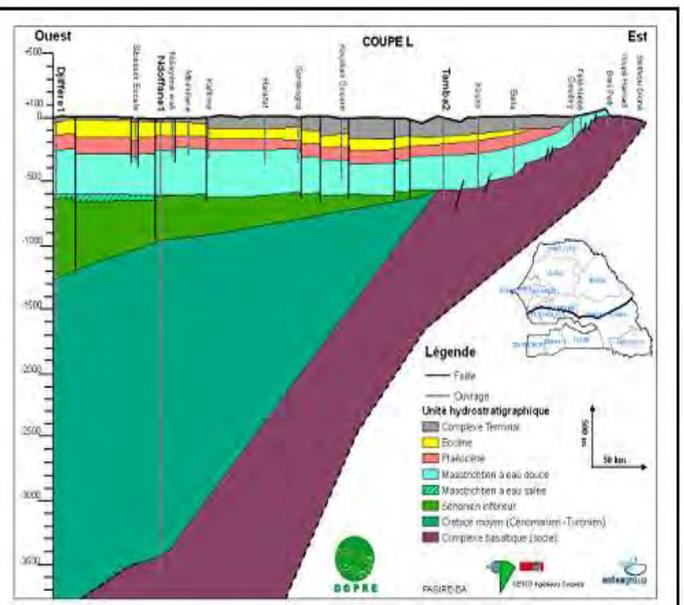
La figure suivante (figure 8) présente la succession d'ensemble et la configuration géométrique des aquifères à travers 4 coupes hydrogéologique réalisées dans le cadre du projet PAGIRE-BA (DGRPE, 2014) :

- **La Coupe F** qui part du fleuve Sénégal (région de Matam) et traverse diagonalement les régions de Matam et de Louga, montre la succession stratigraphique d'ensemble du bassin sédimentaire où les couches en biseau sédimentaire à l'Est s'épaississent vers l'Ouest suite à des jeux de failles et d'effondrement par subsidence. La formation sableuse du Maastrichtien qui fait l'objet de cette étude présente une allure irrégulière ; elle sub-affleure à l'Est et repose sur le socle pour s'enfoncer progressivement sur une puissance de 100 m sous le recouvrement tertiaire et quaternaire suite aux jeux de failles synsédimentaires. Vers le centre, les couches sont légèrement soulevées du fait de l'occurrence du dôme de Léona qui a créé une surrection dans la région. Les sondages pétroliers de Ndioumanane et de Linguère 1 et 2 ont rencontré les formations du dôme et de l'auréole métamorphisée. Au-delà de Linguère, le maastrichtien s'épaissit et s'enfonce progressivement pour atteindre des épaisseurs de plus de 600 m. Les couches supérieures du Paléocène, de l'Eocène et du plio-quaternaire présentent la même allure. Il faut signaler la présence de saumure de 60 à 100 g/l dans le sondage de Sagatta très probablement induite par la surrection des dômes de Gawane et Leona et celle du Horst de Diass.
- **La Coupe J** passant par la diagonale E-W du territoire sénégalais depuis la zone de socle en passant par Diourbel et Mbour et les sondages pétroliers de Korkol, Ndiodiri, Diourbel1, Kotiane et Bambey montre un épaississement progressif du Maastrichtien sous le recouvrement Plio-Quaternaire, Eocène, Paléocène. Dans la zone Est, le maastrichtien affleure et repose sur le socle puis s'enfonce progressivement pour se relever au niveau de Korkol-Ndiodiri à la faveur de la poussée du dôme de Gawane. Au-delà vers l'Ouest, le maastrichtien s'épaissit et son toit remonte par l'amorce de la surrection du Horst de Diass où l'Eocène disparaît.

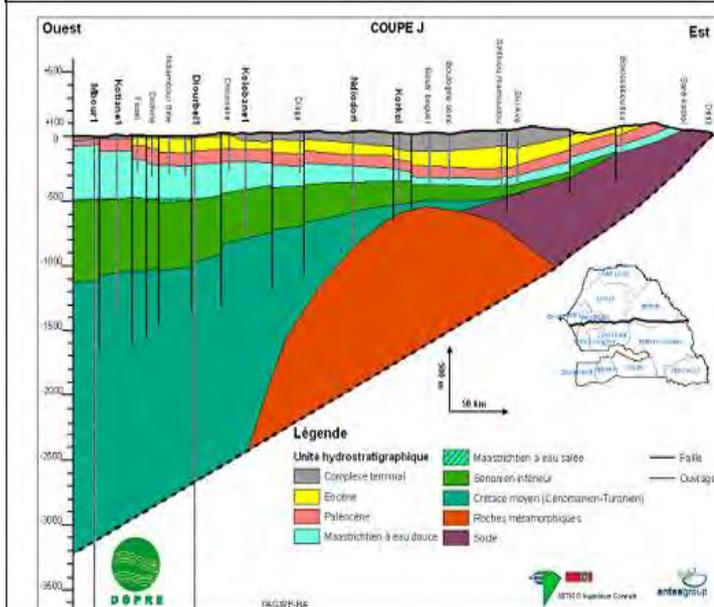
- **La Coupe L** partant du socle et passant par Tambacounda – Kaffrine – Ndoffane – Djiffère présente la plus forte puissance du maastrichtien. Ce dernier affleure à son contact avec le socle pour ensuite s'enfoncer très rapidement vers Tambacounda. C'est d'ailleurs dans cette zone où le toit de la formation est plus profond. La couche maastrichtienne évolue par la suite sur une plateforme constituée des terrains du cénomanien inférieur avec une épaisseur moyenne de 300 à 350 m perturbée par quelques jeux de failles.
- **Coupe O** passant sur le transect Sud du pays depuis le socle en passant par Kolda – Bignona-Kafountine présente une configuration similaire que la précédente mais la zone d'affleurement du maastrichtien est plus étendue et la couche s'approfondit en s'épaississant vers l'Ouest.



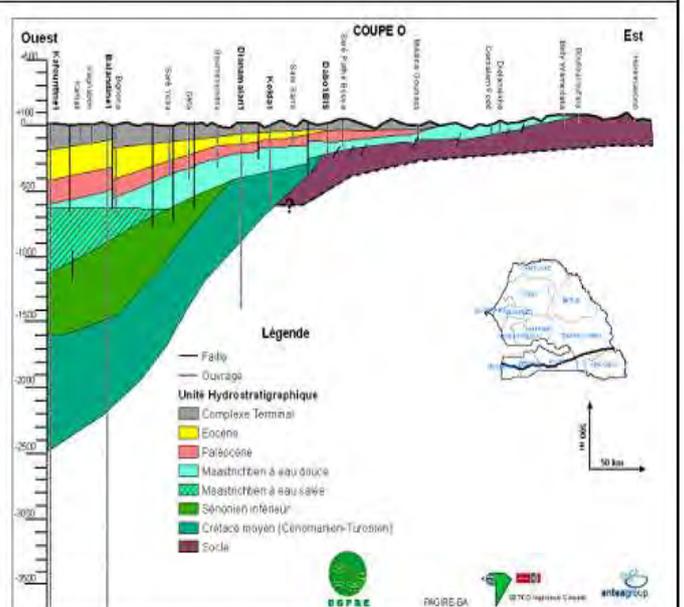
Coupe géologique F



Coupe géologique L



Coupe géologique J



Coupe géologique O

Figure 8: Coupes géologiques Est-Ouest sur le bassin (DGP RE, 2014)

## **CHAPITRE 2 : METHODOLOGIE**

### **2.1. Compilation et constitution de la base de données**

Dans cette présente étude, les outils statistiques et les SIG sont utilisés pour évaluer la qualité des eaux de la nappe profonde du Maastrichtien en compilant des données récentes sur la qualité des eaux souterraines provenant de la base de données de la DGPRE, d'anciens projets d'étude et de mémoire de master sur la nappe maastrichtienne. Les études antérieures sur l'hydrochimie et l'isotopie de cet aquifère profond ont révélé la présence d'anciennes eaux qui ne sont pas affectées par la variabilité saisonnière en dehors du Hors de Diass, et de la bordure Sud correspondant à des zones de recharge de la nappe (Travy, 1988 ; Faye1983 ; DGPRE, 2001). Par conséquent, les données allant de la période 2013 à 2019 au niveau de 623 ouvrages ont été prises en compte dans cette étude. Les analyses de la qualité de l'eau comprenant 10 paramètres (CE, HCO<sub>3</sub>, Cl, NO<sub>3</sub>, SO<sub>4</sub>, Na, K, Ca, Mg, F) ont été effectuées par le laboratoire d'hydrochimie du département de géologie de l'université Cheikh Anta Diop conformément aux méthodes standards.

Toutefois, il faut noter que l'analyse chimique et les mesures *in-situ* sont souvent incomplètes pour les 623 ouvrages répertoriés. La Balance Ionique (BI) a été utilisée comme moyen de vérification de la fiabilité des données. A cet effet, les échantillons ayant une BI supérieure à 10 % ont été éliminés de la base de données. Enfin, le traitement des données s'est effectué sur 382 observations compilées dans une BD géographiquement référencée et projetée UTM-WGS84 (figure 1).

### **2.2. Statistique descriptive et multivariée**

Les techniques statistiques ont été appliquées par de nombreux chercheurs pour caractériser et évaluer la qualité des eaux souterraines (Reghunath et al., 2002 ; Lin et al., 2003 ; Shrestha, 2007 ; Madioune, 2012 ; Emvoutou, 2018).

Dans cette étude, des modèles statistiques multivariés, tels que l'analyse en composantes principales (ACP) et les dendrogrammes (CAH) ont été utilisés pour regrouper les eaux en fonction des caractéristiques de la qualité de l'eau et identifier les facteurs probables qui influencent l'hydrochimie.

L'ACP est surtout utilisée comme technique d'analyse dans laquelle un ensemble complexe de données contenant des variables est transformé en un ensemble plus petit de nouvelles variables, qui maximisent la variance de l'ensemble de données originales (Horejeet et al., 2015). Une standardisation (échelle z) a été effectuée sur chaque paramètre chimique avant l'analyse statistique (Simeonov et al., 2004), afin d'éliminer le biais de tout paramètre de différentes unités à forte concentration et de rendre les données sans dimension. Les composantes principales sont générées de manière séquentielle avec des contributions décroissantes à la variance, c'est-à-dire que la première composante principale (PC1) explique la plupart des variations présentes dans les données originales, et les composantes principales successives représentent des proportions décroissantes de la variance (Pires et al., 2009 ; Vieira et al., 2012).

Le dendrogramme, d'autre part, est une méthode utile pour organiser objectivement un grand ensemble de données en groupes sur la base d'un ensemble donné de caractéristiques. L'objectif principal du dendrogramme est d'identifier des groupes relativement homogènes en fonction de leurs similitudes/dissimilitudes. Le regroupement d'objets similaires se fait d'abord et finalement, lorsque la similarité diminue, tous les sous-groupes sont fusionnés en un seul groupe. Dans cette étude, le Classification Hiérarchique Ascendante (CAH) a été réalisée sur l'ensemble de données normalisées au moyen de la méthode de Ward en utilisant la distance euclidienne au carré comme mesure de la similarité pour obtenir le dendrogramme (Helali, 2016). Le dendrogramme fournit un résumé visuel des processus de regroupement, présentant une image des groupes et de leur proximité, avec une réduction de la dimensionnalité des données originelles.

Toute la statistique multivariée a été réalisée à l'aide des logiciels OriginPro ® et R studio®.

### **2.3. Interpolation spatiale et génération des cartes de distribution spatiale des paramètres**

L'interpolation spatiale est une procédure de prédiction de la valeur des attributs sur des sites non échantillonnés à partir de mesures effectuées à des points situés dans la même zone.

Les méthodes de Krigeage et d'IDW (inverse de la distance au carré) ont été utilisées pour l'interpolation des valeurs et la création de cartes de distribution spatiale des paramètres hydrochimiques (variables). Pour chaque variable, les histogrammes et les QQplots ont été tracés afin d'examiner la normalité des données observées. Les paramètres qui ne sont pas

distribués de façon normale ont été transformés (Log et BoxCox) pour qu'elles satisfassent l'hypothèse d'une égale variabilité.

Pour la méthode de Krigeage, plusieurs types de modèles de semivariogrammes ont été examinés pour chaque paramètre de qualité de l'eau afin d'obtenir le meilleur ajustement. Les performances prédictives des modèles ajustés ont été vérifiées sur la base de tests de validation croisée. Après avoir mené la procédure de validation croisée entre les modèles de krigeage et l'IDW, les couches de distribution des paramètres sont générées. Ces traitements ont été effectués sous ArcGis ® et Surfer ®

### **2.3. Indice de Qualité d'Eau (IQE)**

L'indice de qualité de l'eau (IQE) est défini comme une technique de notation qui exprime l'influence composite d'un paramètre individuel de qualité de l'eau sur la qualité globale de l'eau destinée à la consommation humaine (Vasanthavigar et al., 2010, Herojeet et al., 2015).

Elle a été utilisée pour la première fois par Horton (1965) dans le cadre d'une étude portant sur les critères de qualité de l'eau, norme pour les cours d'eau et les affluents. Cinq ans après, Brown et al (1970) l'ont développé en attribuant un poids approprié à chaque paramètre de bases des éléments d'analyses. De nos jours, l'IQE est devenu un paramètre important dans la gestion des ressources en eaux, largement utilisée à travers la communauté scientifique (El-Fadel et al., 2013 ; Sadat-Noori et al., 2013 ; Selvam et al., 2013 ; Tiyagi et al., 2013 ; Jhariya et al., 2017 ; Gnanachandrasamy et al., 2018 ; Karakus et al., 2018 ; Kawo et al., 2018 ; Huag et al., 2019 ; Prisca 2020 ; Verma et al., 2020).

Dans cette présente étude, le calcul de l'IQE s'est effectué dans un environnement SIG en 4 étapes :

- (1) Choix des paramètres physico-chimiques et création des couches de distribution spatiale à l'issue de la phase d'interpolation ;
- (2) Pondération des critères et leur normalisation ;
- (3) Calcul de la déviation par rapport à la norme OMS (1999 et 2017) (Q) et génération des couches ;
- (4) Combinaison des différentes couches par « overlaying » et classification de l'indice IQE.

La méthodologie est présentée dans la figure 9 ci-dessous.

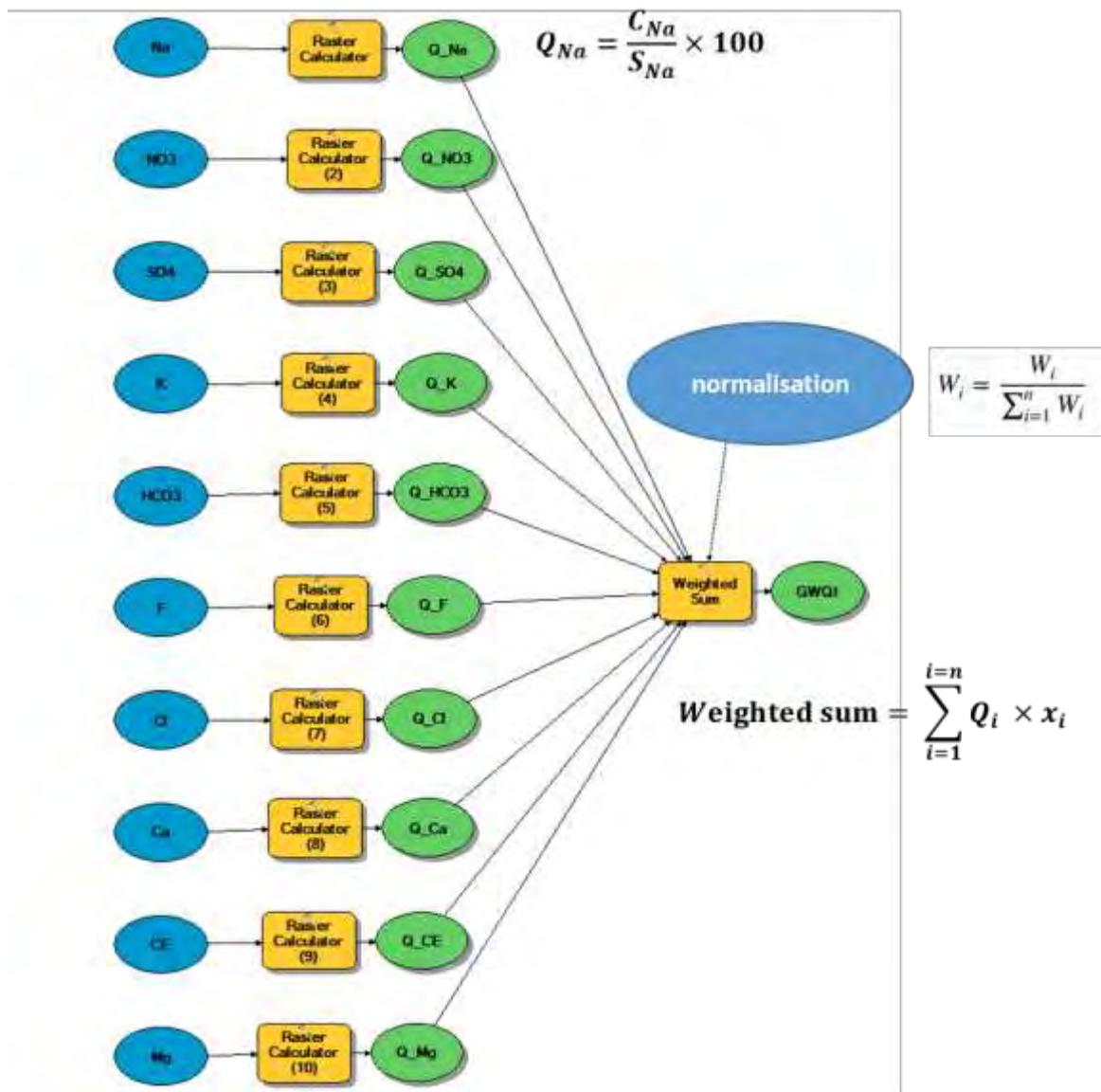


Figure 9: Organigramme de calcul de l'IQE

## CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS

### 3.1. Typologie des eaux

#### 3.1.1. Statistique descriptive

L'analyse statistique a été faite afin d'identifier les tendances des paramètres chimiques et leurs évolutions, de même que leur qualité en comparaison avec les normes OMS (tableau 2). La conductivité électrique varie entre 19 et 6480  $\mu\text{s}/\text{cm}$  avec une moyenne de 1770.10 $\mu\text{s}/\text{cm}$ . Cette dernière montre que plus de la moitié de la nappe maastrichtienne ne respecte pas les normes prescrites par l'OMS pour la conductivité électrique (1500  $\mu\text{s}/\text{cm}$ ). Les cations (Na, Ca, Mg et K) ont des valeurs moyennes de concentration ionique inférieures aux normes de l'OMS à l'exception du sodium dont la moyenne dépasse largement la norme (319,1 mg/L). En outre l'ordre d'abondance des cations est la suivante Na > Ca > Mg > K. Concernant les anions, leurs valeurs moyennes sont inférieures aux normes de l'OMS à l'exception des Chlorures (361,38 mg/L) et du fluor (1,13 mg/L). L'ordre de dominance des anions majeurs est réparti comme suit : Cl > HCO<sub>3</sub> > SO<sub>4</sub> > NO<sub>3</sub> > F

En somme, une grande partie de la nappe maastrichtienne présente des teneurs en ions majeurs (Ca ; Mg ; K ; HCO<sub>3</sub> ; SO<sub>4</sub> ; NO<sub>3</sub>) inférieurs aux normes de l'OMS à l'exception de CE, Na, Cl et F.

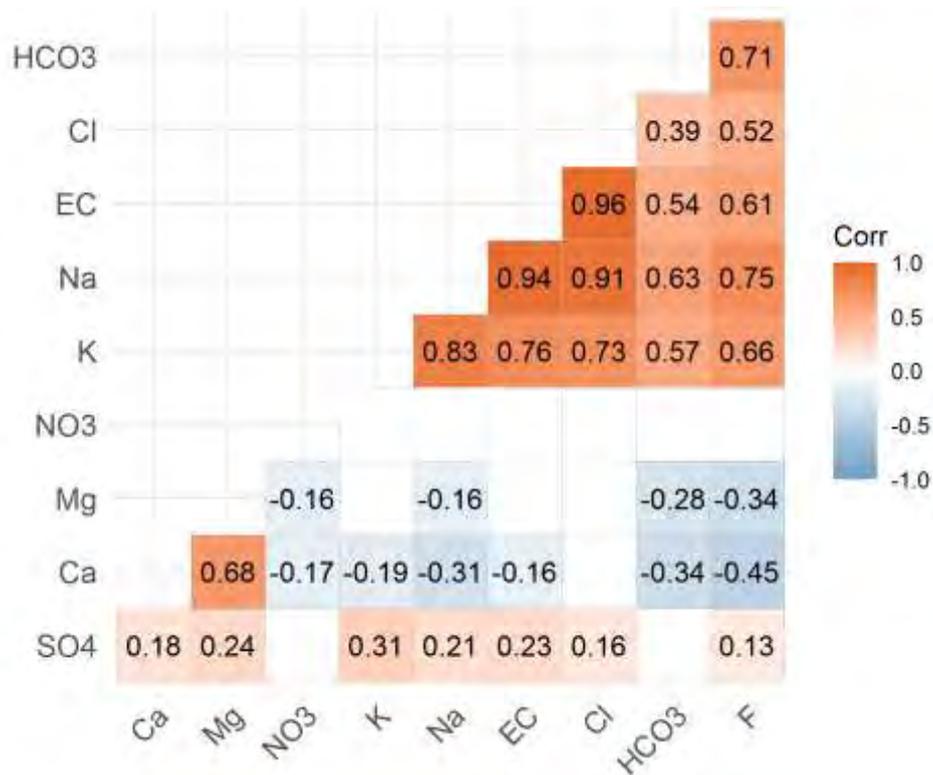
**Tableau 2 : Résumé statistique des paramètres chimiques de la nappe**

Paramètres	Total (N)	Moyenne	Ecart type	Minimum	Médiane	Maximum	Norme
CE	379	1770.8	1478.1	19	1196	6480	1500
Ca	382	27.28	27.64	0.4	19.1	250.8	75
Mg	377	13.74	17.03	0.23	9.7	175.9	30
Na	382	319.13	319.56	1.59	187.2	1453.8	200
K	380	10.8	9.03	0.13	9.4	39.56	12
Cl	382	361.38	444.22	0.6	121.95	2056.7	250
HCO <sub>3</sub>	381	295.23	136.89	2	305	768.7	300
SO <sub>4</sub>	377	71.48	77.01	0.03	56.3	656	250
NO <sub>3</sub>	218	7.5	21.15	0.02	2.1	181.90	50
F	252	1.13	1.16	0.02	0.63	4.49	1.5

### 3.1.2. Matrice de corrélation

La liaison existant entre toutes les variables prises deux à deux et les coefficients de corrélation entre ces différentes variables sont donnés par la matrice de corrélation (figure 10) qui peut aider à la compréhension des différents processus intervenant dans la minéralisation de la nappe maastrichtienne.

Il en ressort une corrélation significative entre CE/Cl (0.96), CE/Na (0.94) et Na/Cl (0.91). Cette forte corrélation entre CE et Na/Cl montre que la minéralisation des eaux de la nappe serait essentiellement contrôlée par ces paramètres. Il existe également, une bonne corrélation entre d'autres paramètres mais de moindre degré : Na/K (0.83) ; Na/F (0.75) ; HCO<sub>3</sub>/F (0.71) ; CE/F (0.61) ; CE/HCO<sub>3</sub> (0.54) ; Mg/Ca (0.68) ; Suggérant que ces ions contribuent aussi d'une certaine manière à la minéralisation de la nappe. Cependant il n'existe pas de corrélation significative entre les autres variables et le nitrate ; qui proviendrait d'une pollution ponctuelle au niveau des ouvrages (puits-forage ou forage puits)



**Figure 10: Matrice de corrélation entre les paramètres. Seules les coefficients de Pearson significatives (p-value <0,05) sont indiqués.**

### 3.1.3. Statistique multivariée

L'application de la méthode statistique multivariée (Analyse des Composantes Principales et la Classification Hiérarchique Ascendante) permet d'identifier les paramètres les plus pertinents qui décrivent la qualité des eaux souterraines et de montrer leur variabilité. Elle a pour but de comprendre les différentes corrélations qui existent entre les différentes variables, de choisir les différentes composantes, la contribution de chaque variable à la constitution des composantes principales et les différents mécanismes qui interviennent dans la minéralisation de la nappe.

#### 3.1.3.1. Analyse des composantes principales

Les ACP ont été réalisées sur les 10 variables (CE ; Na ; Mg ; Ca ; K ; SO<sub>4</sub> ; HCO<sub>3</sub> ; NO<sub>3</sub> ; F ; Cl) sur 382 observations. Elle synthétise et classe en nombre important de données afin d'en extraire les principaux facteurs qui sont à l'origine de l'évolution simultanée, des variables et de leur relation réciproque. Cette analyse a permis de calculer les valeurs propres, les variances exprimées pour chaque composante principale (CP) et leur cumul. Le tableau 3 suivant présente les valeurs propres, le pourcentage de variance ainsi que le pourcentage cumulé de la variance de l'ACP.

**Tableau 3 : variance et cumule de chaque paramètre physico-chimique**

	Valeur propre	% de Variance	% cumulé de la variance
1	4.79843	47.98%	47.98%
2	2.29443	22.94%	70.93%
3	1.06166	10.62%	81.55%
4	0.85921	8.59%	90.14%
5	0.41446	4.14%	94.28%
6	0.23832	2.38%	96.67%
7	0.20531	2.05%	98.72%
8	0.10891	1.09%	99.81%
9	0.01722	0.17%	99.98%
10	0.00204	0.02%	100.00%

Le critère de Kaiser qui considère le plus grand nombre de facteurs possibles en ne retenant que ceux aux valeurs propres supérieures à 1, montre que la variance peut être expliquée par trois composantes principales (CP). Ces dernières expriment 81.55% de la variance totale dont 47.98% pour CP1, 22.94% pour CP2 et enfin 10.62% pour CP3.

Le tableau 4 présente la contribution de chaque variable aux 3 composantes. Les valeurs en gras dans chaque colonne correspondent aux variables explicatives de chaque composante principale.

La projection des variables sur les composantes principales (Figure 11) montre que la composante principale 1 contrôle à elle seule 47.98% de la variance. Elle regroupe les variables telles que CE ; Na ; Cl ; K ; F ; HCO<sub>3</sub> qui contrôle la minéralisation de l'eau de la nappe maastrichtienne. Elle est constituée par deux sous-groupes qui dévoilent l'affinité entre CE ; Na ; F ; Cl et d'autre part HCO<sub>3</sub> ; K. La composante principale 2 (CP2) occupe 22.94% de la variance des observations et oppose le couple Ca/Mg au SO<sub>4</sub>. Le rassemblement de ces éléments traduit qu'ils seraient mis en solution par la dissolution et /ou l'hydrolyse de la roche encaissante ; c'est-à-dire une interaction eau/roche. Néanmoins la position de Ca-Mg dans le même axe et SO<sub>4</sub> dans l'autre axe explique que leurs mécanismes ne sont pas identiques. Le couple Ca/Mg est issu du lessivage des minéraux riches en calcite (CaCO<sub>3</sub>) ou de la dolomite CaMg (CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>. Tandis que le SO<sub>4</sub> peut provenir soit de la dissolution du gypse CaSO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O ou de l'eau de mer. La troisième composante (CP3) est composée par le nitrate (10.62%) qui est souvent un marqueur de pollution. Vu la profondeur de la nappe maastrichtienne, le nitrate peut provenir des micro-organismes ou de l'utilisation de certains pesticides. Une origine anthropique peut ne pas être exclue au niveau des zones de recharge de la nappe et au niveau Lac de Guiers.

Tableau 4: Composantes principales et variance explicative

Variabes	Coefficients de CP1	Coefficients de CP2	Coefficients de CP3
<i>CE</i>	<b>0.44833</b>	0.13216	0.08244
<i>HCO3</i>	<b>0.36984</b>	-0.16275	-0.01394
<i>Cl</i>	<b>0.43028</b>	0.16263	0.17158
<i>SO4</i>	0.05122	<b>0.35038</b>	-0.53431
<i>Ca</i>	-0.07974	<b>0.61553</b>	0.09125
<i>Mg</i>	-0.01472	<b>0.63231</b>	0.02511
<i>Na</i>	<b>0.46538</b>	0.03223	0.09876
<i>K</i>	0.26819	0.03944	-0.30041
<i>F</i>	<b>0.41699</b>	-0.14272	-0.21491
<i>NO3</i>	0.07413	0.07204	<b>0.72314</b>

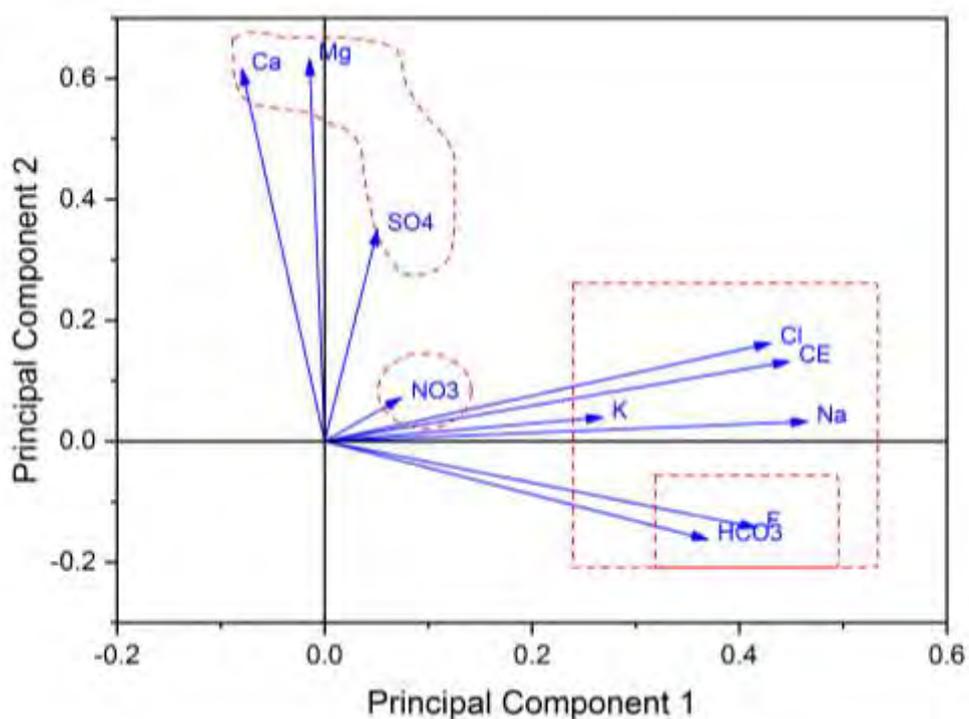
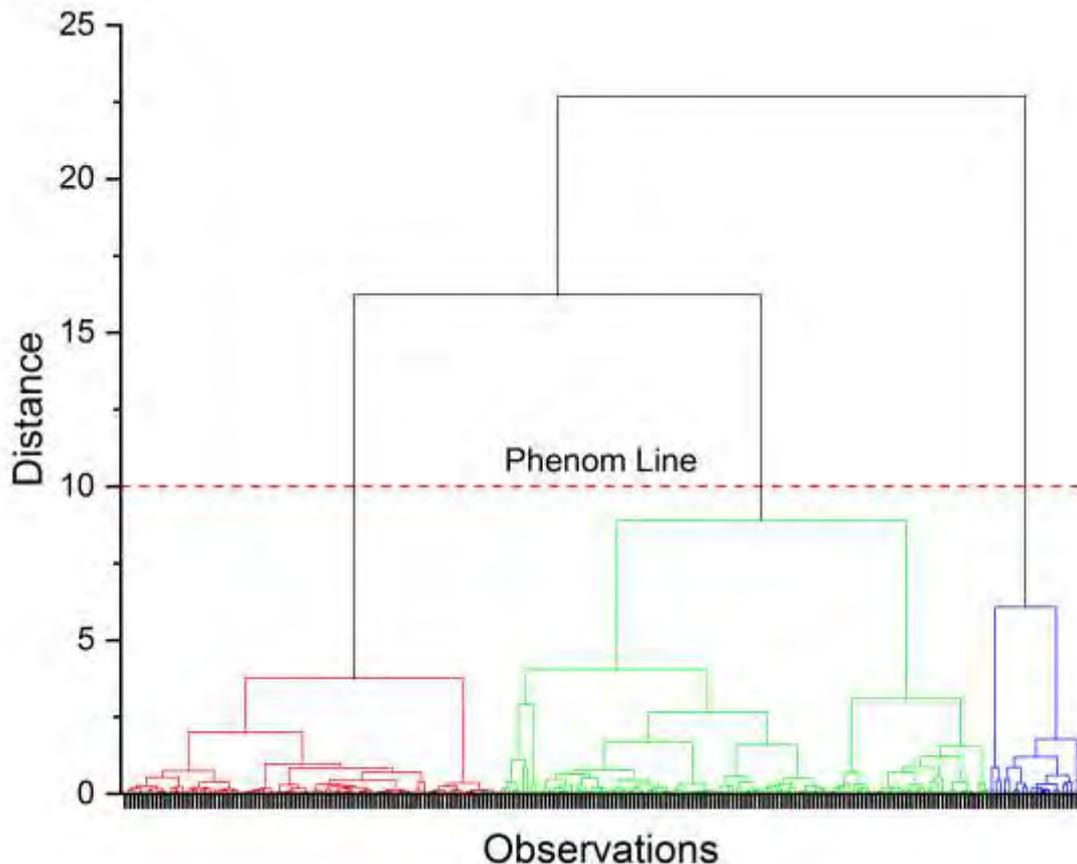


Figure 11: projection des deux premiers composants par ACP

### 3.1.3.2. Classification Hiérarchique Ascendante

L'analyse hiérarchique ascendante ou analyse hiérarchique en grappe est une technique basée sur la similarité ou non des éléments constituant la base de données analytiques. Le résultat est représenté sous forme de figure nommée dendrogramme. Le dendrogramme pour une faible distance d'agrégation de 10 a distingué trois groupes nommés Cluster 1, Cluster 2 et Cluster 3, avec C1/C2 qui sont liés à une plus grande distance (Figure 12).



**Figure 12: Identification des groupes dans le dendrogramme**

La caractérisation des Cluster a été effectuée à travers le diagramme de Piper pour identifier les faciès géochimiques (Figure 13) mais aussi à l'aide de Box-plot pour identifier l'occurrence des ions dans chaque Cluster (Figure 14) :

- C1 est caractérisé par une faible minéralisation (CE moyenne =  $465.57\mu\text{s/cm}$ ) et une dominance des ions Ca et Mg. Elle renferme pour la plupart des eaux très douces qui respectent les normes de l'OMS. Leur faciès est de type bicarbonaté calcique-magnésien (bicarbonaté mixte). Les bicarbonates proviendraient de la dissolution des calcaires du

Paléocène qui surmonte le Maastrichtien.

- C2 est caractérisé par des valeurs de conductivités moyennes de  $991.51 \mu\text{s}/\text{cm}$ . C'est un groupe formé par des eaux saumâtres, riche en Na, Cl,  $\text{HCO}_3$ , F et  $\text{SO}_4$ . Leur faciès est mixte-sodique (bicarbonaté/chloruré- sodique). Ce groupe se confond à C1 pour une plus grande distance d'agrégation ( $<15$ ). En effet, les processus de dissolution et/ou l'hydrolyse de la roche encaissante qui se produit au C1 serait accompagnée par d'autres processus tel que les réactions d'échange de bases dans C2.
- C3 présente une forte minéralisation (CE moyenne de  $3691 \mu\text{s}/\text{cm}$ ), regroupant les eaux salées caractérisées par de fortes teneurs en Fluor, potassium et Na/Cl. Il présente un faciès chloruré-sodique qui est typique des évaporites alcalines et alcalino-terreux. En outre, l'enrichissement en Na peut provenir non seulement des réactions d'échanges de bases, mais également de la dissolution de l'halite.

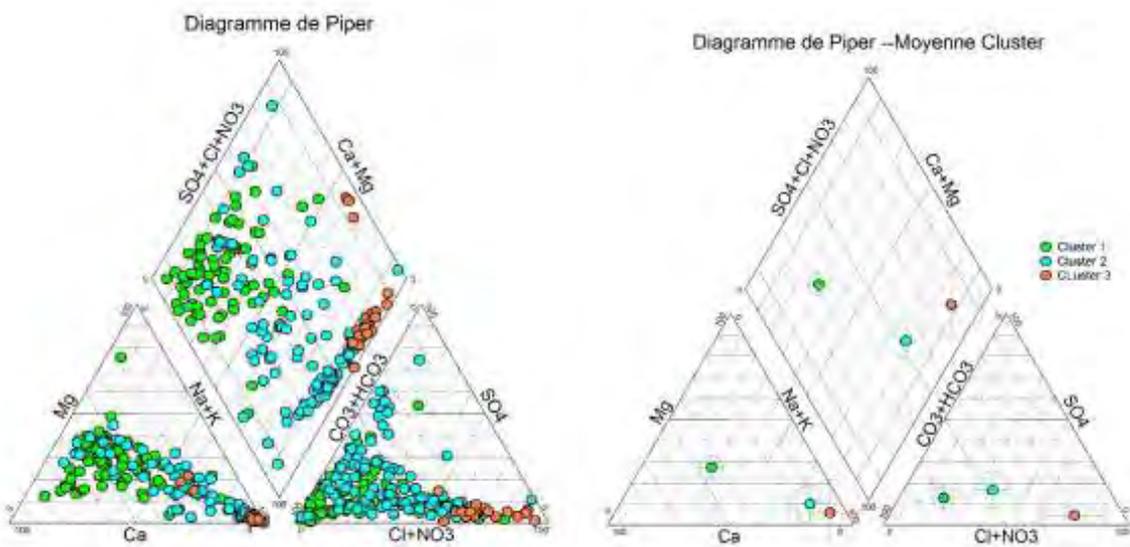


Figure 13: a) Piper de tous les échantillons en fonction des Clusters, (b) Piper de la composition chimique moyenne des Clusters (diamètre des cercles =  $\text{TDS} \times 10$ )

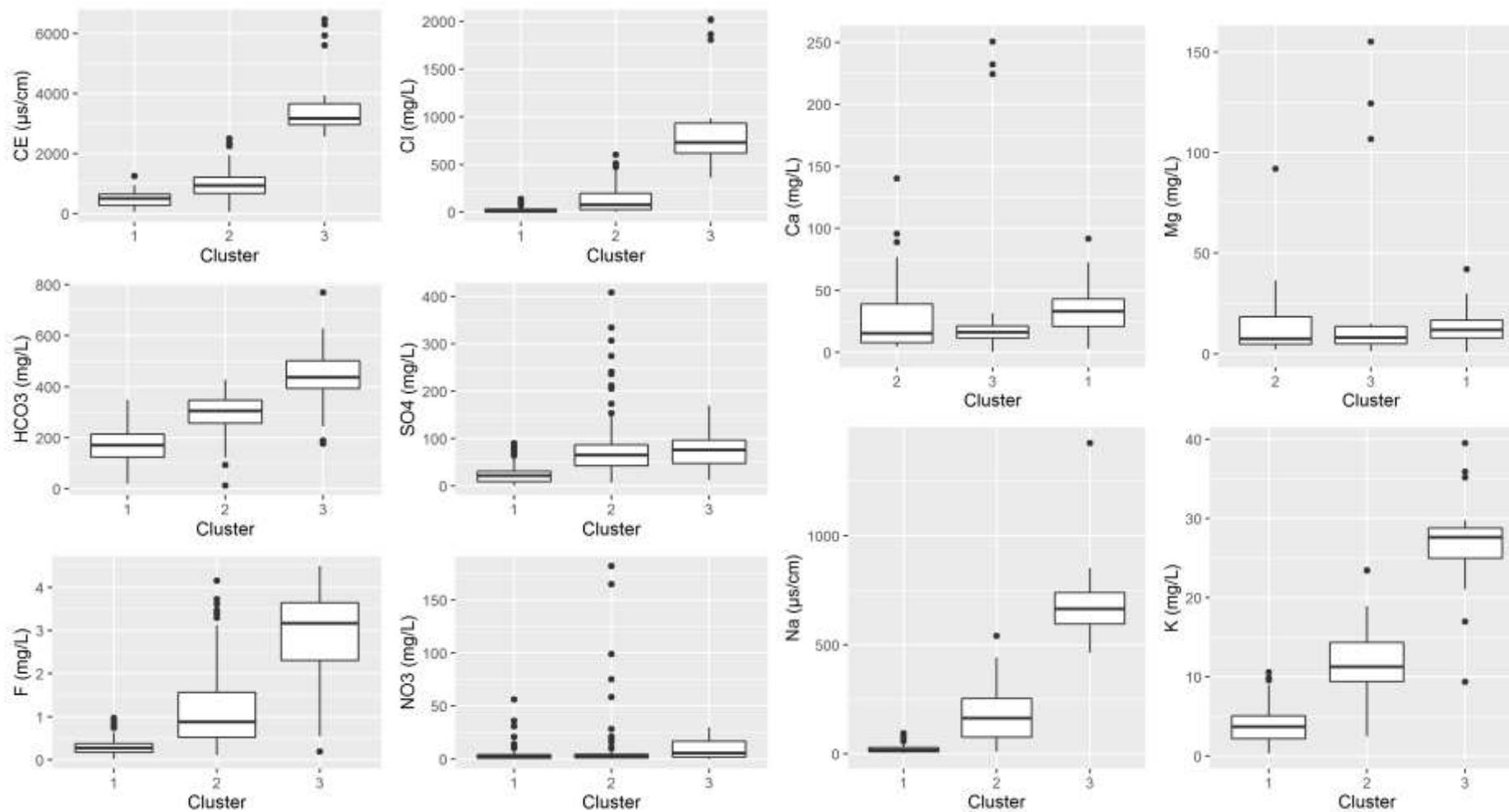


Figure 14: Box plot des paramètres physico-chimiques

### **3.2 Cartographie de la qualité de l'eau**

L'indice de qualité de l'eau (IQE) a été utilisé pour évaluer l'influence composite de chaque paramètre de qualité de l'eau sur la qualité globale de l'eau. Il consiste à résoudre une équation mathématique utilisée pour résumer un grand nombre de données en un seul format compréhensible. Afin d'évaluer la qualité de l'eau de la nappe maastrichtienne par les paramètres physico-chimiques (TDS ; Ca ; Mg ; Na ; K ; Cl ; HCO<sub>3</sub> ; SO<sub>4</sub> ; NO<sub>3</sub> ; F), 4 étapes ont été suivies, comme il a été souligné dans le chapitre méthodologie :

- La génération des couches (Raster) de distribution spatiale des paramètres par interpolation spatiale ;
- Attribution d'un poids à chaque paramètre en fonction de son importance relative dans la qualité globale de l'eau ainsi que leur normalisation ;
- Le calcul de la déviation des paramètres par rapport aux normes, par un indice Q ;
- La génération de la carte spatiale d'IQE par combinaison spatiale (ou superposition) des indices Q.

#### **3.2.1. Interpolation et distribution spatiale des éléments chimiques**

La spatialisation des données chimiques a été faite en utilisant la méthode de Krigeage pour tous les éléments chimiques excepté les Nitrates (NO<sub>3</sub>) et les potassiums (K) qui ne sont pas adaptés à cette méthode. Ainsi, la méthode d'IWD a été utilisée pour ces derniers. Concernant le Krigeage, différents types de modèles de semi-variogrammes (stable, gaussien, sphérique, exponentiel et circulaire) utilisant le krigeage simple ou ordinaire, ont été examinés pour chaque paramètre afin d'obtenir le modèle le plus approprié. Les performances productives des modèles adaptés ont été vérifiées sur la base de tests de validation croisée. Les valeurs de l'erreur moyenne (Mean Error) et de l'erreur quadratique moyenne (Root Mean Square) ont été estimées pour vérifier les performances du modèle adopté (tableau 5).

**Tableau 5: Modèle d'interpolation des éléments chimiques**

<b>Paramètres</b>	<b>Méthode</b>	<b>Meilleur model</b>	<b>Erreur moyenne</b>	<b>Erreur moyenne quadrique</b>
TDS	Krigeage Ordinaire	Stable	-2.10	596
Ca	Krigeage Ordinaire	Stable	-0.10	20.66
Mg	Krigeage Ordinaire	Stable	-0.35	15.17
Na	Krigeage Ordinaire	Stable	0.46	105.23
K	IDW	-	0.037	8.67
Cl	Krigeage Ordinaire	Stable	0.42	205.02
SO4	Krigeage simple	Gaussien	0.41	61.06
HCO3	Krigeage Ordinaire	Stable	0.78	84
F	Krigeage Ordinaire	Stable	-0.31	9.15
NO3	IDW	-	0.92	22.57

La distribution spatiale des paramètres physico-chimiques de la nappe maastrichtienne, classifié en fonction des normes de l'OMS (figure 15 et 16) montre que :

- La Partie occidentale du bassin (Horst de Diass) est formée par des eaux faiblement minéralisé. Ces eaux douces présentent des paramètres physico-chimiques (TDS ; Ca ; Mg ; Na ; K ; Cl ; HCO3 ; SO4 ; NO3 ; F) qui respectent les normes prescrits par l'OMS. Néanmoins la minéralisation augmente de plus en plus que l'on se rapproche d'une bande centrale de direction Nord-Sud, communément appelé la bande centrale salée.
- La bande centrale salée comme son nom l'indique est une zone à forte charge minérale. Elle est formée par des eaux saumâtres à salées avec des teneurs en ions majeurs qui dépassent largement les normes OMS. Cette forte minéralisation est due à la présence excessive de chlorure de sodium, de fluor, de bicarbonate et de potassium, mais également fortes teneurs en Ca et Mg au Nord.

- La partie centrale est une zone à cheval entre la bande salée et la partie orientale du bassin sédimentaire. Elle est caractérisée par une eau moyennement minéralisée mais qui respecte les normes à l'exception du sulfate qui présente de fortes teneurs dans certaines zones du Ferlo. La minéralisation continue de diminuer graduellement vers l'Est où l'on retrouve des eaux très douces à l'instar de la partie occidentale.

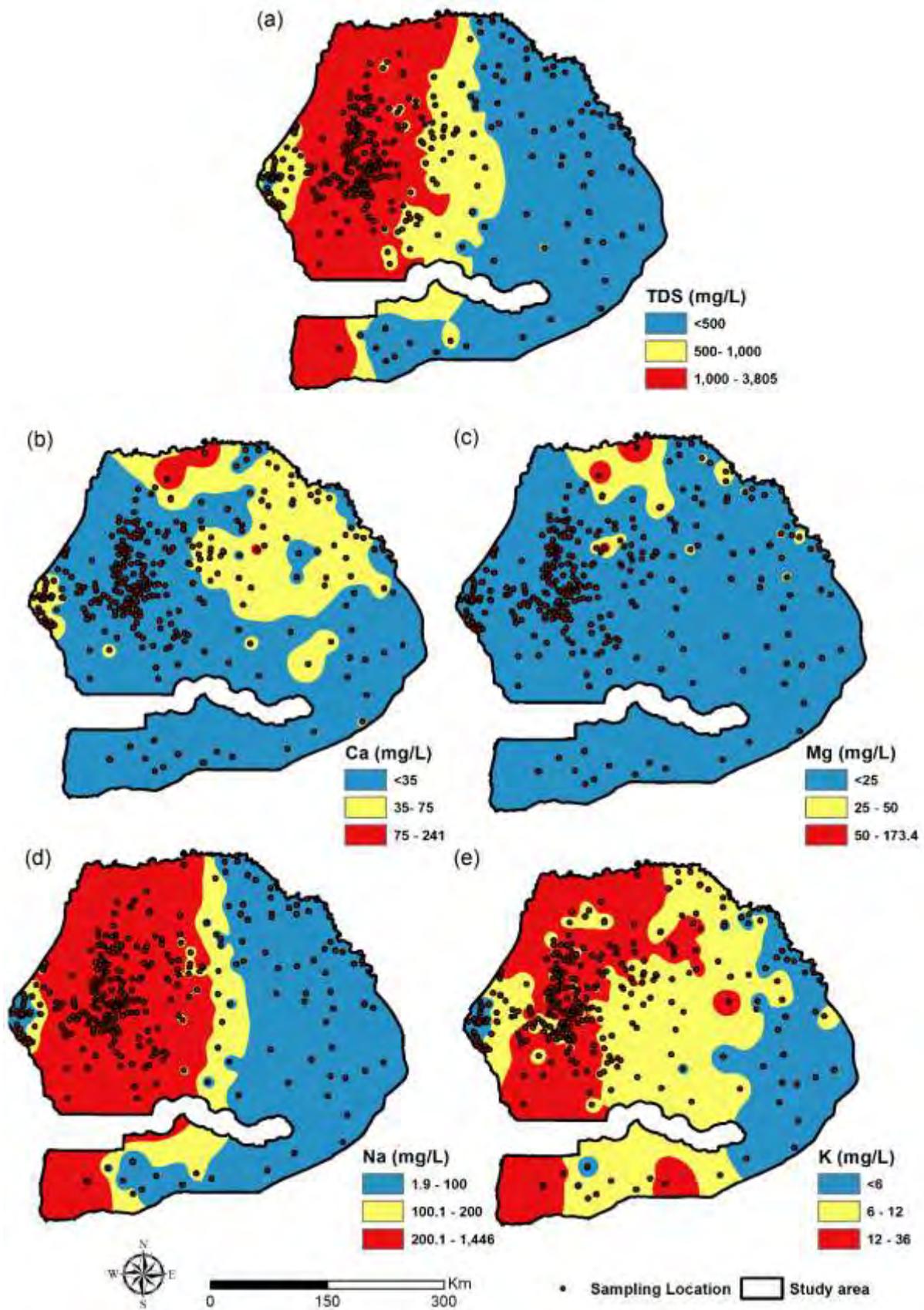


Figure 15: Répartition spatiale du TDS et des cations

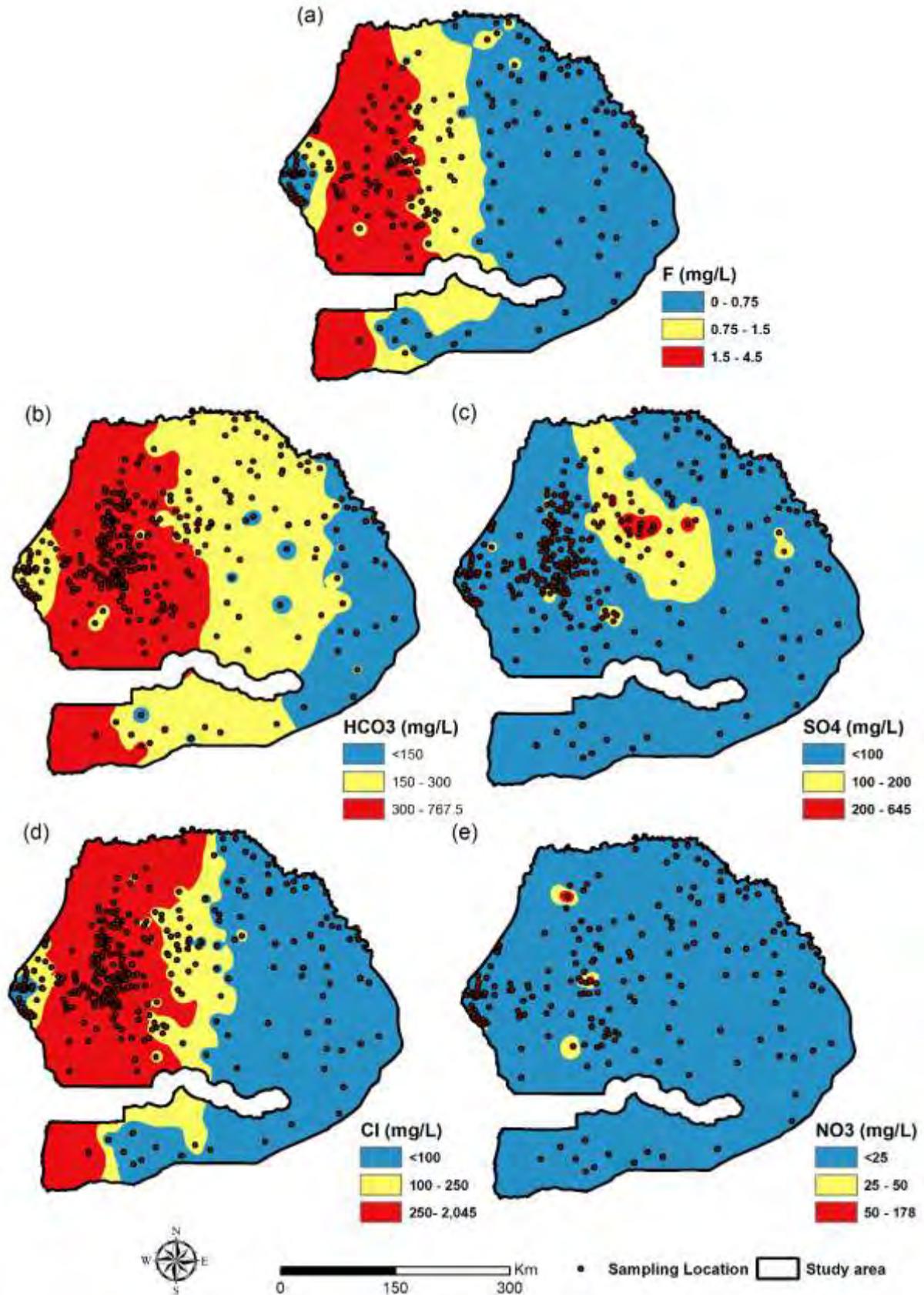


Figure 16: Répartition spatiale des anions

### 3.2.2. Pondération des critères et normalisation

A chaque paramètre est attribué un poids relatif. Ce dernier reflète son importance relative dans la qualité globale de l'eau potable. Un poids maximum de 5 a été attribué au Fluor et Nitrate qui sont considérés comme les éléments les plus nocifs, suivis de 4 attribué à CE ; Cl ; Na et F, en raison de leur importance dans l'évaluation de la qualité l'eau. Le poids de Ca ; Mg ; SO4 ; K est de 2 car leur excès peut être légèrement toléré dans l'eau de consommation. En fin, le bicarbonate est l'élément le plus toléré avec un poids de 1 indiquant que l'excès de bicarbonatés dans l'eau n'est pas un grand danger.

Le tableau 6 présente le poids absolu de paramètre, normalisé grâce à la formule suivante ;

$$Wi = \frac{wi}{\sum_1^n wi}$$

Avec : **Wi** est le poids relatif et **w<sub>i</sub>** est le poids de chaque paramètre et **n** est le nombre de paramètre.

**Tableau 6: Pondération des paramètres**

Paramètres	Norme OMS	Poids	Wi
CE	1500	4	0.13
HCO3	300	1	0.03
Cl	250	4	0.13
SO4	250	2	0.06
Ca	75	2	0.06
Mg	50	2	0.06
Na	200	4	0.13
K	12	2	0.06
F	1.5	5	0.16
NO3	50	5	0.16
	TOTAL	31	1

### 3.2.3. Calcul de la déviation des paramètres par rapport à la norme (Q)

Il s'agit d'une échelle d'évaluation de la qualité qui consiste à calculer le rapport entre la concentration de chaque paramètre chimique et sa norme OMS. La carte matricielle de distribution de chaque élément chimique a été utilisée à cet effet, en divisant la valeur de chaque élément (dans chaque maille) par la norme OMS dans un environnement SIG (« Raster Calculator ») en utilisant la formule suivant :

$$Q_i = \frac{C_i}{S_i} \times 100$$

Avec :  $C_i$  la concentration de l'éléments chimique  $i$  et  $S_i$  la norme OMS de l'élément  $i$  en mg/l.

### 3.2.4. Combinaison des critères et classification des IQE

Afin de générer la carte de l'indice de qualité des eaux de la nappe maastrichtienne en considérant les paramètres chimiques cités dans les sections précédentes, la méthode d'agrégation pondérée a été utilisée sous un environnement SIG (Weighted Sum) à travers la formule suivante :

$$IQE = \sum_{i=1}^{i=n} Q_i \times W_i$$

Où **IQE** désigne la valeur de l'indice pondérée (carte matricielle du taux d'adéquation de l'IQE) ; **Q<sub>i</sub>** l'échelle d'évaluation de la qualité des facteurs  $i$  ; **W<sub>i</sub>** le score de critère des facteurs  $i$  (poids normalisé de  $i$ ).

La carte IQE générée à travers cette formule, a été reclassifiée suivant les ordres de grandeur est présenté dans le tableau 7.

*Tableau 7: Classification des eaux selon leur indice de qualité*

Indices de qualité de l'eau	Type d'eau
<25	Excellente
25-50	Bonne
50-75	acceptable
75-100	mauvaise
>100	Très mauvaise à Inapte

La carte de distribution spatiale d'IQE est présentée sur la figure 17. La répartition des indices révèle que la majeure partie (54,3 % de la superficie totale de la nappe) de l'eau de la nappe est potable. Elle respecte tous les critères chimiques définis par l'OMS pour une eau de boisson. En effet on trouve une eau d'excellente qualité au niveau du horst de Diass et dans la zone Est du bassin (24,9 %). Il s'en suit des eaux de bonne qualité (29,3 %) de part et d'autre de la bande salée et dans une partie de la bordure du socle. Cependant au niveau de la bande salée la minéralisation est très importante avec des valeurs de conductivité, de Na-Cl et de Fluor qui dépassent largement les normes. En conséquent, cette zone renferme des eaux impropres pour la consommation (20 % de la superficie totale), circonscrit de part et d'autre par des eaux de qualité acceptable représentant 11,7 % de la superficie total et de qualité mauvaise (14%) inapte à la consommation.

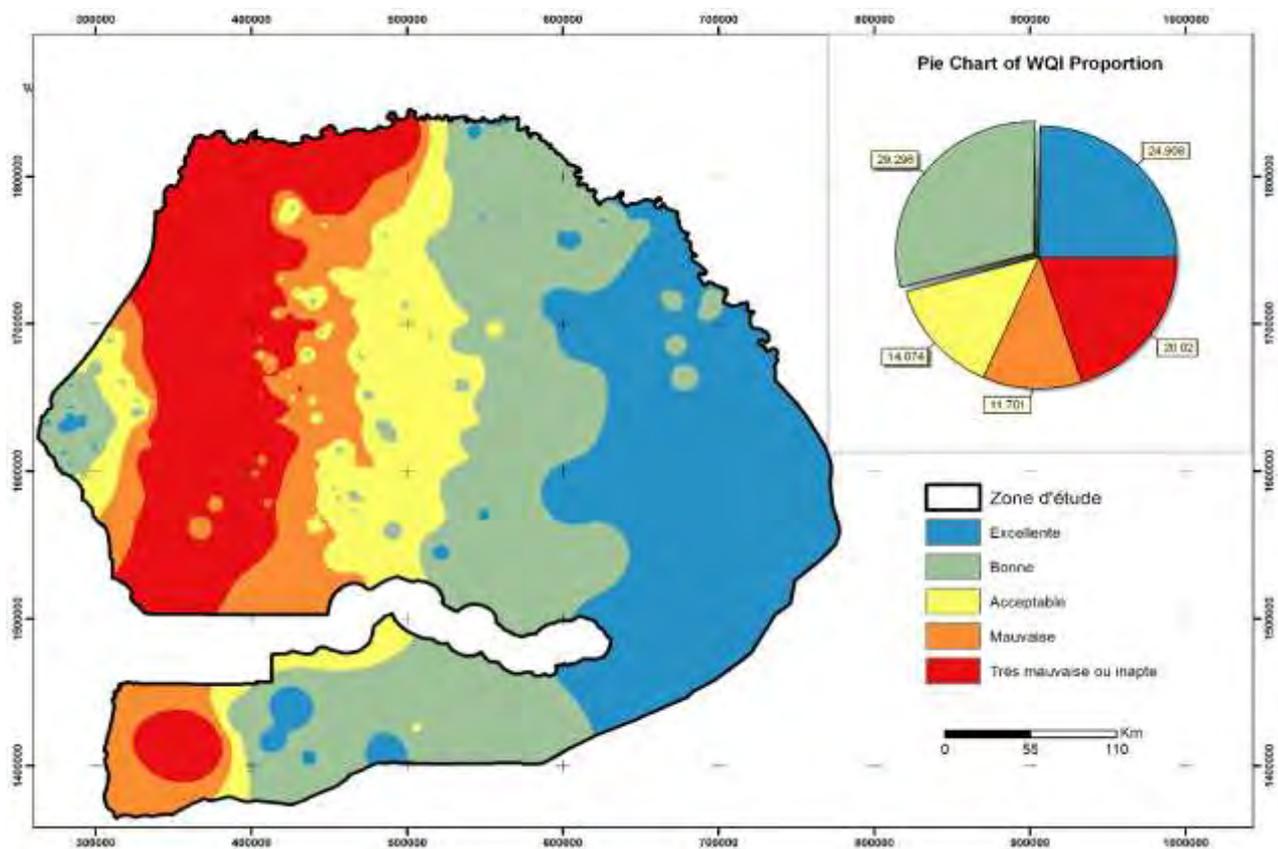


Figure 17: Distribution spatiale de l'IQE de la nappe maastrichtienne

## CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Cette étude sur la nappe maastrichtienne a permis une réactualisation des connaissances hydrochimiques à l'échelle régionale par l'utilisation des outils statistiques et cartographique sur un réseau qui couvre l'ensemble du territoire sénégalais.

L'analyse statistique descriptif des paramètres chimiques analysés révèle des eaux douces à saumâtres avec des valeurs de conductivité variant entre 19 et 6480  $\mu\text{s/cm}$  avec une moyenne de 1770.10  $\mu\text{s/cm}$ . Ces eaux sont caractérisées par des teneurs moyennes en ions chimiques inférieurs aux normes de l'OMS pour la plupart à l'exception du Na ; Cl ; CE et du F qui sont surtout présentes dans la bande centrale salée. La corrélation entre les différents paramètres physicochimiques révèle que la conductivité électrique est fortement corrélée avec le Na, et Cl, suggérant que la minéralisation des eaux est essentiellement contrôlée par ces deux ions. Il existe également, une bonne corrélation entre d'autres paramètres mais de moindre degré entre CE, F, Na, K,  $\text{HCO}_3$  d'une part et Ca/Mg d'autre part, Suggérant que ces ions contribuent aussi d'une certaine manière à la minéralisation de la nappe. L'analyse statistique multivariée par l'ACP montre des processus d'interaction eaux/roches à travers la dissolution des minéraux carbonatés et/ou sulfatés ainsi que l'échange de base, et dans une moindre mesure la pollution anthropique essentiellement contrôlée par le  $\text{NO}_3$ . Le dendrogramme couplé au box plot et au diagramme de Piper définit 3 groupes (Clusters) où C1 est caractérisé par des eaux douces de faciès mixte  $\text{HCO}_3$ , C2 par des eaux saumâtres de faciès mixte-sodique, enfin C3 par des eaux salées fortement minéralisées de faciès chloruré sodique très riche en F, Na et Cl. La distribution spatiale de l'IQE identifie des eaux de mauvaise à très mauvaise qualité représentant environ 31%, des eaux impropres (eaux saumâtres) de la superficie totale localisée dans la bande centrale salée. Cette dernière est circonscrite par des eaux acceptables occupant 14% de la superficie totale du Sénégal. Cependant les eaux de bonne à excellente qualité représentent respectivement 24.9% et 29.3% situés dans la partie occidentale (Horst de Diass) et orientale du bassin. L'aquifère maastrichtien renferme ainsi une importante ressource d'eau de bonne qualité représentant plus de 54.3 % de sa superficie au Sénégal.

Au terme de cette étude, il nous est agréable de formuler les présentes recommandations :

- Faire l'inventaire de tous les ouvrages captant la nappe maastrichtienne sur toute l'étendue du territoire et redimensionner le suivi de cette nappe à travers un réseau optimal.
- La carte de l'indice de qualité de l'eau peut être utilisée comme un outil de référence pour l'identification de nouvelle zone de potentialité d'eau de bonne qualité sur toute l'étendue du territoire. Ainsi, il est recommandé de produire des cartes IQE à travers des données chimiques réactualisées qui prendraient même en compte d'autres paramètres physico-chimiques comme le Fer, ou bactériologiques etc.
- Installer des centres de traitements chimiques dans les zones de mauvaise qualité d'eau (bande centrale salée). Ce traitement permettra d'obtenir de l'eau douce à partir de l'eau saumâtre ou salée. En effet, c'est un processus qui est souvent rentable, car lorsqu'on combine la production d'eau douce avec d'autres activités, notamment la production d'énergie, la vapeur disponible à la sortie des turbines, et perdue dans une usine classique, est réutilisable dans une station de traitement dite thermique ou fonctionnant sur le principe de l'évaporation.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

- Audibert. M. (1962).** Hydrogéologie de la nappe maastrichtienne du Sénégal. Rapport BRGM, Dak 62-A14, 99p.
- Bah.A. (2017).** Problématique de la qualité physico-chimique des eaux souterraines des nappes du continental terminal et du maastrichtien dans les régions de Kaolack et Fatick, Memo D.E.A, 92p.
- Bellion. Y.J.C. (1987).** Histoire géodynamique post-paléozoïque de l’Afrique de l’Ouest d’après l’étude de quelques bassins sédimentaires (Sénégal, Taoudéni, Tullemmeden, Tchad). Thèse Sciences, Univ. d’Avignon et des pays du Vaucluse, 296p.
- Bellion Y. et Guiraud R. (1984).** Le bassin sédimentaire du Sénégal. Synthèse des connaissances actuelles. BRGM et DMG (édit.). In : Plan Minéral de la République du Sénégal, volume 1, p. 4-63.
- Castelain J. (1965).** Aperçu stratigraphique et micropaléontologique du bassin du Sénégal occidental. Historique de la découverte paléontologique. In : « Colloque International de Micropaléontologie » (Dakar). Mémoire BRGM, 32, p. 135-159.
- Degallier. R. (1962).** Possibilité de la nappe maastrichtienne au Sénégal. Rapport BRGM, Dak 62-A11, 25p.
- DGPRES. (2017).** Gestion intégrée et durable des systèmes aquifères et des bassins partagés de la région du sahel:bassin sénégal-mauritanien.
- DGPRES. (2018).** Table ronde de réflexion sur la collaboration transfrontalière autour du Bassin Sédimentaire Sénégal-Mauritanien (BSSM).
- DGPRES. (2019).** Rapport d’activités annuel.
- DGPRES. (2019).** Projet d’alimentation des services d’eau potable et d’assainissement en milieu rural:Atlas de l’eau du Sénégal.
- DGPRES. (2020).** RNB Rapport de synthèse des investigations hydrogéologique et hydrochimique:Etude hydrogéologique complémentaire du littoral Nord.
- Diagana.A. (1994).** Etude hydrogéologique dans la vallée du fleuve sénégal de bakel à podor:relations eaux de surface/eaux souterraines.Thèse de doctorat cycle Univ. C. A. DIOP de Dakar, 177p. et annexes.
- Diédhiou.M. (2003).** Synthèse hydrogéologique de la nappe du maastrichtien .Analyse critique des données de paramètres hydrodynamiques, Mem D.E.A, 128p.
- Doumouya. J. (1988).** Synthèse des propriétés de réservoir, des électrofaciès et des faciès

sédimentologiques de l'aquifère maestrichtienne: établissement d'un outil d'équivalence. Thèse de doctorat de jema cycle Univ. C. A. DIOP de Dakar, 126p. et annexes.

**El Fadel, M., Tomaszikiewicz, M., Adra, Y., Sadek, S., Abou Najm, M. (2013).** GIS-based assessment for the development of a groundwater quality index towards sustainable management .Water Retour Manage, 17p.

**Emvoutou, C.H. (2018).** Fonctionnement hydrodynamique du bassin sédimentaire côtier dans la VILLE de Douala/Cameroun/ : apport des outils géochimiques, géostatiques et isotopiques. Thèse de Doctorat en Cotutelle (Spécialité hydrogéologie), 389 p. Université Cheikh Anta Diop de Dakar, Faculté des Sciences et Techniques, département de géologie

**Faye.A. (1983).** Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique du horst de Ndiass et de ses environs (Sénégal occidental). Thèse 3ème cycle Univ. Dakar. 160p.

**Faye. A. (1994).** Recharge et paléorecharge des aquifères profonds du bassin du Sénégal. Apport des isotopes stables et radioactifs de l'environnement et implication paléohydrologique et paléoclimatique. Docteur es-sciences Thèse de doctorat Dépt de Géologie, Fac. des Scien. et Techn., Univ. C.A.Diop de Dakar, 210p.

**GEOSEN. (2009).** Cartographie géologique du bassin sédimentaire sénégalais. <https://www.geosen.org/>

**Gladima. S. A.S. (1997).** Utilisation des méthodes géophysiques pour la caractérisation de la nappe maestrichtienne du Sénégal, Thèse doctorat 3ème cycle, Dépt de Géologie, Fac. des Scien. et Techn., Univ. C.A.Diop de Dakar. 117p.

**Gnanachandrasamy, G., Dushiyanthan, C., Kajakumar, T.J0, Zhou, Y. (2018).** Assessment of hydrogeochemical characteristics of groundwater in the lower vellar river basin: using geographical information system (gis) and water quality index (wqi) .Environment, Development and sustanaibility. <https://doi.org/10.1007/s10668-018-0219-7>

**Herojeet, R., Rishi, M. S., Lata, R., & Sharma, R. (2016).** Application of environmetrics statistical models and water quality index for groundwater quality characterization of alluvial aquifer of Nalagarh Valley, Himachal Pradesh, India. Sustainable Water Resources Management, 2(1), 39-53.

**Huag, T., Zhao, J., Elubid, B.A., Abass, W., Ahmed, E.H., Elhag, K.M., Babiker.M.M. (2019).** Geospatial distributions of groundwater quality in gedaref state using geographic information system (gis) and drinking water quality index (dwqi). International Research and Public Health. [www.mdpi.com/journal/ijerph](http://www.mdpi.com/journal/ijerph)

- Jhariya, D.C., Kumar, T., Dewangan, R., Pal, D., Dewangan, P.K. (2017).** Assesment of groundwater index of drinking purpose in the durg district, Chhanttisgarh using geographical information system (gis) and multi-criteria decision analysis (mcda) techniques. Journal Geological Society of India. Vol 89, pp 453-459
- Karakus, C.B. (2018).** Evaluation of groundwater quality in Sivas province (Turkey) using water quality index and gis-based analytic hierarchy process. International Journal of Environmental Health Research. <https://doi.org/10.1080/09603123.2018.1551521>
- Kawo, N.S and Karuppanan, S. (2018).** Groundwater quality assessment using water quality assessment using water quality index and gis techiques in Modjo river basin, central Ethiopia .Journal of African Earth Sciences, 44p
- Latil-Brun M. (1987).** Subsidence et évolution thermique du bassin du Sénégal. Comparaison avec la marge divergente homologue est américaine et les marges transformantes de Côte d'Ivoire et des Guyanes. Thèse Doctorat ès Sciences, Université d'Aix-Marseille III : 200 p.
- Latil-Brun M. V. et Flicoteaux R. (1986).** Subsidence de la marge sénégalaise, ses relations avec la structure de la croûte. Comparaison avec la marge conjuguée américaine au niveau du Blake Plateau. Bulletin des Centres de Recherche Exploration - Production Elf Aquitaine, 10 : 69-82.
- Le Priol.J., Dieng B. (1985).** Synthèse hydrogéologique du Sénégal (1984-1985). Etude géologique structurale par photo-interprétation. Géométrie et limites des aquifères souterrains. *Doc. Ministère de l'Hydraulique*, 01/85/MH/DEH, 77p.
- Liger.J.L. (1980).** Structure profonde du bassin sénégal-mauritanien. Interprétation des données gravimétriques et magnétiques. Travaux des Laboratoires des Sciences de la Terre, Saint - Jérôme Marseille, série B, 16 : 1-158
- Lin, W.X., Li, X.D., Shen, Z.G., Wang, D.C., Wai, O.W.H., Li, S.Y. (2003).**Multivariate statistical study of heavy metal enrichment in sediments of the Pearl River Estuary. Environ Pollut 121(3):377–388. [doi:10.1016/S0269-7491\(02\)00234-8](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(02)00234-8)
- Madioune. D .H. (2012).** Etude hydrogéologique du système aquifère du horst de Diass en condition d'exploitation intensive : apport des techniques de télédétection, modélisation et géochimie isotopique. Thèse Doctorat Université Liège.
- Ndiaye, M., (2012).** Sismostratigraphie du bassinSénégal-Mauritanien dans les régions de Thies et Diourbel. PHD thesis. In: Terre et Environnement, vol. 112. Univ. Geneve, p. 175
- Niang.M.F(1995).** Interprétation de données géophysiques sur la structure profonde du bassin

sédimentaire Sénégalais et sur la zone du socle au Sénégal oriental. Thèse doctorat 3ème cycle, Dépt de Géologie, Fac. des Scien. et Techn., Univ. C.A. Diop de Dakar

**Ndiaye .N.A(2013)**. Caractérisation hydrochimique de la bande centrale salée de la nappe profonde du maastrichtien dans la zone nord du bassin arachidier, Mem D.E.A, 65p.

**OMS(2017)**. Water sanitation health. <https://www.who.int>

**PAGIRE-BA(2013)**. Etudes hydrogéologiques pour l'évaluation des potentialités des ressources en eau des zones favorables en vue d'un transfert d'eau vers la zone du Bassin Arachidier.

**Pires, J.C.M., Pereira, M.C., Alvim-Ferraz, M.C.M., Martins, F.G. (2009)**. Identification of redundant air quality measurements through the use of principal component analysis. Atmos Environ 43:3837–3842

**Prisca.J.A.A. (2020)**. Evaluation de la qualité physicochimique des eaux souterraines de la région de Marahoué (Centre ouest de la Côte d'Ivoire) Memo, 47p.

**Reghunath, R., Murthy, T.R.S, Raghavan, B.R. (2002)**. The utility of multivariate statistical techniques in hydro-geochemical studies: an example from Karnataka, India. Water Res 36:2437–2442

**Ritz M. et Flicoteaux R. (1985)**. Prospection tellurique à travers le bassin méso-cénozoïque sénégalais. Bulletin de la Société Géologique de France, 6 : 891-899.

**Sadat-Noori, S.M., Ebrahimi, K., Liaghat, A.M. (2013)**. Groundwater quality assessment using the water quality index and GIS in Saveh-Nobaran aquifer, Iran. Environ Earth Sci, 71, 3827-3843.

**Sarr, R. (1995)**. Etude biostratigraphique et paléoenvironnementale des séries d'âge Crétacé Terminal à Eocène moyen du Sénégal occidental. Systématique et migration des ostracodes. Thèse d'Etat Univ. C.A. Diop de Dakar, 335p.

**Sarr.R. (2019)**. Géologie des bassins sédimentaires du Sénégal. Univ.C.A. DIOP de Dakar, 68p

**Seck .M. (2002)**. Caractérisation hydrochimique et hydrodynamique de la nappe profonde maastrichtienne dans la zone du ferlo, Mem D.E.A, 105p

**Selvam, S., Manimaran, G., Sivasubramanian, P., Balasubramanian, N., Seshunarayana, T. (2013)**. GIS-based evaluation of water quality index of groundwater resources around Tuticorin coastal city, South India. Environ Earth Sci, 13, 2662-2665

**SGPRE & COWI. (2001)**. Etude hydrogéologique de la nappe profonde du Maastrichtien : Service de Gestion et de Planification des Ressources en Eau (SGPRE) Groupement Cowi

- Shrestha, S., Kazama, F. (2007).** Assessment of surface water quality using multivariate statistical techniques: a case study of the Fuji river basin, Japan. *Environ Model Softw*
- Simeonov, V., Simeonova, P., Tsitouridou, R. (2004).** Chemometric quality assessment of surface waters: two case studies. *Ecol Chem Eng* 11:449–469
- Singh, K.P., Malik, A.D., Mohan, S., Sinha, S. (2004).** Multivariate statistical techniques for the evaluation of spatial and temporal variations in water quality of Gomti River (India)—a case study. *Water Res* 38(18):3980–3992
- Travi. Y. (1988).** Hydrogéochimie et hydrogéologie des aquifères fluorés du bassin du Sénégal. Origine et conditions de transport du fluor dans les eaux souterraines. Thèse Sciences. Univ. de Paris Sud (Orsay). 190p.
- Tiyagi, S., Sharma, B., Singh, P., Dobhal, R. (2013).** Water quality assessment interns of water quality index. *American Journal of Water Ressources*, 3, 34-38
- Verma, P., Singh, P.K., Sinha, R.R., Tiwari, A.K. (2020).** Assesement of groundwater quality status by using water quality index (wqi) and geographic information systeme (gis) approches : a case study of the bokaro district, India. *Applied water science* <https://doi.org/10.1007/s13201-019-1088-4>
- Vieira, J.S., Pires, J.C.M., Martins, F.G., Vilar, V.J.P., Boaventura, R.A.R., Botelho, C.M.S. (2012).** Surface water quality assessment of Lis River using multivariate statistical methods. *Water Air Soil Pollut* [doi:10.1007/s11270-012-1267-5](https://doi.org/10.1007/s11270-012-1267-5)