

TABLE DES MATIÈRES

Dédicaces	i
Remerciements :	ii
Résumé.....	iii
TABLE DES MATIÈRES	iv
Liste des figures	vi
Liste des tableaux	vii
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 1 : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE ET DE LA SOCIETE GCO	2
1.1 CADRE GEOGRAPHIQUE :	2
1.1.1 Situation géographique.....	2
1.1.2 Le climat	2
1.1.2.1 Températures	3
1.1.2.2 Pluviométrie :.....	3
1.2 CADRE GEOMORPHOLOGIQUE	4
1.2.1 Géomorphologie des Formations du littoral ⁴	4
1.2.1.1 Le système dunaire interne ancien	4
1.2.1.2 Le système dunaire ogolien intermédiaire	5
1.2.1.3 Le système dunaire externe du littoral.....	5
1.2.2 Morphologie des dépressions sableuses.....	6
1.2.3 Végétation	8
1.3 CADRE GEOLOGIQUE	8
1.3.1 Localisation.....	8
1.3.2 Stratigraphie des formations dans le secteur	9
1.3.2.1 Le Crétacé	9
1.3.2.2 Le Paléocène	10
1.3.2.3 L'Eocène	10
1.3.2.4 La Formation du Saloum.....	10
1.3.2.5 Le Quaternaire	11
1.4 CADRE HYDROGEOLOGIQUE	12
1.4.1 Zones hydrogéologiques	12
1.4.1.1 Ensemble aquifère supérieur.....	15
1.4.1.1.1 Aquifère des sables Quaternaire + CT (Formation du Saloum).....	15
1.4.1.1.2 Aquifère des calcaires lutétiens.	17
1.4.1.2 Ensemble aquifère inférieur (nappe maestrichtienne)	17
1.5 PRESENTATION DE LA SOCIETE GCO	19

1.5.1	Limites du permis d'exploitation	19
1.5.2	Les partenaires	20
1.5.3	Les installations du projet	21
Chapitre 2 : MATERIELS ET METHODOLOGIE		22
Introduction		22
2.1	Collecte des données	22
2.1.1	Choix des ouvrages	22
2.1.2	Protocole d'échantillonnage	23
2.2	Traitement des données	26
2.2.1	Contrôle de la qualité des données	26
2.2.2	Méthode de traitement	26
2.2.2.1	Méthodes d'analyse graphique	27
2.2.2.1.1	Les diagrammes binaires	28
2.2.2.1.2	Les rapports caractéristiques	28
2.2.2.2	Le diagramme de Piper	28
2.2.2.3	Le diagramme de Stiff	29
2.2.2.4	Analyses statistiques multivariées	29
CHAPITRE 3 : PROCESSUS D'EXPLOITATION		31
3.1	Le circuit d'exploitation	31
3.2	Les besoins en eau de la mine	38
3.2.1	Importance de l'eau dans la mine	38
3.2.2	Sources d'approvisionnement en eau de la mine	38
3.2.2.1	Les forages superficiels	38
3.2.2.2	Les forages profonds	38
CHAPITRE 4 : RESULTATS ET DISCUSSION		40
4.1	Effets de l'exploitation minière sur la nappe superficielle	40
4.2	Analyse statistique multivariée des données	45
4.3	Caractérisation physico chimique des eaux	52
4.4	Typologie des eaux de la nappe	53
4.5	Identification des processus de minéralisation	57
4.5.1	Analyse de diagrammes binaires	57
4.5.2	Analyse des rapports caractéristiques des éléments :	60
4.5.3	Analyse des indices d'échange de base	62
4.5.4	Processus hydro chimiques	62
CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS		64
BIBLIOGRAPHIE		66
ANNEXES :		a

Liste des figures

Figure 1 : Situation géographique de la zone d'étude	2
Figure 2: Courbes de variation des températures minimales et maximales au niveau de la station de Thiès Saint-Louis et Louga de 1998 à 2018.	3
Figure 3: Distribution de précipitations moyennes mensuelles à la station de Thiès (période : 1998 à 2018)	4
Figure 4: Carte topographie de la zone d'étude (GCO)	7
Figure 5: Carte géologique de la zone d'étude (Faye, 1995, modifiée)	9
Figure 6 : Coupe lithologique des formations de l'aquifère des sables quaternaire du littoral nord dans la concession minière de GCO entre Diogo et Lompoul (Source : Services Techniques miniers, GCO)	12
Figure 7 : Carte des aquifères du Sénégal. (Fall, 2012)	14
Figure 8 : Comparaison de la piézométrie autour de Diogo : a) en juillet 2012 (avant) et en avril 2019 (après le début des travaux d'exploitation des sables minéralisé)	17
Figure 9 : Limites du permis d'exploitation de GCO	20
Figure 10 : Partenariat du projet GCO	21
Figure 11: Dragage de GCO (d'après Djigo, 2016)	32
Figure 12 : Les différentes unités de l'usine de concentration humide (WCP) (d'après, Djigo, 2017)	33
Figure 13: bassin de stockage (a) et tamis rotatifs (b) (D'après Dieye, 2015)	34
Figure 14: Photo du système des spirales	34
Figure 15: Organigramme du circuit de la pulpe dans le WCP (D'après DJIGO, 2017)	36
Figure 16: Schéma du processus des flux d'eau à la mine	39
Figure 17 : Carte piézométrique de la zone montrant la localisation des ouvrages choisis	41
Figure 18: Comparaison entre débits prélevés (diagramme en bâtonnets) et variations piézométriques (courbes) de 2012 à 2019	43
Figure 19: Carte piézométrique de la zone montrant la localisation des ouvrages choisis sur la partie Ouest de la zone d'étude	44
Figure 20 : Chronique piézométrique (juillet 2012-avril 2019) de piézomètres de la partie Ouest de la zone d'étude.	45
Figure 21 : Dendrogramme des classes issue de la CHA.	46
Figure 22: carte de localisation des ouvrages des groupes G1 et G2	49
Figure 23: Plot des variables et individus dans le plan F1 – F2	52
Figure 24: Détermination des faciès chimiques des eaux à partir du diagramme de Piper	54
Figure 25: Carte de distribution des faciès chimiques de l'eau de la nappe superficielle. (2019)	55
Figure 26: Diagramme de Stiff des 24 échantillons de la zone d'étude.	56
Figure 27 : Représentation des faciès dans le diagramme de Stiff	57
Figure 28: Diagrammes binaires des rapports Cl Vs Na, Cl Vs Ca, Ca Vs HCO₃, Cl Vs NO₃	59
Figure 29: Comparaison des rapports caractéristiques Na/Cl (série 2) et SO₄/Cl (série 1) et Mg/Ca (série 3).	61
Figure 30: Diagramme en bâtonnets des i.e.b.	62
Figure 31: Diagrammes Na versus TDS (a) et Cl-(Na+K) versus (Ca+Mg)- (HCO₃+SO₄) (b)	63

Liste des tableaux

Tableau 1 : Répartition des échantillons en classes et groupes d'après la CHA.....	47
Tableau 2: Répartition en groupes d'après la CHA	48
Tableau 3: Statistique descriptive des éléments du groupe G1	50
Tableau 4: Statistique descriptive des éléments du groupe G2	50
Tableau 5 : Corrélation entre les facteurs et les paramètres.	51

INTRODUCTION

La société Grande Côte Opérations (GCO) exploite les dunes de sables minéralisés en zircon, ilménite, rutile et leucoxène que l'on retrouve le long du littoral Nord, entre Dakar et Saint-Louis. Entre ces dunes de sables existent des dépressions inter-dunaires appelées « Niayes », où la nappe phréatique est affleurente à sub-affleurente. C'est une nappe d'une grande importance économique. Elle permet le développement de cultures maraichères dont le rendement fournit près de 80% de la production horticole nationale (CSE, 2007). Cette nappe est également utilisée par la GCO, dans le cadre du processus industriel mis en œuvre pour la valorisation des sables minéralisés. La croissance démographique galopante associée aux développements récents des activités extractives et agricoles accentue davantage la pression sur cette nappe. Ce qui a favorisé une baisse importante de son niveau piézométrique et une dégradation progressive de la qualité des eaux liée au phénomène d'intrusion saline et à la pollution d'origine agricole (par les produits phytosanitaires de traitement des cultures). Un ensemble de phénomènes dont les effets risquent de dégrader de façon irréversible la qualité de la ressource.

Face à cette situation et l'enjeu que représente cette nappe, la GCO en collaboration avec l'Institut des Sciences de la Terre a initié une étude de caractérisation hydrochimique de la nappe dans le but d'évaluer l'impact des activités d'extraction des sables sur la nappe superficielle.

L'objectif de ce travail vise à faire une caractérisation hydrochimique des eaux de la nappe face à ces enjeux de développement socioéconomiques. Pour atteindre ces objectifs le document est structuré en trois chapitres :

- le premier chapitre qui est consacré à la présentation de la zone d'étude ;
- le deuxième chapitre qui présente les données et la méthodologie utilisées ;
- le troisième chapitre dans lequel les principaux résultats sont présentés et discutés ;

A la suite une conclusion générale et des recommandations ont été formulées.

CHAPITRE 1 : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE ET DE LA SOCIETE GCO

1.1 CADRE GEOGRAPHIQUE :

1.1.1 Situation géographique

La zone d'étude est située dans le permis d'exploitation de GCO qui s'étend le long du littoral Nord sénégalais, entre Dakar et Saint-Louis, sur une superficie de 832 km² figure 1.

La Grande côte constitue l'une des quatre zones éco-géographiques de la région de Thiès et renferme d'importantes potentialités hydro agricoles qui en font une zone d'intenses activités maraichères. Elle abrite également des activités d'industries extractives, chimiques, de pêche (Kayar, Fass Boye) et d'élevage ANSD, SESR (2015).

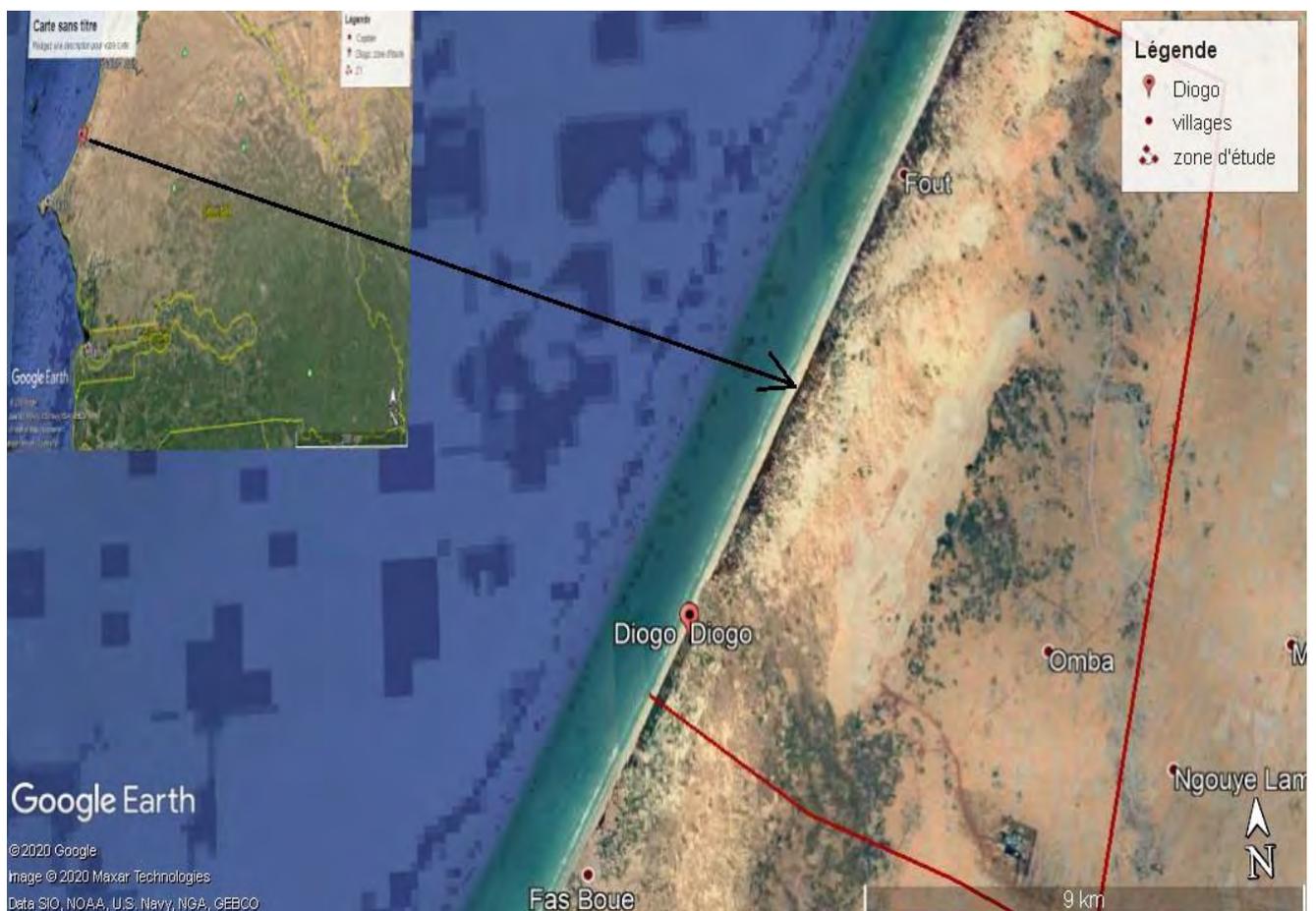


Figure 1 : Situation géographique de la zone d'étude

1.1.2 Le climat

Le climat de la zone est de type sahélien ANSD (2015) et subit l'influence des courants marins (alizés maritimes) et continentaux (harmattan). Les données climatiques utilisées proviennent de la station de Thiès. Elles concernent une période de 20 ans (1998 - 2018).

1.1.2.1 Températures

L'évolution des courbes représentatives de la variation des moyennes mensuelles de la température au niveau de la station de Thiès permet de distinguer une saison chaude (Avril à Novembre) et une période froide sur le reste de l'année (Décembre à Mars). Les minima sont d'environ 16°C (Janvier), les maxima tournent autour de 34°C (Figure 2).

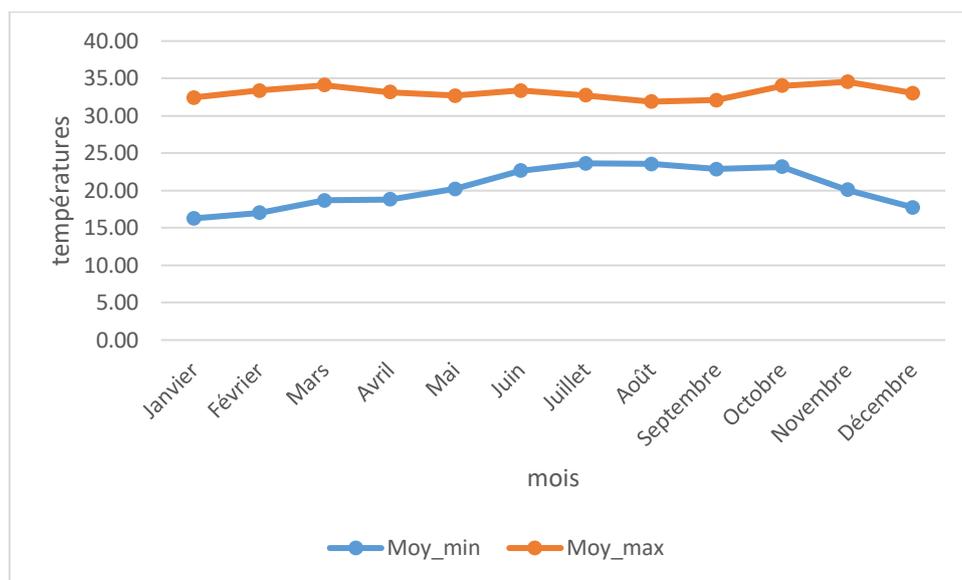


Figure 2: Courbes de variation des températures moyennes mensuelles, minimales et maximales, au niveau de la station de Thiès de 1998 à 2018.

1.1.2.2 Pluviométrie

Avant la période de sécheresse des années 1970, la zone d'étude présentait un climat avec une pluviométrie moyenne annuelle qui oscillait entre 400 et 500 mm Tandia (1990) ; El Faid, (1999). Les données pluviométriques enregistrées entre 1998 et 2018 dans la station de Thiès (Figure 3) avec des moyennes annuelles inférieures à 60 mm montrent que cette sécheresse ne cesse d'avancer. Nous pouvons en outre noter que la saison des pluies débute en général au mois de juin et se termine au mois d'octobre. C'est la saison sèche sur le reste de l'année. L'essentiel des précipitations annuelles (près de 79%) tombe entre Juillet et Septembre.

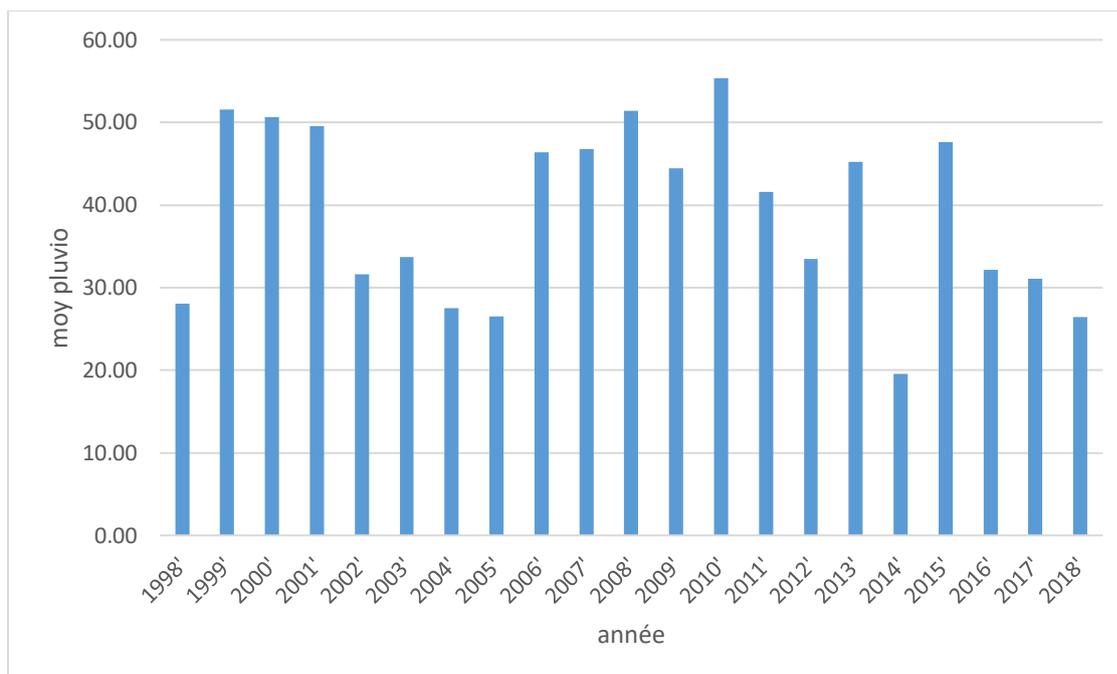


Figure 3: Distribution de précipitations moyennes mensuelles à la station de Thiès (période 1998 à 2018)

1.2 CADRE GEOMORPHOLOGIQUE

1.2.1 Géomorphologie des Formations du littoral

Les grands traits géomorphologiques des formations du littoral Nord ont été donnés dans les travaux de Michel (1973), Sall *et al.*, (1978), Sall (1982). Une synthèse de ces travaux, combinés à des données de photo-aériennes et photo-satellites a été effectué par Fall (1986).

On distingue ainsi plusieurs systèmes dunaires le long du littoral :

- le système dunaire ancien interne ;
- le système ogolien remanié ;
- le système dunaire ogolien intermédiaire ;
- le système dunaire externe du littoral.

1.2.1.1 Le système dunaire interne ancien

Il est appelé erg ackcharien et serait mis en place au cours d'un épisode aride anté-inchirienne Michel (1970). Il subsisterait dans le Ferlo, alors que dans le Cayor et le Cap-Vert, son matériel aurait été démantelé, étalé et mélangé à des gravillons ferrugineux.

1.2.1.2 Le système dunaire ogolien intermédiaire

L'erg ogolien s'est édifié au cours de la phase aride allant de 20 000 à 12 000 ans B.P. Il aurait connu une extension relativement importante vers le Sud. Du littoral vers l'intérieur des terres, on distingue la juxtaposition de deux unités morphologiques différentes par leur altitude, l'importance du système crêtes-couloirs, l'orientation et le couvert végétal. Vers l'intérieur, les dunes ogoliennes sont arasées. Cependant, l'alignement originel de direction Nord-Est est encore observable malgré le colmatage des inter-dunes.

Le long du littoral, les dunes ogoliennes ont été remaniées au cours de la phase humide du Tchadien (12 000 à 7 000 ans B.P.). Elles présentent un modelé particulièrement complexe caractérisé par :

- des altitudes relativement importantes, dans certaines zones : plus de 20 m dans les secteurs de Mboro et de Diogo ;
- des couloirs inter-dunaires aux contours digités, souvent serrés et réticulés autour de dunes paraboliques et qui peuvent aboutir à des sortes de chenaux fluviaux qui n'atteignent guère le rivage ;
- des alignements dunaires très irréguliers, orientés dans des directions allant du NW et NNE à des directions franchement E.

Ces caractéristiques topographiques de l'ogolien remanié participent aux conditions multiples qui ont déterminé l'installation des tourbières.

1.2.1.3 Le système dunaire externe du littoral

Il comprend deux ensembles dunaires juxtaposés : les dunes semi-fixées jaunes qui bordent le système ogolien remanié et les dunes vives blanches du cordon littoral.

- **Les dunes jaunes semi-fixées** ont une extension variable. La largeur du massif dunaire atteint 4 500 m dans certains secteurs, tandis qu'elle se rétrécit considérablement à l'aval de certaines grandes dépressions (Mbawane, Mboro). Les versants sous le vent surplombent l'erg ogolien par un talus abrupt qui devient très marqué lorsque le massif dunaire ceinture une dépression. La dénivellation peut alors atteindre 30 m. Les versants au vent présentent de nombreux ripple-marks. L'orientation des rides indique généralement une direction NNE. Dans certains endroits (Ouest de Mboro, Diogo), le massif de dunes jaunes connaît des réactivations intenses tendant à ensevelir les dépressions.

- **Les dunes vives récentes** (de couleur blanche) forment une bande de quelques mètres à quelques centaines de mètres de largeur. Ces dunes présentent une morphologie assez complexe. Au niveau de l'arrière plage, les dunes s'amoncellent, soumises à une action éolienne relativement intense. Les contrastes sont alors très marqués à ce niveau. Par contre, vers l'intérieur, le raccordement avec les dunes jaunes se fait généralement en pente douce. L'estran est battu par une houle dont l'action engendre un transport de matériaux sableux qui engraisent continuellement le cordon littoral. On estime sous la côte nord un volume charrié compris entre 200 et 450.10³ m³ /an Barusseau (1980).

1.2.2 Morphologie des dépressions sableuses

Les dépressions inter-dunaires ou Niayes représentent des dépressions parfois inondées en permanence ou bien de façon semi-permanente. Elles se trouvent non loin de la côte dans les creux existants entre des dunes d'origines diverses Fall (1986). Elles correspondent à des zones d'affleurement ou d'émergence de la nappe phréatique et à l'emplacement d'un ancien réseau hydrographique qui a été plus ou moins fossilisé par des sables dunaires Puttalaz (1962). Selon Michel (1955) il existe schématiquement deux types de Niayes :

- des Niayes de petites dimensions correspondant à des émergences de la nappe phréatique dans les inter-dunes les plus profondes ; la plupart de ces dépressions sont orientées NNW-SSE, suivant la direction des dunes ogoliennes remaniées ;
- des Niayes de plus vaste étendue, pouvant pénétrer loin à l'intérieur des terres, recoupant les cordons des dunes rouges.

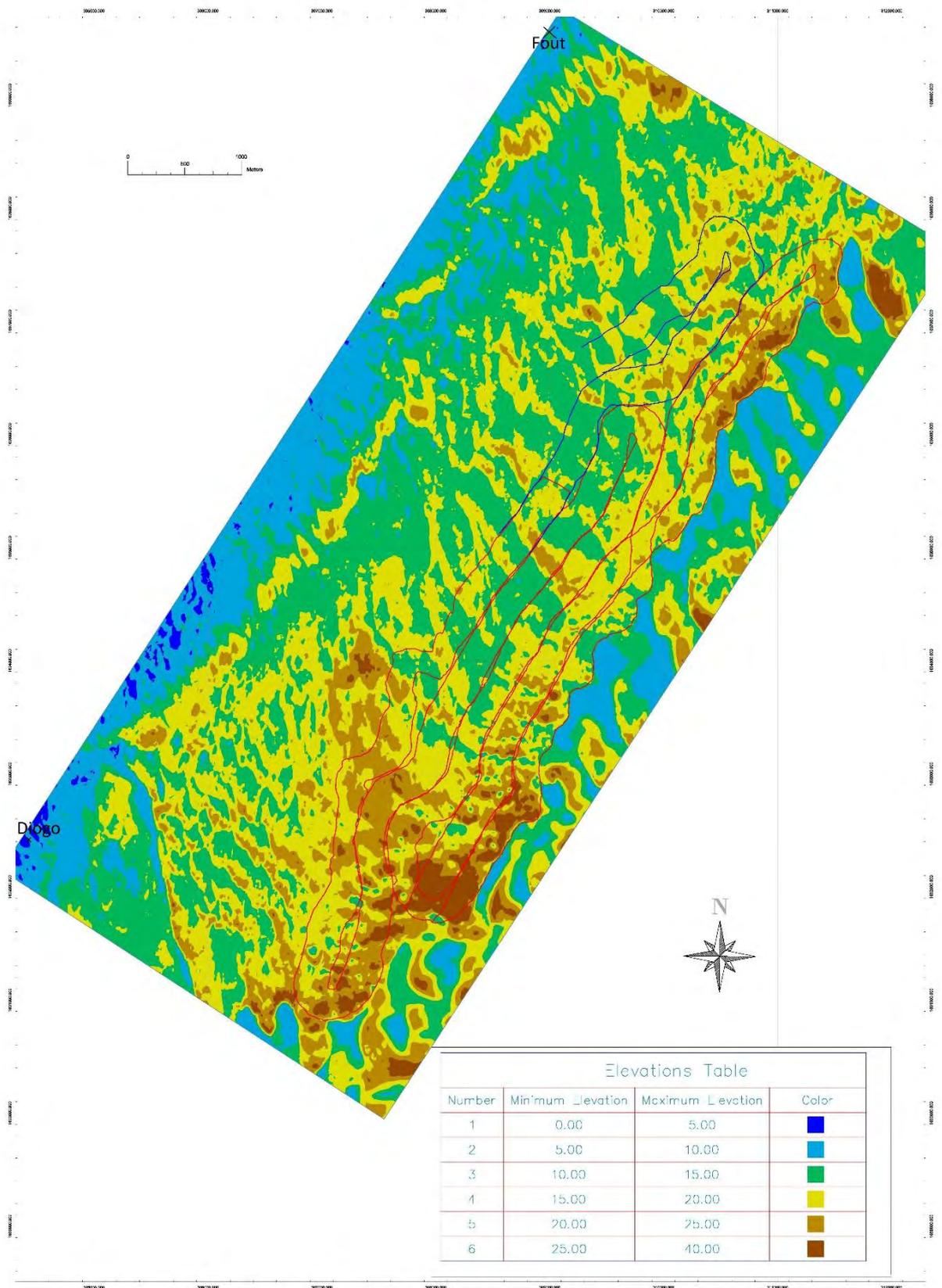


Figure 4: Carte topographique de la zone d'étude (GCO, 2019)

1.2.3 Végétation

On note une grande diversité des espèces végétales dans la zone Trochain, (1939/1941), Adam (1954/1958), Raynal (1961/1962), Fall (1986). Plus de 400 espèces végétales auraient été identifiées (Ecodit, 2008). Ce qui rend difficile une classification. Ndjekouneyom (2007) propose une répartition des espèces selon le type de cordon dunaire.

- D'après Ndjekouneyom, la végétation au niveau des dunes blanches et jaunes forme une sorte de steppe, d'origine édaphique, composée d'espèces pionnières, qui serait le résultat d'un processus d'ensablement de grande envergure. C'est une végétation qui est clairsemée par endroit, ou bien se présente sous une forme buissonneuse ou même de savane arbustive (savane boisée).
- Par contre, la végétation qu'on trouve sur les dunes rouges s'apparente à une sorte de savane (appelée « savane sahélienne »), à cause de son paysage herbeux et buissonnant associé à de nombreux arbres et arbustes. Les séquelles de l'activité anthropique dans cette zone constituent une rupture à la continuité herbeuse, d'où la nécessité de faire appel à de nouvelles notions telles que les parcs arborés ou boisés.

1.3 CADRE GEOLOGIQUE

1.3.1 Localisation

Du point de vue géologique, la zone étudiée appartient au bassin sédimentaire sénégal-mauritanien, ayant résulté de la séparation de l'Afrique et de l'Amérique du Nord au Jurassique. C'est un bassin qui s'étend sur près de 1 400 km du Cap Barbas (Mauritanie) à Cap Roxo (Guinée Bissau), à travers le Sénégal et la Gambie et couvre près de $\frac{3}{4}$ de la superficie du territoire sénégalais Sarr (2011). Les nombreux sondages pétroliers et forages d'exploitation d'eau souterraine et les synthèses stratigraphiques récemment réalisées par Sarr et *al.*, (2008) et Roger et *al.*, (2009) ont permis de connaître la série sédimentaire de remplissage du bassin depuis le Trias jusqu'au Quaternaire. Une carte géologique du littoral Nord a été établie par Faye (1995) (Figure 4).

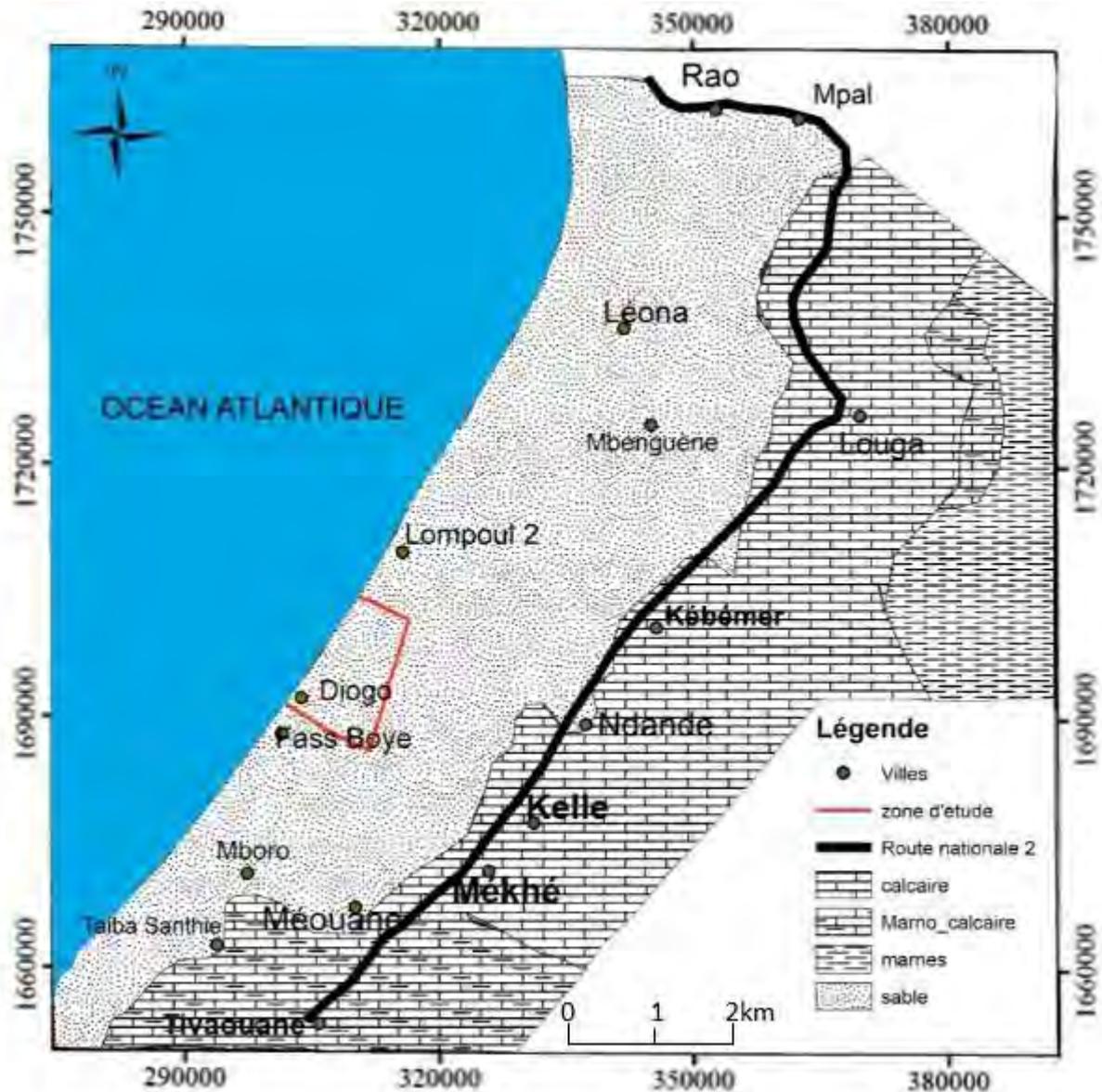


Figure 5: Carte géologique de la zone d'étude (Faye, 1995)

1.3.2 Stratigraphie des formations dans le secteur

La stratigraphie du secteur a été décrite par plusieurs auteurs Tessier (1950), Degallier, (1952), Castelain et al., (1965), Monciardini (1966), Fall (1986), Diouf (1995), El Faid (1999), Sarr et al., (2008). D'après ces travaux nous observons la succession stratigraphique suivante

1.3.2.1 Le Crétacé

Il est essentiellement représenté par des formations calcaires, avec alternances de niveaux sableux et gréseux.

- **Le Crétacé inférieur** (Albien, Cénomano-Turonien, Sénonien) est marqué par la prédominance d'une série argileuse, pouvant atteindre 2000m dans la partie occidentale du bassin.

- **Le Crétacé supérieur** (Campano-Maastrichtien) est caractérisé par des dépôts sableux, très hétérogènes, avec des bancs d'épaisseur variant entre 200 et 400m. Vers le sud du bassin les formations deviennent argilo-sableux, à grésocalcaires et marneux.

1.3.2.2 Le Paléocène

Il comprend des faciès variés, essentiellement des calcaires, des marnes et des marno-calcaires. Son sommet est marqué par un changement de faciès généralement azoïques constitués d'argiles feuilletées, de calcaires marneux, et de calcaires. Le Paléocène devient siliceux au contact de l'éocène inférieur.

1.3.2.3 L'Eocène

Il comprend :

L'Eocène inférieur marqué par une prédominance des dépôts argileux et marneux, alternant avec de rares niveaux calcaires.

L'Eocène moyen (Lutétien) : Il a été traversé par la plupart des puits villageois rencontrés à l'EST de la route Dakar-Saint-Louis. Dans ce secteur, il constitue le dernier terme marin du bassin sédimentaire Sénégal-Mauritanien. D'Est en Ouest, et suivant une ligne subméridienne, les assises supérieures du Lutétien présentent de bas en haut : une série à prédominance marneuse et argileuse (70m de puissance) et une série essentiellement calcaire (118 m d'épaisseur) renfermant une importante faune de Nummulites. Le Lutétien argileux apparaît également au Sud-ouest dans la région de Taïba.

1.3.2.4 L'Eocène supérieur :

La présence (dans la région de Taïba) de remaniements et d'une faune particulière à *Daucénia erneanniana* Bornemann dans les dernières assises marines permet d'envisager leur appartenance à l'éocène supérieur d'après Monciardini (1967b) et Diouf (1995).

1.3.2.5 La Formation du Saloum

D'abord appelée Continental Terminal elle constitue une puissante unité gréseuse, accessoirement argileuse, qui couvre une large part du bassin sédimentaire sénégalais, depuis la Casamance et le Saloum, jusqu'au fleuve Sénégal. Vers le nord, la limite occidentale des dépôts s'arrête en rive droite du lac de Guier. Cette unité a été représentée en surcharge sur le substratum marin paléogène et néogène Roger et *al.*, (2008).

La FS serait absente dans la région de Taïba Diouf (1995) et n'aurait pas été identifiée avec certitude dans les autres secteurs. Ce niveau est en effet peu différent des dépôts quaternaires azoïques susjacentes.

1.3.2.6 Le Quaternaire

Les dépôts du Quaternaire sont présents dans la majeure partie du bassin sénégalais. Ils sont essentiellement sableux à sablo-argileux et constituent au niveau du littoral Nord les sables minéralisés actuellement exploités par GCO. Elouard (1967) et El Faid (1999) ont étudié la succession des dépôts suivant les étages dans la région du Littoral Nord :

- L’Inchirien I (environ 40 000 - 37 000 ans B.P), constitué de sables marins coquilliers comprenant à leur base des sables à ilménite et recouverts par les sables éoliens présentant en surface une altération continentale (argiles à graviers de latérite).
- L’Inchirien II (environ 33 000 - 31 000 ans BP), formé de dépôts constitués essentiellement d’alluvions graveleuses.
- L’Ogolien (20000 à 13000 ans BP) composé de dépôts de sables dunaires fins, de couleur rouge-orange à marron-clair (épaisseur maximale = 50 m).
- Le Nouakchottien (5 500 – 4 200 ans B.P.), formé de dépôts de sables marins fins coquilliers, plage à Arca.
- Le Tafolien (4 000 – 2 000 ans B.P.), constitué de dépôts de sables dunaires fins, jaune orangé.
- Le Sub-actuel à actuel, représenté par des sables dunaires fins blancs. C’est une puissante série d’une épaisseur moyenne de 70 m qui est attribuée au Quaternaire. Les fossiles *d’Arca senilis* retrouvés à la base de certains forages de la région témoigneraient, d’après Faye (1995), l’appartenance de cette série au Quaternaire. L’épaisseur maximale de ces dépôts est de 161 m à Mbenguène, cette dépression a été mise en évidence dans la partie Ouest de Louga par des études géologiques et géophysiques Monciardini (1974) ; Noël (1978) ; Dubreuil et Fohlen (1987).

❖ Description locale

Seck (2018) est revenu en détail sur la lithologie des formations sableuses du Quaternaire rencontrées dans le site de Diogo, qui sont exploitées par la GCO. Il a établi la succession suivante sur la base de 48 forages réalisés dans le secteur d’étude, avec de bas en haut:

- une couche de marnes argileuses ou d'argiles marneuses, considérée comme le mur de l'aquifère des sables du Littoral Nord dans la zone minière de Diogo. Elle est recoupée entre 40 et 47 m de profondeur.
- une couche de sables argileux devenant des argiles sableuses, marrons par endroit ; son épaisseur est faible et dépasse rarement 5 m.
- une couche de sables fins beiges, d'épaisseur faible (en moyenne 2 - 3 m).
- une couche de sables moyens à grossiers beiges, graveleux et quartzeux, d'épaisseur variable (5 - 10 m).
- une couche de sables fins silteux, d'épaisseur variable (5 - 10 m)
- une couche de sables fins à moyen, beiges, tourbeux par endroit, d'épaisseur maximale 10 m ;

Une couche de sables fins à moyens, jaunes, son épaisseur est variable, atteignant 12 m d'épaisseur au niveau des sables dunaires et une épaisseur moyenne de 3 m dans les Niayes.

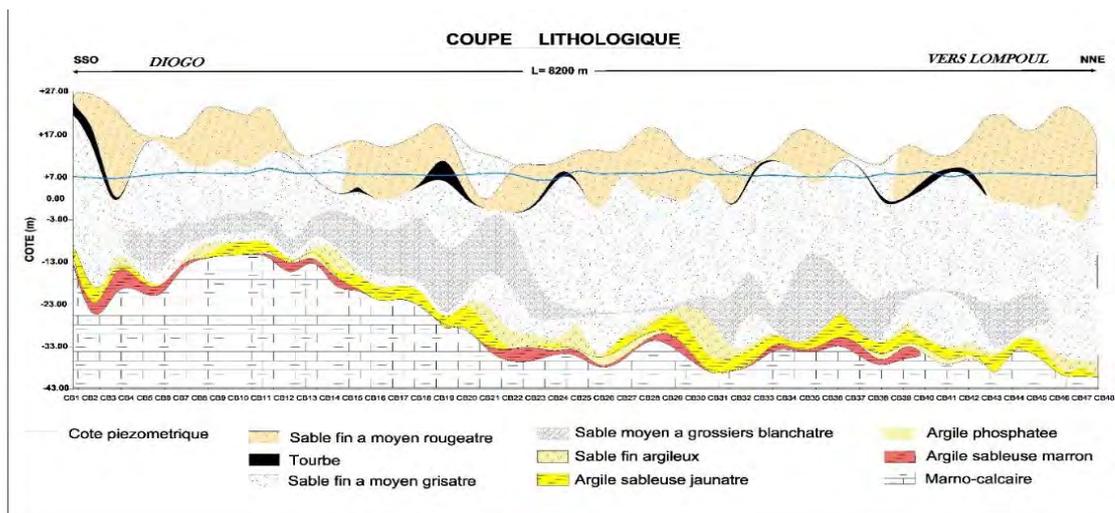


Figure 6 : Coupe lithologique des formations de l'aquifère des sables quaternaire du littoral Nord dans la concession minière de GCO entre Diogo et Lompoul

(Source : Services Techniques miniers, GCO)

1.4 CADRE HYDROGEOLOGIQUE

1.4.1 Zones hydrogéologiques

Les nombreuses études hydrogéologiques, hydrodynamiques, géophysiques réalisées dans le bassin sédimentaire Fall (1986) ; Travi, (1988) ; Diouf (1995) ont permis d'identifier trois ensembles aquifères dans notre zone d'étude (Figure 7). Il s'agit de :

- **Un système aquifère superficiel (ou complexe terminal) qui regroupe les formations à dominante sablo-argileuse et sableuse du Quaternaire, de la Formation du Saloum et de l'Oligo-Miocène** : intéressantes dans le sud du pays, l'importance de ces nappes diminue notablement dans le Ferlo. Le débit peut atteindre 100 à 150 m³/h Wade (2005).
- **Un système aquifère intermédiaire regroupant les formations essentiellement calcaires karstiques du Paléocène et marno-calcaires karstifiés de l'Eocène** : les calcaires paléocènes qui communiquent plus ou moins directement avec la nappe maastrichtienne constituent ici les niveaux les plus productifs. Ils sont activement exploités pour le ravitaillement en eau de Dakar et sa banlieue dans les secteurs de Pout-Sébikotane, où ils sont situés à faible profondeur. Le débit d'exploitation varie de 50 à 80 m³/h Wade (2005).
- **Un système aquifère profond qui correspond aux formations sableuses à sablo-argileuse ou parfois gréseuse du Maastrichtien** : rencontré sur la quasi-totalité du bassin, il constitue un immense réservoir d'eau avec un débit de pompage dépassant les 100 m³/h Wade (2005)

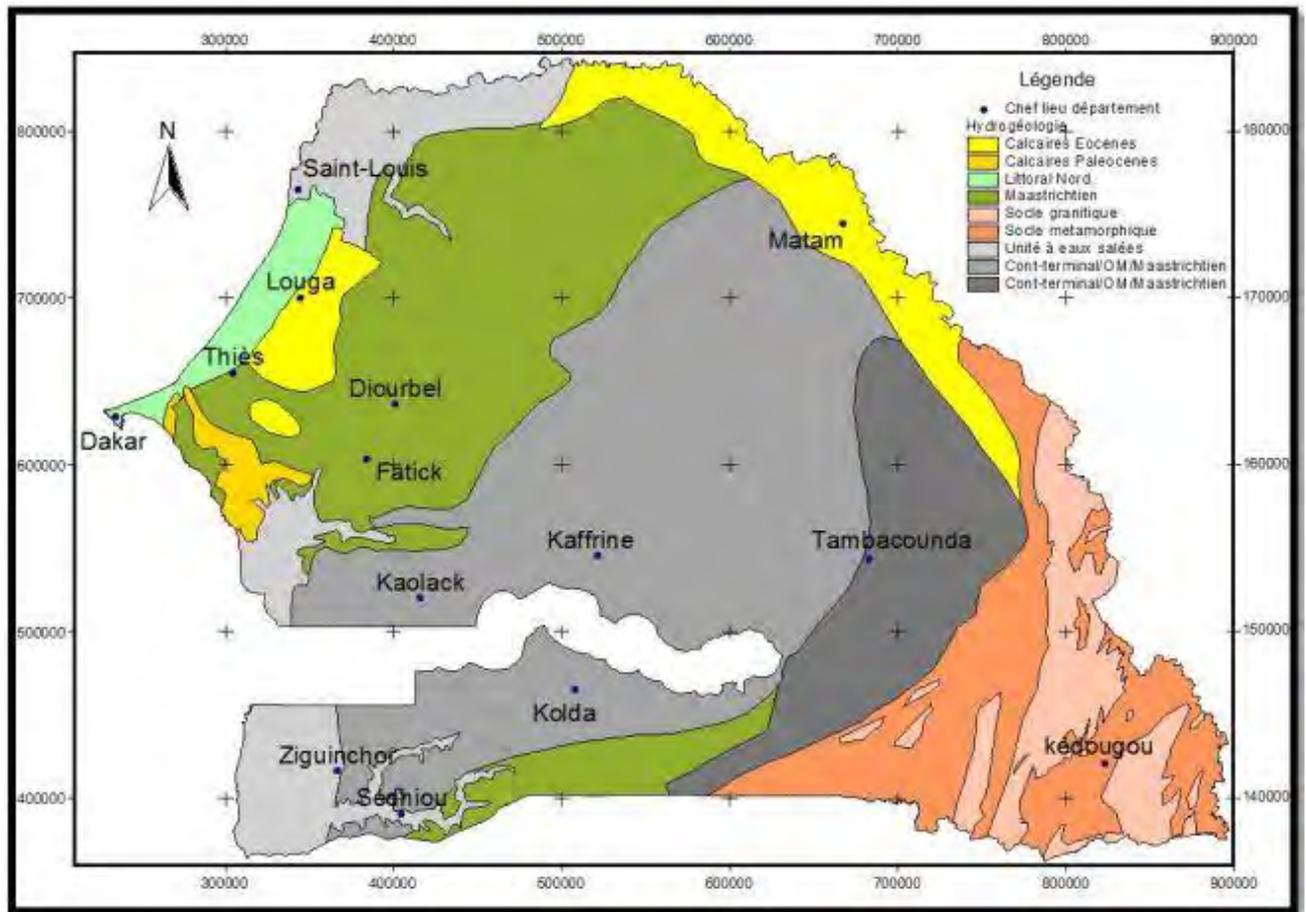


Figure 7 : Carte des aquifères du Sénégal. (Fall, 2012)

A l'échelle sous régionale de la zone d'étude, c'est-à-dire le long du littoral Nord, le système aquifère superficiel des sables (Quaternaire + CT) passe latéralement à des calcaires karstiques aquifères du Lutécien par le jeu d'un accident tectonique Puttallaz (1962) ; Noel (1978) ; BRGM (1992) ; Kane (1995) qui aurait engendré une bonne continuité hydraulique entre ces deux unités aquifères.

Dès lors, on peut individualiser dans notre secteur d'étude les deux grands ensembles hydrogéologiques suivants :

- Un « ensemble aquifère supérieur » regroupant les formations marneuses et gréseuses du Paléocène, les calcaires karstiques lutétiens vers l'Est et les sables quaternaires Quaternaire + CT vers l'Ouest
- Un « ensemble aquifère inférieur » sous-jacent constitué par la nappe maestrichtienne.

1.4.1.1 Ensemble aquifère supérieur

1.4.1.1.1 Aquifère des sables Quaternaire + CT (Formation du Saloum)

Il est formé par les sables du cordon dunaire s'étendant le long du littoral Nord, entre Dakar et Saint-Louis, sur une superficie de 5000 km² environ. Il repose directement sur le substratum marneux à marno-calcaire de l'Eocène Noël (1978) ; El Faid (1999). Les quantités d'eau soutirées de cette nappe sont estimées à 320 000 m³/j, en tenant compte de la nappe infra basaltique de la presqu'île du Cap Vert Travi (1988). Ce réservoir est en contact latéral direct avec la mer dans laquelle il se déverse. Son épaisseur varie en fonction de la morphologie irrégulière du substratum (Kane, 1995) qui est plongé du Sud vers le Nord. Son épaisseur est maximale vers le rivage Fall (1986).

- Caractéristiques hydrodynamiques

Les valeurs de la transmissivité et du coefficient de perméabilité hydraulique seraient comprises entre $5,5 \times 10^{-4}$ et 8×10^{-2} m²/s et entre $8,9 \times 10^{-4}$ et $2,8 \times 10^{-5}$ m.s⁻¹, respectivement O.M.S (1974) ; B.R.G.M (1992) ; Kane (1995). Les coefficients d'emménagement obtenus par pompage d'essais étaient compris entre $2,68 \times 10^{-4}$ et $4,5 \times 10^{-4}$ Kane (1995).

Cependant au niveau de Diogo, les forages de recyclage de GCO installés selon une direction parallèle à celle des dunes semi fixées et situés à environ quatre km de la côte, ont capté ce réservoir sableux avec des perméabilités estimées entre $1,6 \times 10^{-4}$ m/s et 3×10^{-4} m/s. Seck (2018). Ces valeurs différentes des paramètres hydrauliques mettent en évidence une hétérogénéité du système qui serait liée d'après Kane (1995) à la variation spatiale de la proportion d'éléments argileux présents dans les sables.

- Caractéristiques piézométriques

La piézométrie de la nappe des sables quaternaires du littoral Nord évoluerait de manière inquiétante depuis les années 1970 Diouf (1995) ; Kane (1995). Kaba (2017) est revenue sur cette évolution avec les campagnes de suivi piézométrique réalisées en 2012.

A l'Ouest de la route nationale Dakar - Saint-Louis le dôme piézométrique s'allonge suivant un axe SW-NE et présente un sens d'écoulement divergent. L'écoulement de la nappe se fait d'une part vers l'océan contre l'avancé du front salé surtout dans la partie Sud. Il se fait, d'autre part, vers la direction Kelle et Kébémér, au niveau des calcaires lutétiens. Les courbes isopièzes se serrent vers le Sud, et deviennent plus lâches vers le Nord, où le niveau de base est atteint.

Une baisse du niveau piézométrique de 1975 à 1985 a été annoncée par Noel (1978) et a été confirmée par la suite. Cette baisse a été aussi mise en évidence par Kane (1995) au niveau du flanc Ouest du dôme piézométrique en comparant la piézométrie de 1975 à celle de 1991. Les études réalisées dans le cadre de la Gestion des nappes des Niayes Gaye (1990), celles effectuées par la Direction de Gestion et de la Planification des Ressources en Eau (DGPRE, Ministère de l'Hydraulique) et par le Programme des Nations Unies (1994) indiquaient une baisse de 7 à 10 cm/an en moyenne. Ainsi l'extension du dôme piézométrique a connu une forte baisse ; il est passé de (+)40 m en 1965, à (+)35 m en 1985, (+)20 m en 1991 Faye (1995), Kane (1995), et à (+)16,5 m en 2012 Kaba (2017).

La Figure 8 compare la piézométrie avant (en 2012) et durant l'exploitation de la mine de GCO (2019). L'impact de cette exploitation s'observe avec la création d'un dôme piézométrique. En effet, ce dôme est contrôlé par le bassin de dragage et les terrils gorges d'eau localisés derrière le bassin et qui se déplacent le long de la passe minière (figure 8b).

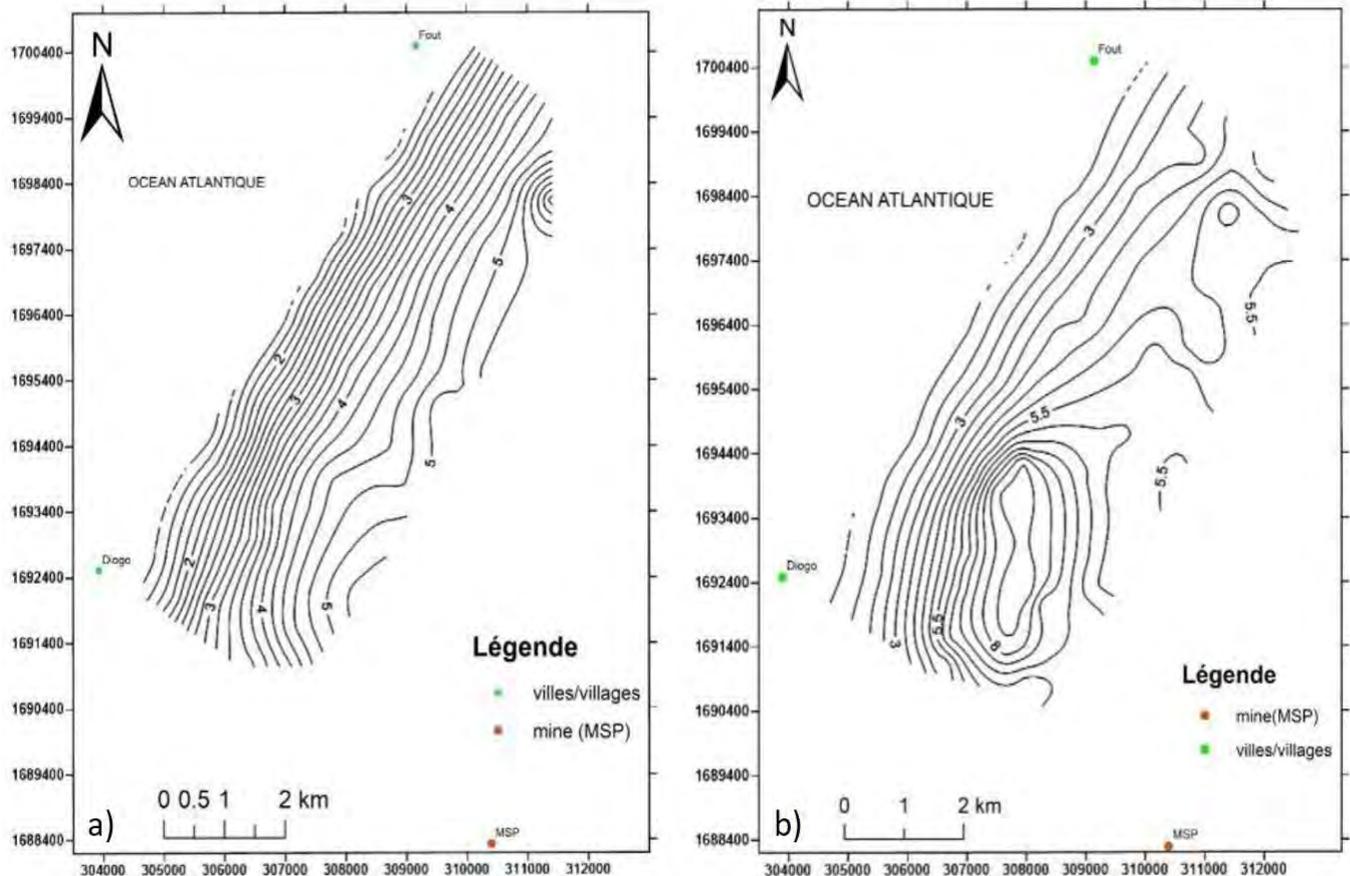


Figure 8 : Comparaison de la piézométrie autour de Diogo : a) en juillet 2012 (avant) et en avril 2019 (après le début des travaux d'exploitation des sables minéralisé)

1.4.1.1.2 Aquifère des calcaires lutétiens.

Cet aquifère s'étend sur une superficie d'environ 2 600 Km², depuis l'Ouest de la route Dakar-Saint-Louis jusqu'au méridien 16° 05' El Faid (1999). Son potentiel hydraulique serait de 115000 m³/j. Il est capté par des forages et des puits dont la profondeur avoisine les 100 m. L'épaisseur de l'aquifère est voisine de 20 m sur la majeure partie de son extension. Elle est maximale (75 m) vers Ndiok Sall, localité située au Nord de Louga El Faid, (1999). Les faciès chimiques de l'eau de cette nappe sont essentiellement du type bicarbonaté calcique Noël (1978) ; El Faid ; (1999). Le résidu sec est de 370 mg. L⁻¹ El Faid (1999).

1.4.1.2 Ensemble aquifère inférieur (nappe maestrichtienne)

Cet aquifère a fait l'objet de nombreuses études. El Faid (1999) fournit une synthèse sur la nature et l'environnement de cet aquifère en se basant sur les travaux de Travi (1988) et Faye (1994).

A l'Est du méridien 14° 30' l'aquifère maastrichtien repose directement sur les formations cristallines du socle ancien. Du point de vue lithologique, il est presque homogène, avec un faciès essentiellement sablo-gréseux.

Cependant à l'Ouest, les terrains maastrichtiens reposent sur les formations argilo-sableux du Cénomano-Turonien contenant des eaux salées profondes. L'apparition des niveaux argileux et carbonatés du Paléocène marque le toit de l'aquifère Maastrichtien.

Les travaux récents de Seck (2018) au niveau de Diogo donnent plus de détails sur les caractéristiques de cet aquifère. Ainsi, le toit de l'aquifère Maastrichtien est atteint aux environs de - 400 à - 500 m au-dessous du niveau marin (IGN) et le mur se situerait à environ - 800 m en dessous de la côte. A l'exception de la bordure sédimentaire en contact avec le socle, et au niveau du Horst de Diass, la nappe est captive sur tout le bassin, et est caractérisée par un écoulement orienté globalement SE-NW.

Concernant les paramètres hydrodynamiques, les valeurs de transmissivité sont bonnes (de l'ordre de 10^{-3} à 10^{-2} m²/s). Les débits d'essai des forages dépassent 200 m³/h, et les rabattements induits sont faibles (2 à 4 m à un rayon de 1 Km autour des puits).

Du point de vue chimique, les eaux de la nappe maestrichtienne présente une bande d'eau salée à saumâtre (résidu sec égale 1 à 3.5 g/l) de direction méridionale, allant de l'embouchure du Sine Saloum aux environs du lac de Guiers. Elle se situe à quelques 30 km à l'Est de la zone de Diogo. Les faciès chimiques des eaux sont du type chloruré sodique et les teneurs en fluor sont supérieures à 1.5 mg/l.

Conclusion

En somme nous avons deux ensembles aquifères dans notre zone d'étude. Un ensemble supérieur constitué de l'aquifère des sables Quaternaires et de l'aquifère des calcaires lutétiens et un ensemble inférieur constitué par la nappe maestrichtienne. Ces deux se distinguent aussi bien par la nature lithologique, la piézométrie que par les caractéristiques hydrodynamiques et la nature chimique des eaux.

1.5 PRESENTATION DE LA SOCIETE GCO

La Grande Côte Opération SA (GCO) est une société minière qui exploite les sables littoraux minéralisés en rutile (TiO_2), zircon (ZrSiO_4) et ilménite (FeTiO_3), et leucoxène qui longent la grande côte sénégalaise du littoral Nord. Le système d'exploitation mis en place par GCO (dragage sur lac artificiel) requiert une bonne connaissance et maîtrise de l'aquifère contenu dans ces sables. Nous donnons ci-après une courte présentation de cette entreprise et du mode de valorisation minière employé, afin de rentabiliser l'exploitation et bien gérer les ressources en eau des nappes et les risques environnementaux potentiels.

1.5.1 Limites du permis d'exploitation

Le permis exploité par GCO s'étend sur une d'environ 100 km de longueur, entre Mboro et Lompoul. Il est situé entre les latitudes N 15° et 16° et les longitudes W 16° et $16^\circ 30'$ et couvre une superficie d'environ 445 km^2 (Figure 9).



Figure 9 : Limites du permis d'exploitation de GCO

1.5.2 Les partenaires

De 2011 à 2018, les partenaires du projet d'exploitation des sables minéralisés du littoral Nord étaient composés de l'Etat du Sénégal (10% des actions) et du Consortium TiZir (90%). Le Consortium TiZir était composé par les sociétés ERAMET.SA, une société française et MDL une société australienne qui détenait chacun 50% des actions du consortium. Mais, en 2018 MDL cède sa quotepart à ERAMET SA qui cumule désormais 90% des actions, à côté des 10% de l'Etat du Sénégal.



Figure 10 : Partenariat du projet GCO

1.5.3 Les installations du projet

Pour assurer une bonne rentabilité des travaux d'extraction et de traitement, plusieurs installations ont été mises en place par GCO sur le site minier de Diogo. On peut citer parmi celles-ci :

- une drague et une usine de concentration humide (WCP) ;
- une usine de séparation de minerais (Mineral Separation Plant, MSP) ;
- une centrale électrique de 36 Mégawatts pour assurer l'autonomie en électricité de la mine ;
- un camp de résidence où loge une bonne partie du personnel de l'entreprise ;
- un tronçon de chemin de fer reliant l'usine au chemin de fer national Ngaye Mékhé-Port de Dakar ;
- des infrastructures de stockage et de chargement du minerai au port de Dakar pour l'exportation du minerai.

Chapitre 2 : MATERIELS ET METHODOLOGIE

Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons la démarche de collecte des données, le matériel utilisé et les méthodes de traitement employés pour parvenir à la caractérisation hydrochimique de l'eau de la nappe des sables du Quaternaire du littoral Nord au niveau site d'exploitation de Diogo.

2.1 Collecte des données

Il s'agissait dans un premier temps de rassembler les données déjà disponibles sur site. Ces données concernent essentiellement les analyses chimiques réalisées depuis le début des activités d'exploitation par le « Département Environnement » de la compagnie GCO. Ce sont des analyses effectuées d'une part sur des ouvrages hydrauliques (piézomètres de suivi du niveau piézométrique) installés par l'entreprise, et d'autre part sur des puits villageois se trouvant aux alentours de la mine. Les éléments analysés au laboratoire sont les éléments majeurs :

- Cations : Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ et K^+
- Anions : Cl^- , HCO_3^{2-} , SO_4^{2-} , NO_3^- , CO_3^{2-}
- et certains métaux lourds ou éléments en trace

2.1.1 Choix des ouvrages

Le choix des ouvrages d'investigation a été opéré de façon à couvrir toute la zone d'étude. Au total, les données d'analyses chimiques de 23 ouvrages hydrauliques ont été collectées pour l'étude de caractérisation hydrochimique de la nappe. Il s'agit de résultats d'analyse chimiques provenant d'une part de la base de données de la DGPRE (Direction de la Gestion et la Protection des Ressources en Eau ; Ministère de l'hydraulique) et d'autre part de la base de données du « Département Environnement » de GCO collectée durant les campagnes de Novembre et de Décembre 2018.

Pour ce qui est de l'étude de l'évolution chimique des eaux de la nappe en rapport avec les activités d'exploitation des sables minéralisés, les ouvrages hydrauliques ayant fait l'objet d'un suivi plus ou moins régulier (depuis le début des activités minières en 2014) ont été choisis. Il s'agit de 4 piézomètres situés en zone d'exploitation minière et de 4 puits villageois situés aux alentours de la mine. En plus, les données des pompages de la nappe superficielle réalisés depuis le début des activités minières ont été exploitées pour juger de l'impact des pompages sur le comportement hydrodynamique de la nappe.

2.1.2 Protocole d'échantillonnage

Le protocole d'échantillonnage de l'eau de la nappe est celui adopté par le « Département Environnement » de GCO.

Matériels utilisés

Les différents outils utilisés pour l'échantillonnage de l'eau souterraine sont :

- Une pompe à levier manuel Waterra destiné au monitoring des eaux souterraines.
- Un flexible qui sert à raccorder la pompe et le fond de l'ouvrage lors du prélèvement des échantillons.
- Un appareil multi paramètre Orion Star A239 pour mesurer les paramètres in situ
- Une sonde piézométrique
- De l'eau distillée
- Un marqueur permanent
- Une calculatrice
- Des gants chirurgicaux pour réduire la possibilité de contamination des échantillons
- Des flacons d'échantillons stérilisés
- Des tissus de coton pour l'essuyage
- Deux glacières avec packs de glace
- Un sceau de volume connu
- Une fiche de suivi
- Un appareil photo
- Un GPS
-

Préparation de l'échantillonnage

- Bien calibrer l'appareil multi-paramètre Orion Star A239, conformément au manuel d'utilisation
- Préparer les flacons d'échantillons et les étiqueter avec un papier imperméable

Procédure de l'échantillonnage

La méthodologie à utiliser pour prélever un échantillon varie selon que l'échantillon provient d'un forage ou d'un puits villageois, comme suit :

- Echantillonnage sur ouvrage GCO :

1i) Purger l'ouvrage : la purge doit être effectuée avant le prélèvement pour obtenir un échantillon représentatif de l'eau de la nappe à analyser. Elle consiste à évacuer les eaux

stagnantes dans l'ouvrage lui-même et ses environs immédiats. En général, le volume d'eau à purger correspond à 3 fois le volume d'eau stagnante dans le forage, après quoi les valeurs des paramètres mesurés in situ deviennent stabilisées.

Le volume d'eau (V) à purger est calculé en fonction du diamètre du tubage de l'ouvrage, comme suit, après avoir mesuré la profondeur d'eau dans l'ouvrage (d) à l'aide d'une sonde piézométrique ou bien du sonar de profondeur.

$$V = \pi \times (d/2)^2 \times d$$

2i) Après la purge d'un volume d'eau égal à 3xV, l'eau pompée est directement recueillie dans un sceau pré-rincé où seront plongées les sondes destinées à la mesure in situ des propriétés de l'eau échantillonnée.

3i) Ensuite remplir les flacons d'échantillonnage jusqu'à trop plein, les étiqueter et ensuite les placer dans une glacière réfrigérée.

4i) Nettoyer tout le matériel d'échantillonnage avec de l'eau distillée et enlever tout déchet de la zone d'échantillonnage.

5i) Renseigner la fiche de terrain en consignant la date et l'heure d'échantillonnage et reportant toutes les mesures.

- **Echantillonnage sur puits villageois :**

La différence de procédure entre échantillonner sur un ouvrage hydraulique GCO et un puits villageois est que dans ce dernier cas, l'échantillon d'eau est recueilli directement à partir robinet utilisé par le propriétaire.



Photo 1 : Prélèvement d'échantillon par l'équipe du département environnement

Les échantillons provenant du terrain sont conservés dans la glacière ou au réfrigérateur, jusqu'à ce qu'ils soient envoyés au laboratoire pour les besoins des analyses dès que possible.



Photo 2 : Mesure des paramètres *in situ* des eaux avec l'appareil multiparamètre Orion Star A239.

2.2 Traitement des données

2.2.1 Contrôle de la qualité des données.

Pour vérifier la fiabilité des données d'analyses, le bilan ionique (BI) de chaque échantillon a été calculé à partir concentrations en méq/L selon la formule suivante :

$$B.I = \frac{\text{méq}(\text{somme des cations}) - \text{méq}(\text{somme des anions})}{\text{méq}(\text{somme des cations}) + \text{méq}(\text{somme des anions})} \times 100$$

Pour une bonne analyse, BI doit être inférieur ou égal à $\pm 5\%$ Appelo et Postma, (2005), Karine (2013). Au-delà, l'analyse doit être revue. Parmi les 24 échantillons exploités, un seul échantillon a une balance ionique est au-delà de $\pm 5\%$. Il s'agit de l'échantillon prélevé sur l'ouvrage DGPZ104 avec BI = -12%.

2.2.2 Méthode de traitement

Différentes méthodes de traitement des données ont été utilisées, afin d'atteindre les objectifs fixés par l'étude. Ces méthodes de traitement sont essentiellement les méthodes graphiques conventionnelles d'interprétation classique des données hydrochimiques et celles d'analyses statistiques multivariées.

En effet, l'emploi de ces méthodes ont permis de montrer comment la salinité des eaux d'irrigation agricole peuvent évoluer vers une salinisation, suite à un écoulement répété et l'effet combiné de l'évaporation et de l'évapotranspiration Nativ et Smith (1987) ; Hamilton et

Helsel (1995) ; Kraft et *al.*, (1999), Rajmohan et *al.*, (2004). Dans une étude réalisée au Sud de l'Inde Rajmohan et *al.* (2004) ont noté qu'en général la composition chimique des eaux souterraines, dans cette région, est influencée par la dissolution et le dépôt de minéraux carbonatés et silicatés l'interaction eau-roche, les phénomènes d'échanges ioniques et leur interaction avec les eaux de surface.

Une étude menée dans les régions de Charlevoix et de la Haute-Côte-Nord au Québec a permis d'identifier cinq principaux facteurs influençant la géochimie des eaux souterraines que sont : la recharge par des eaux de précipitations récentes, les interactions géochimiques eau-roche, les échanges ioniques, la présence d'aquitard d'argile marine ou d'intrusions d'eau salée, et les connexions hydrauliques entre le socle rocheux et les dépôts granulaires surfaciques Ghesquière (2015).

En appliquant la méthode ACP (Analyse en Composantes Principales) de traitement statistique multivariée pour la caractérisation hydrochimique des eaux souterraines, Belkhiri et *al.*, (2010) ont pu montrer que les phénomènes responsables de la variation de la qualité des eaux souterraines sont principalement liés à la présence et la dissolution de minéraux de carbonate, de dolomite et d'évaporite, de processus naturels et d'interactions eau-roche. Dans une étude sur l'hydrogéochimie du fluor dans les eaux souterraines, Travi (1993) préconise que les phénomènes d'échange de base, la précipitation des carbonates de calcium et l'hydrolyse des minéraux silicatés dans les nappes sont favorables à un enrichissement en fluor des eaux. Ces dernières auraient tendance à évoluer vers des faciès hydrochimiques de type « carbonaté sodique » ou « chloruré-carbonaté sodique ». Les études géochimiques et isotopiques de la nappe phréatique des sables quaternaires de Louga ont permis de montrer que la salinité des eaux est marquée par un transit de l'eau au niveau de la zone non saturée El Faïd (1999). L'apport en aérosols marins, l'effet de l'évaporation et les altérations chimiques des aluminosilicates calciques et alcalins constituent les processus déterminants qui contrôlent la minéralisation des eaux de la nappe superficielle de Louga El Faïd (1999).

2.2.2.1 Méthodes d'analyse graphique.

Une bonne organisation des données est préalable à leur bonne exploitation et compréhension D'armore et *al.*, (1983) ; Ghesquière (2015). Dans cette étude, nous avons utilisé des diagrammes binaires des concentrations ou des rapports caractéristiques entre éléments, les diagrammes de Piper et de Stiff, et des courbes d'évolution temporelle pour rechercher l'information dans les données étudiées.

2.2.2.1.1 Les diagrammes binaires

Il s'agit d'une représentation graphique X – Y des concentrations ioniques de deux éléments, ou rapport de concentration ioniques, en fonction des chlorures, le plus souvent. Ces derniers sont des « éléments conservateurs », faiblement solubles et considérés comme des halogènes, non affectées par les réactions d'oxydo-réduction Hussein (2014). Les diagrammes binaires sont utiles surtout pour déterminer les processus géochimiques qui caractérisent l'interaction eau - roche (échange d'ions, précipitation dissolution), évaluer la contamination par actions anthropiques ou par intrusion saline. Les diagrammes inter éléments Cl versus Na, Cl versus Ca, Cl versus NO₃, Ca versus HCO₃, ont été établis pour les 24 échantillons étudiés.

2.2.2.1.2 Les rapports caractéristiques

Les rapports caractéristiques entre éléments (Na/Cl, Ca/Mg, SO₄/Cl, B/Cl...) sont également un moyen très efficace pour la caractérisation hydrogéochimique des nappes. Ces rapports seront choisis en fonction des contextes hydrogéologiques pour élucider les processus géochimiques (intrusion saline, interaction eau-roche...) qui caractérisent l'évolution chimique des eaux souterraines (Hussein, 2014).

Les rapports Mg/Cl, SO₄/Cl, Mg/Ca ont été utilisés dans cette étude pour déterminer l'origine de l'eau de la nappe et évaluer le niveau de l'intrusion saline dans notre secteur d'étude. A côté de ces rapports caractéristiques, nous avons employé l'indice d'échange de base (i.e.b) défini par H. Schoeller (1962). Cet indice, encore appelé « indice chloro-alkalin » permet de ressortir les échanges cationiques ayant lieu dans un aquifère donné et les cations concernés sont Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺ et K⁺ (Schoeller, 1962, 1969 ; in Hussein 2014).

L'indice d'échange de base est donné par l'expression :

$$i. e. b = \frac{[Cl] - [Na + K]}{[Cl]}$$

Cet indice décrit les échanges ioniques entre l'eau et les roches encaissants.

- Si i.e.b = 0 : absence d'échange
- Si i.e.b > 0 il y a fixation de Na⁺ ou K⁺ de l'eau et solubilisation de Ca²⁺
- Si i.e.b < 0 les cations Ca²⁺ et Mg²⁺ de l'eau sont échangés par Na⁺ et K⁺ de la roche.

2.2.2.2 Le diagramme de Piper.

Il est particulièrement adapté à l'étude de l'évolution des faciès hydrochimiques, lorsque la minéralisation augmente, ou bien pour comparer des groupes d'échantillons et indiquer les types de cations et anions dominants. Ce diagramme est composé de deux triangles permettant de représenter les cations et les anions, et d'un losange permettant de donner le nom du faciès

hydrochimique de l'échantillon considéré. Les nuages de point concentrés dans un pôle représentent pour les différents échantillons la combinaison des éléments cationiques et anioniques Olive (1996) ; Sekiou et *al.*, (2014). Dans cette étude, à l'aide du logiciel Diagrammes, le diagramme de Piper a permis de déterminer les principaux faciès chimiques caractéristiques de l'eau de la nappe dans notre zone d'étude.

2.2.2.3 Le diagramme de Stiff

Le diagramme de Stiff (1951) est un polygone correspondant à la courbe représentative des concentrations en meq/L des cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} et $\text{Na}^{+}+\text{K}$) et des anions (HCO_3^- , SO_4^{2-} et Cl^-) reportées sur un système de trois axes horizontaux et parallèles recoupés au milieu par axe vertical, représentant l'origine 0 du système d'axes. Ce diagramme permet de voir rapidement les ions dominants d'un échantillon et la similitude de composition chimique dans un groupe d'échantillons ; les échantillons ayant une représentation géométrique identique reflétant le même faciès ou type hydrochimique. Egalement le logiciel Diagrammes a permis de tracer le diagramme de Stiff des différents échantillons utilisés dans cette étude.

2.2.2.4 Analyses statistiques multivariées

Une bonne approche pour comprendre la chimie des eaux est de faire une investigation sur les relations statistiques qui existent entre leurs constituants dissouts, paramètres physiques, et leurs paramètres environnementaux, telle que la lithologie, en utilisant les méthodes statistiques multivariées Drever (1997) ; Guler et *al.*, (2002). Beaucoup d'auteurs ont ainsi utilisé avec succès les méthodes statistiques multivariées dans leurs études portant sur la caractérisation hydrogéochimique des eaux souterraines Belkhiri et *al.*, (2010) ; Suvedha et *al.*, (2009) ; Kouassi et *al.*, (2012). Dans notre étude, nous avons eu à utiliser l'Analyse en Composantes Principales (ACP) et la Classification Hiérarchique Ascendante. L'outil utilisé est l'extension XLSTAT de Microsoft Excel 2013.

❖ Classification hiérarchique ascendante

Cette méthode permet de classer les échantillons en différents groupes, selon les similarités qui existent entre leurs paramètres chimiques caractéristiques. Les 24 échantillons ont été classés sur la base des 10 paramètres suivants : pH, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{+} et K^{+} , HCO_3^- , NO_3^- , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} et Cl^- . La méthode de classification choisie est celle de Ward (1963) combinée à la distance euclidienne. Cette combinaison est la plus utilisée en hydrochimie et permet d'obtenir une meilleure discrimination entre les différentes classes. D'après Güler (2002) ; L. Belkhiri et al.,

(2010) la classification hiérarchique utilisant la distance euclidienne combinée à la méthode de Ward produit le plus de groupes distincts où chaque élément d'un groupe est plus similaire aux autres membres du groupe que tout autre élément à l'extérieur du groupe. En outre des tableaux de statistique descriptive (valeur minimale, valeur maximale, moyenne, médiane) ont été établis pour caractériser chaque groupe de la CHA.

❖ **Analyse en composantes principales.**

Selon Daget (1976), Bouhsine (2017), l'Analyse en Composantes Principales (ACP) est un outil qui, par l'interprétation de matrices de corrélation aide à ressortir un nombre limité d'axes (vecteurs propres ou "composantes principales") qui expliquent le maximum de variance du set de données pouvant permettre de retrouver une bonne corrélation avec les paramètres utilisés dans l'analyse.

Cette méthode permet de même à réduire le nombre de variables de départ et de voir à travers les composantes principales, les paramètres qui déterminent le plus la variabilité des données. Dans cette étude, l'ACP a été réalisée en utilisant le logiciel XLSTAT. Au total 24 échantillons ont été analysés sur la base de 11 paramètres que sont : la conductivité électrique, le pH, les cations Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ et K^+ , et les anions HCO_3^- , NO_3^- , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} et Cl^-

Conclusion

Les méthodes d'analyse graphique conventionnelles combinées aux méthodes statistiques multivariées sont très utilisées dans la caractérisation hydrochimique des eaux souterraines. Dans cette étude elles nous ont permis d'aboutir aux différents résultats présentés dans le chapitre 4.

CHAPITRE 3 : PROCESSUS D'EXPLOITATION

Introduction

Toute exploitation minière tient compte des caractéristiques du mode de gisement et des risques environnementaux éventuels. Ainsi, le mode d'exploitation mis en place par GCO est le système de dragage sur lac artificiel. Nous avons tiré cette synthèse des travaux de Dieye (2015) et Djigo (2017) qui donnent plus de détails sur la technique et les processus de valorisation des minerais employés par GCO. Le circuit d'exploitation comprend deux « unités mobiles » que sont la drague et l'usine de concentration et une « unité fixe » qu'est l'usine de séparation.

3.1 Le circuit d'exploitation

A) La drague

C'est une machine qui flotte dans un bassin de dragage artificiel de 500 mètres de long sur 200 mètres de large. Durant la première année, le niveau d'eau du bassin de dragage correspondait au niveau statique de la nappe. Les pertes du bassin sont essentiellement le volume aspiré par la drague et l'évaporation. La drague (Figure 13) représente le premier maillon de la chaîne d'exploitation. Elle est dénommée « YEENE » en langue locale. Elle possède un bras (échelle) de 7.6m longueur pouvant effectuer une rotation de 45° par rapport à l'horizontal et à l'extrémité duquel est fixée une lame de coupe rotative (désagrégateur). Le rôle principal de la lame de coupe est de décompacter le sable par des mouvements d'agitation sur le périmètre d'action de la pompe principale. Après décompactage, les sables sont emportés en chute par un puissant jet d'eau envoyé par la drague. Ensuite la pompe principale va aspirer les sables minéralisés sous forme de pulpe qui est transportée (via un tuyau flexible flottant de 1 m de diamètre) vers l'usine de concentration humide (**WCP**) située en amont de la drague.

Elle est reliée à l'usine de concentration par une conduite d'alimentation en pulpe dont le mélange est composé de 22% sable 78% d'eau en moyenne. En principe, si les conditions d'un bon fonctionnement sont réunies, l'exploitation par drague est beaucoup plus rentable que les autres méthodes en vigueur, étant donné ses coûts de revenus relativement plus faibles pour une tonne de minerai extrait.



Figure 11: Drague de GCO (d'après Djigo, 2017)

B) L'usine de concentration humide (WCP)

Ayant pour rôle principal de séparer les minéraux lourds des stériles, cette usine représente le deuxième maillon de la chaîne d'exploitation minière de GCO. Elle forme une étape très importante du processus de valorisation des minerais mis en place par GCO.

La pulpe aspirée par la pompe principale est traitée à ce niveau par deux méthodes principales que sont le tamisage et la gravimétrie. Ainsi, l'eau joue un rôle essentiel dans tout le circuit de traitement du minerai à GCO. Le WCP (Wet Concentration Plant) est composé de trois éléments principaux que sont : le silo de stockage (« Surg bin »), les spirales et le module de densification des terrils (« boomstacker »).



Figure 12 : Les différentes unités de l'usine de concentration humide (WCP) (d'après, Djigo, 2017)

C) Le silo de stockage

C'est dans cette partie de l'usine WCP qu'arrive la pulpe aspirée et acheminée à travers le tuyau flexible. Ce canal possède deux prolongements de chemins opposés qui servent à déverser la pulpe dans des tamis rotatifs (trommels) présentant des ouvertures de maille 03 mm de diamètre. Une première séparation est réalisée au niveau de ces trommels où les particules de taille supérieure à 03 mm sont déversées dans le bassin de dragage alors que la partie de la pulpe qui traverse les tamis (fraction passante) est stockée dans des puisards avant d'être envoyée par la suite vers les distributeurs des « Surg bin » au moyen des pompes d'alimentation des cyclones. Ensuite, la pulpe brute va être débarrassée de son « excès d'eau » au niveau des distributeurs, et le produit humide résultant stocké dans le « Surg bin ». L'excès d'eau qui a été récupéré est fractionné ensuite en deux parts égales : l'une servira à enlever les refus au niveau des tamis et assurer leur nettoyage ; l'autre partie est stockée dans des réservoirs et servira au besoin à fluidifier une nouvelle pulpe et contrôler ainsi sa densité. Enfin, le produit humide stocké dans le « Surg bin » est pompé vers les spirales pour séparation.

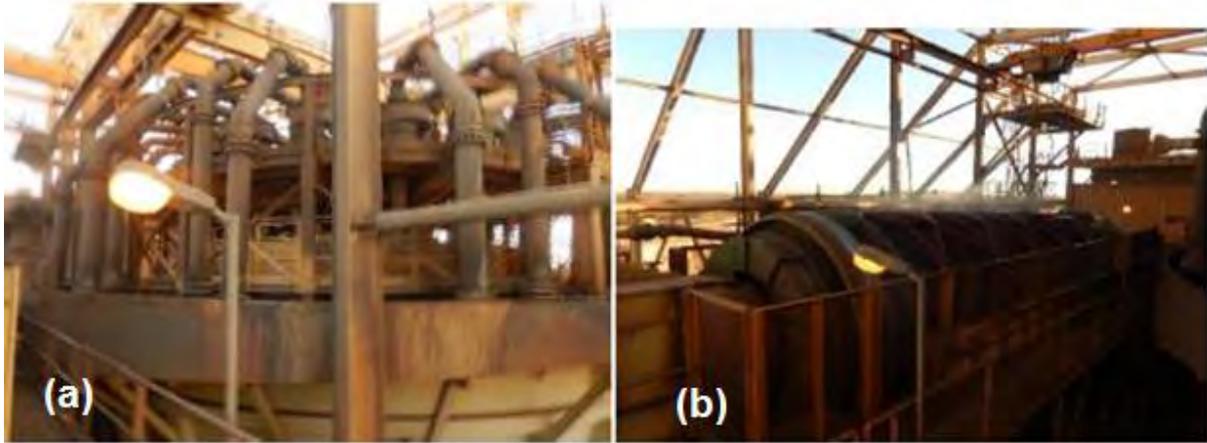


Figure 13: bassin de stockage (a) et tamis rotatifs (b) (D'après Dieye, 2015)

D) Les Spirales

A ce niveau, la pulpe issue du « Surg bin » est subdivisée en 04 parties par le distributeur principal. Chacune partie est envoyée vers un distributeur secondaire raccordé à un tuyau d'alimentation. A travers ces tuyaux, la pulpe va parvenir à un distributeur par gravités où s'opère une séparation via 5 types de spirales différenciés par la qualité du produit obtenu. Ce sont :



Figure 14: Photo du système des spirales

- **Les spirales rugueuses**

Quatre types de produits sont obtenus au niveau de ce type de spirales. Ce sont, essentiellement :

- les concentrés qui seront envoyés vers les spirales de « relavage »
- les concentrés rugueux qui seront pompés vers les spirales de lavage
- les produits médiocres seront envoyés vers les spirales des produits médiocres
- les rejets seront envoyés à l'arrière de la drague et seront considérés comme stériles.

- **Les spirales des produits médiocres.**

Ces spirales traitent les produits médiocres venant des spirales rugueuses pour donner deux produits que sont 1) les concentrés qui seront envoyés vers les spirales de lavage et 2) les rejets qui sont évacués vers les stériles ou TDM.

- **Les spirales de lavage**

C'est à ce niveau que les concentrés rugueux provenant des spirales rugueuses combinés à ceux provenant des spirales des produits médiocres aboutissent pour une autre séparation, plus fine. Les produits médiocres issus de cette séparation seront retournés au niveau de ces mêmes spirales de lavage alors que les rejets seront envoyés vers les spirales des produits médiocres.

- **Les spirales de « relavage »**

Les concentrés issus des spirales rugueuses et des spirales de lavage vont subir une nouvelle séparation à ce niveau. Les produits médiocres qui découlent de cette séparation seront retournés dans le même circuit de ces spirales et les rejets seront envoyés vers les spirales de lavage. Enfin les concentrés issus de cette séparation seront conduits vers les spirales de finition pour la dernière étape de la séparation.

- **Les spirales de finition**

C'est cette étape qui donne le produit final, concentré en minéraux lourds issu du WCP qui représente la matière première de l'usine de séparation. Ce concentré communément appelé HMC (Heavy Mineral Concentrate) sera stocké dans un puisard de stockage appelé « stockpile ». Les produits médiocres issus de ces spirales sont retournés dans ces derniers et les rejets vont être renvoyés vers les spirales de « relavage ». Au finish, la séparation au niveau du WCP permet de passer d'une pulpe à 2% à une pulpe à environ 88.5% de concentrés en minéraux lourds.

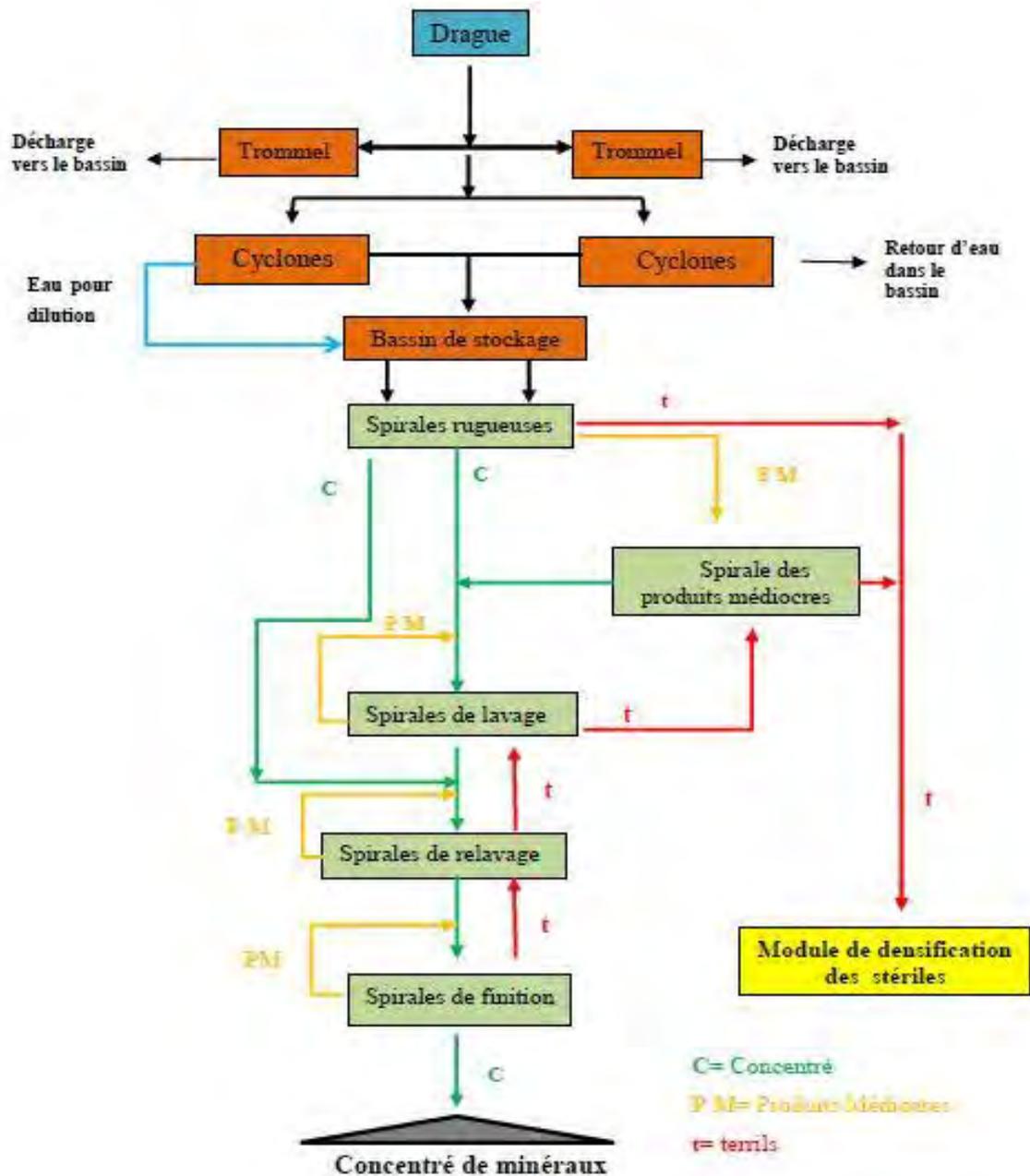


Figure 15: Organigramme du circuit de la pulpe dans le WCP (D'après DJIGO, 2017)

E) Les rejets de sables

Le WCP concentre les minéraux lourds tandis que Les terrils ou rejets de sable sont déposés à l'arrière du bassin. Ce dépôt s'effectue par une flèche gerbeuse sur une distance maximale de 120 m. s'effectue au fur et à mesure que le WCP avance. Au-delà, les rejets sont transportés par des conduites de refoulement. Ils servent à la reconstruction progressive de la morphologie des dunes. Ces terrils, par leur saturation en eau, créent un dôme piézométrique mobile suivant derrière le bassin dans son cheminement. Tout naturellement, ce dôme a tendance à s'abaisser par le biais d'un écoulement latéral mais il est continuellement recréé par les dépôts 7j/7 et 24h/24. Les seuls arrêts sont justifiés par une

panne ou une maintenance préventive. Les terrils sont rejetés à l'arrière du bassin après la concentration de minerais lourds, sous forme de pulpe composée de 65 % solide et 35 % d'eau.

F) L'usine de séparation de minerais (MSP).

L'objectif du travail effectué au niveau du WCP est de séparer les minéraux lourds du sable ou stérile. Par contre, au niveau de l'usine MSP de séparation du minerai, il est question de différencier les quatre types de minéraux lourds que sont le zircon, l'ilménite, la leucoxène et le rutile. L'usine MSP comporte deux circuits de séparation :

- Un circuit de concentration par voie humide

Dans ce circuit, il s'agit d'abord d'éliminer par tamisage les particules grossières (des grains de quartz en général). Ensuite le produit est fluidifié et puis soumis à une séparation magnétique pour isoler les particules magnétiques qui vont subir une nouvelle séparation dans le circuit de concentration par voie sèche. Quant aux particules magnétiques elles vont rester dans le circuit et vont être envoyées d'abord dans des spirales puis sur des tables à secousses pour accroître la teneur en minéraux lourds jusqu'à environ 98%.

Les fines contenues dans le produit seront éliminées en utilisant la méthode de séparation par densité. Le produit final ainsi obtenu sera classé en trois types selon leur qualité dénommés « Cons1 », « Cons2 » et « Cons3 » qui est moins riche en zircon et avec un taux important en TiO_2 .

- Un circuit de concentration par voie sèche

Ici les produits "Cons1", "Cons2" et "Cons3" seront traités d'une part et d'autre part les particules magnétiques initialement isolées dans le circuit de concentration par voie humide subiront également une nouvelle séparation.

Les concentrés "Cons1", "Cons2" et "Cons3" sont d'abord séchés puis soumis à une séparation électrostatique. A l'issue de cette opération, les minéraux prennent deux chemins différents : d'un côté vers les « conducteurs » et de l'autre côté vers les « non conducteurs ». Les « conducteurs » sont séparés à leur tour par la méthode magnétique et vont donner le leucoxène et le rutile. Et les « non conducteurs » subiront une séparation électromagnétique pour donner le « premium zircon » et le « standard zircon ».

De l'autre côté, les particules magnétiques vont être séparées dans un premier temps par l'électrostatique pour isoler les « conducteurs » des « non conducteurs ». Ensuite, les conducteurs seront séparés par voie magnétique et vont donner les meilleures qualités d'ilménites telles que le « $58TiO_2$ » et le « $54TiO_2$ ». Les non conducteurs sont en général constitués d'une petite quantité de zircon, du quartz et du stauroélite.

3.2 Les besoins en eau de la mine.

3.2.1 Importance de l'eau dans la mine.

Comme nous l'avions déjà évoqué, l'eau occupe une place primordiale dans le système d'exploitation opéré par GCO. Et parmi les fonctions jouées par l'eau dans la mine, nous pouvons citer :

- Le maintien du bassin à un niveau optimum pour permettre à la drague et à l'usine WCP de concentration humide de bien flotter et de se déplacer au cours des opérations d'exploitation.
- L'obtention de la pulpe avec les sables minéralisés abattus par la drague et permettre ainsi leur séparation au niveau de l'usine WCP de concentration humide.
- Permettre la séparation des différents minéraux lourds au niveau de l'usine MSP de
- Satisfaire les besoins en eau potable du personnel.

Toutes ces fonctions sont essentiellement assurées par les eaux souterraines superficielle et profonde de la zone d'étude.

3.2.2 Sources d'approvisionnement en eau de la mine

3.2.2.1 Les forages superficiels

Ces ouvrages captent la nappe des sables du quaternaire. Ce sont des forages de recyclage réalisés pour ;

- approvisionner le bassin en recyclant le maximum d'eau infiltrée à partir des terrils ;
- parer au risque environnemental d'inondation des Niayes et des périmètres maraichers qui bordent la mine sous l'action d'importantes infiltrations en provenance des rejets de sables.

La première série composée de 48 forages de recyclage a été implantée parallèle et distante des dunes minéralisées de 100 m. Cette bande de 100 m constitue la zone tampon qui sépare le chemin minier des périmètres maraichers. Par la suite, d'autres ont été implantés dans la bordure Ouest des deux premières passes minières. Ces forages appelés « Containment bores » assurent un recyclage continu de l'eau dans le bassin de dragage. Ainsi ils sont pompent à tour de rôle suivant la position du dôme piézométrique et sur base du bilan hydrique issu des résultats du modèle hydrogéologique de la zone.

3.2.2.2 Les forages profonds

Ils captent la nappe profonde du Maastrichtien et sont au nombre de 13. Ils ont un espacement compris entre 1.5 et 2.5 km et produisent un débit moyen de 160 m³/h chacun. Ils servent en grande

partie à combler les différentes pertes d'eau du bassin de dragage dues à l'évapotranspiration et aux infiltrations à l'approvisionnement en eau potable pour les besoins du personnel de la mine Le schéma (Figure 16) suivant montre en détail les sources d'approvisionnement en eau du bassin.

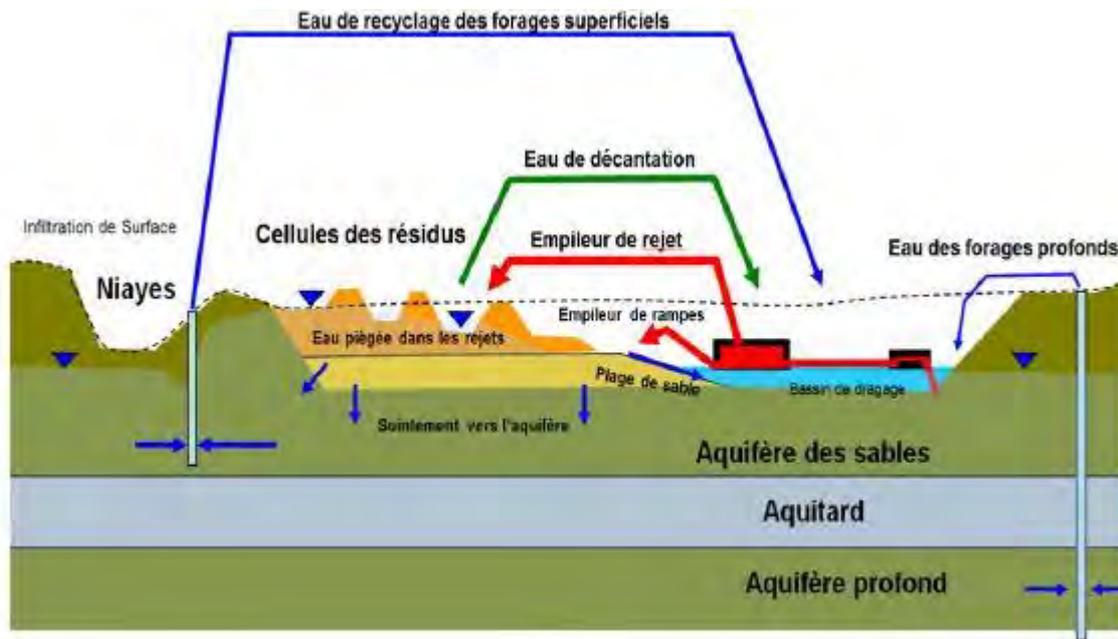


Figure 16: Schéma du processus des flux d'eau à la mine

CHAPITRE 4 : RESULTATS ET DISCUSSION

Introduction

Nous allons présenter dans ce chapitre les principaux résultats obtenus dans notre étude. Il s'agira d'abord de parler de l'effet des pompages liés à l'exploitation minière puis de faire une caractérisation hydrochimique de la NSQ afin d'évaluer l'impact de l'exploitation des sables minéralisés dans la zone minière de Diogo.

4.1 Effets de l'exploitation minière sur la nappe superficielle

Pour étudier l'effet des pompages liés à l'exploitation des sables minéralisés, nous avons choisis 15 forages superficiels (CB) et 15 piézomètres (PZCB) qui leurs sont associés.

Le choix des ouvrages est basé sur leur localisation, de façon à subdiviser la zone d'étude en trois parties selon la disponibilité des données en vue d'avoir une bonne représentativité de la zone. Dans chaque groupe, cinq forages superficiels et cinq piézomètres associés ont été choisis (Figure 17).

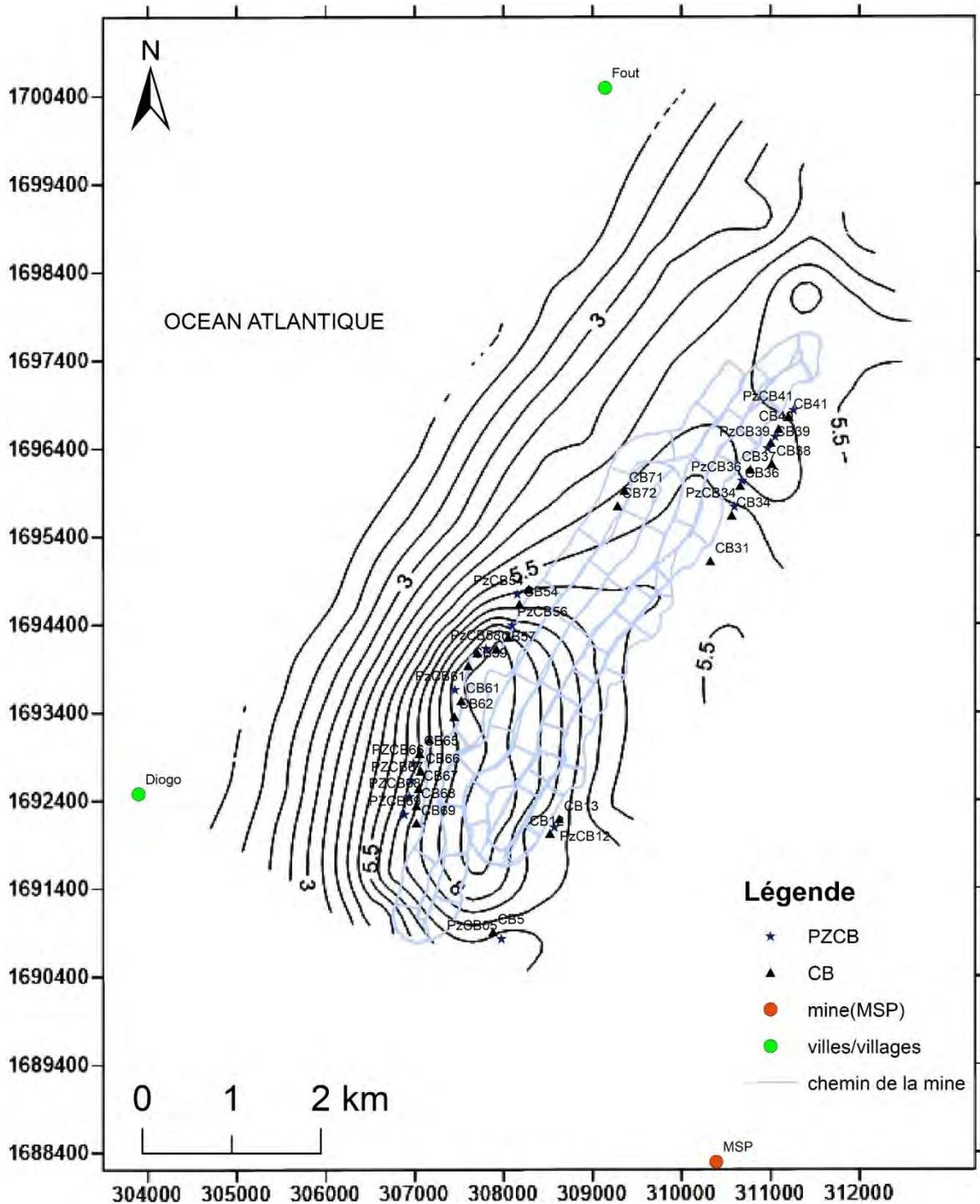


Figure 17 : Carte piézométrique de la zone montrant la localisation des ouvrages choisis

Cette carte met également en évidence les niveaux piézométriques de la nappe dans la zone d'étude en avril 2019. Elle indique un dôme piézométrique contrôlé par le bassin de dragage et les terrils gorgés d'eau.

Les graphiques de la Figure 18 illustrent l'effet des pompages de recyclage sur l'évolution piézométrique de la nappe superficielle dans la zone active de la mine. Elles donnent une représentation assez complète du processus de récupération des flux d'infiltration issus de la mise en dépôt des terrils. Le processus a été bien décrit par Seck (2018) comme suit :

- Mise en dépôt des terrils ;
- Propagation des flux d'infiltration provenant des terrils sur une longueur moyenne de 1 km ;
- Rehaussement du niveau de la nappe supérieure au voisinage de la mine jusqu'à environ +0.5 m (seuil de rabattement autorisé par les licences d'exploitations des forages de recyclage) et allant parfois jusqu'à + 1.20 mètres ;
- Déclenchement des pompages de recyclage ;
- Baisse du niveau de la nappe jusqu'en -0.5m du niveau statique initial des piézomètres ;
- Arrêt des pompages de recyclage ;
- Remontée du niveau dynamique vers le niveau statique.

On voit sur les trois graphiques de la figure 18 que le niveau piézométrique est resté en moyenne constant à l'intérieur de la zone minière depuis le début des exploitations en 2013. Les courbes DGPZ68 (figure18a), DGPZ58 et DGPZ17 (figure 18c) illustrent bien cela. Cependant des fluctuations considérables sont notées en certaines périodes et sont liées essentiellement aux prélèvements de recyclage de l'eau d'infiltration issue des dépôts des terrils au niveau de la mine. Ceci est visible, par exemple à travers les fluctuations observables sur la période avril – juillet 2017 (Figure 18c) ou bien sur la période avril-juillet 2016 (Figure 18b). En plus de ces fluctuations majeures, il apparaît sur les courbes d'évolution piézométrique de petites fluctuations pouvant être liées aux variations saisonnières de la nappe.

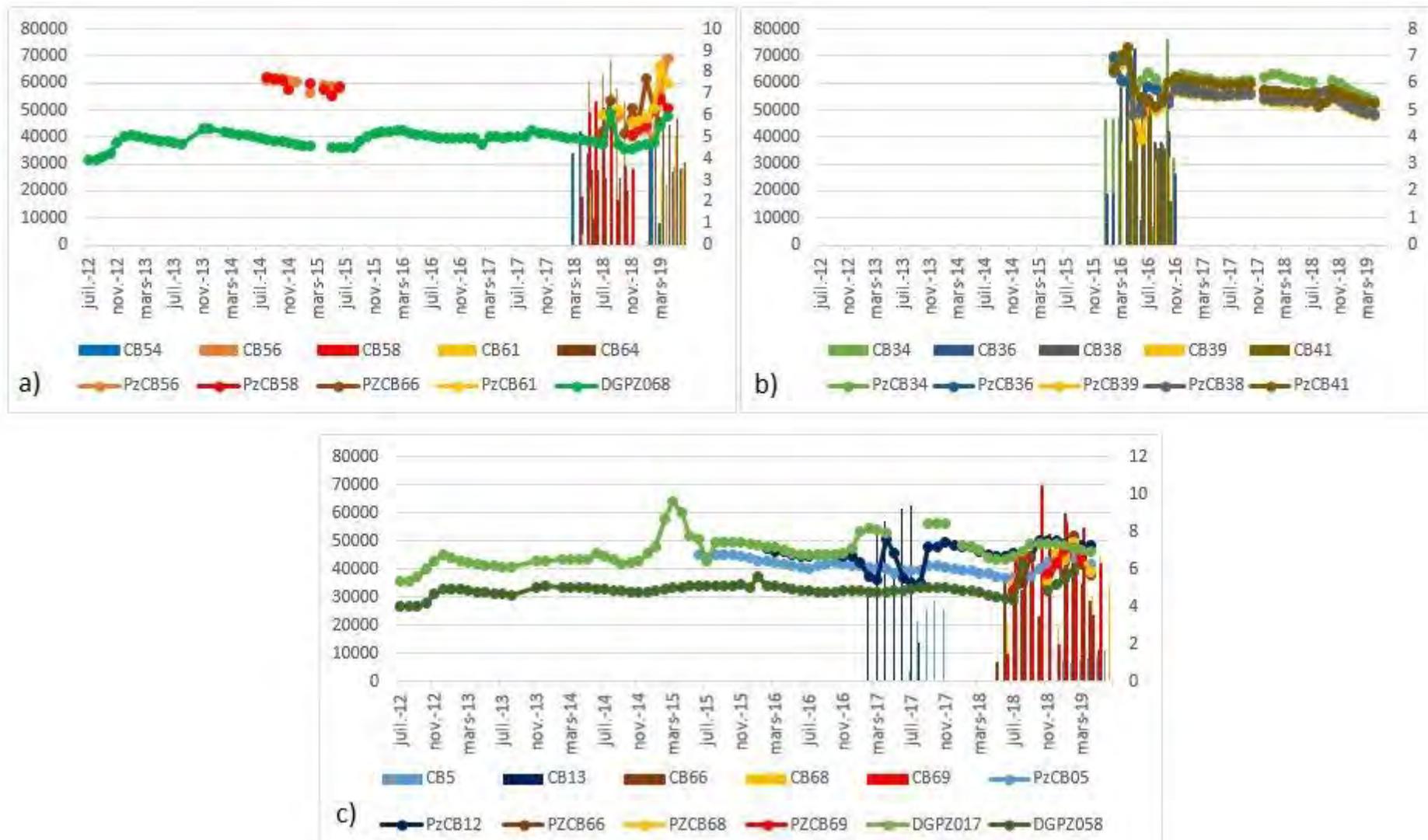


Figure 18: Comparaison entre débits prélevés (diagramme en bâtonnets) et variations piézométriques (courbes) de 2012 à 2019

Cependant au niveau des piézomètres situés dans la partie Ouest de la zone d'étude, (Figure 19) plus éloignée de la zone active, nous pouvons noter une tendance de baisse générale du niveau piézométrique sur la période juillet 2012- avril 2019 d'environ 0.88 cm figure 20. Cette baisse du niveau piézométrique serait surtout liée aux prélèvements des maraichers qui sont très considérables dans la zone des Niayes en général et dans notre zone d'étude en particulier. Toutefois, cette tendance baissière est caractérisée par des hausses du niveau essentiellement due à l'impact de précipitations annuelles.

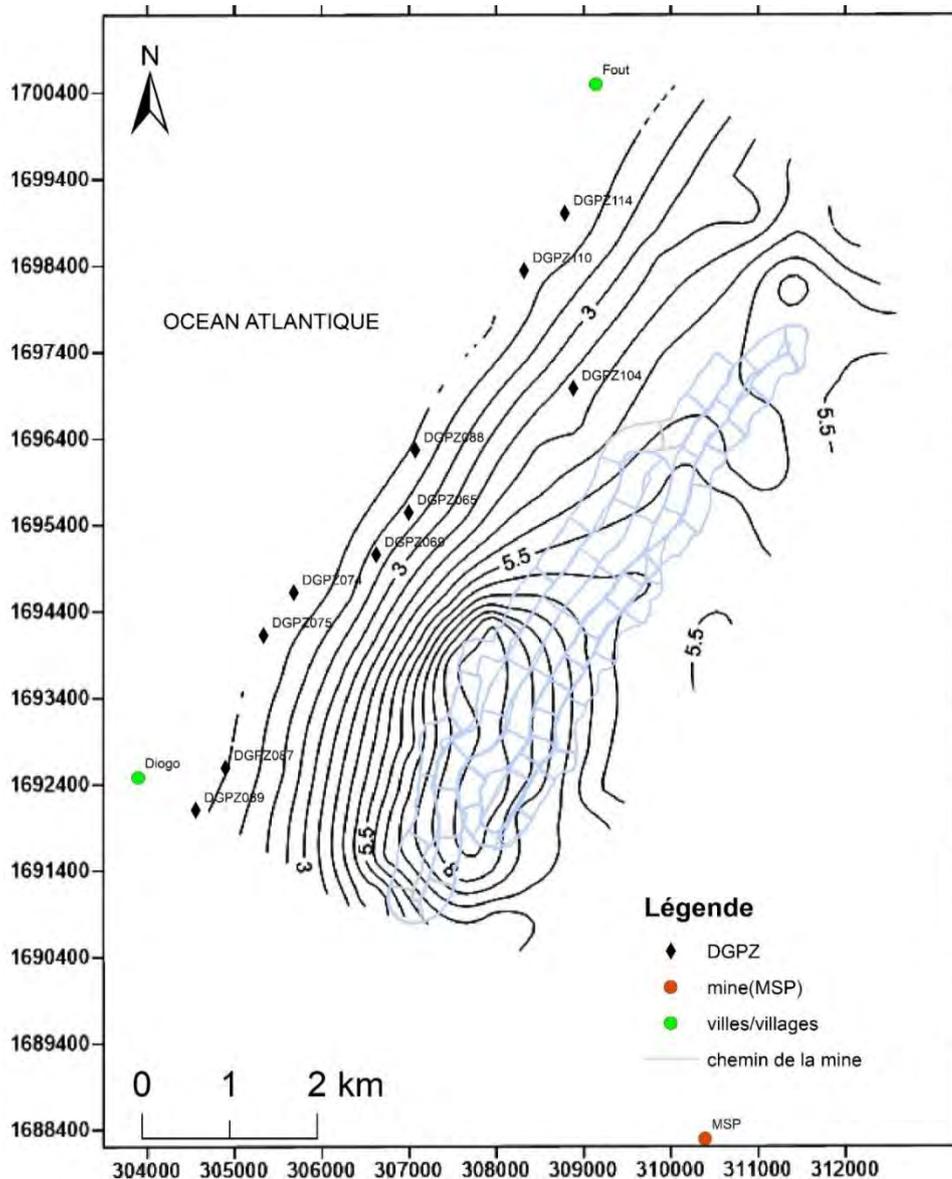


Figure 19: Carte piézométrique de la zone montrant la localisation des ouvrages choisis sur la partie Ouest de la zone d'étude

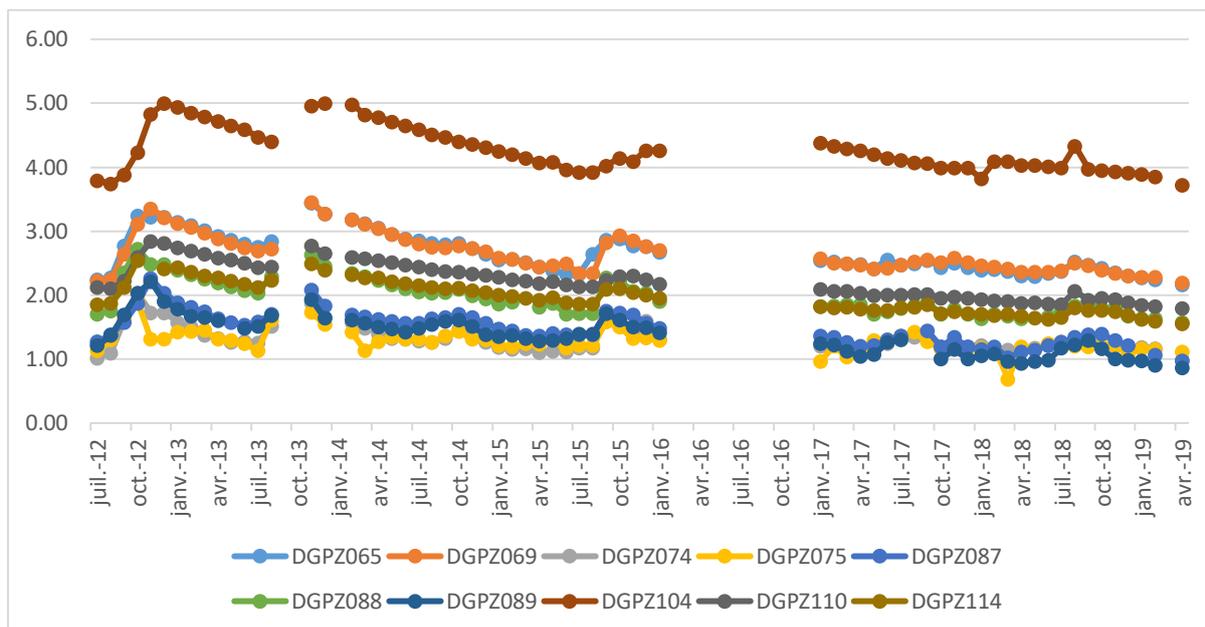


Figure 20 : Chronique piézométrique (juillet 2012-avril 2019) de piézomètres de la partie Ouest de la zone d'étude.

4.2 Analyse statistique multivariée des données

❖ Classification hiérarchique ascendante (CHA)

Cette méthode statistique permet de regrouper des données en classes différentes selon leur particularité. Le regroupement s'effectue de telle sorte que les objets semblables se retrouvent dans la même classe Danielson et *al.*, (1999) ; Suvedha et *al.*, (2009). Le résultat est donné sous forme de dendrogramme où nous pouvons voir les différentes classes.

La CHA a abouti au dendrogramme de la Figure 21. Elle a permis de regrouper les 24 échantillons en 5 classes, dont deux (classes C3 et C4) ne comportent qu'une seule observation chacune (Tableau1). La classe C1 comporte 3 observations, la classe C2 compte 16 observations et la classe C5 compte 3 observations.

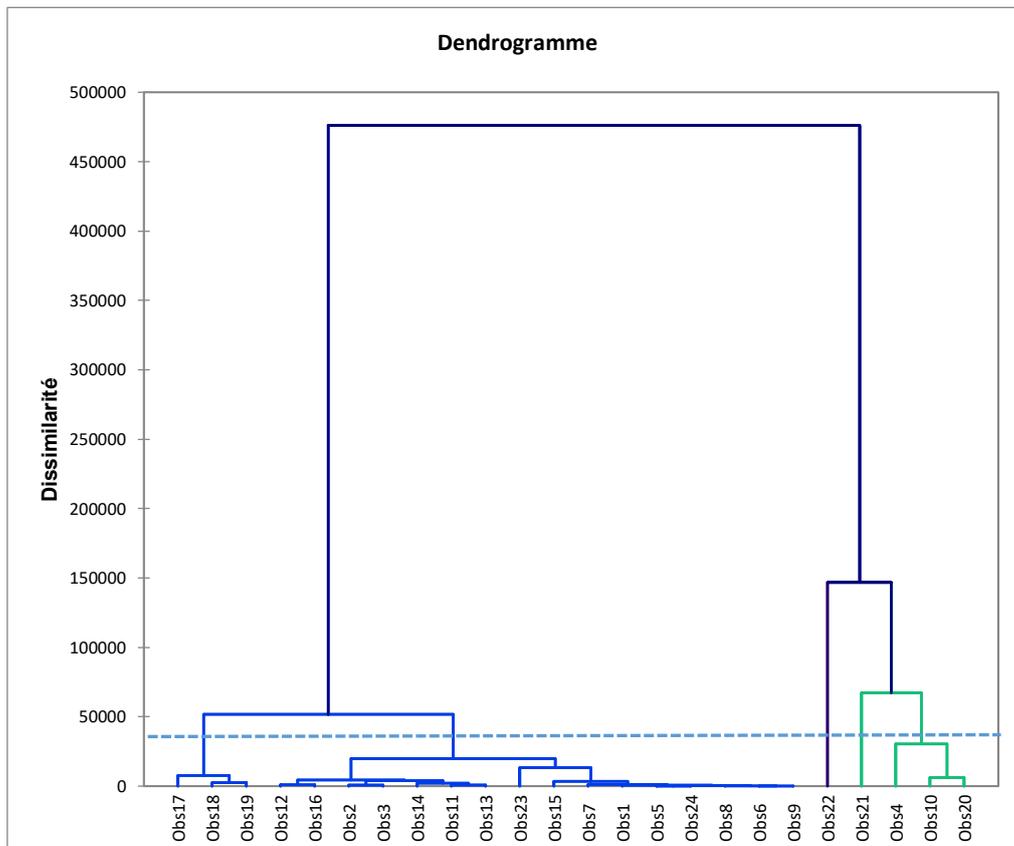


Figure 21 : Dendrogramme des classes issue de la CHA.

Tableau 1 : Répartition des échantillons en classes et groupes d'après la CHA

Observation	Classe	Groupe
DGPZ27	C2	G1
DGPZ54	C2	G1
DGPZ68	C2	G1
DGPZ74	C5	G2
DGPZ77	C2	G1
DGPZ87	C2	G1
DGPZ92	C2	G1
DGPZ101	C2	G1
DGPZ107	C2	G1
DGPZ110	C2	G2
DGPZ201	C2	G1
DGPZ206	C2	G1
PZCB19	C2	G1
PZCB45	C2	G1
DGPZ72	C2	G1
DGPZ75	C2	G1
DGPZ104	C1	G2
PZCB16	C1	G2
PZCB23	C1	G2
EW1	C5	G2
EW3	C4	G2
EW5	C3	G2
EW7	C2	G1
EW8	C2	G1

Pour faciliter l'interprétation, nous avons regroupé les différentes classes en deux groupes principaux : un groupe G1 composé des éléments de la classe 2 et un groupe G2 composé des éléments des autres classes C1, C3, C4 et C5. Voir tableau 2.

Tableau 2: Répartition en groupes d'après la CHA

G1	G2
DGPZ54	DGPZ 104
DGPZ68	PZCB 16
DGPZ201	PZCB 23
DGPZ206	DGPZ74
PZCB19	DGPZ110
PZCB45	EW1
DGPZ 75	EW3
DGPZ27	EW5
DGPZ77	
DGPZ87	
DGPZ92	
DGPZ101	
DGPZ107	
DGPZ 72	
EW7	
EW8	

Sur la figure 22 nous avons la localisation des ouvrages des groupes G1 et G2.

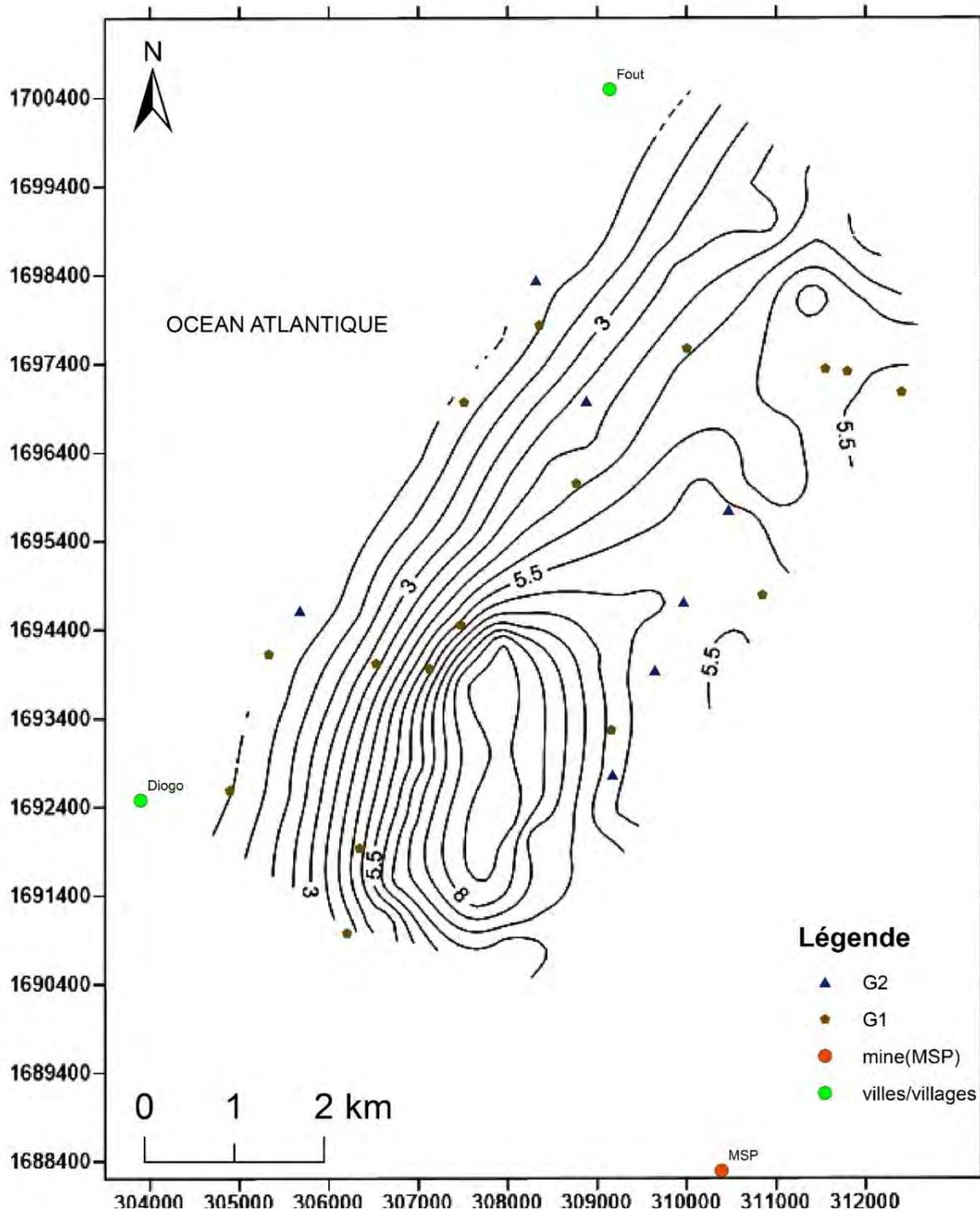


Figure 22: carte de localisation des ouvrages des groupes G1 et G2

Une analyse comparative des statistiques descriptives de ces deux groupes (Tableaux 2 et 3) permet de voir que les paramètres permettant de distinguer les groupes G1 et G2 sont essentiellement : la conductivité électrique, les teneurs en HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} et $\text{Na}^+ (\pm\text{K}^+)$

Pour la conductivité électrique, le groupe G2 présente un maximum de 2098 $\mu\text{S/cm}$ contre 541 $\mu\text{S/cm}$ pour le groupe G1. Les valeurs moyennes sont respectivement de 1308.74 $\mu\text{S/cm}$ (G2) et 314 $\mu\text{S/cm}$ (G1).

Pour la concentration en ions bicarbonates (HCO_3^-), le groupe G2 présente un maximum de 516mg/l, contre 146.4mg/l pour le groupe G1, avec des moyennes respectives de 227.869mg/l (G2) et 74.421 (G1).

Pour les chlorures (Cl^-) le groupe G2 présente un minimum de 143mg/l, contre 8.76mg/l pour le groupe G1. La concentration maximale est de 367mg/l pour le groupe G2 et de 99.360mg/l pour le groupe G1, avec des moyennes respectives de 227.771 (G2) et de 46.287 (G1).

Tableau 3: Statistique descriptive des éléments du groupe G1

Statistique	pH	CE	CO_3^{2-}	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	NO_3^-	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+
Minimum	5.84	128.00	0.00	2.53	8.76	3.07	0.40	4.17	1.17	9.21	1.31
Maximum	7.32	541.00	0.00	146.40	99.36	119.00	54.12	60.10	20.46	38.00	6.70
Médiane	6.42	271.50	0.00	70.15	41.71	13.30	2.06	29.03	7.17	22.87	1.99
Moyenne	6.48	314.00	0.00	74.42	46.29	23.51	6.82	25.77	8.06	23.14	2.58

Tableau 4: Statistique descriptive des éléments du groupe G2

Statistique	pH	CE	CO_3^{2-}	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	NO_3^-	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+
Minimum	6.36	330.90	0.00	93.40	143.00	2.98	1.00	14.00	4.48	73.10	2.72
Maximum	7.79	2098.00	0.00	516.00	367.00	392.00	100.00	200.00	59.96	256.00	11.60
Médiane	7.28	1336.50	0.00	191.28	202.22	59.40	1.00	74.07	23.60	109.46	7.23
Moyenne	7.17	1308.74	0.00	227.87	227.77	104.70	21.83	91.45	26.72	126.72	6.98

Pour la concentration en ions sulfates (SO_4^{2-}), la valeur maximale est de 392.00 mg/l chez le groupe G2 et de 119.00 mg/l chez le groupe G1, pour des moyennes respectives de 104.698 mg/l (G2) et 23.511 mg/l (G1).

Pour ce qui concerne les concentrations en ions Ca^{2+} et Na^+ , les maximums sont respectivement 200.00 mg/l et 256.00 mg/l chez le groupe G2, contre 60.100 mg/l et 38.00 mg/l chez le groupe G1. Les moyennes respectives sont 74.066 mg/l (pour Ca^{2+}) et 109.455 (pour Na^+) chez le groupe G2 contre 25.769 mg/l (pour Ca^{2+}) et 23.137 mg/l (pour Na^+) chez le groupe G1.

En somme le groupe G2 se distingue du groupe du groupe G1 par des valeurs de conductivités beaucoup plus importantes mais également par des concentrations nettement plus élevées en HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} et Na^+ ($\pm\text{K}^+$). Le groupe G2 est donc caractéristique des eaux les plus minéralisées de la zone d'étude.

❖ Analyse en composantes principales

Dans le but de connaître les processus géochimiques contrôlant la minéralisation des eaux de l'aquifère des sables du littoral Nord au niveau de Diogo, une Analyse en Composantes Principales (ACP) a été effectuée sur la base des paramètres physico-chimiques mesurés sur les échantillons.

Les résultats de l'ACP montrent deux facteurs essentiels, F1 et F2, qui expliquent 91.12% de la variance totale des données. Ces deux facteurs expliquent chacun des variances respectives de 71.39% et 19.63% et pourraient donc suffire à la compréhension des mécanismes géochimiques qui prédominent au sein de l'aquifère étudié.

Tableau 5 : *Corrélation entre les facteurs et les paramètres.*

	F1	F2
pH	0.910	-0.094
CE	0.996	0.011
HCO_3^-	0.864	-0.422
Cl^-	0.945	-0.248
SO_4^{2-}	0.584	0.754
NO_3^-	0.510	0.811
Ca	0.872	0.460
Mg	0.902	0.062
Na	0.883	-0.413
K	0.850	-0.321

Le Tableau 4 montre que le facteur F1 est fortement corrélé au pH, à la conductivité électrique CE, et aux ions bicarbonates (HCO_3^-), chlorures (Cl^-), calcium (Ca^{2+}), magnésium Mg^{2+} , sodium (Na^+) et potassium (K^+). Ce facteur semble refléter le processus primaire de minéralisation totale des eaux de la nappe, à travers l'interaction eau/roche.

Les deux variables sulfates SO_4^{2-} et nitrates NO_3^- sont les seules à charger très nettement sur le facteur F2 que l'on pourrait donc relier à un phénomène secondaire de pollution des eaux par ces substances d'origine anthropique. Mais, certaines variables déjà alignées sur F1 montrent aussi une charge pondérale, non négligeable sur ce facteur. C'est le cas par exemple des ions HCO_3^- , Ca^{2+} , Na^+ (et $\pm\text{K}^+$) dont les charges pondérales négatives sont et presque comparables

(-0.422, -0.46, -0.413 et -0.321, respectivement. Leur opposition à SO_4^{2-} et NO_3^- sur F2 pourraient refléter en rapport avec les processus secondaires d'échanges d'ions dans lequel les ions Na^+ et Ca^{2+} sont particulièrement impliqués.

Nous présentons sur la Figure 23, les projections de variables et des individus (observations) dans le plan bidimensionnel F1 – F2. On remarque que les individus qui corréleront bien avec le facteur F1 (essentiellement regroupés dans le quadrant gauche) appartiennent au groupe G2 de la classification hiérarchique ascendante (CHA), correspondant aux eaux de plus forte minéralisation totale dans la zone d'étude, avec des teneurs en chlorures pouvant atteindre 367.00 mg/l et des valeurs de conductivités allant jusqu'à 2098 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Par contre, les échantillons qui présentent les conductivités électriques et teneurs en chlorures les plus faibles sont corrélés avec le facteur F2.

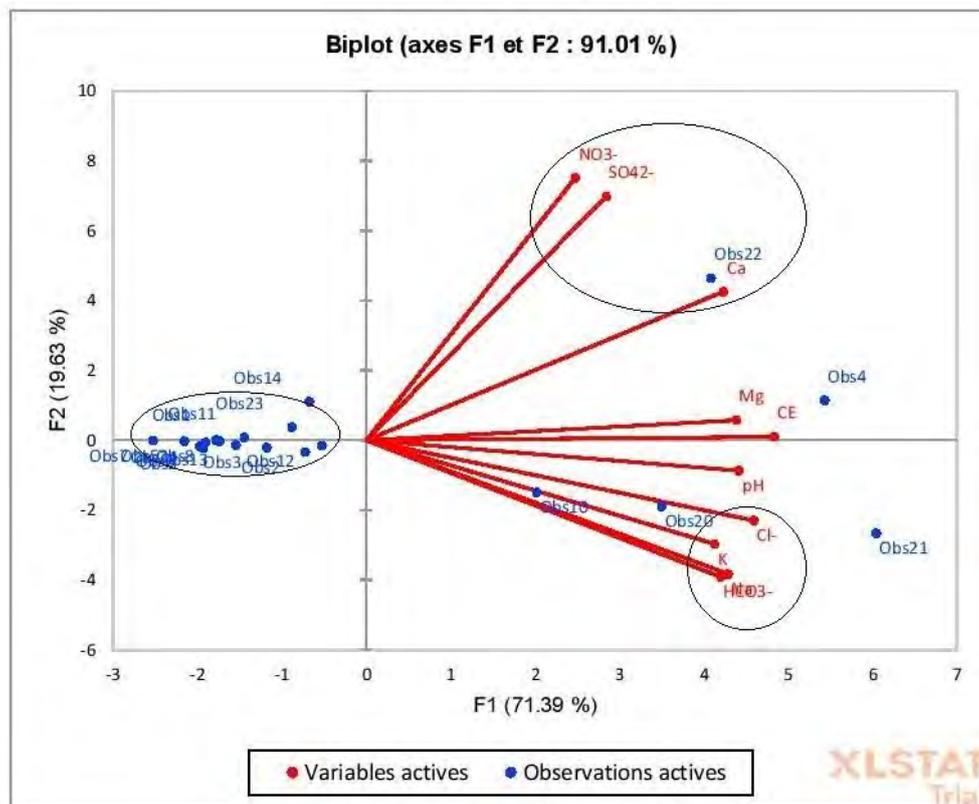


Figure 23: Plot des variables et individus dans le plan F1 – F2

4.3 Caractérisation physico chimique des eaux

En fonction des paramètres étudiés, des statistiques descriptives ont été effectuées. Le PH moyen des eaux souterraines est de 6.71. Les valeurs de CE obtenues témoignent que les eaux de la zone d'étude sont faiblement minéralisées avec une moyenne de 656.53 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Néanmoins on note la présence d'eaux fortement minéralisées avec un maxima de 2143 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Pour les

éléments chimiques la teneur maximale en Cl⁻ est de 367.00mg/l, la valeur maximale 8.76mg/l avec une moyenne de 106.78mg/l. Les ions HCO₃⁻ ont une valeur maximale de 516.00mg/l, une valeur minimale de 2.53mg/l et une moyenne de 125.57mg/l. Les concentrations en Ca et Na sont semblables avec une valeur maximale de 256.00mg/l, une valeur minimale de 9.21mg/l et une moyenne de 57.66mg/l pour le sodium. Les teneurs en Mg et K sont les plus faibles avec des valeurs maximales respectives de 59.96mg/l et 11.60mg/l, des valeurs minimales d'environ 1mg/l et une moyenne de 14.28mg/l pour les ions Mg et 4.05mg/l pour les ions K. les valeurs en SO₄²⁻ et NO₃²⁻ sont en général faibles. Cependant elles sont parfois élevées avec une teneur maximale de 392.00mg/l pour les ions SO₄²⁻ et 100.00 mg/l pour les ions NO₃²⁻. Ces teneurs considérables seraient liées à la contamination anthropique liée aux intrants utilisés par les maraichers.

Tableau 6 : Statistiques descriptives des paramètres physico-chimiques

Statistique	pH	CE	CO32-	HCO3-	Cl-	SO42-	NO3-	Ca	Mg	Na	K
Minimum	5.84	128.00	0.00	2.53	8.76	2.98	0.40	4.17	1.17	9.21	1.31
Maximum	7.79	2143.00	0.00	516.00	367.00	392.00	100.00	200.00	59.96	256.00	11.60
Médiane	6.56	376.00	0.00	92.45	59.51	18.41	1.75	33.08	8.13	34.28	2.86
Moyenne	6.71	656.53	0.00	125.57	106.78	50.57	11.82	47.66	14.28	57.66	4.05

4.4 Typologie des eaux de la nappe

A l'aide du diagramme de Piper, nous avons déterminé les principaux faciès d'eau rencontrés dans la zone d'étude (**Figure 24**).

On distingue ainsi trois groupes de faciès :

- Un groupe G1 correspondant au faciès bicarbonaté calcique – HCO₃ - Ca- constitué de 4 échantillons.
- Un groupe G2 caractérisé par un faciès de type chloruré calcique et magnésien – Cl- Ca-Mg formé de 11 échantillons. A l'intérieur de ce groupe on a un faciès de type sulfaté chloruré et calcique –SO₄-Cl-Ca dominant correspondant au puits EW5 localisé à l'Est de la zone d'étude.
- Un groupe G3 caractérisé par un faciès chloruré sodique – Cl- Na composé de 9 échantillons.

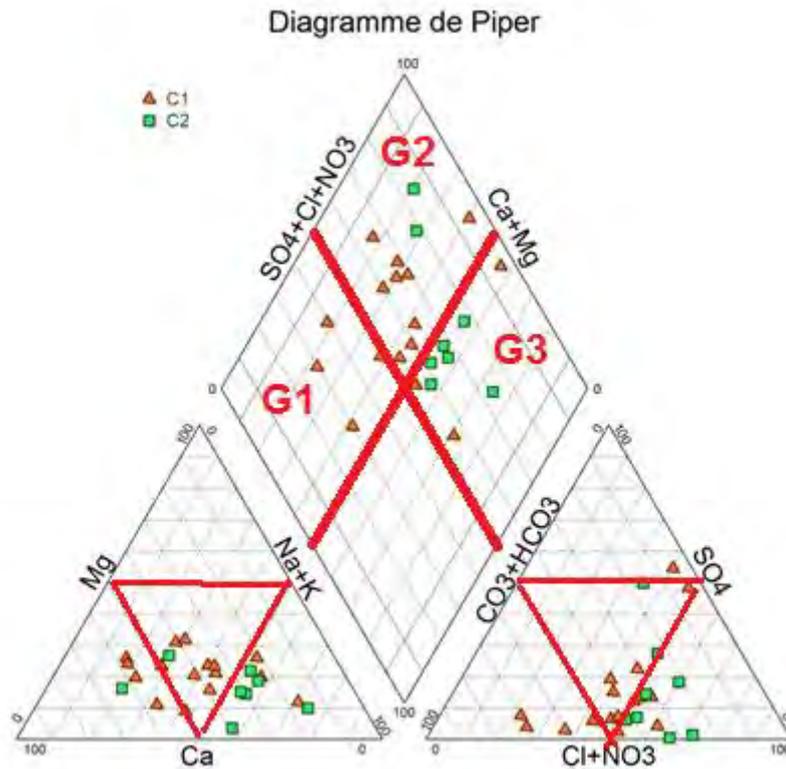


Figure 24: Détermination des faciès chimiques des eaux à partir du diagramme de Piper

La carte de la figure 25 montre que le faciès chloruré sodique (NaCl) que l'on rencontre normalement en bordure de mer est également présent en pleine zone de gisement (c'est à dire à l'intérieur des terres), à côté des « eaux continentales » du type bicarbonaté calcique et magnésien, et « eaux polluées » de type chloruré calcique et magnésien. Ce qui pourrait indiquer un net effet d'intrusion marine rencontré souvent au niveau des nappes côtières.

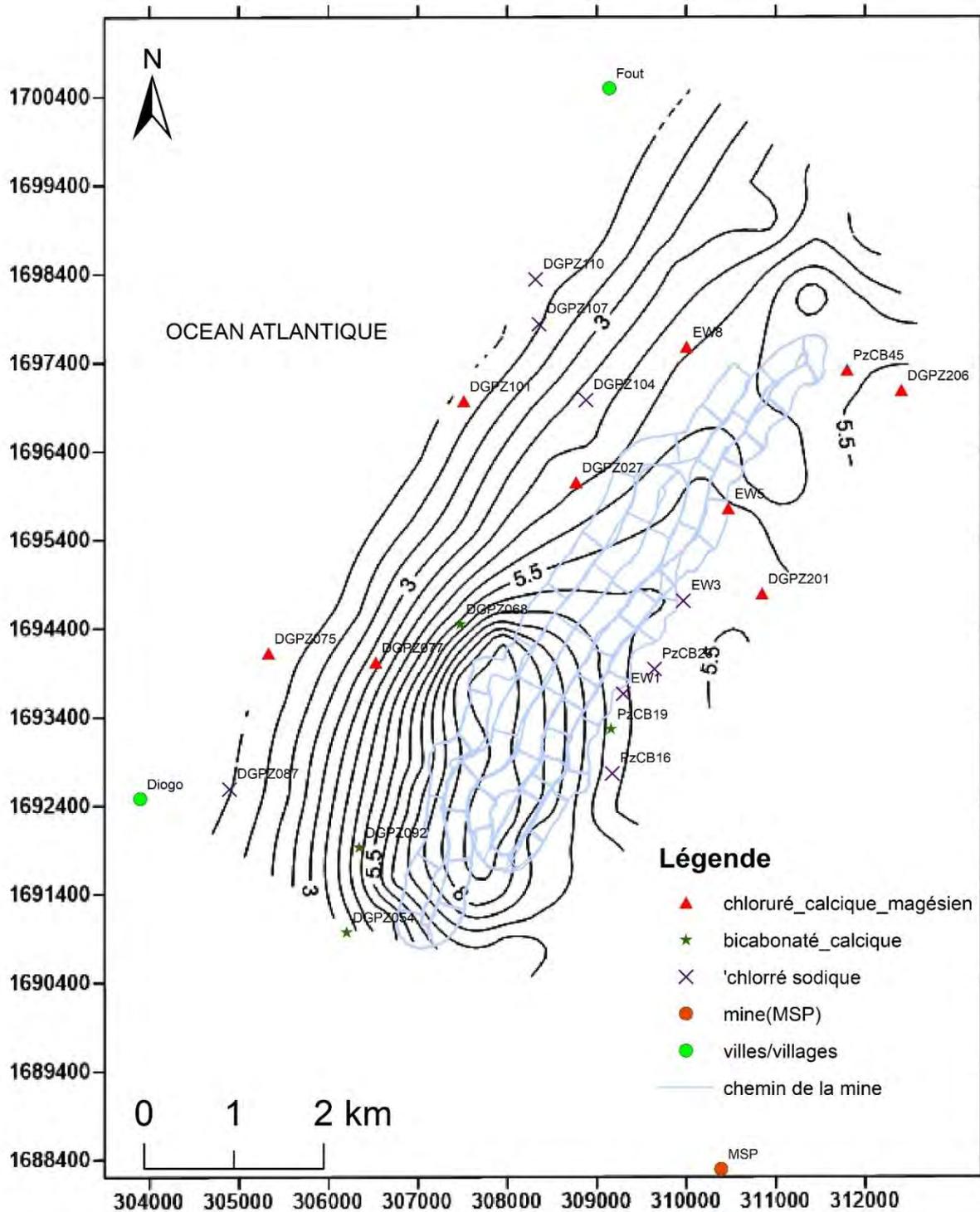


Figure 25: Carte de distribution des facies chimiques de l'eau de la nappe superficielle. (2019)

❖ Diagramme de Stiff

Le diagramme de Stiff (Figure 26) nous a permis de comparer les formes polygonales représentatives des échantillons et de voir leur similitude ou parenté. C'est ainsi que les

échantillons ont pu être regroupés selon leur forme géométrique, nous donnant une idée sur leur parenté chimique.

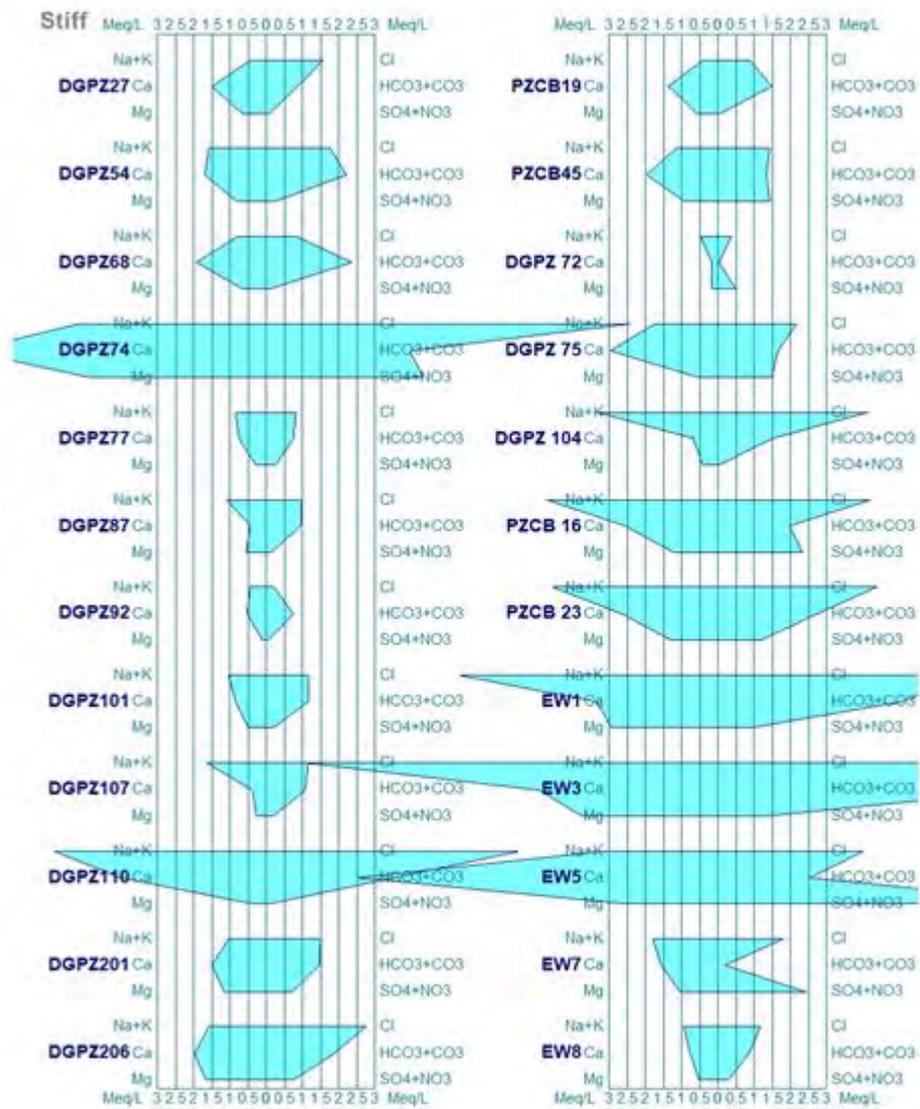


Figure 26: Diagramme de Stiff des 24 échantillons de la zone d'étude.

On retrouve sur la figure 26 les trois formes géométriques principales reproduites dans la Figure 27.

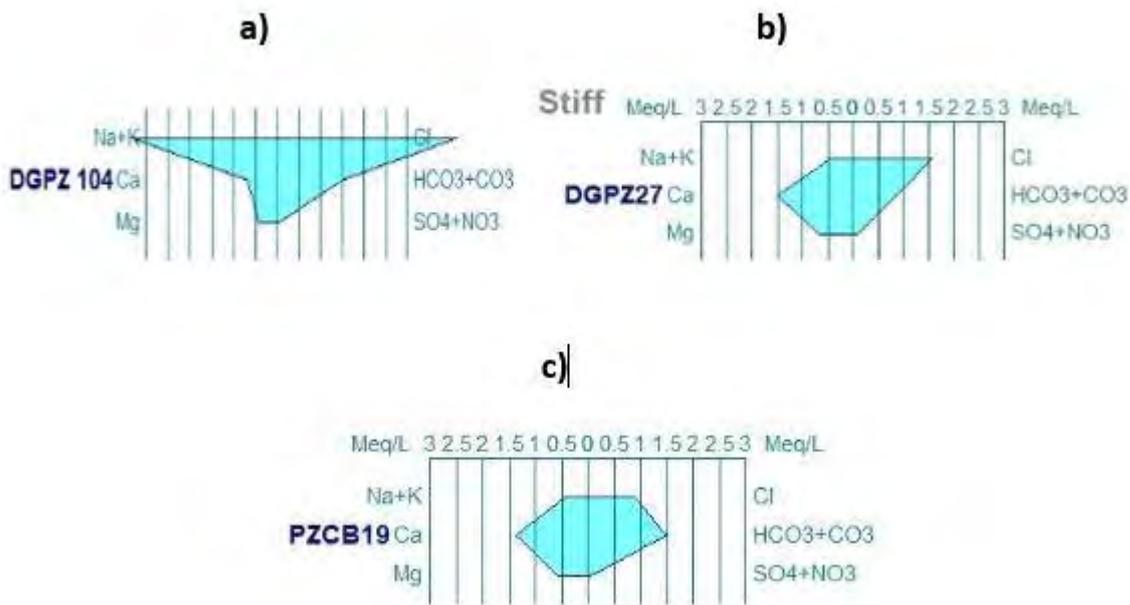


Figure 27 : Représentation des faciès dans le diagramme de Stiff

La Figure 27.a est le prototype du groupe G3 des eaux du type chloruré sodique. Leur forme géométrique montre une prédominance des chlorures chez les anions et des alcalins (Na+K) chez les cations. La Figure 27.b correspond au prototype du groupe G2 des eaux chlorurées calciques et magnésiennes et la figure 27c au prototype du groupe G1 des eaux bicarbonatées calciques et magnésiennes. Ces résultats confirment les différents faciès d'eau obtenus avec le diagramme de Piper. On peut même distinguer des faciès d'eaux polluées par les nitrates (Figure 26) provenant des intrants utilisés très souvent dans l'activité maraîchère.

4.5 Identification des processus de minéralisation

4.5.1 Analyse de diagrammes binaires

Sur la figure 28 nous avons tracé les diagrammes binaires utilisés dans cette étude pour une meilleure compréhension de l'origine et des processus de la minéralisation de l'eau de la nappe superficielle dans la zone de Diogo. Le rapport Cl/Na est très souvent utilisé pour comprendre le processus de la minéralisation de l'eau et surtout mettre en évidence les mécanismes d'acquisition de sa salinité Dixon and Chiswell (1992) ; Houssein (2014).

Sur le diagramme Na/Cl de la Figure 28a, nous voyons un groupe de 04 points situés sur la droite de mélange, de pente égale à 01. Ces points seraient caractérisés par une minéralisation contrôlée par la dissolution de la halite (Farid et *al.*, 2012). Un échange d'ions entre l'eau et

l'aquifère se traduisant par une adsorption de sodium et la libération de calcium et/ou de magnésium (Capaccioni et al., 2005 ; Stigter et *al.*, 1998 ; Farid et *al.*, 2012), pourrait expliquer l'excès des chlorures sur le sodium pour un certain nombre de points (voir figure 28a).

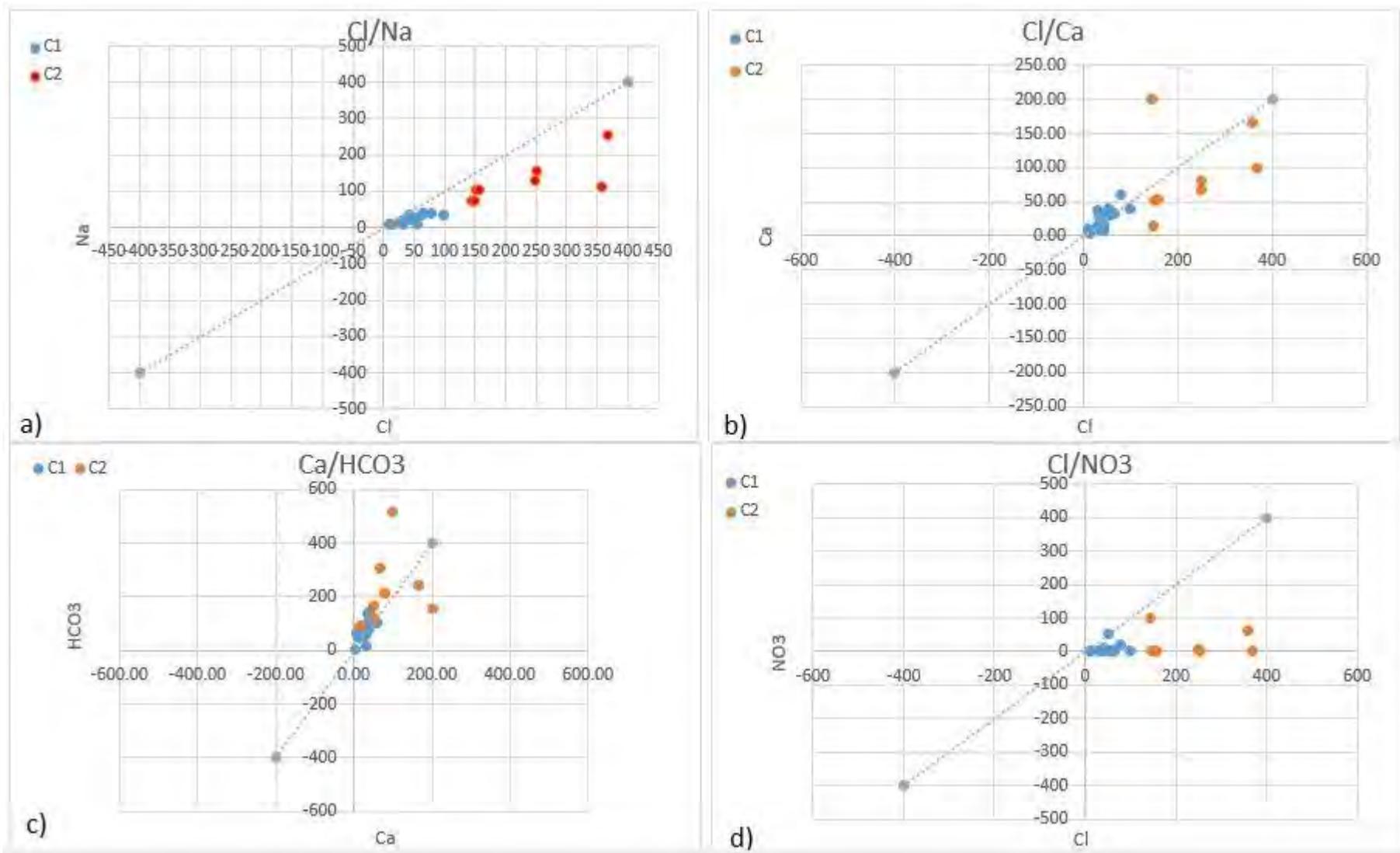
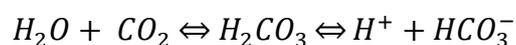


Figure 28: Diagrammes binaires des rapports Cl vs Na, Cl vs Ca, Ca vs HCO₃, Cl vs NO₃

Le diagramme Ca vs Cl (Figurer 28b) est aussi utilisé pour comprendre les processus géochimiques qui caractérisent les eaux souterraines. Nous remarquons ici que presque tous les points du groupe 1 (voir CHA) et 1 à 2 points du groupe 2 qui sont situés sur la droite de mélange eau douce-eau salée. En plus, nous avons un point du groupe 2 complètement situés au-dessus de la droite de mélange. Cela témoignerait d'un phénomène d'échange ionique eau – roche marqué par une solubilisation du calcium et une fixation de sodium ou de magnésium (Kouzana et *al.*, 2007). Les points situés en-dessous de la droite de mélange et appartenant tous au groupe 2 sont caractérisés par un appauvrissement en calcium qui serait lié à un phénomène de précipitation d'évaporites comme la calcite (Hussein et *al.*, 2014).

Le diagramme Ca vs HCO₃ (Figurer 28c) est utilisé pour déterminer l'origine et l'évolution des ions Ca²⁺ dans les eaux souterraines. On voit sur cette figure que la plupart des points du groupe 1 et du groupe 2 sont au-dessus de la droite de mélange. Les concentrations élevées en bicarbonates (HCO₃⁻) seraient liées à la présence de CO₂ provenant de l'infiltration des eaux de pluies ou de l'oxydation de la matière organique Paulami et *al.*, (2016). La réaction entre l'eau et le gaz carbonique donne de l'acide carbonique qui se dissocie par la suite pour donner du bicarbonate de calcium d'après la réaction suivante :



L'évolution de la concentration des nitrates par rapport à celle des chlorures renseigne sur l'origine naturelle (eau de pluie, intrusion marine) ou anthropique de la salinité des eaux (Hussein et *al.*, 2014). Le diagramme Cl vs NO₃ (Figure 28d) montre que les teneurs en nitrate sont presque nulles pour la majeure partie des échantillons étudiés. Seulement 3 échantillons correspondant à un puits villageois (EW5) et deux piézomètres (DGPZ74 et PZCB45) présentent des concentrations en nitrate relativement élevées sans aucune corrélation apparente avec les concentrations en chlorures correspondantes. Ce qui permet de conclure que ces teneurs en nitrates dépendraient d'activités anthropiques liés à la culture maraichère très développée dans la zone d'étude.

4.5.2 Analyse des rapports caractéristiques des éléments

L'étude de l'évolution de la salinité basée sur les rapports caractéristiques a été faite en utilisant les résultats d'analyse chimique des eaux obtenus sur l'ouvrage DGPZ75 de mars 2016

à mars 2019. En effet, c'est l'ouvrage le plus proche du rivage parmi ceux étudiés voir figure 29.

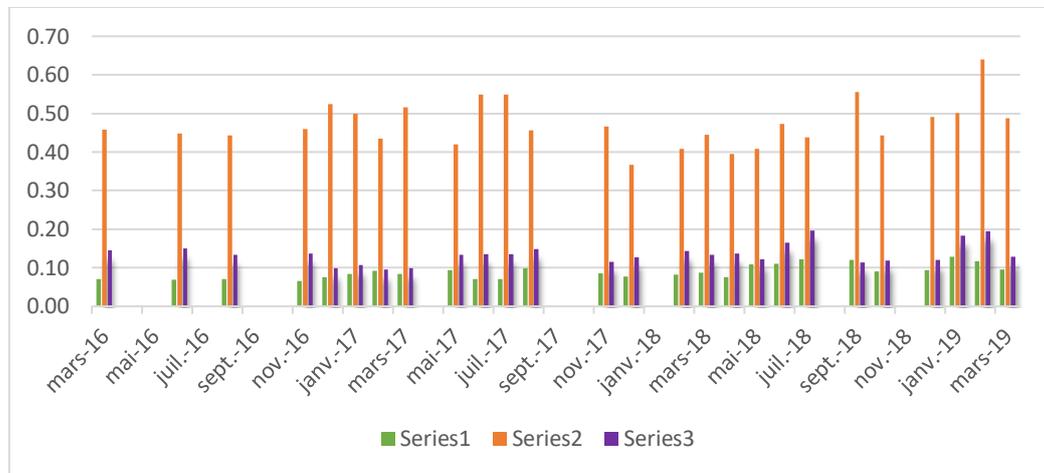


Figure 29: Comparaison des rapports caractéristiques Na/Cl (série 2) et SO4/Cl (série 1) et Mg/Ca (série 3).

Les rapports Na/Cl, SO4/Cl et Mg/Ca sont utilisés pour déterminer l'évolution de la salinité ou de la contamination marine au niveau des aquifères. En effet les rapports Na/Cl et SO4/Cl diminuent quand la salinité augmente. Par contre, le rapport Mg/Ca augmente si la salinité augmente Kouzana et *al.*, (2009).

Les rapports Na/Cl, SO4/Cl montrent de nettes fluctuations sur la période Mars-2016 à Mars-2019. Le rapport Na/Cl qui était de 0.46 en Mars 2016 est passé à 0.52 en décembre 2016, puis à 0.43 en février 2017. Cette valeur passe ensuite à 0.52 en Mars 2017, ensuite à 0.42 en Mai 2017 puis à 0.55 en juin 2017. Le rapport diminue après jusqu'à atteindre sa valeur minimale (0.37) en janvier 2017 avant de remonter petit à petit, mais de façon non monotone, pour atteindre sa valeur la plus élevée (0.64) en février 2019.

Pour le rapport SO4/Cl, nous avons les mêmes tendances avec 0.07 en Mars 2016, ensuite 0.08 en janvier 2017, 0.10 en Août 2017. Ce rapport connaît une baisse avec 0.08 en avril 2018 puis il passe à 0.12 en septembre 2018 et atteint sa valeur maximale (0.13) en janvier 2017. Ces deux rapports qui varient dans les deux sens sur la période étudiée témoigneraient de la présence du phénomène de l'intrusion marine dans la zone ; en d'autres termes de l'augmentation de la proportion de l'eau de mer introduite dans le mélange eau douce- eau salée surtout sur les périodes où ces rapports sont les plus faibles.

D'autre part le rapport Mg/Ca connaît de même une évolution croissante sur la période étudiée mais cette évolution n'est pas tout à fait homogène. Ce rapport qui était de 0.14 en Mai 2016, est passé à 0.16 en juin 2018 puis à 0.19 en février 2019. Cette évolution serait liée à des

échanges ioniques eau-roche ou encore au phénomène de la contamination marine sur cette partie de la Grande côte sénégalaise.

4.5.3 Analyse des indices d'échange de base

L'indice d'échange de base (i.e.b) défini par Schoeller (1962) permet de ressortir les échanges cationiques dans un aquifère donné. Sur la figure 30, nous remarquons que l'i.e.b des 24 échantillons étudiés est partout positif, à l'exception de l'échantillon DGPZ92. Ce qui pourrait témoigner de la présence de phénomènes d'échanges ioniques eau/roche, se traduisant par une fixation des ions Na^+ et K^+ par les roches et la solubilisation des cations Ca^{2+} et ou Mg^{2+} .

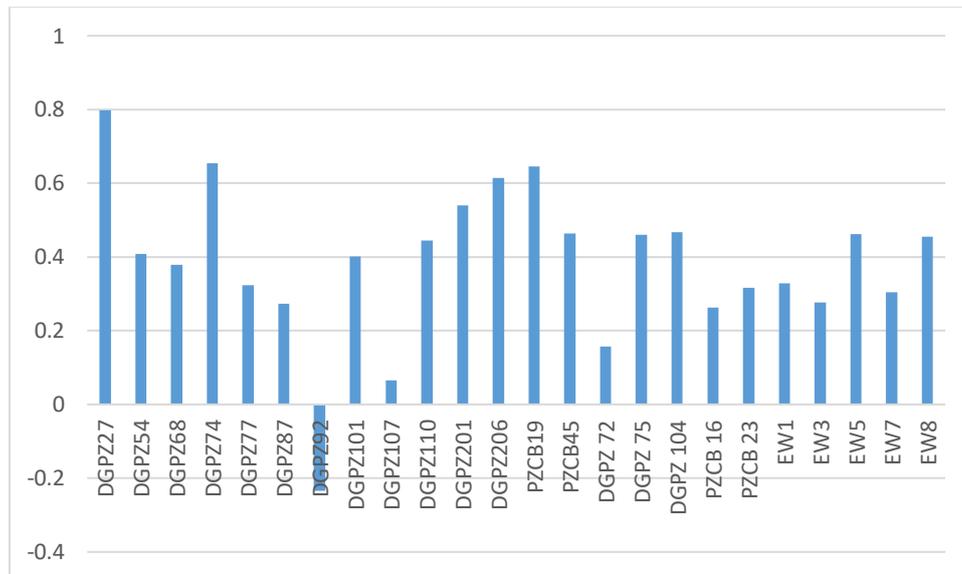


Figure 30: Diagramme en bâtonnets des i.e.b.

4.5.4 Processus hydro chimiques

Nous avons présenté sur la Figure 31a les variations de la minéralisation totale des eaux (TDS) en fonction de leur teneur en sodium (Na^+). On peut voir une certaine relation (corrélation positive) entre ces deux paramètres qui confirme une tendance générale de salinisation des eaux. Les classes C1 et C2 issues de la CHA sont bien séparées dans le graphique

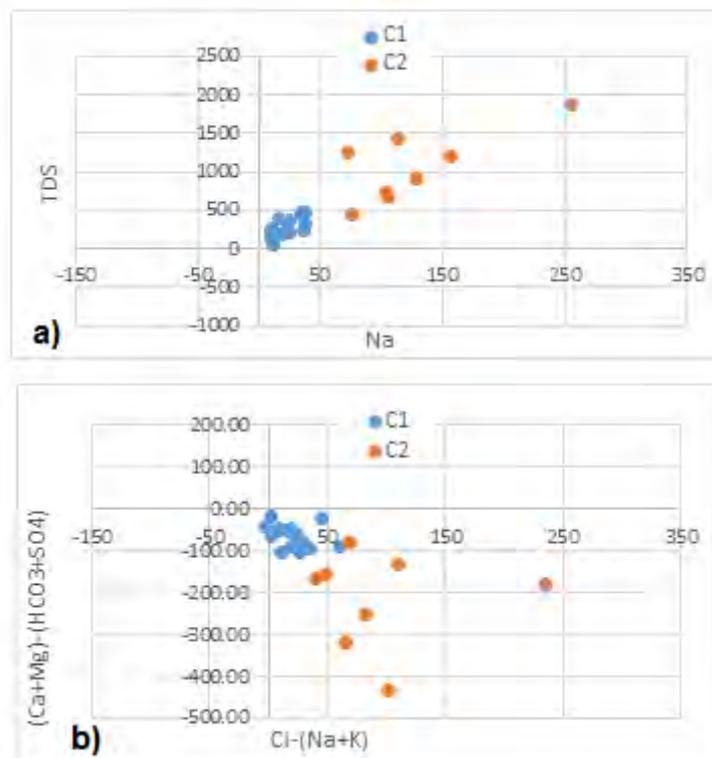


Figure 31: Diagrammes Na versus TDS (a) et Cl-(Na+K) versus (Ca+Mg)- (HCO₃+SO₄) (b)

En examinant les anomalies de concentrations notées entre les ions pouvant avoir la même origine(ou source de minéralisation), nous avons tracé le graphique de la Figure 29b montrant les variations [Cl-(Na+K)] en fonction des variations [(Ca+Mg)-(HCO₃+SO₄)]. La distribution spatiale que l'on remarque sur cette figure montre bien des indices de phénomènes d'échanges ioniques, comme nous venons de l'évoquer plus haut. Nous rappelons ici que s'il y a un excès de Cl par rapport aux alcalins (Na⁺+ K⁺) (i.e.b. > 0), le déficit de (Na⁺+ K⁺) pourrait être le résultat d'un échange ionique, suite à un départ Na et K au profit des alcalino-terreux (Ca²⁺ / Mg²⁺) des roches encaissantes qui s'enrichit ainsi dans l'eau. Ce qui se dégage du graphique, à travers la disposition des points représentatifs des échantillons étudiés. Donc, nous pourrions conclure que les échanges entre la matrice et la nappe joueraient également un rôle dans l'origine de la minéralisation

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

L'aquifère des sables du Quaternaire, situé sur la grande côte du littoral nord sénégalais constitue une importante ressource en eau. Il est exploité à plusieurs fins, dont les besoins en eau potable des populations, le maraichage et pour le développement des activités minières de la zone. A ce titre, se trouve la Société Grande Côte qui via ses forages de recyclage l'utilise pour l'exploitation des sables minéralisés du Littoral.

Dans cette étude nous avons étudié la situation piézométrique actuelle de cette nappe, avant d'aborder une caractérisation hydrochimique de ces eaux et évaluer l'impact probable de l'exploitation des sables minéralisés sur la chimie des eaux.

L'étude de l'évolution du niveau piézométrique de la nappe depuis le début des activités d'exploitation en 2012 a permis de voir que l'exploitation des sables minéralisés par GCO n'a jusque-là pas engendré de baisse du niveau piézométrique de la nappe superficielle dans la zone d'étude. Néanmoins, dans la partie Ouest de la zone d'étude, non encore affectée par les pompages de la GCO, une baisse d'environ 0.88cm du niveau piézométrique a été notée. Cette baisse serait surtout liée aux prélèvements liés aux activités de maraichage. Ces prélèvements deviennent de plus en plus importants avec l'implantation des mini-forages dans presque tous les champs.

La caractérisation hydrogéochimique a permis d'individualiser une catégorie d'eaux fortement minéralisées (groupe 2 de la CHA) en bicarbonates, chlorures, calcium, magnésium, sodium (et \pm potassium) essentiellement et d'identifier 3 principaux faciès chimiques : bicarbonaté calcique et magnésien, chloruré calcique, et chloruré sodique. Deux facteurs ou phénomènes essentiels semblent contrôler la minéralisation des eaux : les processus de dissolution des éléments en rapport avec l'interaction eau/roche (facteur F1 de l'ACP) et des mécanismes de pollution ponctuelle par les sulfates et les nitrates résultant de l'emploi de fertilisants agricoles, et/ou de contamination liée à l'intrusion d'eaux salées marines (Facteur F2 de l'ACP), à l'origine de l'apparition parfois de faciès chimiques hybrides, comme le faciès chloruré calcique.

Au vu de ces conclusions, les recommandations à l'endroit de l'entreprise GCO sont les suivantes :

- ✚ Effectuer un contrôle régulier pour s'assurer de la fonctionnalité des ouvrages de suivi du niveau piézométrique et de la chimie de l'eau pour la fiabilité des données.
- ✚ Faire une cartographie détaillée du biseau salé dans toute la zone du projet pour mieux suivre la salinisation des eaux et s'assurer que l'exploitation des sables minéralisés par la méthode du dragage ne soit pas une des causes de l'avancée de l'intrusion marine dans la zone du permis. Utiliser la géophysique en plus de l'étude piézométrique et géochimique.
- ✚ Etudier dans les détails l'impact potentiel des prélèvements effectués sur la nappe profonde qui servent à combler les pertes d'eau du bassin de dragage liées à l'évapotranspiration et à l'infiltration.

Rapport-gratuit.com 
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

BIBLIOGRAPHIE

Adam J.G. - (1958) Flore et végétation de la réserve de Noflaye (environs de Dakar, Sénégal). Bull. Inst. Fond. Afr. Noire, A, 2013, p. 809-868.

Appelo, C.A.J. et Postma, D. (2005) Geochemisry, groundwater and pollution 2nd edition. Amsterdam, the Netherlands. p647

ANSD (2015) : Situation économique sociale et régionale. p218

Barrussau J.P. (1980) Essai d'évaluation des transports littoraux sableux sous l'action des houles entre St. Louis et Joal. Ass. Sénég. Et. Quatern. Afr. Bull. Liaison, Dakar, n°58-59, p. 34-39.

Belkhiri L., Boudoukha A., Mouni L., (2010) Application of Multivariate Statistical Methods For Characterization of Groundwater - A Case Study: Ain Azel Plain (Algeria). Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology. 9p

Bouhsine el fellah Idrissi et Said Hinaje (2017) Caractérisation de la minéralisation des eaux de la nappe des causses de Sefrou et de l'Anoceur (Moyen Atlas marocain) par les méthodes hydrogéochimiques et statistiques. Geo-Eco-Trop., 2017, 41, 1: 119-134

Capaccioni B., Didero. M., Paletta. C., Idero. L (2005) Saline intrusion and refreshing in a multilayer coastal aquifer in the Catania Plain (Sicily, Southern Italy): dynamics of degradation processes according to hydrochemical characteristics of groundwaters. *J. Hydrol.*, 307, 1-16.

Castelain J. (1965) Aperçu stratigraphique sur la micropaléontologie et la palynologie des sédiments secondaires et tertiaires de l'ouest africain. Communication présentée au Colloque International de Micropaléontologie de Dakar, 6-11 mai 1963. *Mémoire BRGM.*, 32: 146-150,4 Fig.

CSE (2007) Caractérisation des systèmes de production agricoles au Sénégal. document de synthèse. p39

Daget J. (1976) Les modèles mathématiques en écologie. Masson, Paris New York Barcelone Milan. p:172. pp: 141-144.

Danielsson, A., Cato, I., Carman, R., Rahm, L. (1999) Spatial clustering of metals in the sediments of the Skagerrak/Kattegat. Applied Geochemistry, v.14, pp.689-706.

Degallier R (1952) Etude hydrogéologique à Louga. *Direction Fédérale des Mines et de la Géologie*, Dakar, 21, 11 p +planches.

- D'Amore, F., Scandiffio, G., Panichi, C., (1983)** Some observations on the chemical classification of groundwaters. *Geothermics*. 12, 141-148.
- DGPRES (2015)** Note sur les ressources en eaux du Sénégal : zones potentielles pour le transfert d'eau. 8p
- Dixon, W., Chiswell, B., (1992)** The use of hydrochemical sections to identify recharge areas and salines intrusions in alluvial aquifers, southeast Queensland, Australia. *Journal of Hydrology* 135, 259-274
- Djigo IB (2017)** Estimation qualitative et quantitative de la recharge de la nappe des sables du quaternaire dans la zone minière de GCO (bordure occidentale du littoral nord). Mémoire d'ingénieur. 121p
- Diouf S (1995)** Application de la géophysique (électrique et sismique) à l'étude de la géométrie du réservoir de l'aquifère du littoral nord Sénégal (de Taïba à Rao). D.E.A de géologie appliquée mention : hydrogéologie. Univ de Dakar. p154
- Drever JI (1997)** The geochemistry of natural waters, 3rd edn. Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ
- Dubreuil, G., & Fohlen, D. (1987)** Etude des ressources en eau souterraine du Sénégal. Campagne de Prospection géophysique. Rap. B.R.G.M, 87 DAK 04 EAU.
- El Faid, S, (1999)** Etude géochimique et isotopique des transferts d'eau et de solutés dans la zone non saturée de la nappe des sables quaternaires de Louga (Nord Sénégal) recharge et paléorecharge. Thèse de Doctorat 3ème cycle, Département de Géologie, Université Cheikh Anta Diop - Dakar, 237 p.
- Elouard P. (1967)** Eléments pour une définition des principaux niveaux du Quaternaire sénégalomauritanien. *Bull. IFAN*, A, 29 : 822-836.
- Fall. M (1986)** Environnements sédimentaires quaternaires et actuels des tourbières des Niayes de la grande côte du Sénégal ; Thèse de doctorat. p153.
- Farid, I., Zouari, K. & Kallali, A. (2012)** Origine de la salinité des eaux du bassin Chougafiya (Tunisie). *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 25 (3), 255–274. <https://doi.org/10.7202/1013106ar>
- Faye, S. (1995)** Modélisation hydrodynamique de la nappe du Littoral Nord entre Cayar et Saint Louis, Impact des futurs prélèvements sur l'approvisionnement de Dakar et ses environs. Thèse 3ème cycle, Département Géologie, Université Cheikh Anta Diop - Dakar, 101 p. + annexes.

Gaye, C. (1980) *Etude Hydrogéologique, hydrochimique et isotopique de la nappe infrabasaltique de la presqu'île du Cap Vert. Thèse de Doctorat 3ème cycle.* Dakar: UCAD, 131p.

Ghesquière (2015) Caractérisation de la géochimie des eaux souterraines et des facteurs la contrôlant dans les régions de Charlevoix et de la Haute-Côte-Nord. Mémoire de Maîtrise- Université de Québec. 197p

Guler C., Geoffrey DT., John EM., A. Keith Turner (2002) Evaluation of graphical and multivariate statistical methods for classification of water chemistry data *Hydrogeology Journal* (2002) 10:455-474

Hamilton PA, Helsel DR (1995) Effects of agriculture on groundwater quality in five regions of the United States. *Groundwater* 33(2):217–226

Hussein AA. (2014) Caractérisation hydrogéochimique et qualité des eaux souterraines du système aquifère volcano-sédimentaire côtier sous climat aride de Djibouti (Afrique de l'EST). Thèse, Université de Lille1- Sciences et Technologie. p200

Intissar Farid, Kamel Zouari et Abderrahmen Kallali origine de la salinité des eaux du bassin chougafiya (Tunisie). 2012 p255-274

Kane, C.H., (1995) Contribution à l'étude hydrochimique de la nappe des sables quaternaires du Littoral Nord au Sénégal entre Kayar et Saint Louis. Thèse de Doctorat 3ème cycle, Département de Géologie, Université Cheikh Anta Diop Dakar, 162 p. + annexes.

Karine L (2013) Caractérisation géochimique et isotopique des aquifères du Sud-Ouest de la Mauricie. Mémoire de maîtrise-Université du Québec p.239

Kraft GS, Stites W, Mechenich DJ (1999) Impacts of irrigated vegetable agriculture on a Humid North-Central US. Sand plain aquifer. *Groundwater* 37(4):572–580

Kouzana, L., Mammou, A B., Gaaloul N., (2007) : Intrusion marine et salinisation des eaux d'une nappe phréatique côtière (Korba, Cap-Bon, Tunisie). *Geo-Eco-Trop*, 2007, 31: 57-70

M.D Fall (2012) Modélisation hydrogéologique conceptuelle de la nappe des sables quaternaires du littoral nord du Sénégal entre Dakar et Saint-Louis. Master 2 option AEP & eaux souterraines p.88

Mariama Kaba (2017) Etude hydrogéologique régionale et fonctionnement hydrogéochimique des zones humides du littoral nord / Sénégal. Thèse de Doctorat unique FST-UCAD- p.347

Michel P. - (1973) Les bassins des fleuves Sénégal et Gambie. Etude géomorphologique. Mém. ORSTOM. Paris, n°63, 3 tomes, 752 p.

- Kouassi M A., Yao A K ., Ake Y A ., Michel J B (2012)** Application des méthodes d'analyses statistiques multivariées à l'étude de la minéralisation des eaux des aquifères fissurés de la zone Guiglo-Duekoué (Ouest de la Côte d'Ivoire). *Int. J. Biol. Chem. Sci.* 5(5) p.2155-2169
- Michel, P., (1955)** Rapport préliminaire sur la géologie, la morphologie, l'hydrologie et la pédologie de la région des Niayes de Kayar à l'embouchure du fleuve Sénégal. MAS. Saint Louis. 38 pages.
- Monciardini C. (1966)** La sédimentation Eocène au Sénégal. *Mémoire BRGM.*, n° 43, 65 p.
- Monciardini C. (1974)** Etude stratigraphique de 16 sondages hydrauliques et interprétation structurale. Etude morphoscopique du continental terminal. *Rap. Projet Sénégal OMS-PNUD-BRGM et Service Géologique national*, II p + annexes.
- Nativ R, Smith A (1987)** Hydrogeology and geochemistry of the Ogallala aquifer southern high plains. *J Hydrol* 91:217–253
- Seck M (2018)** Actualisation des connaissances sur la nappe du Littoral Nord et évaluation des impacts potentiels de l'exploitation des sables minéralisés par Grande Côte Operations : approche hydrochimique, isotopique et hydrodynamique par modèle – SENEGAL. These de Doctorat unique EDEQUE - UCAD p299
- Rajmohan N and Elango L (2006)** Hydrogeochemistry and its relation to groundwater level fluctuation in the Palar and Cheyyar river basins, southern India; *Hydrol. Process* 20 2415–2427.
- Ndjekouneyom S (2007)** Les impacts du maraichage sur la végétation ligneuse dans la région des Niayes centrales (Mboro-Diogo) au Sénégal), mémoire on line DEA-UCAD on line.
<https://www.memoireonline.com/01/13/6832/Les-impacts-du-maraichage-sur-la-vegetation-ligneuse-dans-la-region-des-Niayes-centrales-Mboro.html>
- Noel Y. (1978)** Etude hydrogéologique des calcaires lutétiens entre Bambey et Louga (2ème phase). *Rapp.* 78 Dak. 02, 82 p.
- Olive P. (1996)** Introduction à la géochimie des eaux continentale, *Iditura Didactica* si pedagogica, R.A. Bucuresti,130p
- Paulami S., Sikdar PK., Surajit C (2016)** Geochemical evolution of groundwater in southern Bengal Basin: The example of Rajarhat and adjoining areas, West Bengal, India. *J. Earth Syst. Sci.* 125, No. 1, p129-145
- Putallaz, J., (1962)** Hydrogéologie de la région des Niayes. *Rapp. inéd.* B.R.G.M. Dak. 62-A-12 (2 fax.), 37 p.
- Sall M. (1982)** Dynamique et morphogenèse actuelles au Sénégal occidental. Thèse Lettres : U.L.P. Strasbourg.

Raynal A. (1963) Flore et végétation des environs de Kayar de la côte au lac Tanma (Sénégal). Dipl. Et. Sup. Fac. Sci. Dakar, Ann. Fac. Sci., Série Sci. végét., t.9, n°2, p. 121-231, 24 fig., 12 pl. phot.

Roger J., NOËL B.J., BARUSSEAU J.P., SERRANO O., NEHLIG P., DUVAIL C. (2009a) Notice explicative de la carte géologique du Sénégal à 1/500 000, feuilles nord-ouest, nord-est et sud-ouest. Ministère des Mines, de l'Industrie et des PME, Direction des Mines et de la Géologie, Dakar, 61 pages.

Sarr (2011) Cours Géologie historique : Paléozoïque, Mésozoïque et Cénozoïque Faculté des Sciences et Techniques/UCAD, p81.

Sekiou F., Kellil A (2014) : Caractérisation et classification empirique, graphique et statistique multivariable d'eaux de source embouteillées de l'algerie ; Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n°20, pp. 225-246

Sarr. R., Diouf M.B., Fall. M., Faye. A., Sow E (2008) Terminologie et Nomenclature stratigraphique du socle et du bassin sédimentaire sénégalais. Rapport Projet PASMI 0 ACP SE 009 –Infrastructures géologiques : Cartographie, 51-97.

Schoeller H (1962) Les Eaux Souterraines. Hydrologie dynamique et chimique, Recherche, Exploitation et Évaluation des Ressources. 187 fig. Paris: Masson et Cie, Éditeurs. 642 p. NF 105

Stiff, H. A. Jr. (1951) The interpretation of chemical water analysis by means of patterns: Journal of Petroleum Technology, v. 3. No. 10, section 1: p15,16 and section 2: p3

Stigter T.Y., Vanooijen S.P.J., Post V.E.A., Appelo C.A.J., Carvalho., A.M.M. DILL (1998) A hydrogeological and hydrochemical explanation of the groundwater composition under irrigated land in a Mediterranean environment, Algarve, Portugal. *J. Hydrol.*, 208, 262-279.

Suvedha M., Gurugnanam M., Suganya., vasudevan S (2009) Multivariate Statistical Analysis of Geochemical Data of Groundwater in Veeranam Catchment Area, Tamil Nadu. Journal geological society of india Vol.74, pp.573-578

Tandia A.A (1990) Revue critique des méthodes d'évaluation de la recharge des nappes. Contribution de l'approche géochimique et isotopique. Louga - Nord Sénégal. *Thèse 3e cycle*, Univ. Dakar, 133 p.

Tessier F., Flicoteaux R., Lappartient J.R., Nahon D., Triat J.M (1975) Réforme du concept du continental terminal dans les bassins sédimentaires côtiers de l'Ouest africain. *IX C~ngr. Inter. Sedim.*, Nice, 207-212.

Travy Y. (1988) Hydrogéochemie 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.

Trochain J. - (1940) Contribution à l'étude de la végétation au Sénégal. Mém. Inst. Fond. Afr. Noire, Dakar, n°2, 433 p., 30 fig., 45 tab., 30 pl. ph.

Wade M., Tran M D., Honoré D (2005) Les ressources en eau. Bilan de la recherche agricole et agroalimentaire au Sénégal. ISRA, ITA, CIRAD, 25p.

ANNEXES :

Annexes 1 : Paramètres physico-chimiques et concentrations en éléments majeurs des échantillons étudiés pour la caractérisation hydrochimique

Nom	pH	CE	CO32-	HCO3-	Cl-	SO42-	NO3-	Ca	Mg	Na	K
DGPZ27	6.43	232	0	54.9	55.42	5.5	1.71	29.83	8.19	9.21	1.95
DGPZ54	6.89	441	0	137.25	63.6	12.6	4.62	33.87	10.18	34.47	3.11
DGPZ68	6.76	334	0	146.4	29.81	6.5	2.34	38.70	8.08	16.18	2.32
DGPZ74	7.23	1880	0	244	357.73	162.5	63.09	165.30	59.96	112.91	10.5
DGPZ77	6.3	190	0	48.8	29.81	14.31	0.69	14.92	3.57	18.43	1.76
DGPZ87	6.41	197	0	61	35.76	6.76	0.83	8.87	6.57	24.15	1.83
DGPZ92	6.21	128	0	48.8	8.76	4.08	0.4	10.48	1.17	9.5	1.31
DGPZ101	6.45	265	0	73.2	41.71	3.07	9.19	16.93	6.15	22.87	2.08
DGPZ107	6.34	230	0	67.1	41.71	8.62	2.87	8.06	3.36	36.97	2.02
DGPZ110	7.32	1059	0	216.55	248.43	2.98	6.54	80.63	4.48	128.91	9.25
DGPZ201	6.29	376	0	91.5	53.65	34.67	1.78	30.24	13.83	22.87	1.85
DGPZ206	6.44	530	0	115.9	99.36	35	4.13	40.32	20.46	34.08	4.23
PZCB19	6.78	234	0	91.5	31.75	3.81	0.61	28.22	7.16	9.31	1.95
PZCB45	6.67	420	0	82.35	51.64	27.85	54.12	39.90	11.65	24.55	3.14
DGPZ 72	5.84		0	2.53	14.5	22.5	3.35	4.17	2.16	10.8	1.43
DGPZ 75	7.32		0	102	77.1	57.9	20.4	60.1	7.19	37.9	3.7
DGPZ 104	6.36		0	93.4	148	4	1	14	5.41	75.8	2.99
PZCB 16	6.89		0	121	151	113	1	51.4	15	106	5.2
PZCB 23	7.03		0	166	156	57.7	1	53.2	15.7	104	2.72
EW1	7.33	1357	0	310	251	44.3	1	67.5	36	157	11.6
EW3	7.79	2143	0	516	367	61.1	1	99.6	45.7	256	9.69
EW5	7.43	1639	0	156	143	392	100	200	31.5	73.1	3.89
EW7	6.17	541	0	14.2	64.3	119	1	32.3	12.8	38	6.7
EW8	6.38	278	0	53.3	41.7	14	1	15.4	6.38	20.9	1.86

Annexes 2 : Indices d'échange de base des échantillons étudiés

Nom	DGPZ27	DGPZ54	DGPZ68	DGPZ74	DGPZ77	DGPZ87	DGPZ92	DGPZ101
i.e.b	0.80	0.41	0.38	0.66	0.32	0.27	-0.23	0.40
Nom	PZCB19	PZCB45	DGPZ 72	DGPZ 75	DGPZ 104	PZCB 16	PZCB 23	EW1
i.e.b	0.65	0.46	0.16	0.46	0.47	0.26	0.32	0.33
Nom	DGPZ107	DGPZ110	DGPZ201	DGPZ206	EW3	EW5	EW7	EW8
i.e.b	0.07	0.44	0.54	0.61	0.28	0.46	0.30	0.45

Annexes 3 : Rapport caractéristiques de Mars 2016 à Mars 2019 de l'échantillon DGPZ75

Mois	mars-16	avr-16	mai-16	juin-16	juil-16	août-16	sept-16	oct-16
Na/Cl	0.46			0.45		0.44		
SO4/Cl	0.18			0.19		0.20		
Mg/Ca	0.14			0.15		0.13		
Mois	nov-16	déc-16	janv-17	févr-17	mars-17	avr-17	mai-17	juin-17
Na/Cl	0.46	0.52	0.50	0.43	0.52		0.42	0.55
SO4/Cl	0.16	0.73	0.72	0.83	0.70		0.72	0.07
Mg/Ca	0.14	0.10	0.11	0.10	0.10		0.13	0.14
Mois	juil-17	août-17	sept-17	oct-17	nov-17	déc-17	janv-18	févr-18
Na/Cl	0.55	0.46			0.47	0.37		0.41
SO4/Cl	0.07	0.77			0.80	0.06		0.06
Mg/Ca	0.14	0.15			0.12	0.13		0.14
Mois	mars-18	avr-18	mai-18	juin-18	juil-18	août-18	sept-18	oct-18
Na/Cl	0.44	0.40	0.41	0.47	0.44		0.56	0.44
SO4/Cl	0.74	0.06	0.81	0.84	0.66		0.57	0.71
Mg/Ca	0.13	0.14	0.12	0.16	0.20		0.11	0.12
Mois	nov-18	déc-18	janv-19	févr-19	mars-19			
Na/Cl		0.49	0.50	0.64	0.49			
SO4/Cl		0.75	0.68	0.09	0.81			
Mg/Ca		0.12	0.18	0.19	0.13			

Annexes 4 : Statistiques descriptives des paramètres physico-chimiques et des concentrations en éléments majeurs des échantillons étudiés.

Variable	Observations	Obs. avec données manquantes	Obs. sans données manquantes	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
pH	19	0	19	6.2	7.8	6.7	0.5
CE	19	0	19	128.0	2143.0	656.5	631.8
HCO3-	19	0	19	14.2	516.0	133.1	119.8
Cl-	19	0	19	8.8	367.0	106.1	113.0
SO42-	19	0	19	3.0	392.0	50.5	93.0
NO3-	19	0	19	0.4	100.0	13.5	27.5
Ca	19	0	19	8.1	200.0	50.6	52.8
Mg	19	0	19	1.2	60.0	15.6	16.1
Na	19	0	19	9.2	256.0	55.2	64.8
K	19	0	19	1.3	11.6	4.3	3.4

