



UNIVERSITE
JEAN LOROUGNON GUEDE

UFR ENVIRONNEMENT

REPUBLIQUE DE CÔTE D'IVOIRE

Union-Discipline-Travail

Ministère de l'Enseignement Supérieur et
de la Recherche Scientifique

ANNEE ACADEMIQUE :
2019-2020

N° D'ORDRE : 0340 / 2021

N° CARTE D'ETUDIANT :

CI0414002837

MASTER

Génie de l'Eau et de l'Environnement

Option : Hydrogéochimie

THEME :

**Caractérisation hydrogéochimique des eaux souterraines
du département de Man (Ouest de la Côte d'Ivoire)**

LABORATOIRE :
SCIENCES ET
TECHNOLOGIES DE
L'ENVIRONNEMENT

Présenté par :

YAO Anne Josiane Larissa

JURY

Président : M. KOUADIO Zilé Alex, Maître de Conférences,
Université Jean LOROUGNON GUEDE

Directeur : M. DIBI Brou, Maître de Conférences,
Université Jean LOROUGNON GUEDE

Encadreur : M. SORO Tanina Drissa, Maître-Assistant,
Université Jean LOROUGNON GUEDE

Examineur : M. MANGOUA Oi Mangoua Jules, Maître de Conférences,
Université Jean LOROUGNON GUEDE

Soutenu publiquement
le : 26 / 02 / 2021



UNIVERSITE
JEAN LOROUGNON GUEDE

UFR ENVIRONNEMENT

REPUBLIQUE DE CÔTE D'IVOIRE

Union-Discipline-Travail

Ministère de l'Enseignement Supérieure et de
La Recherche Scientifique

ANNEE ACADEMIQUE :
2019-2020

N° D'ORDRE : -----

N° CARTE D'ETUDIANT :
CI0414002837

LABORATOIRE :
SCIENCES ET
TECHNOLOGIES DE
L'ENVIRONNEMENT

MASTER

Génie de l'Eau et de l'Environnement

Option : Hydrogéochimie

THEME :

**Caractérisation hydrogéochimique des eaux souterraines
du département de Man (Ouest de la Côte d'Ivoire)**

Présenté par :

YAO Anne Josiane Larissa

JURY

Président : M. : KOUADIO Zilé Alex, Professeur Titulaire,

Université Jean LOROUGNON GUEDE

Directeur : M. DIBI Brou, Maître de Conférences,

Université Jean LOROUGNON GUEDE

Encadreur : M. SORO Tanina Drissa, Maître-Assistant,

Université Jean LOROUGNON GUEDE

Examineur : M. : MANGOUA Oi Mangoua Jules, Maître-Assistant

Université Jean LOROUGNON GUEDE

Soutenu publiquement
le : 26 / 02 / 2021.....

DEDICACE

A mon Feu père **KOFFI Yao Désiré** qui m'a toujours encouragé à donner le meilleur de moi-même en me montrant que seul le travail saura me récompenser, pour l'amour et le réconfort qu'il ne cessait de me montrer et pour tous ses conseils qu'il m'a apportés.

A ma mère **YA Amenan Odette**, pour son soutien, ses conseils, son amour, sa patience, ses prières et pour le rôle de père qu'elle a joué ces dernières années.

A mon tuteur **KONAN Kouakou Germain** et sa famille qui ont fait de moi une des leurs et qui ont soutenu durant tous les moments difficiles.

A mes frères, sœurs et amis pour leurs soutiens moraux, financiers et conseils qu'ils m'ont apportés durant toutes ces années d'études.

Je leur dédie le fruit de mon travail.

REMERCIEMENTS

Ce mémoire a été réalisé grâce au concours de certaines personnes à qui je voudrais exprimer mes remerciements. Mes remerciements vont à l'endroit :

- du personnel administratif de l'Université Jean Lorougnon Guédé, avec à sa tête le Professeur **TIDOU Abiba Sanogo**, Présidente de ladite Université pour son dévouement à faire avancer l'Université ;

- du Professeur **KOUASSI Kouakou Lazare**, Directeur de l'UFR Environnement pour les efforts qu'il a consacrés pour que ce stage puisse s'effectuer ;

- du Docteur **DIBI Brou**, Maître de Conférences, Directeur du Laboratoire des Sciences et Technologies de l'Environnement (LSTE) et Directeur scientifique du mémoire pour ses bons conseils qu'il n'a cessé de me prodiguer tout au long de ce stage ;

- du Docteur **KOUADIO Zilé Alex**, Maître de Conférences, Responsable de la filière Génie de l'Eau et de l'Environnement (GEE) pour sa volonté d'offrir une bonne formation aux étudiants de GEE ;

- du Docteur **MANGOUA Oi Mangoua Jules**, Maître de Conférences, Responsable du parcours Master Génie de l'Eau et de l'Environnement (GEE) pour ses conseils ;

- du Docteur **SORO Tanina Drissa**, encadreur de ce mémoire, pour le sérieux et l'amour qu'il a pour le travail. Ses grandes qualités humaines et sa promptitude dans le travail sont louables. Que Dieu l'élève encore davantage et que ce document puisse satisfaire efficacement ses attentes ;

- du corps professoral de l'Université Jean Lorougnon Guédé pour les connaissances dispensées durant toute ma formation de la Licence et au Master ;

- de Monsieur **TRAORE Abdoulaye**, pour les données qu'il m'a fournies ;

- de mes aînés du laboratoire des Sciences et Technologies de l'Environnement (LSTE), pour leurs temps qu'ils m'ont accordés et pour le savoir qu'ils ont bien voulu partager avec moi ;

- de la promotion 2019-2020 de Génie de l'eau et de l'environnement (GEE) Master 2, pour cette belle aventure qui a duré 3 ans, en particulier à la déléguée **YAO N'da Marie Rebecca** pour son fairplay ;

- de ma famille qui n'a cessé de manifester un amour à mon égard.

Que toutes les personnes qui de près ou de loin ont participé à la réalisation de ce mémoire, retrouvent ici l'expression de mes sincères remerciements.

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES	i
LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS	iii
LISTE DES TABLEAUX	iv
LISTES DES FIGURES	v
INTRODUCTION.....	1
PREMIERE PARTIE : GENERALITES	3
1.1.1. Situation géographique du département de Man	3
1.1.2. Relief	3
1.1.3. Climat	4
1.1.4. Hydrographie	4
1.1.6. Végétation.....	6
1.1.7. Activités économiques	6
1.2. Contexte géologique et hydrogéologique du département de Man	6
1.2.1. Géologie du département de Man	6
1.2.2. Hydrogéologie du département de Man	7
1.3. Processus hydrogéochimique en milieu de socle	9
1.3.1. Géochimie et interaction eau-roche	9
1.3.2. Minéralisation des eaux en milieu cristallin	9
Conclusion partielle	10
DEUXIEME PARTIE : MATERIEL ET METHODES	11
2.1. Matériel	11
2.1.1. Données hydrochimiques de forages	11
2.1.2. Matériel de traitement des données.....	11
2.2. Méthodes	12
2.2.1. Méthodologie d'échantillonnage et d'analyse	12
2.2.2. Validation des mesures.....	12

2.2.3. Caractérisation des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines du département de Man.....	13
2.2.3.1. Statistiques élémentaires des paramètres physico-chimiques.....	13
2.2.3.2. Détermination des faciès hydrochimiques.....	13
2.2.4. Analyse statistique multivariée à partir de l'ACP et la CAH.....	13
2.2.5. Détermination de l'âge relatif des eaux souterraines.....	14
Conclusion partielle.....	14
TROISIEME PARTIE : RESULTATS ET DISCUSSION.....	15
3 .1. Résultats.....	15
3.1.1. Validité des mesures.....	15
3.1.2. Caractéristiques physico-chimiques des eaux souterraines du département de Man.....	15
3.1.2.1. Statistiques élémentaires des paramètres physico-chimiques.....	15
3.1.2.2. Hydrofaciès des eaux souterraines du département de Man.....	19
3.1.3. Analyse statistique multivariée des eaux souterraines du département de Man.....	19
3.1.3.1. Analyse en Composantes Principales (ACP).....	20
3.1.3.2. Classification Ascendante Hiérarchique (CAH).....	35
3.1.4. Etude de l'âge relatif des eaux souterraines du département de Man.....	38
3.2. Discussion.....	39
Conclusion partielle.....	42
CONCLUSION.....	43
REFERENCES.....	44

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

ACP	: Analyse en Composantes Principales
CAH	: Classification Ascendante Hiérarchique
CV	: Coefficient de Variation
ONU	: Organisation des Nations Unies
GEE	: Génie de l'Eau et de l'Environnement
GPS	: Global Positioning System
UTM	: Universal Transverse Mercator
AFNOR	: Association Française de Normalisation
LSTE	: Laboratoire des Sciences et Technologies de l'Environnement
OMS	: Organisation Mondiale de la Santé
INS	: Institut National de la Statistique
ISD	: Indice de Saturation en Dolomite
ISC	: Indice de Saturation en Calcite
UFR	: Unité de Formation et de Recherche

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I : Balance ionique de la saison sèche et de la saison pluvieuse	15
Tableau II : Statistiques élémentaires des paramètres physiques du département de Man.....	20
Tableau III : Valeurs propres et pourcentage de variance exprimée de la saison sèche.....	20
Tableau IV : Matrice de corrélation de la saison sèche.....	23
Tableau V : Coordonnées des variables de la saison sèche	24
Tableau VI : Valeurs propres et pourcentage de variance exprimée de la saison pluvieuse...	29
Tableau VII : Matrice de corrélation de la saison pluvieuse	30
Tableau VIII : Coordonnées des variables de la saison pluvieuse	31

LISTES DES FIGURES

Figure 1 : Localisation de département de Man	3
Figure 2 : Diagramme ombrothermique de la station de Man de 1983 à 2019.....	4
Figure 3 : Carte du réseau hydrographique du département de Man	5
Figure 4 : Carte géologique du département de Man	7
Figure 5 :Schéma simplifié des aquifères sur le socle cristallin (Lachassagne et al ., 2011) ...	8
Figure 6 : Carte de répartition des points d'échantillonnage dans le département de Man.....	11
Figure 7 : Histogramme des cations de la saison sèche (a) et de la saison pluvieuse (b)	17
Figure 8 : Histogramme des anions de la saison sèche (a) et de la saison pluvieuse (b).....	18
Figure 9 : Représentation des eaux souterraines du département de Man dans le diagramme de piper	19
Figure 10 : Cercle de corrélation des variables (a) et graphe des unités statistiques(b) du plan factoriel F1- F2 en saison sèche	26
Figure 11 : Cercle de corrélation des variables (a) et graphe des unités statistiques(b) du plan factoriel F1- F3 en saison sèche	27
Figure 12 : Cercle de corrélation des variables (a) et graphe des unités statistiques(b) du plan factoriel F1- F4 en saison sèche	28
Figure 13 : Cercle de corrélation des variables (a) et graphe des unités statistiques (b) du plan factoriel F1-F2 en saison pluvieuse	32
Figure 14 : Cercle de corrélation des variables (a) et graphe des unités statistiques (b) du plan factoriel F1-F3 en saison pluvieuse	33
Figure 15 : Cercle de corrélation des variables (a) et graphe des unités statistiques (b) du plan factoriel F1-F4 en saison pluvieuse	34
Figure 16 : Dendrogrammes de la saison sèche (a) et de la saison pluvieuse (b)	37
Figure 17 : Diagramme $ISD = f(ISC)$ de la saison sèche du département de Man	38
Figure 18 : Diagramme $ISD = f(ISC)$ de la saison pluvieuse du département de Man	39

INTRODUCTION

INTRODUCTION

Nécessaire à toute forme de vie, l'eau est un élément de promotion de la santé des individus et du développement socio-économique des collectivités humaines (Ouattara *et al.*, 2016). L'utilisation de l'eau dans plusieurs secteurs d'activités humaines, l'augmentation de la population et les variations climatiques sont des facteurs qui affectent la ressource en eau, en terme de quantité et de qualité (Goné, 2001). Cependant, la répartition de ce patrimoine fragile à travers le monde se fait de façon inégale. Près des trois quarts de la surface du globe sont couverts par l'eau (1370 millions de km²), l'eau douce ne représente que 2,5% et seulement 0,007% de celle-ci est accessible pour l'usage humain (Sarallier, 2003). Les eaux souterraines, quant à elles constituent environ les deux tiers des ressources mondiales en eau douce exploitable (Bantou & Bangoy, 1997). L'eau souterraine est d'une importance capitale dans la plupart des régions du monde. Toutefois, cette ressource qui était jadis de bonne qualité, se trouve actuellement menacée par diverses sources de contamination ponctuelles et diffuses. En effet, leur potabilité se heurte à des pollutions d'origine superficielles liées aux activités anthropiques (Kouamé, 2007). Par ailleurs, dans les pays en voie de développement, ces difficultés sont fortement ressenties du fait de l'insuffisance des systèmes d'assainissement et de gestion des ordures. En effet, le manque et la mauvaise qualité de l'eau de consommation sont des fléaux graves et inquiétants qui affectent plus de trois millions d'habitants de la planète chaque année. Ils sont, selon l'organisation mondiale de la santé (OMS), les causes principales de plus de 80% des maladies et des mortalités dans le monde. En Afrique, l'accessibilité à l'eau de consommation en quantité suffisante et en qualité est l'un des volets essentiels des projets de développement. Par ailleurs, selon les estimations de l'ONU, un tiers de la population africaine n'a pas accès à une source d'eau potable dont la moitié se trouve en Afrique subsaharienne (Karim *et al.*, 2002). La question de l'eau potable n'est guère reluisante en Côte d'Ivoire. En effet, le tarissement progressif des eaux de surface, conjugué à la croissance démographique et au développement des maladies hydriques inquiètent de plus en plus les gestionnaires de la ressource en eau qui doivent satisfaire la demande en quantité et en qualité. On assiste alors depuis quelques années à un plus grand recours aux eaux souterraines (Goné, 2001). Malheureusement, sur le territoire national, qui est occupé essentiellement par les terrains cristallins et cristallophylliens (97,5% de la superficie totale), les réserves d'eau souterraine sont généralement de faibles quantités. Ces réserves sont localisées à travers les aquifères isolés de socle granitique fissuré, d'arènes sablo-argileuses et d'alluvions difficiles à gérer (Biémi, 1992). Ce problème d'eau est aggravé par la baisse presque régulière des précipitations durant ces dernières années, les irrégularités saisonnières, l'avancée galopante de

INTRODUCTION

desertification et la dégradation progressive des facteurs environnementaux (Ahoussi *et al.*, 2012). En Côte d'Ivoire, les eaux souterraines sont confrontées à un phénomène de pollution d'origine anthropique qui dégrade leur qualité. Les études réalisées sur les ressources en eau de la Côte d'Ivoire par Ahoussi *et al.* (2011 ; 2013), Eblin *et al.* (2014), Traoré *et al.* (2015), Orou *et al.* (2016a), Ouattara *et al.* (2016) ont signalé de nombreux foyers de pollution aussi bien au niveau des eaux de surface que des eaux souterraines. Parfois le tarissement et la mauvaise qualité des forages qui captent cette eau souterraine obligent les populations à se tourner vers d'autres sources dont la qualité est méconnue. Le département de Man, situé à l'Ouest de la Côte d'Ivoire, ne fait pas exception à cette situation. De plus, l'utilisation courante des intrants agricoles (engrais, pesticides, etc.) constitue une menace pour la qualité des eaux souterraines. Pour une meilleure gestion de ces ressources, il est indispensable de connaître les processus hydrochimiques qui régissent leur minéralisation. C'est dans cette optique que s'inscrit la présente étude qui a pour thème : « **Caractérisation hydrogéochimique des eaux souterraines du département de Man (Ouest de la Côte d'Ivoire)** ». L'objectif de cette étude est de comprendre le fonctionnement hydrochimique des eaux souterraines du département de Man. De façon spécifique, il s'agit de :

- caractériser les paramètres physico-chimiques des eaux souterraines ;
- déterminer l'origine de la minéralisation des eaux souterraines ;
- déterminer l'âge relatif des eaux souterraines.

Ce présent mémoire est subdivisé en trois parties :

- la première partie traite des généralités sur la zone d'étude. Elle fait donc une description des aspects géographique, hydrogéologique et géologique.
- la deuxième partie est consacrée aux matériel et méthodes utilisés pour la réalisation de ce travail.
- la troisième partie présente les résultats obtenus et leur discussion.

Une conclusion qui fait la synthèse des principaux résultats obtenus et des recommandations mettent fin à cette étude.

PREMIERE PARTIE : GENERALITES

1.1. Généralités sur la zone d'étude

1.1.1. Situation géographique du département de Man

La zone d'étude se situe à l'Ouest de la Côte d'Ivoire entre les longitudes 07°25' et 07°55' Ouest et les latitudes 07°00' et 07°40' Nord (Figure 1) avec une superficie de 2 265 km² et une population estimée à 334 166 habitants (INS, 2014) elle est limitée à l'Est par Kouibly et Facobly, à l'Ouest par Danané, au Nord par Biankouma et au Sud par Bangolo. Man est la capitale régionale et départementale dont les principales sous-préfectures sont : Logoualé, Bogouiné, Fagnampléu, GbangbegouinéYati, Podiagouiné, Sandougou-Soba, Sangouiné, Yapleu, Zagoué et Ziogouiné. Quelques sous-préfectures ont été représentées sur la carte.

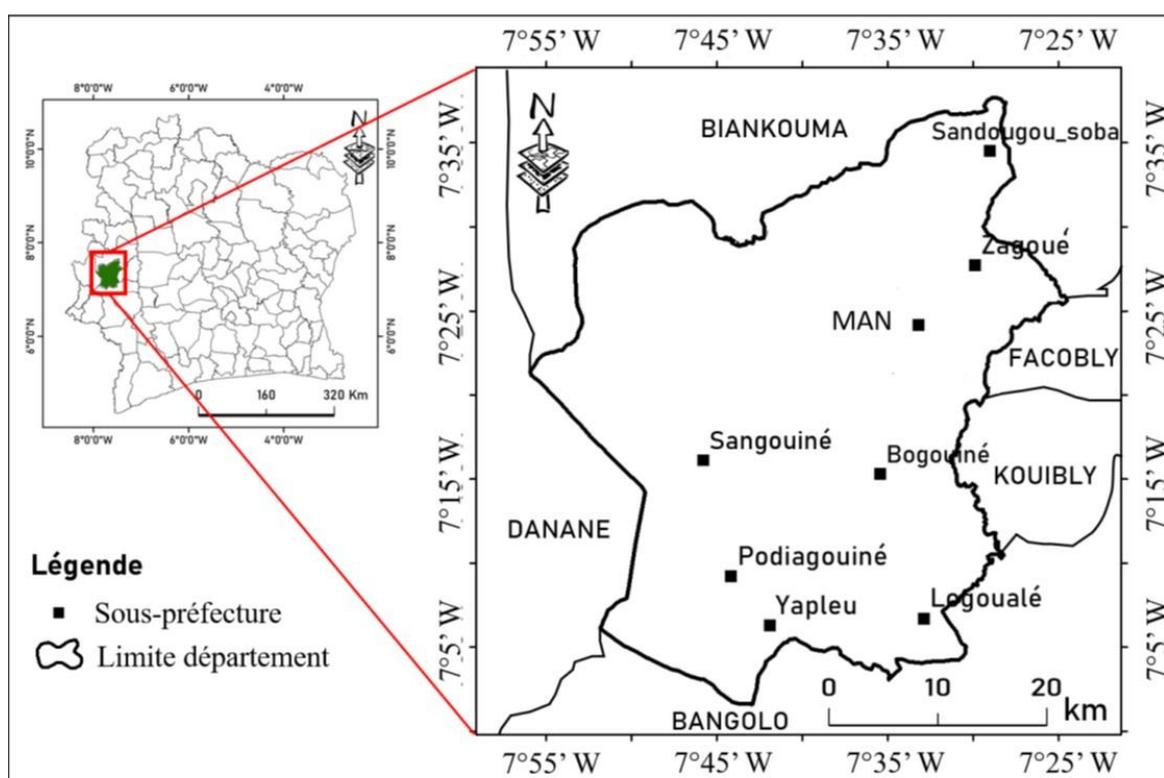


Figure 1 : Localisation de département de Man

1.1.2. Relief

Le relief de Man se subdivise en deux ensembles de morphologie et d'extension inégale : un ensemble montagneux (chaîne des Toura et des Dan) et une zone de plateaux (Kouamé, 1999).

❖ Zone montagneuse

C'est le domaine des hauts sommets où les altitudes dépassent généralement les 1000 mètres. Ce secteur correspond au prolongement oriental de la chaîne du Fouta Djallon, en forme de croissant de lune dont la convexité est tournée vers le NW-SE.

GENERALITES

❖ Zone des plateaux

Cette zone occupe le Sud et le Nord-ouest du secteur montagneux. L'altitude moyenne est égale à 300 m. De nombreux villages et villes sont concentrés dans ce secteur où les dénivellations sont les plus faibles.

1.1.3. Climat

La région Ouest bénéficie d'un climat tropical humide avec une seule saison de pluie et de fortes hauteurs pluviométriques annuelles qui varient de 1095 à 1900 mm (Goné, 2001). On y distingue une saison sèche d'une durée de 4 mois, allant de Novembre à Février et une saison de pluie allant de Mars à Octobre.

En saison pluvieuse, il tombe plus de 100 mm de pluie par mois et les hauteurs maximales sont atteintes pendant les mois d'Août et Septembre et dépassent 275 mm. En saison sèche, les hauteurs de pluie mensuelles ne dépassent guère 50 mm voir (Figure 2).

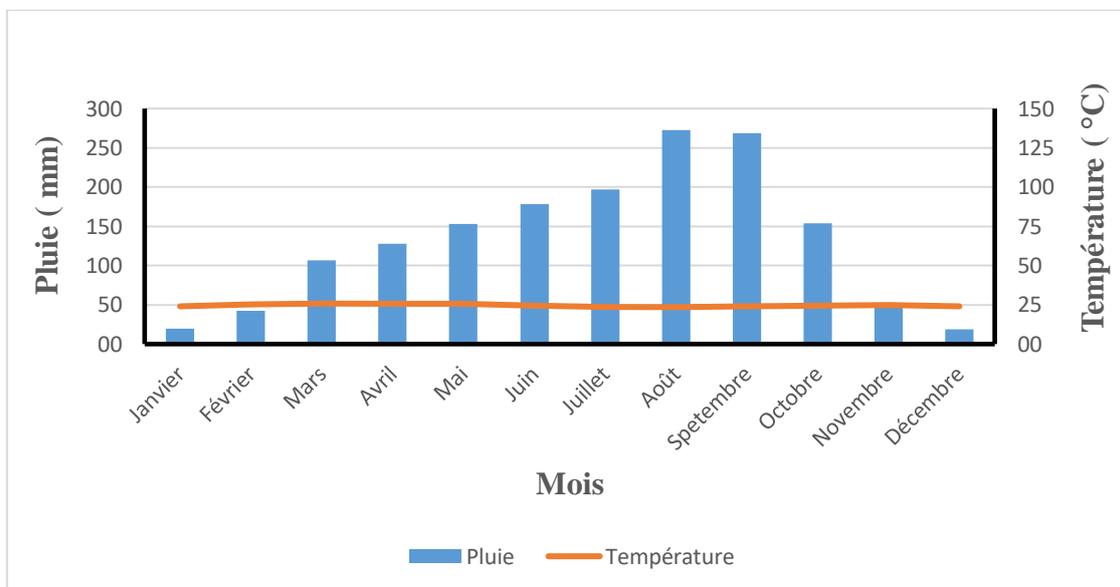


Figure 2 : Diagramme ombrothermique de la station de Man de 1983 à 2019

1.1.4. Hydrographie

Le bassin versant du Sassandra est le principal bassin versant de la région des montagnes. Il occupe toute la partie orientale. La majeure partie du département reste sillonnée par les affluents du Sassandra qui descendent des massifs des Dan et des Toura. On note principalement le Koué et le N'zo (Figure 3). L'architecture de ces cours d'eau est influencée par la fracturation, mais aussi par les facteurs externes tels que la lithologie, la géomorphologie, le climat, etc. De nombreuses études ont montré une forte corrélation entre le réseau hydrographique et les accidents régionaux (Kouamé, 1999 ; Lasm, 2000). Un exemple

GENERALITES

remarquable de la relation entre fracturation et réseau hydrographique est le fleuve Sassandra qui coule sur environ 300 km sur l'accident du Sassandra (Kouamé, 1999). A côté de ces cours d'eaux, on note la présence de sources d'eau naturelles. Les sources sont des résurgences d'eaux souterraines fréquentes dans la région de Man. Il existe principalement deux types de sources. Les sources bien aménagées nommées "source Débagué". Ces sources existent dans les villages non déplacés (Zagoué et Sandougou Soba), et elles sont généralement sacralisées. Les deuxièmes types de source ne bénéficient pas d'un aménagement particulier et sont souvent tapissées de feuilles mortes. Ces dernières sources tarissent généralement en saison sèche.

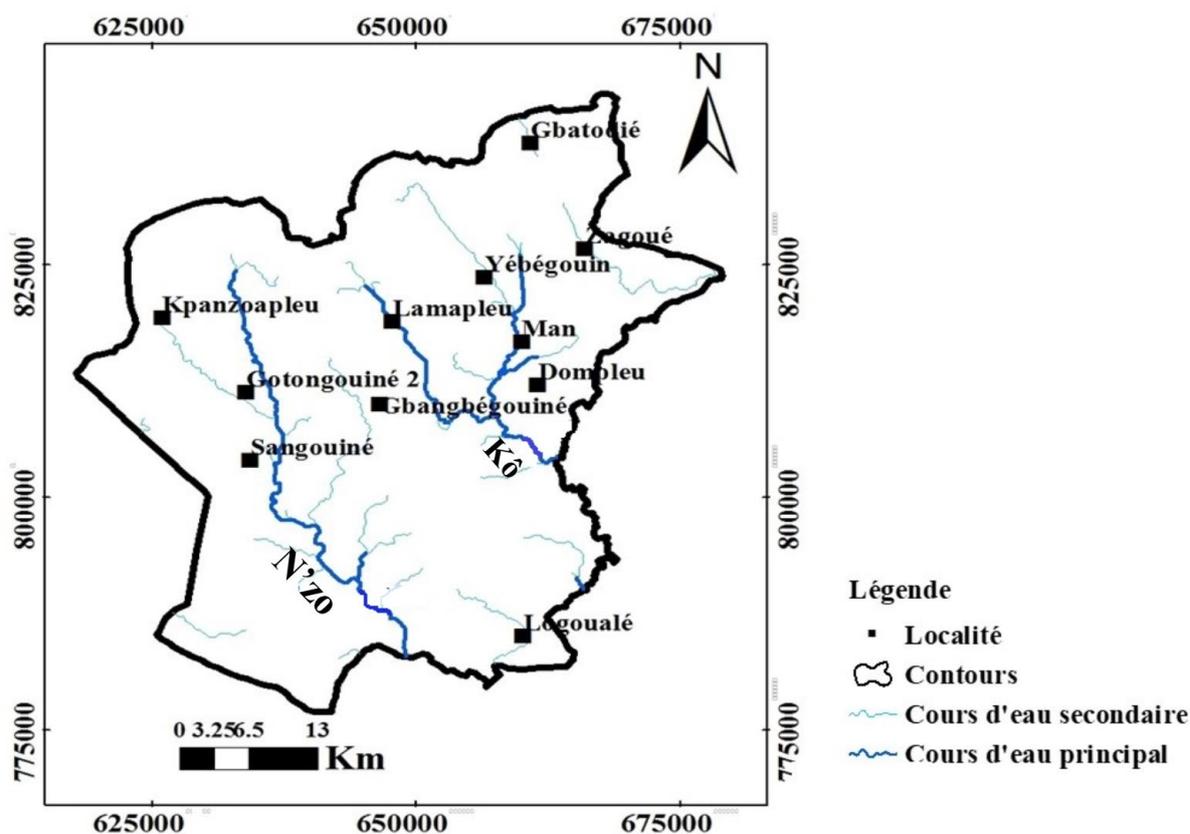


Figure 3 : Carte du réseau hydrographique du département de Man

1.1.5. Sols

Les sols sont essentiellement ferrallitiques (Perraud, 1971) et sont classés en quatre types : sols de plaines alluviales, sols remaniés et rajeunis, sols typiques et remaniés et sols remaniés sur migmatites. Les sols incultivables, soit du fait d'une trop forte pente, soit parce que la roche mère affleure, représentent 18% de la superficie de la région de l'Ouest. Les sols typiques sur granite à hypersthène autour de Biankouma et entre Man et Duékoué sont parmi les meilleures terres cultivables pour leurs aptitudes culturales.

1.1.6. Végétation

Trois secteurs biogéographiques ont été déterminés : le secteur mésophile, le secteur pré-forestier et le secteur de montagne. Le premier occupe les alentours de la ville de Man et correspond aux forêts denses semi-décidues. Le second correspond aux forêts claires, aux savanes boisées, aux savanes arborées et arbustives. Le dernier est souligné par les forêts de montagnes herbeuses (Géomines, 1982a).

1.1.7. Activités économiques

Les Dan (Yacouba et Toura) sont le groupe ethnique dominant du département qui abrite également des autochtones (Ivoiriens) ainsi que des allochtones (Guinéens, Maliens, Burkinabés, etc.). Les non africains constituent une population marginale. Les populations de ce département pratiquent l'agriculture comme activité principale à l'instar de tout l'Ouest du territoire ivoirien. La pêche et l'élevage sont des activités secondaires (Géomines, 1982a). De façon générale, les cultures sont basées sur une association des cultures industrielles (cacao, café et hévéa) et vivrières (riz, banane, manioc, patate douce, maïs, arachide, taro, etc.) ou encore l'association de plusieurs cultures vivrières. L'élevage porte essentiellement sur les bovins et les petits ruminants (moutons et chèvres). Il n'est pratiqué que dans certaines sous-préfectures contrairement à l'agriculture qui se fait sur l'ensemble du département.

1.2. Contexte géologique et hydrogéologique du département de Man

1.2.1. Géologie du département de Man

La zone d'étude appartient au domaine de la dorsale de Man (appelée également dorsale de Léo). Elle prolonge vers l'Est les formations archéennes du Libéria et de la Sierra Léone et se trouve limitée dans sa partie orientale par la faille du Sassandra. De nombreux chercheurs ont travaillé sur la géologie de cette zone. On peut citer entre autres Camil (1984) et Kouamelan (1996). Selon Camil (1984), cette zone peut être subdivisée en deux grands ensembles séparés par la faille de Man d'orientation N70°. Il s'agit du domaine granulitique nord et du domaine granulitique sud (Figure 4). A l'échelle du département, il distingue trois grandes unités lithologiques mises en place dans l'ordre chronologique suivant :

- des unités d'anorthosites, de norites, charnockites qui sont les plus dominants ;
- une unité de granitoïdes hétérogènes à biotite et des granitoïdes à deux micas ;
- des migmatites sur granitoïdes hétérogènes à biotite.

Toutefois, on note la présence d'amphibolites, de pyroxénites, d'itabirites, de quartzites à magnétite et de mylonites. Les gneiss gris et les charnockites sont très développés dans le

GENERALITES

compartiment nord alors que les formations à gneiss migmatitiques et migmatites caractérisent le compartiment sud.

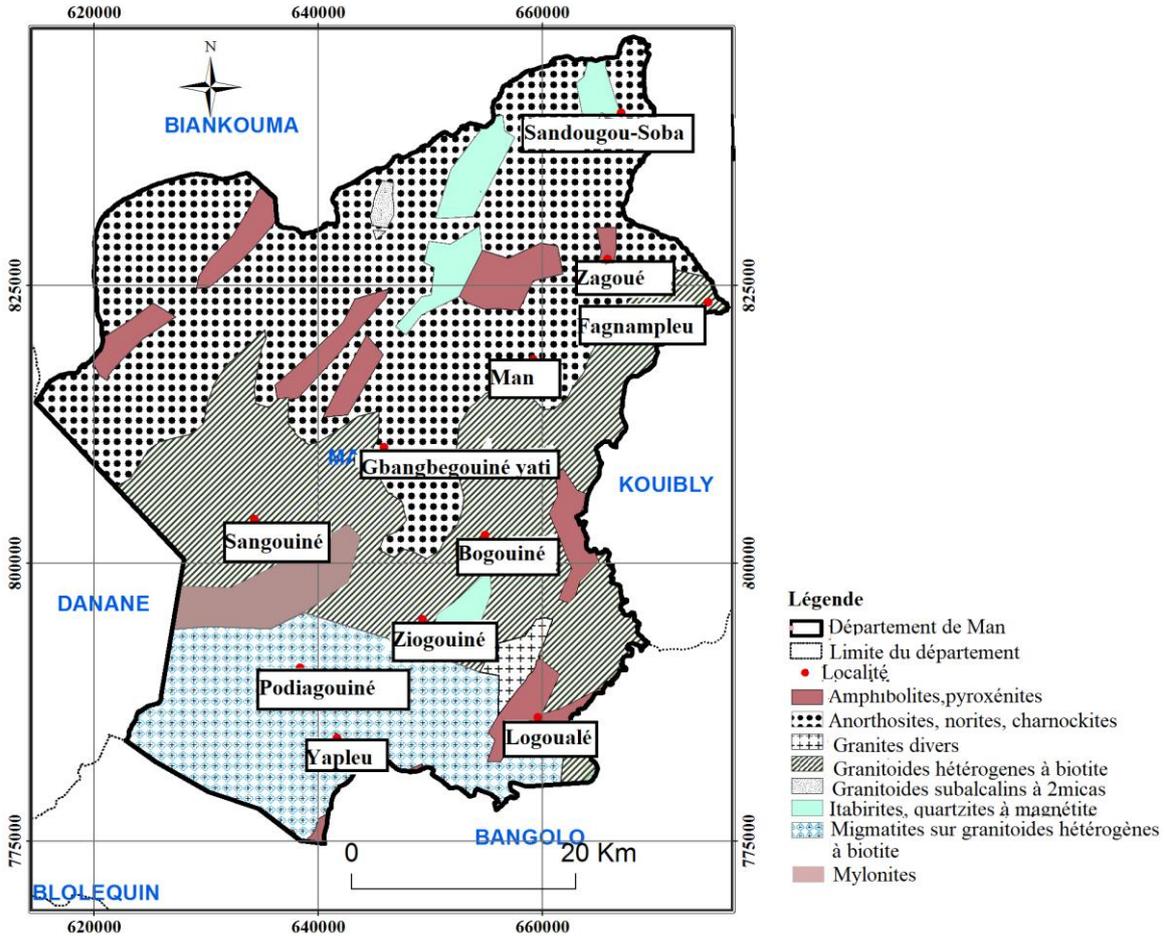


Figure 4 : Carte géologique du département de Man

1.2.2. Hydrogéologie du département de Man

Les travaux de Goné (1997), Saley (1998) et Kouamé (1999) ont permis de caractériser les différents aquifères de cette région. Il s'agit des aquifères d'altérites, des aquifères de fissures, des aquifères d'alluvions et des aquifères de versants.

▪ Aquifères d'altérites

Les réservoirs d'altérites sont le premier niveau de réservoirs d'eau souterraine en milieu de socle cristallin ou cristallophyllien. Ces altérites constituent un vaste réservoir superficiel directement alimenté par l'infiltration de l'eau de pluie de sorte que le niveau piézométrique baisse significativement en saison sèche et remonte en saison des pluies (Biémi, 1992). La baisse du niveau d'eau est due au drainage des eaux souterraines vers les cours d'eau ou autres surfaces d'eau telles que les lacs, mais aussi les puits et forages exploités (Maréchal *et al.*, 2003).

Dans ces réservoirs d'altérites, les niveaux des arènes grenues constituent les niveaux les plus recherchés.

▪ **Aquifères de fissures**

Les aquifères de fissures sous-jacents aux aquifères d'altérites (Figure5), constituent des réservoirs beaucoup plus importants. Ils s'étendent en moyenne sur une épaisseur de 50 m (Maréchal *et al.*, 2003) dans le socle et développent une productivité supérieure à celle des altérites. Contrairement aux aquifères d'altérites, les aquifères de fissures sont à l'abri des fluctuations saisonnières et de la plupart des divers types de pollution. Pour cela, dans les régions de socle, ces aquifères sont de plus en plus recherchés et exploités à partir des forages pour l'alimentation en eau des populations. Les possibilités de formation des aquifères de fissures sont liées à la densité et à l'importance de la fracturation de ceux-ci (Savado, 1984 ; Biémi, 1992).

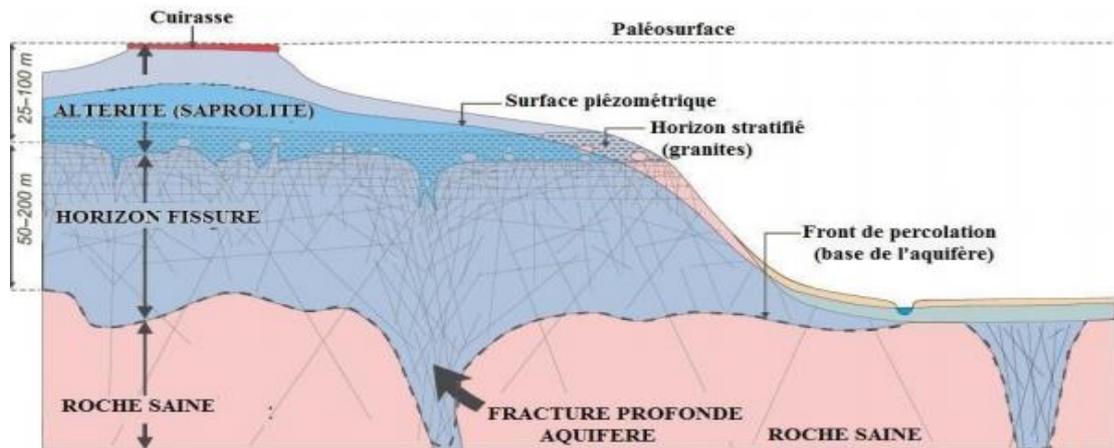


Figure 5 : Schéma simplifié des aquifères sur le socle cristallin (Lachassagne et al ., 2011)

▪ **Aquifères d'alluvions**

Les aquifères d'alluvions sont d'anciens lits de cours d'eau desséchés et recouverts par des sédiments en surface, capables de contenir de l'eau en profondeur. Il s'agit d'anciens lits de cours d'eau ayant disparu à la suite des périodes sèches souvent prolongées ou des cours d'eau affectés par le phénomène de l'eutrophisation. L'exploitation de ces ressources en eau se fait par l'exécution de puits traditionnels peu profonds de 2 à 3 mètres.

▪ **Aquifères de versants**

Les aquifères de versants sont caractéristiques des zones de montagnes. Il s'agit de poches d'eau discontinues, plaquées contre les versants de montagnes. Ces aquifères sont alimentés par le ruissellement des eaux sur les pentes abruptes des montagnes ; ce qui entraîne des sources de

débordement qui alimentent les cours d'eau. Les eaux d'aquifères de versants se restituent assez vite ; ce qui se traduit dans la région de Man par de nombreuses sources d'eau reconnues pour ses qualités exceptionnelles appréciées par les populations locales. Les plus anciennes résurgences d'eau connues sous le nom de sources "Débragué" (Biémi, 1992) existent dans les villages non déplacés (Goné, 2001).

1.3. Processus hydrogéochimique en milieu de socle

1.3.1. Géochimie et interaction eau-roche

L'eau de pluie est légèrement acide du fait de sa teneur en CO₂ dissous. Au cours de son infiltration dans le sol et dans le sous-sol, elle se charge en ions et acquiert des propriétés physiques et chimiques qui caractérisent l'eau de la nappe qu'elle forme. Les eaux sont plus ou moins minéralisées en fonction :

- de la nature des roches traversées et des minéraux rencontrés au cours de l'écoulement ;
- du temps de contact entre l'eau et les minéraux, donc de la vitesse de percolation de l'eau dans le sol due à la transmissivité des systèmes aquifères ;
- du temps de renouvellement de l'eau dans la nappe par l'eau d'infiltration.

Dans la minéralisation, on note donc l'importance des minéraux solubles des roches et la perméabilité de l'aquifère (Jérémie, 1982). La profondeur de la nappe est aussi un facteur très important.

1.3.2. Minéralisation des eaux en milieu cristallin

La minéralisation naturelle des eaux est un ensemble complexe de réactions physico-chimiques (principalement acide-base, échanges ioniques et phénomènes d'oxydo-réduction) entre les matrices solides (minéraux) et le milieu aqueux. La composition chimique des eaux naturelles, en dehors des pollutions généralement d'origine anthropique est le résultat combiné de la composition chimique des précipitations qui atteignent le sol et des réactions avec les minéraux présents dans l'encaissant. La désagrégation mécanique est la première étape du processus de minéralisation des eaux. Elle consiste à l'arrachement, au transfert et à la sédimentation des particules de roche par l'eau (Roose & Sarrailh, 1989 ; Fornis, 2005 ; Kamagaté, 2006). Ce processus est associé à une faible mise en solution d'éléments dissous contribuant directement à la minéralisation des eaux. L'altération chimique, deuxième phase de la minéralisation, consiste à la fois à la dissolution (hydrolyse des silicates, hydratation de la biotite, de l'anhydrite, de l'oligiste) (Schoeller, 1959) et à l'attaque chimique des solides et des gaz par

GENERALITES

l'eau (Kamagaté, 2006). Elle contribue à la production de charges chimiques dissoutes responsables en grande partie de la minéralisation des eaux. Les réactions de mise en solution des charges dissoutes sont d'autant plus intenses que la température et la diffusion sont importantes. Elles sont également plus rapides pour des eaux acides. Les ions H^+ qui dérivent de ces réactions, en pénétrant dans les structures cristallines se substituent aux cations qui passent alors en solution dans l'eau. L'eau ainsi chargée en ions H^+ hydrate d'abord la surface des minéraux essentiellement primaires et hydrolyse ensuite la roche mère. La mise en solution a lieu en général dans la zone non saturée (Appelo & Postma, 1999) et s'accompagne toujours de la néoformation d'argiles secondaires dont la séquence d'apparition est liée au climat et à l'intensité du lessivage.

Conclusion partielle

Le département de Man, situé à l'Ouest de la Côte d'Ivoire, possède des atouts pour son développement. La hauteur moyenne annuelle de pluie varie entre 1 095 et 1900 mm. Le relief du département de Man s'étend sur une zone montagneuse dont les altitudes atteignent les 1000 m et les plateaux dont les altitudes valent les 300 m. Le département de Man possède un réseau hydrographique dense constitué de cours d'eau permanents et temporaires. Après cette présentation des généralités sur la zone d'étude, nous allons aborder la deuxième partie consacrée aux matériel et méthodes.

DEUXIEME PARTIE : MATERIEL ET METHODES

2.1. Matériel

Le matériel se compose de données hydrochimiques de forages et de logiciels de traitement.

2.1.1. Données hydrochimiques de forages

Les analyses physico-chimiques des échantillons d'eau prélevés constituent les données hydrochimiques. L'échantillonnage a été réalisé sur 19 forages (Figure 6) répartis dans le département de Man. Dans le cadre de cette étude, deux campagnes d'échantillonnage ont été menées l'une en saison pluvieuse (Mars 2019) et l'autre en saison sèche (Décembre 2019). La température, le pH, le potentiel redox (Eh), l'oxygène dissous (O_{2dis}), la turbidité et la conductivité électrique (CE) ont été mesurés *in situ* avec le multiparamètre HQ40d portable. Les paramètres chimiques analysés au laboratoire avec le spectrophotomètre DR 6000 HAHC sont Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , NH_4^+ , SO_4^{2-} , HCO_3^- , NO_3^- , Cl^- , NO_2^- , Cu^{2+} , Fe^{2+} , PO_4^{3-} et Al^{3+} .

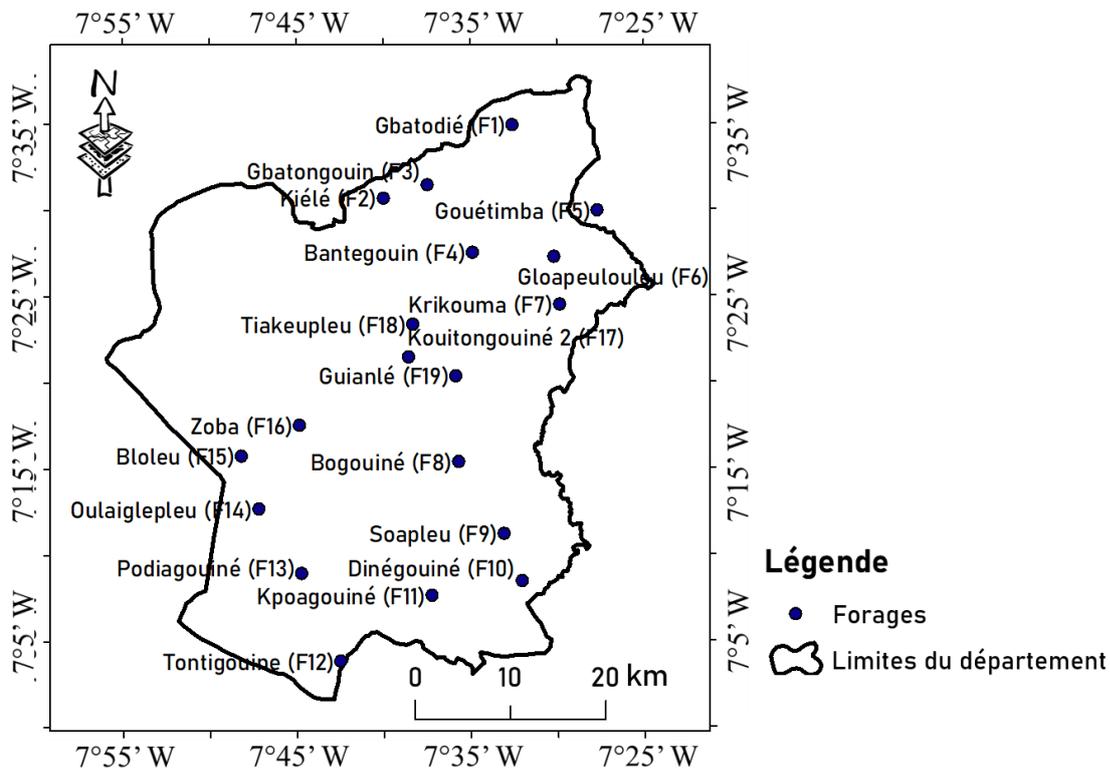


Figure 6 : Carte de répartition des points d'échantillonnage dans le département de Man

2.1.2. Matériel de traitement des données

L'outil de traitement des données est un ordinateur sur lequel sont installés les logiciels suivants:

- Diagrammes (version 5.1) qui est un logiciel hydrochimique multi-langage pour l'interprétation des données hydrochimiques ;

MATERIEL ET METHODES

- Arc GIS 10.5 pour la réalisation des cartes thématiques ;
- Statistica 7.1 pour l'analyse statistique descriptive et l'analyse multivariée ;
- Microsoft Office Excel pour la réalisation des graphiques et des courbes.

2.2. Méthodes

Après avoir procédé à la validation des mesures par la balance ionique, les données collectées ont été traitées en utilisant une combinaison de méthodes statistiques multivariées et de méthodes hydrochimiques.

2.2.1. Méthodologie d'échantillonnage et d'analyse

Les points d'échantillonnages ont été choisis en fonction du niveau d'utilisation du point d'eau par les populations et en fonction de la densité des points d'eau de la zone d'étude. Le GPS a servi à la prise des coordonnées géographiques de ces points. Les bouteilles de 500 ml et de 1 litre en polyéthylène ont également été utilisées pour l'échantillonnage sur le terrain. Le prélèvement, le transport et la conservation des échantillons ont été faits selon les recommandations de Rodier (2009). Les échantillons d'eau pour les analyses physico-chimiques ont été prélevés dans des flacons en polyéthylène de 500 ml. Chaque flacon est rincée trois fois avec l'eau à prélever, puis rempli à refus et fermé hermétiquement avant d'être transportée à froid (4 °C) dans une glacière jusqu'au laboratoire. Les éléments à doser sont : Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ et NH_4^+ pour les cations et SO_4^{2-} , HCO_3^- , NO_3^- , Cl^- , NO_2^- et PO_4^{3-} pour les anions. Les analyses physico-chimiques des eaux ont été réalisées selon les normes préconisées par AFNOR (1997) ou celles homologuées par Rodier (2009). Les métaux ont été dosés à partir de la méthode de spectrométrie à l'aide d'un spectrophotomètre d'absorption atomique. Les analyses réalisées sur les métaux ont porté sur Cu^{2+} , Al^{3+} et Fe^{2+} .

2.2.2. Validation des mesures

La balance ionique est utilisée pour vérifier la fiabilité des résultats des analyses chimiques. Le calcul de la balance ionique (BI) se fait par la vérification de l'échelle des anions et des cations. En théorie, la somme des anions exprimée en méq/L doit correspondre exactement à la somme des cations également exprimée en méq/L (Soro, 2017). Une balance ionique parfaitement équilibrée s'obtient rarement. Il y a toujours un pourcentage d'erreurs (ERR) évalué suivant la formule de l'équation 1 :

$$\text{Erreur} = \frac{\Sigma \text{cations} - \Sigma \text{anions}}{\Sigma \text{cations} + \Sigma \text{anions}} * 100 \quad (\text{Eq .1})$$

- Si $ERR < 5\%$, alors l'analyse est jugée satisfaisante.
- Si $5\% < ERR < 10\%$, alors l'analyse est jugée acceptable.
- Si $ERR > 10\%$, alors l'analyse est douteuse et doit être reprise pour vérification.

2.2.3. Caractérisation des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines du département de Man.

2.2.3.1. Statistiques élémentaires des paramètres physico-chimiques

La caractérisation physico-chimique des eaux souterraines nécessite la quantification des différents paramètres physico-chimiques. Elle s'appuie sur la statistique descriptive par le calcul des moyennes, des maximums, des minimums, des écart-types et des coefficients de variation (CV) des paramètres physico-chimiques comparés aux normes de potabilité (OMS, 2011).

2.2.3.2. Détermination des faciès hydrochimiques

La détermination des hydrofaciès a nécessité l'utilisation du diagramme de Piper à partir du logiciel Diagrammes (version 5.1). Le diagramme de Piper est une des façons les plus classiques de comparer les compositions chimiques en éléments majeurs d'un grand nombre d'eaux (Derron, 2004). Il permet une visualisation triangulaire de chaque eau en fonction des anions majeurs (HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} et NO_3^-) et des cations majeurs (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ et K^+). Il est composé de deux triangles représentant respectivement la répartition des anions et celle des cations, et un losange supérieur représentant la répartition synthétique des ions majeurs. Ce dernier est subdivisé en quatre losanges matérialisant un type d'eau (Ohou, 2009).

2.2.4. Analyse statistique multivariée à partir de l'ACP et la CAH

Pour connaître l'origine de la minéralisation des eaux, l'analyse statistique multivariée a été réalisée à partir de l'Analyse en Composantes Principales (ACP) sur des variables (paramètres physico-chimiques) et la Classification Ascendante Hiérarchique (CAH). Cette analyse statistique a pour but de comprendre l'hydrochimie des eaux de la zone d'étude. Selon Lasm *et al.* (2011), Orou *et al.* (2016b) et Akatumbila *et al.* (2016). L'ACP est une méthode statistique multidimensionnelle descriptive, utilisable comme outil d'aide à l'interprétation d'une matrice de données. Cette analyse permet de synthétiser et de classer un nombre important de données afin d'en extraire les principaux facteurs qui sont à l'origine de l'évolution simultanée des variables et de leur relation réciproque. Elle permet de mettre en évidence les ressemblances et la position graphique que présenteraient deux ou plusieurs variables chimiques au cours de leur

évolution. La CAH est un ensemble de techniques statistiques utilisées pour déterminer des groupes statistiques naturels ou des structures dans les données. Selon Hussein (2004), l'application de cette méthode en géologie a été introduite par Davis en 1986. Cette méthode est couramment utilisée pour analyser les données hydro chimiques et vient en appoint de l'ACP (Hussein, 2004 ; Yidana *et al.*, 2007). C'est un outil puissant pour l'analyse des données chimiques des eaux eu égard à la complexité des systèmes hydrochimiques et des difficultés que l'on rencontre dans leur interprétation.

2.2.5. Détermination de l'âge relatif des eaux souterraines

Les indices de saturation permettent de connaître le degré de saturation des eaux par rapport aux minéraux présents ou susceptibles de se précipiter dans l'aquifère. L'indice de saturation (IS) d'un minéral est obtenu à partir de l'équation 2 (Belkhiri, 2011) :

$$IS = \log \left(\frac{PAI}{Kps} \right) \quad (\text{Eq. 2})$$

où PAI est le produit d'activité ionique des espèces chimiques dissociées en solution et Kps, le produit de solubilité d'équilibre pour le produit chimique impliqué à la température de l'échantillon.

- Lorsque $IS < 0$, la solution est sous-saturée par rapport au minéral (dissolution du minéral). L'eau est capable de dissoudre dans ce cas le minéral.
- Lorsque $IS = 0$, la solution et la phase solide sont à l'équilibre (équilibre).
- Lorsque $IS > 0$, la solution est sursaturée par rapport au minéral (précipitation du minéral).

Il est important de noter que l'indice de saturation dépend directement de la validité des mesures de teneurs ioniques et de la mesure du pH, en particulier pour la saturation vis-à-vis des minéraux carbonatés. Dans cette étude, nous avons utilisé les valeurs de ISC et ISD obtenues à partir du logiciel Diagrammes. Ces valeurs ont été utilisées pour construire le diagramme $ISD=f(ISC)$ pour déterminer l'âge relatif des eaux souterraines.

Conclusion partielle

La deuxième partie a permis de présenter le matériel et les méthodes utilisés dans cette étude. L'approche hydrogéochimique adoptée est basée sur les techniques de l'analyse statistique des paramètres physiques et chimiques, l'analyse statistique multivariée (ACP et CAH) et les indices de saturation (ISC et ISD). L'ensemble du matériel et des méthodes a permis d'obtenir des résultats et leur discussion qui font l'objet de la troisième partie de ce travail.

**TROISIEME PARTIE : RESULTATS ET
DISCUSSION**

RESULTATS ET DISCUSSION

3.1. Résultats

3.1.1. Validité des mesures

La balance ionique présente un déséquilibre dans tous les forages. La majorité des forages ont une erreur supérieure à 5%. En effet, la majeure partie des échantillons d'eaux présentent tantôt une nette dominance des anions par rapport aux cations, tantôt l'inverse (Tableau I).

Tableau I : Balance ionique de la saison sèche et de la saison pluvieuse

Forage	Saison sèche				Saison pluvieuse			
	Cations	Anions	Balance	Erreur (%)	Cations	Anions	Balance	Erreur (%)
F1	910,12	2481,11	-1570,99	-46,325	1150,87	2047,205	-896,335	-28,027
F2	2135,4	3593,09	-1457,69	-25,446	625,22	3656,27	-3031,05	-70,794
F3	3298,8	5524,82	-2226,02	-25,228	650,28	4868,9	-4218,62	-76,436
F4	1937,1	5586,23	-3649,13	-48,504	485,9	4755,4	-4269,5	-81,459
F5	1472,4	1103,08	369,32	14,340	918,18	740,07	178,11	10,741
F6	799,75	1270,78	-471,03	-22,749	247,03	1363,98	-1116,95	-69,332
F7	3340,38	5449,41	-2109,03	-23,994	529,39	4904,815	-4375,425	-80,516
F8	690,42	1091,61	-401,19	-22,513	487,47	1200,385	-712,915	-42,238
F9	1370,38	3848,26	-2477,88	-47,481	566,46	1219,83	-653,37	-36,577
F10	954,91	8732,41	-7777,5	-80,285	547,55	3174,605	-2627,055	-70,579
F11	2176,9	5740,55	-3563,65	-45,010	608,45	5766,345	-5157,895	-80,911
F12	1058,5	2249,69	-1191,19	-36,007	779,09	1196,7	-417,61	-21,136
F13	1911,8	7003,15	-5091,35	-57,110	687,61	6619,61	-5932	-81,180
F14	2982,71	8486,45	-5503,74	-47,987	256,18	8607,575	-8351,395	-94,220
F15	561,29	1975,41	-1414,12	-55,746	1411,05	1681,005	-269,955	-8,731
F16	1401,6	4789,16	-3387,56	-54,720	466,29	3843,26	-3376,97	-78,360
F17	3201,8	3172,57	29,23	0,459	388,35	2695,79	-2307,44	-74,816
F18	1181	2875,15	-1694,15	-41,767	674,36	1713,68	-1039,32	-43,522
F19	1008,7	2565,91	-1557,21	-43,563	566,83	2365,605	-1798,775	-61,341

3.1.2. Caractéristiques physico-chimiques des eaux souterraines du département de Man

3.1.2.1. Statistiques élémentaires des paramètres physico-chimiques

▪ Cations

La figure 7 présente l'histogramme de la statistique élémentaire des cations de la zone d'étude. En saison sèche, les concentrations en calcium (Ca^{2+}) varient de 13 mg/L à 129 mg/L avec une moyenne de $50,474 \pm 37,493$ mg/L. Les teneurs de calcium en saison pluvieuse s'inscrivent dans la gamme de 1,440 mg/L à 49,630 mg/L avec une moyenne de $14,035 \pm 10,449$ mg/L. Tous les points d'eau présentent des concentrations inférieures à la valeur guide de l'OMS (2011) qui est de 100 mg/L en saison pluvieuse alors qu'en saison sèche les forages F7, F14 et F17 (129

RESULTATS ET DISCUSSION

mg/L, 112 mg/L et 112 mg/L) ont des valeurs supérieures à la valeur guide de l'OMS (2011). Pendant la saison sèche, la teneur de magnésium (Mg^{2+}) varie de 8 mg/L à 80 mg/L pour une moyenne de $28,421 \pm 18,928$ mg/L. Le magnésium a des concentrations allant de 1,53 mg/L à 70,74 mg/L pour une moyenne de $10,739 \pm 15,493$ mg/L pendant la saison pluvieuse. Le forage F3 (80 mg/L) en saison sèche et le forage F1 (70,74 mg/L) en saison pluvieuse ont des teneurs en magnésium au-dessus de la valeur guide de l'OMS (2011). La concentration de sodium (Na^+) dans les eaux souterraines varie de 3,490 mg/L et 17,230 mg/L pour une moyenne de $8,567 \pm 3,789$ mg/L pendant la saison sèche et 1,03 mg/L et à 7,48 mg/L pour une moyenne de $4,712 \pm 1,802$ mg/L pendant la saison pluvieuse. Les teneurs de potassium (K^+) varient de 1,10 mg/L à 18,90 mg/L avec une moyenne de $3,867 \pm 3,941$ mg/L pendant la saison sèche et de 0,30 mg/L à 8,90 mg/L avec une moyenne de $2,912 \pm 1,973$ mg/L pendant la saison pluvieuse. Le forage F2 (18,90 mg/L) a une teneur de potassium qui dépasse celle de la valeur guide de l'OMS en saison sèche. Les teneurs en ammonium (NH_4^+) varient de 0,020 mg/L à 0,030 mg/L avec une moyenne de $0,021 \pm 0,002$ mg/L pendant la saison sèche et de 0,010 mg/L à 0,030 mg/L avec une moyenne de $0,020 \pm 0,003$ mg/L pendant la saison pluvieuse. Ces teneurs sont inférieures à la valeur guide de l'OMS (2011) qui est de 1,5 mg/L. Les teneurs en cuivre (Cu^{2+}) varient de 0,040 mg/L à 0,110 mg/L avec une moyenne de $0,047 \pm 0,018$ mg/L pendant la saison sèche et de 0,01 mg/L à 0,08 mg/L avec une moyenne de $0,043 \pm 0,017$ mg/L pendant la saison pluvieuse. Les teneurs en fer (Fe^{2+}) varient de 0,020 mg/L à 4,490 mg/L avec une moyenne de $0,417 \pm 1,009$ mg/L pendant la saison sèche et de 0,010 mg/L à 0,490 mg/L avec une moyenne de $0,120 \pm 0,135$ mg/L pendant la saison pluvieuse. D'après les résultats obtenus, on remarque que les teneurs en fer sont très importantes dans les eaux des forages F4 (0,42 mg/L) et F7 (0,49 mg/L) en saison pluvieuse et dépassent la valeur guide de l'OMS (2011). En saison sèche. Les forages F5, F7 et F11 avec respectivement (4,49 mg/L, 0,74 mg/L et 0,74 mg/L) ont des teneurs de fer au-dessus de la valeur guide de l'OMS (2011). Les teneurs en aluminium (Al^{3+}) varient de 0,005 mg/L à 0,06 mg/L avec une moyenne de $0,011 \pm 0,012$ mg/L pendant la saison sèche et elles sont comprises entre 0,008 mg/L à 0,06 mg/L avec une moyenne de $0,012 \pm 0,012$ mg/L pendant la saison pluvieuse. Les valeurs des teneurs de Cu^{2+} , Na^+ et NH_4^+ sont homogènes car leur CV < 50 %. Par contre, les valeurs des autres cations sont hétérogènes car leur CV > 50 % au cours des deux saisons.

RESULTATS ET DISCUSSION

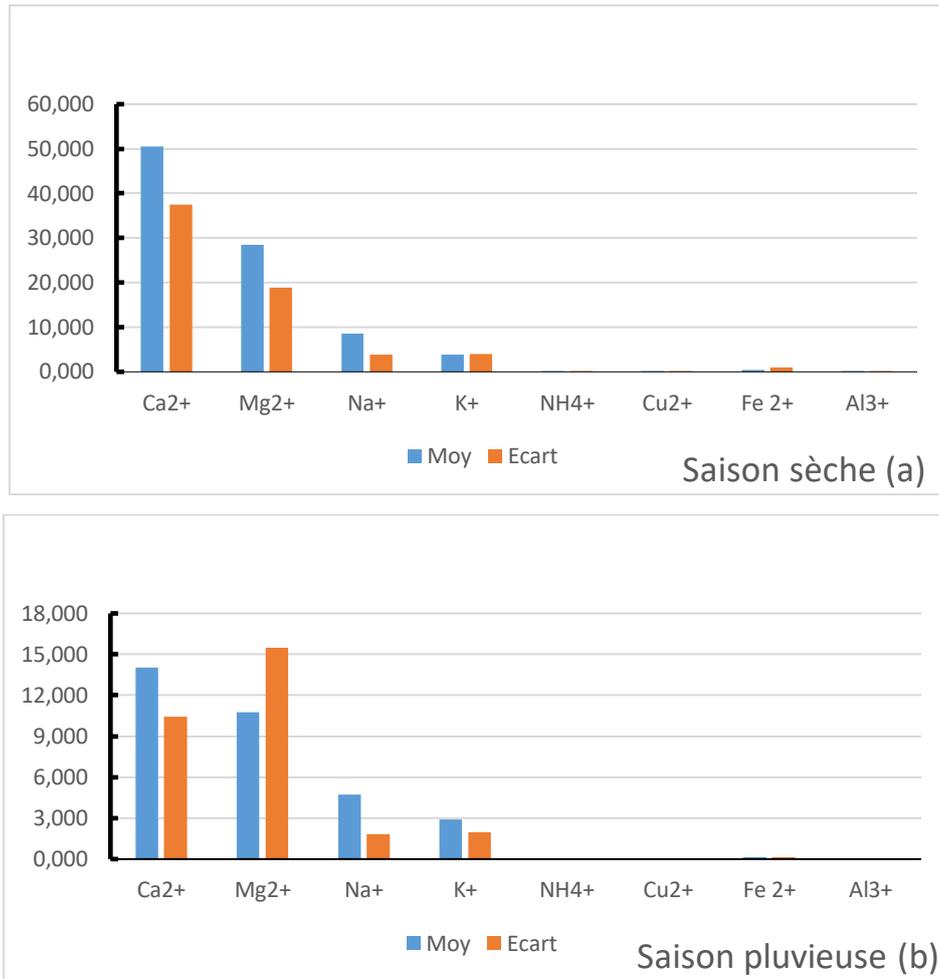


Figure 7 : Histogramme des cations de la saison sèche (a) et de la saison pluvieuse (b)

▪ Anions

La figure 8 présente l'histogramme de la statistique élémentaire des anions de la zone d'étude. Les concentrations en chlorures (Cl⁻) obtenues en saison sèche varient de 0,010 mg/L à 4,350 mg/L avec une moyenne de $0,938 \pm 1,287$ mg/L. Les teneurs en chlorures obtenues en saison pluvieuse oscillent entre 0,010 mg/L à 7,300 mg/L avec une moyenne de $1,264 \pm 1,935$ mg/L. Toutes ces valeurs sont inférieures à la valeur guide de l'OMS (2011) qui est de 250 mg/L définie pour les eaux de consommation. Les teneurs en sulfate (SO₄²⁻) sont comprises entre 2 mg/L à 15 mg/L avec une moyenne de $3,526 \pm 3,486$ mg/L pendant la saison sèche. Les teneurs de sulfate pendant la saison pluvieuse, varient de 1 mg/L à 9 mg/L avec une moyenne de $2,316 \pm 1,974$ mg/L. Ces eaux sont aptes à la consommation humaine car toutes les valeurs sont en dessous de la valeur guide de l'OMS (2011) qui est de 250 mg/L. Les ions hydrogénocarbonates (HCO₃⁻) ont des concentrations qui varient de 6,40 mg/L à 132,90 mg/L avec une moyenne de $51,19 \pm 39,172$ mg/L pendant la saison sèche et de 3,40 mg/L à 139,20 mg/L avec une moyenne de $48,389 \pm 36,119$ mg/L pendant la saison pluvieuse. En saison sèche,

RESULTATS ET DISCUSSION

les teneurs en nitrate (NO_3^-) oscillent entre 2,50 mg/L et 41,30 mg/L avec une moyenne de $12,175 \pm 8,806$ mg/L. Les teneurs du nitrate en saison pluvieuse varient de 0,30 mg/L à 17,90 mg/L avec une moyenne de $2,932 \pm 3,963$ mg/L. Les valeurs de nitrate obtenues sont inférieures à la valeur guide de l'OMS (2011) fixées à 50 mg/L. En saison sèche, les eaux des forages ont une teneur en nitrite (NO_2^-) qui oscille entre 0,002 et 0,021 mg/L avec une valeur moyenne de $0,007 \pm 0,006$ mg/L. Les valeurs de nitrites en saison pluvieuse, varient de 0,002 à 0,08 mg/L avec une moyenne de $0,013 \pm 0,019$ mg/L. Les eaux souterraines en saison pluvieuse et en saison sèche ont une concentration inférieure à la valeur guide de l'OMS (2011) pour la potabilité des eaux de boisson fixée à 3 mg/L. Les teneurs en phosphate (PO_4^{3-}) varient de 0,19 mg/L à 3,50 mg/L avec une moyenne de $0,962 \pm 1,014$ mg/L pendant la saison sèche et de 0,29 mg/L à 4,20 mg/L avec une moyenne de $1,061 \pm 0,984$ mg/L pendant la saison pluvieuse. Pendant les deux saisons, les valeurs des anions sont hétérogènes car leur CV > 50 %.

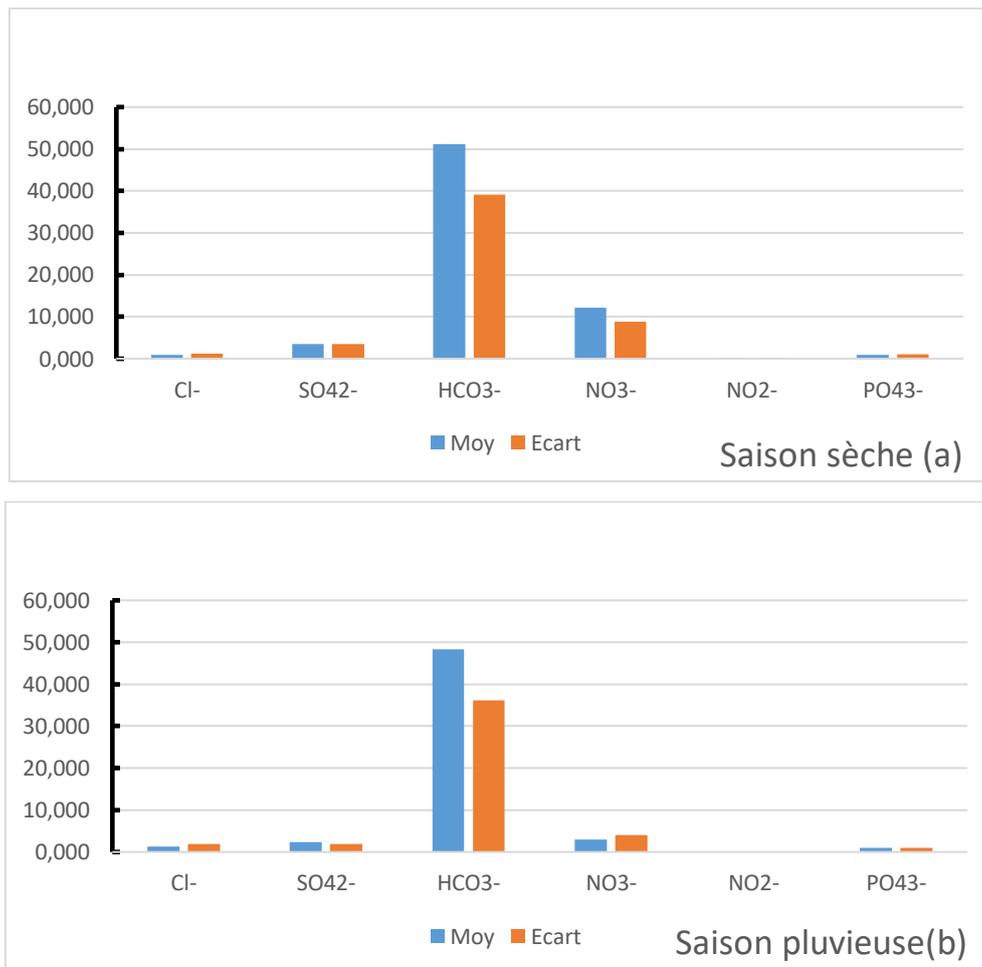


Figure 8 : Histogramme des anions de la saison sèche (a) et de la saison pluvieuse (b)

▪ Paramètres physiques

RESULTATS ET DISCUSSION

Le tableau II présente les statistiques des paramètres physiques de la zone d'étude. L'analyse du tableau montre que les eaux souterraines de la zone d'étude ont des températures qui varient de 23,70°C et à 31,30°C avec une moyenne de 27,342±1,712°C en saison sèche. Le forage F18 a la valeur maximale (31,30°C) qui est supérieure à la valeur guide de l'OMS. Pendant la saison pluvieuse, les températures varient de 23,90°C à 33,60°C avec une moyenne de 28,005±2,164°C. Au cours de cette saison, le forage F3 a la valeur maximale (33,60°C) de température supérieure à celle de la valeur guide de l'OMS (2011). Les valeurs de turbidité évoluent de 0,32 NTU à 2,81 NTU avec une moyenne de 0,759±0,582 NTU en saison sèche. Pendant la saison pluvieuse, les valeurs de turbidité varient entre 0,49 NTU et 4,38 NTU avec une moyenne de 1,145±0,914 NTU. Les valeurs de turbidité de tous les forages respectent la valeur guide de l'OMS (2011). Au cours de la saison sèche, les valeurs de la conductivité électrique (CE) varient de 113,80 µS/cm à 391,00 µS/cm avec une moyenne de 219,511±90,362 µS/cm. En saison pluvieuse, elles varient de 83,40 µS/cm à 376,00 µS/cm avec une moyenne de 206,50±98,352 µS/cm. Les eaux ayant une bonne minéralisation sont caractérisées par des valeurs de conductivités inférieures à 500 µS/cm (19 forages, soit 100 %) pendant la saison pluvieuse et la saison sèche. En saison sèche, les valeurs de pH sont comprises entre 5,58 et 7,74 avec une moyenne de 6,673±0,541. En saison pluvieuse, les valeurs de pH varient de 5,25 à 7,11 avec une moyenne de 6,223±0,441. En saison sèche, 57,89% des eaux souterraines ont des valeurs de pH situées dans l'intervalle de la norme OMS (2011) (6,5 < pH < 8,5) et sont majoritairement neutres. En saison pluvieuse, 15,79% des eaux souterraines ont des valeurs de pH situées dans l'intervalle de la valeur guide de l'OMS (2011) (6,5 < pH < 8,5). Les eaux sont majoritairement acides. Les valeurs du potentiel redox (Eh) varient de -28,50 mV et à 72,70 mV avec une moyenne de 13,074±27,387mV en saison sèche. En saison pluvieuse, les valeurs sont comprises entre 1,00 mV et 100,60 mV avec une moyenne de 42,995±24,566 mV. Les teneurs d'oxygène dissous (O₂dis) varient de 2,30 mg/L à 5,60 mg/L avec une moyenne de 4,058±0,958 mg/L pendant la saison sèche et de 2,90 mg/L à 6,50 mg/L avec une moyenne de 4,937±0,971 mg/L pendant la saison pluvieuse. Pendant les deux saisons les données de T°C, CE, pH et O₂dis sont homogènes car leur CV < 50 % et celles de Turb et Eh sont hétérogènes car leur CV > 50 %.

RESULTATS ET DISCUSSION

Tableau II : Statistiques élémentaires des paramètres physiques du département de Man

Variable	Unité	Saison sèche (Décembre 2019)					Saison pluvieuse (Mars 2019)					Valeur guide de l'OMS (2011)
		Min	Max	Moy	σ	CV (%)	Min	Max	Moy	σ	CV (%)	
T°C	°C	23,700	31,300	27,342	1,712	6,261	23,900	33,600	28,005	2,164	7,727	25 °C à 30°C
Turb	NTU	0,320	2,810	0,759	0,582	76,680	0,490	4,380	1,145	0,914	79,825	< 5
CE	$\mu\text{S/cm}$	113,800	391,000	219,511	90,362	41,165	83,400	376,000	206,500	98,352	47,628	≤ 500
pH		5,580	7,740	6,673	0,541	8,107	5,250	7,110	6,223	0,441	7,087	6,5 < pH < 8,5
Eh	mV	-28,500	72,700	13,074	27,387	209,477	1,000	100,600	42,995	24,566	57,137	
O₂dis	mg/L	2,300	5,600	4,058	0,958	23,608	2,900	6,500	4,937	0,971	19,668	

Min : Minimum ; **Max** : Maximum ; **Moy** : Moyenne ; **σ** : Ecartype ; **CV** : coefficient de variation

3.1.2.2. Hydrofaciès des eaux souterraines du département de Man

La figure 7 présente la projection des échantillons d'eaux souterraines de la zone d'étude au cours des deux saisons (sèche et pluvieuse). L'analyse du diagramme de Piper révèle que les eaux souterraines de la zone d'étude présentent deux faciès pour la saison sèche et trois faciès pour la saison pluvieuse. En saison sèche, on a un faciès **hydrogénocarbonaté calcique et magnésien** représentant 84,21% des eaux analysées. Il se compose des forages F1, F2, F3, F4, F7, F6, F8, F10, F11, F13, F14, F15, F16, F17, F18 et F19. A côté de ce faciès, on note un faciès **chloruré calcique et magnésien** avec 15,79% composé des forages F5, F9 et F12. En saison pluvieuse, on rencontre le faciès **hydrogénocarbonaté calcique et magnésien** représentant 84,21% des eaux analysées et composé des forages F1, F2, F3, F4, F7, F8, F10, F11, F12, F13, F14, F15, F16, F17, F18 et F19. A côté de ce faciès, on a le faciès **chloruré calcique et magnésien** (10,53%) composé des forages F5 et F9. Le troisième faciès est le faciès **hydrogénocarbonaté sodique et potassique** (5,26%) représenté par le forage F6.

On remarque que le forage F6 et F12 ont changé de faciès en passant de la saison sèche a la saison pluvieuse.

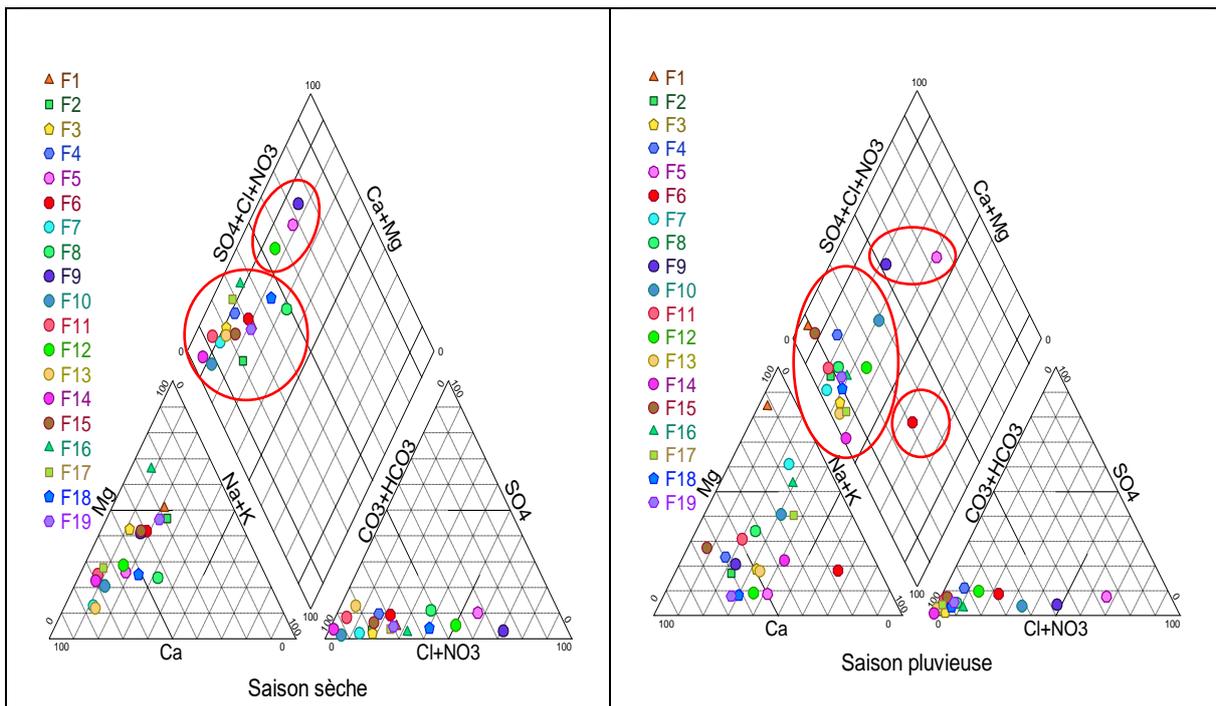


Figure 9 : Représentation des eaux souterraines du département de Man dans le diagramme de piper

3.1.3. Analyse statistique multivariée des eaux souterraines du département de Man.

3.1.3.1. Analyse en Composantes Principales (ACP)

➤ Saison sèche

▪ Analyse du pourcentage de variance exprimée

Les valeurs propres qui permettent d'apprécier la variance exprimée par chaque facteur sont consignées dans le tableau III. Les facteurs 1, 2, 3 et 4 expriment respectivement 22,677%, 16,421%, 11,518% et 10,175% de la variance. Le facteur 5 représente 8,893% de la variance et le facteur 6 représente 7,315% de celle-ci. L'analyse du tableau montre que les six premiers facteurs constituent 76,999% de la variance. Ces facteurs regroupent le maximum de la variance exprimée et sont suffisants pour donner l'information recherchée.

Tableau III : Valeurs propres et pourcentage de variance exprimée de la saison sèche

	F1	F2	F3	F4	F5	F6
Valeur Propre	4,535	3 ,284	2,304	2,035	1,779	1,463
% total variance	22,677	16,421	11,518	10,175	8,893	7,315
Cumul Valeur Propre	4,535	7,820	10,123	12,158	13,937	15,400
Cumul %	22,677	39,098	50,616	60,791	69,684	76,999

▪ Analyse de la matrice de corrélation

Le tableau IV présente la matrice de corrélation des différentes variables. L'examen du tableau montre que les corrélations les plus fortes sont celles établies entre Al^{3+} et NO_3^- (0,80), NO_3^- et Cl^- (0,77) et Eh et HCO_3^- (0,71). La conductivité électrique (CE) est assez corrélée avec Ca^{2+} (0,75) et Na^+ (0,60). Il existe également une corrélation à un degré moindre entre Al^{3+} et Cl^- (0,65), HCO_3^- et pH (0,62), Ca^{2+} et Na^+ (0,63) et Eh et pH (-0,91).

RESULTATS ET DISCUSSION

Tableau IV : Matrice de corrélation de la saison sèche

	T°C	Turb	CE	pH	Eh	O ₂ dis	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	NH ₄ ⁺	PO ₄ ³⁻	Cu ²⁺	Fe ²⁺	Al ³⁺	
T°C	1,00																				
Turb	-0,16	1,00																			
CE	0,11	-0,10	1,00																		
pH	-0,23	0,10	0,34	1,00																	
Eh	0,14	0,00	-0,37	-0,91	1,00																
O ₂ dis	-0,08	-0,03	-0,04	0,11	0,06	1,00															
Ca ²⁺	0,30	-0,20	0,75	0,46	-0,59	-0,18	1,00														
Mg ²⁺	-0,31	-0,15	0,48	0,22	-0,11	0,28	0,31	1,00													
Na ⁺	0,11	0,09	0,60	0,14	-0,20	0,08	0,63	0,37	1,00												
K ⁺	-0,30	0,15	0,05	0,35	0,05	0,25	-0,09	0,34	-0,07	1,00											
Cl ⁻	0,19	-0,15	0,18	-0,50	0,54	0,36	-0,21	0,12	-0,06	0,00	1,00										
SO ₄ ²⁻	0,04	-0,14	0,30	0,40	-0,50	-0,18	0,32	-0,21	-0,09	-0,04	-0,05	1,00									
HCO ₃ ⁻	-0,04	-0,27	0,51	0,62	-0,71	-0,19	0,57	0,12	0,12	-0,09	-0,34	0,46	1,00								
NO ₃ ⁻	0,06	-0,06	0,17	-0,34	0,36	0,39	-0,14	0,29	0,27	-0,10	0,77	-0,24	-0,30	1,00							
NO ₂ ⁻	0,01	0,09	-0,37	-0,03	-0,06	0,08	-0,33	-0,43	-0,17	-0,26	-0,12	0,10	-0,05	0,05	1,00						
NH ₄ ⁺	0,21	0,23	0,46	0,03	-0,05	-0,24	0,51	-0,08	0,55	-0,09	-0,17	-0,11	0,15	-0,02	-0,11	1,00					
PO ₄ ³⁻	0,39	-0,16	-0,27	-0,07	0,06	0,09	0,06	0,04	0,22	-0,04	-0,20	-0,20	-0,19	0,06	0,25	0,00	1,00				
Cu ²⁺	-0,15	-0,04	-0,37	-0,05	0,01	0,30	-0,35	-0,23	-0,23	-0,23	-0,23	-0,11	-0,24	-0,20	0,38	-0,09	-0,15	1,00			
Fe ²⁺	0,16	-0,12	-0,03	-0,45	0,48	-0,17	0,01	-0,16	-0,12	0,16	0,29	-0,09	-0,21	-0,12	-0,23	0,08	-0,20	-0,12	1,00		
Al ³⁺	-0,01	0,01	0,13	-0,18	0,18	0,29	-0,11	0,04	0,15	-0,14	0,65	-0,11	-0,20	0,80	0,27	-0,06	-0,13	-0,12	-0,08	1,00	

RESULTATS ET DISCUSSION

▪ Analyse de la projection dans l'espace des variables et des individus

Le tableau V présente les coordonnées des variables selon les 6 premiers axes factoriels. La projection des variables et des unités statistiques est faite dans les 4 premiers axes. Toutefois, les facteurs F5 et F6 vont être simplement analysés.

Tableau V : Coordonnées des variables de la saison sèche

	Fact. 1	Fact. 2	Fact. 3	Fact. 4	Fact. 5	Fact. 6
T°C	0,027	0,205	-0,623	-0,354	-0,032	0,322
Turb	0,057	-0,128	0,081	0,082	0,408	-0,695
C E	-0,653	0,645	-0,033	0,036	-0,153	-0,154
pH	-0,793	-0,195	0,470	-0,022	0,041	-0,003
Eh	0,854	0,226	-0,290	0,252	0,068	0,012
O₂dis	0,237	0,254	0,630	-0,120	0,156	0,190
Ca²⁺	-0,820	0,386	-0,279	-0,080	0,019	0,091
Mg²⁺	-0,264	0,524	0,445	0,342	0,243	0,272
Na⁺	-0,422	0,594	-0,118	-0,204	0,468	-0,120
K⁺	-0,066	0,050	0,383	0,653	0,173	0,090
Cl⁻	0,529	0,683	0,092	-0,001	-0,433	-0,005
SO₄²⁻	-0,479	-0,170	0,020	-0,160	-0,624	-0,001
HCO₃⁻	-0,799	-0,054	0,044	-0,103	-0,334	0,068
NO₃⁻	0,416	0,759	0,273	-0,312	-0,040	-0,046
NO₂⁻	0,236	-0,373	0,142	-0,691	-0,003	-0,103
NH₄⁺	-0,353	0,284	-0,489	-0,093	0,367	-0,453
PO₄³⁻	0,065	-0,005	-0,174	-0,352	0,546	0,638
Cu²⁺	0,254	-0,486	0,199	-0,242	0,101	-0,133
Fe²⁺	0,276	0,132	-0,512	0,501	-0,256	-0,019
Al³⁺	0,346	0,573	0,302	-0,423	-0,223	-0,254

- **Analyse dans le plan factoriel F1-F2**

- ✓ **Projection des variables dans le plan factoriel F1-F2**

Le facteur F1 est commandé dans sa partie négative par les variables pH, CE, Ca²⁺ et HCO₃⁻ et dans sa partie positive par la variable Eh (Figure 8 a). Le groupe de variables Ca²⁺ et HCO₃⁻ traduit la minéralisation hydrogénocarbonatée calcique acquise suite aux interactions eau-roche. La forte corrélation qui existe entre certaines variables et leur proximité dans le cercle de communauté montrent que la mise en solution de ces différents ions est régie par le même

RESULTATS ET DISCUSSION

processus qui est l'hydrolyse. Contrairement à l'hydrolyse acide des roches qui requiert un temps de séjour long, le regroupement des variables dans la partie négative du facteur F1 signifie que ces variables chimiques sont acquises après un temps de séjour court dans l'aquifère. Le facteur F1 est déterminé par la variable Eh dans sa partie positive à laquelle s'oppose le pH. Eh permet de prévoir l'état des ions chimiques dans l'eau. L'opposition de cette variable avec le pH qui est un indicateur de l'hydrolyse des silicates rend compte de l'influence des conditions du milieu dans l'acquisition de la minéralisation. Le facteur F1 exprime donc le phénomène de **minéralisation-temps de séjour**. Le facteur F2 est déterminé dans sa partie positive par les variables Cl⁻ et NO₃⁻ et à un degré moindre Mg²⁺, Al³⁺ et Na⁺. Ce regroupement indique que ces paramètres sont mis en solution par le même phénomène. Les nitrates (NO₃⁻) ont une origine superficielle et indiquent une pollution d'origine anthropique. Le facteur F2 représente donc un axe de minéralisation par infiltration d'eaux dans la nappe et la dégradation anthropique de la qualité de l'eau. Le facteur F2 est un indicateur des **apports superficiels et dégradation de la qualité de l'eau**.

✓ Projection des individus dans le plan factoriel F1-F2

La projection des individus dans le plan factoriel F1-F2 nous a permis d'obtenir trois classes (Figure 8 b). La classe 1 représente les eaux fortement minéralisées. Nous en voulons pour preuve les forages F3, F7 et F14 avec respectivement des valeurs de fortes conductivités électriques de 335 µS/cm, 391µS/cm et 384 µS/cm. La classe 2 représente les eaux faiblement minéralisées avec des fortes valeurs de potentiel redox (Eh). C'est l'exemple des forages F5 (72,70 mV), F16 (47,8 mV) et F18 (42,2 mV). La classe 3 représente les eaux fortement polluées avec des valeurs élevées de nitrates et de chlorures. On peut citer en exemple le forage F9 avec des concentrations de 41,3 mg/L et 4,35 mg/L respectivement pour le nitrate et le chlorure.

RESULTATS ET DISCUSSION

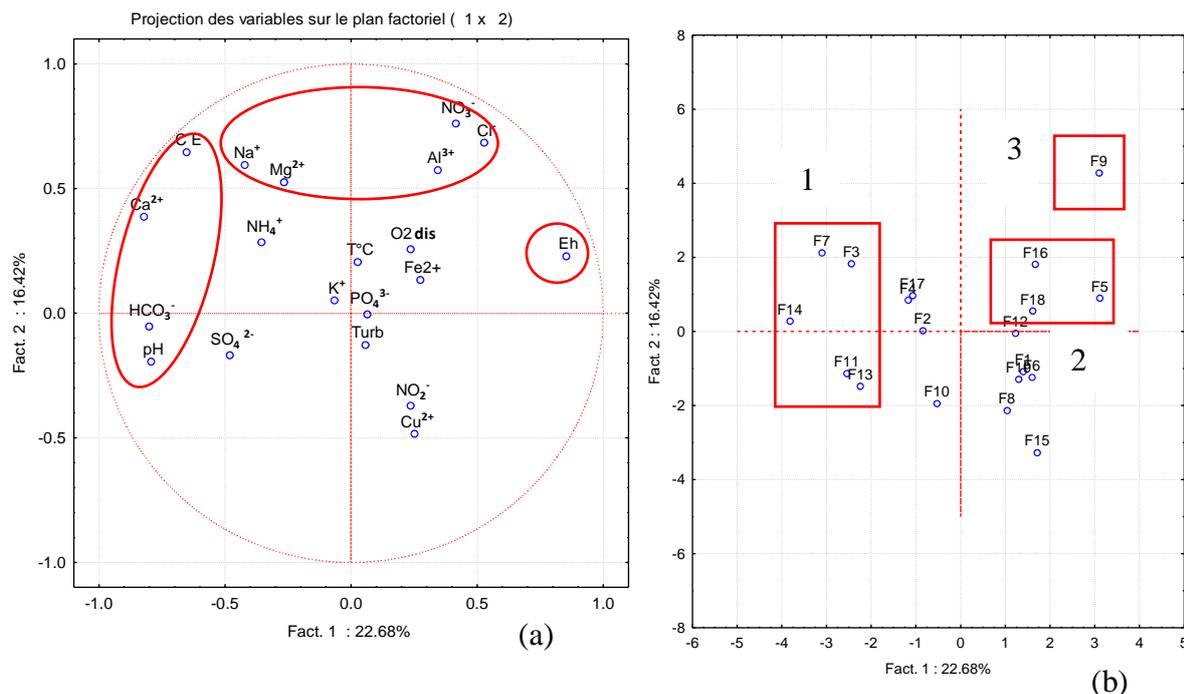


Figure 10 : Cercle de corrélation des variables (a) et graphe des unités statistiques(b) du plan factoriel F1- F2 en saison sèche

- **Analyse dans le plan factoriel F1-F 3**

- ✓ **Projection des variables dans le plan factoriel F1-F3**

Le facteur F3 est commandé par l'oxygène dissous ($O_2\text{dis}$) dans sa partie positive et la $T^{\circ}C$ dans sa partie négative (Figure 9 a). En effet, l'oxygène dissous dans l'eau est dépendante de la température. La concentration en oxygène dissous est un paramètre essentiel dans le maintien de la vie, et donc dans les phénomènes de dégradation de la matière organique. La forte présence de matière organique, dans un plan d'eau par exemple, permet aux micro-organismes de se développer tout en consommant de l'oxygène. Dans notre étude, les activités agricoles constituent la source de matières organiques. La dégradation de ces matières organiques se fait rapidement. Le facteur F3 exprime le phénomène de **pollution organique des eaux souterraines**

- ✓ **Projection des individus dans le plan factoriel F1-F3**

La projection des individus dans le plan factoriel F1-F3 nous a permis d'obtenir trois classes (Figure 9 b). La classe 1 représente les eaux fortement minéralisées. La classe 2 représente les eaux faiblement minéralisées avec des fortes valeurs de potentiel redox (Eh). La classe 3 représente les eaux fortement oxygénées. On peut citer en exemple les forages F2 et F4 avec

RESULTATS ET DISCUSSION

une teneur d'oxygène dissous de 5,6 mg/L et F9 avec une teneur de 5,3 mg/L pour le même paramètre.

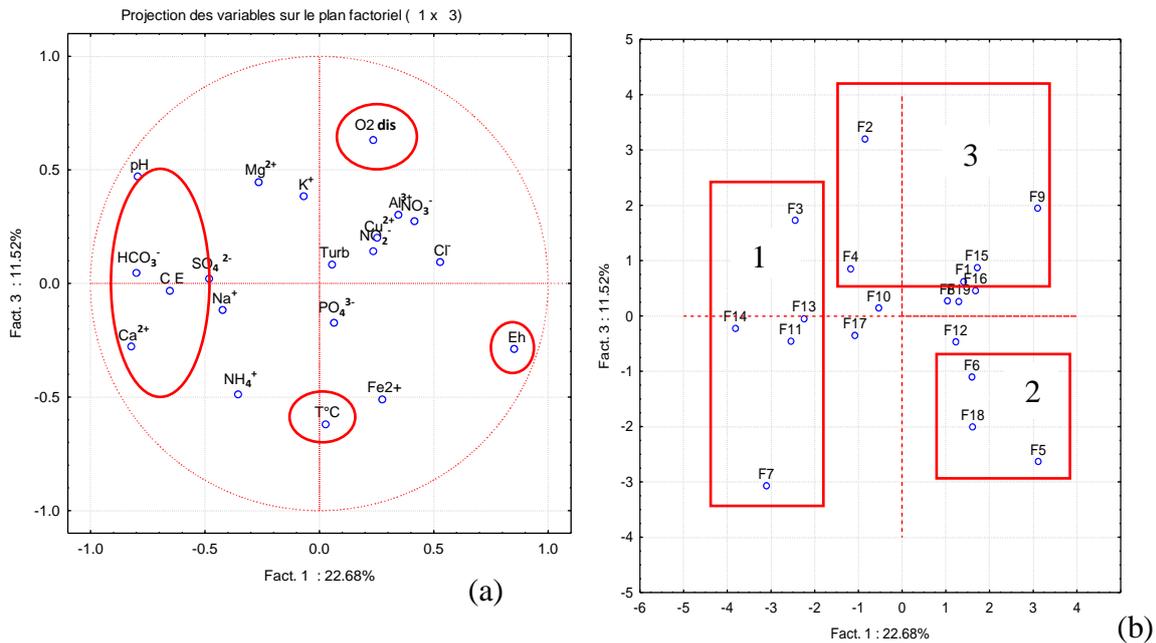


Figure 11 : Cercle de corrélation des variables (a) et graphe des unités statistiques(b) du plan factoriel F1- F3 en saison sèche

- **Analyse dans le plan factoriel F1-F 4**

- ✓ **Projection des variables dans le plan factoriel F1-F4**

Le facteur 4 est mis en relief par la variable K^+ du côté positif et NO_2^- dans sa partie négative (Figure 10 a). Les variables K^+ et NO_2^- sont des paramètres de surface qui se retrouvent en profondeur à la suite d'infiltration. En effet, K^+ et NO_2^- proviendraient des engrais utilisés dans les activités agricoles. Le facteur F4 renseigne donc sur l'origine spatiale des ions par infiltration directe des eaux superficielles et la dégradation anthropique d'origine agricole de la qualité de l'eau. Le facteur F4 est un indicateur **des apports superficiels**

- ✓ **Projection des individus dans le plan factoriel F1-F4**

La projection des individus dans le plan factoriel F1-F3 nous a permis d'obtenir trois classes (Figure 10 b). La classe 1 représente les eaux fortement minéralisées. La classe 2 représente les eaux ayant de fortes valeurs de nitrites. On peut citer en exemple les forages F15 et F19 avec des teneurs respectives de nitrite de 0,021 mg/L et 0,018 mg/L. La classe 3 représente les eaux ayant de fortes valeurs de potassium. C'est le cas des forages F2 et F5 avec des teneurs respectives de 18,9 mg/L et 7,1 mg/L en potassium.

RESULTATS ET DISCUSSION

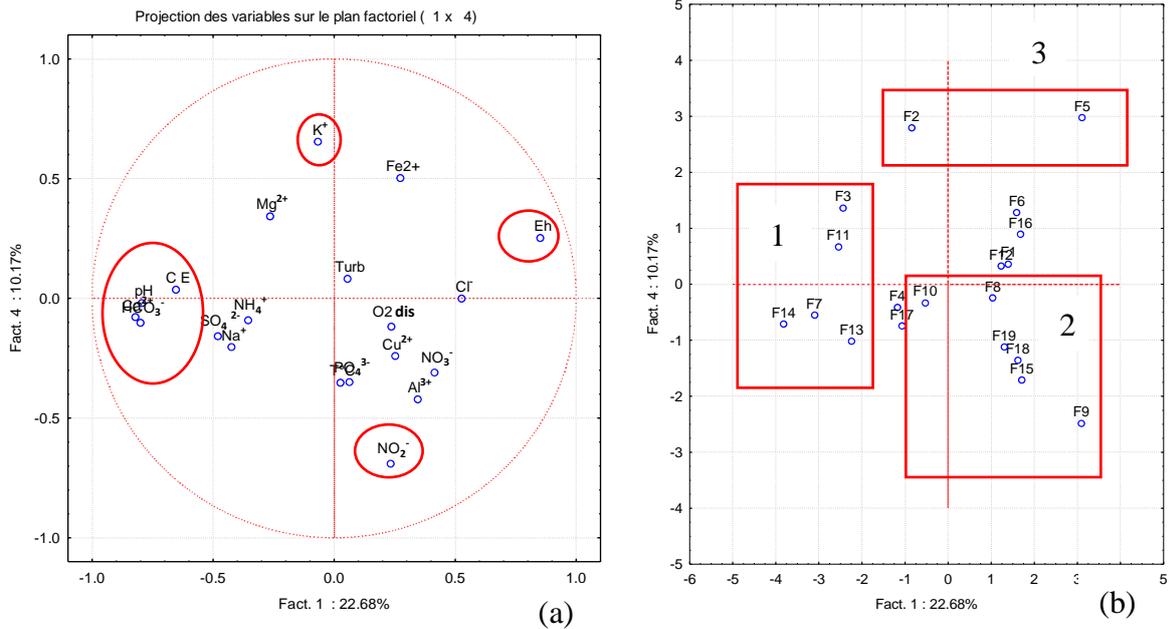


Figure 12 : Cercle de corrélation des variables (a) et graphe des unités statistiques(b) du plan factoriel F1- F4 en saison sèche

- **Analyse des facteurs F5 et F6**

Le facteur F5 est dominé dans sa partie négative par SO_4^{2-} qui semble caractériser une évolution qui s'effectuerait près de la surface du sol. Ces variables ont une origine superficielle et témoignent d'une pollution anthropique. F5 témoigne d'une **pollution anthropique**. Le facteur 6 met en relief la variable PO_4^{3-} dans sa partie positive et $Turb$ dans sa partie négative. La variable PO_4^{3-} est un paramètre de surface qui se retrouve en profondeur à la suite d'infiltration. En effet, PO_4^{3-} proviendrait des engrais utilisés dans l'activité agricole. Le facteur F6 renseigne donc sur l'origine spatiale des ions par infiltration directe des eaux et la dégradation anthropique de la qualité de l'eau. F6 est un indicateur des **apports superficiels**.

- **Saison pluvieuse**

- **Analyse du pourcentage de variance exprimée**

Les valeurs propres qui permettent d'apprécier la variance exprimée par chaque facteur sont consignées dans le tableau VI. Les facteurs 1, 2, 3 et 4 expriment respectivement 20,185%, 13,655%, 13,120% et 9,872% de la variance. Le facteur 5 représente 8,431% de la variance et le facteur 6, 6,842% de celle-ci. L'analyse du tableau montre que les six premiers facteurs constituent 72,105% de la variance. Ces facteurs regroupent le maximum de la variance exprimée et sont suffisants pour donner l'information recherchée.

RESULTATS ET DISCUSSION

Tableau VI : Valeurs propres et pourcentage de la variance exprimée de la saison pluvieuse

	F1	F2	F3	F4	F5	F6
Valeur Propre	4,037	2,731	2,624	1,974	1,686	1,368
% total variance	20,185	13,655	13,120	9,872	8,431	6,842
Cumul Valeur Propre	4,037	6,768	9,392	11,366	13,053	14,421
Cumul %	20,185	33,840	46,960	56,832	65,263	72,105

▪ **Analyse de la matrice de corrélation**

Le tableau VII présente la matrice de corrélation entre les différentes variables. L'examen du tableau montre que les corrélations les plus fortes sont celles établies entre Al^{3+} et Cl^{-} (0,76), NO_2^{-} et Ca^{2+} (0,71) et CE et HCO_3^{-} (0,77). A côté, on note une corrélation entre Eh et pH (-0,99). Le potassium K^{+} est assez avec pH (-0,62) et Eh (0,64).

RESULTATS ET DISCUSSION

Tableau VII : Matrice de corrélation de la saison pluvieuse

	T°C	Turb	CE	pH	Eh	O ₂ dis	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	NH ₄ ⁺	PO ₄ ³⁻	Cu ²⁺	Fe ²⁺	Al ³⁺	
T°C	1,00																				
Turb	0,00	1,00																			
CE	0,28	-0,14	1,00																		
pH	-0,11	0,04	0,24	1,00																	
Eh	0,12	-0,05	-0,27	-0,99	1,00																
O ₂ dis	0,14	0,05	-0,13	-0,10	0,11	1,00															
Ca ²⁺	0,18	-0,04	-0,30	0,12	-0,05	0,26	1,00														
Mg ²⁺	-0,19	-0,16	-0,25	0,05	-0,04	-0,10	0,02	1,00													
Na ⁺	0,07	-0,27	0,13	-0,09	0,10	0,44	0,29	-0,33	1,00												
K ⁺	0,10	0,05	-0,12	-0,62	0,64	0,19	-0,03	-0,32	0,21	1,00											
Cl ⁻	0,17	-0,21	0,31	-0,39	0,40	-0,17	-0,02	-0,18	-0,07	0,06	1,00										
SO ₄ ²⁻	0,07	0,05	0,29	0,14	-0,15	-0,34	0,04	-0,01	-0,13	-0,32	0,21	1,00									
HCO ₃ ⁻	0,22	0,00	0,77	0,53	-0,57	0,02	-0,24	-0,09	0,10	-0,39	-0,21	0,28	1,00								
NO ₃ ⁻	-0,37	-0,17	-0,24	-0,10	0,11	-0,22	-0,17	-0,11	0,23	0,18	0,05	-0,11	-0,27	1,00							
NO ₂ ⁻	-0,13	-0,09	-0,21	0,49	-0,43	-0,17	0,71	0,41	-0,16	-0,42	-0,10	0,31	-0,11	-0,18	1,00						
NH ₄ ⁺	-0,25	0,03	0,11	0,12	-0,12	-0,43	-0,17	0,14	-0,20	-0,11	-0,08	-0,08	-0,13	0,02	0,16	1,00					
PO ₄ ³⁻	-0,26	-0,05	-0,12	0,24	-0,23	0,59	0,37	-0,09	0,33	-0,31	-0,11	0,08	0,06	-0,12	0,23	-0,26	1,00				
Cu ²⁺	-0,36	0,04	-0,32	0,05	-0,05	-0,20	-0,08	0,35	-0,08	-0,14	-0,04	0,25	-0,13	0,45	0,20	-0,29	-0,01	1,00			
Fe ²⁺	-0,09	-0,12	-0,20	-0,29	0,29	0,04	0,11	-0,13	0,11	0,08	-0,12	-0,16	-0,15	-0,09	-0,04	0,00	-0,12	-0,04	1,00		
Al ³⁺	0,25	-0,09	0,05	-0,44	0,45	-0,10	0,05	-0,08	-0,19	0,21	0,76	-0,21	-0,34	0,13	-0,17	0,00	-0,23	-0,14	-0,08	1,00	

RESULTATS ET DISCUSSION

▪ Analyse de la projection dans l'espace des variables et des individus

Le tableau VIII présente les coordonnées des variables selon les 6 premiers axes factoriels. La projection des variables et des unités statistiques est faite dans les 4 premiers axes. Toutefois, les facteurs F5 et F6 vont être simplement analysés.

Tableau VIII : Coordonnées des variables de la saison pluvieuse

	Fact. 1	Fact. 2	Fact. 3	Fact. 4	Fact. 5	Fact. 6
T°C	0,145	0,564	0,170	-0,404	0,201	0,228
Turb	-0,058	-0,004	-0,035	0,188	0,357	0,620
CE	-0,249	0,862	-0,138	-0,044	-0,181	-0,169
pH	-0,915	0,046	0,013	0,055	0,001	-0,132
Eh	0,920	-0,085	0,013	-0,100	0,006	0,114
O₂dis	0,113	0,018	0,856	0,042	0,044	0,160
Ca²⁺	-0,119	-0,351	0,514	-0,635	0,114	-0,133
Mg²⁺	-0,234	-0,480	-0,303	-0,160	0,135	0,105
Na⁺	0,119	0,113	0,667	0,141	-0,376	-0,369
K⁺	0,743	0,046	0,164	0,211	0,085	0,038
Cl⁻	0,442	0,289	-0,287	-0,594	-0,373	-0,075
SO₄²⁻	-0,369	0,138	-0,245	-0,343	-0,374	0,300
HCO₃⁻	-0,604	0,662	0,063	0,181	-0,130	0,076
NO₃⁻	0,250	-0,332	-0,202	0,359	-0,601	-0,251
NO₂⁻	-0,558	-0,499	-0,014	-0,573	0,101	-0,147
NH₄⁺	-0,112	-0,040	-0,479	0,113	0,435	-0,555
PO₄³⁻	-0,325	-0,188	0,663	-0,131	-0,252	-0,014
Cu²⁺	-0,117	-0,548	-0,250	0,113	-0,563	0,361
Fe²⁺	0,252	-0,174	0,160	0,104	0,248	-0,217
Al³⁺	0,594	0,155	-0,266	-0,501	-0,073	-0,099

• Analyse dans le plan factoriel F1-F2

✓ Projection des variables dans le plan factoriel F1-F2

Le facteur F1 est commandé dans sa partie négative par la variable pH et dans sa partie positive, le facteur 1 est commandé par les variables Eh et K⁺ et à un degré moindre Al³⁺ (Figure 11 a). Le groupe de variables K⁺ et Al³⁺ semble caractériser une évolution qui s'effectuerait près de la surface du sol. Ces variables ont une origine superficielle et témoignent d'une pollution anthropique. Le facteur F1 est déterminé par la variable Eh dans sa partie positive à laquelle s'oppose le pH. Eh permet de prévoir l'état des ions chimiques dans l'eau et la direction des

RESULTATS ET DISCUSSION

réactions chimiques (oxydation ou réduction). L'opposition de cette variable avec le pH qui est un indicateur de l'hydrolyse des silicates rend compte de l'influence des conditions du milieu dans l'acquisition de la minéralisation. Le facteur F1 est considéré comme un axe de **minéralisation d'origine à la fois naturelle (contact eau-roche) et anthropique**. Le facteur F2 est déterminé dans sa partie positive par les variables HCO_3^- et CE et à un degré moindre T°C . La variable T°C traduit donc l'influence des conditions du milieu sur la répartition des éléments chimiques. Le facteur F2 traduit donc une **minéralisation-temps de séjour**.

✓ Projection des individus dans le plan factoriel F1-F2

La projection des individus dans le plan factoriel F1-F2 nous a permis d'obtenir trois classes (Figure 11 b). La classe 1 représente les eaux fortement minéralisées avec des valeurs de conductivités électriques et de bicarbonates élevées. On peut citer en exemple F4 (321 $\mu\text{S}/\text{cm}$), F7 (376 $\mu\text{S}/\text{cm}$) et F14 (369 $\mu\text{S}/\text{cm}$) pour les conductivités électriques et les forages F13 (105,3 mg/L) et F14 (139,2 mg/L) pour le bicarbonate. La classe 2 représente les eaux faiblement minéralisées avec des fortes valeurs de potentiel redox (Eh) et de potassium. On a pour exemple les forages F5 et F12 avec respectivement 100,6 mV et 72,4 mV pour Eh et 8,9 mg/L et 5,4 mg/L pour le potassium. La classe 3 représente les eaux ayant un pH élevé. On peut citer en exemple le forage F15 avec une valeur de 7,11 pour le pH.

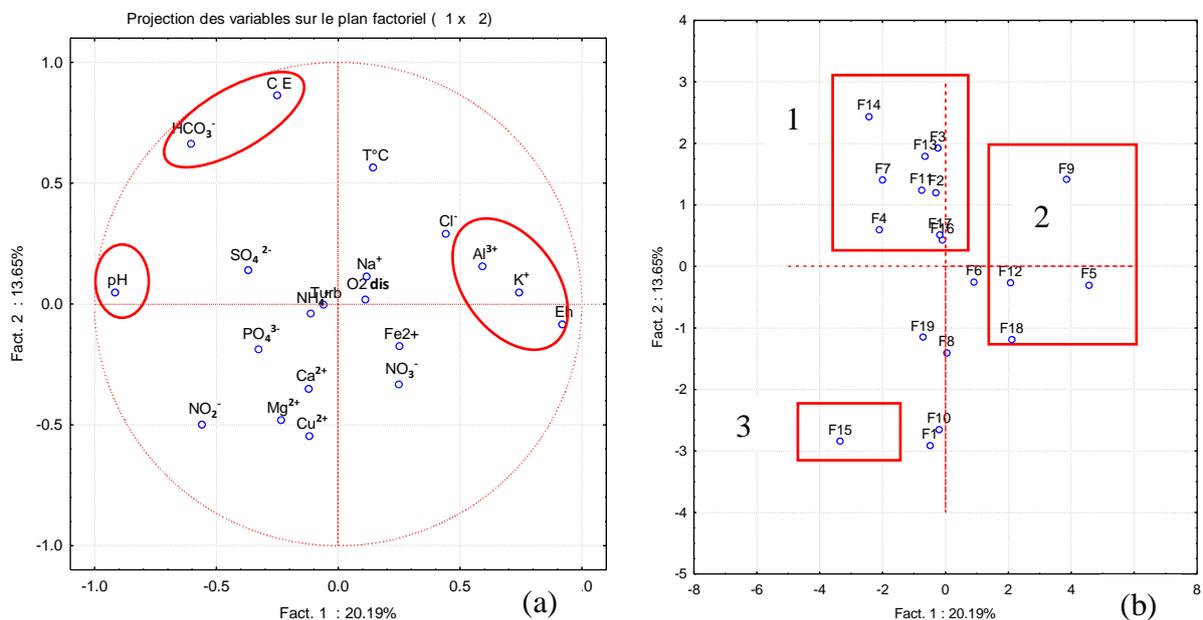


Figure 13 : Cercle de corrélation des variables (a) et graphe des unités statistiques (b) du plan factoriel F1-F2 en saison pluvieuse

• Analyse dans le plan factoriel F1-F 3

✓ Projection des variables dans le plan factoriel F1-F3

RESULTATS ET DISCUSSION

Le facteur F3 est commandé par l'oxygène dissous (O_{2dis}), Na^+ et PO_4^{3-} (Figure 12 a). La variable PO_4^{3-} est un paramètre de surface qui se retrouve en profondeur à la suite d'infiltration. En effet, PO_4^{3-} proviendrait des engrais utilisés dans l'activité agricole. Le facteur F3 renseigne donc sur l'origine spatiale des ions par infiltration directe des eaux et la dégradation anthropique de la qualité de l'eau. F3 est un indicateur des **apports superficiels et de la dégradation de la qualité de l'eau**.

✓ Projection des individus dans le plan factoriel F1-F3

La projection des individus dans le plan factoriel F1-F3 nous a permis d'obtenir trois classes (Figure 12 b). La classe 1 représente les eaux ayant les fortes valeurs de bicarbonates et de pH. On peut citer pour exemple le forage F7 avec 78,1 mg/L pour le bicarbonates et 6,71 pour le pH. La classe 2 représente les eaux faiblement minéralisées avec des fortes valeurs de potentiel redox (Eh). La classe 3 représente les eaux fortement oxygénées. On peut citer en exemple le forage F19 avec une valeur de 6,5 mg/L pour l'oxygène dissous.

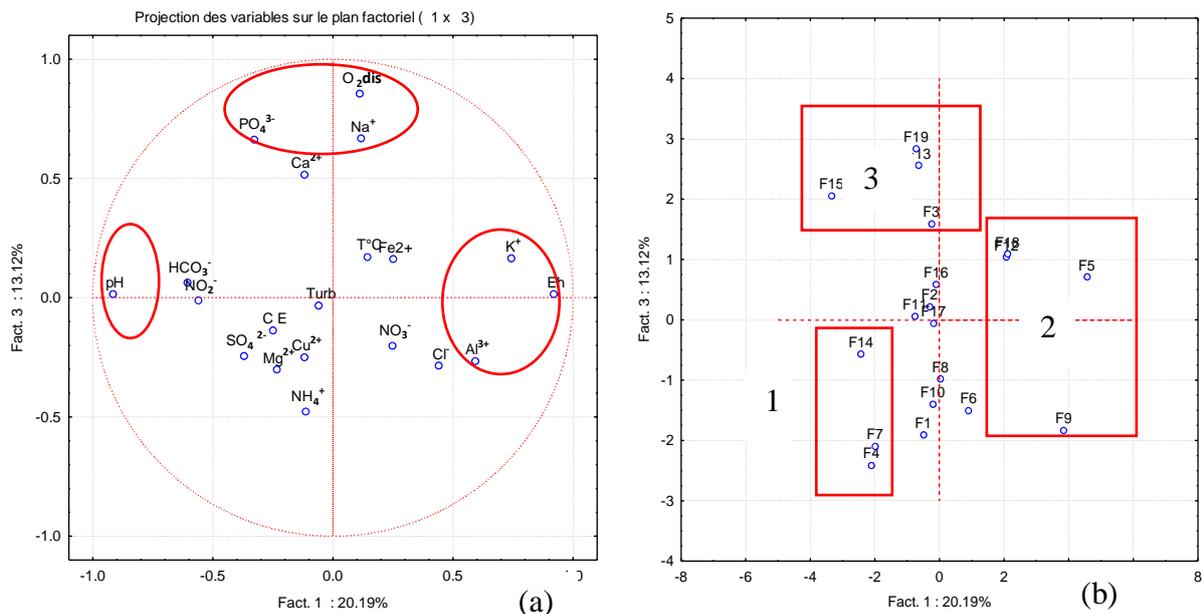


Figure 14 : Cercle de corrélation des variables (a) et graphe des unités statistiques (b) du plan factoriel F1-F3 en saison pluvieuse

• Analyse dans le plan factoriel F1-F 4

✓ Projection des variables dans le plan factoriel F1-F4

Le facteur 4 est mis en relief par la variable Ca^{2+} dans sa partie négative et à un degré moindre Cl^- et NO_2^- (Figure 13 a). Ce regroupement indique que ces paramètres sont mis en solution par

RESULTATS ET DISCUSSION

le même phénomène. Ce sont des paramètres de surface qui se retrouvent en profondeur à la suite d'infiltration. En effet NO_2^- proviendrait des engrais utilisés dans les activités agricoles. Le facteur F4 renseigne donc sur l'origine spatiale des ions par infiltration directe des eaux superficielles et la dégradation anthropique de la qualité de l'eau. Le facteur F4 est un indicateur des **apports superficiels**.

✓ Projection des individus dans le plan factoriel F1-F4

La projection des individus dans le plan factoriel F1-F4 nous a permis d'obtenir trois classes (Figure 13 b). La classe 1 représente les eaux ayant les fortes valeurs de bicarbonates et de pH. La classe 2 représente les eaux faiblement minéralisées avec des fortes valeurs de potentiel redox (Eh). La classe 3 représente les eaux polluées et riche en calcium. On peut citer en exemple le forage F15 avec une teneur de 0,08 mg/L pour le nitrite et 49,63 mg/L pour le calcium.

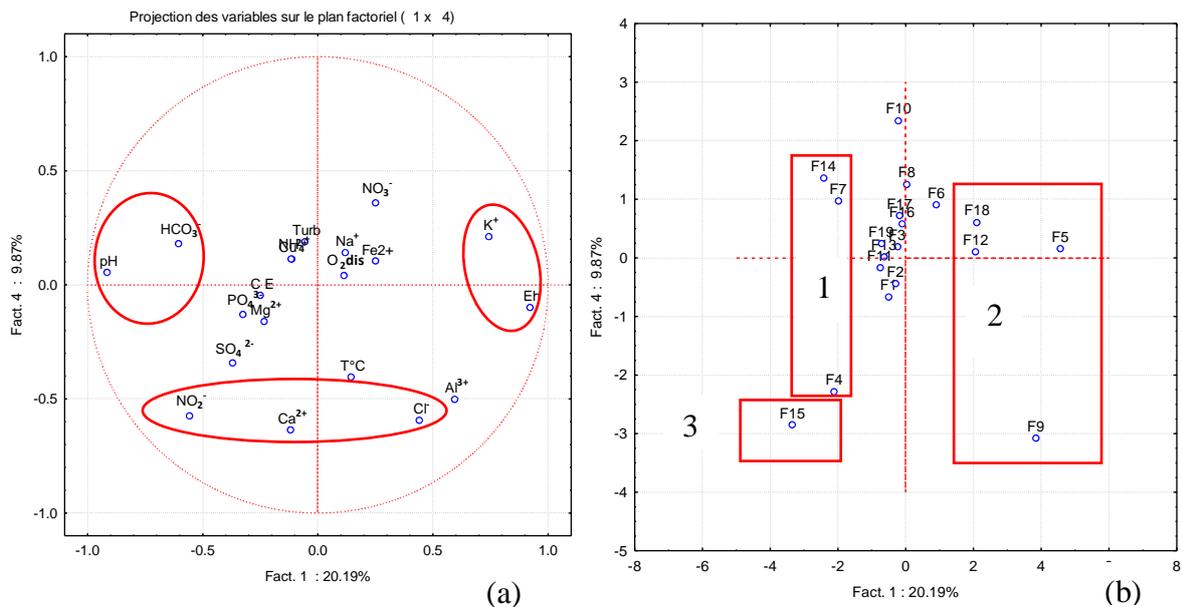


Figure 15 : Cercle de corrélation des variables (a) et graphe des unités statistiques (b) du plan factoriel F1-F4 en saison pluvieuse

- **Analyse dans le plan factoriel F5 et F6**

RESULTATS ET DISCUSSION

Le facteur 5 est déterminé par NO_3^- et à un degré moindre Cu^{2+} dans sa partie négative. Ce regroupement indique que ces paramètres sont mis en solution par le même phénomène. Les nitrates (NO_3^-) ont une origine superficielle et indiquent une pollution d'origine anthropique. F5 exprime le phénomène **origine spatiale et dégradation de la qualité de l'eau**. Le facteur 6 est mis en relief par la variable Turb dans sa partie positive et à un degré moindre NH_4^+ dans sa partie négative. Les variables NH_4^+ est un paramètre de surface qui se retrouve en profondeur à la suite d'infiltration. En effet, NH_4^+ proviendrait des engrais utilisés dans les activités agricoles. La turbidité est importante dans les eaux peu profondes ou mal aménagées montrant une possible contamination par l'eau, surtout après des pluies abondantes. La turbidité de l'eau souterraine est généralement surtout inorganique et causée par des facteurs géologiques naturels. Le facteur F6 renseigne donc sur l'origine spatiale des ions par infiltration directe des eaux superficielles et la dégradation anthropique de la qualité de l'eau. Le facteur F6 est un indicateur des **apports superficiels**.

3.1.3.2. Classification Ascendante Hiérarchique (CAH)

Les forages se regroupent en fonction de l'origine des minéraux qu'ils ont en commun. Les familles ayant les mêmes ascendants ont une bonne corrélation. Les dendrogrammes montrent que les différentes cellules d'une même famille ont la même ascendance. L'analyse de la figure 14 montre que les individus (forages) se regroupent en différentes classes.

- Il y a trois grandes classes en saison sèche (Figure 14 a).
 - Classe 1: elle regroupe les forages F14, F7 et F3. Ces forages ont des valeurs importantes en Ca^{2+} , pH, HCO_3^- , CE, Na^+ et Fe^{2+} . La forte teneur de CE montre que cette classe représente les eaux les plus minéralisées. Les abondances en ces minéraux montrent une minéralisation due au temps de séjour de l'eau dans l'aquifère.
 - Classe 2 : elle regroupe les forages F1, F13, F11, F4, F16, F9 et F2. Ces forages ont des valeurs importantes en Cl^- , pH, NO_3^- , PO_4^{3-} , Na^+ , O_2dis , SO_4^{2-} , HCO_3^- et NO_2^- . Les variables NO_3^- , PO_4^{3-} et NO_2^- montrent une minéralisation d'origine superficielle tandis que HCO_3^- traduit une minéralisation liée au contact eau-roche.
 - Classe 3: elle regroupe les forages F10, F18, F12, F5, F19, F15, F8, F6 et F1. Ces forages ont des teneurs importantes en NO_3^- , PO_4^{3-} , NO_2^- et Cu^{2+} montre une minéralisation d'origine superficielle.
- Il y a deux classes en saison pluvieuse (Figure 14 b)

RESULTATS ET DISCUSSION

-Casse 1 : elle regroupe les forages F2, F3, F11, F9, F4, F16, F13, F7 et F14 et peut être subdivisée en deux sous-classes :

- ✓ une classe prenant en compte les forages F2, F3, F9 et F11 qui ont des valeurs élevées en Eh, T°C, O₂dis, Turb, CE, Ca²⁺, HCO₃⁻ et SO₄²⁻. La forte teneur de CE montre que c'est la classe représentant les eaux les plus minéralisées. Les abondances en ces minéraux montrent une minéralisation due au temps de séjour de l'eau dans l'aquifère.
- ✓ une classe prenant en compte les forages F4, F7, F13, F14 et F16 qui ont des valeurs élevées en K⁺, O₂dis, CE, Na⁺, Cu²⁺, PO₄³⁻, NH₄⁺ et HCO₃⁻. Elle indique une minéralisation d'origine naturelle et une minéralisation d'origine superficielle.

-Classe 2 : elle regroupe les forages F1, F6, F17, F8, F10, F19, F15, F5, F12 et F18 et peut être subdivisée en deux sous-classes :

- ✓ une classe prenant en compte les forages F5, F12 et F18 qui ont des valeurs importantes en Eh, Turb, O₂dis, Ca²⁺, Na⁺, K⁺, NH₄⁺ et Al³⁺. Elle indique une minéralisation liée à une pollution d'origine superficielle.
- ✓ une classe prenant en compte les forages (F1, F6, F17, F8, F10, F19 et F15) qui ont des valeurs élevées en Eh, T°C, O₂dis, Cu²⁺, PO₄³⁻ et NH₄⁺. Elle indique une minéralisation liée à une pollution d'origine superficielle.

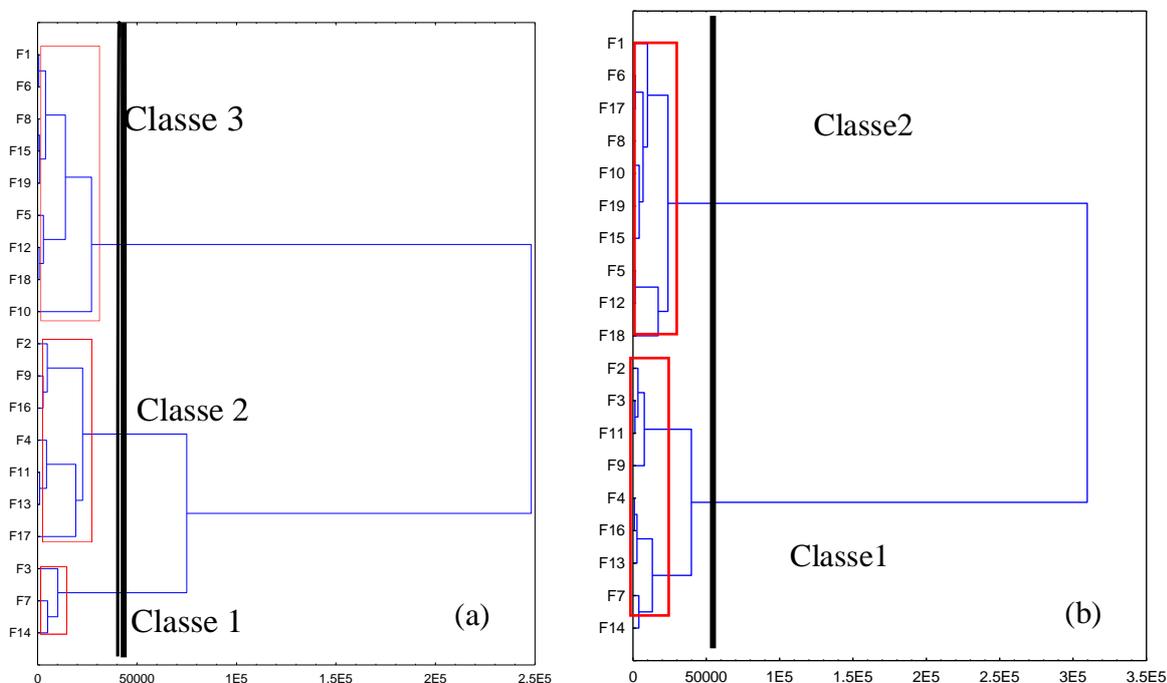


Figure 16 : Dendrogrammes de la saison sèche (a) et de la saison pluvieuse (b)

3.1.4. Etude de l'âge relatif des eaux souterraines du département de Man

▪ Indices de saturation en calcite et en dolomite.

Le diagramme ISD fonction de ISC de la saison sèche montre que 94,73 % des eaux analysées présentent une sursaturation en calcite ($ISC > 0$) et en dolomite ($ISD > 0$). Quant au diagramme ISD fonction de ISC de la saison pluvieuse, il montre que 73,68 % des eaux analysées présentent une sursaturation en calcite ($ISC > 0$) et en dolomite ($ISD > 0$).

➤ Saison sèche

Les points représentatifs des échantillons d'eau souterraine s'alignent d'une manière générale suivant une droite de régression dont l'équation est : $ISD = 1,8342 * ISC + 0,1617$ avec un coefficient de régression $R^2 = 0,976$. Ceci montre qu'il existe une très bonne corrélation entre les indices de saturation en calcite (ISC) et les indices de saturation en dolomite (ISD). L'analyse du diagramme (Figure 15) permet de distinguer 3 familles :

- **Famille 1** : Les eaux de ces ouvrages sont les eaux très anciennes dans l'aquifère avec un temps de séjour très long, une vitesse de circulation des eaux très lente ou nulle. Les ouvrages représentant cette famille sont les forages F17, F2, F3, F4, F7, F10, F11, F13 et F14. Ils correspondent à 47,37 % des forages échantillonnés.

- **Famille 2** : Ce sont les eaux anciennes dans l'aquifère ayant un temps de séjour long et une vitesse de circulation lente. Cette famille regroupe les forages F1, F8, F9, F12, F15, F16, F18 et F19, soit 42,10 % des forages échantillonnés.

- **Famille 3** : C'est une eau récente et qui a eu un temps de séjour court dans l'aquifère avec une vitesse de circulation élevée. Cette famille représente les eaux sous saturées en calcite et en dolomite. Elle représente également 5,26 % des forages échantillonnés.

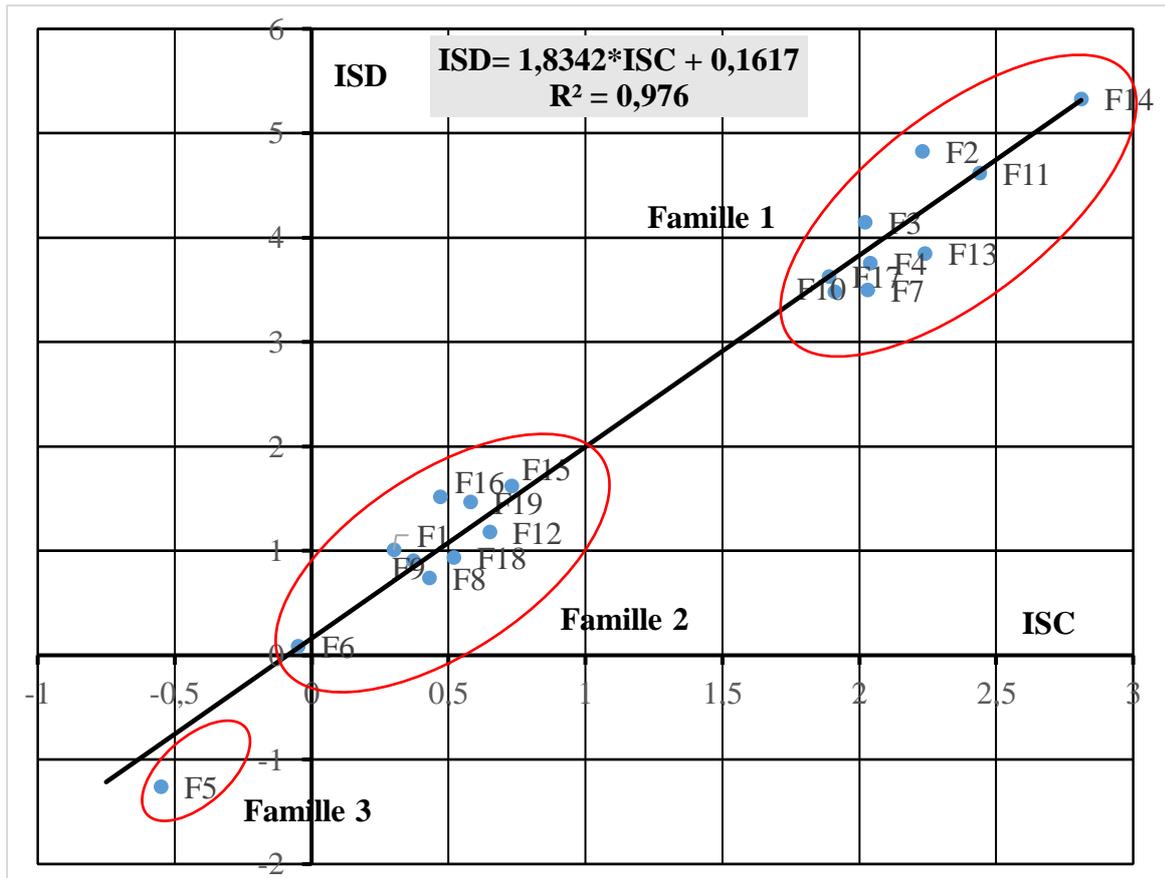


Figure 17 : Diagramme ISD = f(ISC) de la saison sèche du département de Man

➤ **Saison pluvieuse**

Les points représentatifs des échantillons d'eau souterraine s'alignent d'une manière générale suivant une droite de régression dont l'équation est : $ISD = 2,0172 * ISC - 0,0482$ avec un coefficient de régression $R^2 = 0,9028$. Ceci montre qu'il existe une très bonne corrélation entre L'analyse du diagramme (Figure 16) permet de distinguer quatre (04) familles :

- **Famille 1** : Elle représente les eaux très anciennes dans l'aquifère avec un temps de séjour très long. une vitesse de circulation des eaux très lente ou nulle. Les ouvrages appartenant à cette famille sont les forages F2, F3, F4, F7, F15, F11, F13 et F14. Ils correspondent à 42,10 % des forages échantillonnés.
- **Famille 2** : Ce sont les eaux anciennes dans l'aquifère ayant un temps de séjour long et une vitesse de circulation lente. Cette famille regroupe les forages F1, F8, F16, F17, F18 et F19, soit 31,57 % des forages échantillonnés
- **Famille 3** : Ce sont des eaux moins anciennes que celles de la famille 2 avec un temps de séjour moyen dans l'aquifère et une vitesse de circulation moyenne. Cette famille regroupe les forages F6, F9, F12 et F18 représentant les eaux sous-saturées en calcite et en dolomite. Ils correspondent à 21,05 % des forages échantillonnés.

RESULTATS ET DISCUSSION

-Famille 4 : C'est une eau récente ayant un temps de séjour court dans l'aquifère avec une vitesse de circulation très élevée. Elle regroupe le forage F5 sous-saturée en calcite et en dolomite. Elle représente 5,26 % des forages échantillonnés.

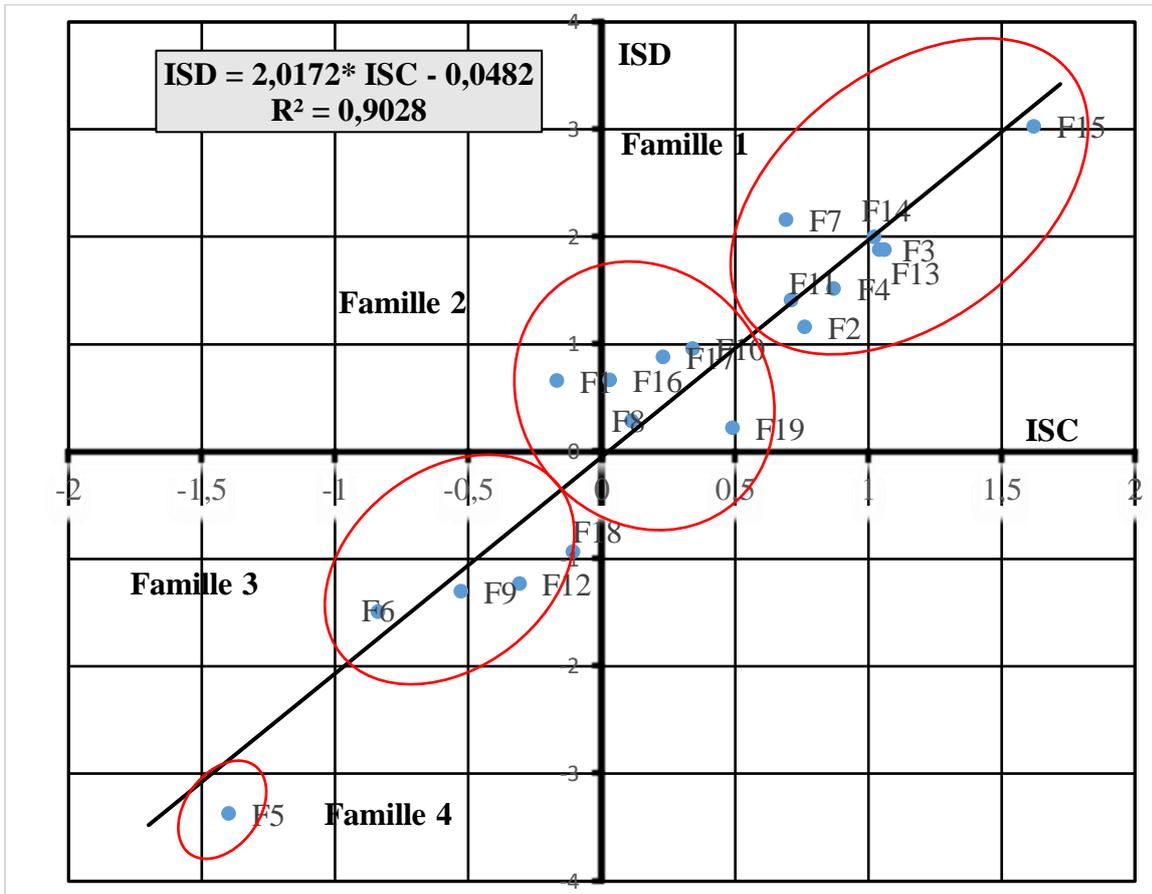


Figure 18 : Diagramme $ISD = f(ISC)$ de la saison pluvieuse du département de Man

3.2. Discussion

Dans le département de Man, la majeure partie des échantillons d'eau présente tantôt une nette dominance des anions par rapport aux cations, tantôt l'inverse. Le déséquilibre de la balance ionique affecte surtout les eaux des forages (70%). Les eaux de puits sont en général moins touchées (39%) (Goné, 2001). Les analyses chimiques sont le plus souvent incomplètes par rapport à certains ions généralement non dosés, ce qui montre que la liste des principaux éléments chimiques couramment dosés n'est pas assez complète (Goné, 2001). La température moyenne des eaux est de 27,34°C en saison sèche et de 28,005°C en saison pluvieuse. Les eaux souterraines sont moins sensibles aux variations de température que les eaux superficielles (Rodier, 2009). Les analyses des eaux souterraines de la zone d'étude montrent que les eaux sont acides au cours des deux saisons. Ces eaux ne sont pas à priori interdites pour la consommation humaine. Les eaux sont acides donc corrosives. En effet, l'acidité des eaux a été observée dans plusieurs régions du pays. Il s'agit notamment des régions de Tiassalé (Oga *et*

RESULTATS ET DISCUSSION

al., 2009) et de San-Pedro (Lasm *et al.*, 2011). L'acidité des eaux en zone tropicale humide est selon Matini *et al.* (2009) principalement liée à la décomposition de la matière organique végétale, avec la production de CO₂ dans les premières couches du sol. Aussi, la présence dans l'eau de CO₂ provenant des sols facilite-t-elle l'hydrolyse des minéraux silicatés et la formation des ions HCO₃⁻, qui constituent les ions les plus importants dans la zone d'étude. C'est ce phénomène qui explique l'abondance des bicarbonates dans les eaux. En effet, l'hydrolyse des minéraux silicatés présent dans les roches constitue le principal mécanisme de production d'ions dans les eaux souterraines. En Côte d'Ivoire, ce phénomène a été mise en évidence par les travaux d'Ahoussi *et al.* (2010; 2011) dans la région d'Agboville et d'Abidjan. Les eaux de la zone d'étude sont minéralisées avec une CE moyenne de 219,511 µS/cm en saison sèche et 206,500 µS/cm en saison pluvieuse. Ces différentes valeurs témoignent que ces eaux souterraines sont dans l'ensemble peu minéralisées. En saison pluvieuse, la valeur moyenne du potentiel redox (Eh) est de 42,995 mV tandis qu'en saison sèche, elle est de 13,074 mV. Ces valeurs moyennes d'Eh sont inférieures à celle obtenue par Soro (2014) dans le bassin versant du Haut Bandama qui est de 147,7 mV. Les valeurs positives obtenues signifient que les eaux sont bien oxygénées et qu'elles appartiennent à un système ouvert à l'atmosphère. Cependant, les valeurs positives pourraient témoigner des facilités d'infiltration des eaux superficielles et par conséquent des variations importantes des paramètres physico-chimiques (Soro, 2014). Les valeurs très élevées du potentiel d'oxydo-réduction sont le signe d'une pollution anthropique (Lallahem, 2002). Dans l'ensemble, les paramètres chimiques (Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, NH₄⁺, Cl⁻, NO₂⁻, NO₃⁻, PO₄³⁻, SO₄²⁻ et HCO₃⁻) des eaux souterraines du département de Man respectent les recommandations fixées par l'OMS (2011) sauf la valeur de K⁺ du forage F2 (18,9 mg/L), la valeur de Mg²⁺ du forage F3 (80mg/L) et les valeurs de Ca²⁺ des forages F7, F14 et F17 (129 mg/L, 112 mg/L et 112 mg/L) qui dépassent la valeur guide de l'OMS en saison sèche. La valeur de Mg²⁺ du forage F1 (70,74 mg/L) est supérieure à la valeur guide de l'OMS en saison pluvieuse. Les teneurs en éléments traces métalliques observées dans les eaux de la zone sont faibles, à l'exception du fer qui a une moyenne de 0,417 mg/L en saison sèche supérieure à la valeur guide de l'OMS. Les teneurs de Fe²⁺ des forages F5, F7et F11(4,49, 0,74 et 0,74 mg/l) sont supérieures à la valeur guide de l'OMS en saison sèche. Celles de F4 et F7 (0,42 et 0,49 mg /L) ne respecte pas la valeur guide de l'OMS en saison pluvieuse. L'origine de ce métal dans les eaux étudiées pourrait être associée à la nature géologique des formations aquifères et du substratum rocheux qui les abritent comme l'ont signalé Mangoua *et al.* (2010) dans le bassin versant de la Baya. En effet, le département de Man constitue la zone où l'on rencontre les plus grands gisements métalliques de la Côte d'Ivoire. La géologie de la zone est mise en évidence

RESULTATS ET DISCUSSION

par la présence des roches mafiques et ultramafiques riches en minéraux ferromagnésiens dont certains sont riches en fer, en plomb et en chrome. De nombreux gisements abritant des métaux précieux ont été mis en évidence et certains font actuellement l'objet d'une exploration : c'est le cas du gisement de fer du Mont Klahoyo (Ahoussi,2018). Tous les points d'eau analysés ont des teneurs de nitrates largement en-dessous de la norme OMS qui est de 50 mg/L. La teneur moyenne est de 12,175 mg/L en saison sèche et 2,932 mg /L en saison pluvieuse. Les nitrates des eaux souterraines de la région proviennent en grande partie des pesticides et des engrais utilisés dans les activités agricoles. D'autre part. les travaux de Gibrilla *et al.* (2010) menés dans le bassin de la rivière Densu au Ghana s'accordent avec cette origine et soulignent que les nitrates peuvent provenir également de la nitrification des plantes légumineuses et des excréments des animaux. Cette hypothèse n'est pas à écarter quand on sait que la région est une zone d'élevage. Les travaux de Baali *et al.* (2007) menés sur la qualité et les risques de pollution des eaux souterraines dans la cuvette de Chéria au Nord-Ouest de l'Algérie appuient cette hypothèse. Pour ces auteurs, sous l'effet du lessivage des pluies et leur écoulement, ces déchets d'origine animale activent la contamination des eaux souterraines. Les nitrates ne sont pas toxiques en eux-mêmes. Cependant, ils peuvent devenir dangereux pour l'organisme, lorsqu'ils sont transformés en nitrites et en composés nitrosés (nitrosamines et nitrosamides). La toxicité des nitrates survient lorsqu'il y a une ingestion massive ou lorsqu'ils sont transformés dans l'organisme en nitrites (NO_2^-). Les nitrites sont dangereux pour l'homme car ils sont à la base de la méthémoglobine dont la maladie manifestée est la méthémoglobinémie (syndrome du bébé bleu). En effet, la méthémoglobine est incapable de transporter l'oxygène vers les tissus et peut dans certains cas provoquer une asphyxie et des troubles de conscience pouvant évoluer vers la mort par anoxie cérébrale notamment chez les nourrissons de moins de 6 mois (Biémi, 1992). Les eaux contaminées en nitrates peuvent également causées des cancers d'estomac (Gibrilla *et al.*, 2010). L'utilisation des techniques d'analyse statistique multivariée (ACP et CAH) pour l'étude du chimisme des eaux souterraines a révélé trois mécanismes responsables de l'évolution de la minéralisation des eaux dans les aquifères de fissures de la zone. Les principaux mécanismes sont : la minéralisation-temps de séjour, l'apport superficiel et la dégradation anthropique de la qualité des eaux et la pollution organique dans l'acquisition des ions se fait de façon rapide par l'hydrolyse acide des silicates et les interactions eaux-roches qui constituent le phénomène important dans la minéralisation des eaux. Les granites, les gneiss et les schistes sont riches en feldspaths alcalins et en plagioclases acides. Ces roches dominent la géologie du département comme dans plusieurs régions du socle cristallophyllien ivoirien. L'hydrolyse de telles roches explique les teneurs en Ca^{2+} dominantes pour les cations dans les

RESULTATS ET DISCUSSION

eaux souterraines (Faillat & Drogue. 1993 ; Savané & Soro. 2001). La présence dans l'eau de CO_2 provenant des sols facilite l'hydrolyse des silicates qui permet la formation de HCO_3^- (Tapsoba-Sy, 1995). C'est la raison pour laquelle HCO_3^- est l'anion dominant dans les eaux souterraines. L'acidité des eaux et l'abondance des précipitations provoquent une altération très intense et complète des minéraux primaires de la roche mère par hydrolyse (Eblin *et al.*, 2014). Cette hydrolyse est donc importante en saison pluvieuse que sèche. En effet, en saison pluvieuse comme en saison sèche la minéralisation des eaux étudiées est d'origine à la fois naturelle (contact eau-roche) et anthropique mais le degré anthropisation est moindre en saison sèche. La présence du NO_2^- , NO_3^- et PO_4^{3-} et de métaux lourds indiquerait une pollution liée aux activités anthropiques dans le processus de la minéralisation des eaux. Ceci se justifierait par l'utilisation de fertilisants au cours des activités agricoles comme le soulignent El Amrani-Paaza *et al.* (2007). En effet, les ions nitrates issus de la décomposition des déchets organiques s'infiltrent dans la nappe et contaminent les eaux souterraines. Ces résultats corroborent avec ceux de Ouattara (2009). L'analyse des graphes ISD fonction de ISC montre que les eaux souterraines sont sursaturées en dolomite et en calcite pour la majorité des forages en saison sèche et en saison pluvieuse. Ces eaux sont dans l'ensemble anciennes dans l'aquifère avec un long temps de séjour. En terme hydrogéologique et précisément en terme de productivité des ouvrages, les forages appartenant aux familles dont la vitesse de renouvellement des eaux est grande seront plus productifs. Au contraire, pour les familles dont la vitesse de renouvellement des eaux est faible, il faut craindre un tarissement suite à une forte sollicitation des eaux ou à une baisse de la pluviométrie (Goné, 2001).

Conclusion partielle

La troisième partie montre que les forages du département de Man ont leurs paramètres qui respectent en majorité la norme de potabilité de l'OMS au cours des deux saisons. Ils ont deux types de faciès en saison sèche et trois types en saison pluvieuse. Le mécanisme de minéralisation est gouverné par la minéralisation-temps de séjour, minéralisation d'origine anthropique et la pollution organique. Les eaux du département sont pour la plupart des eaux anciennes et sursaturées ayant un temps de séjour long dans l'aquifère.

CONCLUSION

CONCLUSION

Cette étude avait pour but de comprendre le fonctionnement hydrochimique des eaux souterraines du département de Man dans l'Ouest de la Côte d'Ivoire. Les analyses physico-chimiques montrent que les eaux souterraines du département de Man sont acides au cours des deux saisons. Les températures moyennes de la zone d'étude sont 28,005 °C en saison pluvieuse et de 27,34 °C en saison sèche. Les eaux sont peu minéralisées dans l'ensemble avec des moyennes de conductivités qui oscillent entre 206,50 µS/cm et 219,51 µS/cm observées respectivement pendant la saison pluvieuse et la saison sèche. Les eaux souterraines de la zone sont globalement de bonne qualité car les teneurs des différents paramètres physico-chimiques respectent pour la plupart la norme de potabilité de l'OMS. Le fer a une valeur moyenne de 0,42 mg/L et des valeurs élevées dans les forages F4 et F7 en saison sèche et dans les forages F4, F7 et F11 au-dessus de la valeur guide de l'OMS (0,3 mg/L). Ces eaux présentent un faciès bicarbonaté calcique et magnésien majoritaire à 84,21% et un faciès chloruré calcique et magnésien minoritaire qui représente 15,79% en saison sèche. En saison pluvieuse, ces eaux présentent un faciès bicarbonaté calcique et magnésien majoritaire à 84,21 %, un faciès chloruré calcique et magnésien minoritaire (10,53%) et un faciès bicarbonaté sodique et potassique (5,26%). Les différents phénomènes responsables de l'acquisition du chimisme des eaux souterraines de la zone d'étude sont : la minéralisation-temps de séjour, l'apport superficiel et la dégradation anthropique de la qualité des eaux et la pollution organique. L'étude de l'âge relatif des eaux montre que les eaux souterraines du département de Man sont sursaturées en dolomite et en calcite pour la majorité des forages en saison sèche et en saison pluvieuse. Ces eaux sont dans l'ensemble anciennes dans l'aquifère avec un long temps de séjour. Cette étude est une contribution à la gestion des eaux souterraines du département de Man.

En perspectives nous voulons faire :

- une étude isotopique pour connaître l'âge absolu des eaux souterraines ;
- une étude de modélisation hydrochimique de ces aquifères en vue de mieux appréhender le phénomène de transfert des polluants d'origine superficielle.

REFERENCES

REFERENCES

- AFNOR (1997). Qualité de l'Eau (Tome 1) : Terminologie, échantillonnage et évaluation des Méthodes (3^e édn). Afnor : Paris (France), 34 p.
- Ahoussi K.E., Soro N., Koffi Y.B., Soro G. & Biémi J. (2010). Origine de la minéralisation des eaux des aquifères discontinus sous couvert forestier de la zone sud de la Côte d'Ivoire: cas de la région d'Abidjan-Agboville. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 4(3) : 782-797.
- Ahoussi K.E., Oga Y.M.S., Koffi Y.B., Kouassi A.M., Soro N. & Biémi J. (2011). Caractérisation hydrogéochimique et microbiologique des ressources en eau du site d'un Centre d'Enfouissement Technique (CET) de Côte d'Ivoire : cas du CET de Kossihouen dans le District d'Abidjan (Côte d'Ivoire). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 5(5) : 2114-2132.
- Ahoussi K.E., Koffi Y.B., Kouassi A.M., Soro G., Soro N. & Biémi J. (2012). Étude des caractéristiques chimiques et microbiologiques des ressources en eau du bassin versant du N'zi : cas de la commune de N'zianouan (Sud de la Côte d'Ivoire). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 6(4) : 1854-1873.
- Ahoussi K.E., Koffi Y.B., Kouassi A.M., Soro G. & Biémi J. (2013). Étude hydrochimique et microbiologique des eaux de source de l'Ouest montagneux de la Côte d'Ivoire : Cas du village de Mangouin-Yrongouin (sous-préfecture de Biankouman). *Journal of Applied Biosciences*, 63 : 4703-4719.
- Akatumbila L., Mabilia M., Lubini A., Pwema K. & Musibono E.A. (2016). Contribution à l'évaluation de la qualité physico-chimique de l'eau : cas de la rivière urbaine Gombe de Kinshasa/République Démocratique du Congo. *Larhyss Journal*, 26: 7-29.
- Appelo C. & Postma D. (1999). *Geochemistry groundwater and pollution*, Balkema, Rotterdam (Holande), 536 p.
- Banton O. & Bangoy M. (1997). Hydrogéologie multiscience environnementale des eaux souterraines. *Presses de l'Université du Québec/AUPELF*, 159-160.
- Belkhiri L. (2011). Etude de la pollution des eaux souterraines : cas de la plaine d'Ain Azel - Est Algérien. Thèse de Doctorat, Université Hadj Lakhdar Batna (Batna, Algérie), 121 p.

REFERENCES

- Biémi J. (1992). Contribution à l'étude géologique, hydrogéologique et par télédétection des bassins versants subsahariens du socle précambrien d'Afrique de l'Ouest: hydrostructurale, hydrodynamique, hydrochimie, isotopie des aquifères discontinus de sillons et aires granitiques de la Haute Marahoué (Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat d'État ès Sciences Naturelles, Université d'Abidjan (Abidjan, Côte d'Ivoire), 492 p.
- Camil J. (1984). Pétrographie et chronologie des ensembles granulites archéens et formations associées de la région de Man (Côte d'Ivoire). Implications pour l'histoire géologique du craton Ouest africain. Thèse de Doctorat d'Etat ès Sciences Naturelles, Université d'Abidjan (Abidjan, Côte d'Ivoire), 306 p.
- Derron M. H. (2004). Géochimie des eaux de sources et interactions eau-roche dans les Alpes. Quanterra short course 08F Lausanne, 18 p.
- Eblin S.G., Soro G.M., Sombo A.P., Aka N., Kambiré O. & Soro N. (2014). Hydrochimie des eaux souterraines de la région d'Adiaké (Sud-Est côtier de la Côte d'Ivoire). *Larhyss Journal*, 17 : 193-214.
- El Amrani-Paaza N., Larocque M., Banton O. & Benavente J. (2007). Simulation de la contamination des eaux souterraines du delta du rio Adra et eutrophisation des albuferas Références 48 (Almérie. Espagne). *Revue des Sciences de l'Eau*, 20(1) : 15- 25.
- Faillat J.P. & Drogue C. (1993). Différenciation hydrochimique de nappes superposées d'altérites et de fissures en socle granitique. *Journal-des Sciences Hydrologiques*, 38, 3(6) : 215-229.
- Fornis R. L. (2005). Kinetic energy-rainfall intensity relationship for central Cebu, Philippines for soil erosion studies. *Journal of Hydrology*, 300 (1-4) : 20-32.
- Géomines (1982a). Inventaire hydrogéologique appliqué à l'hydraulique villageoise. Ministère des travaux publics et des transports. Direction centrale de l'hydraulique, République de Côte d'Ivoire, carte de Man, cahier N° 24, 30p.
- Gibrilla A., Osae S., Akiti T.T., Adomako D., Ganyaglo S.Y., Bame. P.K. & Hadisu A. (2010). Hydrogeochemical and groundwater quality studies in the Northern part of the Densu river basin of Ghana. *Journal of Water Resource and Protection*, 2 : 1071-1081.

REFERENCES

- Goné D. L. (1997). Influence de la nature pétrographique des roches sur le chimisme des eaux souterraines du degré carré de Man. Mémoire de DEA, Université d'Abobo-Adjamé, Côte d'Ivoire, 63 p.
- Goné D. L. (2001). Contribution des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines à l'étude du fonctionnement des systèmes hydrauliques en milieu fissuré de la région semi-montagneuse de Man (Ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat 3^e cycle, Université d'Abobo-Adjamé (Abidjan, Côte d'Ivoire), 182 p.
- Hussein M. T. (2004). Hydrochemical evaluation of groundwater in the Blue Nile basin, eastern Sudan, using conventional and multivariate techniques. *Hydrogeology Journal* 2 : 144-158
- Jérémie J. (1982). Contribution à l'étude géochimique des eaux souterraines froides de la Basse-Terre (Guadeloupe, petites Antilles). *Carib Journal Scientifique*, 17(1-4) : 133- 150.
- Kamagaté B. (2006). Fonctionnement hydrologique et origines des écoulements sur un bassin versant en milieu tropical de socle au Bénin : bassin versant de Donga (haute vallée de l'Ouémé). Thèse de Doctorat, Université de Montpellier II (Montpellier, France), 239 p
- Kouamé K. F. (1999). Hydrogéologie des régions de montagne : apports des données de télédétection et des méthodes statistique et fractale à l'élaboration d'un système d'information hydrogéologique à référence spatiale des aquifères discontinus du secteur Man-Danané (Ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat 3^e cycle, Université de Cocody-Abidjan (Abidjan, Côte d'Ivoire), 210 p.
- Kouamé K. I. (2007). Pollution physico-chimique des eaux dans la zone de la décharge d'Akouédo et analyse du risque de contamination de la nappe d'Abidjan par un modèle de simulation des écoulements et du transport des polluants. Thèse de Doctorat, Université d'Abobo-Adjamé (Abidjan, Côte d'Ivoire), 206 p.
- Kouamelan A. N. (1996). Géochronologie et géochimie des formations archéennes et Protérozoïques de la dorsale de Man en Côte d'Ivoire. Implications pour la transition archéenprotérozoïque. Thèse de Doctorat, Université de Rennes 1 (Rennes, France), 277 p.
- Lachassagne P., Wyns R. & Dewandel B. (2011). The fracture permeability of Hard Rock Aquifer is due neither to tectonics, nor to unloading, but to weathering processes. *Terra Nova*, 23(3) : 145-161.

REFERENCES

- Lallahen S. (2002). Structure et modélisation hydrodynamique des eaux souterraines : Application à l'aquifère crayeux de la bordure nord du bassin de Paris. Thèse de Doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille (Lille, France), 242 p.
- Lasm T., De Lasmé O., Oga Y.M.S., Youan Ta M., Baka D., Kouamé F. & Yao K.T. (2011). Caractérisation hydrochimique des aquifères fissurés de la région de San-Pedro (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 5(2) : 642-662.
- Lasm T. (2000). Hydrogéologie des réservoirs fracturés de socle: Analyses statistiques et géostatistiques de la fracturation et des propriétés hydrauliques. Application à la région des montagnes de Côte d'Ivoire (Domaine Archéen). Thèse de Doctorat, Université de Poitiers (Poitiers, France), 272 p.
- Mangoua O.M.J., Touré S., Goula B.T.A., Yao K.B., Savané I. & Biémi J. (2010). Évaluation des caractéristiques des aquifères fissurés du bassin versant de la Baya ou Bâ (Est de la Côte d'Ivoire). *Revue Ivoirienne des Sciences et Technologie*, (16) : 243- 259.
- Maréchal J.C., Wyns R., Lachassagne P., Subrahmanyam K. & Touchard F. (2003). Anisotropie verticale de la perméabilité de l'horizon fissuré des aquifères de socle : concordance avec la structure géologique des profils d'altération. *Compte rendu de Géoscience*, 335 : 451-460
- Matini L., Moutou J.M. & Kongo-Mantono M.S. (2009). Evaluation hydrochimique des eaux souterraines en milieu urbain au Sud-Ouest de Brazzaville, Congo. *Afrique Science*, 05(1) : 82-98.
- Oga Y.M.S., Lasm T., Yao T.K., Soro N., Saley M.B., Kouassi D. & Gnamba F. (2009). Caractérisation chimique des eaux des aquifères de fracture: Cas de la région de Tiassalé en Côte d'Ivoire. *European Journal of Scientific Research*, 31(1) : 72-87
- Ohou M. J. A. (2009). Impacts des activités anthropiques sur la qualité physico-chimique des ressources en eau souterraine du bassin versant de la Lobo (Buyo, Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire) : Cas du nitrate. Thèse de Doctorat, UFR des Sciences et Gestion de l'Environnement, Université d'Abobo-Adjamé (Abidjan, Côte d'Ivoire), 118 p.

REFERENCES

- OMS (2011). Directives de qualité pour l'eau de boisson. Quatrième édition, Genève (Suisse), 526 p.
- Ouattara A., Méité A., Dally T., Ouattara H. & Coulibaly K. S. (2016). Étude de la qualité des eaux de consommation dans la localité de N'Zianouan s/p de Tiassalé et des quartiers précaires de trois communes du District d'Abidjan (Koumassi. Treichville. Attécoubé). *Journal of Applied Biosciences*, 102 : 9708-9715.
- Ouattara I. (2009). Processus hydrogéochemiques en milieu soudano-tropical de socle cristallin en Côte d'Ivoire : bassin versant du Bandama. Mémoire de DEA, UFR Sciences et Gestion de l'Eau, Université d'Abobo-Adjamé, Côte d'Ivoire, 77 p.
- Orou K.R., Ahoussi K.E., Soro N., Coulibaly K.J., Kissiedou K.P.E., Tanoh A.J. & Soro T.D. (2016). Qualité et vulnérabilité des eaux d'aquifère d'altérites dans les sous-préfectures de grand-morié et d'azaguié dans le département d'agboville au sud-est de la côte d'ivoire. *Revue Ivoirienne Science Technologie*, 28 : 243 - 272
- Perraud A. (1971). Le milieu naturel de la Côte d'Ivoire. Mémoire, ORSTOM n°50, France, 391 p.
- Rodier J. (2009). L'analyse de l'eau. 9^{ème} Edition. Dunod: Paris, 1600 p.
- Roose E. & Sarrailh J.M. (1989). Erodibilité de quelques sols tropicaux. Vingt années de mesure en parcelles d'érosion sous pluies naturelles. Cahier ORSTOM, *série Pédologique*, XXV (1-2) : 7-30.
- Saley M. B. (1998). Estimation du bilan hydrologique et simulation d'écoulement dans la région de Man : cas du bassin versant de Ko (Ouest de la Côte d'Ivoire). Mémoire de DEA, Université de Cocody, Côte d'Ivoire, 71 p.
- Sarallier C. (2003). Eau et développement. *Bibliographie thématique* (6) : 27 p.
- Savadogo A. N. (1984). Géologie et hydrogéologie du socle cristallin de Haute Volta-Etude régionale du bassin versant de la Sissili. Thèse Doctorat d'Etat ès Sciences Naturelles, Université Grenoble 1, (Grenoble, France), 350 p.
- Savané I. & Soro N. (2001). Caractérisation chimique et isotopique des eaux souterraines du Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire : recharge des aquifères discontinus de la région d'Odienné. *Africa Geoscience Review*, 8(4) : 379-390.

REFERENCES

- Schoeller H. (1959). Recherches sur la zone aride : Hydrologie des régions arides, Progrès récents. UNESCO, 127 p.
- Soro D. D. (2017). Caractérisation et modélisation hydrogéologique d'un aquifère en milieu de socle fracturé : cas du site expérimental de Sanon (région du plateau central). Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie–Paris 6 (UPMC) (France), 303 p.
- Soro T. D. (2014). Evolution des ressources en eau du bassin versant du Haut Bandama à Tortiya (Nord de la Côte d'Ivoire) dans un contexte de variabilité et de changement climatiques : impacts hydrologiques, hydrogéologiques et hydrochimiques. Thèse de Doctorat, Université Félix Houphouët-Boigny, (Abidjan, Côte d'Ivoire), 243 p.
- Tapsoba-Sy A. (1995). Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique de la région de Dabou (Sud de la Côte d'Ivoire) : Hydrochimie, isotopie et indice cationique de vieillissement des eaux souterraines. Thèse de Doctorat 3^è cycle, Université Nationale de Côte d'Ivoire (Abidjan, Côte d'Ivoire), 200 p.
- Traoré A., Ahoussi K.E., Aka N., Traoré A. & Soro N. (2015). Niveau de contamination par les pesticides des eaux des lagunes Aghien et Potou (Sud-Est de la Côte d'Ivoire). *International Journal of Pure & Applied Bioscience*, 3(4) : 312-322.
- Yidana S.M., Ophori D. & Banoeng-Yakubo B. (2007). Hydrogeological and hydrochemical characterization of the Voltaian Basin: the Afram Plains area, Ghana. *Environmental Geology*, 54(9) : 1751-1762.

RESUME

Cette étude a pour but de comprendre le fonctionnement hydrogéochimique des eaux souterraines du département de Man situé à l'Ouest de la Côte d'Ivoire. Elle fait appel aux méthodes de statistique descriptive, hydrochimique (diagramme de Piper), à l'analyse statistique multivariée (ACP et CAH) et les indices de saturation en calcite (ISC) et en dolomite (ISD). Les résultats de la statistique descriptive montrent que les eaux ont une température moyenne qui est de 27,34°C en saison sèche et 28,005 °C en saison pluvieuse. Les eaux sont acides pendant les deux saisons. Elles sont peu minéralisées, avec des moyennes de CE allant de 219,51 µS/cm en saison sèche et 206,50 µS/cm en saison pluvieuse. Ces eaux présentent un faciès bicarbonaté calcique et magnésien majoritaire, un faciès chloruré calcique et magnésien au cours des deux saisons et un faciès bicarbonaté sodique et potassique en saison pluvieuse. Les principaux phénomènes à l'origine de la minéralisation des eaux sont la minéralisation-temps de séjour, l'apport superficiel et dégradation anthropique de la qualité des eaux et la pollution organique. Les eaux souterraines sont sursaturées en calcite et en dolomite ; donc anciennes dans l'aquifère avec une vitesse de circulation lente pendant les deux saisons.

Mots clés : hydrochimie, faciès, aquifère, minéralisation, vitesse de circulation

ABSTRACT

The aim of this study is to understand the hydrogeochemical functioning of groundwater in the Department of Man in western Côte d'Ivoire. It uses descriptive, hydrochemical (Piper diagram) statistical methods, multivariate statistical analysis (ACP and CAH) and calcite (ISC) and dolomite (ISD) saturation indices. The results of the descriptive statistic show that the waters have an average temperature of 27.34 degrees Celsius in the dry season and 28.005 degrees Celsius in the rainy season. The waters are acidic during both seasons. They are low mineralized, with CE averages ranging from 219.51 S/cm in the dry season and 206.50 S/cm in the rainy season. These waters have a majority calcium and magnesian double-carbonate, a calcium and magnesian chlorinated facies during the two seasons and a sodium and potassium bicarbonate facies in the rainy season. The main phenomena at the origin of the mineralization of the waters are mineralization-time of stay, the superficial contribution and anthropogenic degradation of water quality and organic pollution. Groundwater is oversaturated with calcite and dolomite; so old in the aquifer with a slow speed of movement during both seasons.

Keywords: hydrochemistry, facies, aquifer, mineralization, speed of circulation