

**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**

**Rodrigue Kotchi OROU<sup>1\*</sup>, Kalpy Julien COULIBALY<sup>2</sup>,  
Germaine Adjoua TANO<sup>3</sup>, Ernest Kouassi AHOUSI<sup>1</sup>,  
Patrice Eugène Koman KISSIEDOU<sup>2</sup>, Drissa Tanina SORO<sup>4</sup>  
et Nagnin SORO<sup>1</sup>**

*<sup>1</sup>Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Eau et du Génie de  
l'Environnement, UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières  
(UFR-STRM), Université Félix Houphouët Boigny de Cocody,  
22 BP 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire*

*<sup>2</sup>Laboratoire de l'Unité d'Etude et de Recherche des Contaminants  
chimiques et Microbiologiques dans les Aliments (UNERCO) de l'Institut  
Pasteur, 01 BP 490 Abidjan 01, Côte D'Ivoire*

*<sup>3</sup>Laboratoire des Sciences du Sol, UFR des Sciences de la Terre et des  
Ressources Minières (UFR-STRM), Université Félix Houphouët Boigny de  
Cocody, 22 BP 582 Abidjan 22, Côte D'Ivoire*

*<sup>4</sup>Département des Sciences de l'Environnement (DSE), Université Jean  
Lorougnon Guédé, 02 BP 150 Daloa 02, Côte d'Ivoire*

---

\* Correspondance, e-mail : [orourodrigue@gmail.com](mailto:orourodrigue@gmail.com)

## **RÉSUMÉ**

Cette étude a pour objectif d'étudier la qualité hygiénique de quelques aquifères d'altérites dans les sous-préfectures de Grand-Morié et d'Azaguié dans le département d'Agboville. Une analyse hydrochimique et microbiologique de 20 puits utilisés comme eau de boisson et également pour les activités domestiques a été effectuée. Les techniques d'analyse statistique multivariée, le calcul du pouvoir épurateur (Md) et l'Indice de Contamination Fécale (ICF) des eaux souterraines sont les différentes méthodes qui ont permis d'atteindre notre objectif. Plus de 85 % des puits étudiés ont un Md < 1, ceci montre qu'ils sont très vulnérables à une contamination bactériologique et / ou chimique. Ces eaux sont acides avec pH moyen de 6,13. Dans l'ensemble, ces eaux sont douces et faiblement minéralisées avec une conductivité électrique moyenne de 218,2 µS / cm. Plus du tiers (35 %) et un vingtième (5 %) des puits ont respectivement une concentration en nitrite et en ammonium supérieure à

la norme de l'OMS (2008). Les eaux souterraines ont été fortement contaminées par des germes de contamination fécale. Les coliformes thermotolérants sont les germes les plus abondants. L'Indice de Contamination Fécale indique que les eaux souterraines ont subi une contamination fécale forte avec un ICF moyen de 7,2.

**Mots-clés :** *eaux de puits, pouvoir épurateur, qualité, contamination fécale, vulnérabilité, Agboville.*

## **ABSTRACT**

### **Quality and vulnerability of alterite aquifer waters in the sub-prefectures of Grand-Morié and Azaguié in the department of Agboville in the Southeast of Côte d'Ivoire**

This study aims to investigate the hygienic quality of some alterite aquifers in the sub-prefectures of Grand-Morié and Azaguié in the department of Agboville. A hydrochemical and microbiological analysis of 20 wells used as drinking water and also for domestic activities was carried out. Multivariate statistical analysis techniques, calculation of cleaner power (Md) and Fecal Contamination Index (IFC) of groundwater are the different methods that have enabled us to achieve our objective. More than 85 % of the wells studied have a Md < 1, this shows that they are very vulnerable to bacteriological and / or chemical contamination. These waters are acidic with an average pH of 6.13. On the whole, these waters are soft and weakly mineralized with an average electrical conductivity of 218.2  $\mu\text{S} / \text{cm}$ . More than one-third (35 %) and one-twentieth (5 %) of the wells have a higher concentration of nitrite and ammonium than the WHO standard (2008). Groundwater has been heavily contaminated with fecal contamination germs. Thermotolerant coliforms are the most abundant germs. The Fecal Contamination Index indicates that groundwater has been subjected to strong fecal contamination with an average ICF of 7.2.

**Keywords :** *well water, cleaner power, quality, fecal contamination vulnerability, Agboville.*

## **I - INTRODUCTION**

L'eau est d'une importance biologique et économique capitale et l'hydrosphère est le fondement de la vie et des équilibres écologiques [1]. L'eau, première source vitale et facteur prépondérant dans le développement durable de tous les pays, s'est longtemps considérés comme une ressource inépuisable [2]. La

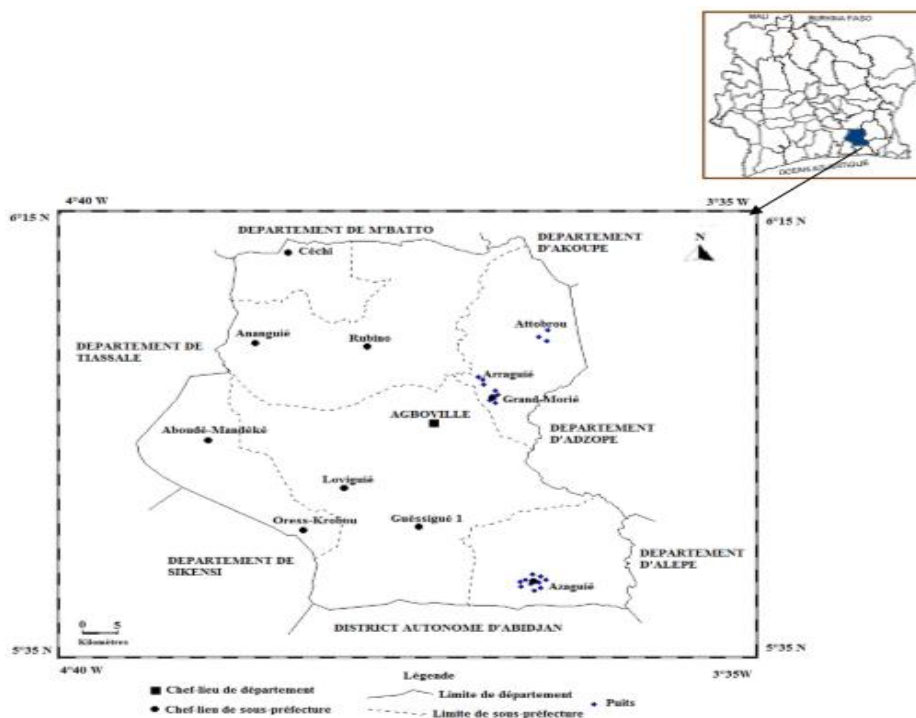
préservation et la sauvegarde de cette ressource est donc une nécessité qui concerne à la fois ses usages et sa valeur environnementale [3]. Sa contamination est la principale source de maladie comme les gastroentérites, l'hépatite virale, douleurs abdominales, typhoïdes, leptospirose, etc. [4]. La prédiction du risque de pollution et la protection à moyen et à long terme de la qualité des ressources en eaux s'impose [5]. C'est ainsi que la conférence internationale sur l'eau et le climat en 2016 au Maroc s'est fixée cinq thématiques majeures dont la vulnérabilité de l'eau aux changements climatiques et l'alliance « Eau-Energie-Sécurité Alimentaire-Santé-Education » pour une sécurité hydrique et une justice climatique [6]. Le suivi de la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux des cours d'eau de Ngaoundéré, au Cameroun a permis de mettre en évidence d'importantes communautés microbiennes parmi lesquelles les streptocoques fécaux et les vibrions [7]. Les eaux de la nappe phréatique M'nasra, au Maroc ont présenté une concentration moyenne en nitrates de 119 mg / L, avec une valeur maximale qui a atteint un niveau 5 fois plus élevé que la norme fixée à 50 mg / L. Ces eaux ont présenté une contamination fécale avérée par la présence d'un degré élevé en coliformes totaux, coliformes fécaux et en streptocoques fécaux [8].

En Côte d'Ivoire, les travaux de [9], ont enregistré les densités bactériennes maximales en début des crues et les minimales à l'étiage dans la rivière Agnéby. A Abengourou, [10] ont dénombré dans 28 % des eaux de puits analysées des souches d'Escherichia coli et 28 % des points d'eau présentent des teneurs de nitrates supérieures aux normes O.M.S. [11, 12] ont signalé de nombreux foyers de pollution aussi bien au niveau des eaux de surface que des eaux souterraines, dans les localités de N'zianouan et Mangouin-Yrongouin. Les Sous-préfectures de Grand-Morié et d'Azaguié dans le département d'Agboville ne sont pas en marge de ces problèmes environnementaux. La plupart de ces puits sont installés sans tenir compte de la distance avec les fosses septiques et les latrines traditionnelles. La population de la zone d'étude qui est essentiellement rurale se tourne de plus en plus vers les eaux de puits et les utilise pour leurs besoins domestiques en ignorant la qualité de ces ressources [13]. La présente étude a pour objectif d'étudier la qualité hygiénique (physico-chimiques et microbiologique) de quelques aquifères d'altérites dans les sous-préfectures de Grand-Morié et d'Azaguié dans le département d'Agboville utilisés comme eau de boisson et également pour les activités domestiques.

## **II - PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE**

Le département d'Agboville couvre une superficie d'environ 3850 km<sup>2</sup> et est situé entre les latitudes 5°35'N et 6°15'N et les longitudes 3°55'W et 4°40'W (*Figure 1*). Les sous-préfectures de Grand-Morié et d'Azaguié sont dans le département d'Agboville et ont une population respective de 38361 et 21976

habitants [14]. La population de la zone d'étude représente environ 20,65 % de la population totale du département d'Agboville. Cette population est essentiellement rurale et l'agriculture constitue la principale activité. Son couvert végétal est marqué par le type ombrophile pour le tiers sud et le reste par le type mésophile dominé par les tulpiers du Gabon et les fromagers [13, 15]. Le département d'Agboville est soumis à un climat équatorial de transition et caractérisé par 4 saisons dans l'année dont 2 saisons pluvieuses (Avril à Juillet et Septembre à Octobre) et 2 saisons sèches (Novembre à Mars et Août à Septembre) [15]. C'est une zone très humide où les précipitations interannuelles sont supérieures à 1500 mm [13]. La géologie de la zone d'étude est constituée de formations birimiennes et éburnéennes auxquelles sont associées des auréoles métamorphisées [13]. Les aquifères des altérites se développent dans les formations argilo-sableuses de la couche d'altération issue de l'altération et du lessivage des formations géologiques (roches magmatiques et métamorphiques). L'épaisseur des altérites dans le département d'Agboville varie en moyenne entre 4 et 53 m [16]. Il s'agit d'aquifères captés par les puits paysans et modernes dont la profondeur n'excède pas 30 m [17]. Ces puits sont les plus exploités dans les zones rurales car ils sont faciles d'accès (profondeur moins de 15 m) [13].



**Figure 1 :** Localisation des points de prélèvement des eaux de puits dans la zone d'étude

### III - MATÉRIEL ET MÉTHODES

#### III-1. Matériel

Le matériel utilisé est essentiellement constitué de données géologiques, cartographiques, physico-chimiques et bactériologiques. Dans le cadre de cette étude, une campagne d'échantillonnage de 20 puits ont été menées en saison sèche le 19 et 22 Mars 2014 (*Figure 1*). Ces puits sont utilisés comme eau de boisson et également pour les activités domestiques dans les différentes localités.

##### *III-1-1. Données cartographiques*

Pour mener à bien cette étude, les cartes topographiques du degré carré d'Abidjan, de Dimbokro et de Grand-Bassam à l'échelle 1 / 200 000 ont été utilisées pour localiser les points d'eau dans la zone d'étude.

##### *III-1-2. Données géologiques*

Les données géologiques ont permis de calculer le pouvoir épurateur du sol (Md). Elles sont essentiellement constituées de la nature des matériaux composants la zone non saturée.

##### *III-1-3. Données physico-chimiques*

Le conditionnement des échantillons s'est fait à l'aide de bouteilles en polyéthylène de capacité 1 litre, préalablement lavées à l'acide nitrique puis à l'eau distillée. Sur le terrain, avant le remplissage des bouteilles, celles-ci ont été lavées trois fois avec l'eau à prélever. Le remplissage des bouteilles a été fait à ras-bord puis le bouchon vissé afin d'éviter tout échange gazeux avec l'atmosphère. Les échantillons d'eau ont été ensuite transportés dans une glacière à 4 °C au laboratoire pour analyse. L'échantillonnage est réalisé à l'aide d'un seau muni d'une corde. Le pH, la T°C, la turbidité et la conductivité ont été mesurés *in situ* par un pH-mètre Hach HQ11D et un conductivimètre Hanna Instruments HI 98360. Les ions analysés  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_2^-$  et  $\text{NO}_3^-$  ont été déterminés au laboratoire du Centre Ivoirien Anti-pollution (CIAPOL) selon les techniques de [18] et les normes de l'Association Française de Normalisation (AFNOR).

##### *III-1-4. Données bactériologiques*

Le conditionnement des échantillons s'est fait à l'aide de bouteilles en verre de capacité 1 litre, préalablement lavées à l'eau distillée puis stérilisées au poupinel à 200°C pendant 02 heures. Sur le terrain, avant le remplissage des

bouteilles, celles-ci ont été rincées trois fois avec l'eau à prélever. Le remplissage des bouteilles a été fait en respectant la ligne indicatrice de limite de capacité afin de préserver un espace pour la respiration. Chaque bouteille a été refermée avec un bouchon vissé afin d'éviter tout échange gazeux avec l'extérieur. Ces bouteilles ont été emballées avec du papier aluminium. Les échantillons d'eau ont été ensuite transportés dans une glacière à 4 °C au laboratoire pour analyse. L'échantillonnage est réalisé à l'aide d'un seau muni d'une corde. La qualité bactériologique des eaux a été déterminée d'une part par le dénombrement des coliformes thermotolérants, des streptocoques fécaux et de *Escherichia col*, et d'autre part par la recherche de *Pseudomonas aeruginosa* et *Vibrio cholerea*. Les analyses bactériologiques des eaux ont été effectuées au laboratoire de l'Unité d'Etude et de Recherche des Contaminants chimiques et microbiologiques dans les aliments (UNERCO) de l'Institut Pasteur de Côte d'Ivoire. Les analyses ont été réalisées selon les exigences de la norme ISO 17025 adoptée par l'UNERCO.

### III-2. Méthodes

#### III-2-1. Calcul du pouvoir épurateur (Md)

Pour déterminer l'épaisseur et la nature du matériel géologique de la zone non saturée des puits, une campagne piézométrique a été effectuée en saison sèche le 19 et 22 Mars 2014. A l'échelle des mesures, la migration d'un polluant est régie par deux parcours : l'un vertical, traversant les couches superficielles de la nappe (zone non saturée), l'autre horizontal suivant le sens d'écoulement de la nappe (zone saturée). [19] a proposé une méthode empirique pour l'évaluation du pouvoir épurateur des terrains. Cette méthode a été utilisée par [5, 20 - 25]. Le pouvoir épurateur sur le trajet vertical (Md) selon la méthode de Rehese est calculé par la relation suivante :

$$Md = \sum_{j=1}^n h_j * i_j \quad (1)$$

avec,

*h* : hauteur non mouillée des différentes catégories des terrains rencontrés (zone non saturée de la nappe) ; *i* : index caractéristique associé à chaque type de terrain.

Deux cas peuvent se présenter :

- Md > 1, l'épuration est totale dans les couches de couverture ;
- Md < 1, la dépollution n'est pas totale.

### III-2-2. Analyse descriptive des données hydrochimiques et bactériologiques

Une analyse descriptive sommaire a permis de faciliter l'exploitation des données hydrochimiques et bactériologie. Elle a consisté à étudier les valeurs extrêmes (minima et maxima) et les valeurs centrales (moyenne). Les valeurs des paramètres ont été comparées aux valeurs guides des critères de l'Union Européenne de Directive du conseil 98 / 83 / CE du 3 Novembre 1998 relative à la qualité des eaux destinées à la consommation humaine parue au journal officiel des Communautés européennes du 5 / 12 / 98 [26], de l'Organisation Mondiale de la Santé [27] et du [28] pour l'eau de boisson non influencée par les activités anthropiques. La norme bactériologique de l'OMS en ce qui concerne l'eau destinée à la consommation humaine est de zéro (0) colonie pour 100 mL d'eau filtrée. L'analyse descriptive a été réalisée à l'aide du logiciel Excel.

### III-2-3 Calcul de l'indice de contamination fécale (ICF)

Dans la présente étude, nous avons élaboré l'Indice de Contamination Fécale (ICF) en se basant sur les valeurs guides des critères de [26 - 28]. Les paramètres pris en compte pour l'élaboration de l'Indice de Contamination Fécale (ICF) sont des bactéries d'origine fécale : *Escherichia coli* (EC), les streptocoques fécaux (SF) et coliformes thermotolérants (fécaux ou totaux) (CT) qu'on retrouve dans le tube digestif des humains et des animaux [35 - 38]. Les coliformes thermotolérants ou coliformes fécaux sont des sous-groupes des coliformes totaux [39]. L'indice de contamination fécale (ICF) est calculé par l'équation suivante :

$$ICF = EC + SF + CT \quad (2)$$

La classification des variables se fait par classe d'altération et le **Tableau 1** montre les concentrations des éléments bactériologiques par classe.

**Tableau 1 :** Classification des concentrations des variables des eaux souterraines par classes [28]

Variables	Classes			
	1	2	3	4
EC	0	> 0 et ≤ 20	> 20 et ≤ 20000	> 20000
SF	0	> 0 et ≤ 20	> 20 et ≤ 10000	> 10000
CT	0	> 0 et ≤ 50	> 50 et ≤ 50000	> 50000

$IFC =$  somme des numéros de classe des trois (3) variables.

Le **Tableau 2** indique la grille de degré de contamination fécale des eaux souterraines.



**Tableau 2 : Grille de degré d'indice de contamination fécale des eaux souterraines**

Classes	Valeur calculée	Indice de pollution
1	$0 < ICF \leq 3$	pas contamination fécale
2	$3 < ICF \leq 6$	Contamination fécale modérée
3	$6 < ICF \leq 9$	contamination fécale forte
4	$9 < ICF \leq 12$	contamination fécale excessive ou très forte

### III-2-4 Analyse en composante principale des données hydrochimiques et bactériologies

L'approche statistique qui a été utilisée pour étudier les phénomènes à l'origine de la minéralisation des eaux. Le regroupement des eaux et l'identification des facteurs responsables de ces regroupements est basée sur l'Analyse en Composantes Principales (ACP). Elle a donc pour but d'établir une relation entre les différents paramètres physico-chimiques et bactériologiques afin de mieux évaluer l'effet des activités anthropiques sur la qualité des eaux souterraines échantillonnées. Son application dans le domaine des sciences de l'eau a déjà été réalisée par plusieurs auteurs en Afrique et dans le monde avec des résultats très intéressants dont les auteurs [29 - 34]. L'Analyse en Composantes Principales (ACP) a été réalisée sur 20 descripteurs et à l'ensemble des paramètres (13 variables). Ces variables sont : coliformes thermotolérants (CT), *Escherichia coli* (EC), streptocoques fécaux (ST), pH, température (T°C), turbidité (Turb.), conductivité électrique (CE), ammonium (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), nitrites (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>), nitrate (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), chlorure (Cl<sup>-</sup>), pouvoir épurateur (Md) et l'Indice de Contamination Fécale (ICF). L'analyse statistique a été réalisée à l'aide du logiciel STATISTICA 7.1.

## IV - RÉSULTATS

### IV-1. Vulnérabilité des aquifères d'altérite à la contamination

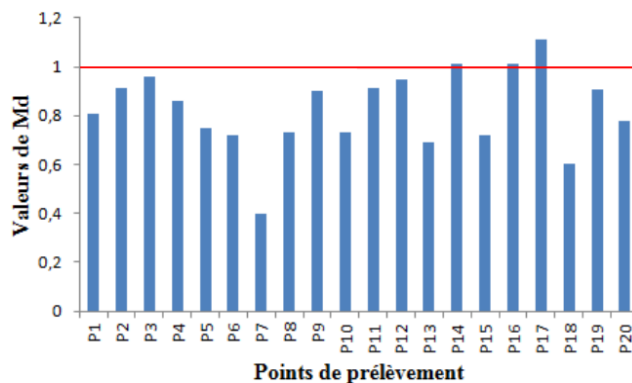
Les valeurs du pouvoir épurateur (Md) sur le trajet vertical varient entre 0,4 et 1,11 avec une moyenne de 0,82 (**Tableau 3**).

**Tableau 3 : Statistiques élémentaires et répartition du pouvoir épurateur en fonction des classes**

	Min	Max	Moy
Valeurs de Md	0,4	1,11	0,82
Classes de Md	Type de classes	Effectif	% effectif
Md < 1	l'épuration n'est pas totale.	17 / 20	85
Md > 1	l'épuration est totale	3 / 20	15



Cependant, l'analyse du **Tableau 3** et de la **Figure 2** montrent que 85 % des puits étudiés soit 17 puits ont un  $Md < 1$ , donc l'autoépuration n'est pas totale et doit se poursuivre dans la couche aquifère (la zone saturée). Par contre 15 % des puits soit 3 puits à Azaguié ont un  $Md > 1$ , donc l'autoépuration est totale dans la couche de couverture. Ainsi, une éventuelle contamination pourrait être affaiblie ou bien éliminée avant d'atteindre la surface piézométrique mais cette protection est relativement faible car les valeurs de  $Md$  tournent autour de 1. Dans l'ensemble, la valeur moyenne de  $Md$  qui est 0,82 montre que les puits sont vulnérables à une contamination bactériologique et / ou chimique. La lithologie de couverture (zone non saturée) des puits qui est essentiellement constituée d'argile latéritique est de faible épaisseur.



**Figure 2 :** Variation du pouvoir épurateur ( $Md$ ) des puits étudiés

## IV-2. Analyse descriptive des données hydrochimiques et bactériologies

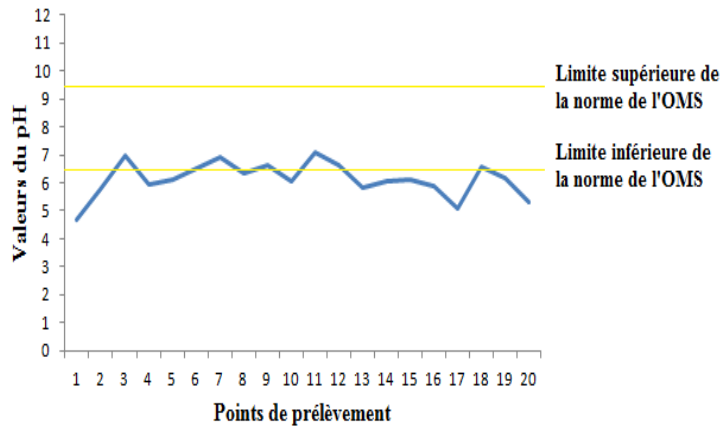
### IV-2-1. Statistique élémentaire des paramètres physico-chimiques

Les résultats des différentes analyses physico-chimiques réalisées sur les eaux de puits sont consignés dans le **Tableau 4**.

**Tableau 4 :** Statistique élémentaire des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines

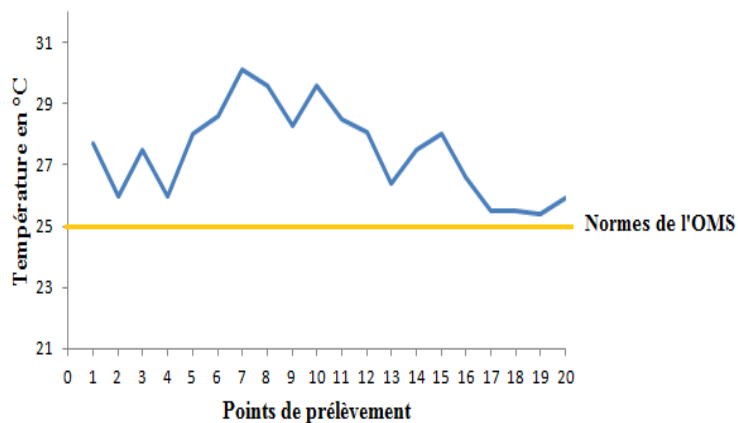
Paramètres physico-chimiques	Unités	Normes OMS (2008)	Min	Max	Moy
pH		6,5 - 9,5	4,7	7,07	6,13
T	°C	< 25	25,4	30,1	27,44
Turb	NTU		3,56	79,6	19,75
CE	μS/cm	> 400	50	450	218,2
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	mg/L	≤ 0,5	0,023	0,83	0,18
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	mg/L	≤ 0,1	0,009	0,2	0,09
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	mg/L	≤ 50	5,17	43,92	22,97
Cl <sup>-</sup>	mg/L	≤ 200	10,3	30,1	16,90

Les valeurs du pH varient de 4,7 à 7,07 avec une moyenne de 6,13 (**Tableau 4**). La **Figure 3** montre que 35 % des eaux souterraines ont des valeurs de pH situées dans l'intervalle de la norme de potabilité ( $6,5 < \text{pH} < 9,5$ ). Cependant 65 % des points ont des valeurs inférieures à 6,5 et ne respectent pas la norme de potabilité.



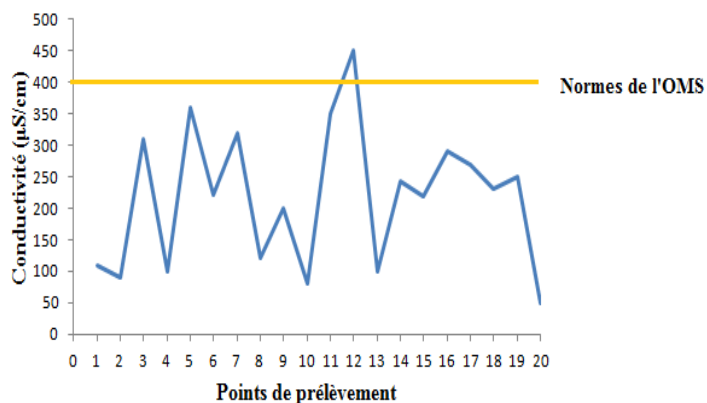
**Figure 3 :** Variation du potentiel d'hydrogène (pH) des eaux souterraines

Les températures des eaux souterraines échantillonnées varient entre 25,4°C et 30,1°C avec une valeur moyenne de 27,44°C (**Tableau 4**). Les températures les plus faibles correspondent à celles mesurées soit très tôt le matin soit très tard le soir. Les températures des eaux souterraines échantillonnées sont à toutes supérieures à la norme de potabilité de [27] qui est fixée à 25°C et à la valeur guide de la directive des communautés européennes qui donnent 22°C (**Figure 4**).



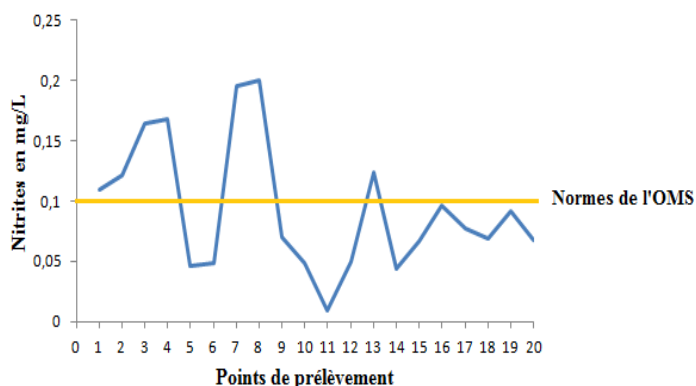
**Figure 4 :** Variation de la température dans les eaux souterraines

La turbidité des eaux échantillonnées varie de 3,56 à 79,6 UTN avec une moyenne de 19,75 (**Tableau 4**). Toutes les eaux de puits appartiennent à la classe des eaux non potables nécessitant un traitement de potabilisation [28]. Cependant, Les conductivités électriques mesurées varient de 50 à 450  $\mu\text{S} / \text{cm}$  avec une moyenne de 218,2  $\mu\text{S} / \text{cm}$  (**Tableau 4**). Les valeurs de conductivité électrique les plus fréquentes sont inférieures à 400  $\mu\text{S} / \text{cm}$  soit 95 % des valeurs mesurées (**Figure 5**).



**Figure 5 :** Variation de la conductivité électrique des eaux souterraines

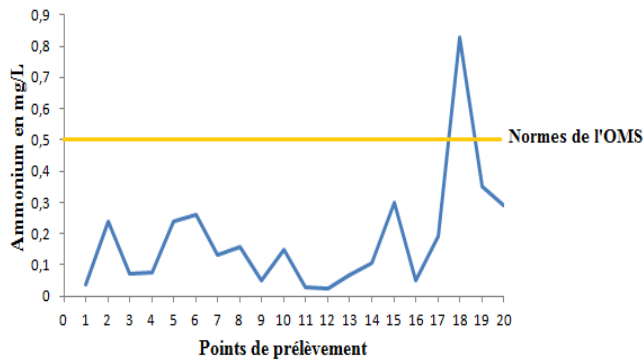
Les valeurs de nitrites mesurées oscillent de 0,009 à 0,2 mg / L avec une moyenne de 0,09 mg / L (**Tableau 4**). Plus du tiers (35 %) des eaux souterraines ont une concentration supérieure à la norme de potabilité fixée pour les eaux de boisson (0,1 mg / L) (**Figure 6**).



**Figure 6 :** Variation des valeurs de nitrites dans les eaux souterraines

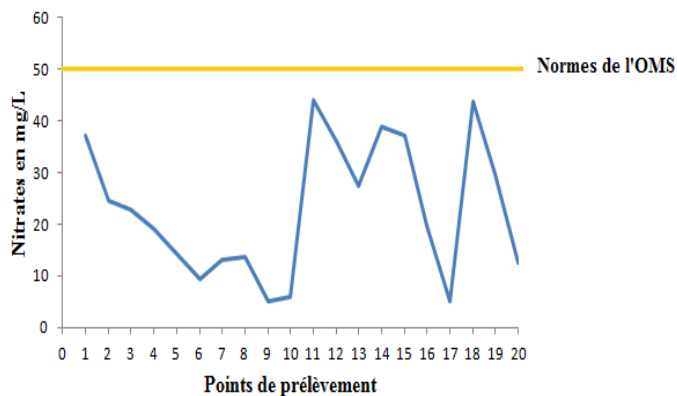
Les concentrations d’ammonium sont négligeables au même titre que celle des nitrites et sont comprises entre 0,023 et 0,83 mg / L avec une concentration

moyenne de 0,18 mg / L (**Tableau 4**). Un (1) puits présente une concentration supérieure à la norme de potabilité de [27] qui est de 0,5 mg / L (**Figure 7**).



**Figure 7 :** Variation de l'ammonium dans les eaux souterraines

L'azote est présent dans les eaux sous sa forme nitrate ( $\text{NO}_3^-$ ). Les valeurs du nitrate varient de 5,17 à 43,92 mg / L avec une moyenne de 22,97 mg / L. L'analyse de la **Figure 8** montre que 20 % des puits ont une concentration en nitrates inférieure à 10 mg / L qui est la teneur naturelle du nitrate dans les eaux souterraines d'altérites dont la profondeur est inférieure à 10 m [40]. Les valeurs de nitrates obtenues sont toutes inférieures aux normes [27] établies et fixées à 50 mg / L.



**Figure 8 :** Variation du nitrate dans les eaux souterraines

Les teneurs en chlorures obtenues oscillent de 10,3 mg / L à 30,1 mg / L avec une moyenne de 16,90 mg / L (**Tableau 4**). La **Figure 9** illustre la variation des valeurs rencontrées dans la zone d'étude. Les teneurs les plus fréquentes sont supérieures à 15 mg / L qui est la teneur naturelle des chlorures dans les eaux souterraines d'altérites dont la profondeur est inférieure à 10 m et situé à

moins de 100 km des côtes [40]. Toutes ces valeurs sont inférieures à la norme de potabilité de [40] qui est de 200 mg / L définie pour les eaux de consommation.

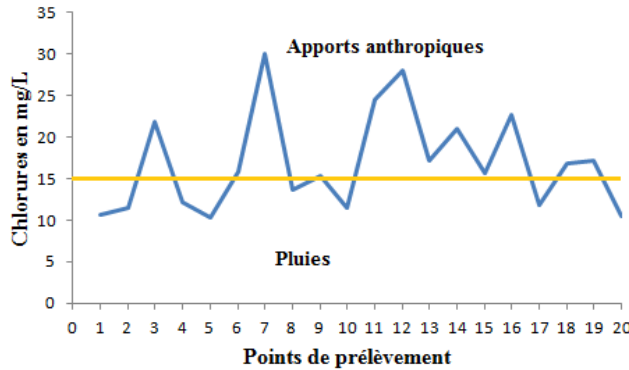


Figure 9 : Variation des chlorures dans les eaux souterraines

IV-2-2. Statistique élémentaire des paramètres bactériologiques

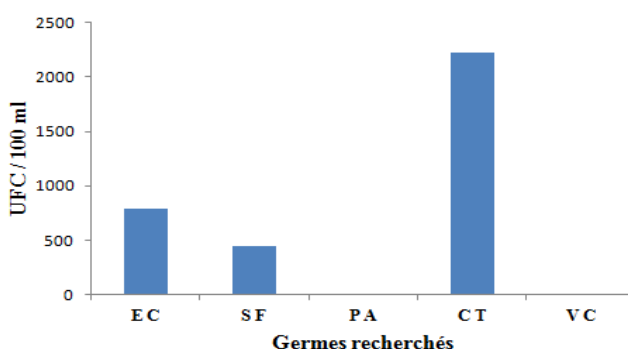
Les résultats des différentes analyses bactériologiques réalisées sur les eaux de puits échantillonnées sont consignés dans le **Tableau 5**. Le nombre de colonies a été exprimé sous forme d'Unité Formant Colonie (UFC / 100 mL).

Tableau 5 : Statistique élémentaire des paramètres bactériologiques des eaux souterraines

Paramètres bactériologiques	Unités	Normes de l’OMS (2008)	Normes de l’EU	Min	Max	Moy
Escherichia coli (EC)	UFC/100 mL	0	0	0	8480	795
Streptocoques fécaux (SF)	UFC/100 mL	0	0	0	1860	442
Coliformes thermotolérants (CT)	UFC/100 mL	0	0	0	18000	2223

Les résultats des analyses microbiologiques ont montré que les eaux de puits étaient toutes contaminées par la plupart des germes recherchés. Les valeurs d'Escherichia coli (EC) se situent entre 0 et 8480 UFC / 100 mL avec une valeur moyenne de 795 UFC / 100 mL (**Tableau 5**). Un quart des puits ont des valeurs de Escherichia coli qui respecte les normes européennes (0 UFC/100 mL). La contamination des eaux de puits par Escherichia coli a induit 75 % de non-conformité soit 15 puits présentant des valeurs supérieures aux critères européens d'évaluation. Les valeurs de streptocoques fécaux (SF) varient entre 0 et 1860 UFC / 100 mL avec une moyenne de 442 UFC / 100 mL (**Tableau 5**). Seuls sept (7) puits ont une valeur de streptocoques fécaux acceptable pendant la période de prélèvement (0 UFC / 100 mL). Les streptocoques fécaux ont été

retrouvés dans 65 % des échantillons d'eau de puits analysés. Les valeurs des coliformes thermotolérants (CT) oscillent entre 0 et 18000 UFC / 100 mL avec une moyenne de 2223 UFC / 100 mL. Un cinquième (20 %) des puits étudiés ont montré des valeurs nulles pour ce paramètre. Les coliformes thermotolérants ont été retrouvés dans 80 % des échantillons d'eau de puits analysés. *Pseudomonas aeruginosa* ont été absents dans 14 puits mais nous avons enregistré leur présence dans les eaux de 6 puits soit 30 % des puits échantillonnés. Tous les échantillons d'eau (20 puits) ont été conformes par rapport aux *Vibrio Cholerea*. La **Figure 10** montre que les eaux souterraines étudiées ont été fortement contaminées par les germes de contamination fécale à savoir les coliformes thermotolérants, les streptocoques fécaux et *Escherichia coli*. Les coliformes thermotolérants sont les plus abondants dans les eaux de puits analysés.



**Figure 10 :** Variation des valeurs moyennes des germes recherchés dans les eaux souterraines

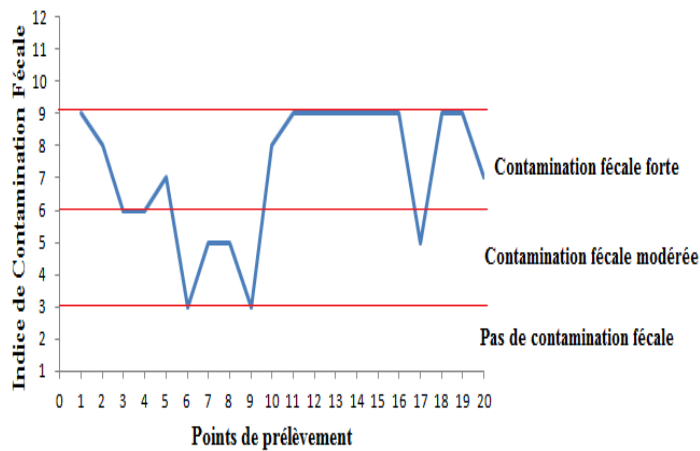
#### IV-3. Indice de contamination fécale (ICF)

Les valeurs de l'Indice de Contamination Fécale (ICF) oscillent de 3 à 9 avec une moyenne de 7,2 (**Tableau 6**).

**Tableau 6 :** Statistiques élémentaires et répartition d'ICF en fonction des classes

	Min	Max	Moy
Valeurs d'ICF	3	9	7,2
Classes d'ICF	Type de classes	Effectif	% effectif
0 < ICF ≤ 3	pas contamination fécale	2 / 20	10
3 < ICF ≤ 6	contamination fécale modérée	5 / 20	25
6 < ICF ≤ 9	forte contamination fécale	13 / 20	65

L'analyse du **Tableau 6** et de la **Figure 11** montrent que les eaux des puits étudiées sont subdivisées en trois (3) classes de qualité bactériologique. Un dixième (10 %) des points d'eau appartiennent aux eaux de qualité optimale pour la consommation humaine. Ces eaux n'ont pas subi une contamination fécale. Cependant 25 % des puits ont des eaux qui ont montré une contamination fécale modérée et ces eaux sont de qualité acceptable pour la consommation humaine, mais pouvant le cas échéant faire l'objet d'un traitement de désinfection. Par contre 13 puits soit 65 % des points de prélèvement ont indiqué une forte contamination fécale. Les eaux de ces puits doivent subir un traitement correctif pour la rendre conforme aux normes de potabilité. Dans l'ensemble, les eaux étudiées ont montré une forte contamination fécale.



**Figure 11 :** Variation de l'indice de contamination fécale dans les eaux souterraines

#### IV-4 Analyse en composante principale des données hydrochimiques et bactériologies

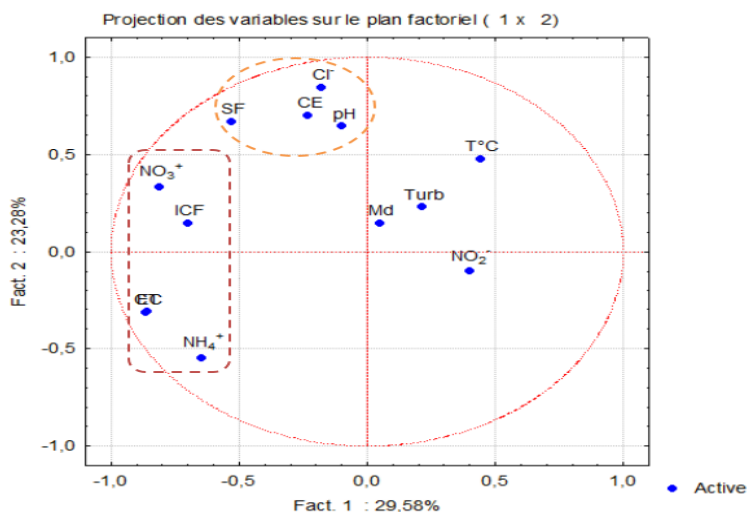
Le **Tableau 7** montre que les 4 premiers facteurs représentent 80,29 % de la variance exprimée. Ces facteurs regroupent le maximum de la variance exprimée et sont suffisants pour donner l'information recherchée.

**Tableau 7 :** Valeurs propres et pourcentage de variance exprimée en saison pluvieuse

	F1	F2	F3	F4
Valeurs propres	4,45	3,04	2,22	1,52
% Valeurs propres	31,78	21,76	15,90	10,85
% Variance exprimée cumulée	31,78	53,54	69,44	80,29

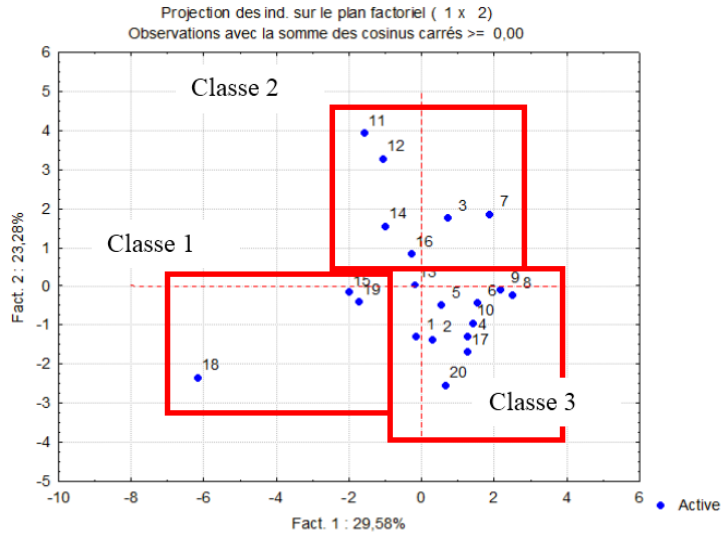


L'analyse des variables de l'ACPN dans le plan factoriel F1-F2 est présentée par la **Figure 12**. L'analyse dans l'espace des variables du plan factoriel F1-F2 permet de mettre en évidence deux regroupements des variables. Le facteur F1 est commandé dans sa partie négative par les variables  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ , ICF, EC, et CT. Ce regroupement de variables dans cette partie indique qu'ils apparaissent plus rapidement dans les eaux étudiées. La présence de nitrates et d'ammonium dans l'eau de consommation est principalement attribuable aux rejets d'effluents domestiques. Par contre *Escherichia coli* et les coliformes thermotolérants sont des bactéries d'origine fécale. Ce groupement de variables peut traduire une contamination fécale d'origine anthropique et animale. Le facteur F1 est considéré comme un axe de contamination fécale. Le facteur 2 est mis en relief par les variables SF (Streptocoques fécaux), CE, Cl<sup>-</sup> et pH dans sa partie positive. La CE et le pH expriment la minéralisation des eaux souterraines étudiées par l'hydrolyse acide des roches. Les streptocoques fécaux traduisent une origine fécale et la variable Cl<sup>-</sup> semble caractériser une évolution qui s'effectuerait près de la surface du sol. Le facteur F2 renseigne donc sur la minéralisation naturelle et anthropique des eaux étudiées.



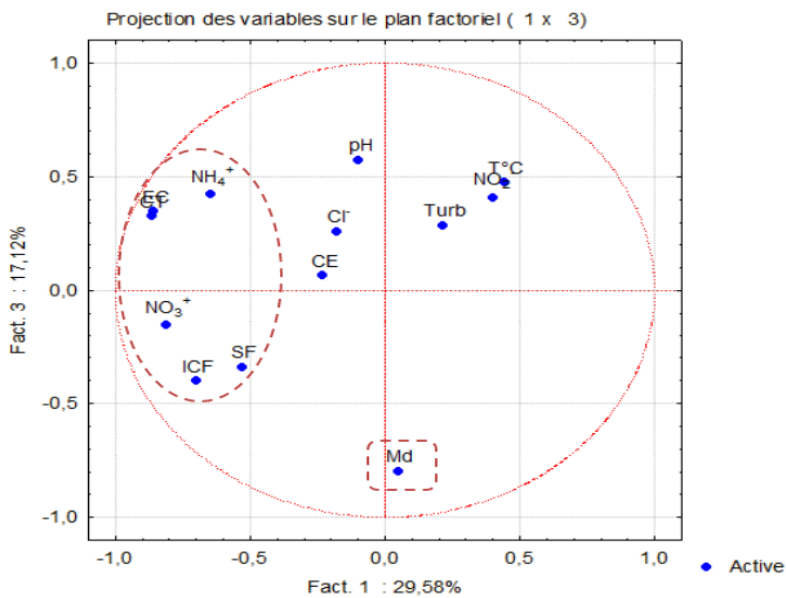
**Figure 12 :** Cercle de communauté du plan factoriel F1-F2 des eaux souterraines

La projection des individus dans le plan factoriel F1-F3 (**Figure 13**) montre 3 classes. La classe 1 prend en compte toutes les eaux qui sont riches en nitrates, en ammonium et sont caractérisées par forte contamination fécale. La classe 2 regroupe toutes les eaux les plus minéralisées avec des fortes teneurs de streptocoques fécaux, Cl<sup>-</sup> et de pH. Quant à la classe 3, elle contient les eaux troubles riches en nitrites



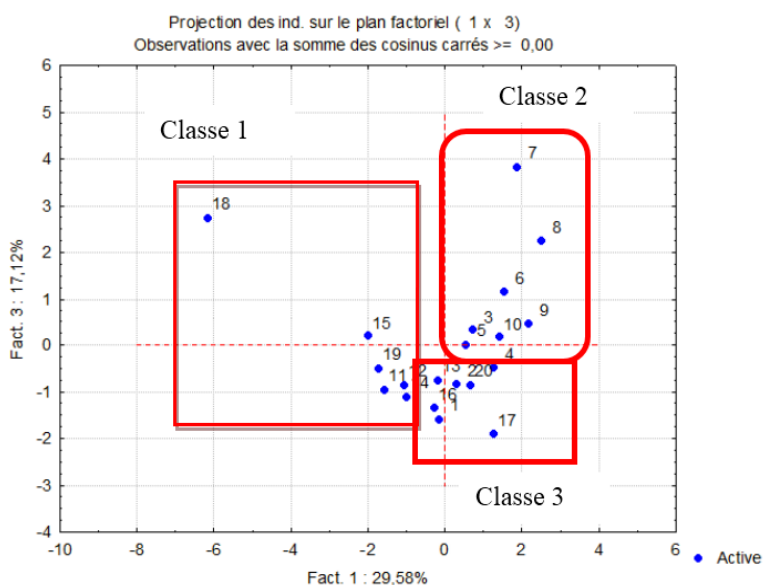
**Figure 13 :** *Graphe des unités statistiques dans le plan factoriel F1-F2 des eaux de souterraines*

L'étude des eaux dans l'espace des variables du plan factoriel F1-F3 met en évidence les regroupements de variables suivants les différents axes d'étude (*Figure 14*).



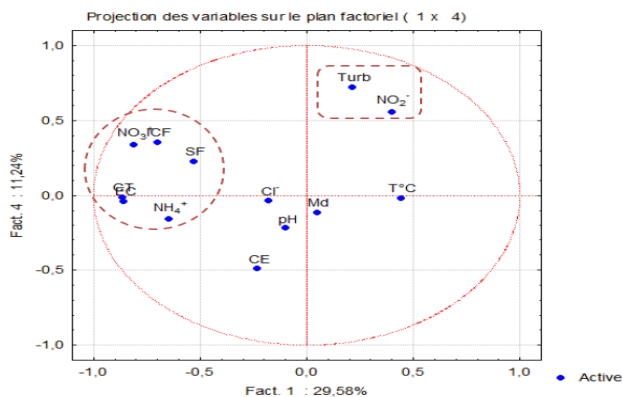
**Figure 14 :** *Cercle de communauté du plan factoriel F1-F3 des eaux souterraines*

Le facteur F3 est commandé par le pouvoir épurateur (Md) dans sa partie négative. En effet, le Md est un paramètre essentiel qui exprime l'autoépuration des couches de couvertures formant la zone non saturée des aquifères d'altérites. Le positionnement de cette variable dans la partie négative du facteur F3 signifie que le risque de contamination des eaux étudiées est très élevé. Le facteur F3 exprime donc la vulnérabilité des aquifères d'altérites à la contamination anthropique. La projection des individus dans le plan factoriel F1-F3 (*Figure 15*) montre trois (3) classes. La classe 1 est composée d'eaux riches en nitrate et caractérisées par de fortes teneurs des bactéries d'origine fécale. La classe 2 regroupe les eaux les plus minéralisées. La classe 3 est située dans la partie négative du facteur 3 et est constituée des puits ayant un pouvoir épurateur élevé.



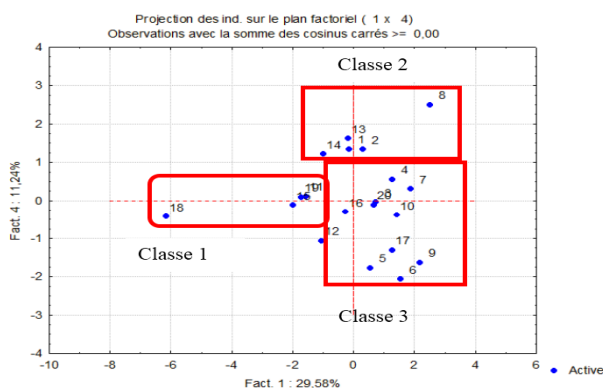
**Figure 15 :** *Graphe des unités statistiques dans le plan factoriel F1-F3 des eaux souterraines*

Le facteur F4 est déterminé par la variable Turb et à un moindre degré  $\text{NO}_2^-$  dans sa partie positive (*Figure 16*).



**Figure 16 :** Cercle de communauté du plan factoriel F1-F4 des eaux souterraines

Le nitrite traduit une contamination superficielle issue des eaux usées des fosses septiques, des puits perdus et des eaux stagnantes autour des puits mal entretenus. Il constitue donc un bon indice de contamination organique et bactériologique des eaux. La turbidité est la mesure du caractère trouble de l'eau. Ce paramètre est un indicateur de la transparence de l'eau et est causée par les matières en suspension. Un puits mal construit peut entraîner une infiltration de l'eau de surface riche en matière organique. Il est plus probable qu'un puits mal construit soit la cause d'une turbidité quand des bactéries sont également présentes. Le facteur F4 exprime donc le degré d'aménagement des puits et la transparence des eaux. La projection des individus dans le plan factoriel F1-F4 (**Figure 17**) montre trois (3) classes. La classe 1 est composée d'eaux riches en nitrate et caractérisée par de fortes teneurs des bactéries d'origine fécale. La classe 2 est constituée des puits mal construits ou mal aménagés. Cette classe est composée des eaux ayant des fortes teneurs en turbidité et en nitrites. La classe 3 regroupe les eaux les plus minéralisées.



**Figure 17 :** Graphe des unités statistiques dans le plan factoriel F1-F4 des eaux souterraines

## V - DISCUSSION

Dans l'ensemble, la valeur moyenne du pH (6,13) montre que les ressources en eaux de la zone d'étude sont acides. Cette acidité des eaux est en accord avec celle obtenue par [13, 29, 41] sur les eaux souterraines du département d'Agboville. L'acidité des eaux constitue l'un des traits caractéristiques des eaux de Côte d'Ivoire et particulièrement dans le Sud [32, 42 - 45]. Cette acidité pourrait s'expliquer d'une part par la décomposition de la matière organique végétale, avec la production de CO<sub>2</sub> dans les premières couches du sol [46, 47] et d'autre part au passage des eaux sur des permutolites libérant des ions H<sup>+</sup> [48, 49]. La dissociation de l'acide carbonique issu du CO<sub>2</sub> de l'atmosphère constitue un des facteurs de l'acidification des eaux souterraines concernées (aquifères superficiels). La nature silicatée des réservoirs souterrains explique l'acidité des eaux [50]. La température moyenne des étudiées est de 27,44°C.

Ces températures mesurées sont relativement proches de celles des valeurs de la température ambiante en saison sèche de la zone, indiquant un équilibre thermique entre l'aquifère et l'atmosphère. Cet équilibre thermique est confirmé par la faible profondeur des puits échantillonnés. La température est un paramètre qui sert généralement à contrôler la qualité de l'eau. Comme observé les plus faibles températures correspondent à celles mesurées soit très tôt le matin, soit très tard le soir. Cette observation a été faite par [17] où la valeur impérative de 25°C [27] est difficile à observer en Afrique de l'Ouest. La température moyenne de l'eau en Afrique de l'Ouest tend vers 30°C en raison des conditions climatiques. La valeur moyenne des températures des eaux souterraines rencontrée dans le département d'Agboville est sensiblement égale à celle observée par [13] avec une température moyenne de 27,13°C dans la même zone d'étude et de certaines eaux souterraines du pays. Par contre, elle reste inférieure à celle du bassin versant du Haut Bandama à Tortiya (28,8°C) [32].

Selon [51], dans la zone tropicale humide, la température moyenne des eaux est de 30°C. Les températures au-dessus de 25°C obtenues ne constituent donc pas un danger. Les eaux prélevées sont très faiblement minéralisées avec une conductivité électrique moyenne de 218,2 µS / cm où un seul point d'eau dépasse la norme de l'OMS [27] qui est de 400 µS / cm. La mesure de la conductivité constitue une bonne appréciation du degré de minéralisation d'une eau où chaque ion agit par sa concentration et sa conductivité spécifique [52]. Cette faible minéralisation s'explique par le très faible temps d'acquisition des ions. Cependant, la conductivité des eaux souterraines varie en fonction de la nature géologique des aquifères, de son épaisseur et du temps de séjour de l'eau dans l'aquifère. La turbidité moyenne des eaux est 19,75 NTU. La turbidité est la mesure du caractère trouble de l'eau autrement dit ce

paramètre est un indicateur de la transparence de l'eau et est causée par les matières en suspension. Elle peut se produire naturellement et être causée par des matières en suspension comme de la boue, de la terre glaise, des matières organiques et inorganiques très fines, ainsi que des micro-organismes [53]. Toutes les eaux de puits appartiennent à la classe des eaux non potables nécessitant un traitement de potabilisation [28]. Dans cette étude, l'origine de la turbidité est sans doute le degré d'aménagement des puits qui facilité la contamination de ces eaux par les eaux de surface riche en matière en suspension. La turbidité est également considérée comme un indicateur indirect du risque microbiologique [36]. Il est plus probable qu'un puits mal construit soit la cause d'une turbidité quand des bactéries sont également présentes [53]. Cette vulnérabilité est exprimée par le pouvoir épurateur des couches de couvertures (Md).

Plus de quatre cinquième (85 %) des puits ont un  $Md < 1$ , ce qui traduit que l'épuration n'est pas totale dans les couches de couverture. La valeur moyenne de Md qui est de 0,82 montre que les puits échantillonnés sont très vulnérables avec un risque de contamination chimique et / ou fécale élevé. Ces valeurs sont fonction de l'épaisseur de la lithologie de couverture des puits échantillonnés. La lithologie est essentiellement constituée de couche d'argile avec une grande proportion de graviers grossiers. Ces valeurs indiquent que ces eaux pourraient être contaminées si les sources de pollution sont permanentes et / ou répétitives. La faible profondeur de la nappe par rapport au sol et la proximité des fosses septiques ou des latrines traditionnelles des puits provoquent la contamination des eaux car les nitrates sont des marqueurs des eaux contaminées par les activités anthropiques, donc d'eaux récentes. Concernant les puits ayant un  $Md > 1$ , ils sont caractérisés par un moyen risque de contamination car l'épuration est totale dans les couches de couverture.

Mais ces valeurs se situant autour de 1 montrent que ces puits sont aussi vulnérables à une contamination permanente et / ou répétitive. Ces résultats sont similaires aux travaux de [5, 20, 21, 23, 54 - 56] sur les eaux souterraines d'Algérie. Leurs travaux ont montré que lorsque  $Md < 1$ , l'autoépuration dans les couches de couverture n'est pas totale et ces points d'eaux sont caractérisés par un risque de contamination élevé mais lorsque  $Md > 1$ , l'autoépuration est totale dans la couche de couverture. Cette autoépuration indique l'existence d'une couche argileuse qui joue un rôle protecteur et de terre végétale riche en humus qui est le siège des activités microbiennes du sol. Ainsi, une éventuelle contamination sera affaiblie ou bien éliminée avant d'atteindre la surface piézométrique. [57] a mentionné également que l'eau d'une nappe phréatique est d'autant plus vulnérable que le sommet de la nappe est proche de la surface du sol, que les terrains qui surmontent l'aquifère sont perméables et que les

sources superficielles de pollution sont importantes. Dans cette étude, c'est surtout l'absence de cette couche végétale qui entraîne et accentue ce risque de contamination. Ce risque de contamination est exprimé par la présence des bactéries d'origine fécale dans les eaux prélevées qui sont les coliformes thermotolérants, *l'Escherichia coli* et les streptocoques fécaux. Les coliformes thermotolérants sont les bactéries les plus nombreux dans ces eaux de puits. La valeur moyenne de l'Indice de Contamination Fécale qui est de 7,2 indique une forte contamination fécale des eaux prélevées. Plus de la moitié (65 %) des points de prélèvement ont indiqué cette forte contamination fécale. La présence de ces bactéries dans l'eau démontre que celle-ci a été contaminée par des déjections d'origine humaine ou animale. Ces contaminations pourraient provenir de personnes souffrant de maladies intestinales ou porteuses de germes de ces maladies. Il s'ensuit que dans les eaux qui en ont été contaminées, il est probable qu'il existe, outre les bactéries coliformes, des bactéries intestinales pathogènes [58].

La présence de la bactérie *E. coli* dans les eaux souterraines découle généralement de la présence de l'homme et d'organismes à sang chaud dans la région [59]. Cette bactérie est considérée comme le meilleur indicateur de contamination fécale et ces eaux peuvent donc contenir des microorganismes pathogènes [60]. Les streptocoques fécaux sont aussi essentiellement des bactéries intestinales mais moins nombreux dans les matières fécales [60, 61]. Dans l'eau, les streptocoques fécaux ne se multiplient pas mais disparaissent rapidement comme *E. coli* et surtout plus vite que les autres coliformes. Par conséquent, la caractérisation des streptocoques fécaux dans les échantillons d'eaux est le signe d'une contamination fécale récente et constitue une excellente confirmation d'une souillure fécale car ils sont des témoins peu sensibles [60]. La présence des coliformes thermotolérants dans l'eau n'indique pas forcément une contamination fécale ni un risque sanitaire, mais plutôt une dégradation de la qualité bactérienne de l'eau.

Ces bactéries sont d'origines fécale et environnementale car elles se trouvent naturellement dans le sol et la végétation. Cette dégradation peut être attribuée entre autre à une infiltration d'eau de surface dans le puits ou au développement progressif d'une couche de bactéries sur les parois appelé « biofilm ». Leur présence donne des informations sur la vulnérabilité possible d'un puits à la contamination de surface [60]. Ce manque d'entretien des puits se traduit par la présence des *Pseudomonas aeruginosa* dans les eaux. Ces puits sont caractérisés par des eaux dont les teneurs sont élevées en bactéries d'origine fécale. Ce manque d'entretien se traduit par des puits pas non busés, ni équipés d'une margelle et donc ne sont pas protégés. Ces observations sont identiques à celles de [37] où le manque d'entretien des puits a favorisé une forte contamination des eaux par ce germe. Les fosses septiques et les latrines inadéquates ou défectueuses et la défécation humaine et / ou animale



généralisée à l'air libre sont les sources de contamination des eaux prélevées par ces bactéries d'origine fécale. Ces villages sont dépourvus de système d'assainissement adéquat et sont caractérisés par un élevage de type traditionnel sans survie vétérinaire. Le nombre élevé de ces bactéries indique que ces souillures fécales sont permanentes et continues par une communication hydraulique permanente entre puits et fosses septiques ou latrines traditionnelles [62]. Ces observations sont similaires à celles [10] à Abengourou où la présence d'*Escherichia coli* dans 28 % des puits a été démontrée que ces eaux ont été polluées par des déchets d'origine humaine ou animale. Les travaux de [63] à Lomé au Togo ont indiqué que les eaux de puits sont caractérisées par une importante contamination d'origine fécale que les eaux de forages. A Niamey au Niger, [64] ont attribué la pollution fécale des eaux souterraines à diverses causes: défaut d'assainissement et de collecte des ordures ménagères, transfert de polluants à partir des couches superficielles, conditions de puisage et structure des installations.

La forte contamination d'origine fécale s'accompagne très naturellement d'une pollution azotée, que l'on voit bien à travers les teneurs en nitrates, nitrites et ammonium obtenues. Une fois dans le milieu souterrain et en conditions oxydantes, l'azote se nitrifie. L'azote nitrique est une forme très mobile au contraire de l'azote ammoniacale qui se retrouve rapidement dans la nappe. Dans cette étude, la pollution azotée des eaux provient essentiellement des fosses septiques et des latrines inadéquates ou défectueuses [65]. Ce dysfonctionnement des ouvrages d'assainissement laissent infiltrer directement dans le sol les eaux usées [66]. Cette contamination se traduit par les matières organiques humaines et animales infiltrées mais relativement faible pour l'origine animale. La plupart des installations septiques se situent à une distance n'excédant pas 15 mètres des différents puits.

Les 15 mètres représentent la distance recommandée entre les installations septiques et les puits [24, 67]. La valeur moyenne des nitrites (0,09 mg / L), des nitrates (22,97 mg / L) et de l'ammonium (0,18 mg / L) indiquent que les nitrates sont plus abondants dans l'eau que l'ammonium et les nitrites. Cette abondance est due au fait que les nitrates sont des sels très solubles, qui sont difficilement retenus lors de leur transfert dans l'aquifère [66]. Cette infiltration verticale des nitrates a été accélérée ou retardée par la nature géologique de la zone non saturée. Les nitrites sont très solubles et par conséquent très peu présents dans les eaux souterraines, sauf en cas de pollution. Les nitrites constituent donc de bons indices de contamination organique et bactériologique des eaux [66]. Les plus importantes teneurs en ammonium témoignent d'une pollution récente [62]. Cette pollution est issue d'une contamination d'origine superficielle (des rejets d'effluents domestiques, de la réduction naturelle des nitrates et de la dégradation incomplète de la matière organique).

## VI - CONCLUSION

Cette étude a permis d'étudier la qualité hygiénique (physico-chimiques et microbiologique) de quelques aquifères d'altérites dans les sous-préfectures de Grand-Morié et d'Azaguié dans le département d'Agboville. Ces eaux sont utilisées comme eau de boisson et également pour les activités domestiques. La valeur moyenne de Md (0,82) ont indiqué que ces aquifères sont vulnérables à la contamination fécale. Cette vulnérabilité est confirmée par la valeur moyenne de l'Indice de Contamination Fécale (7,2) montrant une forte contamination fécale. Plus de la moitié (65 %) des points de prélèvement ont indiqué cette forte contamination fécale. Les eaux de ces puits doivent subir un traitement correctif pour la rendre conforme aux normes de potabilité. L'ordre d'abondance des germes dans les eaux échantillonnées est le suivant : coliformes thermotolérants > *Escherichia coli* > streptocoques fécaux > *Pseudomonas aeruginosa* > *Vibrio cholerae*. Ces eaux sont acides et faiblement minéralisées. Plus du tiers (35 %) et un vingtième (5 %) des eaux souterraines ont respectivement une concentration en nitrite et en ammonium supérieure à la norme de l'OMS (2008). Dans cette étude, le nitrate a une origine anthropique mais aucun puits n'a une concentration en nitrate supérieure à la norme de l'OMS (2008).

## REMERCIEMENTS

*Nous remercions le laboratoire du Centre Ivoirien Anti-pollution (CIAPOL), le laboratoire de l'Unité d'Etude et de Recherche des Contaminants chimiques et microbiologiques dans les aliments (UNERCO) de l'Institut Pasteur de Côte d'Ivoire et le Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Eau et du Génie de l'Environnement de l'UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières de l'Université Félix Houphouët Boigny de Cocody.*

## RÉFÉRENCES

- [1] - B. FESTY, P. HARTEMANN, M. LEDRANS, P. LEVALLOIS, P. PAYMENT et D. TRICARD, Qualité de l'eau. Environnement et santé publique – Fondements et pratiques. Edisem / Tec Doc, Acton Vale / Paris, (2003) 333 - 368.
- [2] - M. BEN ABOU, F. FADIL, M. EL HAJI et M. ZEMZAMI, Impact anthropique sur la qualité des eaux souterraines du bassin versant de l'oued Taza (Maroc). European Scientific Journal, Vol. 10, N° 5, (2014) 117 - 137.

- [3] - P. QUEVAUVILLER, Protection des eaux souterraines : Législation européenne et avancées scientifiques. Editions TEC & DOC, Lavoisier, (2010) 432 p.
- [4] - A. EL OUALI LALAMI, F. EL-AKHAL, S. BERRADA, L. BENNANI, N. RAISS et S. MANIAR, Evaluation de la qualité hygiénique des eaux de puits et de sources par l'utilisation d'une analyse en composantes principales (ACP) : Une étude de cas de la région de Fès (MAROC). *J. Mater. Environ. Sci.* 5 (S1), (2014) 2333 - 2344.
- [5] - M. AMHARREF et A. S. BERNOUSSI, Vulnérabilité et risque de pollution des eaux souterraines. Actes des JSIRAUF, Hanoi, (2007), 10 p.
- [6] - MINISTERE DELEGUE CHARGE DE L'EAU DU ROYAUME DU MAROC. Conférence internationale sur l'eau et le climat : sécurité hydrique pour une justice climatique. Rabat, (2016) 22 p.
- [7] - E. AGUIZA ABAI, A. OMBOLO, M. B. NGASSOUM et A. MBAWALA, Suivi de la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux des cours d'eau de Ngaoundéré, au Cameroun. *Afrique SCIENCE* 10(4), (2014) 135 - 145.
- [8] - S. BRICHA, K. OUNINE, S. OULKHEIR, N. EL HALOUI, et B. ATTARASSI, Etude de la qualité physico-chimique et bactériologique de la nappe phréatique M'nasra (Maroc). *Afrique SCIENCE* 03 (3), (2007) 391 - 404.
- [9] - N. P. MANIZAN, B. KONAN, G. GOURENE et M. DOSSO, Dynamique des flux bactériens dans un hydrosystème ouest africain : cas de la rivière Agnébi, Côte d'Ivoire. *Afrique SCIENCE* 06(2), (2010) 9 - 17.
- [10] - N. AKA, S. B. BAMBA, G. SORO et N. SORO, Étude hydrochimique et microbiologique des nappes d'altérites sous climat tropical humide : Cas du département d'Abengourou (Sud-Est de la Cote d'Ivoire). *Larhyss Journal*, N°16, (2013) 31 - 52.
- [11] - K. E. AHOUSSE, Y. B. KOFFI, A. M. KOUASSI, G. SORO, N. SORO et J. BIEMI, 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), (2012) 1854 - 1873.
- [12] - K. E. AHOUSSE, Y. B. KOFFI, A. M. KOUASSI, G. SORO et J. BIEMI, 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*, N°63, (2013b) 4703 - 4719.
- [13] - K. E. AHOUSSE, Evaluation quantitative et qualitative des ressources en eau dans le Sud de la Côte d'Ivoire. Application de l'hydrochimie et des isotopes de l'environnement à l'étude des aquifères continus et

- discontinus de la région d'Abidjan-Agboville. Thèse de Doctorat Unique, Université de Cocody Abidjan, Côte d'Ivoire, (2008) 270 p.
- [14] - INSTITUT NATIONAL DE LA STATISTIQUE, Recensement Général de la Population et de l'Habitat : résultats globaux, (2014) 22 p.
- [15] - O. DEMBELE, Logiques et stratégies de développement urbain comparées à Abengourou, Agboville et Bonoua. Thèse de Doctorat, 3<sup>e</sup> cycle de Géographie, Université de Cocody, (1989) 666 p.
- [16] - K. R. OROU, Influence de l'utilisation des engrais NPK sur la qualité des eaux souterraines dans les zones agricoles en milieu Soudano-Guinéen : Cas du département d'Agboville (Sud-Est de la Côte d'Ivoire), Mémoire DEA, Université Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire, (2008) 68 p.
- [17] - J. BIEMI, Contribution à l'étude géologique, hydrogéologique et par télédétection des bassins versants subsahariens du socle précambrien d'Afrique de l'Ouest : Hydrostructurale, hydrodynamique, hydrochimie et isotopie des aquifères discontinus des sillons et aires granitiques de la Haute Marahoué (Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat d'Etat ès Sciences Naturelles, Université Nationale d'Abidjan, Côte d'Ivoire, (1992) 493 p.
- [18] - J. RODIER, B. LEGUBE, N. MERLET, L'Analyse de l'Eau. 9<sup>e</sup> édition. Dunod : Paris, (2009) 1579 p.
- [19] - W. REHSE, « Abbaubare organische Verunreinigungen pathogene Keime Und Viren » Eidgenossisches Amt Umweltschutz (Office Fédérale de la Protection de l'Environnement), Berne, Suisse, (1997).
- [20] - N. KHERICI, Vulnérabilité à la pollution chimique des eaux souterraines d'un système de nappes superposées en milieu industriel et agricole (Annaba- La Mafragh Nord-Est algérien), Thèse de doctorat d'Etat, Université d'Annaba, Algérie, (1993) 170 p.
- [21] - A. LALLEMEND-BARRES, Normalisation des critères d'établissement des cartes de vulnérabilité aux pollutions. Etude documentaire préliminaire. R37928. BRGM, (1994) 17 p.
- [22] - DI B. SOU et K. KHALLAA YOUNE, Mise en place d'un système de traitement-valorisation des eaux et des boues résiduaires dans la commune de L'QLIAA : étude préliminaire de diagnostic. Ministère de l'Environnement, Agence Américaine pour le Développement International (USAID), Rabat, Tunisie, (1997) 45 p.
- [23] - H. BOUSNOUBRA, Ressources en eaux des régions de Skikda-Annaba- Tarf- Guelma- Souk Ahras (Nord Est Algérien). Evaluation, Gestion et perspective. Vulnérabilité et protection. Thèse de Doctorat d'état, Université d'Annaba, (2002) 159 p.
- [24] - T. G. J. YOUMBI, D. NTAMACK, R. FEUMBA, E. NGNIKAM, J. WETHE et E. TANAWA, Vulnérabilité des eaux souterraines et périmètres de protection dans le bassin versant de la Mingoa (Yaoundé, Cameroun). Revue de l'Université de Moncton, Vol. 40, N° 2, (2009) 71 - 96.

- [25] - S. ABDELAZIZ, Vulnérabilité et évaluation des ressources en eau dans l'extrême Nord-Est algérien. Magister de l'Université BADJI MOKHTAR d'Annaba, Algérie, (2012) 80 p.
- [26] - UNION EUROPEENNE, Directive du conseil 98 / 83 / CE du conseil du 3 novembre 1998 relative à la qualité des eaux destinées à la consommation humaine. Journal Officiel des Communautés Européennes, L 330, (1998) 32 - 54.
- [27] - OMS, Guidelines for drinking water quality, Vol. 1, Recommendations (2nd edn.), Geneva, WHO, 1993, (2008) 130 p.
- [28] - MINISTERE DE L'ECOLOGIE ET DU DEVELOPPEMENT DURABLE et AGENCES DE L'EAU, Système d'évaluation de la qualité de l'eau des cours d'eau (SEQ-Eau), grilles d'évaluation seq-eau (version 2), (2003) 40 p.
- [29] - K. R. OROU, G. SORO, T. D. SORO, N. M. R. FOSSOU, Z. O. ONETIE, K. E. AHOUSI et N. SORO, Variation saisonnière de la qualité physico-chimique des eaux souterraines des aquifères d'altérites du département d'Agboville (Sud-Est de la Côte d'Ivoire). European Scientific Journal, Vol. 12, N°17, (2016a) 213 - 240.
- [30] - A. REGGAM, H. BOUCHELAGHEM et HOUHAMDI M. Qualité physico-chimique des eaux de l'Oued Seybouse (Nord-Est de l'Algérie) : caractérisation et analyse en composantes principales. J. Mater. Environ. Sci. 6 (5) (2015) 1417 - 1425.
- [31] - S. G. EBLIN, G. M. SORO, A. P. SOMBO, N. AKA, O. KAMBIRÉ et N. SORO, Hydrochimie des eaux souterraines de la région d'Adiaké (Sud-Est côtier de la Côte d'Ivoire). Larhyss Journal, N° 17, (2014) 193 - 214.
- [32] - T. D. SORO, 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 Unique, Université Félix Houphouët-Boigny, Côte d'Ivoire, (2014) 243 p.
- [33] - P. GBOLO et D. L. LOPEZ, Chemical and geological control on surface water within the Shade river watershed in southeastern Ohio. Journal of Environmental Protection, 4 (2013) 1 - 11.
- [34] - R. THILAGAVATHI, S. CHIDAMBARAM, PRASANNA M. V. C. TIVYA et C. A. SINGARAJA, Study on groundwater geochemistry and water quality in layered aquifers system of pondicherry region, southeast India. Applied Water Science, 2 (2012) 253 - 269.
- [35] - SERVICE CANTONAL DE L'ECOLOGIE DE L'EAU. Etude de la Versoix et ses affluents : état 2003 et évolution depuis 1997. Département de l'Intérieur, de l'Agriculture et de l'Environnement, Suisse, Etat de Genève, (2004) 32 p.

- [36] - E. JESTIN, La production et le traitement des eaux destinées à l'alimentation et à la préparation de denrées alimentaires. AESN Rivières de Basse-Normandie-Agence de l'Eau Seine-Normandie Direction Territoriale et Maritime des Rivières de Basse-Normandie-Hérouville saint Clair, (2006) 34 p.
- [37] - D. BENGOUNI, A. CHAHLAOUI, L. BELGHITI, I. TAHA, M. SAMIH ET EL R. MOUSTAINÉ, Etude de la qualité bactériologique de l'eau de certains puits dans les élevages avicole (Meknès et Gharb - Maroc). Larhyss Journal, N°24, (2015) 209 - 226.
- [38] - AGENCE DE LA SANTE ET DES SERVICES SOCIAUX DE CHAUDIERE-APPALACHES. Quoi faire en présence de coliformes fécaux, d'Escherichia coli ou d'entérocoques dans l'eau de votre puits? Canada, (2011) 2 p.
- [39] - INSTITUT NATIONAL DE SANTE PUBLIQUE DU QUEBEC. Coliformes fécaux, (2016) 5 p.
- [40] - B. LADOUCHE, L. CHERY et E. PETELET-GIRAUD, Contribution à la caractérisation des états de référence géochimie des eaux souterraines. Application de la méthodologie en milieu de socle fracturé (Naizin, Morbihan), B.R.G.M/RP-53025-FR-Rapport final, (2004) 67 p.
- [41] - D. L. GONE, I. SAVANE et M. M. GOBLE, Caractéristiques physico-chimiques majeurs des eaux souterraines des aquifères fissurés de la région d'Agboville (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire). Rev. Ivoir. Sci. Technol., 05 (2004) 117 - 133.
- [42] - I. SAVANE, Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique des aquifères discontinus du socle cristallin d'Odienné (Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire). Apports de la télédétection et d'un Système d'Information Hydrogéologique à Référence Spatiale. Thèse de Doctorat d'Etat ès Sciences Naturelles, Université d'Abidjan, Côte d'Ivoire, (1997) 386 p.
- [43] - N. SORO, Hydrochimie et Géochimie isotopique des eaux souterraines du degré carré de Grand-Lahou et ses environs (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire). Implications hydrologiques et hydrogéologiques. Thèse de Doctorat d'Etat ès Sciences Naturelles, Université de Cocody, (2002) 256 p.
- [44] - M. S. OGA, T. LASM, T. K. YAO, N. SORO, M. B. SALEY, D. KOUASSI et F. GNAMBA, 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) (2009) 72 - 87.
- [45] - G. SORO, Evaluation quantitative et qualitative des ressources en eau souterraines dans la région des Lacs (Centre de la Côte d'Ivoire) : hydrogéologie et hydrochimie des aquifères discontinus du district de Yamoussoukro et du département de Tiébissou. Thèse de Doctorat, Université de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire, (2010) 250 p.



- [46] - L. MATINI, J. M. MOUTOU et M. S. KONGO-MANTONO, Évaluation hydrochimique des eaux souterraines en milieu urbain au Sud-Ouest de Brazzaville, Congo. *Afrique Science*, 05 (1) (2009) 82 - 98.
- [47] - K. E. AHOUSI, N. SORO, Y. B. KOFFI, G. SORO et J. BIEMI, 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) (2010) 782 - 797.
- [48] - J. P. R. JOURDA, Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique de la région du Grand-Abidjan (Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat 3<sup>ème</sup> cycle, Université de Grenoble I, Institut Dolomieu, France, (1987) 317 p.
- [49] - A. TAPSOBA-SY, 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<sup>e</sup> cycle, Université Nationale de Côte d'Ivoire, (1995) 200 p.
- [50] - S. YAMEOGO, Ressources en eau souterraine du centre urbain de Ouagadougou au Burkina Faso : qualité et vulnérabilité. Thèse de Doctorat en Sciences de l'Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse, France, (2008) 245 p.
- [51] - J. RODIER, L'analyse de l'eau : eaux naturelles, eaux résiduaires, et eau de mer. 7<sup>ème</sup> édition, Dunod Technique, (1984) 1136 p.
- [52] - M. MAKHOUKH, M. SBAA, A. BERRAHOU et M. CLOOSTER VAN, Contribution a l'étude physico-chimique des eaux superficielles de l'oued Moulouya (Maroc oriental). *Larhyss Journal*, N° 09, (2011) 149 - 169.
- [53] - MINISTERE DE L'ENVIRONNEMENT DE LA NOUVELLE-ÉCOSSE. Turbidité, (2010) 8 p.
- [54] - F. MEDJANI, Ressources en eau, vulnérabilité et développement durable dans la plaine de SKIKDA (Nord-Est Algérien). Magister en Hydrogéologie, Université Badji Mokhtar-Annaba, Algérie, (2007) 87 p.
- [55] - W. CHAOUI, Impact de la pollution organique et chimique des eaux de l'Oued Seybouse et de l'Oued Mellah sur les eaux souterraines de la nappe alluviale de Bouchegouf (GUELMA). Mémoire de Magister de l'Université Badji Mokhtar-Annaba, Algérie, (2007) 104 p.
- [56] - W. CHAOUI, W. BOUSNOUBRA et K. CHAOUI, Étude de la vulnérabilité à la pollution des eaux superficielles et souterraines de la région de Bouchegouf (Nord-Est Algérien), *Revue « Nature & Technologie »*. C-Sciences de l'Environnement, N° 08, (2013) 33 - 40.
- [57] - C. BOUTIN, L'eau des nappes phréatiques superficielles, une richesse naturelle vitale mais vulnérable : l'exemple des zones rurales du Maroc. *Sci. Eau*, 6 (3) (1987) 357 - 65.



- [58] - H. SAMAKE, Analyse physico-chimique et bactériologique au L.N.S. des eaux de consommation de la ville de Bamako durant la période 2000 et 2001. Mémoire de thèse de la faculté de Médecine, de Pharmacie et d'Odonto-Stomatologie de l'Université de Bamako, Mali, (2002) 71 p.
- [59] - MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT : NOUVEAU-BRUNSWICK. Surveillance de la qualité de l'eau domestique, Série de rapports environnementaux, T2009-01, (2009) 24 p.
- [60] - LE DUC F. et D. VAURETTE, Contrôle bactériologique de la potabilité des eaux, Trégor Solidarité Niger, (2014) 29 p.
- [61] - J. A. E. FARROW, Taxonomic studies of *S. bovis* and *S. equines*. *Systematic and Applied Microbiology*, 5 (1984) 467 - 482.
- [62] - G. R. KOUAM KENMOGNE, F. NTEP, F. ROSILLON, H. G. MPAKAM, A. NONO et H. B. DJEUDA TCHAPNGA, Hydrodynamique souterraine et vulnérabilité à la pollution des ressources en eau en zone urbaine tropicale : cas du bassin versant de Mingoa (Yaoundé-Cameroun). Colloque Eau, Déchets et Développement Durable, 28 – 31 mars 2010, Alexandrie, Egypte, (2010) 145 - 151.
- [63] - K. SONCY, B. DJERI, K. ANANI, M. EKLOU-LAWSON, Y. ADJRAH, D. S. KAROU, Y. AMEYAPOH et C. DE SOUZA, Évaluation de la qualité bactériologique des eaux de puits et de forage à Lomé, Togo. *Journal of Applied Biosciences*, 91 (2015) 8464 - 8469.
- [64] - J.-P. CHIPPAUX, S. HOUSSIER, P. GROSS, C. BOUVIER et F. BRISSAUD, Étude de la pollution de l'eau souterraine de la ville de Niamey, Niger. *Bull Soc Pathol Exot*, 94 2 (2002) 119 - 123.
- [65] - P. LEVALLOIS et D. PHANEUF, La contamination de l'eau potable par les nitrates : analyse des risques à la santé. *Revue canadienne de santé publique*, 85 (3) (1994) 192 - 196.
- [66] - K. E. AHOUSSE, S. LOKO, Y. B. KOFFI., G. SORO, Y. M. S. OGA et N. SORO, Evolution spatio-temporelle des teneurs en nitrates des eaux souterraines de la ville d'Abidjan (Côte d'Ivoire). *Int. J. Pure App. Biosci.* 1 (3) (2013a) 45 - 60.
- [67] - UNICEF, Points d'eau, latrines, lave-mains, et kits d'hygiène en milieu scolaire : Normes, spécifications techniques, plans-types et photos pour les entreprises et les bureaux de contrôle. Élaboré par l'équipe Eau-Hygiène-Assainissement (WASH) de l'UNICEF-Mali, (2013) 79 p.