
Etude de la qualite de l'eau destinee a la consommation humaine dans le sous-bassin versant de Ravine Diable (Anse-a-Veau)

Auteur : Orelie, Frantzy

Promoteur(s) : Debbaut, Vincent

Faculté : Faculté des Sciences

Diplôme : Master de spécialisation en sciences et gestion de l'environnement dans les pays en développement

Année académique : 2016-2017

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/3245>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

Communauté française de Belgique



ULg - Faculté des Sciences – Département des Sciences et Gestion de l'Environnement

UCL – Faculté des bioingénieurs

« Étude de la qualité de l'eau destinée à la consommation humaine dans le sous-bassin versant de Ravine Diable (Anse-à-Veau) »

Frantzy ORELIEN

**MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER DE
SPÉCIALISATION EN SCIENCES ET GESTION DE L'ENVIRONNEMENT DANS LES
PAYS EN DÉVELOPPEMENT**

FILIÈRE : EAU & SOL

ANNÉE ACADÉMIQUE : 2016-2017

PROMOTEUR : Dr Vincent DEBBAUT

©Copyright : *"Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique de l'Université de Liège et de l'Université catholique de Louvain".*

Le présent document n'engage que son auteur.

Auteur du présent document : ORELIEN Frantzy

Adresse : frantzyorelien@gmail.com

Communauté française de Belgique



ULg - Faculté des Sciences – Département des Sciences et Gestion de l'Environnement

UCL – Faculté des bioingénieurs

« Étude de la qualité de l'eau destinée à la consommation humaine dans le sous-bassin versant de Ravine Diable (Anse-à-Veau) »

Frantzy ORELIEN

**MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER DE
SPÉCIALISATION EN SCIENCES ET GESTION DE L'ENVIRONNEMENT DANS LES
PAYS EN DÉVELOPPEMENT**

FILIÈRE : EAU & SOL

ANNÉE ACADÉMIQUE : 2016-2017

PROMOTEUR : Dr Vincent DEBBAUT

REMERCIEMENTS

Je remercie très particulièrement mon Promoteur, Dr Vincent DEBBAUT, pour la lettre d'approbation qu'il m'a donnée pour me permettre d'obtenir la bourse Fonds Elizabeth & Amélie de la Fondation Roi Baudouin ainsi que pour les précieuses et pertinentes remarques qu'il m'a fournies pour améliorer ce travail.

Je tiens à adresser mes sincères remerciements à l'Académie de Recherche et d'Enseignement Supérieur et la Commission de la Coopération au Développement (ARES-CDD), pour avoir sélectionné ma candidature à ce programme de Cours et Stages Internationaux à compétitivité très élevée.

Mes remerciements vont également à l'endroit de la Fondation Roi Baudouin pour le soutien financier qu'elle m'a donné via la bourse Fonds Elizabeth & Amélie en vue de la réalisation de mon stage.

J'exprime aussi ma plus profonde gratitude au Corps professoral de l'Université de Liège et de l'Université catholique de Louvain, plus particulièrement aux Professeurs Bernard TYCHON et Charles BIELDERS, Co-Coordonnateurs du Master de spécialisation en Sciences et Gestion de l'Environnement dans les Pays en Développement, et à Monsieur Antoine DENIS, Assistant-Coordonnateur du Master, pour tout le savoir scientifique qu'ils ont partagé avec nous, leur dynamisme et leur sens de responsabilité.

J'adresse également mes vifs remerciements au Directeur de la Fondation Seguin, Monsieur Serge Junior CANTAVE et à l'Agronome Yvon Emmanuel ÉLIE, pour leurs appuis et leur enthousiasme à me donner les lettres de recommandation pour postuler au programme de bourse.

Je remercie le Chef d'unité du laboratoire de la Direction Nationale de l'Eau Potable et de l'Assainissement (DINEPA), Madame Cinthia BLAISE, pour son support dans la réalisation des analyses de laboratoire.

Je remercie d'une façon spéciale ma fiancée Yveline LEGERME, qui m'a toujours encouragé et supporté moralement pour mener à terme cette aventure.

Le séjour d'études ici en Belgique pourrait se révéler difficile sans le support de Jeannette TOUSSAINT et Marc MENNUI. Je leur renouvelle l'expression de ma profonde reconnaissance.

Je ne saurais terminer sans remercier mes amis et collègues haïtiens et africains, notamment Luc CLERVIL, Fenelon S. ALLY, Vladimyr BIENVENUE, Djems SAINT-JUSTE, Franciot WANÉLUS, Arnaud G. SEDA, Allousenou BAH, Dieudonné ZERBO, Hamidou YORO, Penda NDIAYE, pour leur amitié, l'entraide et leurs supports.

Enfin, je remercie toutes celles et tous ceux qui, d'une façon ou d'une autre, ont contribué à la réussite de ce travail. Qu'il puisse vous rendre fier !

DÉDICACES

Je dédie de façon spéciale ce Travail de Fin d'Études

❖ À

Dieu Tout-Puissant, pour son amour infini. Je Lui rends Gloire et Honneur !

❖ À

*Ma mère Lisemène **ROSIA**, pour les sacrifices consentis pour faire de moi ce que je suis ;*

❖ À

*Mon père Estimé **ORELIEN**, pour les sacrifices consentis et la voie sur laquelle il m'a engagé ;*

❖ À

*Ma fiancée Yveline **LEGERME**, pour ses supports incalculables et inconditionnels ;*

❖ À

*Ma fille Lourdemie F. **ORELIEN** ;*

❖ À

Mes frères et sœurs ;

❖ À

Mes oncles et tantes ;

❖ À

Mes cousins et cousines.

RÉSUMÉ

Aliment indispensable à la vie, l'eau destinée à la consommation humaine nécessite une excellente qualité physico-chimique et microbiologique. Cette étude a envisagé de déterminer la qualité physico-chimique et microbiologique de l'eau consommée par la population du sous-bassin versant de Ravine Diable en analysant les paramètres suivants : pH, température, couleur, odeur, conductivité électrique, calcium, magnésium, manganèse, fer, chlorures, fluorures, sodium, aluminium, cuivre, zinc, arsenic, nitrites, nitrates, sulfates, carbonates, bicarbonates, dureté et alcalinité, coliformes fécaux et totaux, *Escherichia coli* et numération des germes. Le choix des échantillons d'eau analysés a été reposé sur un certain nombre de facteurs de risques et sur l'importance relative des populations utilisatrices. Ces derniers ont été identifiés via des enquêtes et observations de terrain. Les résultats ont montré que la quasi-totalité de ces paramètres physico-chimiques sont conformes aux normes de l'OMS et de l'Union Européenne. La classification hydrochimique des eaux à partir du diagramme de Piper a montré qu'elles sont principalement bicarbonatées calciques, avec une minéralisation qui varie de faible à modérément accentuée. Par contre, sur le plan microbiologique, ils ont montré que les eaux de source, de la rivière et de la citerne Berné contiennent tous les germes susmentionnés à des concentrations supérieures aux normes. À l'instar de l'échantillon témoin, les citernes Kolo et Neyop ne sont conformes qu'en *Escherichia coli* et coliformes fécaux. Les activités humaines exercent une influence non négligeable sur la qualité des ressources en eau du sous-bassin. La consommation de ces eaux sans traitement préalable constitue un risque pour la santé des populations. Des mesures urgentes s'avèrent donc nécessaires pour prévenir les populations des risques de maladies hydriques.

Mots clés: Eau destinée à la consommation humaine, sous-bassin versant, Ravine Diable, paramètres physico-chimiques, paramètres microbiologiques, activités humaines, risque sanitaire.

ABSTRACT

Essential food to life, drinking water needs an excellent physico-chemical and microbiological quality. This study planned to determine physico-chemical and microbiological quality in drinking water used by the population of Ravine Diable under-watershed by analyzing the following parameters: pH, temperature, color, odor, electrical conductivity, calcium, magnesium, manganese, iron, chlorides, fluorides, sodium, aluminium, copper, zinc, arsenic, nitrites, nitrates, sulfates, carbonates, bicarbonates, hardness, alkalinity, faecal and total coliforms, *Escherichia coli* and numeration of germs. The choice of waters samples have been based on a certain number of risks factors and the relative importance of user populations. These factors have been identified through surveys and field observations. The results showed that almost all of these physico-chemical parameters are in accordance with the standards of WHO and European Union. The hydrochemical classification of waters from the Piper's diagram showed that are mainly calcic bicarbonated, with a mineralization ranging from low to moderately accentuated. However, from the microbiological point of view, the results showed that waters of sources, river and Berné's tank contain all the germs listed above at concentrations greater than the standards. As the case of control sample, Kolo and Neyop's tanks are not in accordance with the standards in *Escherichia coli* and faecal coliform. Humain activities exert a significant influence on the quality of water ressources in the under-watershed. The consumption of these waters without prior treatment represents a risk to the health of populations. Urgent measures are therefore necessary to prevent the populations of the risk of water-borne diseases.

Key words : Drinking water, under-watershed, Ravine Diable, physico-chemical parameter, microbiological parameter, human activities, health risk.

Table des matières

REMERCIEMENTS	iii
DÉDICACES	iv
RÉSUMÉ	v
ABSTRACT	vi
LISTE DES TABLEAUX	xi
LISTE DES FIGURES	xii
SIGLES ET ABRÉVIATIONS	xiii
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
1.- Contexte de l'étude	1
2.- Problématique et objectifs.....	2
3.- Hypothèse de recherche	3
4.- Limites de l'étude	3
5. Architecture du travail.....	4
CHAPITRE I- SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE	5
I.1.- Eaux destinées à la consommation humaine	5
I.2.- Importance de l'eau pour la santé publique.....	5
I.3.-Accès et approvisionnement en eau potable en Haïti	6
I.4.- Accès à l'assainissement de base en Haïti.....	8
I.5.-Paramètres de contrôle de qualité de l'eau	9
I.5.1.-Paramètres organoleptiques	9
1.5.1.1.-La couleur.....	9
1.5.1.2.-L'odeur.....	10
I.5.2.-Paramètres physico-chimiques liés à la structure naturelle de l'eau et les eaux adoucies	10
I.5.2.1.-Le pH	10
I.5.2.2.-La conductivité électrique.....	10
I.5.2.3.-La température	10
I.5.2.4.-Le sodium.....	11
I.5.2.5.-Les sels totaux dissous	11
I.5.2.6.-L'alcalinité	11
I.5.2.7.-Le calcium.....	12
I.5.2.8.-Le magnésium.....	12
I.5.2.9.-La turbidité.....	12

I.5.2.10.-La dureté de l'eau.....	12
I.5.2.11.-Les sulfates.....	13
I.5.2.12.-L'aluminium	13
I.5.2.13.-Les chlorures.....	14
I.5.3.-Paramètres concernant les substances indésirables	14
I.5.3.1.-Les nitrates et nitrites	14
I.5.3.2.-Le manganèse.....	15
I.5.3.3.-Le fer.....	15
I.5.3.4.-Les fluorures	16
I.5.3.5.-Le cuivre	16
I.5.3.6.-Le zinc.....	17
I.5.4.-Paramètres toxiques.....	17
I.6.-Normes physico-chimiques de qualité de l'eau.....	17
I.7.-Paramètres microbiologiques	19
I.7.1.-Généralités	19
I.7.2.-Les coliformes.....	21
I.7.2.1.-Les coliformes fécaux	22
I.7.2.2.- <i>Escherichia coli</i>	22
I.7.3.-La numération des germes	23
I.8.-Effet d'une exposition à des contaminants présents dans l'eau sur la santé humaine.....	23
I.9.-Normes de qualité microbiologique	24
CHAPITRE II. PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE	25
II.1.- Localisation géographique	25
II.2.- Climat.....	26
II.3.- Pédologie.....	26
II.4.- Réseau hydrographique	27
II.5.-Population.....	27
II.6.- Activités économiques	27
CHAPITRE III. MATÉRIELS ET MÉTHODES	28
III.1.- Matériels	28
III.2.- Méthodes.....	28
III.2.1.- Revue de bibliographie.....	28
III.2.2.- Campagne de collecte de données.....	29

III.2.2.1.- Données de terrain.....	29
III.2.2.1.1.- Inventaire des ressources en eau	29
III.2.2.1.2.- Enquête et observation	29
III.2.2.1.3.- Plan d'échantillonnage	29
III.2.2.1.4.- Prélèvement et conservation des échantillons.....	32
III.2.2.2.- Données de laboratoire.....	33
III.2.2.2.1.- Détermination et mesure des paramètres physico-chimiques	33
III.2.2.2.2.- Détermination et mesures des paramètres microbiologiques.....	34
III.2.3.- Traitement et analyse des données	34
CHAPITRE IV.- RÉSULTATS ET DISCUSSION	35
IV.1.-Résultats.....	35
IV.1.1.-Ressources en eau destinée à la consommation humaine dans le sous-bassin versant	35
IV.1.2.- Qualité physico-chimique des eaux dans le sous-bassin versant	37
IV.1.2.1.- Qualité physico-chimique des échantillons d'eau de source	37
IV.1.2.2.- Qualité physico-chimique de l'eau de la rivière Ravine Diable	38
IV.1.2.3.- Qualité physico-chimique des échantillons d'eau de citerne	39
IV.1.2.4.- Qualité physico-chimique de l'échantillon témoin	40
IV.1.2.5.- Variabilité des paramètres physico-chimiques des eaux dans le sous-bassin versant	41
IV.1.2.6.- Comparaison des paramètres physico-chimiques pour les points d'eau étudiés ..	42
IV.1.3.- Qualité microbiologique	45
IV.1.3.1. Qualité microbiologiques des points d'eau analysés.....	45
IV.1.3.2.-Comparaison des paramètres microbiologiques pour les points d'eau étudiés.....	46
IV.1.4.-Sources éventuelles de contamination des eaux	47
IV.1.4.1.- Faible taux de couverture en assainissement de base	47
IV.1.4.2.- Absence de protection des sources.....	48
IV.1.4.3.-Excréments de bétail et agriculture	48
IV.1.4.4.-Non différenciation de l'aire de prélèvement pour la consommation humaine de celle d'abreuvement des animaux.....	48
IV.1.4.5.- État des citernes, dalots et toitures des maisons.....	48
IV.2.- Discussion.....	49
IV.2.1.- Ressources en eau destinées à la consommation humaine.....	49
IV.2.2.- Qualité des eaux destinées à la consommation humaine	50

IV.2.2.1.- Paramètres organoleptiques	50
IV.2.2.2.- Paramètres physico-chimiques liés à la structure naturelle de l'eau et aux eaux adoucies	50
IV.2.2.3.- Paramètres indésirables.....	51
IV.2.2.4.- Paramètre toxique	52
IV.2.2.5.- Paramètres microbiologiques	53
CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....	56
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	xv
ANNEXES	xxi
Annexe 1. Fiche d'inventaire et d'identification des facteurs de risque	xxii
Annexe 2. Fiche de renseignements	xxiii
Annexe 3. Matrice des données des résultats des analyses microbiologiques	xxiii
Annexe 4. Matrice des données des résultats des analyses physico-chimiques.....	xxiv
Annexe 5. Vue des 3 sources d'eau échantillonnées.....	xxv

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Approvisionnement en eau (en pourcentage) en Haïti par milieu de résidence.....	8
Tableau 2. Concentration maximale admissible dans l'eau destinée à la consommation humaine	18
Tableau 3. Quelques agents pathogènes excrétés dans les fèces, maladies et symptômes associés	19
Tableau 4. Les principales infections humaines transmises par l'eau	24
Tableau 5. Normes microbiologiques relatives aux paramètres étudiés.....	24
Tableau 6. Caractéristiques des points d'eau définissant le plan d'échantillonnage.	30
Tableau 7. Limite de quantification et de détection de certains paramètres physico-chimiques..	34
Tableau 8. Les points d'eau inventoriés dans le sous-bassin.....	35
Tableau 9. Concentrations en substances chimiques dans les échantillons d'eau de source	37
Tableau 10. Concentrations en substances chimiques dans l'échantillon d'eau de rivière	38
Tableau 11. Concentrations en substances chimiques dans les échantillons d'eau de citerne	39
Tableau 12. Concentration en substances chimiques dans l'échantillons d'eau témoin.....	40
Tableau 13. Variation de la concentration en substances chimiques dans les échantillons d'eau	41
Tableau 14. Concentrations des germes de bactéries isolées dans les échantillons d'eau analysés	45

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Évolution de la couverture en eau potable en Haïti	7
Figure 2. Évolution de la couverture en assainissement de base en Haïti.....	8
Figure 3. Évolution de la couverture en eau potable et en assainissement en Haïti (1990 à 2008)	9
Figure 4. Localisation géographique du sous-bassin versant Ravine Diable.....	25
Figure 5. Pluviométrie mensuelle moyenne de 1998 à 2012 dans le sous-bassin versant.....	26
Figure 6. Réseau hydrographique du sous-bassin versant Ravine Diable	27
Figure 7. Graphique en 3D des paramètres température, pH et conductivité électrique des échantillons d'eau retenus pour les analyses.	31
Figure 8. Distribution spatiale des points d'eau échantillonnés	32
Figure 9. Répartition spatiale des points d'eau inventoriés dans le sous-bassin de Ravine Diable	36
Figure 10. Histogramme de variation des paramètres étudiés dans les différents échantillons d'eau	42
Figure 11. Représentation de la classification hydrochimique des échantillons d'eau.....	44
Figure 12. Dénombrement de germes de bactérie dans les échantillons d'eau analysés	46
Figure 13. Occurrence des latrines par localité dans les ménages enquêtés	47
Figure 14. Vue de l'état d'une citerne et de la toiture de l'habitat.	49
Figure 15. Vue de la citerne Berné	54

SIGLES ET ABRÉVIATIONS

THM : Trihalomethanes

PED : Pays en developpement

RMPP : Région Metropolitaine de Port-au-Prince

OPS : Organisation Panamericaine de la Santé

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

UNICEF : United Nations International Children's Emergency Fund

CAMEP : Centrale Autonome Metropolitaine d'Eau Potable

CE : Communauté Européenne

DINEPA : Direction Nationale de l'Eau Potable et de l'Assainissement

pH : Potentiel hydrogène

TDS: Sels Totaux Dissous

NTU: Nephelometric Turbidity Unit

ADN : Acide Deoxyribonucléique

ICP/MS: Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry

INERIS : Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques

PVG : Pas de Valeur Guide

APC : Acceptable Pour Consommateur

ISO : Organisation Internationale de standardisation

ORL : Otorhinolaryngoly

CFU : Colony Forming Unit

GPS : Global Positioning System

RD : Ravine Diabie

LP: Lapaix

K-J: K-Jozon

IRPU: Importance Relative des Populations Utilisatrices

CASEC : Conseil d'Administration de la Section Communale

ASEC : Assemblée de la Section Communale

3D : 3 dimensions

SD : Standard Deviation

T° : Température

U Pt/Co : Unité Platine- Cobalt

UE : Union Européenne

WHO : World Health Organization

INTRODUCTION GÉNÉRALE

1.- Contexte de l'étude

L'eau douce est un aliment indispensable à la vie (homme, animaux, plantes) (Kahoul et Touhami, 2014). Elle est une ressource stratégique et fondamentale à l'existence de l'être humain (Odoulami, 2009). Entant que telle, elle mérite une attention toute particulière vu qu'elle peut être l'objet de sérieuse menace à cause des activités de l'homme. Selon Emmanuel *et al.* (2004), toutes activités humaines faisant appel à la mobilisation des ressources de la nature entraînent la production de déchets (solides et liquides) et des effluents gazeux capables d'y provoquer un transfert de polluants. Ces sources de pollution peuvent être à l'origine d'une détérioration grandissante de la qualité des ressources en eau quand la protection du milieu récepteur n'est pas garantie (Fifi, 2010 ; Wanélus, 2016). Les risques de propagation des maladies d'origine hydrique telles que le choléra, les hépatites, la dysenterie, et toutes autres maladies dont les vecteurs sont des moustiques deviennent plus importants (Brangeon, 2015).

La détérioration de la qualité des ressources en eau devient donc une préoccupation à l'échelle mondiale (Kouam Kenmogne, 2013). Plus d'un milliard d'êtres humains se trouvent dans l'obligation de se contenter d'une eau non potable et donc vivre avec des parasites dans le corps qui leur apporteront des maladies (Gaspard, 2002). Dans les continents africain, asiatique et latino-américain, 57% des personnes en moyenne n'ont pas accès à l'eau potable (Vermande, 2002). Selon le même auteur, 65 % de la population haïtienne n'a pas accès à l'eau potable soit à cause de sa cherté ou tout simplement parce que leur habitation n'est pas desservie. Alors que d'après Wari (2012), l'assainissement et l'accès à l'eau potable sont des éléments incontournables pour l'amélioration des conditions de vie et de la santé de l'homme à travers le monde entier.

Emmanuel et Lindskog (2002), précisent qu'en Haïti le traitement par chloration est le seul appliqué à l'eau brute consommée par la population. Or, le chlore et les autres halogènes (à l'exception du fluor) peuvent réagir avec les substances organiques présentes dans l'eau brute, particulièrement les eaux ayant une forte concentration en coliformes fécaux, pour former des trihalométhanes (THM), substances à effets cancérigènes et à mutation génique, poursuivent les mêmes auteurs.

Bref, si dans les pays occidentaux, la disponibilité de l'eau potable ne pose pratiquement aucun problème, elle constitue dans la majorité des pays en développement (PED) un problème majeur qui handicape le développement socio-culturel (Chouti, 2007). Ce problème est posé avec

beaucoup plus d'acuité en milieu rural qu'en milieu urbain. Car, en milieu rural, les eaux consommées sont le plus souvent celles des sources ou des rivières soit à l'état brut, c'est-à-dire, sans aucun traitement préalable, soit suite à une simple chloration (Magny, 1991 ; Saade, 2005). Tel est le contexte dans lequel cette étude sur la qualité de l'eau va être réalisée dans le sous-bassin versant de Ravine Diable.

2.- Problématique et objectifs

En Haïti, la problématique de l'eau revêt un caractère assez particulier dans un contexte socio-économique caractérisé par une explosion démographique, la pauvreté, la malnutrition et le faible niveau d'éducation de la population (Emmanuel et Lindskog, 2002). Un (1) logement sur cinq (5) a accès à un fournisseur d'eau, mais avec des différenciations importantes en fonction du type de logement, du milieu de résidence et du niveau de revenu (Saade, 2005). Cette situation a conduit, selon Vermande (2002), à la création d'esclaves de l'eau, qui sont des femmes et des enfants astreints à consacrer plusieurs heures par jour en vue de s'approvisionner en quelques litres d'eau dans les sources ou les rivières pour la survie de la famille.

Plusieurs études sont déjà réalisées sur la qualité de l'eau de boisson en Haïti et les risques sanitaires qui lui sont liés, surtout dans la région métropolitaine de Port-au-Prince (RMPP) ou dans d'autres villes de province. Brasseur et al (2001), Emmanuel *et* Lindskog (2002), Angerville et al. (2004), Bras et al. (2007), Balthazard-Accou (2011), ont tous révélé que des concentrations importantes en substances physico-chimiques ainsi que des germes de micro-organismes pathogènes sont retrouvés dans l'eau destinée à la consommation humaine.

Les sources de contamination identifiées sont liées principalement à la mauvaise gestion des effluents urbains, des excréta humains et des fèces d'animaux. D'ailleurs plusieurs études dont celles menées par Emmanuel et Lindskog (2002), OPS/OMS (2003), Saade (2005) et la Direction Nationale de l'Eau Potable et de l'Assainissement (2012), ont montré des taux très critiques en termes de couverture en assainissement de base en Haïti. Wanélus (2016) a montré qu'en amont des sources de pollution, les points d'eau exploités pour la RMPP ne présentent pas de défaut physico-chimique mis à part le calcium.

Cependant, dans les zones reculées comme le sous-bassin versant de Ravine Diable, il existe une carence voire une absence complète d'informations qualitatives sur les eaux exploitées pour la consommation humaine. Face à cette situation, nous nous demandons : quelle est la qualité de l'eau consommée par la population de ce sous-bassin versant ? Quel niveau de risque de contamination est lié à la consommation de l'eau disponible pour la santé humaine ? Ainsi, pour faciliter la compréhension de la situation en termes de la qualité de l'eau à l'échelle de ce sous-bassin versant et répondre à ces questions, cette étude s'attache à réaliser une évaluation des paramètres physico-chimiques et microbiologiques de l'eau consommée par la population.

De façon beaucoup plus spécifique, le présent travail se fixe les quatre (4) objectifs suivants :

- 1- Inventorier les ressources en eau utilisées pour la consommation humaine dans le sous-bassin versant de Ravine Diable ;
- 2- Déterminer la qualité physico-chimique et microbiologique de ces points d'eau ;
- 3- Comparer les paramètres physico-chimiques et microbiologiques mesurés pour les différents points d'eau étudiés ;
- 4- Identifier les éventuelles sources de contamination des eaux destinées à la consommation humaine.

3.- Hypothèse de recherche

Cette étude a été articulée autour de l'hypothèse suivante :

Les points d'eau exploités par la population du sous-bassin versant de Ravine Diable pourraient être contaminés par des substances chimiques et par des germes de micro-organismes qui les rendent non conformes à la consommation humaine.

4.- Limites de l'étude

Analyser une eau pour tous les paramètres connus est un procédé compliqué et coûteux. En effet, la présente étude s'est limitée à la détermination du pH, de la température, de la couleur, de l'odeur, de la conductivité électrique, du calcium, du magnésium, du manganèse, du fer, des ions chlorures, des ions fluorures, du sodium, de l'aluminium, du cuivre, du zinc, de l'arsenic, des nitrites et nitrates, des sulfates, des carbonates et bicarbonates, de la dureté et de l'alcalinité de l'eau. Au plan microbiologique, elle s'est limitée à rechercher les coliformes fécaux, les coliformes totaux, l'*Escherichia coli* et la numération des germes.

Elle ne s'est pas intéressée aux autres éléments-traces métalliques (plomb, Cadmium, nickel, etc.) ni aux pesticides non pas parce qu'ils ne sont pas importants mais pour des contraintes de temps et de moyens. À cause de ces contraintes, nous n'avons pas pu non plus répéter dans le temps les prélèvements et les analyses.

5. Architecture du travail

Le présent Travail de Fin d'Études est structuré en quatre chapitres. Le premier chapitre consiste à faire une synthèse bibliographique. Dans un premier temps, il aborde la définition adoptée pour l'eau destinée à la consommation humaine, son importance pour la santé publique, l'accès et l'approvisionnement en eau et au service d'assainissement de base en Haïti. Dans un second temps, il aborde les principaux paramètres de contrôle de qualité de l'eau qui sont considérés dans le cadre de ce travail ainsi que les normes y afférentes.

Le deuxième chapitre est consacré à une présentation succincte du cadre physique de l'étude en termes de localisation géographique, du climat, de la pédologie, du réseau hydrographique, de la population et des activités économiques.

Le troisième chapitre s'attache à présenter les matériels et méthodes qui ont été utilisés pour conduire cette étude.

Le quatrième chapitre sert à présenter et discuter les résultats obtenus.

Enfin, une conclusion met en exergue les principaux résultats obtenus et les perspectives des travaux ultérieurs.

CHAPITRE I- SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

Ce chapitre consiste à faire une revue synthétique de la littérature en rapport à la qualité de l'eau destinée à la consommation humaine, son importance pour la santé publique, l'accès et l'approvisionnement en eau en Haïti ainsi que les principaux paramètres en lien à la qualité de l'eau qui sont considérés dans le cadre de cette étude.

I.1.- Eaux destinées à la consommation humaine

La Directive 98/83/CE du Conseil du 3 novembre 1998 de l'Union Européenne définit, dans son article 2, les eaux destinées à la consommation humaine comme « a) *toutes les eaux, soit en l'état, soit après traitement, destinées à la boisson, à la cuisson, à la préparation d'aliments, ou à d'autres usages domestiques, quelle que soit leur origine et qu'elles soient fournies par un réseau de distribution, à partir d'un camion-citerne ou d'un bateau-citerne, en bouteilles ou en conteneurs ; b) toutes les eaux utilisées dans les entreprises alimentaires pour la fabrication, la transformation, la conservation ou la commercialisation de produits ou de substances destinés à la consommation humaine, à moins que les autorités nationales compétentes n'aient établi que la qualité des eaux ne peut affecter la salubrité de la denrée alimentaire finale* ».

Ainsi, qu'elle soit distribuée au robinet, en bouteille, par camion ou prélevée directement dans la nature, l'eau destinée à la consommation humaine est un aliment et doit, à ce titre, d'une part, posséder des qualités organoleptiques propres à satisfaire le consommateur, et d'autre part, ne pas porter atteinte à sa santé.

I.2.- Importance de l'eau pour la santé publique

L'eau est une commodité première sans laquelle aucune vie n'est possible. Elle est indispensable à la vie de l'homme, des plantes et des animaux. Elle est un important facteur de progrès qui conditionne l'évolution des communautés quand l'approvisionnement est adéquat pour permettre aux habitants de vivre sainement et confortablement (Lanoix et Roy, 1976). Ce nutriment indispensable est le principal composant du corps humain puisqu'il représente environ les 2/3 du poids corporel. Pour un adulte de 80 kg, son corps renferme 50 à 60 litres d'eau. L'eau permet tous les échanges nutritifs à l'intérieur des cellules et aussi entre les cellules présentes dans nos différents organes ; même les influx nerveux ont besoin d'un milieu aqueux pour que les échanges d'ions et de particules électriques puissent avoir lieu (Vermande, 2002). Comme pour le climat

terrestre, l'eau contrôle notre température interne. Nous faisons tous partie intégrante du cycle global de l'eau qui nous lie, à travers le sang, le liquide rachidien et le liquide amniotique. Notre vie est dépendante des fonctions biologiques assumées par l'eau. Celle-ci assure la dissolution et le transport des aliments et des carburants (énergie) à travers notre organisme et nos voies métaboliques. Elle purifie nos cellules, les débarrasse des déchets et remplit tout notre système vital du liquide rachidien au liquide amniotique. En l'état des connaissances, l'eau liquide est la seule capable de dissoudre les nutriments pour les amener aux cellules et débarrasse celles-ci des métabolites et des impuretés (Bouguerra, 2003). Ce rôle crucial ne peut se concevoir sans la notion de salubrité. Si la fourniture de l'eau doit se faire en quantités suffisantes, il est également nécessaire que cette eau soit saine et pure, car elle est connue comme le véhicule le plus commun et le plus important de la transmission des maladies (Lanoix et Roy, 1976). À ce titre, l'eau est une préoccupation majeure de l'hygiène publique.

I.3.-Accès et approvisionnement en eau potable en Haïti

Droit humain élémentaire et composante-clé des politiques efficaces de protection sanitaire, l'accès à l'eau potable reste et demeure une condition indispensable à la santé. L'OMS/UNICEF (2000) l'a défini comme « *la possibilité de disposer, par personne et par jour, d'au moins 20 litres d'eau provenant d'une source située à moins d'un kilomètre du lieu de résidence de l'utilisateur* ». Falkenmark et Widstrand (1992), analysant de leurs côtés la dimension quantitative de l'approvisionnement en eau potable, estiment que les besoins domestiques minimaux pour mener une vie saine doivent être de 100 litres environ par jour et par personne, soit 36.5 m³ d'eau/an. Alors que selon Emmanuel et Lindskog (2004), la production d'eau par La Centrale Autonome Métropolitaine d'Eau Potable (CAMEP) appelée aujourd'hui Direction Nationale de l'Eau Potable et de l'Assainissement (DINEPA) est estimée à 20 m³ d'eau par habitant et par an, ce qui est nettement inférieur à la dotation minimale de 36.5m³/habitant/an.

Par ailleurs, d'après de nombreuses études menées sur la qualité de l'eau distribuée en Haïti (Tractebel, 1998 ; Emmanuel et Lindskog, 2002 ; Angerville et *al.*, 2004 ; Bras et *al.*, 2007 ; Balthazard-Accou, 2011), plusieurs cas de contamination par des substances chimiques (fluor, plomb, etc.) et par des germes de micro-organismes (coliformes, oocystes de *Cryptosporidium*) ont été décelés.

Au regard de ces données, force est de constater que le stress en rapport à l'eau potable en Haïti est posé tant sur le plan quantitatif que qualitatif. Saade (2005) avance qu'Haïti est le seul pays de la région Amérique Latine-Caraïbes où le taux de couverture d'eau de la population est d'environ 50% (figure 1).

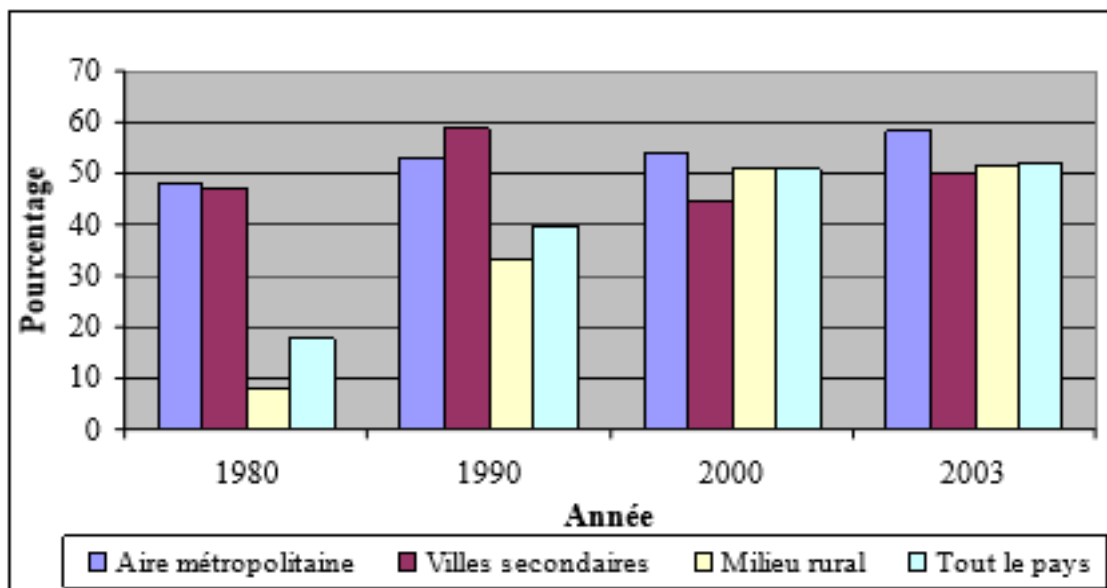


Figure 1. Évolution de la couverture en eau potable en Haïti (Source : Saade, 2005)

Saade (2005) montre que du point de vue de l'approvisionnement en eau de boisson ou pour tout autre usage domestique, trois (3) grands modes principaux existent : les sources ou rivières à hauteur de 34.7%, les fontaines publiques (20.5%) et l'achat de seaux d'eau (19.0 %). La première forme d'approvisionnement est particulièrement courante en milieu rural alors que la dernière est surtout rencontrée dans la région métropolitaine de Port-au-Prince (tableau 1). Selon l'OMS (2004), l'approvisionnement en eau des consommateurs par les vendeurs d'eau pose un certain nombre de problèmes sanitaires, notamment l'accès à des volumes suffisants, et suscite de préoccupations quant à l'inadéquation du traitement subi par l'eau et des récipients utilisés pour la transporter comportant un risque de contamination.

Tableau 1. Approvisionnement en eau (en pourcentage) en Haïti par milieu de résidence

Mode d'approvisionnement	Milieu de résidence			Ensemble
	Aire métropolitaine	Autre urbain	Milieu rural	
Robinet dans le logement	5.8	2.1	0.5	2.0
Robinet dans la cour	9.5	8.1	2.7	5.2
Puits dans la cour	1.3	2.8	1.8	1.9
Puits dans le voisinage	4.1	13.8	11.2	10.0
Fontaine publique	7.8	29.4	22.8	20.5
Achat de camions d'eau	0.7	0.1	0.0	0.2
Achat de seaux d'eau	59.7	11.9	5.3	19.0
Achat d'eau traitée	9.9	2.2	0.4	2.9
Récupération d'eau de pluie	0.6	0.1	3.1	2.0
Source ou rivière	0.1	27.1	50.2	34.7
Autre	0.5	2.3	1.7	1.6
Total	100	100	100	100
Échantillon	1 002	1 451	4 641	7 184

Source : Saade, 2005

I.4.- Accès à l'assainissement de base en Haïti

En Haïti, l'accès au service d'assainissement de base est dans une situation critique. En milieu urbain comme en milieu rural, le taux d'accès reste encore faible. Emmanuel et Lindskog (2002), ont montré que le milieu rural a le score le plus faible en termes de taux de couverture à l'assainissement de base, soit 16% de la population. En 2003, OPS/OMS a évalué à 28% le taux de couverture des besoins en évacuation des eaux usées et des excréta humains. Comme illustre la figure 2, Saade (2005) a montré pratiquement la même tendance à ce sujet.

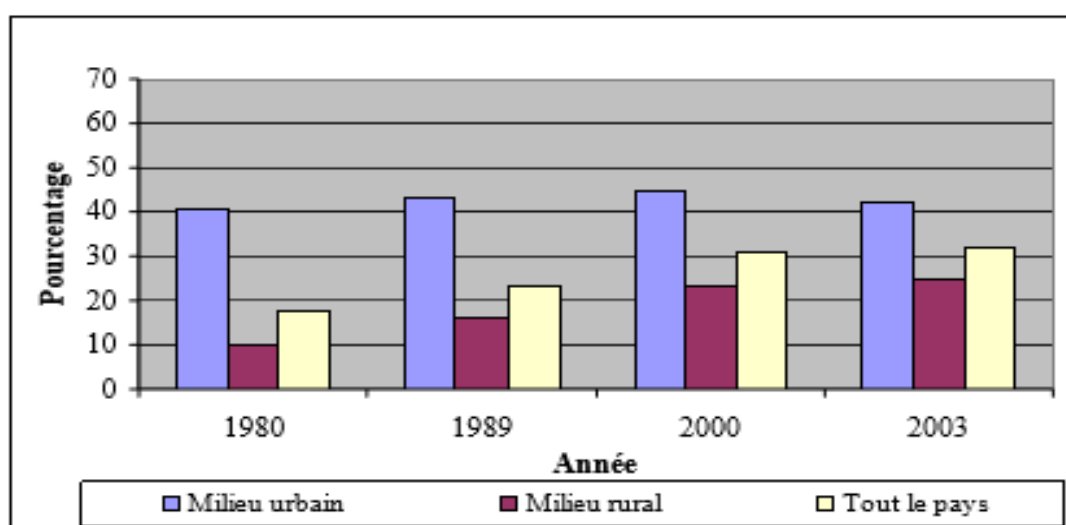


Figure 2. Évolution de la couverture en assainissement de base en Haïti (Source : Saade, 2005)

Sans prise en compte du milieu de résidence, la figure 3 suivante montre l'évolution de la couverture en eau potable et en assainissement en Haïti de 1990 à 2008.

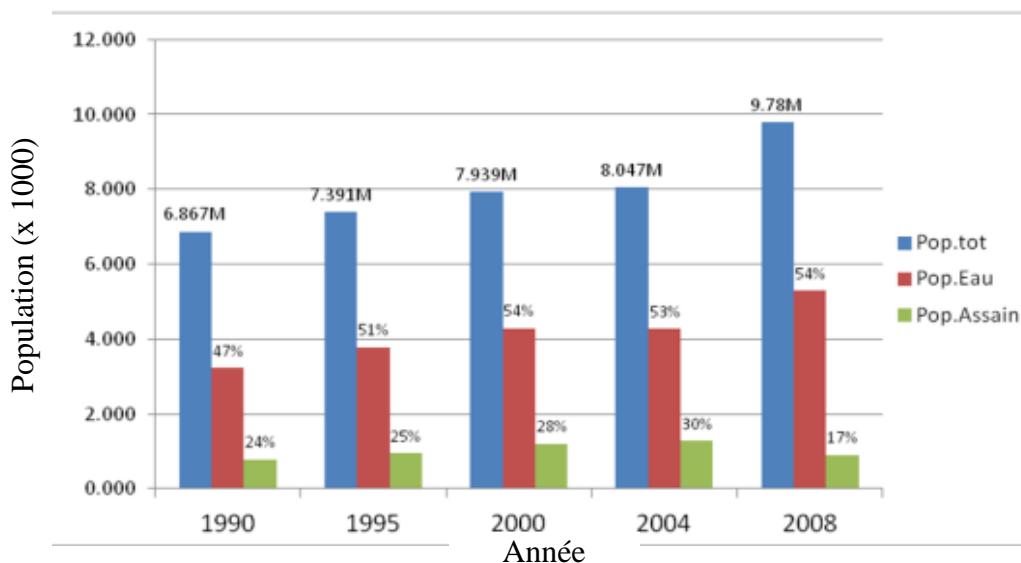


Figure 3. Évolution de la couverture en eau potable et en assainissement en Haïti (1990 à 2008)

Source : DINEPA, 2012.

I.5.-Paramètres de contrôle de qualité de l'eau

En rapport au contrôle de la qualité de l'eau, sept (7) groupes de paramètres ont été déterminés : paramètres organoleptiques, paramètres physico-chimiques liés à la structure naturelle de l'eau, paramètres indésirables, paramètres concernant les eaux adoucies, paramètres toxiques, paramètres concernant les pesticides et les produits apparentés et paramètres microbiologiques (Edmond, 2000). Seulement les paramètres qui sont considérés dans le cadre de ce travail sont présentés dans ce document.

I.5.1.-Paramètres organoleptiques

I.5.1.1.-La couleur

La couleur d'une eau est fonction des substances qui y sont présentes (WHO,2011). Quand sa coloration est due seulement à la présence de substances dissoutes, c'est-à-dire des substances qui peuvent passer au travers d'un filtre de faible porosité (0.45 μm), la couleur est dite vraie. Si par contre, d'autres substances sont en suspension dans l'eau, elles vont lui donner une couleur apparente à cause de leur propre coloration (Rodier et al., 2009). Quand la teneur en ces substances

est faible, les couleurs apparente et vraie sont relativement la même dans une eau claire. La lixiviation et les débris organiques sont les principales sources de couleur dans l'eau (Hem, 1985).

I.5.1.2.-L'odeur

Signe de pollution ou de présence de matières organiques en décomposition (WHO, 2011), l'odeur est un paramètre important qui permet de porter un jugement bref sur la qualité de l'eau. Elle est définie, selon Rodier et al (2009), comme l'ensemble des sensations perçues par le nez en aspirant certaines substances volatiles. Dans l'eau destinée à la consommation humaine, aucune odeur ne doit être perçue.

I.5.2.-Paramètres physico-chimiques liés à la structure naturelle de l'eau et les eaux adoucies

I.5.2.1.-Le pH

Le potentiel hydrogène, noté pH, mesure l'activité chimique des ions hydrogènes en solution. En général, il est sans effet direct sur les consommateurs (WHO,2011). Cependant, il fait partie des paramètres essentiels de contrôle de la qualité de l'eau. Car, il conditionne un large éventail d'équilibres physico-chimiques entre les gaz dissous (CO₂), les ions carbonates et bicarbonates (Belghiti et al 2013, Akil et al., 2014). Le pH des eaux naturelles est principalement imposé par les équilibres des acides carboniques (Rodier et al.,2009). Il est aussi influencé par la nature du substratum sol, la géologie et l'origine des eaux (Belghiti et al 2013).

I.5.2.2.-La conductivité électrique

D'après Rodier et al. (2009), la conductivité électrique d'une eau est "*la conductance d'une colonne d'eau comprise entre deux électrodes métalliques de 1 cm² de surface et séparées l'une de l'autre de 1 cm*". Largement fonction de la température, sa mesure permet d'apprécier le niveau de minéralisation d'une eau (Belghiti et al., 2013, Rodier et al., 2009). L'OMS (2000) fixe à 1200 µs/cm comme limite de référence de la conductivité électrique mesurée à 25 °C pour un eau potable.

I.5.2.3.-La température

La température d'une eau joue un rôle déterminant dans la modification des propriétés physiques et chimiques de l'eau. Elle influence, en effet, les réactions biologiques qui se produisent dans l'eau (Makhoukh, 2011 ; Akil et al.,2014). Elle a une grande influence sur un certain nombre de

contaminants chimiques et de constituants inorganiques susceptibles d'avoir des effets sur le goût de l'eau. À température élevée, le développement des micro-organismes est favorisé et les problèmes de goût, de couleur et d'odeur peuvent augmenter (WHO,2011).

I.5.2.4.-Le sodium

Constamment présent dans l'eau et les aliments, le sodium est un élément essentiel qui peut provenir naturellement de la décomposition des sels minéraux comme les silicates de sodium et d'aluminium ou des formations géologiques contenant du chlorure de sodium, de l'intrusion d'eau salée dans les aquifères et des retombées en provenance de la mer (Belghiti et *al.*, 2013). Certains adoucisseurs d'eau et des usages industriels peuvent contribuer à augmenter la teneur en sodium dans l'eau (WHO, 2011). Généralement, dans l'eau potable, la teneur en sodium ne dépasse pas 20 mg/l mais dans certains pays des concentrations nettement supérieures peuvent être constatées (WHO, 2011) et augmentent ainsi le risque de développement des maladies très graves chez les personnes qui souffrent d'hypertension artérielle, d'accidents vasculaires cérébraux, d'infarctus du myocarde, d'insuffisance cardiaque, d'insuffisance rénale, etc. (Meneton, 2001).

I.5.2.5.-Les sels totaux dissous

La détermination des sels totaux dissous (TDS) dans une eau potable n'a pas de base fondée sur la santé. Leur présence dans l'eau favorise la corrosion et l'incrustation. À teneur élevée, ils sont répréhensibles pour les consommateurs car ils entraînent un goût désagréable à l'eau. Se référant à ce paramètre, une eau est réputée bonne quand sa teneur en TDS est inférieure à 600mg/l (WHO, 2011).

I.5.2.6.-L'alcalinité

Selon Rodier *et al.* (2009), l'alcalinité de l'eau appelée aussi titre alcalimétrique est liée à son contenu en caractère alcalin, c'est-à-dire à la présence de bases et de sels d'acides faibles. Dans les eaux naturelles, elle est due la plupart du temps à la présence d'hydrogénocarbonates ou bicarbonates (HCO_3^-) et de carbonates (CO_3^{2-}). À ce constat général, le risque de se tromper est faible et peut être dû un à pH élevé ($\text{pH} > 9.5$) ou à la présence d'une substance chimique inhabituelle dans l'eau. Le gaz carbonique (CO_2) présent dans le sol ou dans l'atmosphère est la principale source d'alcalinité dans les eaux souterraines ou les eaux de surface (Hem, 1985).

I.5.2.7.-Le calcium

Le calcium est le plus abondant des métaux alcalino-terreux (Hem, 1985). Il existe sous un seul état d'oxydation, le Ca^{2+} . Il est essentiel à la vie des plantes et des animaux. Dans la nature, il est essentiellement rencontré dans les roches ignées, spécifiquement dans les pyroxènes, les amphiboles et les feldspaths. Par contre, les carbonates représentent les formes les plus courantes du calcium dans les roches sédimentaires (Hem, 1985). Associé au magnésium, il provoque la dureté de l'eau. Au-delà d'une certaine concentration, le calcium provoque aussi un problème de goût à l'eau. Selon l'anion associé, le seuil de goût pour l'ion calcium se situe entre 100 et 300 mg/l (WHO,2011).

I.5.2.8.-Le magnésium

Le magnésium est un métal alcalino-terreux essentiel à la nutrition des plantes et des animaux. Il est surtout dominant dans les minéraux ferromagnésiens incluant spécialement les pyroxènes, les amphiboles et les micas (Hem, 1985). Dans certains aspects de la chimie de l'eau, le magnésium et le calcium sont considérés comme ayant des effets similaires en contribuant à sa dureté en dépit de leur comportement géochimique différent. Élément à effets bénéfiques pour l'organisme, le déficit en magnésium se traduit par des manifestations cardiaques et des troubles neuromusculaires (Wanélus, 2016).

I.5.2.9.-La turbidité

La turbidité est un paramètre efficace de contrôle de qualité de l'eau. Elle est causée par des particules présentes dans l'eau et agit sur l'efficacité des processus de traitement et de désinfection. Elle n'a pas une signification sanitaire mais elle doit être maintenue à un niveau faible pour être acceptable par les consommateurs. La valeur médiane de la turbidité idéale devrait être inférieure à 0.1 NTU (WHO,2011).

I.5.2.10.-La dureté de l'eau

La dureté de l'eau est en général un indicateur de la minéralisation. Elle est surtout due au calcium et au magnésium et se traduit par des précipitations de l'écume du savon ou son utilisation excessive lors des activités de nettoyage (Rodier et al. 2009 ; WHO, 2011). Son acceptabilité dans l'eau peut varier de façon significative d'une communauté à une autre en fonction des conditions locales. Il n'y a pas de valeur indicative fondée sur la santé pour la dureté dans l'eau potable mais

certaines consommateurs peuvent tolérer une dureté d'environ 500mg/litre (WHO, 2011). En Wallonie, en dépit de l'inexistence d'une valeur paramétrique, le Code de l'eau limite à 15 degrés français, soit 150 mg/litre de CaCO_3 , la dureté minimale d'une eau adoucie artificiellement (Prevedello, 2006).

I.5.2.11.-Les sulfates

Principalement commercialisés dans l'industrie chimique, les sulfates se trouvent naturellement dans de nombreux minéraux notamment le gypse (CaSO_4) mais peuvent également provenir de l'oxydation de sulfures comme la pyrite (FeS) et de certaines roches magmatiques (Akil et *al.*, 2014). L'utilisation des engrais chimiques, la lessive et la combustion du charbon et du pétrole entraînant la production d'importante quantité de sulfures qui sont les principales sources anthropiques des sulfates (Barry, 1989). Leur déversement dans l'eau se fait principalement par dépôt atmosphérique et par des effluents industriels. En général, la plus importante concentration en sulfates se rencontre dans les eaux souterraines et provient des sources naturelles. En fonction des conditions locales, l'eau potable ou les aliments sont les principales sources d'apport en sulfates pour l'organisme humain. Quand la concentration en sulfates dans l'eau potable est élevée (>500 mg/l), des effets laxatifs et gastro-intestinaux peuvent se développer au niveau de l'organisme (WHO, 2006 ; WHO, 2011).

I.5.2.12.-L'aluminium

Troisième élément en termes d'importance dans la croûte terrestre, l'aluminium se rencontre rarement en solution dans les eaux naturelles à une concentration plus élevée que quelques dizaines ou centaine de milligramme par litre. De nombreux minéraux silicatés dont les feldspaths, les feldspathoïdes, les micas et beaucoup d'amphiboles sont d'importantes sources d'aluminium (Hem, 1985). Dans l'eau potable, les sels d'aluminium utilisés comme coagulants dans le traitement de l'eau et l'aluminium naturel sont les sources les plus courantes qui peuvent contribuer à augmenter la teneur en aluminium (WHO, 2011). L'aluminium est un métal neurotoxique qui, à concentration élevée, peut avoir des effets néfastes sur la santé humaine. Dans l'eau de boisson, une teneur en aluminium supérieure à 100 mg/l pourrait entraîner un risque accru du développement de la maladie d'Alzheimer (Dartigues et *al.*, 2002).

I.5.2.13.-Les chlorures

Parmi les halogènes, le chlore est l'élément le plus abondant. Élément volatil, le chlore peut se rencontrer sous diverses formes d'oxydation allant du Cl^- au Cl^7 . Dans l'eau exposée à l'atmosphère, il est surtout rencontré sur la forme des ions chlorures (Hem, 1985). À forte concentration, les chlorures donnent un goût salé à l'eau. En fonction du cation associé (Na^+ , K^+ , Ca^{2+}), le seuil de détection du goût diffère et se situe ordinairement entre 200 et 300 mg/l. Toutefois, dans l'eau potable, il n'y a pas d'indication fondée sur la santé quant à la teneur en ions chlorures (WHO, 2011).

I.5.3.-Paramètres concernant les substances indésirables

I.5.3.1.-Les nitrates et nitrites

À cause de leur instabilité et de leur très grande hydrosolubilité dans l'environnement, la contamination des sources d'eau et des nappes souterraines par les nitrates devient beaucoup plus préoccupante. L'utilisation soutenue des fertilisants chimiques ou organiques dans la production agricole, les fosses septiques, les fumiers d'animaux et les effluents (municipaux et industriels) sont les principales sources de contamination de l'eau par les nitrates (Levallois et Phaneuf, 1992 ; WHO, 2011 ; Akil et *al.*, 2014). Sous l'action oxydatrice des micro-organismes, les nitrates (NO_3^-) sont formés naturellement à partir de l'ion ammonium (NH_4^+). Quant aux nitrites (NO_2^-), ils sont formés par dégradation de la matière azotée mais sont rapidement transformés en nitrates dans les sources d'eau potable (Levallois et Phaneuf, 1992).

L'organisme humain absorbe facilement les nitrates ingérés et les excrète rapidement par l'urine et la salive. Sous l'action bactérienne, les nitrates se biotransforment en nitrites au niveau de la bouche et de l'estomac pour s'impliquer dans le phénomène de méthémoglobinémie, principale conséquence connue de l'ingestion des nitrates (Santé et Bien-Etre Social du Canada, 1992). La méthémoglobinémie est le résultat de l'oxydation du fer de l'hémoglobine. Sous cette forme, cette protéine (hémoglobine) ne pourra fixer l'oxygène nécessaire aux cellules et provoque en conséquence des troubles d'oxygénation (Gaudreau et Mercier, 1998). Les femmes enceintes, les nourrissons de moins de trois (3) mois et les personnes déficientes génétiquement en enzymes impliquées dans la réaction réversible méthémoglobine/oxyhémoglobine sont plus susceptibles à la formation de méthémoglobine. La susceptibilité aux effets des nitrates de la femme enceinte est

particulièrement plus importante vers le septième mois de grossesse, où son taux de méthémoglobine peut atteindre 10% (Gaudreau et Mercier, 1998).

Dans l'eau potable, la méthémoglobinémie n'est pas le seul risque associé à la présence des nitrates. Des risques potentiels de cancérogénécité (cancer gastrique et de la prostate) et de tératogénécité sont aussi associés à l'ingestion des nitrates/nitrites via la formation de nitrosamines et de nitrosamides désignés sous le nom de composés N-nitroso, bien qu'ils ne soient pas cancérigènes en eux-mêmes. Une concentration élevée en nitrates dans l'eau potable entraîne aussi un risque génotoxique et de lymphomes non Hodgkinniens élevé (Levallois et Phaneuf, 1992).

I.5.3.2.-Le manganèse

Principalement dominant dans les roches basaltiques (Hem, 1985), le manganèse (Mn) se rencontre un peu partout dans l'environnement dans l'air l'eau et le sol sous plusieurs états d'oxydation (Santé Canada, 2016). Il est l'un des métaux les plus abondants dans la croûte terrestre et s'accompagne généralement du fer. En conditions anaérobies ou à faible oxydation, le manganèse se dissout de façon naturelle dans les eaux souterraines et les eaux de surface (WHO, 2011). Il peut provenir aussi de sources anthropiques telles que l'exploitation minière, les rejets industriels, la lixiviation à partir des sites d'enfouissement (Santé Canada, 2016). Quand il est à faible concentration dans l'eau (0.1 mg/l), il ne présente pas de problème à la santé humaine mais peut provoquer un goût indésirable à l'eau et des taches sanitaires et la lessive (WHO, 2006). Par contre, à forte concentration, le manganèse peut entraîner entre autres des problèmes d'anoéxie, d'apathie, de douleurs musculaires et des troubles neurologiques (OMS, 2000 ; Bouchard et *al.* 2011).

I.5.3.3.-Le fer

Très largement utilisé sous forme d'acier dans le domaine de la construction, le fer est un métal qui est très abondant dans la croûte terrestre, principalement dans les roches ignées comme les amphiboles et les pyroxènes (Hem, 1985). Dans la nutrition humaine, il joue un rôle essentiel. La dotation minimale journalière en fer dans l'organisme varie de 10 à 50 mg en fonction de l'âge, du sexe, de sa biodisponibilité et de l'état physiologique de la personne considérée (WHO, 2011). Les pollutions industrielles et le phénomène de lixiviation des bassins versants sont les principales causes de la présence du fer dans les eaux de surface (Wanélus, 2016). À une concentration de 2

mg/l dans l'eau potable, le fer ne présente aucun danger pour la santé des consommateurs. Au-dessous de ce seuil, le goût et la couleur de l'eau sont généralement affectés (WHO, 2011).

I.5.3.4.-Les fluorures

Treizième (13^e) élément le plus abondant sur la terre, le fluor se combine toujours avec d'autres substances, à l'extérieur d'un environnement contrôlé, pour former des fluorures (WHO, 2011). A faible dose, il est un élément essentiel à l'organisme humain, car il participe à la formation des os et des dents et aussi à la protection contre la carie dentaire, spécialement chez les enfants (Jean-Pierre et *al.*, 2013). Pour avoir les effets protecteurs, la concentration minimale requise dans l'eau de boisson est d'environ 0.5mg/l (Chouhan et Flora, 2010). Sous la forme de fluorure, le fluor fait son entrée dans l'organisme humain à travers les aliments, l'air, l'eau de boisson, les médicaments et les produits de beauté, mais la plus importante source d'apport demeure l'eau de boisson (Emmanuel et *al.*, 2002). Par ailleurs, les engrais chimiques, les déchets industriels et la combustion de charbon sont trois importantes sources anthropiques de fluor. Il est l'une des substances inorganiques les plus toxiques. Il peut affecter le système squelettique, la structure et la fonction du muscle squelettique, les dents, le cerveau et la moelle épinière. La diarrhée, le vomissement, la nausée et les douleurs abdominales en sont les principaux symptômes d'une contamination aiguë. La toxicité chronique au fluor se produit après une ingestion à long terme de petite quantité de fluor et se traduit par une inhibition de la synthèse de l'acide déoxyribonucléique (ADN), des protéines et de la prolifération cellulaire (Chouhan et Flora, 2010).

I.5.3.5.-Le cuivre

Métal stable, le cuivre peut être retrouvé sous plusieurs formes dans l'environnement notamment sur la forme de sulfure. En agriculture, il est utilisé dans la préparation de fongicide et de fertilisants (INERIS, 2005a). Dans un approvisionnement en eau potable, il provient surtout de l'action corrosive du lessivage des tubes cuivrés. Il favorise l'augmentation de la corrosion des installations en fer et en fer galvanisé. Quand sa concentration excède 5mg/litre, il agit sur la coloration de l'eau et lui confère aussi un goût amer (WHO, 2011). Mohod et Dhote (2013) ont avancé que la contamination de l'eau de boisson par une forte concentration en cuivre peut conduire à une anémie chronique, des maladies coronariennes et de fortes pressions sanguines, bien que les maladies coronariennes aient été aussi liées à une carence en cuivre. Emmanuel (2004)

de son côté lie une carence en cuivre dans l'organisme à d'autres pathologies tels que des troubles du métabolisme osseux, du système nerveux et aussi de l'anémie et des lésions cardiaques.

I.5.3.6.-Le zinc

Selon INERIS (2005) le zinc est un élément chimique qui est naturellement présent dans l'environnement. Il est surtout rencontré dans la blende (ZnS). Dans l'eau potable, la concentration en zinc dépasse très rarement 0.1 mg/litre. Quand sa concentration avoisine les 3-5 mg/litre, il confère un goût indésirable à l'eau et peut développer à l'ébullition un film grasse (WHO,2011). À faible concentration, il joue un rôle particulier dans l'organisme (Bertini et *al*, 1994).

I.5.4.-Paramètres toxiques

Le seul paramètre toxique qui a été considéré dans le cadre de travail est l'arsenic. Trente-troisième élément du tableau périodique, l'arsenic existe à l'état métallique sous trois formes allotropiques et plusieurs formes ioniques dans la nature. Il est le vingtième élément le plus abondant dans la croûte terrestre et est connu comme un poison susceptible de provoquer le cancer à l'être humain (Hem, 1985 ; Chouhan et Flora, 2010). Présent dans la nature sous différentes formes organiques ou inorganiques, l'arsenic forme des composés à solubilité assez variable. Sa capacité d'absorption par les sédiments est affectée par le pH, la conductivité électrique et le potentiel d'oxydo-réduction, le taux de fer, de phosphate, de sulfure et la température de l'eau (INERIS, 2010). Il est très utilisé dans l'industrie de la métallurgie et en électronique. Ses dérivés sont aussi utilisés en agriculture dans la fabrication de raticide et dans les activités de tannage. À forte concentration dans l'eau, l'arsenic est un élément toxique qui augmente les risques des effets néfastes sur la santé dont le cancer de la peau, les maladies cardiovasculaires, les maladies pulmonaires, des reins et de la vessie (Flanagan et al., 2016a). Sa présence dans l'eau n'est détectable que par des tests spécifiques, car le consommateur ne peut pas le voir, le sentir ou apprécier son goût (Flanagan et al., 2016b).

I.6.-Normes physico-chimiques de qualité de l'eau

Les normes physico-chimiques de la qualité de l'eau destinée à la consommation humaine ne subissent pas trop de variation les unes par rapport aux autres. Ces cadres normatifs visent à fournir des directives scientifiques en termes de concentration maximale en substance chimique admissible en vue de protéger la santé des personnes des effets néfastes de la contamination des eaux. Dans la littérature, différents cadres existent mais seuls ceux de l'OMS et de l'UE sont

considérés dans le cadre de cette étude parce qu'ils sont utilisés par la Direction Nationale de l'Eau Potable et de l'Assainissement en Haïti pour le contrôle et l'évaluation de la qualité de l'eau potable dans le pays. Pour les paramètres considérés dans ce travail, le tableau 2 présente la concentration maximale admissible selon les normes de l'OMS et de l'UE.

Tableau 2. Concentration maximale admissible dans l'eau destinée à la consommation humaine

Paramètres	Unités	OMS	Directive UE ⁽³⁾
pH	Unité pH	6.5- 8.5 ⁽¹⁾	6.5-9.5
Conductivité à 20 °C	µS/cm	< 1200 ⁽¹⁾	2 500
Température	°C		25
Couleur vraie	U Pt/Co	< 15 ⁽¹⁾	APC**
Odeur	Seuil		APC
Turbidité	NTU	< 1 ⁽¹⁾	0.5
TDS	mg/l	< 600 ⁽¹⁾	PVG
Alcalinité phénolphtaléine	mg/l	PVG*	PVG
Alcalinité totale	mg/l	PVG	PVG
Bicarbonates	mg/l	PVG	PVG
Carbonates	mg/l	PVG	PVG
Calcium	mg/l	PVG	PVG
Dureté calcique	mg/l	PVG	PVG
Dureté magnésienne	mg/l	PVG	PVG
Dureté totale	mg/l	100- 300 ⁽¹⁾	PVG
Salinité	mg/l	PVG	PVG
Sodium	mg/l	< 200 ⁽¹⁾	200
Nitrites	mg/l	< 0.2 ⁽²⁾	0.5
Nitrates	mg/l	<50 ⁽²⁾	50
Sulfates	mg/l	< 250 ⁽¹⁾	250
Fluorure	µg/l	<1500 ⁽¹⁾	1500
Chlorure	mg/l	< 250 ⁽¹⁾	250
Aluminium	mg/l	< 0.2 ⁽¹⁾	0.2
Fer	mg/l	< 0.2 ⁽¹⁾	0.2
Magnésium	mg/l	PVG	
Manganèse	mg/l	<0.1 ⁽¹⁾	0.05
Arsenic	µg/l	10 ⁽²⁾	10
Cuivre	mg/l	< 2 ⁽¹⁾	2
Zinc	mg/l	<3 ⁽¹⁾	PVG

¹ WHO, 2011 ; ² WHO, 2006 ; ³ Directive N°98/83/CE du 03/11/1998 et Arrêté du 11/01/2007; * Pas de Valeur Guide; ** Acceptable Pour Consommateur.

I.7.-Paramètres microbiologiques

I.7.1.-Généralités

Dans la nature, les bactéries se retrouvent dans les tous milieux (eau, air, sol et même dans et sur les êtres vivants). Elles sont des espèces innombrables qui jouent dans la biosphère un rôle géochimique majeur. Elles occupent toutes les niches écologiques et interviennent dans le recyclage des éléments (carbone, oxygène, azote, soufre, etc.), dans la minéralisation de la matière organique (hétérotrophes), dans l'assimilation des éléments minéraux (autotrophes, photosynthèse). Avec l'air et les sols, les eaux font donc partie des éléments qui servent soit de lieu d'hébergement pour les espèces autochtones, soit de canal pour véhiculer les bactéries en transit éliminées par l'homme, les animaux et les plantes (Rodier et al., 2009). Les fèces humaines ou animales sont donc une importante source de pollution à cause de leur charge microbienne (bactéries, virus, protozoaires et d'helminthes pathogènes) (OMS, 2004 ; OMS, 2013). Le tableau 3 illustre quelques-uns avec les maladies et symptômes associés.

Tableau 3. Quelques agents pathogènes excrétés dans les fèces, maladies et symptômes associés

Groupes	Pathogènes	Maladies et symptômes
Bactéries	<i>Aeromonas spp</i>	Entérite
	<i>Campylobacter jejuni/coli</i>	Campylobactériose, diarrhée, crampes, douleurs abdominales, fièvre, nausée, arthrite ; syndrome de Guillain-Barré
	<i>Escherichia coli</i>	Entérite
	<i>Plesiomonas shigelloides</i>	Entérite
	<i>Samonella typhi/paratyphi</i>	Fièvre typhoïde/paratyphoïde, maux de tête, fièvre, malaise, anorexie, bradycardie, splénomégalie, toux
	<i>Salmonella spp</i>	Salmonellose – diarrhée, fièvre, crampes abdominales
	<i>Shigella spp.</i>	Shigellose, dysenterie (diarrhée sanglante), vomissements, crampes, fièvre; syndrome de Reiter
	<i>Vibrio cholerae</i>	Cholera-diarrhée aqueuse, létale dans les cas graves et non traités
	<i>Yersinia spp.</i>	Yersiniose, fièvre, douleur abdominale, diarrhée, douleurs articulaires, rash

Source : Ottosson, 2003 cité par OMS, 2013

Tableau 3. Quelques agents pathogènes excrétés dans les fèces, maladies et symptômes associés (Suite)

Groupes	Pathogènes	Maladies et symptômes
Virus	Adénovirus entérique	Entérite
	Astrovirus	Entérite
	Calicivirus (norovirus)	Entérite
	Coxsackievirus	Affection respiratoire ; entérite ; méningite virale
	Echovirus	Méningite aseptique; encéphalite; souvent asymptomatique
	Entérovirus types 68–71	Méningite ; encéphalite ; paralysie
	Virus de l'hépatite A	Hépatite – fièvre, malaise, anorexie, nausée, gêne abdominale, ictère
	Virus de l'hépatite E	Hépatite
	Poliovirus	Poliomyélite-souvent asymptomatique, fièvre, nausée, vomissement, maux de tête, paralysie
	Rotavirus	Entérite
	<i>Cryptosporidium parvum</i>	Cryptosporidiose – diarrhée aqueuse, crampes et douleurs abdominales
	<i>Cyclospora cayetanensis</i>	Souvent asymptomatique ; diarrhée, douleur abdominale
	<i>Entamoeba histolytica</i>	Amibiase – souvent asymptomatique ; dysenterie, gêne abdominale, fièvre frisson
	<i>Giardia intestinalis</i>	Giardiase-diarrhée, crampes abdominales, malaise, perte de poids
Helminthes	<i>Ascaris lumbricoides</i>	Ascariadiase ; respiration sifflante, toux, fièvre Enterite, eosinophilie pulmonaire
	<i>Taenia solium/saginata</i>	Taeniase
	<i>Trichuris trichiura</i>	Richiuriase–d'asymptomatique (vague détresse du tractus digestif) à l'émaciation avec peau sèche et diarrhée
	<i>Ancylostomaduodenale /Necator americanus</i> (ver à crochets)	Prurit, rash, toux, anémie, déficience protéique
	<i>Schistosoma spp</i> (douve)	Schistosomiase, bilharziose

Source : Ottosson, 2003 cité par OMS, 2013

Festy et *al.* (2003) avancent que le risque hydrique microbien dont l'origine est essentiellement fécale, survient dans des circonstances accidentelles dans les pays développés mais revêt d'un caractère permanent et chronique dans bon nombre de pays en développement, faute d'une gestion très insuffisante des ressources en eau. D'après Emmanuel (2004), les coliformes fécaux, les streptocoques fécaux et les spores des bactéries sulfito-réductrices sont les marqueurs de pollution

fécale des eaux les plus courants. OMS (2013) argue que parmi les bactéries, au moins *Salmonella* et *Escherichia coli* entérohémorragique présentes tant dans les pays industrialisés que dans les pays en développement, constituent une préoccupation générale sous l'angle des risques microbiens liés à l'utilisation de divers produits fertilisants (fèces, boues d'épuration, fumier animal notamment). Leur présence indicatrice de contamination fécale entraîne souvent des troubles sanitaires très graves. Dans les régions où l'accès à un assainissement approprié est inexistant ou insuffisant, la fièvre typhoïde due au *Salmonella typhi* et le choléra (*Vibrio cholerae*) constituent des risques majeurs du fait de la contamination de l'eau de boisson (OMS, 2013). Leur détermination dans l'eau destinée à la consommation humaine est donc très importante car la qualité bactériologique d'une eau n'est pas un paramètre stable, mais au contraire sujet à fluctuation par pollution accidentelle. En ce sens, elle nécessite des contrôles permanents vu que les bactéries représentent la cause la plus fréquente de non potabilité de l'eau (Rodier et al., 2009). Vu l'importance de ces micro-organismes en termes de diversité et de risques potentiels de santé publique, il s'avérerait important de prendre en compte le plus grand nombre de paramètres microbiologiques possibles pour évaluer la qualité de l'eau bien que le but de l'analyse microbiologique ne consiste pas à inventorier toutes les espèces susceptibles d'être présentes dans l'eau. Cependant, à cause des contraintes de temps et de moyens, nous avons pu déterminer à titre exploratoire les coliformes fécaux, les coliformes totaux, l'*Escherichia coli* et la numération des germes. Le choix de ces paramètres a été guidé par le faible taux de couverture en assainissement de base en Haïti surtout dans le milieu rural mais aussi parce que ces quatre indicateurs microbiens sont très utilisés pour évaluer la salubrité de l'eau potable. Étant des témoins de la contamination fécale, nous estimons que la recherche de ces bactéries pourrait aider à avoir une compréhension sommaire de la qualité microbiologique des eaux de consommation.

I.7.2.-Les coliformes

Dans la littérature scientifique, il n'y a pas une définition microbiologique stricte du terme « coliforme ». Un certain nombre d'espèces bactériennes partageant certaines caractéristiques biochimiques appartenant à la famille des *Enterobacteriaceae* se trouve regroupé sous ce terme. Selon la définition adoptée par l'Organisation Internationale de Standardisation (ISO), le terme coliforme désigne des organismes en bâtonnets, non sporogènes, Gram négatifs, oxydase négatifs, facultativement anaérobies, capables de croître en présence de sels biliaires ou d'autres agents de

surface possédant des activités inhibitrices de croissance similaires, et capables de fermenter le lactose (et le mannitol) avec production d'acide et d'aldéhyde en 48 heures, à des températures de 35 à 37 °C. Le dénombrement de ces organismes à 35-37 °C est souvent désigné sous l'expression de dénombrement des coliformes totaux (Rodier et *al.*, 2009).

Selon Tallon et *al.* (2005) cité par Verhille (2013), la présence des coliformes totaux dans une eau ne témoigne pas exclusivement une contamination fécale. Les progrès scientifiques ont montré qu'ils ne sont pas forcément retrouvés au niveau de l'intestin de l'homme ou des animaux homéothermes. Ils peuvent aussi se retrouver dans l'environnement. Leur détermination dans l'eau potable est indicatrice d'une détérioration de la qualité, car ils constituent non seulement une présomption de la présence des matières fécales d'origine humaine ou animale mais aussi une présomption de la présence des germes de micro-organismes pathogènes (Payment et Hartemann, 1998 ; Hébert et Légaré, 2000 ; Chan et *al.*, 2007).

I.7.2.1.-Les coliformes fécaux

Appelés aussi coliformes thermo-tolérants, les coliformes fécaux correspondent aux coliformes qui présentent les mêmes propriétés après incubation à la température de 44 °C (Rodier et *al.* 2009). Ils sont des bio-indicateurs de contamination fécale au même titre que les streptocoques fécaux et les Clostridium sulfito-réducteurs (Nola et *al.*, 1998). Cependant, Verhille (2013) rapporte que la détermination des coliformes fécaux dans une eau ne fournit pas trop de spécificité quant à l'origine de la contamination fécale de l'eau.

I.7.2.2.-*Escherichia coli*

Caractérisé par les enzymes *B*-galactonidase et *B*-gluconidase, *Escherichia coli* correspond à des coliformes thermo-tolérants qui produisent de l'indole à partir du tryptophane (Emmanuel, 2004). Il est abondant dans les fèces humaines et animales jusqu'à des concentrations de 10⁹ par gramme de matières sèches. Sa présence est l'indicateur le plus précis de la contamination par les matières fécales qui contiennent des micro-organismes pathogènes, comme des bactéries, des virus ou des parasites (El Haissoufi et *al.*, 2011). Selon Emmanuel (2004), il est aussi retrouvé dans les eaux d'égout, les effluents traités, ainsi que dans toutes les eaux naturelles et les sols victimes d'une contamination fécale récente, qu'elle soit d'origine humaine, animale ou agricole.

I.7.3.-La numération des germes

Elle reflète la charge totale en bactéries hétérotrophes aérobies qui peuvent coloniser un réseau de distribution. À la fin du XIX^e siècle, elle a été utilisée comme indicateur d'évaluation de la pureté de l'eau. Cependant, à ce jour, à l'instar des coliformes totaux, sa détermination dans l'eau sert plutôt à indiquer une possibilité de détérioration de sa qualité. Sa présence dans une eau prouve alors la nécessité de faire des analyses approfondies (Verhille, 2013).

I.8.-Effet d'une exposition à des contaminants présents dans l'eau sur la santé humaine

Selon Festy et al. (2003), les risques sanitaires liés à l'eau destinée à la consommation humaine peuvent survenir de manière directe ou indirecte. Dans le premier cas, ils résultent d'un contact avec l'eau contaminée elle-même (eau de boisson, eaux usées, eau de loisirs). Dans le second cas, ils surviennent par l'intermédiaire d'aliments ou d'air contaminés par une eau de mauvaise qualité. Les conséquences d'une exposition à des bactéries, des virus et des parasites pathogènes présents dans l'eau sont très variables (tableau 4). Les maladies entériques caractérisées par la nausée, les vomissements et la diarrhée sont les symptômes les plus couramment rencontrés qui sont en association au problème de la qualité microbienne de l'eau potable (Verhille, 2013). Les enfants en bas âge, les personnes âgées, ainsi que les personnes dont le système immunitaire est affaibli, peuvent avoir des symptômes plus graves. Dans les cas extrêmes, la présence d'un large éventail de contaminants chimiques et microbiens dans l'eau destinée à la consommation humaine peut induire des effets sanitaires importants incluant une rupture prolongée, du cancer, des troubles gastro-intestinaux, des troubles du foie, des problèmes de reproduction et des troubles de fonctionnement du système nerveux (Villanueva et al.,2014).

Tableau 4. Les principales infections humaines transmises par l'eau

Sphères	Infections	Agents étiologiques	Origine la plus fréquente
Digestive	Fièvres typhoïdes	<i>Samonella typhi</i>	Coquillages, eau de boisson
	Gastro-entérites	<i>Escherichia coli</i> <i>Salmonella sp.</i> <i>Shigella sp.</i> <i>Yersinia</i> <i>Campylobacter</i> <i>Cryptosporidium</i> Rotavirus	Eau de boisson, aliments crus, baignades
Respiratoire- ORL	Choléra	<i>Vibrio cholerae</i>	Eau de boisson, aliments souillés, coquillages
	Hépatites A et B	Virus	Eaux aérosolisées, compostage
	Légionellose	<i>Legionella sp.</i>	
	Mycoses pulmonaires	<i>Aspergillus sp.</i> Actinomycètes thermophiles	
Cutanéomuqueuse	Affections ORL	Adénovirus Réovirus	Piscines, Baignades
	Méningo-encéphalites amibiennes		Baignades (eau douce)
	Dermatomycose	Dermatophytes	Piscines
	Candidose	<i>Candida albicans</i>	Baignades
	Leptospirose	Leptospire	Baignades (eau douce)
	Suppurations bactériennes	Streptocoque hémolytique groupe A Staphylococcus Pseudomonas	Piscines, baignades
	Dermatites	Furcocercaires	Baignades (eau douce)

Source: Leclerc et al., 1982

I.9.-Normes de qualité microbiologique

Pour les paramètres microbiologiques sur lesquels portent la présente étude, les normes de admises à l'échelle internationale sont présentées dans le tableau 5.

Tableau 5. Normes microbiologiques relatives aux paramètres étudiés

Paramètres	Valeurs paramétriques		Unité
	Normes OMS	Directive 98/83/CE du Conseil du 3 novembre 1998 de l'UE	
Coliformes fécaux	0	0	CFU/100 ml
Coliformes totaux	0	0	CFU/100 ml
<i>Escherichia coli</i>	0	0	CFU/100 ml
Numération des germes			CFU/100 ml

CHAPITRE II. PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

Ce chapitre est consacré à une présentation succincte du cadre physique de l'étude en termes de localisation géographique, du climat, de la pédologie, du réseau hydrographique, de la population et des activités économiques.

II.1.- Localisation géographique

Le sous-bassin versant de Ravine Diable est situé à cheval entre les communes Paillant, Petite-Rivière de Nippes et Anse-à-Veau dans la partie Nord du département des Nippes (figure 4). Il a une superficie de 9.44 km² et un périmètre de 17.42 km (Bienvenue, 2012). Il est divisé en douze (12) habitations dont huit (8) dans la troisième section Saut-du-Baril, deux (2) dans la première section de Petite-Rivière de Nippes et deux (2) dans la première section Salagnac, commune de Paillant (Bienvenue, 2012).

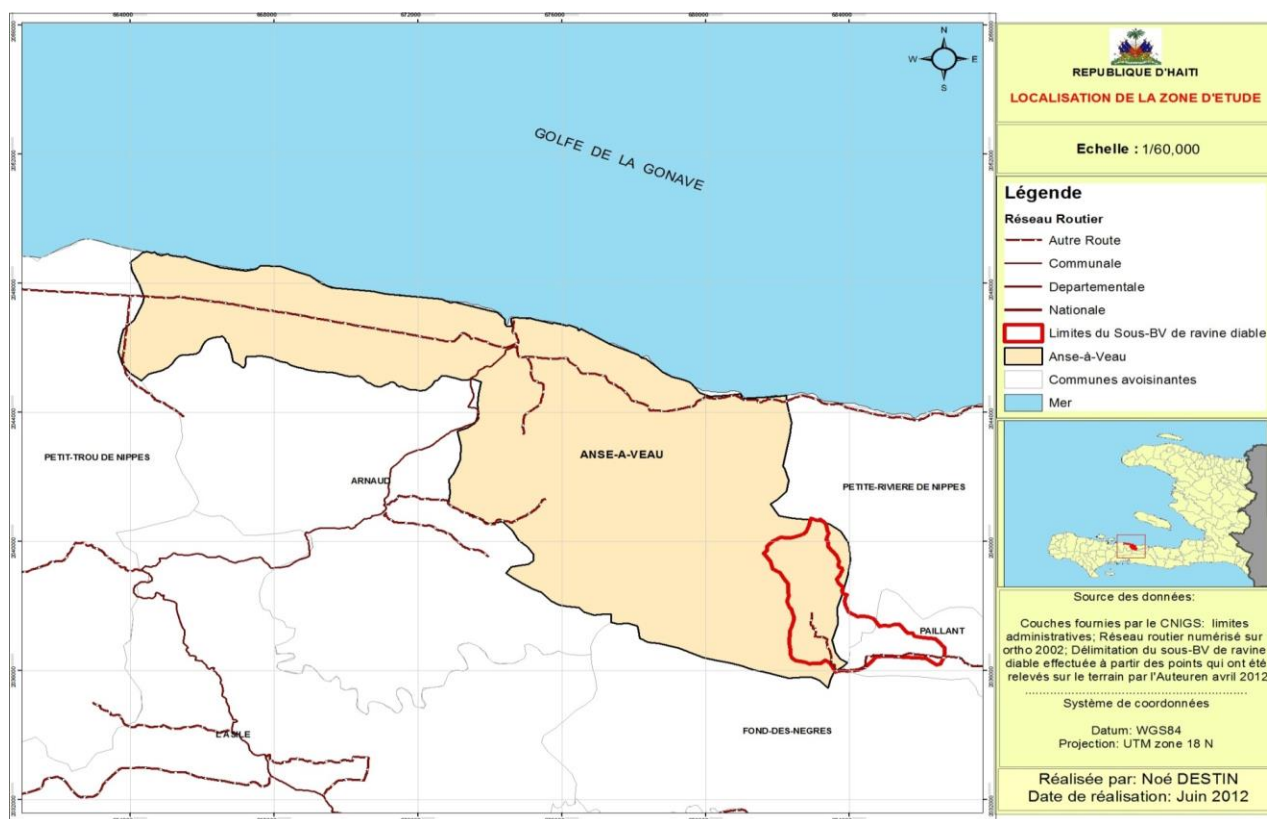


Figure 4. Localisation géographique du sous-bassin versant Ravine Diable (Source : Bienvenue, 2012)

II.2.- Climat

Selon Saintil (2009), le sous-bassin versant de Ravine Diable est marqué par un climat de type tropical caractérisé par une saison sèche qui s'étend en général de novembre à mars et une saison pluvieuse allant du mois d'avril à octobre avec un creux en juin (figure 5). La pluviométrie varie de 1600 à 2600 mm/an.

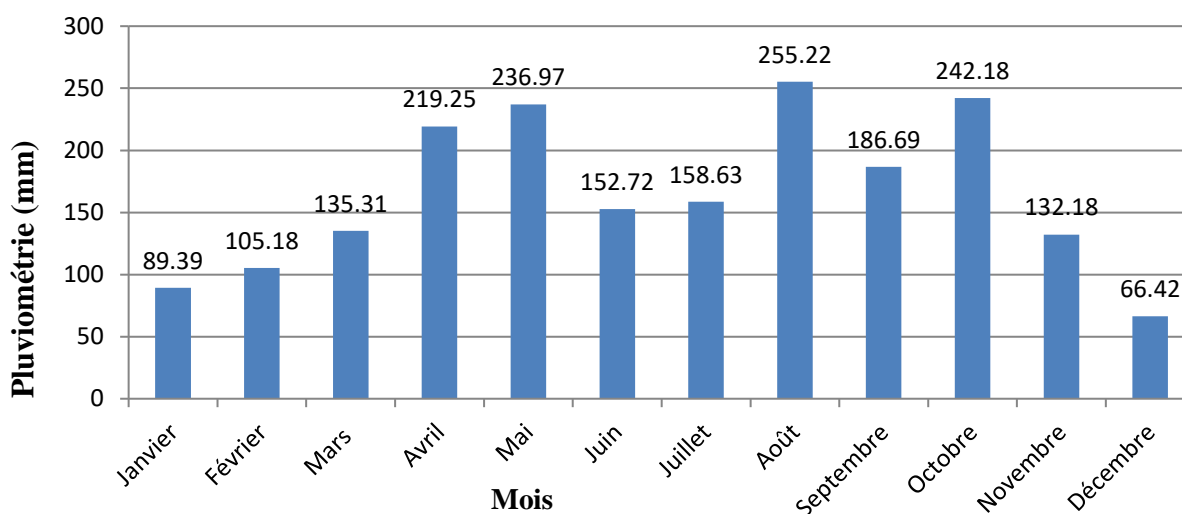


Figure 5. Pluviométrie mensuelle moyenne de 1998 à 2012 dans le sous-bassin versant (Source : Centre Salagnac¹, 2016)

Les températures moyennes mensuelles oscillent entre 19 °C et 24 °C. En dépit de la bonne pluviométrie de la zone, l'action des vents cause souvent des périodes de déficit pluviométrique notamment en février, mars, novembre, décembre (Saintil, 2009). De façon générale, l'humidité relative de l'air est très élevée et des brouillards sont fréquemment observés surtout au niveau des points les plus élevés.

II.3.- Pédologie

Sur le plan édaphique, trois (3) unités pédologiques se rencontrent au niveau de la zone : les sols rouges bauxitiques (sols ferrallitiques), les marnes (texture argileuse) et les sols calci-magnésiens (Museau, 2003). En fonction de leur profondeur et de leur richesse en roche calcaire, ces sols présentent des faciès différents en raison de leur situation topographique.

¹ Données non publiées obtenues dans les registres du Centre de Salagnac à Paillant

II.4.- Réseau hydrographique

Le réseau hydrographique du sous-bassin versant Ravine Diable débute à Bannak (Salagnac), première section communale de Paillant (figure 6). Le sous-bassin versant alimente une rivière du même nom qui prend sa source dans une localité dénommée Laporpote (Bienvenue, 2012). Cette rivière a un débit de $0.46 \text{ m}^3/\text{s}$ et rencontre un autre cours d'eau dit cours d'eau de Saut-du-Baril de débit $1.57 \text{ m}^3/\text{s}$ dans une localité appelée *Dlo Kontre* pour former la rivière froide qui a un débit moyen de $2.029 \text{ m}^3/\text{s}$ (DUVIVIER, 2006).



Figure 6. Réseau hydrographique du sous-bassin versant Ravine Diable (Source : Bienvenue, 2012)

II.5.-Population

Selon Bienvenue (2012), le sous-bassin est habité par une population qui se chiffre à environ deux mille trois cent cinquante (2350) habitants, soit une densité de $248.94 \text{ habitants}/\text{km}^2$.

II.6.- Activités économiques

L'agriculture est la principale activité économique pratiquée dans la zone. Les cultures maraichères et vivrières sont les plus rencontrées. L'élevage des équins, bovins, porcins, caprins et des volailles est aussi pratiqué et représente une sorte d'épargne sur pied pour les agriculteurs. La composition du cheptel varie en fonction des systèmes de culture (Saintil, 2009).

CHAPITRE III. MATÉRIELS ET MÉTHODES

Ce troisième chapitre du document présente les matériels et méthodes qui ont été utilisés pour conduire cette étude.

III.1.- Matériels

- ❖ Un GPS (Global Positioning System) de marque Garmin etrex, pour la prise des coordonnées géographiques des points d'eau inventoriés dans le sous-bassin versant ;
- ❖ Un appareil photo pour la prise de vues ;
- ❖ Des flacons en propylène stériles et en polyéthylène non stériles pour maintenir les échantillons d'eau à analyser ;
- ❖ Une glacière pour entreposer les échantillons d'eau afin de les transporter aux laboratoires de chimie et de microbiologie de la DINEPA aux fins de les analyser ;
- ❖ Des bandelettes colorimétriques pour faire un diagnostic rapide du pH sur le terrain ;
- ❖ Une multisonde HQ40d de marque HACH, pour la mesure de la conductivité électrique et de la température de l'eau sur le terrain ;
- ❖ Des logiciels (Statistica, Excel, ArcGis, Diagramme de Piper), pour le traitement et l'analyse des données.

III.2.- Méthodes

III.2.1.- Revue de bibliographie

Cette étape a consisté à se documenter sur les paramètres physico-chimiques et microbiologiques dans l'eau de consommation humaine. Les paramètres physico-chimiques qui ont été concernés sont : pH, température, conductivité électrique, couleur, odeur, calcium, magnésium, manganèse, fer, chlorure, fluorure, sodium, potassium, aluminium, nitrite, nitrate, sulfates, arsenic, cuivre, zinc, dureté et alcalinité. Pour les germes, l'étude visait à rechercher les coliformes fécaux, de coliformes totaux, d'*Escherichia coli* et la numération des germes. À cet effet, des documents scientifiques incluant entre autres thèses de doctorat, livres, articles, rapports et revues pertinents à ce sujet ont été consultés et analysés en vue de mettre en évidence les éventuels problèmes qu'ils peuvent provoquer chez les hommes, femmes et enfants qui les consomment quand ils sont présents dans l'eau à des concentrations qui excèdent les normes en vigueur. Aussi, nous avons eu

recours à la capture d'écran pour pouvoir présenter certains graphiques qui nous paraissent pertinents pour le travail.

III.2.2.- Campagne de collecte de données

Au cours de la période allant du 28 mars au 12 avril 2017, une campagne de collecte de données a été organisée. Cette campagne a été réalisée en deux (2) étapes : la première a consisté en la collecte des données de terrain et la deuxième en la réalisation des analyses de laboratoire.

III.2.2.1.- Données de terrain

III.2.2.1.1.- Inventaire des ressources en eau

Un inventaire de tous les points d'eau destinée à la consommation humaine a été réalisé au moyen de visites exploratoires. Les caractéristiques physiques (température, pH, conductivité électrique) pour chaque point d'eau inventorié ont été mesurées in situ. Ensuite, tous les points d'eau ont été géoréférencés afin de permettre une compréhension de leur répartition spatiale dans le sous-bassin versant. Des entretiens ont été aussi réalisés avec des résidents de la zone pour collecter des informations sur les ressources en eau qui sont destinées à la consommation humaine. Cette information a été importante, car elle a permis de savoir les points d'eau qui sont utilisés pour la consommation humaine.

III.2.2.1.2.- Enquête et observation

Au moyen d'enquête et d'observation, des informations ont été également collectées sur l'existence des facteurs de risque tels que l'existence des latrines dans les ménages, leur proximité par rapport à un point d'eau, l'importance relative des populations utilisatrices (IRPU), l'état de salubrité de l'environnement et de la zone de prélèvement et/ou de capture de l'eau.

III.2.2.1.3.- Plan d'échantillonnage

Pour constituer notre échantillonnage, nous avons utilisé les données collectées au cours de l'inventaire et de l'enquête/observation. Les points d'eau présentant les paramètres physiques (température, pH, conductivité électrique) les plus suspects et les autres facteurs susmentionnés nous ont permis de choisir trois (3) sources, trois (3) citernes familiales et un (1) point de prélèvement sur la rivière à un endroit où l'eau est utilisée à des fins domestiques (boisson,

baignade, cuisine, etc.) par la communauté avoisinante. Le tableau 6 présente les caractéristiques des points d'eau retenus pour le prélèvement des échantillons à des fins d'analyse de laboratoire.

Tableau 6. Caractéristiques des points d'eau définissant le plan d'échantillonnage.

Points d'eau	pH	T°(°C)	Conductivité (µS/cm)	État de salubrité & zone prélèvement	IRPU
Source Ravine Diable	6.98	24.5	472	Élevage en amont, Parcage d'animaux à proximité, absence de protection et de zone séparée pour l'abreuvement des animaux	Communautés Javel, Platon Jovin, Ravine Diable, Ladoise.
Source Lapaix	7.12	23.4	131	Absence totale de latrine dans la zone	Communauté Lapaix
Source K-Joson	8.06	24.3	489	Présence de latrine à Proximité (amont)	Une communauté de 11 habitats
Rivière Ravine Diable	8.27	24.2	257	Élevage à proximité, Absence de latrine	Une communauté de 17 habitats
Citerne Berné	7.07	24	413	Citerne, dalot et toiture de maison en mauvais état	Une famille de 8 personnes
Citerne Kolo	7.12	23.4	131	Citerne, dalot et toiture de maison en mauvais état	Une famille de 7 personnes
Citerne Neyop	10.06	24.3	243	Citerne, dalot et toiture de maison en mauvais état	Une famille de 5 personnes

Source : Enquête de l'auteur, mars 2016.

La figure 7 ci-dessous illustre une présentation en 3 dimensions (3D) des paramètres physiques ayant servi au choix des points d'eau retenus pour le prélèvement des échantillons.

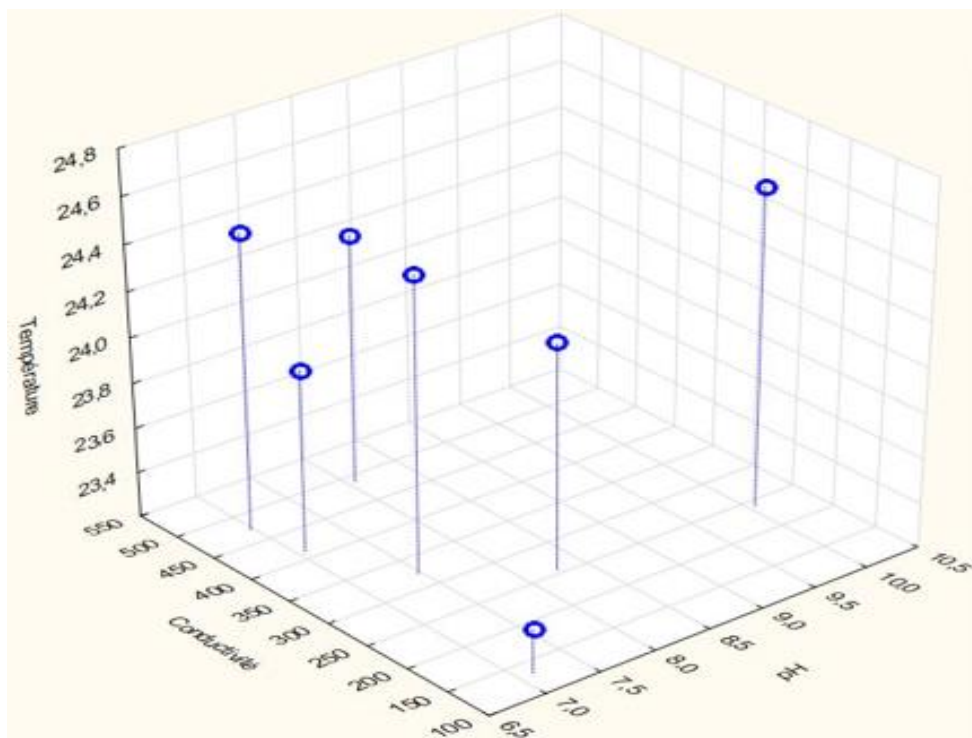


Figure 7. Graphique en 3D des paramètres température, pH et conductivité électrique des échantillons d'eau retenus pour les analyses.

En termes de la répartition spatiale, les points d'eau présentant les niveaux de risque les plus élevés pour être retenus comme échantillons sur la base des critères prédéfinis suivent par coïncidence une tendance relativement représentative de la distribution des types d'eau destinée à la consommation humaine dans la partie amont et aval du sous-bassin versant (figure 8).

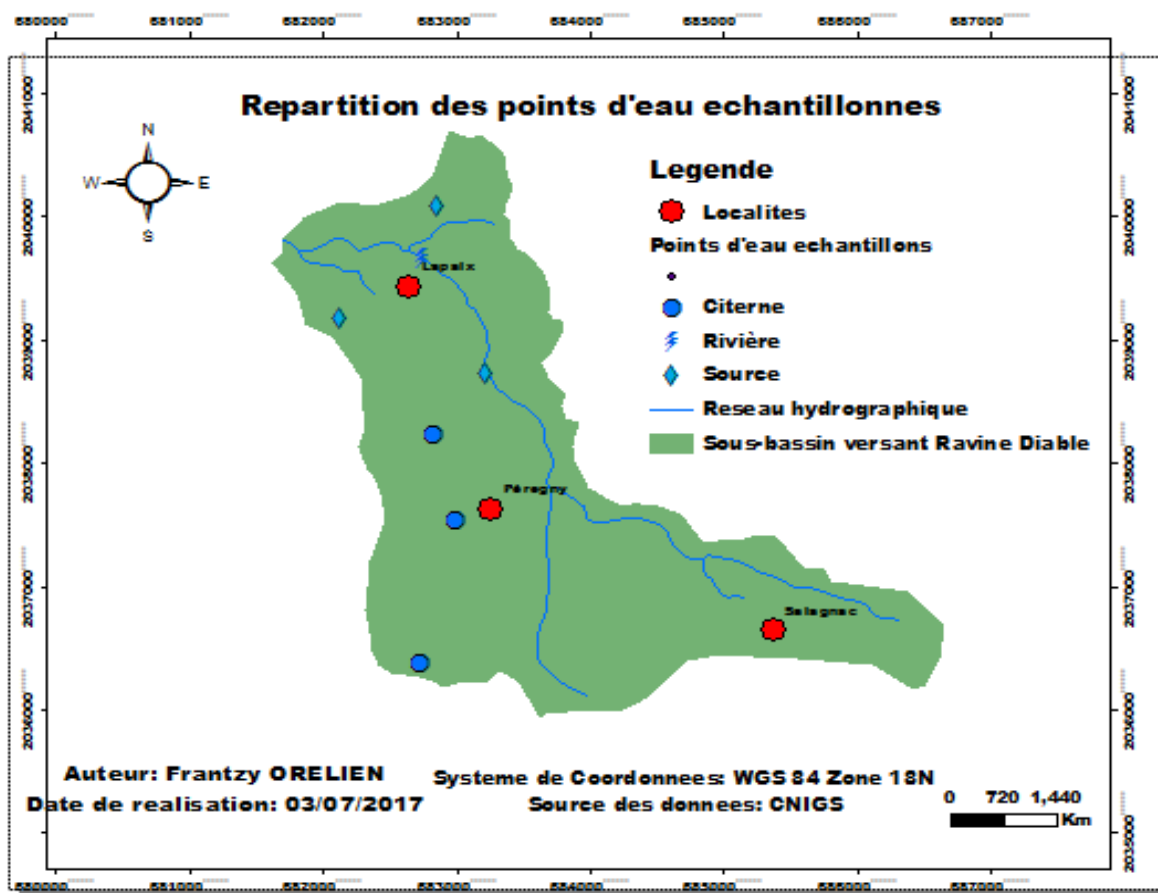


Figure 8. Distribution spatiale des points d'eau échantillonnés

III.2.2.1.4.- Prélèvement et conservation des échantillons

Étant une opération délicate, le prélèvement des échantillons d'eau a été réalisé avec le plus grand soin. Des flacons en polyéthylène non stériles d'une capacité de 1500 ml ont été utilisés pour les échantillons destinés aux analyses physico-chimiques. Les flacons ont été préalablement rincés trois (3) fois avec l'eau à prélever avant leur remplissage. Chaque flacon a été rempli à ras bord sans matériel intermédiaire et bien bouché en évitant le barbotage et l'emprisonnement d'air à la fermeture. Tous les échantillons ont été étiquetés et transportés au laboratoire dans une glacière. Pour bloquer les activités biologiques, les échantillons prélevés ont été traités avec 2ml d'acide nitrique à $\text{pH} < 2$, concentré à 65% et gardés dans une enceinte réfrigérée à une température comprise entre 4 à 6 °C (Rodier et al., 2009). Les paramètres tels que la température, le pH et la conductivité électrique ont été mesurés in situ à l'aide d'une multisonde HQ40d de marque HACH. Ces paramètres ont été utilisés comme critères d'échantillonnage.

Pour les échantillons destinés aux analyses microbiologiques, six (6) flacons en propylène stériles de 100 ml chacun ont été utilisés pour chaque échantillon. Les flacons ont été remplis, étiquetés et placés dans la même glacière. L'ensemble des échantillons d'eau ont été transportés aux laboratoires de chimie et de microbiologie de la Direction Nationale de l'Eau Potable et de l'Assainissement (DINEPA) le lendemain de la date de prélèvement à des fins d'analyse, soit le 05 avril 2017.

Un échantillon témoin provenant d'une des plus grandes compagnies de traitement et de commercialisation d'eau potable en Haïti a été aussi prélevé et analysé afin de comparer les résultats. Le choix de cet échantillon témoin est basé sur la grande valeur qui lui est accordée en Haïti. L'eau de cette compagnie jouit d'une très bonne réputation et appréciation dans le pays pour sa qualité.

III.2.2.2.- Données de laboratoire

Ces données ont concerné les résultats des analyses physico-chimiques et microbiologiques qui ont été réalisées aux laboratoires de chimie et de microbiologie de la DINEPA.

III.2.2.2.1.- Détermination et mesure des paramètres physico-chimiques

Quatre (4) méthodes d'analyse ont été utilisées pour la détermination et la mesure des paramètres physico-chimiques. Il s'agissait des méthodes spectrophotométrique, titrimétrique, potentiométrique et néphélométrique. Ainsi, l'aluminium (Al), l'arsenic (As), le cuivre (Cu), les fluorures (F^-), le fer (Fe), le manganèse (Mn), les nitrites (NO_2^-), les nitrates (NO_3^-), les sulfates (SO_4^{2-}) et le zinc (Zn) ont été mesurés par spectrophotométrie. Cette méthode consiste à mesurer la densité optique des substances chimiques en fonction de leur longueur d'onde d'absorption. Elle est une méthode à la fois simple, précise et rapide qui permet de réduire les erreurs qui pourraient être dues aux manipulations (Rodier et *al.*, 2009). La méthode de titrage volumétrique a été utilisée pour le dosage du calcium (Ca), du magnésium (Mg), des ions chlorures (Cl^-), des carbonates et bicarbonates, de l'alcalinité et de la dureté de l'eau. Selon Rodier et *al.* (2009), cette méthode titrimétrique permet d'avoir des résultats satisfaisants pour le contrôle de la qualité de l'eau. Le sodium, la salinité et les sels dissous totaux (TDS) ont été évalués par potentiométrie. Cette méthode électrochimique est très fréquemment utilisée dans l'analyse de l'eau pour sa rapidité, sa commodité et sa précision (Gurand, 2010). En fin, la turbidité a été mesurée à l'aide d'un néphélomètre. Cette technique (néphélométrie) consiste à mesurer, à 90° d'angle, la lumière

diffusée par rapport à la lumière incidente. Elle est fortement utilisée dans la détermination de la turbidité des eaux (eaux de surface, eaux souterraines, eau potable, eaux usées) (Centre d'Expertise en Analyse Environnementale du Québec, 2016).

Le tableau 7 ci-dessous présente la limite de quantification et de détection pour certains de ces paramètres analysés. Pour les autres paramètres (Ca, carbonates, dureté, etc.), nous n'avons pas pu trouver dans la littérature consultée leurs limites de quantification ou de détection.

Tableau 7. Limite de quantification et de détection de certains paramètres physico-chimiques.

Paramètres	Limite de quantification (LQ) par ICP/MS (Wanélus, 2016)	Limite de détection (LD) & Méthodes (WHO, 2006 ; WHO, 2011)
As	< 1 µg/L	0.1 µg/L ICP/MS
Cu	< 2 µg/L	0.02 – 0.1 µg/L ICP/MS
Fluorures	-	0.01 mg/L Colorimétrie
Mn	< 1 µg/L	0.5 µg/L Spectrométrie
NO ₃ ⁻ /NO ₂ ⁻	-	0.01 – 1 mg/L Spectrométrie
Al	< 20 µg/L	-
Zn	< 15 µg/L	-
Fe	< 15 µg/L	-

III.2.2.2.2.- Détermination et mesures des paramètres microbiologiques

L'*Escherichia coli*, les coliformes fécaux, les coliformes totaux et la numération des germes ont été les principaux paramètres microbiologiques recherchés. Ces germes ont été déterminés par la méthode de filtration sur membrane telle que décrite par Rodier et al. (2009). Cette méthode est très largement utilisée pour le dénombrement des germes de micro-organisme dans l'eau destinée à la consommation humaine.

III.2.3.- Traitement et analyse des données

Après les analyses de laboratoire, les résultats obtenus ont été saisis sur Excel, puis traités et analysés avec les logiciels STATISTICA et ARCGIS version 10.3. Par ailleurs, les techniques hydrochimiques comme le Diagramme de Piper a été utilisé pour représenter graphiquement la chimie des échantillons d'eau analysés. Ces résultats ont été ensuite comparés aux normes internationales de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) et à la Directive 98/83/CE du Conseil du 3 novembre 1998 de l'Union Européenne (UE) relative à la qualité des eaux destinées à la consommation humaine en vue d'en tirer les conclusions appropriées

CHAPITRE IV.- RÉSULTATS ET DISCUSSION

Ce quatrième et dernier chapitre du présent travail s'est attaché dans un premier temps à la présentation et à l'interprétation des résultats obtenus. Dans un second temps, il est consacré à discuter ces résultats sur la base de la littérature disponible en la matière.

IV.1.-Résultats

IV.1.1.-Ressources en eau destinée à la consommation humaine dans le sous-bassin versant

Trois (3) types de points d'eau destinée à la consommation humaine ont été inventoriés dans le sous-bassin versant de Ravine Diable. Il s'agit des sources (temporaires et permanentes), de la rivière principale portant le nom du sous-bassin et des citernes familiales. Ces dernières sont des ouvrages de stockage des eaux pluviales collectées au moyen des toitures des maisons. Le tableau 8 présente l'effectif des points d'eau inventoriés dans le sous-bassin versant pour chaque type susmentionné.

Tableau 8. Les points d'eau inventoriés dans le sous-bassin

Types de point d'eau	Effectif inventorié
Rivière	1
Sources permanentes	8
Sources temporaires	2
Citernes familiales	44

En termes de la distribution spatiale, nous avons observé une répartition inverse entre les habitats et celle de la disponibilité des ressources en eau. L'amont du sous-bassin versant, zone la plus habitée, ne renferme que les citernes familiales (environ 15m³ de capacité unitaire) dans seulement 44 familles. La disponibilité en eau dans les citernes est strictement tributaire de la pluie. Tandis qu'en aval, zone très peu habitée du sous-bassin, se concentrent les sources et la rivière Ravine Diable (figure 9) où l'eau reste disponible tout au long de l'année mais avec une diminution du débit en saison sèche.

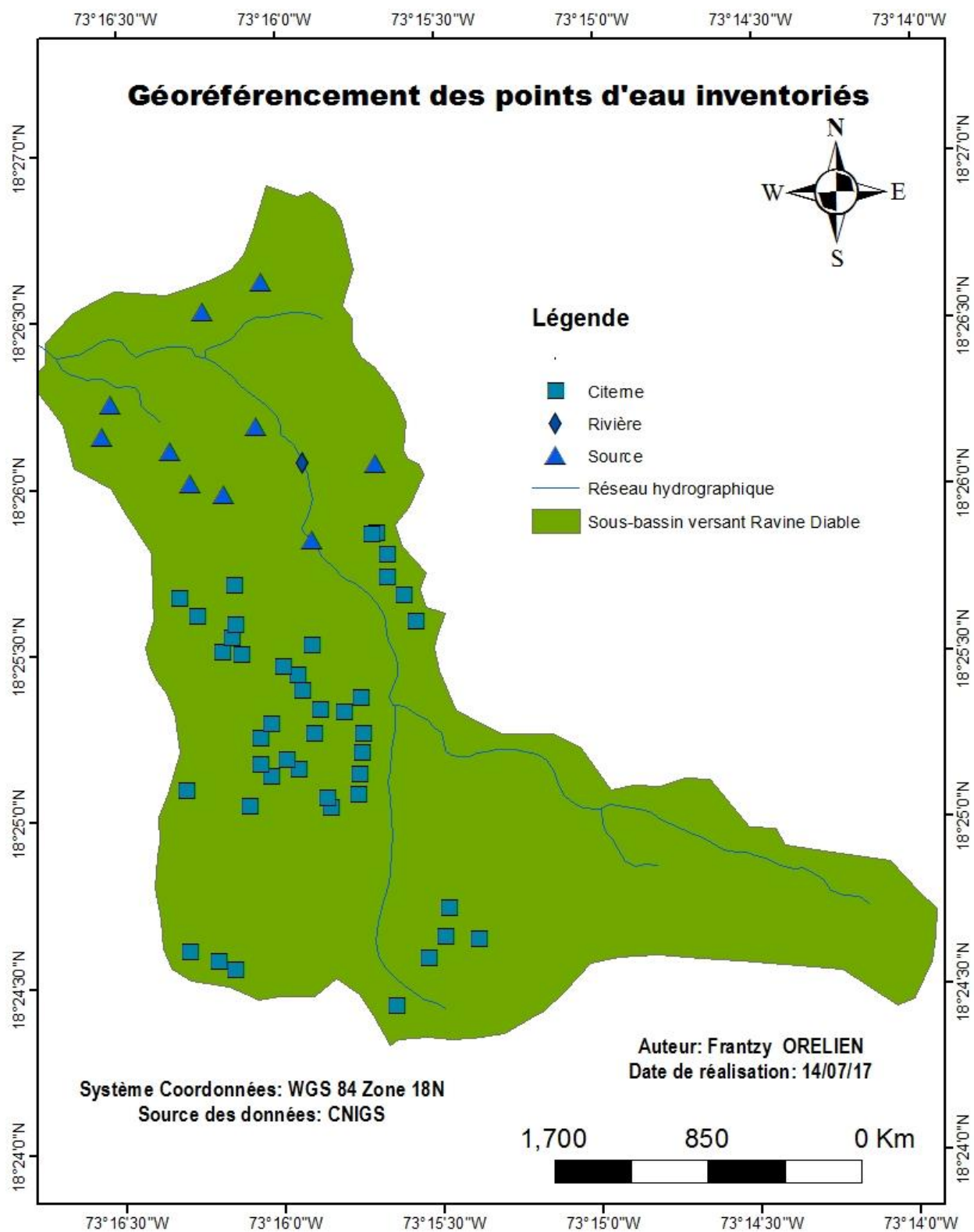


Figure 9. Répartition spatiale des points d'eau inventoriés dans le sous-bassin de Ravine Diabla

IV.1.2.- Qualité physico-chimique des eaux dans le sous-bassin versant

IV.1.2.1.- Qualité physico-chimique des échantillons d'eau de source

La détermination des paramètres physico-chimiques dans l'eau destinée à la consommation humaine est une démarche importante pour évaluer sa qualité. Elle reste l'un des moyens d'identification d'éventuels cas de contamination par des substances chimiques. Le tableau 9 présente les teneurs en substances physico-chimiques mesurées pour les paramètres étudiés dans les échantillons d'eau de source prélevés au cours de la campagne du 04 avril 2017.

Tableau 9. Concentrations en substances chimiques dans les échantillons d'eau de source

Paramètres	Unités	Sources			Normes OMS	Directive UE
		Ravine Diable	K-Jozon	Lapaix		
pH	Unité pH	7.47	6.98	8.06	6.5- 8.5	6.5-9.5
Conductivité	µS/cm	322	472	489	< 1200	2 500
Température	°C	24.5	24.5	24.3		25
Couleur vraie	U Pt-Co	4	0	6	< 15	APC
Odeur	Seuil	Inodore	Inodore	Inodore		APC
Turbidité	NTU	0.72	0.6	4.15	< 1	0.5
TDS	mg/l	154.3	228	237	< 600	PVG
Alcalinité phénolphtaléine	mg/l CaCO ₃	0	0	0	PVG	PVG
Alcalinité totale	mg/l CaCO ₃	154	242	258	PVG	PVG
Bicarbonates	mg/l CaCO ₃	154	242	258	PVG	PVG
Carbonates	mg/l CaCO ₃	0	0	0	PVG	PVG
Calcium	mg/l	62.5	97.7	52.85	100	PVG
Dureté calcique	mg/l CaCO ₃	156	244	132	PVG	PVG
Dureté magnésienne	mg/l CaCO ₃	8	12	124	PVG	PVG
Dureté totale	mg/l CaCO ₃	164	256	256	100- 300	PVG
Salinité	mg/l	0.15	0.23	0.23	PVG	PVG
Sodium	mg/l	3.01	7.85	22.2	< 200	200
Nitrites	mg/l	0.033	0.003	0.007	< 0.2	0.5
Nitrates	mg/l	55.8	35	28.78	<50	50
Sulfates	mg/l	1	3	1	< 250	250
Fluorure	µg/l	0.04	0.12	0	<1500	1500
Chlorure	mg/l	11	13	14	< 250	250
Aluminium	mg/l	< 0.02	< 0.02	0.046	< 0.2	0.2
Fer	mg/l	2	0.1	0.1	< 0.2	0.2
Magnésium	mg/l	1.942	2.914	30.11	PVG	30-50
Manganèse	mg/l	0.015	0.006	0.024	<0.1	0.05
Arsenic	µg/l	< 1	< 1	< 1	10	10
Cuivre	mg/l	0.4	1.33	0.1	< 2	2
Zinc	mg/l	0.11	0.08	0.05	<3	PVG

Ces résultats montrent que mise à part les nitrates et le fer pour la source Ravine Diable et la turbidité pour la source Lapaix, les autres paramètres mesurés sont tous conformes aux normes de l'OMS et de l'UE pour lesquels les valeurs guides sont spécifiées. Certains d'entre eux tels que les ions fluorures et les carbonates existent à l'état de trace ou sont nuls. Pour l'arsenic, la valeur mesurée est inférieure à la limite de quantification (LQ) dans les trois (3) sources.

IV.1.2.2.- Qualité physico-chimique de l'eau de la rivière Ravine Diable

Consommée par une communauté du sous-bassin, la rivière Ravine Diable présente des caractéristiques physico-chimiques qui se diffèrent un peu de la source du même nom. Contrairement à la source, la valeur mesurée pour la turbidité dans la rivière est supérieure à la norme. Le pH de l'eau de rivière est aussi plus élevé que celui de la source. Par contre, la teneur en cuivre, la conductivité électrique, l'alcalinité et la dureté totale y sont plus faibles. Les résultats obtenus pour la rivière sont repris dans le tableau 10.

Tableau 10. Concentrations en substances chimiques dans l'échantillon d'eau de rivière

Paramètres	Unités	Valeurs déterminées	Normes OMS	Directive UE
pH	Unité pH	8.27	6.5- 8.5	6.5-9.5
Conductivité	µS/cm	257	< 1200	2 500
Température	°C	24.2		25
Couleur vraie	U Pt-Co	13	< 15	APC
Odeur	Seuil	Inodore		APC
Turbidité	NTU	3.8	< 1	0.5
TDS	mg/l	122.8	< 600	PVG
Alcalinité phénolphtaléine	mg/l CaCO ₃	0	PVG	PVG
Alcalinité totale	mg/l CaCO ₃	126	PVG	PVG
Bicarbonates	mg/l CaCO ₃	126	PVG	PVG
Carbonates	mg/l CaCO ₃	0	PVG	PVG
Calcium	mg/l	49.65	100	PVG
Dureté calcique	mg/l CaCO ₃	124	PVG	PVG
Dureté magnésienne	mg/l CaCO ₃	20	PVG	PVG
Dureté totale	mg/l CaCO ₃	144	100- 300	PVG
Salinité	mg/l	0.12	PVG	PVG
Sodium	mg/l	6.85	< 200	200
Nitrites	mg/l	0.0164	< 0.2	0.5
Nitrates	mg/l	44.713	<50	50
Sulfates	mg/l	3	< 250	250
Fluorure	µg/l	0.02	<1500	1500
Chlorure	mg/l	9.5	< 250	250
Aluminium	mg/l	0.022	< 0.2	0.2
Fer	mg/l	0.05	< 0.2	0.2
Magnésium	mg/l	4.86	PVG	30-50
Manganèse	mg/l	0.007	<0.1	0.05
Arsenic	µg/l	< 1	10	10
Cuivre	mg/l	0.02	< 2	2
Zinc	mg/l	0.04	<3	PVG

Outre la turbidité, ces résultats montrent globalement que sur le plan physico-chimique, l'eau de la rivière n'affiche pas des valeurs hors des normes pour les paramètres considérés dans le cadre de ce travail. Toutefois, la couleur et la teneur en nitrate, bien qu'ils soient encore dans les limites acceptables, méritent une certaine attention. La concentration en arsenic est inférieure à la LQ.

IV.1.2.3.- Qualité physico-chimique des échantillons d'eau de citerne

Rencontrées dans la partie amont du sous-bassin versant, les citernes sont des ouvrages de stockage des eaux pluviales collectées au moyen des toitures des maisons. Les résultats obtenus pour les vingt-neuf (29) paramètres physico-chimiques auxquels est intéressée l'étude sont insérés dans le tableau 11.

Tableau 11. Concentrations en substances chimiques dans les échantillons d'eau de citerne

Paramètres	Unités	Citernes			Normes OMS	Directive UE
		Kolo	Neyop	Berné		
pH	Unité pH	7.12	10.06	7.07	6.5- 8.5	6.5-9.5
Conductivité	µS/cm	131	243	413	< 1200	2 500
Température	°C	23.4	24.6	24		25
Couleur vraie	U Pt-Co	20	81	43	< 15	APC
Odeur	Seuil	inodore	inodore	inodore		APC
Turbidité	NTU	0.83	1.23	1.4	< 1	0.5
TDS	mg/l	62.3	115.7	199.1	< 600	PVG
Alcalinité phénolphtaléine	mg/l CaCO3	0	34	0	PVG	PVG
Alcalinité totale	mg/l CaCO3	42	86	36	PVG	PVG
Bicarbonates	mg/l CaCO3	42	52	36	PVG	PVG
Carbonates	mg/l CaCO3	0	68	0	PVG	PVG
Calcium	mg/l	28.83	4.004	14.42	100	PVG
Dureté calcique	mg/l CaCO3	72	10	36	PVG	PVG
Dureté magnésienne	mg/l CaCO3	8	6	12	PVG	PVG
Dureté totale	mg/l CaCO3	80	16	48	100- 300	PVG
Salinité	mg/l	0.06	0.11	0.2	PVG	PVG
Sodium	mg/l	4.4	5.7	60.8	< 200	200
Nitrites	mg/l	0.0131	0.008	0.007	< 0.2	0.5
Nitrates	mg/l	20.8	20.8	28.8	<50	50
Sulfates	mg/l	0	1	2	< 250	250
Fluorure	µg/l	0	0.1	0	<1500	1500
Chlorure	mg/l	4.5	4.99	108	< 250	250
Aluminium	mg/l	0.056	0.396	0.027	< 0.2	0.2
Fer	mg/l	0.09	0.05	0.02	< 0.2	0.2
Magnésium	mg/l	1.94	1.46	2.914	PVG	30-50
Manganèse	mg/l	0.014	0.008	0.009	<0.1	0.05
Arsenic	µg/l	< 1	< 1	< 1	10	10
Cuivre	mg/l	0.02	0.03	0.02	< 2	2
Zinc	mg/l	0.25	0.85	0.17	<3	PVG

Pour les 29 paramètres analysés, ces résultats révèlent que les trois (3) échantillons accusent des problèmes de conformité en couleur par rapport à la norme. Par ailleurs, les citernes Berné et Neyop présentent des valeurs en turbidité qui excèdent la norme. Aussi, la citerne Neyop a un pH et une concentration en aluminium qui dépassent la fourchette admise dans les normes de potabilité de l'eau. Les autres paramètres dont la concentration maximale est fixée ne sont pas en inadéquation avec les normes. La concentration en arsenic est inférieure à la LQ.

IV.1.2.4.- Qualité physico-chimique de l'échantillon témoin

Provenant de l'une des plus grandes compagnies de traitement et de commercialisation d'eau potable en Haïti, l'échantillon témoin a été analysé en vue de faire un parallèle avec les résultats obtenus pour les échantillons d'eau destinée à la consommation humaine dans le sous-bassin versant. Le tableau 12 présente les caractéristiques physico-chimiques de l'échantillon témoin.

Tableau 12. Concentration en substances chimiques dans l'échantillons d'eau témoin

Paramètres	Unités	Valeurs déterminées	Normes OMS	Directive UE
pH	Unité pH	6.17	6.5- 8.5	6.5-9.5
Conductivité	µS/cm	17.77	< 1200	2 500
Température	°C	23.9		25
Couleur vraie	U Pt-Co	1	< 15	APC
Odeur	Seuil	Inodore		APC
Turbidité	NTU	0.33	< 1	0.5
TDS	mg/l	8.57	< 600	PVG
Alcalinité phénolphtaléine	mg/l CaCO ₃	0	PVG	PVG
Alcalinité totale	mg/l CaCO ₃	10	PVG	PVG
Bicarbonates	mg/l CaCO ₃	10	PVG	PVG
Carbonates	mg/l CaCO ₃	0	PVG	PVG
Calcium	mg/l	0	PVG	PVG
Dureté calcique	mg/l CaCO ₃	0	PVG	PVG
Dureté magnésienne	mg/l CaCO ₃	0	PVG	PVG
Dureté totale	mg/l CaCO ₃	0	100- 300	PVG
Salinité	mg/l	0.01	PVG	PVG
Sodium	mg/l	3.92	< 200	200
Nitrites	mg/l	0.0164	< 0.2	0.5
Nitrates	mg/l	23.9	<50	50
Sulfates	mg/l	0	< 250	250
Fluorure	µg/l	0.05	<1500	1500
Chlorure	mg/l	6	< 250	250
Aluminium	mg/l	< 0.02	< 0.2	0.2
Fer	mg/l	0.02	< 0.2	0.2
Magnésium	mg/l	0	PVG	
Manganèse	mg/l	< 0.001	<0.1	0.05
Arsenic	µg/l	< 1	10	10
Cuivre	mg/l	0.04	< 2	2
Zinc	mg/l	0.03	<3	PVG

Ces résultats ont montré que 28 sur 29 des paramètres analysés sont conformes aux normes admises. Le seul paramètre qui fait défaut est le pH dont la valeur mesurée est égale à 6.17. Cette valeur de pH est plus faible par rapport à la fourchette admise (6.5-8.5, OMS ; 6.5-9.5, UE). Elle exprime donc un niveau d'acidité plus élevé.

IV.1.2.5.- Variabilité des paramètres physico-chimiques des eaux dans le sous-bassin versant

Pour avoir une image d'ensemble de la qualité physico-chimique de l'eau destinée à la consommation humaine dans le sous-bassin, nous avons effectué une analyse statistique globale pour les sept (7) échantillons d'eau prélevés. Pour les différents paramètres retenus, les valeurs minimum, maximum et moyenne ont été déterminées. En vue d'en tirer des conclusions, nous les avons comparées aux normes de l'OMS et de l'UE en vigueur (tableau 13).

Tableau 13. Variation de la concentration en substances chimiques dans les échantillons d'eau

Paramètres	Unités	Valeurs obtenues			Normes OMS	Directive UE
		Minimum	Maximum	Moyenne \pm SD (n=7)		
pH	Unité pH	6.98	10.06	7.86 \pm 1.09	6.5- 8.5	6.5-9.5
Conductivité	μ S/cm	131	489	332.42 \pm 132.19	< 1200	2 500
Température	°C	23.4	24.6	24.21 \pm 0.41		25
Couleur vraie	U Pt-Co	0	81	23.85 \pm 29.00	< 15	APC
Turbidité	NTU	0.6	4.15	1.81 \pm 1.50	< 1	0.5
TDS	mg/l	62.3	237	159.88 \pm 64.55	< 600	PVG
Alcalinité phénolphthaléine	mg/l CaCO ₃	0	34	4.85 \pm 12.85	PVG	PVG
Alcalinité totale	mg/l CaCO ₃	36	258	134.85 \pm 89.32	PVG	PVG
Bicarbonates	mg/l CaCO ₃	36	258	130 \pm 93.25	PVG	PVG
Carbonates	mg/l CaCO ₃	0	68	9.71 \pm 25.70	100	PVG
Calcium	mg/l	4.004	97.7	44.2 7 \pm 31.72	PVG	PVG
Dureté calcique	mg/l CaCO ₃	10	244	110.57 \pm 79.23	PVG	PVG
Dureté magnésienne	mg/l CaCO ₃	6	124	27.14 \pm 42.95	PVG	PVG
Dureté totale	mg/l CaCO ₃	16	256	137.71 \pm 95.66	100- 300	PVG
Salinité	mg/l	0.6	0.23	0.15 \pm 0.06	PVG	PVG
Sodium	mg/l	3.01	60.8	15.83 \pm 20.83	< 200	200
Nitrites	mg/l	0.003	0.033	0.01 \pm 0.01	< 0.2	0.5
Nitrates	mg/l	20.8	55.8	33.52 \pm 12.85	<50	50
Sulfates	mg/l	0	3	1.57 \pm 1.13	< 250	250
Fluorure	μ g/l	0	0.12	0.04 \pm 0.05	<1500	1500
Chlorure	mg/l	4.5	108	23.57 \pm 37.40	< 250	250
Aluminium	mg/l	0.007	0.396	0.08 \pm 0.13	< 0.2	0.2
Fer	mg/l	0.02	2	0.34 \pm 0.73	< 0.2	0.2
Magnésium	mg/l	1.46	30.11	6.59 \pm 10.43	PVG	30-50
Manganèse	μ g/l	0.006	0.024	0.01 \pm 0.00	<0.1	0.05
Arsenic	Mg/l	<1	< 1	< 1 \pm 0.00	10	10
Cuivre	mg/l	0.01	1.33	0.21 \pm 0.49	< 2	2
Zinc	mg/l	0.04	0.85	0.22 \pm 0.28	<3	PVG

Tout échantillon confondu, les minima mesurés pour les paramètres étudiés sont tous dans les limites acceptables. Par contre, les maxima ont montré une non-conformité pour les paramètres pH, couleur, turbidité et nitrates dont leurs valeurs maximales sont respectivement 10.06 unité pH, 81 U Pt/Co, 4.15 NTU, 55.8 mg/L. Quant aux valeurs moyennes, la non-conformité aux valeurs seuils concerne seulement la couleur et la turbidité de l'eau.

IV.1.2.6.- Comparaison des paramètres physico-chimiques pour les points d'eau étudiés

D'un échantillon à un autre, des variations ont été constatées pour bon nombre des paramètres analysés. La figure 10 ci-dessous illustre la variation des valeurs déterminées par paramètre dans les sept (7) échantillons provenant du sous-bassin par comparaison à l'échantillon témoin.

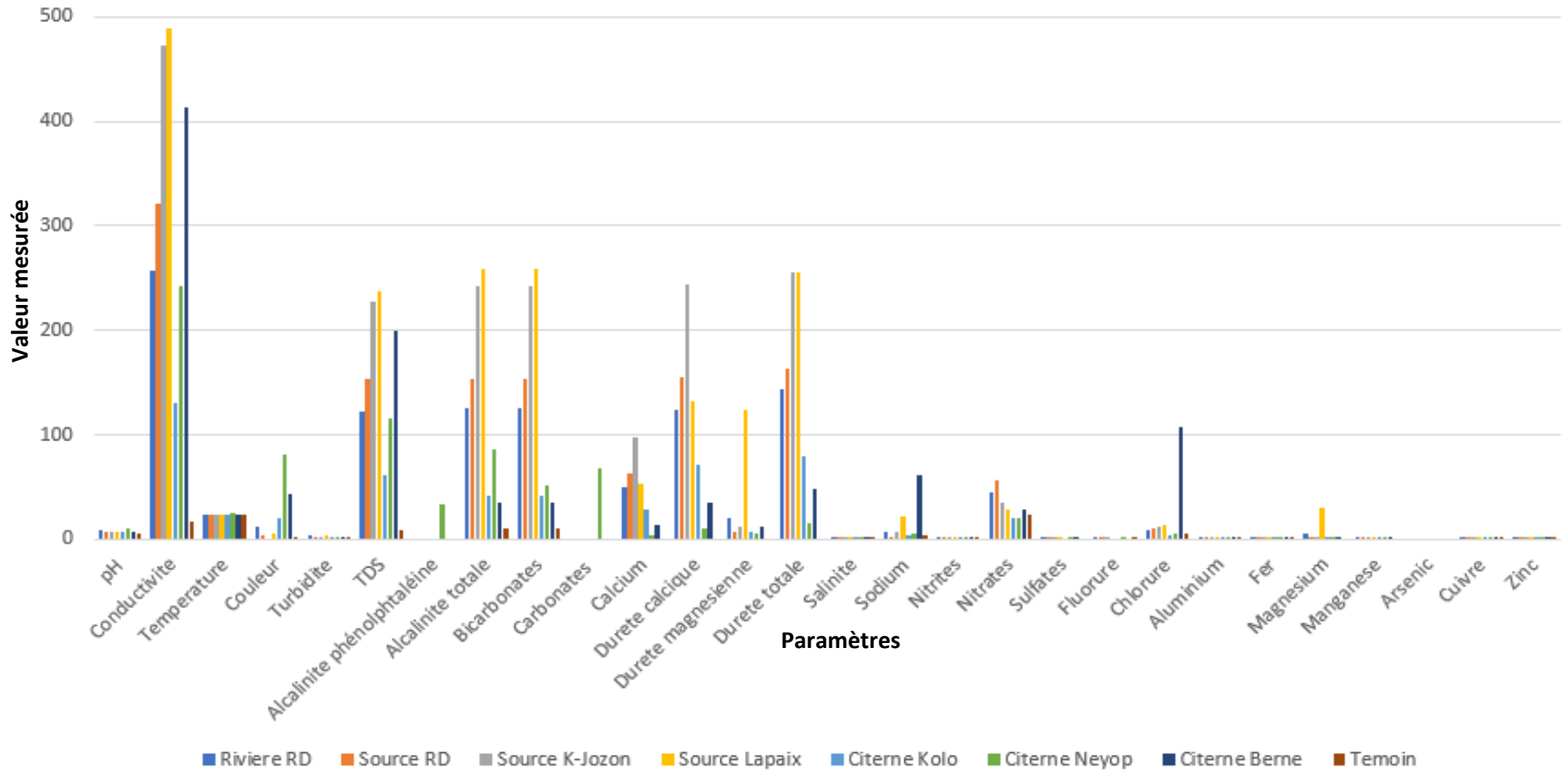


Figure 10. Histogramme de variation des paramètres étudiés dans les différents échantillons d'eau

Comme le montre la figure 10, les paramètres tels que la salinité, les nitrites, les sulfates, les fluorures, l'aluminium, le fer, le manganèse, le cuivre et le zinc sont présents à de très faibles concentrations dans tous les échantillons. L'arsenic est carrément nul pour tous les échantillons. Bien qu'elles soient conformes aux normes, les valeurs les plus élevées en conductivité électrique, TDS, alcalinité totale, bicarbonates et dureté totale sont observées dans la source Lapaix. Après vient la source K-Jozon pour ces mêmes paramètres. La citerne Berné occupe la troisième place en terme de valeur en conductivité élevée. Par contre, la source Ravine Diable suit les sources Lapix et K-Jozon pour l'alcalinité totale, les bicarbonates et la dureté totale.

De ces paramètres étudiés, quatre (4) classes peuvent être distinguées : paramètres physiques (pH, conductivité, température) ; paramètres organoleptiques (couleur, odeur) ; paramètres chimiques (HCO_3^- , CO_3^{2-} , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_2^- , NO_3^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , dureté, alcalinité), et métaux (Mn, Fe, Al, As, Cu, Zn).

Dans les paramètres chimiques, les cations étudiés dans les eaux du sous-bassin sont constitués des ions Na^+ , Ca^{2+} et Mg^{2+} . Parmi ces cations, les plus importants sont le Ca^{2+} qui représente 66.38%, ensuite viennent le Na^+ (23.74%) et le Mg^{2+} (9.88%). Au niveau des anions, les plus importants sont le HCO_3^- qui représente 65.52%, le NO_3^- (16.90%), le Cl^- (11.88%), le CO_3^{2-} (4.9%) et le SO_4^{2-} (0.8%). Les nitrites et l'ion fluorure sont pratiquement inexistantes dans les eaux étudiées. La classification hydrochimique des eaux du sous-bassin versant de Ravine Diable montre que celles-ci sont principalement bicarbonatées calciques. Le Diagramme triangulaire de Piper suivant (figure 11) illustre l'hydrochimie des eaux consommées par la population du sous-bassin.

Diagramme de Piper

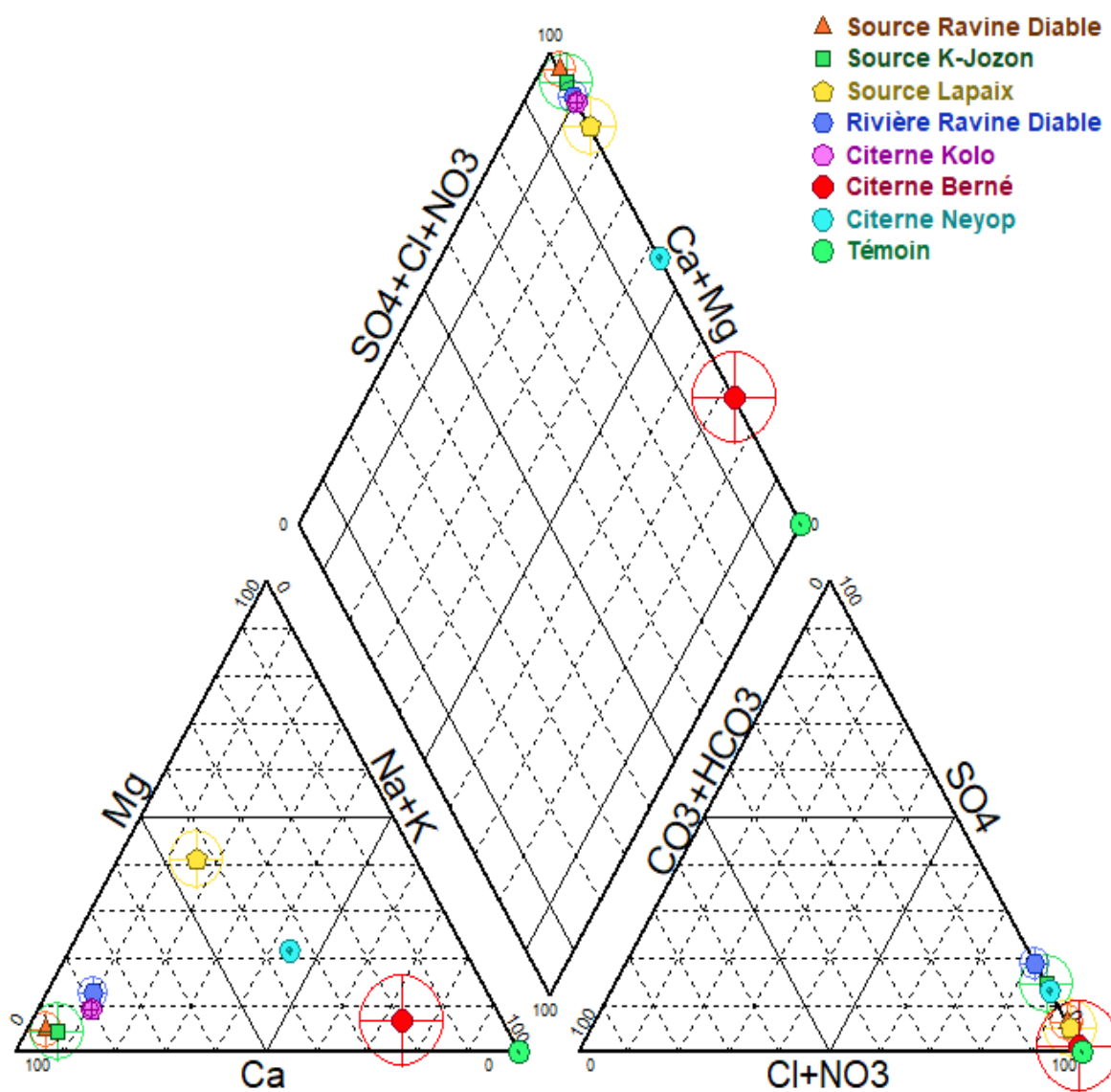


Figure 11. Représentation de la classification hydrochimique des échantillons d'eau

IV.1.3.- Qualité microbiologique

IV.1.3.1. Qualité microbiologiques des points d'eau analysés

De mêmes pour les analyses physico-chimiques, les échantillons d'eau soumis au test microbiologique ont été prélevés au cours de la campagne de prélèvement du 04 avril 2017. Les concentrations des germes de bactéries qui ont été déterminées pour chaque point d'eau analysée sont présentées dans le tableau 14.

Tableau 14. Concentrations des germes de bactéries isolées dans les échantillons d'eau analysés

Germes	Concentrations isolées par points de prélèvement (CFU/100 ml)								Normes(CFU/100ml)	
	Source RD	Source K-J	Source LP	Rivière RD	Citerne Kolo	Citerne Berné	Citerne Neyop	Témoin	OMS	UE
Coliformes fécaux	180	86	> 200	> 200	< 1	152	< 1	< 1	0	0
Coliformes totaux	> 200	> 200	> 200	> 200	12	> 200	8	38	0	0
<i>E. coli</i>	122	68	192	184	< 1	50	< 1	< 1	0	0
Numération des germes	> 200	> 200	> 200	> 200	40	> 200	26	200		

Ces résultats montrent que les eaux des citernes Kolo et Neyop sont conformes aux normes microbiologiques pour les coliformes fécaux et *Escherichia coli*. Cette observation est la même pour l'échantillon témoin qui est provenu de l'une des plus grandes compagnies d'eau potable en Haïti. Par contre, pour les deux autres paramètres testés (coliformes totaux et numération des germes), ces trois (3) échantillons (citerne Kolo, citerne Neyop et témoin) ont montré des concentrations supérieures aux normes. Quant aux échantillons d'eau de source, de rivière et de la citerne Berné, aucun des paramètres testés n'est conforme aux normes internationales admises. En d'autres termes, l'eau destinée à la consommation humaine dans le sous-bassin versant de Ravine Diable est contaminée par des germes de bactéries d'origine fécale. Cette contamination microbienne touche aussi à l'échantillon témoin, commercialisé sur le marché haïtien comme de l'eau potable.

IV.1.3.2.-Comparaison des paramètres microbiologiques pour les points d'eau étudiés

La densité de germes de bactérie mesurée dans les échantillons d'eau analysés présente une certaine différence d'un échantillon à un autre hormis la source Lapaix et la rivière Ravine Diable dont la tendance est identique (figure 12).

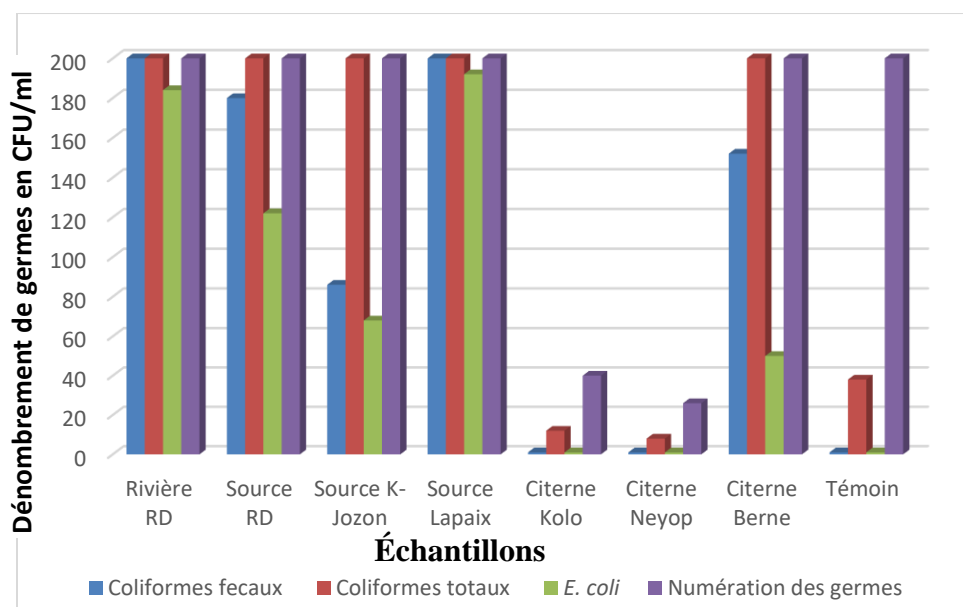


Figure 12. Dénombrement de germes de bactérie dans les échantillons d'eau analysés

Comme illustre la figure 12, les citernes Kolo et Neyop ont la charge microbienne la plus faible parmi l'ensemble des échantillons analysés, y compris le témoin. La source Lapaix et la rivière Ravine Diable présentent une concentration élevée pour tous les germes recherchés. Globalement, ce sont les coliformes totaux et la numération des germes qui sont les plus nombreux dans les eaux du sous-bassin versant. Les coliformes fécaux et *Escherichia coli* évoluent dans le même sens pour tous les échantillons. Quand la concentration en coliformes fécaux augmente, celle d'*Escherichia coli* augmente aussi. Mais les coliformes fécaux présentent toujours une concentration supérieure à *Escherichia coli* quand celle-ci n'est pas inférieure à l'unité.

IV.1.4.-Sources éventuelles de contamination des eaux

Les informations recueillies et les observations faites sur le terrain au cours de la campagne de collecte de données ont permis de comprendre que les activités humaines, la faible accessibilité au service d'assainissement de base et le déficit en hygiène publique pourraient être à la base des cas de pollution bactériologique rencontrée dans les eaux du sous-bassin versant. Les principales sources éventuelles de contamination identifiées sont les suivantes :

- Un faible taux de couverture en assainissement de base ;
- L'absence de protection des sources ;
- L'agriculture et les excréments du bétail ;
- Non différenciation de l'aire de prélèvement pour la consommation humaine de celle d'abreuvement des animaux ;
- Le mauvais état des citernes, dalots et toitures des maisons

IV.1.4.1.- Faible taux de couverture en assainissement de base

Jusqu'à ce jour, l'accès au service d'assainissement de base reste une préoccupation majeure dans le milieu rural haïtien. Le sous-bassin de Ravine Diable n'en est pas exempt. Sur 150 ménages enquêtés dans huit (8) localités du sous-bassin versant (figure 13), 44.23% disposent d'une latrine familiale. Plus de la moitié de la population, soit 55.77%, pratique la défécation à l'air libre. Ce qui constitue un véritable risque de détérioration de la qualité de l'eau.

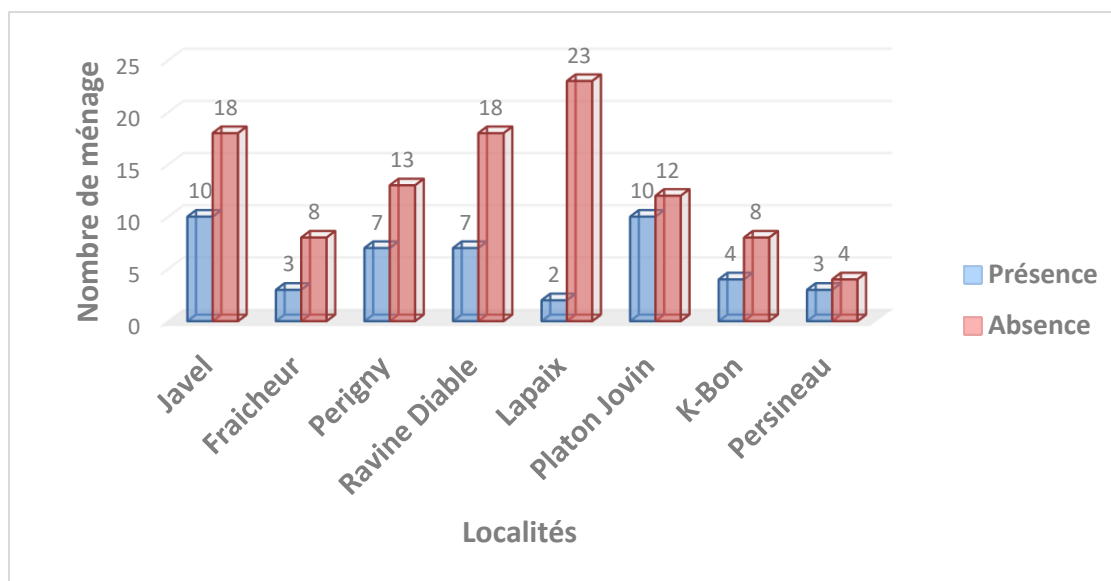


Figure 13. Occurrence des latrines par localité dans les ménages enquêtés

IV.1.4.2.- Absence de protection des sources

Se basant sur les conditions environnementales et les activités anthropiques, toutes les sources d'eau du sous-bassin versant présentent une certaine vulnérabilité. Aucun ouvrage physique de protection n'est construit. Par ailleurs, aucun aménagement parcellaire n'a été observé en amont des sources. Au contraire, à quelques mètres près (3-4m) de la source de Ravine Diable par exemple, la plus importante source de prélèvement d'eau par la population dans le sous-bassin, un sablier (*Hura crepitans*) sert de point de parcage des animaux après l'abreuvement jusqu'au retour à la maison ou au pâturage.

IV.1.4.3.-Excréments de bétail et agriculture

Dans le périmètre immédiat des sources, l'agriculture et l'élevage sont des activités couramment rencontrées. L'utilisation d'engrais chimique est très rare dans ces zones. Mais les excréments de bétail peuvent être facilement transportés par le vent et les eaux de ruissellement pour contaminer les sources en aval.

IV.1.4.4.-Non différenciation de l'aire de prélèvement pour la consommation humaine de celle d'abreuvement des animaux

Les sources destinées à la consommation humaine sont aussi utilisées pour l'abreuvement des animaux sans séparation aucune de l'aire d'utilisation. Les animaux se désaltèrent au même endroit de prélèvement que les humains. Le pire, un individu qui part à la recherche de l'eau accompagné de son animal (cheval, mulet, bœuf) laisse d'abord à l'animal de s'abreuver avant de remplir son récipient (gallon, seau) dans cette même source d'eau.

IV.1.4.5.- État des citernes, dalots et toitures des maisons

Les citernes et dalots servant à de récolte de l'eau de pluie ont présenté beaucoup de déficits en hygiène. Le lavage des citernes se fait au maximum quatre fois par année. Des couches de débris végétaux (paille verte, feuilles sèches) emportées par le vent ainsi que des fientes des oiseaux peuvent s'accumuler dans les dalots, se décomposent et pénètrent dans la citerne. Rares sont les citernes qui sont munies d'une crépine à l'entrée de l'eau pour retenir les débris. Quant aux toitures des maisons, majoritairement en tôle, des cas d'oxydation s'observent presque partout (figure 14).



Figure 14. Vue de l'état d'une citerne et de la toiture de l'habitat (Orélien, 2017).

IV.2.- Discussion

IV.2.1.- Ressources en eau destinées à la consommation humaine

Ce travail a montré l'existence de trois types d'eau exploitée pour les besoins domestiques par la population dans le sous-bassin de Ravine Diable : 10 sources, 1 rivière et 44 citernes familiales servant à stocker l'eau de pluie. Par contre, ces ressources en eau sont inversement réparties par rapport à la répartition des habitats. Les sources et la rivière se trouvent dans la zone la moins habitée alors que dans la zone la plus habitée seulement 44 citernes familiales existent. Cette répartition inverse pourrait s'expliquer par le fait que les sources se concentrent dans la partie enclavée (en aval) du sous-bassin. Elle est accessible soit à pied ou à dos d'animaux. Cependant, en dépit de sa pauvreté hydrique, la partie amont du sous-bassin est très habitée. Ce fait est dû à la carrossabilité de la route, à l'accès à certains services sociaux de base (école, dispensaire, marché public) et à la possibilité offerte par cette zone pour cultiver une plus grande diversité de culture grâce à la nature du sol. Pour son approvisionnement eau, la majorité de la population a dû consacrer 2h à 3h de marche presque quotidiennement, surtout en période de sécheresse.

IV.2.2.- Qualité des eaux destinées à la consommation humaine

IV.2.2.1.- Paramètres organoleptiques

Du point de vue de l'odeur, les résultats trouvés ont montré que les échantillons d'eau étaient tous inodores. Ce qui est conforme aux normes. Par contre, du point de vue de la couleur, les trois (3) échantillons d'eau de citerne ont eu des problèmes de conformité. L'eau de la rivière montre aussi une valeur qui s'approche de la valeur seuil. Ce problème de couleur pourrait être dû à une accumulation et à la décomposition d'une quantité trop importante de matière organique ou à des particules en suspension dans l'eau. Cette hypothèse reste cependant à vérifier.

IV.2.2.2.- Paramètres physico-chimiques liés à la structure naturelle de l'eau et aux eaux adoucies

En rapport à la structure naturelle de l'eau et aux eaux adoucies, nous avons considéré dans le cadre de ce travail les paramètres suivants : le pH, la température, la conductivité électrique, l'alcalinité, la turbidité, la dureté, les chlorures, les TDS, la salinité, les carbonates et bicarbonates, les sulfates, le calcium, le magnésium, le sodium et l'aluminium. Pour les paramètres température, pH et conductivité dont les analyses ont été réalisées *in situ*, il ressort des résultats que :

- 1) La température des échantillons d'eau analysée varie de 24.3 à 24.6 °C. Ce qui montre une conformité par rapport à la valeur guide de l'UE fixée à 25 °C. Étant un facteur de modification des propriétés chimiques et biologiques de l'eau en agissant sur sa densité, la solubilité des gaz, la dissociation des sels dissous, les réactions biochimiques et biologiques (Makhoukh et al., 2011 ; Akil et al, 2014), cette variation de température pourrait signifier que ces eaux sont de bonne qualité, car les températures ne sont pas assez élevées pour affecter leurs propriétés organoleptiques.
- 2) La détermination du pH a permis de mesurer la concentration en ions H⁺ contenus dans les échantillons d'eau analysée. Les valeurs obtenues ont montré que le pH est légèrement neutre à alcalin pour six (6) échantillons dont les 3 sources, 2 citernes et la rivière. En effet, il varie de 6.98 à 8.27. Ceci pourrait s'expliquer par la présence des bicarbonates qui ont un pouvoir tampon dans les eaux. Les normes édictées par la réglementation de l'OMS et de l'UE recommandant un pH qui varie de 6.5 à 8.5 (OMS) et de 6.5 à 9.5 (UE) ont montré la conformité de ces échantillons. D'autres auteurs dont Wanélus (2016) et Kahoul et Touhami (2014) ont trouvé des résultats qui se rapprochent de ceux enregistrés pour ces six (6) échantillons. Par contre, l'échantillon témoin et la citerne Neyop accusant respectivement un

pH de 6.17 et 10.08 sont hors des normes. Il convient de souligner que la citerne Neyop a été construite en juin 2016. Étant à peine construite (par rapport aux autres), cette valeur de pH élevé qui y a été mesurée pourrait s'expliquer par le ciment utilisé dans la construction.

- 3) La mesure de la conductivité électrique permet de se faire une appréciation du niveau de minéralisation de l'eau (Rodier et *al.*, 2009 ; Makhoukh et *al.*, 2011 ; Belghiti et *al.*, 2013). Les minima et maxima enregistrés ont montré un écart assez important mais conformes aux normes. Ils varient de 131 à 489 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et traduisent une minéralisation faible à modérément accentuée. Cette minéralisation est encore plus faible dans l'échantillon témoin car sa conductivité électrique est de 17.77 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Par contre, Wanélus (2016) a trouvé des résultats un peu différents. Il a révélé que les points d'eau qu'il a analysés présentaient une minéralisation qui varie de modérément accentuée à une minéralisation importante. Cette légère dissemblance peut être due à une différence de concentration en sels dans les eaux.

En ce qui a trait aux autres paramètres (turbidité, dureté, chlorures, TDS, calcium, sulfates, aluminium, etc.), leur détermination a été faite au laboratoire. Les résultats ont montré qu'il y a un problème de conformité par rapport aux normes pour la turbidité dans la source Lapaix, la rivière Ravine Diable, les citernes Berné et Neyop. Les valeurs mesurées ont été respectivement 4.15, 3.8, 1.4 et 1.23 NTU. Par contre, la turbidité moyenne obtenue pour les 7 échantillons d'eau provenant du sous-bassin est égale à 4.15 NTU. Cette valeur se rapproche de la moyenne 4.08 NTU trouvée par Ahoussi et *al.* (2013). Ce problème, qui peut être dû à la présence des particules dans l'eau, se montre plus accentué dans la source et la rivière que dans les citernes. Aussi, une non-conformité en aluminium a été constatée pour la citerne Neyop. Ceci pourrait peut-être s'expliquer par l'utilisation d'un sel d'aluminium pour le traitement de l'eau ou du ciment utilisé dans la construction. Tous les autres paramètres sont conformes à la grille des normes de l'OMS et de l'UE.

IV.2.2.3.- Paramètres indésirables

Concernant les paramètres indésirables considérés (nitrites, nitrates, fluorures, Cu, Mn, Zn), les concentrations maximales mesurées (0.0164 mg/L en NO_2^- , 55.8 mg/L en NO_3^- , 0.12 mg/L en F⁻, 1.33 mg/L en Cu, 0.024 mg/L, 0.85 mg/L en Zn) dans les échantillons analysés sont conformes aux normes de l'OMS et de l'UE qui sont les normes de référence utilisées en Haïti en matière de qualité de l'eau, sauf les nitrates dont la norme est de 50mg/L. Toutefois, sur la base de ces concentrations, nous avons observé que la concentration en cuivre tend à s'approcher de la valeur

guide dans l'échantillon de la source Ravine Diable. Il a accusé une teneur de 1.33 mg/L alors que la norme est de 2 mg/L. Ces situations sont probablement dues aux activités agricoles pratiquées dans le sous-bassin. Les nitrates étant un fertilisant chimique hydrosoluble et instable très utilisé dans l'agriculture, ils peuvent facilement intégrer le cycle hydrologique par ruissellement et infiltration pour contaminer les sources et la rivière (Levallois et Phaneuf, 1992 ; WHO, 2011 ; Akil et *al*, 2014). Quant au cuivre, il peut être non seulement utilisé comme fertilisant chimique mais aussi dans la fabrication des fongicides (INERIS, 2005). Vu que ces paramètres (NO_3^- et Cu), à concentration élevée, peuvent poser de graves problèmes de santé (Levallois et Phaneuf, 1992 ; Gaudreau et Mercier, 1998 ; Mohod et Dhote, 2013), une intervention particulière et rapide devrait leur être faite. Pour le fer, le maxima de 2 mg/L mesuré dans la source Ravine Diable est supérieure à la norme. Ceci pourrait être dû au phénomène de lessivage des sols dans le sous-bassin versant. D'autres auteurs ayant travaillé sur la problématique de la qualité de l'eau ont trouvé des résultats qui se rapprochent de ceux de la présente étude. Wanélus (2016) a mesuré dans la région métropolitaine de Port-au-Prince des concentrations qui varient de 0.002 à 0.018 mg/L en Cu, de < 0.015 à 0.35 mg/L en Zn, et de < 0.015 à 0.066 mg/L en Fe. Au Bénin, Makoutode et *al* (1999) ont mesuré des concentrations en nitrates, en fer et en manganèse dans les eaux de puits de la sous-préfecture du Grand-Popo. Ils ont montré que plus 50% des échantillons présentaient des concentrations en nitrates supérieures à 10 mg/L. Pour le fer et le manganèse, la concentration mesurée a varié de 0 à 1 mg/L.

IV.2.2.4.- Paramètre toxique

L'arsenic a été le seul paramètre toxique considéré dans ce travail. Sa valeur mesurée a été inférieure à la limite de quantification (1 $\mu\text{g/L}$) pour tous les échantillons d'eau analysés. Selon Mohod et Dhote (2013), les métaux toxiques sont généralement présents dans les effluents industriels, municipaux et urbains. Cette faible concentration mesurée pour l'arsenic pourrait être liée à l'absence complète d'activités industrielles et d'effluents municipaux dans la zone. Par ailleurs, pour combattre les ravageurs des cultures (les rats), il se peut que les agriculteurs n'aient pas recours au raticide car les paysans haïtiens sont très attachés aux pièges traditionnels. Wanélus (2016), dans son travail de caractérisation de l'eau destinée à la consommation humaine dans la région métropolitaine de Port-au-Prince, a trouvé des résultats identiques (< 1 $\mu\text{g/L}$) à la présente étude. Dans l'ouest montagneux de la Côte d'Ivoire, Ahoussi et *al* (2013) ont montré aussi que des concentrations très faibles en arsenic (< 0.002 mg/L) ont été obtenues dans les eaux des sources

exploitées par la population du village Mangouin-Yrongouin. Il semble qu'en absence des activités industrielles, la concentration de ce metalloïde dans les eaux naturelles ne pose presque pas de problème de conformité aux normes.

IV.2.2.5.- Paramètres microbiologiques

Sur la base des résultats obtenus pour les paramètres microbiologiques qui ont été considérés en vue d'évaluer la salubrité de l'eau destinée à la consommation humaine dans le sous-bassin d'étude, nous pouvons catégoriser en deux (2) les échantillons d'eau analysée. Il s'agit, d'une part, des points d'eau qui ne présentent aucune conformité sur le plan microbiologique et d'autre part, des points d'eau dont la conformité est constatée pour deux (2) sur les quatre (4) paramètres analysés.

Dans la première catégorie, nous retrouvons les trois (3) sources analysées (source Lapaix, source Ravine Diable et source K-Jozon), l'échantillon prélevé dans la rivière et la citerne Berné. Pour les sources et la rivière, bien qu'une différence relative en densité de germes mesurés ait été constatée comme le montre le tableau 13, la source de cette contamination pourrait être la même. Il s'agit probablement du mode de gestion des excréta humains et des fèces d'animaux.

En effet, les données collectées par rapport à l'hygiène et l'assainissement dans le sous-bassin ont fait état d'un taux de 44.23% de ménages qui disposaient d'une latrine familiale. Plus de la moitié de cette population qui n'a pas accès à une latrine défèque à l'air libre (à même le sol). Le vent et les eaux de ruissellement pourraient servir d'agent de transport de ces excréta du milieu récepteur jusqu'aux sources et à la rivière. Par ailleurs, dans le périmètre immédiat de ces points d'eau ainsi que dans leur périmètre éloigné, nous avons observé la présence de beaucoup d'animaux d'élevage (caprin, bovin, équin, etc.) qui sont conduits de part et d'autre (en amont, en aval, latéralement) de ces points d'eau. Les excréments de ces animaux, sources de pollution, pourraient aussi être emportées par le vent et la pluie et provoquent la contamination de ces derniers. Surtout avec une pluviométrie qui varie de 1600 à 2600 mm/an dans le sous-bassin versant, le transport par ruissellement pourrait s'avérer important.

En ce qui a trait à la citerne Berné, ce résultat pourrait trouver son explication dans les déficits d'hygiène constatés (figure 15). La citerne n'est assez bien gérée pour éviter ces cas de contamination. Le lavage de propreté n'est pas régulier. Elle n'est pas hermétiquement fermée ni toujours couverte. La maison d'habitation se trouve en plein cœur d'une zone où l'agriculture et

l'élevage sont très pratiqués. Les fèces des bétails peuvent être transportées sur la toiture des maisons qui sert à capter l'eau de pluie pour se retrouver finalement dans la citerne.

Ces indicateurs microbiens de pollution fécale témoignent une contamination récente et une présence possible des micro-organismes pathogènes (bactéries, virus, protozoaires parasites) susceptibles de provoquer le développement des maladies entériques chez les consommateurs (Verhille, 2013).



Figure 15. Vue de la citerne Berné (Orélien, 2017)

D'ailleurs, bien qu'elles soient réalisées sur des paramètres et dans des conditions environnementales différents de la présente étude, Brasseur et *al* (2001) et Balthazard- Accou (2011) ont déjà conduit des études qui ont mis en évidence des germes pathogènes (oocystes de cryptosporidies) dans les eaux de surfaces ainsi que dans des eaux destinées à la consommation humaine en Haïti, notamment à Port-au-Prince et dans la ville des Cayes. Ces oocystes sont des parasites qui infectent l'intestin d'un grand nombre de vertébrés (Balthazard- Accou, 2011). Emmanuel et Landskog (2002) ont montré des amas en coliformes totaux et fécaux dans les eaux exploitées pour la région métropolitaine de Port-au-Prince. Par ailleurs, des études réalisées par Ahoussi et *al* (2013) en Côte d'Ivoire, Makoutode et *al* (1999) au Bénin, Nola et *al* (1998) au Cameroun qui sont des pays en développement comme Haïti, ont tous montré des cas de contamination des eaux par *E. coli*, *Salmonella spp*, les coliformes totaux et fécaux ainsi que les streptocoques fécaux, tant en milieu rural qu'en milieu urbain.

Dans la deuxième catégorie, il y a les citernes Kolo et Neyop et l'échantillon témoin. Ces trois échantillons ont satisfait aux normes pour les coliformes fécaux et *Escherichia coli*. Par contre, pour les coliformes totaux et la numération des germes, ils sont tous non conformes. Dans ces deux citernes, la conformité observée pour ces deux paramètres (coliformes fécaux et *E. coli*) pourrait être due au traitement par chloration, car les propriétaires ont rapporté qu'ils savaient utiliser le chlore pour traiter l'eau. Vu que ces bactéries sont très sensibles au chlore, son application dans le traitement de l'eau peut les éliminer.

Il convient de souligner que ce mode de traitement a été mentionné par Emmanuel et Landskog (2002) comme le seul rencontré pour le traitement de l'eau destinée à la consommation humaine en Haïti. En dépit des effets secondaires (formation de THM) signalés par Emmanuel et Landskog (2002) que la chloration peut provoquer quand l'eau est riche en matière organique, Mahfouz et al. (1995) ont montré l'efficacité du traitement par chloration contre les bactéries qui lui sont sensibles. Les coliformes totaux et la numération des germes à 36 °C qui ont été observés pourraient résulter d'un développement d'une plus grande résistance à la chloration ou d'une insensibilité totale. Quant à l'échantillon témoin, qui est une eau traitée très commercialisée et appréciée par les consommateurs dans le pays, l'absence de ces germes devrait être une évidence. Par contre, il montre une situation un peu contraire (38 CFU/100ml de coliformes totaux et plus de 200 CFU/100 ml de numération des germes). Cette situation est probablement due à l'inefficacité ou la défaillance du service de traitement bactériologique.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Ce travail porté sur l'eau destinée à la consommation humaine dans le sous-bassin de Ravine Diable a permis de pourvoir à la communauté scientifique et à tout intéressé une compréhension globale du type et de la qualité de l'eau consommée par la population à l'échelle locale. Il ressort des résultats obtenus que dix (10) sources, une (1) rivière et quarante-quatre (44) citernes familiales constituent les points d'approvisionnement en eau par la population pour tous les usages domestiques (boisson, cuisine, lessive, baignade). Ces points d'eau sont mal répartis par rapport à la distribution dans l'espace des habitats dans le sous-bassin. Les observations réalisées ont permis de constater que la majorité des habitats se trouvent dans la partie amont du sous-bassin versant alors que seulement quelques familles ont une certaine accessibilité à l'eau en temps pluvieux via les citernes familiales. Les ressources en eau permanentes (sources et rivière) se concentrent dans la partie la moins habitée du sous-bassin. Ce qui oblige à la majorité de la population 2h à 3h de marche pour s'approvisionner en eau, surtout en période de sécheresse. Les sources d'eau ne sont pas protégées. Le taux de couverture en assainissement de base reste encore faible, soit 44.23%.

Sur le plan qualitatif, cette étude a montré que la quasi-totalité des paramètres physico-chimiques analysés sont conformes aux normes de l'OMS et de l'UE. En effet, sur les vingt-neuf (29) paramètres physico-chimiques qui ont été considérés dans le cadre de ce travail, six (6) se révèlent non conformes dans les huit (8) échantillons. Il s'agit de la couleur au niveau de la source Lapaix et des citernes Kolo, Neyop et Berné ; de la turbidité au niveau de la source K-Joson, de la rivière Ravine Diable et des citerne Berné et Neyop ; du fer dans la source Ravine Diable ; de l'aluminium au niveau de la citerne Neyop ; du pH au niveau de l'échantillon témoin et de la citerne Neyop, et des nitrates au niveau de la source Ravine Diable. Toutefois, en dépit de la conformité des nitrates dans l'eau de rivière et du cuivre dans la source Ravine Diable, ces deux paramètres requièrent une certaine attention, car leurs concentrations tendent à s'approcher des valeurs guides. Par contre, les analyses microbiologiques ont montré la présence de coliformes totaux, de coliformes fécaux, d'*Escherichia coli* et des germes à 36 °C dans tous les échantillons d'eau de source, dans la rivière et dans une (1) des trois (3) citernes analysées. Les deux (2) autres citernes sont conformes en *Escherichia coli* et coliformes fécaux. Ce défaut de conformité au plan microbiologique a concerné aussi l'échantillon témoin pour les paramètres coliformes totaux et

numération des germes. Fort de ces résultats, notre hypothèse de recherche est donc confirmée en partie.

La présence de ces indicateurs microbiens de pollution fécale dans les eaux du sous-bassin versant montre que celles-ci sont exposées à une source de contamination microbiologique. Ces micro-organismes présents dans les eaux témoignent non seulement l'influence des activités humaines sur la qualité des eaux mais aussi la possibilité d'existence d'autres micro-organismes pathogènes susceptibles de provoquer le développement des maladies entériques chez les populations qui sont largement tributaires de ces ressources en eau pour satisfaire leurs besoins.

Les conclusions tirées de ce travail pourraient être entachées d'un certain biais du fait que les prélèvements n'ont pas tenu compte de la saisonnalité. Ils n'ont pas été non plus doublement échantillonnés à cause du manque de temps et de moyen. Il importe de poursuivre cette étude en intégrant ces considérations en vue d'avoir une meilleure assurance de la fidélité de ces conclusions par rapport à la qualité de l'eau destinée à la consommation humaine dans le sous-bassin versant de Ravine Diable.

Toutefois, sur la base de ces constatations, des mesures urgentes incluant la population locale, les autorités locales (Mairie, Conseil d'Administration de la Section Communale (CASEC), Assemblée de la Section Communale (ASEC)), les organisations communautaires de base ainsi que les groupements planteurs devraient être envisagées dans la perspective de prévenir la population des risques de santé encourus par la consommation de ces eaux,. En ce sens, il serait important :

- a) d'entreprendre une campagne de sensibilisation et de formation sur l'hygiène publique et les opérations de traitement de l'eau par désinfection (ébullition, chloration) en vue d'éliminer les micro-organismes qui y sont présents ;
- b) d'envisager de faire la promotion et la vulgarisation des systèmes personnels de traitement de l'eau du genre Katadyn ;
- c) de définir une zone tampon en amont des sources afin de protéger les ressources en eau de toutes les formes de pollution directes influencées par les activités humaines ;
- d) de rationaliser l'application des engrais azotés dans les cultures en vue d'éviter d'accroître la teneur en azote dans les eaux ;

- e) de mobiliser les communautés riveraines à l'appropriation de la problématique de la gestion de l'environnement pour réduire la vulnérabilité des ressources en eau aux foyers de pollution ;
- f) de capter les sources les plus importantes en termes de débit et d'utilisation en vue de limiter les risques de contamination tout venant ;
- g) d'entreprendre un programme de construction de latrines familiales dans tout le sous-bassin versant afin de réduire les risques de contamination hydro-fécale due à la défécation à l'air libre ;
- h) d'engager la mise en œuvre d'un projet de construction de citernes familiales dans la partie amont du sous-bassin versant en vue d'améliorer l'accessibilité et l'approvisionnement de la population aux ressources en eau.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Ahoussi K. E., Koffi Y. B., Kouassi A. M., Soro B., Biemi J. 2013. Etude hydrochimique et microbiologique de l'ouest montagneux de la Cote d'Ivoire : Cas du village de Mangouin-Yrongouin (sous-préfecture de Biankouman). 17p.
- Akil A., Hassan T., Fatima E. H., Lahcen B., Abderrahim L. 2014. Etude de la qualité physico-chimique et contamination métallique des eaux de surface du bassin versant de Guigou, Maroc. 11p.
- Angerville R., Rony F. J., Balthazard-Accou K., Joseph O., Emmanuel E., Perrodin Y. 2004. Assessment of human exposures to lead in drinking water. 8p.
- Balthazard-Accou, K., 2011. Contamination microbiologique des eaux souterraines de la ville des Cayes, Haïti. Evaluation des risques pour la santé des consommateurs. Thèse de doctorat. Université de Picardie Jules Verne & Université Quisqueya, 208p.
- Barry G.S. 1989. Sodium sulfate. Canadian minerals yearbook-1988. Mineral report, N° 37. Division des ressources minérales, énergie, mines et ressources. Ottawa.
- Belghiti M. L., Chahlaoui A., Bengoumi D., El Moustaine R. 2013. Etude de la qualité physico-chimique et bactériologique de la nappe plio-quadernaire de la région de Meknès (Maroc). 16p.
- Bertini I., Gray H. B., Lippard S. J., Valentine J. S. 1994. Bioinorganic chemistry. University Science Books, Mill Valley, California. 628p.
- Bienvenue V. 2012. Diagnostic de la filière igname (*Disocorea sp*) dans le sous-bassin versant Ravine Diable. Mémoire de Fin d'Etudes. Université Episcopale d'Haïti. 52p.
- Bouchard M. F., Sauvé S., Barbeau M., Legrand M., Brodeur T., Bouffard E., Limoges E., Bellinger D. C., Mergler D. 2011. Intellectual impairment in school-age children exposed to manganese from drinking water. Environmental Health Perspectives. 119: 138-143.
- Bouguerra M. L. 2003. Les batailles de l'eau pour un bien commun de l'humanité. Enjeux, Planète. Une collection mondiale pour une autre mondialisation. 225p.
- Brangeon S. 2015. La gestion des déchets des acteurs de l'aide. Etude de cas : Haïti. CEFREPADE. Observatoire du groupe URD en Haïti. 44p.

- Bras A., Emmanuel E., Obicson L., Brasseur P., Pape J. W., Raccurt C. P. 2007. Évaluation du risque biologique dû à *Cryptosporidium* sp présent dans l'eau de boisson à Port-au-Prince (Haïti). 10p.
- Brasseur P., Eyma E., Li X., Verdier R. I., Agnamey P., Liataud B., Dei Cas E., Pape J. W., RACCURT C. 2001. Circulation des oocystes de *Cryptosporidium* dans les eaux de surface et de distribution par adduction publique à Port-au-Prince, Haïti. In : Actes du Colloque International réalisé à Port-au-Prince les 26, 27, 28 juin 2002. p173-176.
- Centre d'Expertise en Analyse Environnementale du Québec. 2016. Méthode d'analyse. Détermination de la turbidité dans l'eau: méthode néphélométrique. 11p.
- Chan C. L., Zalifah M. K. et Norrakiah A. S. 2007. Microbiological and physicochemical quality of drinking water. 8p.
- Chouhan S. et Flora S. J. S. 2012. Arsenic and fuloride : Two major ground water pollutants. 13p.
- Dartigues J.-F., Berr C., Helmer C., Letenneur L. 2002. Épidémiologie de la maladie d'Alzheimer. 7p.
- Chouti W. K. 2007. Evaluation de la qualité des eaux des puits couverts munis de pompe dans la commune de Porto-Novo. Mémoire DESS. Université d'Abomey-Calavi.
- DINEPA. 2012. Plan d'élimination du cholera en Haïti, 2013-2022. 115p.
- Directive 98/83/CE du Conseil du 3 novembre 1998 relative à la qualité des eaux destinées à la consommation humaine. 28p.
- Djuikom E. Temgoua E., Jugnia L. B., Nola M., Baane M. 2009. Pollution bactériologique des puits d'eau utilisés par les populations dans la Communauté Urbaine de Douala – Cameroun. 12p.
- Duvivier P. 2006. Profil biophysique des communes de Paillant et de l'Anse-à-Veau. 44p.
- Edmond B. 2000. Possibilités d'amélioration de la desserte en eau de boisson de la zone Callebasse (4^e section Bellevue La Montagne), par captage de la source Biolé. Mémoire de Fin d'Études. Faculté d'Agronomie et de Médecine Vétérinaire. Université d'État d'Haïti. 50p.
- El Haissoufi H. Berrada S., Merzouki M., Aabouch M., Bennani L., Benlemlih M., Idir M., Zanibou A., Bennis Y., El Ouali Lalami A. 2011. Pollution des eaux de puits de certains quartiers de la ville de Fès, Maroc. 32p.

- Emmanuel E. 2004. Évaluation des risques sanitaires et écotoxicologiques liés aux effluents hospitaliers. Thèse de doctorat. Institut National des Sciences Appliquées de Lyon. 246p.
- Emmanuel E., Balthazard-Accou K., Joseph O. 2004. Impact of urban wastewater on the biodiversity of aquatic ecosystems. 42p.
- Emmanuel E., Fanfan N.P., Louis R. et Michel G. A. 2002. Détermination de la dose optimale dans l'eau destinée à la consommation humaine de la région hydrographique Centre-Sud de la République d'Haïti. Cahier de santé 12, (2) : 241-245.
- Emmanuel E. et Landskog P. (2002). Regards sur la situation des ressources en eau de la République d'Haïti. In : Actes du Colloque International réalisé à Port-au-Prince les 26, 27,28 juin. pp 32-54.
- Falkenmark, M. et Widstrand, C. 1992. Population and water resources: a delicate balance. Population Bulletin, Population Reference Bureau ; 47. Cités par François GADELLE In : Le monde manquera-t-il bientôt d'eau ? Sécheresse, vol. 6, 1995, 1 :11-15.
- Festy B., Hartemann P., Ledrans M., Levallois P., Payment P., Tricard D. 2003. Qualité de l'eau. In : Environnement et santé publique- Fondements et pratiques. pp.333-368.
- Fifi U. 2010. Impacts des eaux pluviales urbaines sur les eaux souterraines dans les pays en développement – mécanismes de transfert des métaux lourds à travers un sol modèle de Port-au-Prince, Haïti. Thèse de doctorat. 260p.
- Flanagan S. V., Spayd S. E., Procopio N. A., Chillrud S. N., Braman S. Zheng Y. 2016a. Arsenic in a private well water part 1 of 3: Impact of the New Jersey Private Well tasting Act on household tasting and mitigation behavior. 11p.
- Flanagan S.V., Spayd S. E., Procopio N. A., Chillrud S. N., Ross J., Braman N., Zheng Y. 2016b. Arsenic in a private well water part 2 of 3: Who benefits the most from traditional tasting promotion? 9p.
- Gaspard S. 2002. Conférence Introductive du Thème : Traitement et épuration des eaux. In : Actes du Colloque International réalisé à Port-au-Prince les 26, 27,28 juin. pp 219-229.
- Gaudreau D. et Mercier M. 1998. La Contamination de l'eau des puits privés par les nitrates en milieu rural. Direction De La Santé Publique Montérégie. 49p.
- Gurand G. 2010. Potentiométrie. Définitions et principes généraux. In : Les techniques d'analyse. Méthodes électrochimiques. 84p.

- Hébert S. et Légaré S. 2000. Suivi de la qualité de l'eau des rivières et des petits cours d'eau. Direction de suivi de l'état de l'environnement. Ministère de l'Environnement du Québec. 48p.
- Hem J. D. 1985. Study and interpretation of chemical characteristic of natural water. 3rd Edition. University of Virginia, United States of Geological Survey Water-Supply. Paper 2254 Washington, DC, USA. 263p.
- INERIS (Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques). 2010. Arsenic et ses dérivés inorganiques. Fiches de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques. 124p.
- INERIS (Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques). 2005. Zinc et ses dérivés. Fiches de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques. 69p.
- Jean-Pierre C. T., Simon Y., Charles T., Léandre I., Alfred F. et Emmanuel E. 2013. Health risk assessment of fluoride in drinking water: A case study from Arcahaie and Cabaret (Haiti). 4p.
- Kahoul M. et Touhami M. 2014. Evaluation de la qualité physico-chimique des eaux de consommation de la ville d'Annaba (Algérie). 10p.
- Kouam Kenmogne G-R. 2013. Vers une gestion rationnelle de l'eau dans une situation complexe d'urbanisation anarchique dans un pays en développement : Cas du bassin versant de l'Abièrgue (Yaoundé-Cameroun). Thèse de doctorat. Université de Liège, 272p.
- Leclerc H., Festy B., Lazar P. 1982. Connaissances actuelles sur la pathologie hydrique. Revue épidémiologie et Santé publique 30, 3. p363-385.
- Levallois P. et Phaneuf D. 1992. Les risques associés à la contamination de l'eau potable par les nitrates. Bulletin d'information en santé environnementale. Centre de santé publique de Québec. Volume 3 - No 3. 18p.
- Magny E. 1991. Haïti, Ressources Naturelles, Environnements : une nouvelle approche, édition Henri Deschamps. 252p.
- Mahfouz A. A. R., Abdel-Moneim M., Al-Erian R. A. G., Al-Amari O. M. 1995. Impact of chlorination of water in domestic storage tanks of childhood diarrhoea: a community trial in the rural areas of Saudi Arabia. 5p.
- Makhoukh M., Sbaa M.; Berrahou A., Van Clooster M. 2011. Contribution à l'étude physico-chimique des eaux superficielles de l'oued Moulouya (Maroc Oriental). 21p.

- Makoutode M., Assani A. K., Ouendo E. M., Agueh V. D., Diallo P. 1999. Qualité et mode de gestion de l'eau de puits en milieu rural au Bénin : cas de la sous-préfecture de Grand Popo. 7p.
- Meneton P. 2001. Le chlorure de sodium dans l'alimentation : un problème de santé publique non résolu. 17p.
- Mohod C. V., Dhote J. 2013. Review of heavy metals in drinking water and their effect in human health. 5p.
- Museau H. 2003. Diagnostic de la filière carotte (*Daucus carotta*, L.) au niveau du Plateau de Rochelois. Mémoire de Fin d'Études, FAMV/ UEH, Damien. Haïti. 52p.
- Nola M., Njine T., Monkiedje A., Foko S. V., Djuikom E., Talliez R. 1998. Qualité bactériologique des eaux des sources et des puits de Yaoundé (Cameroun). 7p.
- Odoulami L. 2009. Problématique de l'eau potable et de la santé humaine dans la ville de Cotonou (République du Bénin). Thèse de doctorat. Université d'Abomey-Calavi. 230p
- OMS (Organisation Mondiale de la Santé). 2000. Directives de qualité pour l'eau de boisson. Critères d'hygiène et documentation. 2nd édition. Genève, 1050p.
- OPS/OMS (Organisation Panaméricaine de la Santé/Organisation Mondiale de la Santé). 2003. Développement durable et santé environnementale en Haïti. Proposition pour la mobilisation des ressources. 51p.
- OMS (Organisation Mondiale de la Santé). 2004. Directives de qualité pour l'eau de boisson. Troisième Edition. Volume 1. Recommandations. Genève. 110p.
- OMS (Organisation Mondiale de la Santé). 2013. Directives OMS pour l'utilisation sans risque des eaux usées, des excréta et des eaux ménagères. Utilisation des excréta et des eaux ménagères en agriculture. Volume IV. 32p.
- OMS/UNICEF. 2000. Programme conjoint de surveillance de l'approvisionnement en eau et de l'assainissement. Rapport sur l'évaluation de la situation mondiale de l'approvisionnement en eau et de l'assainissement.
- Payment P. et Hartemann P. 1998. Les contaminants de l'eau et leurs effets sur la santé. 13p.
- Prevedello C. 2006. La qualité de l'eau d distribution. Dossier scientifique réalisé dans le cadre de l'élaboration du rapport analytique 2006-2007 sur l'état de l'environnement wallon. 44p.
- Rodier J., Legude B., Merlet N. et coll. 2009. L'analyse de l'eau. 9th Edition. Dunod. 1579p.

- Saade L. 2005. Agir ensemble pour une gestion plus efficace des services de l'eau potable et l'assainissement en Haïti. Projet CEPALC/Fondation W. K. Kellogg « Stratégies non conventionnelles pour le développement économique en Haïti. 44p.
- Saintil J. 2009. Étude de Faisabilité de la Route Agricole Salagnac-Javel-St-Yves-Rouck. Mémoire de Fin d'Études, FAMV/UEH, Damien, Haïti. 51p.
- SANTÉ ET BIEN-ETRE SOCIAL CANADA. 1992. Le Nitrate et le nitrite. Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada. 9 p.
- Santé Canada. 2016. Le manganèse dans l'eau potable. Comité Fédéral Provincial Territorial sur l'eau potable. Document de consultation publique. 127p.
- TRACTEBEL DEVELOPMENT. 1998. Définition des périmètres de protection pour les sources exploitées par la CAMEP. Bruxelles.
- Verhille S. 2013. Les indicateurs microbiens dans l'évaluation de l'eau potable : interpréter les résultats de laboratoire et comprendre leur signification pour la sante publique. Centre de collaboration nationale en santé environnementale. 13p.
- Vermande P. 2002. La Gestion Intégrée de l'Eau : les enjeux mondiaux et régionaux. In : Actes du Colloque International réalisé à Port-au-Prince les 26, 27, 28 juin 2002. pp 10-19.
- Villanueva C.M., Kogevinas M., Cordier S., Templeton M. R., Vermeulen R., Nuckols J. R., Nieuwenhuijsen M.J. Levallois P. 2014. Assessing exposure and health consequences of chemicals in drinking water: Current state of knowledge and research needs. Environ Health Perspective 122 (3), 213-221.
- Wanélus F. 2016. Caractérisation physico-chimique de l'eau destinée à la consommation humaine dans la Région Métropolitaine de Port-au-Prince, Haïti. Travail de Fin d'Etudes. 64p.
- Wari S. A. 2012. Problématique de la gestion des déchets ménagers urbains de la ville de N'djamena : cas du 8eme arrondissement. Mémoire pour l'obtention du diplôme de master en ingénierie de l'eau et de l'environnement. Institut International d'ingénierie de l'Eau et de l'Environnement. 55p.
- WHO (World Health Organization). 2006. Guidelines for drinking-water quality. First addendum to third edition. Volume 1. Recommendations. 595p.
- WHO (World Health Organization). 2011. Guidelines for drinking-water quality. Fourth edition. Geneva. 564p.

ANNEXES

Campagne de collecte des données de terrain

Annexe 1. Fiche d'inventaire et d'identification des facteurs de risque

No	Nom du point d'eau	Type	Coordonnées géographiques		Caractéristiques physiques			Zone de prélèvement
			Latitude	Longitude	pH	T°	Conductivité électrique	

No	Facteurs de risque					
	Existence de latrine familiale	Proximité % un point d'eau	Positionnement % un point d'eau	Autres type(s) de SCE/Activités	Nombre de personnes/habitats dépendant	Mode de gestion/Aspect du milieu naturel

T° =Température à l'émergence ; %=Par rapport à ; SCE = Source éventuelle de contamination ; No= Numéro

Campagne de prélèvement des échantillons d'eau

Annexe 2. Fiche de renseignements

No	Date	Heure	Demandeur	Préleveur	Usage de l'eau	Motif d'analyse	Nom du point d'eau	Origine de l'eau

Résultats des analyses

Annexe 3. Matrice des données des résultats des analyses microbiologiques

Parametres	Riviere RD	Source RD	Source K-Jozon	Source Lapaix	Citerne Kolo	Citerne Neyop	Citerne Berne	Temoin
Coliformes fecaux	> 200	180	86	>200	< 1	< 1	152	<1
Coliformes totaux	> 200	>200	>200	>200	12	8	>200	38
E. coli	184	122	68	192	< 1	< 1	50	<1
Germes totaux	> 200	>200	>200	>200	40	26	>200	200

Annexe 4. Matrice des données des résultats des analyses physico-chimiques

Parametres	Unites	Riviere RD	Source RD	Source K-Jozon	Source Lapaix	Citerne Kolo	Citerne Neyop	Citerne Berne	Temoin
pH	Unité pH	8.27	7.47	6.98	8.06	7.12	10.06	7.07	6.17
Conductivite	µS/cm	257	322	472	489	131	243	413	17.77
Temperature	°C	24.2	24.5	24.5	24.3	23.4	24.6	24	23.8
Couleur	TCU	13	4	0	6	20	81	43	1
Odeur	Seuil	Inodore	inodore	inodore	inodore	inodore	inodore	inodore	inodore
Turbidite	NTU	3.8	0.72	0.6	4.15	0.83	1.23	1.4	0.33
TDS	mg/l	122.8	154.3	228	237	62.3	115.7	199.1	8.57
Alcalinite phénolphtaléine	mg/l CaCO3	0	0	0	0	0	34	0	0
Alcalinite totale	mg/l CaCO3	126	154	242	258	42	86	36	10
Bicarbonates	mg/l CaCO3	126	154	242	258	42	52	36	10
Carbonates	mg/l CaCO3	0	0	0	0	0	68	0	0
Calcium	mg/l	49.65	62.5	97.7	52.85	28.83	4.004	14.42	0
Durete calcique	mg/l CaCO3	124	156	244	132	72	10	36	0
Durete magnesienne	mg/l CaCO3	20	8	12	124	8	6	12	0
Durete totale	mg/l CaCO3	144	164	256	256	80	16	48	0
Salinite	mg/l	0.12	0.15	0.23	0.23	0.06	0.11	0.2	0.01
Sodium	mg/l	6.85	3.01	7.85	22.2	4.4	5.7	60.8	3.92
Nitrites	mg/l	0.0164	0.033	0.003	0.007	0.0131	0.008	0.007	0.0164
Nitrates	mg/l	44.713	55.8	35	28.78	20.8	20.8	28.8	23.9
Sulfates	mg/l	3	1	3	1	0	1	2	0
Fluorure	µg/l	0.02	0.04	0.12	0	0	0.1	0	0.05
Chlorure	mg/l	9.5	11	13	14	4.5	4.99	108	6
Aluminium	mg/l	0.022	0.007	0.018	0.046	0.056	0.396	0.027	0.015
Fer	mg/l	0.05	2	0.1	0.1	0.09	0.05	0.02	0.02
Magnesium	mg/l	4.86	1.942	2.914	30.11	1.94	1.46	2.914	0
Manganese	mg/l	0.007	0.015	0.006	0.024	0.014	0.008	0.009	0
Arsenic	µg/l	0	0	0	0	0	0	0	0
Cuivre	mg/l	0.02	0.04	1.33	0.01	0.02	0.03	0.02	0.04
Zinc	mg/l	0.04	0.11	0.08	0.05	0.25	0.85	0.17	0.03

Annexe 5. Vue des 3 sources d'eau échantillonnées



Photo 1 : Prélèvement de l'eau dans la Source Ravine Diable



Photo 2 : Source K-Jozon



Photo 3 : Source Lapaix