

REPUBLIQUE DE COTE D'IVOIRE

Union - Discipline - Travail

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE



Institut National Polytechnique

Félix HOUPHOUËT-BOIGNY



Année universitaire : 2019-2020

N° d'ordre : 077/2020

**THESE**

*Pour l'obtention du titre de*

**DOCTEUR DE L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE FÉLIX  
HOUPHOUËT-BOIGNY DE YAMOUSSOUKRO EN SCIENCES AGRONOMIQUES**

**UMRI : SCIENCES AGRONOMIQUES ET GENIE RURAL**

*Spécialité : Agronomie et Microbiologie environnementale*

Par:

**ANOMAN TCHIMONBIE MESSIKELY**

THEME :

**EVALUATION DE LA QUALITE DES EAUX LACUSTRES  
D'ARROSAGES DE YAMOUSSOUKRO (COTE D'IVOIRE) ET IMPACT  
SUR LA QUALITE SANITAIRE DES CULTURES MARAICHERES**

*Soutenu publiquement le 15 Décembre 2020 devant le jury composé de :*

<b>M. HILI Ouagnina</b>	Professeur Titulaire	INP-HB	<b>Président</b>
<b>M. ZEZE Adolphe,</b>	Professeur Titulaire	INP-HB	<b>Directeur de thèse</b>
<b>M. DADIE Adjéhi Thomas</b>	Professeur Titulaire	UNA	<b>Rapporteur</b>
<b>Mme AMA Adingra Antoinette</b>	Maître de Recherches	CRO	<b>Rapporteur</b>
<b>M. KAROU Tago Germain</b>	Maître de Conférences	UFHB	<b>Examineur</b>

---

## **DEDICACE**

---

A mon Seigneur Dieu tout puissant

A ma fille, **NIAGNE Brou Divine Rinna**

Et à **ma famille**

Je dédie ma thèse de doctorat

---

## REMERCIEMENTS

---

Ce travail de thèse est le résultat d'un long et ardu parcours et doit sa concrétisation à des rencontres enrichissantes de personnes à qui je tiens à adresser mes sincères remerciements et exprimer ma profonde gratitude :

**M. ZEZE Adolphe**, Professeur titulaire de l'Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny de Yamoussoukro, mon directeur de thèse, qui a tout mis en œuvre pour la réalisation effective du travail. En effet, depuis le mémoire de master, il m'a permis de faire mes premiers pas dans le monde de la recherche avec un appui financier du programme de Production Agricole en Afrique de l'Ouest (PPAAO/WAAPP), au sein du Laboratoire de Biotechnologies Végétale et Microbienne (**LBVM**) qu'il dirige. Sa rigueur, ses remarques et orientations pertinentes dans le cadre du travail m'ont permis non seulement d'être formée au plan académique mais aussi d'avoir une éducation sociale et humaine. Merci beaucoup Professeur et j'espère, un jour, avoir votre sagesse d'esprit.

Je tiens à remercier les membres du jury de thèse d'avoir accepté de prendre le temps pour contribuer à parfaire le présent document.

**M. HILI Ouagnina**, Professeur titulaire de l'Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny de Yamoussoukro, pour avoir bien accepté de présider ce jury de thèse. Sa disponibilité, sa compréhension, et ses critiques et conseils avisés m'ont particulièrement marqués lors de la pré-soutenance de ce mémoire de thèse ; où il n'a d'ailleurs ménagé aucun effort pour être présent, au-delà même des heures normales de service. Merci beaucoup professeur.

**M. DADIE Adjéhi Thomas**, Professeur titulaire de l'Université Nandjui Abrogoua et rapporteur de cette thèse, dont la disponibilité et la gentillesse me conforteront plus tard à faire beaucoup de bien, dans ma future carrière d'enseignante. En effet, c'est hospitalisé sur un lit à la PISAM, qu'il a tenu à corriger ce mémoire de thèse, pour que le temps ne soit pas un obstacle à ce projet de soutenance. Ses corrections très avisés et ses conseils précis lors de plusieurs

visio-conférences, ont contribué à donner une allure plus rayonnante au présent document. Grand merci professeur. Franchement, je n'oublierai pas ce geste noble de votre part.

Mme **AMA Adingra Antoinette**, Maitre de conférences du Centre Recherche Océanologique et rapporteur de cette thèse, pour cette grande disponibilité, effectivement rare dans notre milieu universitaire. Avant même de recevoir le courrier attestant de sa participation à ce jury de thèse, cette dame au grand cœur a décidé de me prendre sous son aile depuis Décembre 2019 après avoir remarqué certains manques, lors d'une présentation de ce travail à un congrès. Son acharnement au travail bien fait, a permis de parfaire le présent document. Merci beaucoup madame!

**M. KAROU Tago Germain** Maitre de conférences de l'Université Félix Houphouët-Boigny et examinateur de cette thèse, dont la gentillesse, et l'esprit du travail bien fait, ont précédés l'homme, tant par les bons témoignages entendus au sujet ce microbiologiste aguerri, que par son humanité. Merci Monsieur, d'avoir accepté d'examiner ce document de thèse, en espérant trouver bonne grâce à vos yeux après la lecture de ce travail.

Je tiens également à remercier

**M. KOFFI N'Guessan**, Directeur Général de l'Institut National Polytechnique Félix-Houphouët-Boigny (**INP-HB**) de Yamoussoukro, **M. YAO Kouassi Benjamin**, Directeur de l'Ecole Doctorale Polytechnique (**EDP**) et le Conseil Scientifique de l'EDP de m'avoir accordé l'inscription en thèse de doctorat au sein dudit institut.

Pour leurs conseils avisés, leurs questions et leurs analyses, je tiens à remercier

**M. BROU Yao Casimir**, Directeur de l'Unité Mixte de Recherche et d'Innovation (**UMRI**) en Sciences Agronomiques et Génie Rural de l'**EDP**, qui a dû, par moment ôter l'habit de directeur pour revêtir celui de père, lorsque mes agissements nécessitaient une correction, une protection mais aussi une orientation rigoureuse pour l'avancement du travail.

**M. POHE JEAN**, Phytopathologiste, Maitre de conférence à l'**INP-HB** de Yamoussoukro au Département de Formation et de Recherche Agriculture et Ressources

Animales (**DFR ARA**) pour la lecture, les corrections et recommandations faites lors de l'évaluation du travail à l'**UMRI Sciences Agronomiques et Génie Rural de l'EDP**.

Les membres du jury de pré-soutenance de thèse à savoir le Professeur **HILI Ouagnina** de l'Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny de Yamoussoukro, le Docteur **KOUADIO Kouakou Théodore** de l'Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny de Yamoussoukro, et le Docteur **NANDJUI Jacob** de l'Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny de Yamoussoukro,

Les membres des comités de suivi de thèse, à savoir : Professeur **ZIHIRI Guédé Noël** de l'Université Félix Houphouët Boigny, Professeur **KONÉ Mongomaké** de l'Université Nangui Abrogoua, Professeur **ZORO Bi Irié Arsène** de l'Université Nangui Abrogoua, Docteur **BROU Yao Casimir** de l'Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny de Yamoussoukro, Docteur **ATCHAM Thérèse** de l'Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny de Yamoussoukro, Docteur **DANHO Mathias** de l'Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny de Yamoussoukro.

Le **Docteur VOKO Bi Rosin Don Rodrigue**, enseignant-chercheur à l'Université Lorougnon Guédé de Daloa, membre du LBVM et l'éclaireur de ce travail de thèse pour sa disponibilité, l'ensemble des connaissances et compétences transmises, ses conseils et son assistance tout au long du travail effectué.

Je tiens aussi à remercier pour leur aide matériel:

Le **Professeur ADOUBY Kopoin**, Directeur du Laboratoire des Procédés Industriels, de Synthèses des Energies Nouvelles et de l'Environnement (**LAPISEN**), qui a permis, au sein de son laboratoire, de réaliser les analyses physicochimiques des échantillons d'eaux. Merci à ses étudiants Docteur **MAHUNON Reine Edwige**, Docteur **KOFFI Edmond**, Docteur **APPIA Kouassi Esaïe** et Docteur **ASSEMIAN Alain Stéphane** pour l'assistance au cours de nos analyses.

Le **Professeur ASSIDJO**, Directeur du **Laboratoire de Microbiologie** de l'INPHB, qui a permis, au sein de son laboratoire, de réaliser une partie des analyses bactériologiques sur

les échantillons d'eaux. Merci à ses étudiants Docteur **KACOU** et Docteur **KOUADIO Agnès** pour leur contribution.

Le **Docteur N'GORAN Essan Bla Zita épouse AW** enseignant-chercheur et membre du Département Génie Chimique et Agro-Alimentaire (**GCAA**) à l'INPHB pour son soutien et ses orientations.

**M. KOUADIO** du Laboratoire National d'Appui au Développement Agricole (**LANADA**) Laboratoire d'Analyse des Semences (**LANASEM**) de Yamoussoukro pour le matériel mis à ma disposition pour les analyses bactériologiques sur les légumes.

**Mme KOUDJO-ZEZE Claude Ghislaine**, chercheur au Centre National de Recherches Agronomiques (**CNRA**) d'Adiopodoumé, pour le matériel mis à notre disposition pour les analyses moléculaires et pour le suivi. Aussi, merci madame pour les nombreux conseils et corrections apportées dans les articles produits.

**M. KOFFI Ghislain**, technicien supérieur au Centre National de Recherches Agronomiques (**CNRA**) d'Adiopodoumé, pour son assistance lors de nos analyses moléculaires.

Le **Docteur AMOULAYE KOFFI**, de l'Université Nandjui Abroguia (**UNA**) en Sciences et Gestion de l'Environnement pour sa connaissance apportée sur le système lacustre de Yamoussoukro et pour la confection du plan d'eau lacustre par le **logiciel Quantum GIS** et le **Docteur SYLLA** du **LBVM** pour son assistance sur le terrain aux premières heures de ce travail.

Le **Docteur KOUAKOU Kouadio Paul Martial**, enseignant-chercheur et directeur du Département Agriculture et Ressources Animales (**ARA**) à l'INPHB pour son soutien, ses conseils avisés et son assistance dans le traitement statistique des données ainsi qu'aux **Docteurs KANH Kpahé Herbert Michael et Bruno HERAULT** pour les analyses statistiques.

Le **Docteur KOUADIO Marie Stéphanie**, enseignant-chercheur à l'Université Lorougnon GUEDE de Daloa, membre du LBVM pour m'avoir hébergée, assistée dans la maladie, donné des orientations précises dans le travail, la liste est longue.... Merci à M. **YUGONE Bi Tra Jérôme** pour l'aide concernant les activités au laboratoire et sur le terrain.

Le **Docteur DOGA Dabe** pour son soutien matériel et son assistance sur le terrain.

Ma gratitude va aussi aux maraichers **ISSA, SEKOU, KANGA, Maman DJENEBA et ses filles et aux piroguiers** avec qui j'ai travaillée tout au long de cette thèse. Franchement, je vous dois beaucoup.

Je n'omettrai pas des personnes chères à mon cœur tel que :

Le personnel de l'EDP, Professeur **SORO Doudjo**, Docteur **ABRO Koutouan**, Mme **STRANGER Gisèle** et M. **AMOATA** ainsi qu'aux **doctorants de l'EDP** pour tous ces moments de convivialités partagées lors des différentes organisations de Doctoriales et festivités de l'EDP ainsi que pour leur aide. Que M. **SOUGNON** trouve aussi par ces lignes l'expression de ma gratitude.

L'équipe du Département de Formation et Recherche Agriculture et Ressources Animales (**DFR-ARA**) pour le climat chaleureux et je remercie particulièrement le **Docteur ATCHAM Thérèse**, présidente des femmes chercheurs de l'INP-HB.

Tous les membres de notre Laboratoire de Biotechnologie Végétale Microbienne (**LBVM**) trouveront ici l'expression de ma reconnaissance pour leur fraternité et assistance au cours de ce travail. Je remercie particulièrement le **Docteur FOSSOU Romain** pour ses conseils et orientations très pertinents aux dernières heures de ce travail. Je remercie également le doyen, père et conseiller **FOFANA Khalil** pour sa passion contagieuse pour un travail scientifique de qualité, sa gentillesse, son soutien à chaque fois que j'ai pu le solliciter. Votre humilité m'a beaucoup marqué. Je remercie également les doctorants du LBVM.

Je termine en exprimant ma profonde gratitude à toute **ma grande famille**, pour son soutien et tous ses encouragements tout au long de ces années d'études. J'adresse un merci

particulier au **colonel BABE Yapi, MANTO Denis, ODJE Denis, commissaire OSEE** pour leurs soutiens moraux et financiers tout au long de cette thèse. Merci à **M. NIAGNE Jean Marie Vianney, mon époux**, pour son assistance, son soutien moral et financier et pour ses conseils. **Maman KOFFI Koua Solange**, merci pour ton assistance, ta présence et ton amour. Tu t'es occupée de mon ange **NIAGNE Brou Divine Rinna**, me permettant ainsi de poursuivre mes travaux dans la quiétude. Faire ta joie est aujourd'hui mon bonheur. Merci à vous ma deuxième famille, **maman et papa ETAWA** pour votre soutien moral et financier, vos prières et votre présence à toutes les étapes que j'ai traversé dans ma vie. Dieu vous le rendra. Mes petites sœurs et frères, trouvez ici l'expression de ma gratitude. Merci au **pasteur KOUASSI K. Pierre** pour son assistance et ses conseils dans les moments difficile et aux membres de **l'Eglise Assemblées de Dieu de DJAHAKRO**. Merci à **Tonton GNAMIEN** de la chorale de l'Eglise des **Assemblées de Dieu de Yopougon GARE**, au révérend pasteur **KOUASSI Emmanuel** et au pasteur **YAO KAN** qui se soucient toujours de savoir comment je me porte. Merci beaucoup.

Que tous ceux qui de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude.

---

## **TABLE DES MATIERES**

---

<b>DEDICACE.....</b>	<b>ii</b>
<b>REMERCIEMENTS.....</b>	<b>iii</b>
<b>TABLE DES MATIERES .....</b>	<b>ix</b>
<b>RESUME.....</b>	<b>i</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>ii</b>
<b>LISTE DES FIGURES.....</b>	<b>i</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX .....</b>	<b>iv</b>
<b>LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS.....</b>	<b>vi</b>
<b>LISTE DES ANNEXES .....</b>	<b>1</b>
<b>INTRODUCTION GENERALE .....</b>	<b>2</b>
<b>CHAPITRE 1 : L’AGRICULTURE MARAICHERE EN COTE D’IVOIRE .....</b>	<b>6</b>
1.1. Pratique de l’activité maraichère en Côte d’Ivoire.....	6
1.2. Particularité de l’agriculture maraichère à Yamoussoukro .....	8
1.2.1. Production maraichère à Yamoussoukro.....	8
1.2.2. Surfaces cultivées et types de cultures pratiquées à Yamoussoukro.....	8
1.3. Rôle des cultures maraichères pour les populations urbaines .....	10
<b>CHAPITRE 2 : PROBLEMATIQUE DE LA SECURITE SANITAIRE DES PRODUITS MARAICHERS .....</b>	<b>11</b>
2.1. Risques sanitaires des productions maraichères.....	11
2.2. Différents cas de contaminations des produits maraichers .....	11
2.2.1. Eaux d’arrosage, sources de contaminations des produits maraichers.....	11
2.2.2. Contaminations pré-récolte des cultures maraichères .....	12
2.2.3. Contaminations post-récolte des légumes .....	12

2.3. Quelques causes de maladies dues à la consommation des productions maraichères ..	13
2.3.1. Agents pathogènes bactériens .....	13
2.3.2. Agents pathogènes viraux .....	14
2.3.3. Agents pathogènes fongiques .....	14
2.3.4. Protozoaires pathogènes .....	14
2.3.5. Micro-algues et cyanobactéries pathogènes .....	15
2.3.6. Helminthes pathogènes .....	15
<b>CHAPITRE 3 : SOURCES DE POLLUTION DES EAUX LACUSTRES DE YAMOOUSSOUKRO .....</b>	<b>16</b>
3.1. Les eaux lacustres de Yamoussoukro.....	16
3.2. Origine de la pollution microbiologique des eaux lacustres .....	18
3.2.1. Installations d’assainissements défectueuses .....	18
3.2.2. Déchets solides .....	19
3.2.3. Eaux usées .....	20
3.2.4. Activités d’élevage et de pêche .....	21
3.2.5. Pratiques agricoles polluantes .....	22
<b>CHAPITRE 4 : IMPACT DES FACTEURS ENVIRONNEMENTAUX SUR LA QUALITE MICROBIOLOGIQUE DES EAUX DE SURFACES .....</b>	<b>23</b>
4.1. Définitions de quelques termes et concepts climatiques .....	23
4.2. Changement et variabilité climatiques en Afrique de l’ouest .....	24
4.2.1. Changement climatique et agriculture.....	25
4.2.2. Changement climatique et ressources en eau .....	25
4.2.3. Changement climatique et santé humaine .....	27
4.3. Impact des changements climatiques sur les paramètres du milieu et qualité microbiologique des eaux de surfaces.....	28
4.3.1. Les paramètres physiques.....	28
4.3.2. Les paramètres chimiques .....	30

<b>CHAPITRE 5 : LES COLIFORMES THERMOTOLERANTS : INDICATEURS PERFORMANTS DE POLLUTION FECALE .....</b>	<b>33</b>
5.1. Réglementation de la qualité des eaux de surface et des germes indicateurs de pollution microbiologique .....	33
5.2. Les coliformes thermotolérants, indicateurs de contaminations des eaux de surfaces .	35
5.2.1. Méthodes microbiologiques de détection et d'étude des coliformes thermotolérants .....	35
5.2.2. Propriétés enzymatiques des coliformes thermotolérants .....	37
5.2.3. Méthodes moléculaires de détection des coliformes thermotolérants.....	38
<b>CHAPITRE 6 : ANTIBIORESISTANCE COMME INDICATEUR DE SECURITE SANITAIRE.....</b>	<b>39</b>
6.1. Actions des antibiotiques contre les bactéries .....	39
6.1.1. Définition des antibiotiques .....	39
6.1.2. Mécanismes d'actions des antibiotiques contre les bactéries.....	39
6.1.2. Classification et familles d'antibiotiques .....	42
6.2. Résistances des bactéries aux antibiotiques .....	52
6.2.1. Résistance naturelle aux antibiotiques .....	52
6.2.2. Résistance acquise aux antibiotiques et transfert des gènes par les éléments génétiques.....	53
6.2.3. Modes de résistances des bactéries aux antibiotiques.....	56
6.3. Problèmes sanitaires liés à la résistance des bactéries aux antibiotiques.....	58
6.3.1. Particularité des <i>E. coli</i> .....	58
6.3.2. Adaptation et résistance des <i>E. coli</i> aux antibiotiques .....	59
6.3.3. Sources de contaminations médicamenteuses de l'environnement.....	59
<b>CHAPITRE 7 : MATERIEL.....</b>	<b>63</b>
7.1. Matériel biologique .....	63
7.1.1. Zone d'étude.....	63

7.1.2. Climat de la zone d'étude .....	63
7.1.3. Eaux des lacs .....	65
7.1.4. Légumes analysés .....	66
7.1.5. Milieux de cultures .....	68
7.2. Matériel technique .....	68
7.2.1. Matériel de prélèvement des eaux et des légumes .....	68
7.2.2. Matériel de mesures des paramètres physicochimiques du milieu .....	68
7.2.3. Matériel pour l'étude microbiologique .....	68
7.2.4. Matériel pour la caractérisation moléculaire des <i>E. coli</i> .....	69
7.2.5. Matériel ou outil informatique .....	69
<b>CHAPITRE 8 : METHODES .....</b>	<b>70</b>
8.1. Echantillonnages .....	70
8.1.1. Choix des sites .....	70
8.1.2. Prélèvements de l'eau et des légumes .....	72
8.2. Mesures des différents paramètres physicochimiques .....	75
8.3. Détermination des charges bactériennes dans les échantillons d'eaux et de légumes ..	77
8.3.1. Dénombrement des coliformes thermotolérants et des <i>E. coli</i> dans les échantillons d'eaux .....	77
8.3.2. Subculture des souches de <i>E. coli</i> .....	77
8.4. Caractérisation moléculaire des <i>E. coli</i> .....	78
8.4.1. Extraction de l'ADN .....	78
8.4.2. Amplification génique par PCR .....	79
8.5. Antibiogramme des souches de <i>E. coli</i> .....	80
8.6. Traitement des données et analyses statistiques .....	82
8.6.1. Analyse statistiques des données physicochimiques et bactériologiques .....	82
8.6.2. Analyse des souches des <i>E. coli</i> .....	84

**CHAPITRE 9 : DONNEES PHYSICOCHIMIQUES DES LACS AU FIL DES SAISONS  
HYDROCLIMATIQUES ..... 86**

9.1. Normalité des distributions des variables physicochimiques..... 86

9.2. Evolution des caractéristiques physicochimiques des lacs au cours des saisons climatiques des années 2015-2016 ..... 87

9.2.1. Variation des caractéristiques physicochimiques de l'eau au cours des saisons climatiques de l'année 2015-2016..... 87

9.2.2. Niveaux de variabilités des paramètres physicochimiques étudiés au cours des saisons climatiques de l'année 2015-2016 ..... 88

9.3. Evolution des caractéristiques physicochimiques des lacs au cours des saisons climatiques des années 2016-2017..... 91

9.3.1. Variation des caractéristiques physicochimiques de l'eau au cours des saisons climatiques de l'année 2016-2017..... 91

9.3.2. Niveaux de variabilités des paramètres physicochimiques étudiés au cours des saisons climatiques de l'année 2016-2017 ..... 91

9.4. Evolution des paramètres physicochimiques étudiés au cours des saisons climatiques des années 2015-2016 et 2016-2017 ..... 94

9.4.1. Evolution de la température ..... 94

9.4.2. Evolution du pH ..... 94

9.4.3. Evolution de la turbidité ..... 97

9.4.4. Evolution de l'oxygène dissous..... 97

9.4.5. Evolution du Carbone Organique Dissous des eaux ..... 100

9.6. Discussion ..... 102

**CHAPITRE 10 : DYNAMIQUE SPATIALE ET TEMPORELLE DE LA  
CONTAMINATION BACTERIOLOGIQUE DANS LES DIFFERENTS LACS  
ETUDIÉS ..... 105**

10.1. Normalité des distributions de l'ensemble des variables bactériologiques..... 105

10.2. Evaluation spatiale et temporelle de l'évolution des charges moyennes en coliformes thermotolérants et *E. coli* ..... 106

10.2.1. Variation temporelle des charges moyennes en coliformes thermotolérants et <i>E. coli</i> dans les eaux des cinq lacs .....	106
10.2.2. Niveaux de contamination des légumes cultivés aux abords des lacs par l'évaluation des charges moyennes en coliformes thermotolérants et <i>E. coli</i> au cours des saisons climatiques des années 2015-2016 et 2016-2017 .....	110
10.3. Evolution de la pollution bactérienne des eaux lacustres et corrélation avec la qualité des légumes .....	119
10.4. Influence des paramètres physicochimiques sur les bactéries (coliformes thermotolérants et les <i>E. coli</i> ) au cours de l'année 2015-2016 .....	122
10.4.1. Vérification de la faisabilité de l'ACP par l'évaluation des indices de KMO et test d'homoscédasticité des variances de Bartlett en 2015-2016.....	122
10.4.2. Influence des paramètres physico-chimiques des eaux sur les coliformes thermotolérants et les <i>E. coli</i> au cours de l'année 2015-2016 par l'usage de l'ACP.....	123
10.4.3. Corrélation entre les paramètres physicochimiques et les charges bactériennes en coliformes thermotolérants des lacs en 2015-2016 .....	125
10.5. Influence des paramètres physicochimiques sur les bactéries (coliformes thermotolérants et les <i>E. coli</i> ) au cours de l'année 2016-2017 .....	127
10.5.1. Vérification de la faisabilité de l'ACP par l'évaluation des indices de KMO et test d'homoscédasticité des variances de Bartlett.....	127
10.5.2. Influence des paramètres physico-chimiques des eaux sur les coliformes thermotolérants et les <i>E. coli</i> au cours de l'année 2016-2017.....	128
10.5.3. Corrélation entre les paramètres physicochimiques et les charges bactériennes en coliformes thermotolérants des lacs en 2016-2017 .....	130
10.6. Discussion .....	132
<b>CHAPITRE 11 : QUALITE SANITAIRE DES LACS ET DES CULTURES ENVIRONNANTES PAR L'ETUDE DU PROFIL DE RESISTANCES AUX ANTIBIOTIQUES DES <i>E. COLI</i> .....</b>	<b>137</b>
11.1. Proportion des <i>E. coli</i> dans les lacs étudiés et sur les cultures environnantes .....	137
11.2. Confirmation des <i>E. coli</i> étudiées par l'outil moléculaire.....	141

11.3. Diversité et regroupement des <i>E. coli</i> obtenues dans les différents lacs étudiés après antibiotypage au cours des saisons climatiques des années 2015-2016 et 2016-2017.....	142
11.4. Résistance des <i>E. coli</i> aux antibiotiques dans les lacs.....	146
11.4.1. Evaluation globale du niveau de résistance des <i>E. coli</i> aux antibiotiques dans les lacs.....	146
11.4.2. Influence spatiale et temporelle sur la résistance des <i>E. coli</i> aux antibiotiques.	148
11.4.3. Profil de la résistance des populations d' <i>E. coli</i> dans le Lac A .....	150
11.4.4. Profil de la résistance des populations d' <i>E. coli</i> dans le LAC B.....	152
11.4.5. Profil de la résistance des populations d' <i>E. coli</i> dans le LAC C.....	154
11.4.6. Profil de la résistance des populations d' <i>E. coli</i> dans le LAC D .....	156
11.4.7. Profil de la résistance des populations d' <i>E. coli</i> dans le LAC E.....	158
11.5. Corrélation entre l'abondance bactérienne, les paramètres antibiotique de résistance et les paramètres physicochimiques des lacs de Yamoussoukro.....	160
11.6. Discussion .....	163
<b>CONCLUSION ET PERSPECTIVES .....</b>	<b>167</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>	<b>172</b>
<b>ANNEXES.....</b>	<b>227</b>

---

## RESUME

---

Afin d'expliquer la dynamique de la pollution bactérienne des eaux des lacs de Yamoussoukro et évaluer les risques sanitaires liés à l'arrosage des cultures maraichères environnantes, les coliformes thermotolérants dont *Escherichia coli* (*E. coli*) a constitué 75% dans cette étude, ont été utilisés comme indicateurs de pollution. Les points d'eaux d'irrigations des cultures, situés à proximité des lacs, ainsi que trois (3) légumes dans les champs environnants, ont été prélevés au niveau de cinq (5) lacs au cours des saisons hydroclimatiques (saisons sèches/saisons pluvieuses) de décembre 2015 à octobre 2017. Les paramètres physico-chimiques des lacs (la température, le pH, l'oxygène dissous (OD), le carbone organique dissous (COD) et la turbidité) ont été déterminés selon les normes ISO et les coliformes thermotolérants et les *E. coli* ont été dénombrés sur milieu COMPASS ECC Agar. Les résultats ont montrés que les charges bactériennes en coliformes thermotolérants et *E. coli* ont évolué des lacs en amont vers l'aval du système lacustre (du lac A au lac E) et ont été très élevées pendant les saisons pluvieuses (en moyenne 5,81 log<sub>10</sub>. UFC/100ml en 2015-2016 et 5,91 log<sub>10</sub>. UFC/100ml en 2016-2017), tandis que sur les légumes, elles ont été élevées pendant les saisons sèches (en moyenne 3,46 log<sub>10</sub>. UFC/100ml en 2015-2016 et 3,58 log<sub>10</sub>. UFC/100ml en 2016-2017). Le carbone organique dissous et la turbidité ont présentés une forte corrélation positive avec l'évolution des charges bactériennes au cours des deux années d'études, respectivement (r=0,8012) et (r=0,8201) en 2015-2016 et 2016-2017 pour la matière organique et (r=0,6959) et (r=0,6127) en 2015-2016 et 2016-2017 pour la turbidité. Par contre, la température, le pH et l'oxygène dissous n'ont pas eu une très grande influence sur l'évolution des charges en coliformes thermotolérants. Les résultats d'antibiorésistance ont montrés que la plupart des souches d'*E. coli* étaient résistantes à l'ampicilline (16,46%), à la tétracycline (12,87%), à la ciprofloxacine (12,86%) et au Sulfametoazole (10,14%). Par ailleurs, en comparant les lacs, le plus grand nombre de souches résistantes aux antibiotiques a été trouvé au lac E (63,2%) contre (14,5%) au Lac A où la plupart des souches étaient sensibles à la plupart des antibiotiques testés. De plus, au lac E plusieurs multi résistances ont été observés ainsi qu'au lac D, lac en contact avec les effluents hospitaliers et les eaux usées de la ville. Les corrélations de rang de Spearman et l'analyse en composantes principales (ACP) ont révélé des corrélations significatives entre les bactéries résistantes aux antibiotiques dans les lacs et les paramètres physico-chimiques de l'eau. Globalement, cette étude a fourni des informations de base sur la résistance bactérienne dans les lacs de Yamoussoukro en Côte d'Ivoire, montrant que ces lacs pourraient être des réservoirs de résistance aux antibiotiques, potentiellement dangereux pour la santé publique.

**Mots clés :** Coliformes thermotolérants, *E. coli*, Eaux lacustres; Cultures maraichères ; Variations climatiques, Résistance Antibiotique

---

## ABSTRACT

---

In order to explain the dynamics of bacterial pollution in the waters of the Yamoussoukro lakes and to assess the health risks associated with watering the surrounding market garden crops, thermotolerant coliforms including *Escherichia coli* (*E. coli*) which constitute 75% in this study, were used as indicators of pollution. The irrigation water points for crops, located near the lakes, as well as three (3) vegetables in the surrounding fields, were taken from five (5) lakes during the hydroclimatic seasons (dry seasons / seasons) rainy) from December 2015 to October 2017. The physico-chemical parameters of the lakes (temperature, pH, dissolved oxygen (DO), dissolved organic carbon (DOC) and turbidity) were determined according to ISO standards and thermotolerant coliforms and *E. coli* were counted on COMPASS ECC Agar medium.

The results showed that the bacterial loads of thermotolerant coliforms and *E. coli* evolved from lakes upstream to downstream of the lake system (from lake A to lake E) and were very high during the rainy seasons (on average 5,81 log<sub>10</sub>.CFU/100ml in 2015-2016 and 5,91 log<sub>10</sub>. CFU/100ml in 2016-2017), while on vegetables, they were high during the dry seasons (on average 3,46 log<sub>10</sub>. CFU/100ml in 2015-2016 and 3, 58 log<sub>10</sub>. CFU/100ml in 2016-2017). Dissolved organic carbon and turbidity showed a strong positive correlation with the evolution of bacterial loads over the two years of studies, respectively (r = 0.8012) and (r = 0.8201) in 2015-2016 and 2016-2017 for organic matter and (r = 0.6959) and (r = 0.6127) in 2015-2016 and 2016-2017 for turbidity. On the other hand, temperature, pH and dissolved oxygen did not have a very large influence on the evolution of thermotolerant coliform loads. Antibiotic resistance results showed that most souchees of *E. coli* were resistant to ampicillin (16.46%), tetracycline (12.87%), ciprofloxacin (12.86%) and sulfamethoxazole (10.14%). Furthermore, by comparing the lakes, the greatest number of strains resistant to antibiotics was found in Lake E (63.2%) against (14.5%) in Lake A where most of the strains were susceptible to most of the antibiotics tested. In addition, at Lake E several multi-resistances were observed as well as at Lake D, a lake in contact with hospital effluents and city wastewater. Spearman's rank correlations and principal component analysis (PCA) revealed significant correlations between antibiotic resistant bacteria in lakes and physicochemical parameters of water. Overall, this study provided basic information on bacterial resistance in the Yamoussoukro lakes in Côte d'Ivoire, showing that these lakes could be reservoirs of antibiotic resistance, potentially dangerous for public health.

**Keywords:** Thermotolerant coliforms, *E. coli*, Lake Water; Vegetable crops; Climatic variations, Antibiotic resistance

---

## LISTE DES FIGURES

---

Figure 1 : Photographies de quelques cultures maraichères .....	7
Figure 2 : Evolution comparée des surfaces cultivées et de la production des produits maraîchers en Côte d'Ivoire .....	7
Figure 3 : Répartition des cultures maraîchères en fonction du niveau de production .....	9
Figure 4 : Localisation et sens d'écoulement des eaux des dix (10) lacs de Yamoussoukro ..	17
Figure 5 : Canal d'évacuation d'eaux usées d'une station d'épuration non fonctionnelle, située au quartier Riviera près du lac 5 (CHR).....	18
Figure 6 : Ordures ménagères sur la berge du lac 8 (Rue des maquis) .....	19
Figure 7 : Eaux usées de vannes et de lavage automobile dans le quartier Dioulabougou proche du lac 7 (Gare Djekanou) .....	20
Figure 8 : Repos du bétail après abreuvement dans le Lac 6 (Petit Bouaké) .....	21
Figure 9 : Engrais composés de fientes et de fumiers disséminés sur une parcelle de salades cultivés aux abords du lac 1 (Guiglo).....	22
Figure 10. Colonies de coliformes thermotolérants sur milieu chromogène ECC Compass Agar contenant un substrat chromogénique .....	37
Figure 11 : Schéma du mode d'action des antibiotiques contre les bactéries .....	41
Figure 12 : Schéma des différents supports génétiques et d'une structure en "mosaïque" .....	54
Figure 13: Mécanismes de dissémination de gènes de résistance aux antibiotiques chez les bactéries.....	55
Figure 14. Principaux mécanismes cellulaires mis en jeu par les bactéries pour leur résistance aux antibiotiques .....	57
Figure 15. Mise en place de la résistance aux antibiotiques des microorganismes aquatiques par une source ponctuelle de contamination .....	61
Figure 16 : Diagramme ombrothermique de Yamoussoukro.....	64
Figure 17. Les cultures maraichères choisies pour l'étude .....	67

Figure 18. Localisation des lacs définis pour les échantillonnages dans système lacustre de Yamoussoukro.....	71
Figure 19. Evolution de la température des eaux des cinq lacs au fil des saisons climatiques	95
Figure 20. Evolution du pH des eaux des cinq lacs au fil des saisons climatiques.....	96
Figure 21. Evolution de la turbidité des eaux des cinq lacs au fil des saisons climatiques .....	98
Figure 22. Evolution de l'Oxygène dissous (O <sub>2</sub> ) des eaux des cinq lacs au fil des saisons climatiques .....	99
Figure 23. Evolution de la teneur en Carbone Organique Dissous des eaux des cinq lacs au fil des saisons climatiques.....	101
Figure 24. Dynamique des coliformes thermotolérants dans les différents lacs étudiés aux différentes saisons climatiques des années 2015/2016 (A) et 2016/2017 (B).....	108
Figure 25. Dynamique des <i>E. coli</i> dans les différents lacs étudiés aux différentes saisons climatiques des années 2015/2016 (A) et 2016/2017 (B) .....	109
Figure 26. Charges moyennes de coliformes thermotolérants sur les carottes dans l'ensemble des lacs étudiés aux différentes saisons d'échantillonnages des années 2015/2016 (A) et 2016/2017 (B) .....	111
Figure 27. Charges moyennes de <i>E. coli</i> sur les carottes dans l'ensemble des lacs étudiés aux différentes saisons d'échantillonnages des années 2015/2016 (A) et 2016/2017 (B).....	112
Figure 28. Charges moyennes de coliformes thermotolérants sur les choux dans l'ensemble des lacs étudiés aux différentes saisons climatiques des années 2015/2016 (A) et 2016/2017 (B) .....	114
Figure 29. Charges moyennes de <i>E. coli</i> sur les choux dans l'ensemble des lacs étudiés aux différentes saisons climatiques des années 2015/2016 (A) et 2016/2017(B).....	115
Figure 30. Charges moyennes de coliformes thermotolérants sur les laitues des différents lacs étudiés aux différentes saisons climatiques des années 2015/2016 (A) et 2016/2017 (B) ....	117
Figure 31. Charges moyennes de <i>E. coli</i> sur les laitues des différents lacs étudiés aux différentes saisons climatiques des années 2015/2016 (A) et 2016/2017 (B).....	118
Figure 32. Evolution des charges bactériennes moyennes en coliformes thermotolérants des legumes en fonction de celle des eaux des lacs.....	120

Figure 33 : Linéarité entre les charges moyennes en coliformes thermotolérants des légumes et les charges moyennes en coliformes thermotolérants des eaux .....	121
Figure 34. Analyse en composantes principales des paramètres physico-chimiques et des coliformes thermotolérants dans les cinq lacs étudiés pendant l'année 2015-2016.....	124
Figure 35. Analyse en composantes principales des paramètres physico-chimiques et des populations des bactérienne dans les cinq lacs étudiés pendant l'année 2016-2017.....	129
Figure 36 : Proportions relatives des <i>E. coli</i> dans l'ensemble des échantillons analysés au fil des saisons climatiques .....	140
Figure 37. Profils électrophorétiques de produits d'amplification du gène <i>UidA</i> de <i>E. coli</i> par PCR .....	141
Figure 38. Classifications des <i>E. coli</i> dans le plan factoriel de l'Analyse factorielle des correspondances multiples (AFCM) .....	145
Figure 39. Profils de résistance des souches d' <i>E. coli</i> aux différents antibiotiques dans chaque lac en fonction des années d'échantillonnages.....	147
Figure 40 : Abondance des <i>E. coli</i> résistantes aux antibiotiques .....	149
Figure 41. Dynamique des souches de <i>E. coli</i> antibiorésistantes dans le lac A.....	151
Figure 42. Dynamique des souches de <i>E. coli</i> antibiorésistantes dans le lac B .....	153
Figure 43. Dynamique des souches de <i>E. coli</i> antibiorésistantes dans le lac C .....	155
Figure 44. Dynamique des souches de <i>E. coli</i> antibiorésistantes dans le lac D.....	157
Figure 45. Dynamique des souches de <i>E. coli</i> antibiorésistantes dans le lac E.....	159
Figure 46. Analyse en composantes principales des caractéristiques physico-chimiques et des fréquences de résistance aux antibiotiques.....	162

---

## LISTE DES TABLEAUX

---

Tableau I. Normes de qualité microbiologique des eaux de surfaces pour les coliformes thermotolérants.....	34
Tableau II. Caractéristiques requises des germes indicateurs de pollution microbiologique ..	34
Tableau III : Classification des pénames de la famille des $\beta$ lactamines .....	43
Tableau IV : Classification des céphèmes de la famille des $\beta$ lactamines .....	44
Tableau V : Classification des Carbapénèmes, oxapénames et monobactames de la famille des $\beta$ lactamines.....	45
Tableau VI : Classification des Glycopeptides et des Fosfomycines.....	46
Tableau VII : Classification des Polymixines .....	47
Tableau VIII : MLS (Macrolides-Lincosamides- Streptogramines), Phénicolés, Oxazolidinones, Tétracyclines, Aminosides, Fusidanines .....	49
Tableau IX : Classification des Quinolones et Fluoroquinolones, Rifamycines, Nitrofuranes, Novobiocine et Nitro-imidazoles .....	50
Tableau X : Classification des Sulfamides, Trimethoprim et association.....	51
Tableau XI. Echantillonnage des eaux et des légumes .....	73
Tableau XII. Dates des campagnes de prélèvements au cours des années 2015-2016 et 2016-2017.....	74
Tableau XIII. Paramètres physicochimiques mesurés .....	76
Tableau XIV : Amorces utilisés pour les réactions de PCR .....	79
Tableau XV. Antibiotiques choisis pour l'antibiogramme des <i>E. coli</i> .....	81
Tableau XVI : Distributions de l'ensemble des paramètres physicochimiques évalués au cours des saisons climatiques par le test de normalité des distributions de Shapiro et Wilk .....	86
Tableau XVII : Interaction des facteurs LACS et SAISONS pour l'ensemble des paramètres physicochimiques des années 2015 à 2016 selon le test ANOVA de Fisher-Snedeco au seuil de 5%.....	87

Tableau XVIII : Niveaux de variabilités des paramètres physicochimiques au seuil de 5% au cours de l'année 2015 à 2016 selon le test de comparaisons multiples des moyennes de Newman-Keuls.....	90
Tableau XIX: Interaction des facteurs LACS et SAISONS pour l'ensemble des paramètres physicochimiques des années 2016 à 2017 selon le test ANOVA de Fisher-Snedeco au seuil de 5%.....	91
Tableau XX : Niveaux de variabilités des paramètres physicochimiques au seuil de 5% au cours de l'année 2016 à 2017 selon le test post-hoc de comparaisons multiples des moyennes de Newman-Keuls.....	93
Tableau XXI : Normalité des distributions de l'ensemble des caractéristiques bactériologiques des coliformes thermotolérants et <i>E. coli</i> .....	105
Tableau XXII: Mesure de précision de l'échantillonnage de Kaiser-Meyer-Olkin :.....	122
Tableau XXIII. Vérification de la faisabilité de l'ACP par le test de sphéricité de Bartlett :	122
Tableau XXIV. Corrélation de Pearson (n) entre les coliformes thermotolérants et les paramètres physico-chimiques des lacs au cours de l'année 2015-2016 .....	126
Tableau XXV. Mesure de précision de l'échantillonnage de Kaiser-Meyer-Olkin.....	127
Tableau XXVI. Vérification de la faisabilité de l'ACP par le test de sphéricité de Bartlett..	127
Tableau XXVII. Corrélation de Pearson (n) entre les coliformes thermotolérants et les paramètres physico-chimiques des lacs au cours de l'année 2016-2017 .....	131
Tableau XXVIII : Effectifs totaux des <i>E. coli</i> dénombrés et des autres coliformes thermotolérants au cours des saisons climatiques des années 2015-2016 et 2016-2017. ....	138
Tableau XXIX : Effectifs totaux des <i>E. coli</i> et profils de résistances aux antibiotiques obtenus au cours des saisons climatiques des années 2015-2016 et 2016-2017. ....	143
Tableau XXX : Corrélation de Spearman Rank entre les caractéristiques physico-chimiques des lacs et les fréquences de résistance des <i>E. coli</i> aux antibiotiques .....	161

---

## LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

---

**ACP** : Analyse en Composantes Principales

**ADNr** : Acide DésoxyRibonucléique ribosomique

**AEP** : Alimentation en Eau Potable

**AFNOR**: Association française de normalisation

**ANASUR** : Agence Nationale de la Salubrité Urbaine

**ANOVA** : Analysis Of Variance (Analyse de Variance)

**ARNr** : Acide RiboNucléique ribosomique

**C. Th.**: Coliformes thermotolérants

**CAH** : Classification Ascendante Hiérarchique

**CHR** : Centre Hospitalier Régional

**CNRA** : Centre National de Recherche Agronomique

**COT** : Carbone Organique Total

**DBO** : Demande biochimique en oxygène

**DCO** : Demande chimique en oxygène

**DFR-ARA** : Département de Formation et de Recherche – Agriculture et Ressources Animales

**ECC** : *E. coli*-Coliformes

**EDTA** : Ethylène Diamine Tétra Acétique

**FAO**: Food and Agriculture Organization (Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture)

**GIRE** : Gestion intégrée des ressources en eau

**GLM**: Generalized Linear Model (Modèle linéaire général)

**GPS**: Global Positioning System

**ICPE** : Installations classées pour la protection de l'environnement

**INP-HB** : Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny

**ISO**: Organisation Internationale de Normalisation

**La:** Lac

**LBVM :** Laboratoire de **B**iotechnologies **V**égétale et **M**icrobienne

**MEDD :** Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable

**MEMIS :** Ministère d'Etat, Ministère de l'Intérieur et de la Sécurité

**MES :** Matières en suspension

**MO:** Matière organique

**MSUA :** Ministère de la Salubrité Urbaine et de l'Assainissement

**NF:** Normes Françaises (norme française)

**NO<sub>3</sub><sup>-</sup>:** Nitrate

**NPP :** Nombre le Plus Probable

**NTU :** Nephrolemetic Turbidity Unit

**OD:** oxygène dissous

**OMS:** Organisation mondiale de la santé

**ONAD :** Office National de l'Assainissement et du Drainage

**PCR:** Polymerase Chain Reaction (Réaction de polymérisation en chaîne)

**pH :** Potentiel Hydrogène

**PME :** Partenariat Mondial de l'Eau

**ppm :** partie par million

**rpm :** rotation par minute

**T°C :** Température

**Turb. :** Turbidité

**UFC / ml:** unités formant des colonies par millilitre

---

## LISTE DES ANNEXES

---

Annexe 1 : Points d’eaux insalubres utilisés pour l’arrosage des cultures, sites de commerces et écoulements d’eaux usées près des lacs .....	227
Annexe 2. Coordonnées géographiques des points d’échantillonnages.....	228
Annexe 3. Corrélations entre les variables et les facteurs de l’ACP de l’influence des paramètres physicochimiques sur les coliformes thermotolérants et les <i>Escherichia coli</i> en 2015-2016	229
Annexe 4. Contributions des variables (%) de l’ACP de l’influence des paramètres physicochimiques sur les coliformes thermotolérants et les <i>Escherichia coli</i> en 2015-2016	229
Annexe 5. Coordonnées des observations de l’ACP de l’influence des paramètres physicochimiques sur les coliformes thermotolérants et les <i>Escherichia coli</i> en 2015-2016	230
Annexe 6. Corrélations entre les variables et les facteurs de l’ACP de l’influence des paramètres physicochimiques sur les coliformes thermotolérants et les <i>Escherichia coli</i> en 2016-2017	231
Annexe 7. Contributions des variables (%) de l’ACP de l’influence des paramètres physicochimiques sur les coliformes thermotolérants et les <i>Escherichia coli</i> en 2016-2017	231
Annexe 8. Coordonnées des observations de l’ACP de l’influence des paramètres physicochimiques sur les coliformes thermotolérants et les <i>Escherichia coli</i> en 2016-2017	232
Annexe 9. Morphotypes obtenus par classification ascendante hiérarchique de l’ensemble des <i>Escherichia coli</i> dans le Lac A.....	233
Annexe 10 : Morphotypes obtenus par classification ascendante hiérarchique de l’ensemble des <i>Escherichia coli</i> dans le Lac B .....	233
Annexe 11 : Morphotypes obtenus par classification ascendante hiérarchique de l’ensemble des <i>Escherichia coli</i> dans le Lac C .....	234
Annexe 12 : Morphotypes obtenus par classification ascendante hiérarchique de l’ensemble des <i>Escherichia coli</i> dans le Lac D.....	234
Annexe 13. Morphotypes obtenus par classification ascendante hiérarchique de l’ensemble des <i>Escherichia coli</i> dans le Lac E .....	235
Annexe 14 : ACM Contributions (Variables) .....	236
Annexe 15 : Publications scientifiques issues de la thèse .....	237

# **INTRODUCTION**

---

## INTRODUCTION GENERALE

---

Depuis des décennies, la disponibilité de l'eau préoccupe de nombreux pays du monde en raison de son offre limitée (**Pedrero et al., 2016**). Les demandes croissantes en eaux sont dues à l'accroissement de la population et aux activités pratiquées par celle-ci, surtout l'agriculture (**Kouadio et al., 2017; Toé, 2018**).

La Commune de Yamoussoukro, capitale politique de la Côte d'Ivoire est caractérisée par la présence d'un système lacustre composé de dix (10) lacs aménagés (**MCAU, 2016**). Ces lacs constituent les milieux récepteurs de sept (7) stations d'épurations construites sur le bassin versant desdits lacs (**MSUA, 2016**). En effet, dans les zones urbaines dotées d'eaux de surfaces (lagunes, lacs, rivières), ces eaux constituent généralement les milieux récepteurs des eaux des stations d'épurations, lorsque les normes de rejets réglementaires sont respectées (**Kabour et al., 2011**). Dans ce cas, la qualité de ces milieux aquatiques est impactée par celle des eaux usées rejetées (**Toule et al., 2017**). Cependant, il a été constaté un dysfonctionnement de certaines stations d'épuration où transitent les eaux usées à Yamoussoukro.

En plus, l'irrégularité du ramassage des ordures ménagères entraîne un important rejet de déchets liquides et solides polluant les eaux des lacs de Yamoussoukro (**Koné, 2010**). A tous ces constats qui contribuent à une détérioration de la qualité des eaux lacustres, s'ajoutent plusieurs activités anthropiques exercées par les populations sur les bassins versants des lacs. Les populations locales pratiquent autour des lacs des activités telles que l'agriculture urbaine, l'élevage, la pêche, le ménage (**Lhote, 2000; Aw Sadat, 2011**). Les déchets résultant de ces activités sont entraînés par les eaux de ruissèlements après les pluies dans les lacs (**N'guessan, 2017**). Tous ces facteurs impactent l'intégrité des lacs.

L'agriculture urbaine dominée par les cultures maraîchères constitue l'activité prépondérante pratiquée aux abords des lacs (**Tano et al., 2011**). Les productions des maraichers permettent d'approvisionner les marchés locaux de la ville de Yamoussoukro ainsi que les marchés des villes environnantes. Ils sont également exportés vers les grandes villes du pays telles que Abidjan, Daloa, Bouaké (**ANADER, 2018**). Ainsi, cette agriculture urbaine assure la suffisance alimentaire des populations et contribue sans aucun doute à l'amélioration des revenus des paysans (**Takis et al., 2000**).

Cependant, les eaux lacustres sont les sources principales pour l'arrosage de ces cultures. Ainsi, la consommation des produits maraîchers n'est pas sans risque (**Fofana, 2011**). En effet, plusieurs études menées dans plusieurs pays du monde, ont montré que l'arrosage des cultures avec des eaux de mauvaise qualité provoque la contamination des produits agricoles par divers polluants chimiques ou organiques (**Amoah et al., 2007; Rai, 2007; Chase et al., 2019**). Les fruits et légumes peuvent également être contaminés par des agents pathogènes microbiologiques durant la maturation (**Toe, 2018**). Il existe environ 60 types d'agents pathogènes humains dans les eaux (**CDC, 2013**). Ce sont les virus, les bactéries, les protozoaires et les parasites eucaryotes multicellulaires tels que le ver de Guinée.

Evaluer la qualité des produits agricoles revient ainsi à vérifier les niveaux de charges de ces pathogènes dans les eaux d'arrosages et sur les cultures (**Coulibaly-Kalpy et al., 2017**). Cependant, sonder tous les agents pathogènes pris individuellement, serait trop fastidieux et coûteux, d'autant plus que cela se ferait sur une base irrégulière de fréquence vu que la présence de ces pathogènes dans les eaux est vérifiée lors de flambées de maladies (**OMS, 2014**). Pour pallier cette insuffisance, les normes de l'OMS sur l'évaluation des risques sanitaires des eaux de surfaces, sont basées sur la détection d'organismes dits indicateurs de pollution dont les coliformes fécaux ou thermotolérants (**ISO 9308-3, 1999**).

Les coliformes fécaux ou thermotolérants correspondent à un groupe d'indicateurs de pollution capables d'attester de la présence d'organismes pathogènes nuisibles, car leur densité et leur résistance dans les eaux sont corrélées à celles de certains pathogènes (**Dorner et al., 2007**). Ce groupe bactérien comprend plusieurs espèces dont *E. coli* qui représente 80 à 90 % des coliformes thermotolérants généralement détectés dans l'eau (**Edberg et al., 2010**). *E. coli* est présente de façon spécifique dans le tractus intestinal des animaux à sang chaud et est donc fortement excrétée dans les matières fécales (environ  $10^7/g$  de matière sèche chez les bovins) (**Mieszkin, 2010**). Cependant, sa présence en dehors de l'intestin est très limitée, car dans le milieu extérieur, il est soumis aux conditions défavorables de survie. Ainsi, détecter sa présence dans un environnement aussi hostile et stressant que le milieu aquatique, est la preuve d'une contamination récente du milieu (**OMS, 2012**). De ce fait, *E. coli* et les autres coliformes thermotolérants sont des indicateurs idéaux de contamination des eaux de surface.

L'objectif général de ce projet de thèse vise à comprendre et expliquer la variation spatiotemporelle de la pollution microbiologique des eaux lacustres utilisées pour l'arrosage et

des cultures maraichères à Yamoussoukro, par l'étude de la dynamique des coliformes thermotolérants.

Les objectifs spécifiques sont :

- déterminer les facteurs environnementaux impliqués dans la pollution des eaux lacustres;
- déterminer les niveaux de pollutions microbiologiques des eaux d'arrosages et des cultures maraichères et mettre en évidence l'impact des facteurs environnementaux sur la dynamique des coliformes thermotolérants
- établir le lien entre la dynamique de cette pollution et le profil de résistances aux antibiotiques des souches d'*E. coli*.

Le présent mémoire a été structuré en trois (3) grandes parties. La première partie est une revue bibliographique. Dans la deuxième partie, la description des milieux d'étude ainsi que l'approche méthodologique ont été présentées. Les principaux résultats ont été analysés et discutés dans la troisième partie. La conclusion et les perspectives ont clos ce document.

**PARTIE 1: REVUE**

**DE**

**BIBLIOGRAPHIE**

---

# CHAPITRE 1 : L'AGRICULTURE MARAICHÈRE EN CÔTE D'IVOIRE

---

## 1.1. Pratique de l'activité maraichère en Côte d'Ivoire

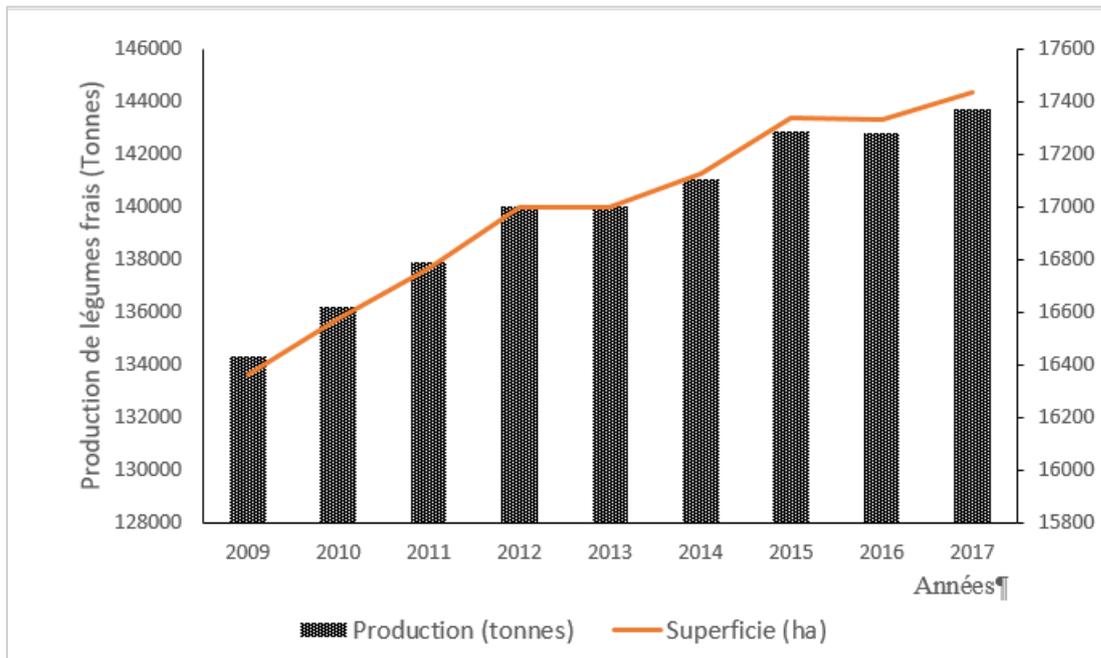
L'agriculture maraichère ou maraîchage ou horticulture maraichère est la culture de végétaux à usage alimentaire, tel que les légumes et fruits frais. C'est une agriculture faite en général de manière professionnelle et développée dans des zones humides des agglomérations (**Mougeot et Moustier, 2004 ; Équiterre, 2016**).

Cette agriculture maraichère est pratiquée dans un but lucratif ou substantiel. Elle est indispensable pour les besoins et l'équilibre alimentaire des populations urbaines en produits frais (**Abakou et Brou, 2003**). Depuis très longtemps, les populations de Côte d'Ivoire cultivaient des tomates, des piments et des aubergines destinés à la consommation familiale (**Parrot 2008a**). De nos jours, cette activité s'est étendue à un cadre professionnel, favorisant l'émergence des variétés locales améliorées et l'introduction de nouvelles espèces (**Yapi-Diahou, 1996 ; Parrot, 2008b**). En Côte d'Ivoire, plus de 40 espèces maraichères, locales ou introduites, sont cultivées. Il s'agit principalement de la carotte (*Daucus carota*), du chou (*Brassica napus*), de la laitue (*Lactuca sativa*), du piment (*Capsicum* sp.), du poireau (*Allium porum*), de la tomate (*Solanum lycopersicum*), du radis (*Raphanus sativus*) et de la betterave (*Beta vulgaris*), l'oseille de Guinée (*Hibiscus* sp.), l'épinard africain (*Talinum fruticosum*), etc...(**FAO, 2009**). Quelques-unes sont représentées à la (**Figure 1**). Ces dernières années la production ivoirienne de légumes frais ne fait que croître en raison des superficies de plus en plus croissantes accordées au maraîchage (**Figure 2**).

Le développement du maraîchage a été favorisé par de nombreux facteurs tels que la croissance démographique, les différentes crises sociopolitiques, le chômage et la pauvreté. En effet, pendant les différentes crises sociopolitiques survenues en Côte d'Ivoire (2002 à 2011), plusieurs ouvriers ayant perdu leur emploi ont trouvé en la pratique du maraîchage, un moyen de subvenir à leurs besoins (**Koffie-Bikpo et Adaye, 2014**). Malheureusement, les exploitations maraichères se trouvent généralement sur des sites délaissés qui regroupent de nombreuses immondices ou sur des espaces vacants et en friche non constructibles (marécages) situés dans des bas-fonds inondables, des cuvettes, des collines ou des fortes pentes (**Koffi-Nevry et al., 2012**).



**Figure 1 : Photographies de quelques cultures maraichères (Anoman *et al.*, 2019)**  
 A : Piments ; B: Laitues C : Tomates ; D : Choux



**Figure 2 : Evolution comparée des surfaces cultivées et de la production des produits maraîchers en Côte d'Ivoire (FAO, 2017)**

## **1.2. Particularité de l'agriculture maraichère à Yamoussoukro**

### **1.2.1. Production maraichère à Yamoussoukro**

Un total de 13 grands sites de production ont été répertoriés à l'intérieur et aux extrémités de la ville. Ils se retrouvent, préférentiellement, autour des lacs, avec 31% des sites se situant dans des bas-fonds de collecte d'eaux usées et 15% dans les bas-fonds humides ou aménagés à la périphérie de la ville (**Koffi, 2012**). Les installations spontanées sans autorisation préalable ou «squattant» représentent 89% des parcelles agricoles de la ville.

Les légumes tiennent aujourd'hui une place importante dans le marché urbain à Yamoussoukro (**Parrot 2008a**). Plusieurs types de cultures sont pratiqués aux alentours des lacs. Ce sont principalement la laitue, le chou, l'aubergine, la carotte, le piment, le persil, la tomate et le haricot Vert. Il s'agit d'aliments consommés crus ou peu cuits comme les salades vertes.

Le maraîchage est une activité informelle à Yamoussoukro, caractérisée par une quasi absence de regroupement des producteurs qui entretiennent des exploitations individuelles (environ 91%). Il est exercé majoritairement par les hommes qui constituent 88% des producteurs et est tenu en majorité par des allochtones (71%), essentiellement des burkinabés et des maliens. Les producteurs sont en majorité illettrés (81%). C'est une activité ouverte à tous les âges (**Tano et al., 2011**).

### **1.2.2. Surfaces cultivées et types de cultures pratiquées à Yamoussoukro**

Les exploitations sont de tailles très variées, non seulement sur un même site, mais aussi d'un site à l'autre. Les domaines d'exploitations sont relativement petits. La majorité des exploitations (69%) ont une superficie comprise entre 100 m<sup>2</sup> et 1000 m<sup>2</sup>. Le maraîchage urbain à Yamoussoukro se caractérise par une polyculture où plusieurs cultures sont pratiquées par chaque producteur sur différentes parcelles (**ANADER, 2004**). Plus d'une quinzaine de spéculations sont rencontrées. Pour les plus cultivées, les taux d'adoption par les producteurs sont par ordre décroissant : 79%, 76% et 53%, respectivement pour la laitue, l'oignon vert et la carotte (**Figure 3**) (**Tano et al., 2011**).

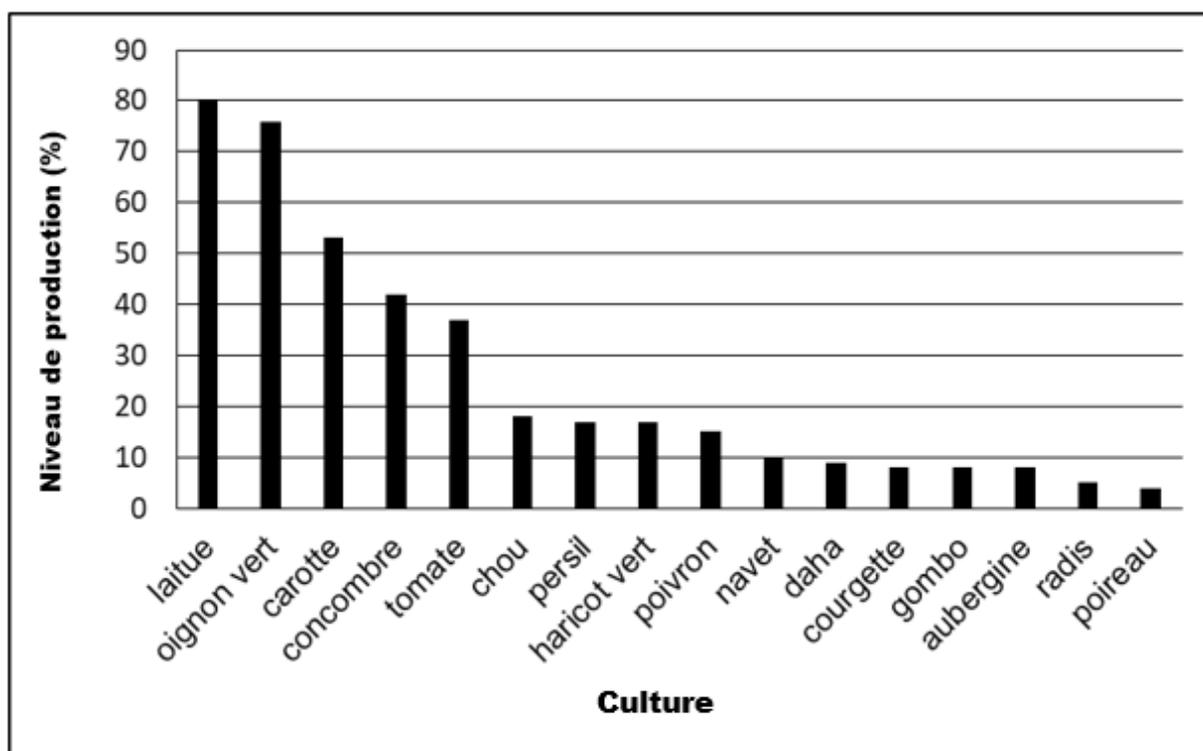


Figure 3 : Répartition des cultures maraîchères en fonction du niveau de production (Tano *et al.*, 2011) .

### **1.3. Rôle des cultures maraîchères pour les populations urbaines**

Les produits maraichers jouent un double rôle de sécurité alimentaire et de lutte contre certaines maladies (**Kimbatsa et al., 2018**). En effet, les légumes frais sont des aliments caractérisés par leur richesse en eau, en fibres, en vitamines, en minéraux et en micronutriments divers (**CEP, 2014**). Et concernant les micronutriments, certains se retrouvent préférentiellement dans les produits maraichers plutôt que dans d'autres types d'aliments. C'est le cas de la vitamine C, des folates et de la vitamine A apportée par les caroténoïdes pro-vitaminiques A (**INRA, 2007**). Leur richesse en vitamines, sels minéraux et protéines aident l'organisme à résister, entres autres, à certaines infections dites métaboliques (hypertension, diabète, cancer), à entretenir la qualité de la vue et de la peau et à faciliter la digestion (**Fofana, 2011**).

Les cultures maraîchères ont également l'avantage de pouvoir être cultivées sur de petites surfaces tout en assurant un revenu moyen aux producteurs (**Parrot, 2008b**). Le maraichage est pratiqué par des femmes et des jeunes qui disposent de faibles revenus (**ANADER, 2018**). Cette activité leur permet de vivre de la production et du commerce des produits (**ANADER, 2018**). Par ailleurs, les produits maraichers permettent d'alimenter des consommateurs en produits frais locaux (**Kanda et al. 2014**).

---

## CHAPITRE 2 : PROBLEMATIQUE DE LA SECURITE SANITAIRE DES PRODUITS MARAICHERS

---

### 2.1. Risques sanitaires des productions maraichères

La sécurité sanitaire traite de la sécurité et de l'évaluation des risques concernant la santé (Charbit et Gaimard, 2015 ; UNICEF, 2016). La santé passant par une bonne alimentation, un volet important de la sécurité sanitaire est la sécurité sanitaire des aliments et surtout celle des produits maraichers qui sont généralement consommés crus (Tano *et al.*, 2011). L'urbanisation de plus en plus poussée conduit à l'intensification de l'agriculture destinée à satisfaire une demande alimentaire croissante. Cela suscite à la fois des opportunités mais des défis pour la sécurité sanitaire des aliments (Toe, 2018). Les produits maraichers impropres à la consommation constituent une menace sanitaire (Koné *et al.*, 2014).

Les légumes peuvent être contaminés au cours de leur production, de leur récolte, de leur transformation, de leur distribution et de leur préparation pour la consommation (Adiko *et al.*, 2010 ; Sy *et al.*, 2014).

### 2.2. Différents cas de contaminations des produits maraichers

#### 2.2.1. Eaux d'arrosage, sources de contaminations des produits maraichers

Les eaux d'arrosage de mauvaise qualité peuvent contenir des microorganismes pathogènes apportés par les rejets fécaux (fèces et effluents) d'origine humaine ou animale et entraîner une forte contamination des légumes (Toe *et al.*, 2017). Pour la plupart des microorganismes (bactéries, virus, protozoaires, champignons, algues...), l'eau représente un vecteur de choix pour atteindre leur cible (U.S. EPA, 2010). Ces pathogènes peuvent véhiculer des maladies infectieuses, dont certaines pourraient se propager et atteindre le niveau épidémique pouvant conduire à de graves problèmes de santé publique (Koffi-Nevry *et al.*, 2012). Dans certains pays arides et semi-arides, le manque d'eau incite les agriculteurs à l'usage des eaux usées comme source d'irrigation (OMS, 2012). Ces pratiques observés aussi par certains maraichers des pays tropicaux, amplifient les risques de contamination microbiologique des légumes par l'eau (Adingra *et al.*, 2010).

### 2.2.2. Contaminations pré-récolte des cultures maraîchères

La contamination des légumes avant récolte est considérée comme susceptible de prendre en compte de nombreux foyers, car elle est extrêmement difficile à prévenir (**Ganyu et al., 2018**). Les agents pathogènes peuvent arriver par le fumier animal et la litière de volaille utilisée comme engrais, par les particules de sol contaminées, par le matériel agricole contaminé par des matières fécales (**Coulibaly-Kalpy et al., 2017**) ou même par des insectes.

Aussi, l'eau insalubre contaminée par des matières fécales et utilisée pour l'arrosage des cultures constitue une source directe de contamination avant les récoltes (**Aw et al., 2011**). Par ailleurs, l'élevage des animaux domestiques (chèvres, moutons et bovins), très répandu dans les zones de cultures, constitue des sources indirectes de contaminations.

Les animaux, leurs fèces et les eaux de crue provenant de parc à bétail ou une station d'épuration, sont responsables de la détérioration microbienne des cultures (**Kouadio et al., 2016**). Les mesures visant à empêcher les animaux domestiques et sauvages d'accéder aux zones de production et à l'eau d'irrigation (**FAO, 2008b**) ne sont généralement pas suivies. Dans certains pays, l'accès sans restriction des animaux d'élevages aux fermes maraîchères est observé dans 60% des cas au Nigeria (**Oyinlola et al., 2017**) et 23% aux États-Unis (**Bennett et al., 2015**).

Les agriculteurs ne sont généralement pas conscients du lien entre les pratiques de sécurité alimentaire et la contamination microbienne des légumes frais (**Shenge et al., 2015**). Pourtant, des études antérieures ont montré que le lavage et la désinfection des légumes ne peuvent pas éliminer toutes les bactéries contaminantes déjà installées, ainsi la réduction de la contamination avant la récolte est essentielle pour améliorer la sécurité des plantes fraîches (**Kouadio et al., 2016**).

### 2.2.3. Contaminations post-récolte des légumes

Les légumes peuvent être contaminés par divers itinéraires depuis la récolte jusqu'à la consommation.

Les facteurs post-récolte comprennent principalement: la manipulation humaine, les équipements de récoltes, les eaux de lavage et de rinçage des légumes, les récipients de conservations ainsi que les insectes volants principalement les mouches (**Bartram et Cairncross, 2010**). L'hygiène médiocre du personnel pénétrant dans le champ ou la serre et les

conditions de manutention non hygiéniques après la récolte entraînent également la contamination des légumes (**Faour-Klingbeil et al., 2016a**). Par ailleurs, l'utilisation d'ustensiles contaminés, de matériaux d'emballages et des conditions inappropriées pendant le stockage peuvent affecter la qualité des légumes et poser des problèmes de sécurité alimentaire (**Toe et al., 2017**).

Les autres facteurs, notamment l'utilisation des eaux de lavage, des installations de transport et de stockage inadéquates, ont également été identifiés comme des risques de contamination. La réutilisation des eaux de surfaces pour le lavage peut entraîner l'accumulation de charges microbiennes, y compris d'agents pathogènes indésirables provenant de la culture (**Artes et al., 2009**).

Une forte proportion de maladies accidentelles d'origine alimentaire est toutefois due à une préparation impropre des produits ou à une mauvaise manipulation à domicile, dans les établissements de restauration ou sur les marchés (**Toe et al., 2018**) ; entraînant de graves flambées de maladies d'origine alimentaire, souvent amplifiées par un commerce mondialisé (**Kouamé, 2017**)

## **2.3. Quelques causes de maladies dues à la consommation des productions maraichères**

### **2.3.1. Agents pathogènes bactériens**

Les bactéries pathogènes opportunistes induisent essentiellement des gastro-entérites d'origine hydrique (**Lin et Ganesh, 2013**).

La fièvre typhoïde est causée par *Salmonella typhi*, maladie infectieuse aiguë et contagieuse. *Salmonella paratyphi* A, B et C sont également à l'origine de fièvres entériques. *Staphylococcus aureus* est à l'origine d'infections cutanées (**Devleesschauwer et al., 2017**). Les enfants (moins de 16 ans) sont les plus touchés par ces troubles de santé. *Leptospira interrogans* responsable de la leptospirose, portée par certains animaux infectés (rats, bétail, chiens...), qui la rejettent dans leurs urines, est présent dans les eaux douces et les berges boueuses (**Lin et Ganesh, 2013**).

Les bactéries pathogènes incluent des espèces d'origine fécale humaine ou animale, qui appartiennent aux genres *Shigella* (*S. sonnei* et *S. flexneri*), *Salmonella*, *Campylobacter* (*C. jejuni* et *C. coli*), *Yersinia* (*Y. enterocolitica*), *Escherichia* (*E. coli* pathogènes) et *Vibrio* (*V. cholerae*) (**Wallender, 2014**). D'autres bactéries pathogènes comme les *Legionellas* (*L. pneumophila*) et certaines espèces du genre *Vibrio* ne sont pas des bactéries d'origine entérique

mais des pathogènes dont l'habitat naturel est l'environnement et plus particulièrement les systèmes aquatiques (**Kirmeyer et al., 2014**).

### **2.3.2. Agents pathogènes viraux**

Les virus pathogènes d'origine fécale (Virus de l'hépatite A, Entérovirus, Rotavirus, Calicivirus, Astrovirus, Norovirus) sont souvent à l'origine de maladies transmises par les eaux polluées (**Armon et Hanninen, 2015**). Les Adénovirus peuvent, eux, induire des gastro-entérites ayant des périodes d'incubation pouvant aller jusqu'à deux semaines (**Abbaszadegan et al., 2008**). Les virus Norwalk et Norwalk-like sont principalement responsables d'épidémies de gastro-entérites chez les adultes alors que les Rotavirus et Astrovirus sont à l'origine d'épidémies chez les enfants (**Hellmer et al., 2015**). Entérovirus et Adénovirus sont aussi responsables de problèmes respiratoires (**Bellou et al., 2015**).

L'infection d'un individu par un virus hydrique se produit dans la majorité des cas par l'ingestion, sauf pour le Coronavirus où elle peut aussi avoir lieu par inhalation (**Corsi et al., 2014**).

### **2.3.3. Agents pathogènes fongiques**

Les champignons de l'eau se transmettent par voie cutanéomuqueuse, et sont à l'origine d'affections cutanées (**CDC, 2013b**). Ce sont les moisissures et les levures (mycètes unicellulaires). Parmi les moisissures pathogènes de l'eau, on a : *Allescheria boydii*, *Géotrichum candidum* et *Aspergillus fumigatus*. Parmi les levures, l'espèce incriminée dans les pathologies humaines et animale est *Candida albicans*. C'est une espèce très répandue, d'origine fécale, et responsable de diverses mycoses telles que les infections cutanéomuqueuses buccales, vaginales et cutanées) (**Kakoul et al., 2014**).

### **2.3.4. Protozoaires pathogènes**

Les protozoaires sont des organismes unicellulaires eucaryotes, plus complexes et plus gros que les bactéries. La plupart des protozoaires pathogènes sont des organismes parasites et se développent aux dépens de leur hôte (**Drayna et al., 2015**). Certains protozoaires adoptent au cours de leur cycle de vie une forme de résistance, appelée kyste (en particulier, oocyte pour *Cryptosporidium* et kyste pour *Giardia*) (**Dorner et al., 2007**). Le protozoaire *Giardia lamblia*, est à l'origine d'une maladie connue sous le nom de giardiase, maladie intestinale assez

répandue. Son mode de transmission se fait par l'ingestion d'eau en provenance de réservoirs contaminés par des kystes qu'elle se fait (**Bonilla et al., 2015**). La cryptosporidiose est causée par le sporozoaire *Cryptosporidium*.

Les pathologies induites par ces parasites sont principalement des gastro-entérites. Selon plusieurs études, il y aurait une corrélation importante entre la présence de *Giardia* et *Cryptosporidium* avec les indicateurs de pollution fécale dans les eaux naturelles (**Payment et al., 2011**).

### **2.3.5. Micro-algues et cyanobactéries pathogènes**

De nombreuses espèces toxiques de dinoflagellés, de diatomées, de nanoflagellés et de cyanobactéries (algues de couleur bleu-vert) présentes dans le milieu aquatique provoquent des pathologies humaines. La toxicité de ces micros-algues pour l'homme tient aux toxines qu'elles libèrent (**Johnson et al., 2011**). Le principal danger vient de ce qu'elles s'accumulent dans les fruits et légumes qui sont ensuite consommés par l'homme, chez qui elles provoquent des intoxications. *Nodularia spumigena* a été la première cyanobactérie reconnue comme mortelle chez l'animal (**Hynds et al., 2012**). Elle produit une hépatotoxine, qui provoque d'importantes hémorragies du foie chez les mammifères et altère la structure de cet organe. L'inhalation d'embruns chargés de fragments de dinoflagellés ou de toxines (brévétotoxines) libérés dans l'écume par des micros-algues lysées peut être dangereuse pour l'homme (**Marion et al., 2014**). Les signes et symptômes sont une irritation sévère de la conjonctive et des muqueuses (en particulier celles du nez) suivie d'une toux persistante, d'éternuements et de picotements des lèvres (**Gleeson et al., 2009**).

### **2.3.6. Helminthes pathogènes**

Il peut s'agir de vers plats (plathelminthes), ou ronds (némathelminthes), qui comprennent de nombreuses formes de parasites souvent à l'origine de maladies très graves. Ce sont pour la plupart, des vers intestinaux, rejetés avec les matières fécales animales ou humaines (souvent sous forme d'œufs très résistants). La contamination se fait par voie digestive lors de l'absorption d'eau contaminée par des œufs ou des larves, ou alors par voie transcutanée c'est à dire, par fixation puis pénétration de larves à travers la peau (**Given et al., 2006**).

---

## CHAPITRE 3 : SOURCES DE POLLUTION DES EAUX LACUSTRES DE YAMOOUSSOUKRO

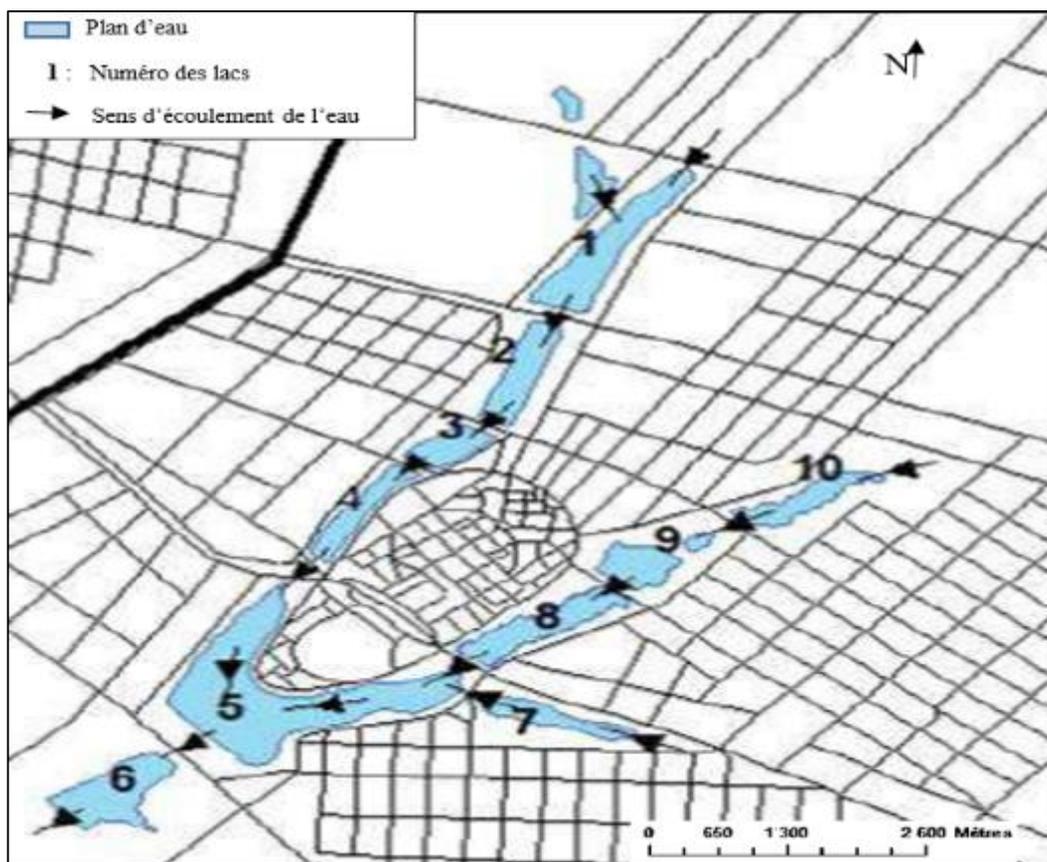
---

### 3.1. Les eaux lacustres de Yamoussoukro

Le district de Yamoussoukro est parcouru par un réseau hydrographique dense et ramifié au fleuve Bandama, les rivières N'ZI et KAN ainsi que leurs affluents. La commune de Yamoussoukro est caractérisée par la présence de dix lacs aménagés qui servent de milieux récepteurs aux eaux pluviales (N'guessan, 2014). L'écoulement des eaux d'un lac à l'autre se fait de façon gravitaire et à travers des ouvrages de communication aménagés à cet effet. Ces ouvrages de communication permettent d'évacuer le trop-plein du lac en amont immédiat dans le lac en aval contigu (**Figure 4**).

L'accès aux bordures des lacs est plus ou moins facile selon leur localisation et leur superficie varie d'un lac à l'autre. En forme "Y" le système lacustre a été aménagé sur deux branches.

La première branche de lacs, composée des **Lac 1 (Guiglo)**, **Lac 2 (lac aux caïmans 1)**, **Lac 3 (lac aux caïmans 2)**, et **Lac 4 (lac aux caïmans 3)**, est situé dans une zone peu urbanisée et très peu peuplée. La seconde branche de lacs aménagés comprend les **Lac 8(Rue des Maquis)**, **Lac 9 (Fanon)** et **Lac 10 (Médico-Scolaire)**, qui eux sont situés en plein centre urbain très dense et très peuplé. Les eaux en provenance de ces deux branches, auxquelles s'ajoutent celles issues du **Lac 7 (lac Gare DJEKANOU)**, se déversent dans le **Lac 5 (Centre Hospitalier Régional (CHR))**, le lac le plus étendu. En définitive, les eaux à la sortie du lac CHR sont évacuées dans le **Lac 6 (Petit-Bouaké)** pour alimenter le périmètre irrigué situé en aval.



**Figure 4 : Localisation et sens d'écoulement des eaux des dix (10) lacs de Yamoussoukro (N'guessan, 2017)**

**1 :** Guiglo

**7 :** Gare Djekanou

**2 ; 3 et 4 :** Lacs aux caïmans

**8 :** Rue des Maquis

(Résidence du président Felix Houphouët-Boigny)

**5 :** CHR

**9 :** Fanou

**6 :** Petit Bouaké

**10 :** Medico Scolaire

## 3.2. Origine de la pollution microbiologique des eaux lacustres

### 3.2.1. Installations d'assainissements défectueuses

Les installations d'assainissements, défectueuses du fait du mauvais ou du non fonctionnement des stations d'épurations, engendrent des effluents mal traités (MCAU, 2016). Ainsi, les eaux usées coulant dans les réseaux urbains ou les eaux usées directement émises par les fosses septiques individuelles sont directement rejetées dans les lacs. A Yamoussoukro, seulement quatre (4) stations d'épurations sur sept (7) fonctionnent de façon optimale (CHR, 2014 ; MCAU, 2016). Ces stations fonctionnelles restituent des eaux épurées à travers des canaux d'évacuations installés sur les lacs (Figure 5), qui respectent les normes de rejets d'eaux (Kabour *et al.*, 2011). Les trois (3) autres constituent une source de pollution permanente pour les lacs puisque les eaux rejetées dans les lacs ne subissent aucun traitement comme le préconisent les normes.

D'autre part, le manque de vidange des installations autonomes occasionnent des écoulements d'eaux usées remplies de déjections qui sont sources de pollution des eaux lacustres (Bakenou, 2011).



**Figure 5 : Canal d'évacuation d'eaux usées d'une station d'épuration non fonctionnelle, située au quartier Riviera près du lac 5 (CHR) (Anoman *et al.*, 2019)**

### 3.2.2. Déchets solides

Les déchets solides ménagers et assimilés résultent des activités des ménages. En cas de déficit de collecte des déchets solides, des dépôts sauvages sont constitués et les déchets sont disséminés un peu partout dans la commune (Aw, 2009). Certains déchets sont entreposés directement aux abords des lacs. Ainsi, par ruissellement, ces déchets sont mobilisés vers les points bas et les plans d'eau (Kakoul *et al.*, 2014). Certains ménages transforment les caniveaux à ciel ouvert et les regards en dépotoir d'ordures ménagères qui sont charriées vers les points bas et dans les eaux des lacs (Figure 6). Les déchets solides représentent une menace de pollution des eaux de surface avec des risques particuliers pour la santé, la sécurité des êtres vivants et la qualité de l'environnement s'ils ne sont pas bien collectés, transportés et traités (Jagai *et al.*, 2015).



Figure 6 : Ordures ménagères sur la berge du lac 8 (Rue des maquis) (Anoman *et al.*, 2019)

### 3.2.3. Eaux usées

Les eaux usées comprennent les eaux ménagères (eaux de toilette, de lessive, de cuisine), les eaux vannes (urines et matières fécales), les eaux de ruissellement comprenant les eaux de pluies, les eaux des caniveaux, les eaux de lavages automobiles et les eaux de drainages (WWAP, 2017) (Figure 7). Les pluies occasionnent des écoulements de ces eaux usées vers les eaux lacustres. (IBGE, 2018). Ces eaux sont polluées par les matières qu'elles entraînent et contiennent une multitude d'agents pathogènes susceptibles de déclencher des maladies transmissibles. Ces agents peuvent être des bactéries, des virus, des parasites et des champignons (Dovonou, 2008).



**Figure 7 : Eaux usées de vannes et de lavage automobile dans le quartier Dioulabougou proche du lac 7 (Gare Djekanou) (Anoman et al., 2019)**

### 3.2.4. Activités d'élevage et de pêche

La Commune de Yamoussoukro constitue un site de transit des animaux d'élevages en provenance des pays du Nord (Mali, Niger, Burkina-Faso) (Amadji, 2012). Ces animaux trouvent refuge dans des enclos à proximité des lacs. Ainsi, il s'en suit des déjections animales produites à proximité des eaux. Ces déchets sont entrainés dans les eaux des lacs par le ruissellement engendré par les pluies. Aussi, certains éleveurs conduisent périodiquement les bétails aux lacs pour les laver et s'abreuver(N'Guessan, 2017) (Figure 8). Cette pratique dégrade davantage la qualité des eaux des lacs.

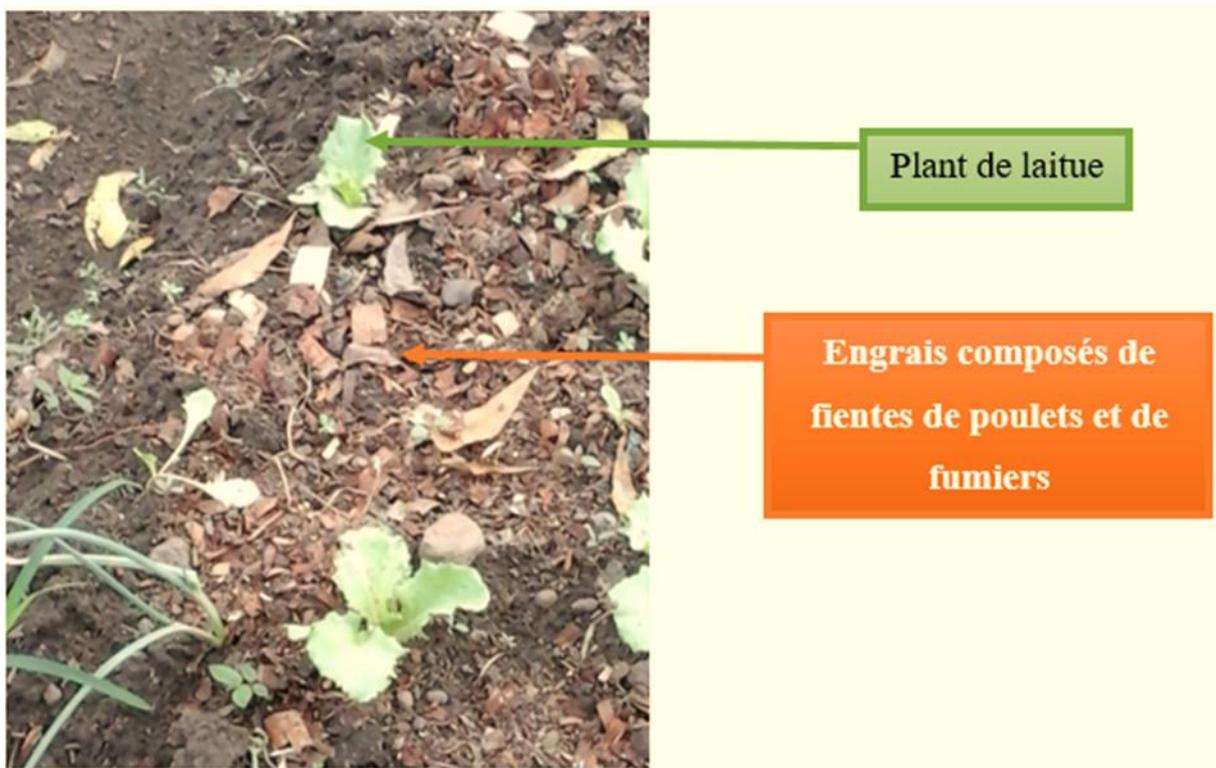
Concernant, la pêche pratiquée généralement de façon artisanale, les sons de riz utilisés comme principal appât par les pêcheurs contribuent à dégrader la qualité de l'eau (Bony, 2016) .



Figure 8 : Repos du bétail après abreuvement dans le Lac 6 (Petit Bouaké) (Anoman et al., 2019)

### 3.2.5. Pratiques agricoles polluantes

L'agriculture constitue une source importante de contamination microbienne. Elle peut avoir des effets négatifs sur la quantité et la qualité de l'eau (**Ganyu et al., 2018**). Lors de l'épandage du fumier sur les terres agricoles, des contaminants bactériologiques contenus dans ces déjections animales peuvent être entraînés vers les cours d'eaux par ruissellement (**Carr et Neary, 2008**) (**Figure 9**). Les risques pour la santé causés par les fumiers ne sont pas bien documentés quoique la présence de virus, de bactéries et de parasites pathogènes dans les déjections animales soient bien connue (**Compaoré et al., 2010 ; Pagadala et al., 2015**).



**Figure 9 : Engrais composés de fientes et de fumiers disséminés sur une parcelle de salades cultivés aux abords du lac 1 (Guiglo) (Anoman et al., 2019).**

---

## CHAPITRE 4 : IMPACT DES FACTEURS ENVIRONNEMENTAUX SUR LA QUALITE MICROBIOLOGIQUE DES EAUX DE SURFACES

---

### 4.1. Définitions de quelques termes et concepts climatiques

De nombreuses définitions relatives aux concepts du changement climatique et des stratégies d'adaptations sont proposées par la communauté scientifique. Ce travail retiendra les définitions proposées par la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC, 1992), et le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC, 2007 ; 2014) Leur portée a été précisée afin de contextualiser la compréhension des idées développées.

**Changement climatique** : La CCNUCC (CCNUCC, 1992), dans son article premier, définit les changements climatiques comme « des changements qui sont attribués directement ou indirectement à une activité humaine altérant la composition de l'atmosphère mondiale et qui viennent s'ajouter à la variabilité naturelle du climat observée au cours de périodes comparables».

**Variabilité climatique** : Elle est un des éléments intégrateurs du changement global. Selon cette convention, la variabilité climatique désigne les changements climatiques d'origine naturelle. Elle fait pressentir la mobilité ou la variation du schéma climatique moyenne et d'autres statistiques (écarts moyens, normales, phénomènes extrêmes, etc.) du climat à toutes les échelles temporelles et spatiales au-delà des phénomènes climatiques individuels. La variabilité peut être due à des processus internes naturels au sein du système climatique (variabilité interne), ou à des variations des forçages externes anthropiques (GIEC, 2007). La variabilité du climat est souvent perçue à travers l'irrégularité des paramètres climatiques dans leur évolution. Dans ce travail, il s'agit de caractériser les cycles interannuels et les tendances du climat.

**Perception locale** : La perception locale ou paysanne des phénomènes climatiques peut être définie comme la façon des agriculteurs et communautés locales de comprendre, de représenter ou d'interpréter les changements du climat qu'ils observent. La perception locale contrôlera en partie la sensibilisation, les objectifs et les méthodes à appliquer dans les actions pratiques (Pulido et Bocco, 2014).

**Stratégies d'adaptation** : L'adaptation est définie comme « l'ajustement dans les systèmes naturels ou humains en réponse au climat actuel ou futur, ou à leurs effets qui atténue les dommages ou en valorise les bénéfices » (GIEC, 2007 ; 2014).

**Atténuation** : L'atténuation désigne les politiques et les options visant à réduire les émissions de GES et à restaurer ou renforcer les capacités de puits de carbone des écosystèmes et agroécosystèmes qui absorbent le carbone ou le dioxyde de carbone atmosphérique (**GIEC, 2007**).

**Risque** : Le risque est défini comme la probabilité d'occurrence d'événements dangereux ou de conséquences préjudiciables résultant d'interactions entre des aléas naturels ou causés par l'homme et des conditions de vulnérabilité (**UNISDR, 2009**). Le risque lié au climat est une combinaison de trois facteurs à savoir l'aléa, l'exposition et la vulnérabilité (**GIEC, 2014**). L'aléa est un phénomène dangereux pouvant causer des impacts néfastes. Le terme «exposition» fait référence à la présence de personnes, de services, d'infrastructures et de biens sociaux, économiques ou culturels dans un lieu susceptible de subir des dommages (**GIEC, 2014**). La «vulnérabilité» fait référence aux caractéristiques et circonstances d'une communauté ou d'un système qui le rendent susceptible de subir les effets d'un danger (**UNISDR, 2009**).

**Résilience** : La résilience peut être définie comme l'habilité des personnes, des lieux et des écosystèmes exposés de sortir des stressés et de lutter seuls contre ces stressés et s'adapter aux stressés et perturbations futures. Elle présente deux aspects à savoir : - identifier les risques des effets actuels, progressifs et à long terme du changement climatique ; - concevoir des mesures pour réduire ces risques, les transférer et s'y préparer.

#### **4.2. Changement et variabilité climatiques en Afrique de l'ouest**

L'Afrique est l'un des continents les plus vulnérables au changement du climat. Les études sur le changement climatique en Afrique de l'Ouest, en particulier la pluviométrie, sont en perpétuellement croissance (**Nicholson, 2008 ; Druyan, 2011**). Depuis plus de trois décennies, cette région fait face à une variabilité climatique sans précédent à l'échelle historique. Plusieurs études ont été menées au niveau régional sur l'analyse du changement climatique et de ses caractéristiques, en particulier la mousson ouest-africaine qui dépend de la configuration des précipitations dans la région (**Hastenrath et Polzin, 2011 ; Rodríguez et al., 2011**). La conséquence immédiate est la baisse des précipitations annuelles en cours depuis la fin des années 1960, avec une diminution de 20 à 40 % entre les périodes 1931-1960 et 1968-1990 (**Dai et al., 2004 ; Chappell et Agnew 2004**). Dans les régions semi-arides et subhumides d'Afrique de l'Ouest, les précipitations ont connu la même tendance, avec une période de fortes pluies dans les années 1950 et 1960, suivie d'une baisse significative dans les années 1970 et

au début des années 1980 (**Hastenrath et Polzin, 2011**). Dans cette région, une augmentation de la température de 0,2 à 0,8 °C a été notée depuis la fin des années 1970. Cette augmentation thermométrique est plus marquée au niveau des minimales que des maximales (**ECOWAS-SWAC/OECD, 2008**). En Côte d'Ivoire, ces conséquences sont certes moins marquées qu'en zone sahélienne, mais elles induisent des évolutions socio-économiques non négligeables (**Bigot et al., 2005 ; Yao et al., 2005**). **Goula et al. (2006)** et **Assemian et al., (2013)** ont noté une diminution des précipitations de 10 à 30 % dans plusieurs régions du pays. Selon le GIEC, la région devrait être confrontée à l'horizon 2050 à l'effet combiné de la hausse des températures (+2 °C), de la variation des précipitations (-9 % en mai et +9 % en octobre) et de la montée des eaux des océans (30 cm) (**GIEC, 2014**).

#### **4.2.1. Changement climatique et agriculture**

L'Afrique de l'Ouest est l'une des régions du monde les plus vulnérables à la variabilité climatique (**GIEC, 2014 ; World Bank, 2018**). Cette vulnérabilité est aggravée par plusieurs facteurs de stress, dont la dépendance de l'agriculture vis-à-vis des précipitations, la sécheresse récurrente, la pauvreté, la démographie galopante et la faible capacité d'adaptation (**Niasse et al., 2004**). La situation climatique est beaucoup plus désastreuse au niveau du Sahel en raison de sa proximité au désert saharien et de la forte dépendance de sa population à l'agriculture pluviale et à l'élevage (**Mertz et al. 2009a ; 2009b ; 2011 ; 2012**). Dans ce contexte, **Connolly-Boutin et Smith (2016)**, **Verhagen et al., (2003)** et **Paeth et al., (2008)** ont mis en exergue l'impact du changement climatique sur la sécurité alimentaire à travers des indicateurs et des scénarii en Afrique de l'Ouest. Les sécheresses, les vagues de chaleur et les inondations ont réduit le rendement des cultures et la productivité du bétail. La diminution des précipitations enregistrée en Afrique de l'Ouest depuis les années 1970 a entraîné une baisse de la production agricole qui en dépend (**Mertz, 2010 ; Aloko-N'Guessan et al., 2014**).

#### **4.2.2. Changement climatique et ressources en eau**

Les principaux effets du changement climatique sur les systèmes fluviaux africains se reflètent dans les changements du cycle hydrologique (**Fofana et al., 2017**). L'Afrique de l'Ouest renferme dans son ensemble de nombreux fleuves et lacs (**Barrat, 2012**). Les changements dans les précipitations totales, combinés aux changements dans l'utilisation des terres en Afrique de l'Ouest depuis les années 1970, ont entraîné une forte baisse de ces eaux de surfaces (**Goula et al., 2006 ; Barrat, 2012**). Les estimations montrent que le niveau de certains grands

fleuves ouest-africains a chuté de près de 60 % entre les périodes 1970-1980 (**Sircoulon, 1987 ; Oliviry et al., 1998**). Ainsi, la variabilité climatique a entraîné la baisse de la disponibilité de l'eau et la dégradation de la qualité de l'eau (**Niasse et al., 2004**). En Côte d'Ivoire, des études ont révélé une évolution ascendante des coefficients de tarissement de certains cours d'eau depuis les années 1970 (**Goula et al., 2006 ; Assemian et al., 2013**). De plus, la dégradation du couvert végétal contribue à l'envasement des rivières et des lacs, limitant ainsi les possibilités de culture et d'approvisionnement en eau pour les populations et le bétail (**Benhin et Barbier, 2004 ; Fried, 2004**).

#### **4.2.2.1. Modifications des régimes pluviométriques et ressources en eau**

Les modifications des régimes et des quantités de précipitations affectent les systèmes des eaux de surfaces (**Krejci et al., 2015**). Avec leurs corollaires d'évènements météorologiques extrêmes, les régimes hydrologiques sont marqués par des crues fortes et rapides en saisons pluvieuses (**Kouakou et al., 2008**). Ces crues en période pluvieuses, favorisent l'érosion des sols de l'amont vers les bassins versants des eaux (**Trolle et al., 2010**) sans parler d'une diminution des superficies d'exploitations dans certaines zones; car les eaux de pluie les inondent (**Sy et al., 2014**).

Les niveaux de pluie sont une cause à l'origine lessivage des sols agricoles. Les précipitations entraînent les microorganismes pathogènes via les processus de diffusions et d'advection par le mouvement de la phase liquide (**Taylor, 2006**). Les eaux qui ruissellent sur les toitures, les cours, les jardins, les espaces verts, les voies publiques et les marchés entraînent toutes sortes de déchets minéraux et organiques (**IBGE, 2018**). Elles influencent aussi l'aération des sols environnant les lacs en libérant et drainant vers les eaux les microorganismes pathogènes retenus. La fréquence et la densité des précipitations modifient des facteurs abiotiques du sol et la survie des microorganismes (**Chase et al., 2019**).

#### **4.2.2.2. Sécheresse et rayonnements solaires et influence sur les ressources en eau**

Les zones arides et semi-arides, en particulier la zone sahélienne, ont subi de profonds changements suite aux aléas climatiques en cours depuis les années 1970. Les sécheresses, de plus en plus fréquentes, ont considérablement affecté les surfaces habituellement inondables au niveau des cours d'eau (**Barrat, 2012 ; Fofana et al., 2017**). En effet, les sécheresses majeures se sont accompagnées d'une dégradation des sols avec la disparition progressive de la végétation naturelle et l'extension des zones dénudées et des croûtes superficielles (**Barrat, 2012**). Ces changements environnementaux ont été accélérés par les activités anthropiques, telles que la

mise en cultures, les défrichages incontrôlés, les mauvaises pratiques agricoles, le surpâturage, etc. (Mertz *et al.*, 2011 ; Brandt *et al.*, 2016 ; 2017). Dans un contexte où les réserves s'amenuisent de façon inquiétante, face à une consommation accrue et l'augmentation des activités humaines, surtout là où les densités de population sont élevées, la disponibilité de l'eau y devient problématique (Orsini *et al.*, 2013). Les changements climatiques pourraient exacerber les impacts négatifs de la rareté, de la disparité spatio-temporelle et de la forte dégradation des ressources en eau (Ozer *et al.*, 2013).

Les modifications climatiques caractérisées par la rareté des pluies et par l'augmentation de la température moyenne, ont pour corollaires la dégradation de la qualité et la disponibilité de l'eau (De Nicola *et al.*, 2015). La plupart du temps, des problèmes importants de qualité se posent en relation avec l'érosion, la salinisation et la pollution des eaux en situation extrême de sécheresse. Les barrages s'assèchent, les puits tarissent, et les superficies exploitables se réduisent de manière drastique. (Misztal *et al.*, 2015).

Certains des rayons émis par le soleil (les ultra-violets en particulier) ont un effet délétère sur les organismes vivants (Hijnen *et al.*, 2006). Ils contribuent à détruire une partie des microbes vivants ou survivants dans les couches supérieures des eaux superficielles quand l'eau n'est pas trop turbide. On a toujours pensé que seules les radiations U.V. (~ 280nm) qui agissent au niveau des acides nucléiques étaient létales pour les micro-organismes (Khalil, 2016). Cependant, il a été observé que la lumière visible ou proche des U.V. peut causer des dommages chez *E.coli*. Aussi, Chase *et al.* en (2019) ont montré que les rayons solaires avaient un effet bactéricide chez *E.coli*. Une forte sécheresse est néfaste aux microorganismes fécaux (Hijnen *et al.*, 2006).

#### 4.2.3. Changement climatique et santé humaine

Les facteurs climatiques ont un impact sur les agents pathogènes, les hôtes, les vecteurs et la dynamique épidémiologique. Depuis des décennies, de nombreux décès et maladies sont imputés au changement climatique au regard des catastrophes naturelles qu'elles entraînent (vagues de chaleur, inondations, sécheresses, etc.) (OMS, 2004 ; Cissé *et al.*, 2011). En outre, plusieurs maladies sont hautement sensibles aux facteurs climatiques (température et précipitations) (Drouet, 2019). La plupart d'entre elles sont des maladies à transmission vectorielle telles que le paludisme et la dengue, ainsi que d'autres causes principales de mortalité, telles que la malnutrition, les maladies diarrhéiques et les pathologies respiratoires (Moore *et al.*, 2017 ; Coulibaly *et al.*, 2018). De plus, des auteurs ont montré une corrélation

significative entre l'incidence de la méningite et les facteurs climatiques (**Sultan et al., 2005**) Les pluies extrêmes provoquent des inondations qui occasionnent également des noyades et des traumatismes physiques. Ces inondations endommagent les logements et perturbent la prestation des services de soins et de santé (**Drouet, 2019**). De plus, la sécheresse et les fortes pluies entraînant la contamination des eaux de surface constituent des facteurs importants d'infection liés à *E. coli* (**Okeke, 2010 ; Effler et al., 2001**) et à *Salmonella typhi* (**Mweu, 2008; Kim et al., 2017**). Par ailleurs, certains scientifiques ne pensent que le changement climatique impacte l'occurrence des maladies infectieuses transmises par l'eau ou les micromammifères. **Omoleke et al., (2016)** ont observé que les facteurs climatiques ont impacté l'éclosion des épidémies d'Ebola en Afrique de l'Ouest. La variabilité climatique à l'échelle locale ou régionale influence à la fois la dynamique temporelle et la synchronie spatiale des épidémies de choléra chez les populations humaines du golfe de Guinée (**Constantin et al., 2007**).

### **4.3. Impact des changements climatiques sur les paramètres du milieu et qualité microbiologique des eaux de surfaces**

#### **4.3.1. Les paramètres physiques**

##### **4.3.1.1. Influence de la température sur la survie des microorganismes**

La température est l'un des facteurs environnementaux les plus importants qui déterminent la croissance et la survie des microorganismes. Chaque organisme a un intervalle caractéristique de croissance avec des valeurs de température minimum, optimum, et maximum (**Kahn et al., 2014**). Les micro-organismes peuvent exister dans les environnements à des températures en dessous de zéro (-5 °C minimum) au point d'ébullition de l'eau et au-dessus (113 °C maximum), et peuvent être classés en trois groupes majeurs : psychrophiles, thermophiles, et mésophiles selon leurs exigences de température. **Nedwell (1999)** a suggéré qu'aux basses températures, les membranes des cellules bactériennes deviennent plus rigides, lequel surtout influence le transport actif d'éléments nutritifs à travers la membrane (**Allison et Martiny, 2008**). La perméabilité de la membrane pourrait affecter aussi la vitesse d'absorption des métaux lourds par les cellules, affectant ainsi la toxicité des métaux. **Hossain et al. (2006)** ont cultivé *E. coli* à différentes températures (20, 30, 40, et 50 °C) pendant 60 h en présence de 600 ppm de Pb. Ces auteurs remarquèrent que la croissance est maximale à 40 °C. Les températures hautes diminuent la survie des bactéries (**Michel et al., 2000 ; Tornevi et al., 2014**).

La survie des bactéries coliformes diminue avec la température. En moyenne l'optimum de température de stockage avoisine les 15 à 20 °C, ce qui peut paraître surprenant pour des microorganismes habitués à des températures proches de 37 °C (Cook *et al.*, 2007).

#### **4.3.1.2. Influence de la présence des matières en suspension (MES) sur la survie des microorganismes**

Les matières en suspension (MES) constituent l'ensemble des particules minérales et/ou organiques présentes dans une eau naturelle ou polluée (Camenen *et al.*, 2019). Elles peuvent être composées de particules de sable, de terre et de sédiment arrachées par l'érosion, de divers débris apportés par les eaux usées ou les eaux pluviales très riches en MES, d'êtres vivants planctoniques (notamment les algues) (Dèdjiho *et al.*, 2013). Elles correspondent à la concentration en éléments non dissous d'un échantillon (Launay *et al.*, 2019). L'abondance des matières en suspension dans l'eau favorise la réduction de la luminosité et abaisse la production biologique du fait, en particulier, d'une chute de l'oxygène dissous consécutive à une réduction des phénomènes de photosynthèse (Derwich *et al.*, 2019).

Elles sont en majeure partie de nature biodégradable (Camenen *et al.*, 2019). La plus grande part des microorganismes pathogènes contenus dans les eaux usées est transportée par les MES. Elles donnent également à l'eau une apparence trouble, un mauvais goût et une mauvaise odeur. Cependant, elles peuvent avoir un intérêt pour l'irrigation des cultures (Derwich *et al.*, 2019). Les MES s'expriment par la relation suivante  $MES = MMS + MVS$  (I.1). Les matières volatiles en suspension (MVS) sont recueillies soit par filtration, soit par centrifugation, séchées à 105°C, puis pesées, ce qui fournit la teneur en MES (g/l). Elles sont ensuite chauffées à 500-600°C, les matières volatiles disparaissent, et la perte de poids est attribuée aux MVS (g ou mg/l) matières volatiles en suspension (Merzougui, 2017). Les matières minérales sèches (MMS) représentent la différence entre les matières en suspension (MES) et les matières volatiles en suspension (MVS) et correspondent à la présence de sel, et de silice (Merzougui, 2017).

#### **4.3.1.3. Influence de la Turbidité sur la survie des microorganismes**

Une eau turbide est une eau trouble (Newcombe, 2003). La turbidité est inversement proportionnelle à la transparence de l'eau, elle est de loin le paramètre de pollution indiquant la présence de la matière organique ou minérale sous forme colloïdale en suspension dans les eaux usées. Elle varie suivant les matières en suspension (MES) présentes dans l'eau (Betatache *et al.*, 2014).

Cette caractéristique vient de la teneur de l'eau en particules en suspension, associées au transport de l'eau. Au cours de ce parcours, l'eau se charge de quantités énormes de particules, qui troublent l'eau. Les matières, mêlées à l'eau, sont de natures très diverses : matières d'origine minérale (argile, limon, sable...), micro particules, micro-organismes (**Lorette et al., 2019**). La turbidité indique une probabilité plus grande de présence d'éléments pathogènes (**Schiperski et al., 2019**). La matière organique associée à la turbidité favorise la formation de biofilms dans le réseau et par conséquent, le développement de bactéries insensibles au chlore et protégées des ultraviolets (**Goldscheider et al., 2019**).

#### **4.3.2. Les paramètres chimiques**

##### **4.3.2.1. Influence du potentiel Hydrogène (pH) sur la survie des microorganismes**

Ce paramètre caractérise un grand nombre d'équilibre physico-chimique et dépend de facteurs multiples, dont l'origine de l'eau (**Atinkpahoun et al., 2018**). Le pH donne une indication de l'acidité d'une substance. Il représente le degré d'acidité ou d'alcalinité suivant qu'il se trouve dans la bande de 0 à 7 ou de 7 à 14. Il est déterminé à partir de la quantité d'ions d'hydrogène hydronium (H<sup>+</sup>) ou d'ions hydroxide (OH<sup>-</sup>) contenus dans la substance. Quand les quantités de ces deux ions sont égales, l'eau (ou la substance) est considérée comme neutre, et le pH a une valeur aux alentours de 7. Au-dessus de 7, la substance est considérée comme basique ou alcaline et la quantité d'ions OH<sup>-</sup> est supérieure à celle d'ions H<sup>+</sup>. Au-dessous de 7, la substance est acide ; les ions H<sup>+</sup> sont en quantités supérieures (**Bach, 2010**).

La valeur du pH est importante lors des opérations d'évaluation de qualité de l'eau. L'activité biologique et certains rejets urbains influent sur le caractère acide ou basique d'une eau (**Sadia et al., 2016**). Les variations importantes du pH dans un milieu aquatique, sont presque toujours la conséquence de rejets industriels et de l'activité biologique. Par ailleurs, la présence de macrophytes dans les eaux participe à la fluctuation du PH (**Abba et al., 2008**). Les bactéries peuvent exister dans les environnements extrêmement acides (jusqu'à pH 0) aux environnements très alcalins (aussi haut que pH 12), et se classent dans trois groupes principaux - acidophiles (intervalle de croissance pH 0-5.5), neutrophiles (pH 5.5-8.5), et alcalophiles (pH 8.5-12.0). Par contre, les pH extrêmes sont nuisibles pour les microorganismes d'origine fécale (**El-Amier et al., 2015**).

#### 4.3.2.2. Influence de l'Oxygène dissous (O<sub>2</sub>) sur la survie des microorganismes

L'eau absorbe autant d'oxygène que nécessaire pour que les pressions partielles d'oxygène dans le liquide et dans l'air soient en équilibre. La solubilité de l'oxygène dans l'eau est fonction de la pression atmosphérique (donc de l'altitude), de la température et de la minéralisation de l'eau : la saturation en O<sub>2</sub> diminue lorsque la température et l'altitude augmentent (**Villeneuve et al., 2006**). La concentration en oxygène dissous est un paramètre essentiel dans le maintien de la vie, et donc dans les phénomènes de dégradation de la matière organique et de la photosynthèse (**Ivanovsky et al., 2016**). C'est un paramètre utile dans le diagnostic biologique des eaux de surface. Une eau très aérée est généralement sursaturée en oxygène (torrent), alors qu'une eau chargée en matières organiques dégradables par des micro-organismes est sous-saturée car ne contient pas beaucoup d'oxygène. En effet, la forte présence de matière organique, dans un plan d'eau par exemple, permet aux micro-organismes de se développer tout en consommant de l'oxygène (**Touchart et al., 2012**).

L'oxygène dissous permettra d'estimer la vitesse de la dégradation de la matière organique. Une eau chargée en matières organiques dégradables par des micro-organismes est sous-saturée car ne contient pas beaucoup d'oxygène. La forte présence de matière organique, dans un plan d'eau, permet aux micro-organismes de se développer et augmenter tout en consommant de l'oxygène, jusqu'à ce que l'eau limite la diffusion et la disponibilité de l'oxygène (**Balesdent et al., 2000**). Des conditions légèrement anaérobies favorisent néanmoins la persistance des bactéries fécales (**Oliver et al., 2005a**). *E. coli* étant aérobie facultative, elle est capable de survivre dans des eaux oxygénées ou saturées. Par contre, sa survie est plus limitée dans des eaux saturées (**Tate et al., 1978**).

#### 4.3.2.3. Influence de la teneur en matière organique (MO) sur la survie des microorganismes

La teneur en matière organique nous renseignera sur la quantité de nutriments disponibles dans le milieu. Le carbone organique dissous et particulaire constitue une variable influençant sur les abondances bactériennes (**Gessol, 2008**). La survie des bactéries augmente lorsque la teneur en matière organique est élevée (**Jang et al., 2017**). La teneur en matière organique nous renseignera sur la quantité de nutriments disponibles dans le milieu (**Abril et al., 2004**). Le carbone organique dissous (COD) (**NF 90-103**) exprime la totalité des fractions solubles des matières organiques qu'elles soient biodégradables ou inertes (**Kishe, 2004**). La concentration en carbone organique dissous agit sur le maintien des populations bactériennes d'après **EILER et al. (2003)**.

#### 4.3.2.4. Influence de la salinité (NaCl) sur la survie des microorganismes

Le sel ou le stress osmotique est étroitement relié au stress hydrique parce que les solutés affectent fortement l'activité de l'eau (**Yan *et al.*, 2015**).

**Gupta *et al.* (1998)** ont étudié l'effet du NaCl sur la croissance de deux souches de *E. coli*, sensible et résistante à l'argent. Ils observèrent que 40 g/l de NaCl, sans addition de Ag<sup>+</sup>, réduit la croissance de la souche résistante. En présence de NaCl et de Ag<sup>+</sup>, la souche sensible croît, mais aucune croissance n'est observée aux concentrations élevées de NaCl (20, 30, 40, 50 et 60 g/l). Concernant la souche résistante, la croissance est affectée à 10 g/l de NaCl ; alors qu'à 20 g/l de NaCl, la croissance est nulle.

---

## CHAPITRE 5 : LES COLIFORMES THERMOTOLERANTS : INDICATEURS PERFORMANTS DE POLLUTION FECALE

---

### 5.1. Réglementation de la qualité des eaux de surface et des germes indicateurs de pollution microbiologique

les normes en vigueur sur l'évaluation des risques sanitaires des eaux de surfaces, sont basées sur la détection d'organismes dits indicateurs de pollution (**Norme ISO 9308-3, 1999 ; Fricker *et al.*, 2008**), choix qui résulte des difficultés à détecter toute la diversité des bactéries pathogènes des eaux (des dizaines d'espèces, des centaines de souches) (**Lehtola *et al.*, 2007 ; Leclerc *et al.*, 2011**). En ce qui concerne la qualité microbiologique des eaux de surface, la norme est édictée à partir de l'abondance d'indicateurs de pollution présents dans les eaux et de l'incidence des maladies d'origine hydrique dues à une exposition à ces eaux de surface. Parmi les normes microbiologiques des eaux de surface, on distingue les normes proposées par l'OMS et le PNUE et la nouvelle directive Européenne 2006/7/CEE (**Tableau I**). Deux niveaux de qualité : suffisante ou mauvaise ont été définies. La catégorie « suffisante » est le seuil minimal de qualité. Lorsque les valeurs sont inférieures au seuil de la catégorie « suffisante », l'eau est polluée (**OMS et PNUE, 2006**).

Les germes indicateurs de contamination fécale peuvent être des bactéries, des virus, des champignons, etc... Leur abondance révèle le contact avec une source de contamination fécale et donc la présence possible d'un agent pathogène associé aux matières fécales (**Orskov I., 2012**). L'utilisation de certains microorganismes indicateurs pour évaluer la qualité microbiologique de l'eau est établie depuis longtemps (**Palmer *et al.*, 2004 ; Power *et al.*, 2015**). En effet, la recherche de tous les pathogènes susceptibles de contaminer les matrices hydriques ou les aliments est non réalisable en routine car trop coûteuse, laborieuse et limitée par de nombreuses difficultés techniques. Les laboratoires qui font ces analyses requièrent des équipements et de la main d'œuvre très spécialisés et les volumes d'eau à filtrer pour réaliser les analyses de ces pathogènes sont toujours très importants (**Tate *et al.*, 2008**). L'utilisation des indicateurs est essentielle pour gérer le danger associé à la pollution fécale. La présence dans l'environnement de microorganismes originaires du tractus digestif étant le témoignage d'une contamination par des matières fécales, elle est potentiellement associée à la présence de pathogènes entériques (**Schäfer *et al.*, 2011**). Pour avoir le titre d'indicateur de pollution fécale, les groupes de microorganismes devraient répondre à plusieurs critères précis qui ont été établis à la suite d'études microbiologiques (**Vansteelant, 2004**) (**Tableau II**).

**Tableau I. Normes de qualité microbiologique des eaux de surfaces pour les coliformes thermotolérants**

<b>Paramètres (UFC/100 ml)</b>	<b>Qualité suffisante</b>	<b>Mauvaise qualité</b>	<b>Méthodes de référence pour l'analyse</b>
<b>Coliformes thermotolérants</b>	900	1 000	ISO 9308-3 et 1
<i>E. coli</i>	800	1 000	ISO 9308-2

Source : l'OMS et le PNUE en 2006

**Tableau II. Caractéristiques requises des germes indicateurs de pollution microbiologique**

<b>Propriétés</b>	<b>Caractéristiques des indicateurs</b>
Pathogénicité	Pas pathogène
Occurrence	Présent en même temps que les pathogènes, absent sans contamination fécale, doit apparaître en plus grand nombre que les agents pathogènes associés
Survie	Taux de survie similaire à celui des pathogènes
Concentration	Doit être en lien direct avec le niveau de pollution fécale de l'eau.
Reproduction	Ne doit pas se reproduire dans l'eau
Inactivation	Inactivé par les différents traitements au même niveau que les pathogènes
Source	La seule source dans les eaux naturelles est la contamination fécale
Coût	Doivent être mis en évidence, dénombrés et identifiés à l'aide de techniques simples, bon marché, rapides et faciles à mettre en œuvre
Attitude	Avoir le même comportement que les agents pathogènes dans l'environnement naturel

Source : (Vansteelant, 2004).

## **5.2. Les coliformes thermotolérants, indicateurs de contaminations des eaux de surfaces**

Les coliformes font partie de la famille des Entérobactériaceae et sont des bactéries saprophytes, en forme de bacilles, non sporulantes, à Gram négatif, aérobies facultatives et qui fermentent le lactose en 48 heures à 35°C avec production de gaz en présence de sels biliaires ( **Leclerc *et al*, 2011**). Ce sont des bactéries indicatrices d'une contamination fécale ( **Edbrg *et al*, 2010**). Cependant, cette définition peut changer selon les-pays et aussi selon la méthode d'analyse utilisée. Les coliformes totaux ne sont pas nécessairement des bactéries originaires du système intestinal. Plusieurs bactéries qui font partie du groupe des coliformes totaux se retrouvent en fait sur les feuilles des arbres et sur toute autre forme de végétation. Donc, la présence d'*E. coli* et coliformes totaux ne veut pas dire à coup sûr que l'on se retrouve devant une contamination d'origine fécale ( **Tallon *et al.*, 2005** ).

Cependant, il est bon de noter que les coliformes fécaux, ou thermotolérants ont pour habitat naturel le tractus intestinal des animaux et des hommes et donc leur présence dans tout autre milieu que l'intestin indiquerait une contamination d'origine fécale ( **Murphy *et al.*, 2016**). Les coliformes fécaux ou coliformes thermotolérants sont des bactéries poussant à des températures plus élevées, soit à partir de 44,5°C ( **Edberg *et al.*, 2010**). Leur présence dans une source d'eau peut représenter une menace ou l'indication d'une éventuelle dégradation de la qualité microbiologique de l'eau, due à la présence d'une contamination fécale ( **Locas Annie, 2015**). Ces indicateurs sont donc des indicateurs de pollution fécale, mais ne sont en général pas à l'origine des maladies hydriques. Ils sont plutôt utilisés parce que les pathogènes de l'eau, en l'occurrence *Giardia*, *Cryptosporidium* et les virus entériques, demandent des méthodes analytiques complexes ( **Dupont *et al.*, 2014**).

### **5.2.1. Méthodes microbiologiques de détection et d'étude des coliformes thermotolérants**

Les méthodes traditionnelles pour l'énumération des coliformes thermotolérants sont pour la plupart aisées. Elles sont basées sur la mise en culture des bactéries dans des milieux de cultures liquides ou sur des milieux solides appelées géloses ( **Fricker *et al.*, 2010**).

### **5.2.1.1. Culture en milieu liquide et détermination du nombre le plus probable (NPP)**

Des dilutions décimales de l'échantillon sont inoculées dans une série de tubes contenant un milieu de culture liquide spécifique. La loi de Poisson permet de calculer le NPP sur base de la proportion de tubes positifs dans chaque dilution (**Olstadt, 2007**).

C'est une technique qui ne permet pas l'isolement et l'observation des souches bactériennes (**Murphy et al., 2014**).

### **5.2.1.2. La culture sur gélose après filtration des échantillons sur membrane**

La technique de filtration sur membrane a été adoptée dans le cadre de l'analyse bactériologique de l'eau en 1951. Un volume défini de l'échantillon est filtré sur membrane de cellulose stérile de 0.45 µm et la membrane est incubée sur un milieu gélosé. Après incubation, on dénombre les colonies visibles à l'œil nu et l'on considère que chaque colonie résulte de la multiplication d'une cellule bactérienne. Le résultat s'exprime en UFC (unité formant colonie) par unité de volume (**APHA et al., 2015**).

La technique par filtration n'est pas appropriée pour des eaux usées brutes à cause de la charge bactérienne très élevée et de la teneur excessive en matières en suspension pouvant provoquer le colmatage de la membrane. Elle convient plutôt aux eaux très peu chargées en matières (**Croxen et Finlay, 2010**).

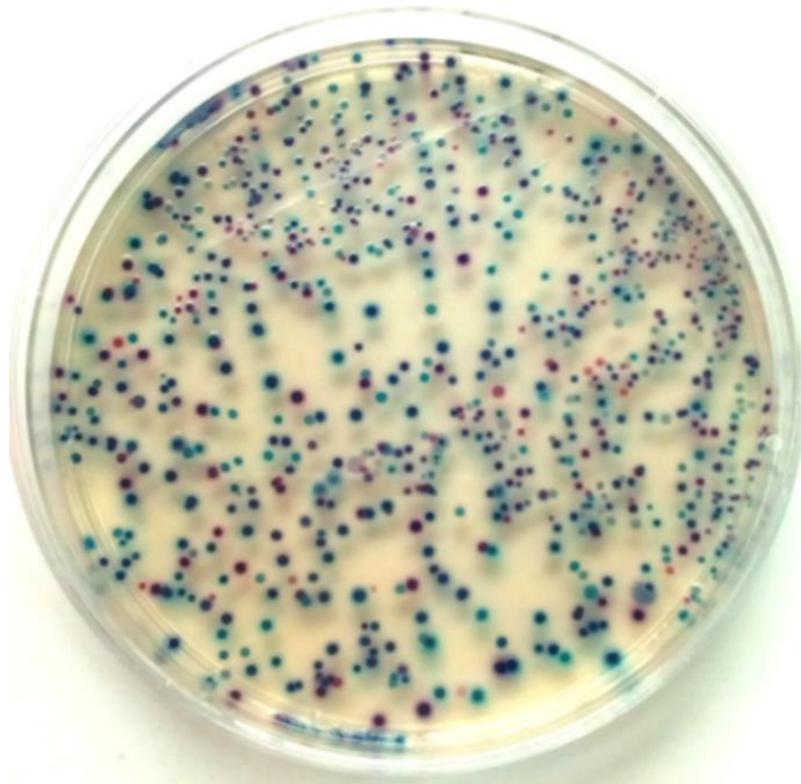
### **5.2.1.3. La culture sur gélose par étalement direct des échantillons**

C'est une technique qui est utilisée pour l'analyse des eaux usées brutes et des eaux à forte charges bactériennes. Dans ce cas, des dilutions sont nécessaires car elle utilise de très faibles volumes à cause de la charge bactérienne souvent très élevée. L'incubation et le dénombrement se font selon le même principe que pour la technique par filtration (**Ming et al., 2011**).

Pour l'énumération des coliformes et des *E. coli*, les milieux spécifiques classiques utilisés pour la détermination du NPP ou des UFC possèdent du lactose et un indicateur pour identifier la production d'acide. Ils contiennent aussi des détergents et/ou des sels biliaires pour inhiber la croissance des Gram positifs et des levures (**Rompre et al., 2002**).

### 5.2.2. Propriétés enzymatiques des coliformes thermotolérants

Pour augmenter la spécificité et diminuer le temps de réponse des méthodes basées sur la mise en culture (Speight *et al.*, 2014), des propriétés enzymatiques des coliformes et des *E. coli* sont aujourd'hui exploitées. La détection de l'activité de la  $\beta$ -D-galactosidase (une enzyme spécifique des coliformes) et celle de la  $\beta$ -D-glucuronidase (une enzyme spécifique des *E. coli*) sont utilisées pour mettre en évidence la présence de ces bactéries. Des substrats chromogéniques et fluorogéniques ont été incorporés dans les milieux de culture. L'hydrolyse de ces substrats par les enzymes spécifiques donne lieu à des produits colorés ou fluorescents qui permettent une détection aisée de l'activité enzymatique ciblée (van Lieverloo, 2007) (Figure 10).



**Figure 10. Colonies de coliformes thermotolérants sur milieu chromogène ECC Compass Agar contenant un substrat chromogénique (EUROFINS IPL Nord SAS , 2010).**

### 5.2.3. Méthodes moléculaires de détection des coliformes thermotolérants

Les méthodes moléculaires de détection de bactéries fécales (pathogènes et indicatrices) ont été l'objet d'un important travail de recherche durant ces dernières années (**Lin et Ganesh, 2013**). Les méthodes moléculaires présentent l'avantage d'être rapides, spécifiques. Elles ne nécessitent pas d'étape de mise en culture. Cependant, elles sont chères et nécessitent un personnel très qualifié. De plus, les résultats moléculaires ne distinguent généralement pas les bactéries vivantes et mortes (**Allen et al., 2010**).

La méthode moléculaire est basée sur l'extraction de l'ADN des micro-organismes présents dans l'échantillon suivie de la multiplication, par la technique d'amplification génique, d'une séquence du génome ou ADN spécifique du micro-organisme recherché. Cette multiplication appelée PCR (pour Polymérase Chain Réaction en anglais), permet de recopier en plusieurs centaines de millions d'exemplaires le fragment d'ADN. Il est alors possible de visualiser la présence d'un micro-organisme présent en très faible nombre dans l'échantillon de départ (**Fricke et al., 2008**). Des variantes de cette technique (PCR compétitive et PCR en temps réel) permettent aujourd'hui, sur la base du nombre de copies du gène après amplification, de dénombrer les micro-organismes dans l'échantillon (**Stevens et al., 2011**).

Ces méthodes sensibles présentent néanmoins l'inconvénient de ne pas permettre la distinction entre un micro-organisme vivant et un fragment en bon état de son ADN présent dans l'échantillon (**Ogorzaly et al., 2013**). C'est pourquoi, généralement dans les études de qualités d'un échantillon où seuls les individus viables sont recherchés, cette méthode fait suite à la mise en culture (**van Lieverloo, 2007**).

---

## CHAPITRE 6 : ANTIBIORESISTANCE COMME INDICATEUR DE SECURITE SANITAIRE

---

### 6.1. Actions des antibiotiques contre les bactéries

#### 6.1.1. Définition des antibiotiques

Les antibiotiques sont des substances naturelles ou synthétiques possédant la propriété de tuer ou de limiter la propagation des bactéries (**Vuillemin, 1890**). Lorsque la substance est utilisée de manière externe pour tuer la bactérie par contact, on ne parle pas d'antibiotique mais d'antiseptique (**Allen et al., 2010**).

Un grand nombre des antibiotiques existants sont constitués de molécules naturelles, fabriquées par des micro-organismes : des champignons ou d'autres bactéries (**Anastasi et al., 2012**). Ces dernières les produisent pour éliminer les bactéries concurrentes avec lesquelles elles sont en compétition dans leur biotope. Cependant, seul un petit nombre des antibiotiques naturels est utilisable en thérapeutique humaine, pour des raisons de disponibilité dans l'organisme ou d'effets indésirables (**Bentley et Bennett, 2004**). Un grand nombre de molécules aujourd'hui sur le marché sont des molécules de synthèse, dérivées ou non d'antibiotiques naturels, en particulier pour contourner les problèmes de résistance (**Anastasi et al., 2012**).

Le premier d'entre eux (la pénicilline) a été découvert par Alexander Fleming, chez le champignon *Penicillium glaucum* (**Fromols, 1947**).

#### 6.1.2. Mécanismes d'actions des antibiotiques contre les bactéries

Les antibiotiques ne sont efficaces que sur les bactéries et n'ont aucun effet sur les champignons et sur les virus (**Allen et al., 2010**). Ils bloquent la croissance des bactéries en inhibant la synthèse de leur paroi, de leur matériel génétique (ADN ou ARN), de protéines qui leur sont essentielles, ou encore en bloquant certaines voies de leur métabolisme (la production d'énergie par exemple). Pour cela ils se fixent sur des cibles spécifiques (**Figure 11**), une molécule de la bactérie qui participe à l'un de ses processus métaboliques essentiels (**Jiménez et al., 2012**). Cette interaction entre l'antibiotique et sa cible est très sélective, spécifique des bactéries et ces composés ne sont en général actifs ni sur les champignons ni sur les virus. Il existe d'autres

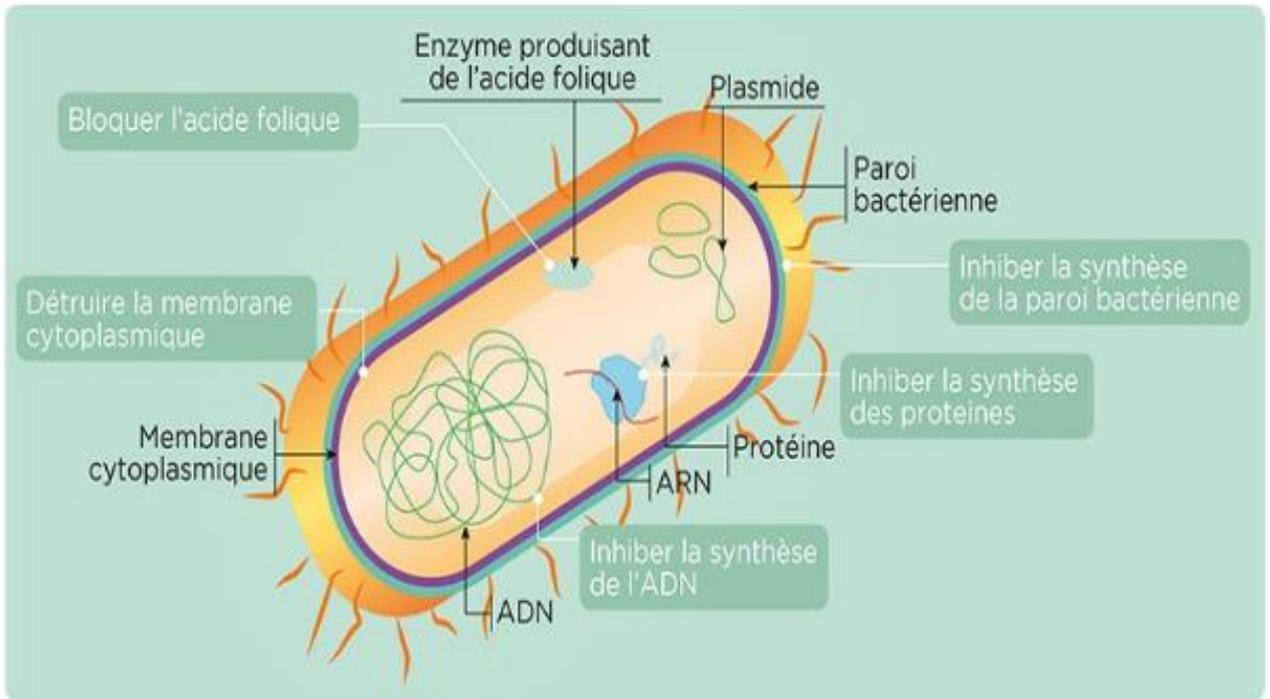
molécules actives sur ces autres types d'agents infectieux que l'on appelle des antimycosiques ou des antiviraux, distincts des antibiotiques.

Selon leurs modes d'action ou leur structure moléculaire, il existe des antibiotiques dits *bactériostatiques* c'est-à-dire qui inhibent la multiplication des bactéries et des antibiotiques *bactéricides* c'est-à-dire qui sont capables de détruire entièrement la cellule bactérienne (Sekhosokh, 2008). Un antibiotique peut être à la fois bactéricide et bactériostatique, tout dépendant de sa dose.

**Les antibiotiques bactéricides** tels que *les bêta-lactamines* (comme la pénicilline) inhibent la synthèse de la paroi bactérienne, *les aminosides* (comme la streptomycine) interfèrent avec le ribosome et empêchent la traduction des ARN messagers en protéines, *les imidazoles*, *les macrolides* (comme l'érythromycine) bloquent la sous-unité 50S du ribosome procaryote en inhibant sa translocation ou la peptidyl-transférase, *les fosfomycines*, *les quinolones* empêchent la réplication de l'ADN bactérien en bloquant l'ADN gyrase et le topoisomérase II, *les glycopeptides* inhibent la formation de la paroi bactérienne en bloquant la synthèse des peptidoglycanes et les polypeptides.

**Les antibiotiques bactériostatiques** tels que *les phénicol*s (comme le chloramphénicol) bloquent la peptidyl-transférase du ribosome bactérien, les tétracyclines inhibent la fixation des ARN de transfert sur le complexe ribosome-ARN messager et perturbent la traduction.

Les antibiotiques ne doivent pas être administrés en cas d'infection virale. Inutiles dans ce cas, ils risquent au contraire de favoriser l'apparition de résistances bactériennes à ces traitements. Enfin toujours dans le but d'éviter le développement de résistances bactériennes, la durée de traitement prescrite doit impérativement être respectée (OMS, 2014).



**Figure 11 : Schéma du mode d'action des antibiotiques contre les bactéries (Koulikoff, 2018)**

### 6.1.2. Classification et familles d'antibiotiques

La classification des antibiotiques peut se faire selon **leur origine** : élaboré par un organisme (naturel) ou produit par synthèse (synthétique ou semi synthétique) ; **leur mode d'action** (*cf.6.1.2*): paroi, membrane cytoplasmique, synthèse des protéines, synthèse des acides nucléiques ; **leur spectre d'activité** : liste des espèces sur lesquelles les antibiotiques sont actifs (spectre étroit ou large) ; **leur nature chimique** : très variable, elle est basée souvent sur une structure de base (ex : cycle  $\beta$  lactame) sur laquelle il y a héli-synthèse. La nature chimique nous permet de classer les antibiotiques en familles ( $\beta$  lactamines, aminosides, tétracyclines.....etc.)

#### 6.1.2.1. Inhibiteurs de la synthèse du peptidoglycane : Les $\beta$ lactamines, les glycopeptides et les acides phosphoniques.

- ❖ **Les  $\beta$  lactamines** : Il s'agit d'une famille qui se caractérise par une structure de base : le noyau  $\beta$ lactame. C'est la plus utilisée en antibioprophyllaxie (préventive) et en antibiothérapie (curative). Elle comprend 5 groupes majeurs les Pénames, les céphalosporines, les oxapénames (inhibiteurs des  $\beta$ -lactamases) les carbapénèmes et les monobactames.
- Les Pénames sont un groupe d'antibiotiques qui se subdivise en plusieurs sous-groupes représentés sur le tableau suivant (**Tableau III**).

**Tableau III : Classification des pénames de la famille des  $\beta$  lactamines (Mohommedi, 2012)**

Sous-groupes	Antibiotiques (DCI)	Spectre d'activité	Mode d'action
Pénicilline G et ses dérivés	Parentérales : - Benzyl pénicilline (péni G) - Benzyl pénicilline-procaine - Bénéthamine-benzypénicilline -Benzathine-benzylpénicilline Orales : - Phénoxy méthyle pénicilline (pénicilline V) - Clométocilline	Cocci Gram+ : Streptocoques (groupe A, C, G et B), Pneumocoques sensible.  Bacilles Gram+ : <i>Corynebacterium diphtheria</i> , <i>Bacillus anthracis</i> , <i>Listeria monocytoenes</i> , Anaérobie.....	Paroi bactérienne, par toxicité sélective : Les pénicillines agissent sur la synthèse du peptidoglycane en inhibant les PLP (fixation des pénicillines sur les PLP)  Les PLP ont une activité transpeptidasique et transglycolasique.  L'inhibition des PLP aboutit à la formation des ponts peptidocycliques responsables de la structure réticulée de la paroi.  On obtient ainsi des formes bizarroïdes (rondes ou filamenteuses) qui aboutissent à la lyse bactérienne.
Pénicillines M (antistaphylococciques)	- Méthicilline - Oxacilline - Isoxazolyl-pénicillines) : Cloxacilline, Dicloxacilline, Flucloxacilline.....	Staphylocoque producteur de pénicillase  Staphylocoque MRSA- (sensibles à l'Oxacilline)	
Aminopénicillines (Pénicillines à large Spectre)	- Ampicilline - Dérivés de l'ampicilline : Bacampicilline, Métampicilline, Pivampicilline -Amoxicilline, Epicilline	-Entérobactéries sauf : Klebsiella, Enterobacter, Serratia et Protéus indole+  -Neisseria méningitidis, <i>Haemophilus Influezae b</i> sensible (pénicillinase-)  - Inactif sur Pseudomonas et Acinetobacter Streptocoques A, C, G	
Carboxy-pénicillines	- Carbénicilline, ticarcilline	<i>Pseudomonas aeruginosa</i> . - Bacilles à Gram- résistants à l'ampicilline  - Entérobactéries productrices de céphalosporinases : Citrobacter, Entrobacter, Serratia, Proteus indole+	
Acyl-amio-pénicillines (Uréido-pénicillies)	- Aziocilline - Meziocilline  - Pipéracilline	Entérobactéries productrices de céphalosporinases  <i>Pseudomonas aerugisa</i> , <i>Acinetobacter</i>	
Amidino-pénicillines	- Mécillinam - Pivmécillinam	Actifs uniquement sur les bacilles à Gram-  Pas d'action sur les Cocci à Gram+	
Pénicillines sulfones : Inhibiteurs de $\beta$ lactamases  Utilisés en association Avec une $\beta$ lactamase	Ampicilline+Sulbactam  Pipéracilline + Tazobactam	Bactéries à Gram- fermentaires  Bactérie à Gram- oxydatifs	

- Les céphalosporines : Céphèmes, Céphamycines et Oxacéphèmes,

Les céphèmes correspondent aux céphalosporines au sens strict. Certains, les 7-alpha-méthoxy céphalosporines, sont individualisées sous le nom de céphamycines. Les oxacéphèmes sont les 1-oxa-7 alpha méthoxy céphalosporines.

En dépit de ces différences de structure, ces divers produits sont souvent désignés globalement sous le terme de céphalosporines (**Tableau IV**). Ce sont tous des produits à large spectre, mais dont l'intérêt réside surtout dans leur activité sur les bacilles à Gram-

Les céphalosporines injectables sont classées, selon leurs propriétés antibactériennes, en trois " générations ". Les céphalosporines orales peuvent aussi être classées en trois catégories, globalement superposables, du point de vue de l'activité antibactérienne, à celles des céphalosporines injectables.

**Tableau IV : Classification des céphèmes de la famille des  $\beta$  lactamines (Mohommedi, 2012)**

Famille	Antibiotiques (DCI)	Spectre d'activité	Mode d'action
<p>Céphalosporines de 1<sup>ère</sup> génération</p> <p>Relativement résistantes aux pénicillinases et pouvant être actives sur des souches résistantes aux pénicillines à large spectre. Détruites par les céphalosporinases de nombreux bacilles à Gram-négatif.</p>	<p>Injectables, instables métaboliquement Céfalotine, Céfacétrie, Céfapirine</p> <p>Injectables, stables métaboliquement Céfaloridine, Céfazoline</p> <p>Céphalosporines orales : Céfadroxil, Céfaclor</p>	<p>-Staphylocoques MRSA-</p> <p>-Streptocoques sauf entérocoques)</p> <p>- <i>Haemophilus influenzae</i></p> <p>-Certains bacilles à Gram-(<i>E.coli</i>, <i>Proteus mirabillis</i>, <i>Salmonella spp...</i>)</p> <p>-Inactifs sur <i>Pseudomonas aeruginosa</i></p>	<p>Le mode d'action des céphalosporines est identique au mode d'action des autres <math>\beta</math> lactamines (voir pénames)</p>
<p>Céphalosporines de 2<sup>ème</sup> génération</p> <p>Se distinguent des précédentes par une relative résistance à certaines céphalosporinases</p>	<p>Injectables Céfatoxine, (Céfamycine), Céfuroxime, Céfamandole</p>	<p>-Staphylocoque MRSA-</p> <p>Streptocoques groupe A</p> <p>-<i>Streptococcus pneumoniae</i></p> <p>-<i>haemophilus Influenzae</i></p> <p>-Bacilles à gram-</p> <p>-Inactifs sur <i>Pseudomonas aeruginosa</i></p>	
<p>Céphalosporines de 3<sup>ème</sup> génération</p> <p>Accentuent les avantages des précédentes : résistance accrue à l'inactivation par les céphalosporinases.</p>	<p>Injectable Céfatoxine, Céftrizoxime, Céftriaxone Latamoxef (Oxacephem), Ceftazidime Cefménoxime, Cerpirome Cefsulodine, Cefepime, Cefpirone</p> <p>Orales : Cefixime</p>	<p>-Bacilles à Gram-</p> <p>-Cocci à Gram+ : pneumocoque (sauf Entéreoque)</p> <p>-Cocci à Gram-</p> <p>-Certains sont actifs sur <i>Pseudomonas</i> (Ceftazidime).</p>	
<p>Autres céphalosporines</p>	<p>Céfopérazones, Céfotiam, Céfotétan (céphamycine), Céfsulodie</p>	<p><i>Pseudomonas</i>, Cocci à Gram, entérobactéries</p>	

- Les Carbapénèmes, les oxapénames et les monobactames font également partir de la famille des  $\beta$  lactamines (**Tableau V**). Les carbapénèmes sont des antibiotiques bactéricides parentéraux présentant un spectre extrêmement large.

**Tableau V : Classification des Carbapénèmes, oxapénames et monobactames de la famille des  $\beta$  lactamines (Mohommedi, 2012).**

Groupe	Antibiotiques (DCI)	Spectre d'activité	Mode d'action
<b>Carbapénèmes</b>	Imipénème, Méropénème Ertapénème, Faropénème	Très large spectre  Bactérie à Gram- y compris <i>Pseudomonas aeruginosa</i>  De nombreux microorganismes pathogènes nosocomiaux multirésistants aux antibiotiques ne sont sensibles qu'aux carbapénèmes	Le mode d'action de ces antibiotiques est identique au mode d'action des autres $\beta$ lactamines  (voir Pénames)
<b>Oxapénames ou clavams (acide clavulanique)</b>  inhibiteur de $\beta$ lactamases utilisés en association avec une $\beta$ lactamine	Amoxicilline + Acide clavulanique  Ticarcilline + Acide clavulanique	Bactéries à Gram- fermentaires  Bactéries à Gram- oxydatifs	
<b>Monobactames</b>	-Aztréonam	Actif uniquement sur les bacilles à Gram- y compris <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	

❖ Les **Glycopeptides** et les **Acides phosphoniques (fosfomycines)** :

Ils sont également des inhibiteurs de la synthèse du peptidoglycane des bactéries pareillement aux antibiotiques de la famille des  $\beta$  lactamines (**Tableau VI**).

Les **Glycopeptides** sont bactéricides mais le spectre est étroit (limité aux Gram+, les Gram- sont naturellement résistants). Strictement administrés par voie parentérale, ils sont non résorbés par voie digestive avec une mauvaise diffusion tissulaire. Ces molécules sont utilisées strictement en milieu hospitalier et réservés au traitement des infections graves à Gram+ résistants

Les **Acides phosphoniques** : La fosfomycine est un antibiotique naturel à large spectre produit par certaines espèces de Streptomyces.

**Tableau VI : Classification des Glycopeptides et des Fosfomycines (Mohommedi, 2012).**

Famille	Antibiotiques (DCI)	Spectre d'activité	Mode d'action
Glycopeptides	-Vancomycine -Teicoplanine	Bactérie à Gram+ essentiellement -staphylocoques MRSA+ -Entérocoques -Pneumocoque résistant aux pénicillines	Paroi bactérienne en bloquant la polymérisation du peptidoglycane.  Ils inhibent la transglycolysation en se liant au dipeptide terminal du peptidoglycane, en se chélatant à l' aminoacyl-D-alanyl-D-alanine.
Acides phosphoniques	Fosfomycine Fosfomycine trométamol	<i>Staphylococcus aureus</i> et <i>Streptococcus pneumoniae</i>  Entérobactéries sauf <i>M.morganii</i> , <i>N. meningitidis</i> , Pasteurella et <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Paroi bactérienne à un stade précoce lors de sa synthèse.  Inhibe la synthèse de la paroi bactérienne par inhibition de la synthèse de l'acide muramique

### 6.1.2.2. Antibiotiques actifs sur les enveloppes membranaires : Polymixines

Les polymyxines sont des agents surfactants cationiques qui agissent comme antibiotiques. Ils détruisent la structure de la membrane de la cellule bactérienne en interagissant avec ses phospholipides (**Tableau VIII**).

**Tableau VII : Classification des Polymixines (Mohommedi, 2012)**

Famille	Antibiotiques (DCI)	Spectre d'activité	Mode d'action
<b>Polymixines</b>	- Polymixine B - Polymixine E ou colistine  Non résorbés par voie orale : utilisation topique (peau ou muqueuses) ou administration  Parentérale, aérosols, intrathécale...	Bacilles à Gram – sauf : Proteus, Providentia, <i>Serratia marcescens</i> <i>Morganella morganii</i> et <i>Edwardsiella tarda</i>  Les bactéries à Gram+ et les mycobactéries sont naturellement résistantes.	Ils possèdent une charge positive et agissent des agents tensio-actifs. Ils agissent sur la membrane cellulaire en se fixant sur les phospholipides d'où rupture de la barrière osmotique.

### **6.1.2.3. Inhibiteurs de la synthèse des protéines : MLS (Macrolides-Lincosamides-Streptogramines), Phénicolés, Oxazolidinones, Tétracyclines et Glycylcynes, Aminosités, Fusidanes (Tableau VII)**

Le ribosome bactérien est constitué de deux sous unités : une petite sous unité (30S) chargée d'accueillir l'ARNm et de lire le code génétique et une grosse sous unité (50S) chargée d'accueillir les ARNt et d'assembler les acides aminés en peptides et protéines

Il existe 6 familles d'antibiotiques qui interfèrent avec la traduction des ARNm en protéines par le ribosome bactérien.

#### **Ceux agissant sur la sous unité 50s :**

**Le groupe MLS** (Macrolides-Lincosamides- Streptogramines ou synergistines): comprend 3 familles chimiquement, pharmacologiquement et structurellement distinctes mais possédant un même mécanisme d'action. **Les Phénicolés** sont des inhibiteurs de la synthèse des protéines, au niveau de la 50S. Ils bloquent l'élongation de la chaîne polypeptidique en formation en inhibant l'activité peptidyltransférase. **Les Oxazolidinones** qui est la classe la plus récente

#### **Ceux agissant sur la sous unité 30S :**

**Les Tétracyclines** pénètrent dans la plupart des tissus et des liquides biologiques. La tétracycline et la minocycline sont principalement excrétées dans l'urine. La doxycycline est excrétée principalement dans les fèces. **Les Aminosités** C'est une famille majeure d'antibiotiques essentiellement utilisée dans le traitement des infections graves (Bactéricides) en association avec d'autres antibiotiques (Beta-lactamines). Ce ne sont pas des inhibiteurs au sens propre, mais des perturbateurs de la synthèse protéique. Ils agissent sur la sous unité 30S du ribosome en entraînant une mauvaise lecture du code génétique. Il en résulte des protéines anormales inutilisables qui seront intégrés par exemple à la structure bactérienne entraînant la mort cellulaire

#### **Agissant sur les Facteurs d'élongation (EF-G)**

**Les Fusidanes** Bactériostatique, bactéricide à fortes doses

**Tableau VIII : MLS (Macrolides-Lincosamides- Streptogramines), Phénicolés, Oxazolidinones, Tétracyclines, Aminosides, Fusidanines (Mohommedi, 2012)**

Famille	Antibiotiques (DCI)	Spectre d'activité	Mode d'action
MLS (Macrolides- Lincosamides- Streptogramine)	Macrolides vrais : 14atomes : Erythromycine, Oléandomycine 15atomes : Azithromycine 16atomes : Josamycine, Spiramycine ; Midécamycine	<b>Cocci à Gram+</b> : Staphylocoque MRSA-, Streptocoque <b>Cocci à Gram-</b> : <i>Neisseria, Moraxelles</i> <b>Bacilles à Gram+</b> : <i>Corynebacterium diphtheriae, Listeria monocytogenes, Bacillus</i> <b>Certains bacilles à Gram-</b> : <i>Campylobacter, Helicobacter, Legionella</i> <b>Certain anaérobies</b> : Eubacterium, Propionibacterium <b>Autres bactéries</b> : <i>Mycoplasma pneumoniae, Chlamydia, Borrelia</i>	Les MLS sont des inhibiteurs de la synthèse des protéines, ils agissent au niveau de la s/unité 50S du ribosome. Ils inhibent la croissance de la chaîne polypeptidique en formation et bloquent par encombrement stérique la croissance de la chaîne peptidique naissante, Il en résulte le détachement du peptidyl-ARNt dès que celle-ci atteint une longueur de 6 à 8 acides aminés.
	Lincosamides : - lincomycine, Clindamycine (c'est le	Staphylocoque, streptocoque. Les lincosamides sont inactifs sur les entérocoques	
	Streptogramines : Pristynamycine, Virgiamycine Quinupristine-Dalfoprystine	Staphylocoque et autres Cocci à Gram+	
Phénicolés	- Chloramphénicol - Thiamphénicol	Bactéries à Gram+ et Gram- En Algérie ils sont réservés au traitement de la fièvre typho-paratyphoïdique.	Sous unités 30S du ribosome. Inhibiteurs de la polymérase.
Oxazolidinines :	- Linézolide	Bactéries à Gram+ résistantes aux traitements habituels y compris les multi résistantes	Ils interagissent avec l'unité ribosomale 50S et non encore complètement élucidés
Tétracyclines	-Oxytétracycline, Chlortétracycline  -Doxycyline, Minocycline  - Glycylcyclines	-Bactéries à multiplication intracellulaire : <i>Chlamydia, Borrelia, Brucella, Rickettsia, Mycoplasma Leptospira, Pasteurella...</i> -Bactéries à Gram+ et Gram- : <i>Neisseria gonorrhoe, Bacillus anthracis, Francisella tulatensis, Yersinia pestis</i>	Sous unité 30S du ribosome. Inhibiteurs de la phase d'élongation de la chaîne polypeptidique, ils empêchent la fixation de l'aminoacyl-ARNt
Aminosides  Les aminosides sont souvent utilisés en association avec d'autres antibiotiques (β lactamines)	- Streptomycine Dihydrostreptomycine - Néomycine, Paromomycine Framycétine (voie locale). - Kanamycine, Tobramycine Dibékacine, Amikacine - Gentamicine, Sisomycine, Nétilmicine - Spectinomycine	- Cocci et bacilles à Gram+ - Cocci et bacilles à Gram- - Mycobactéries (streptomycine, kanamycine). Les anaérobies et les streptocoques sont résistants  <i>Neisseria gonorrhoeae</i>	Sous unités 30S du ribosome.  Erreur de la lecture du code génétique lors de la traduction des protéines
Fusidanines	Acide fucidique	Bactéries à Gram+, surtout utilisé comme anti staphylococcique	C'est un inhibiteur de la synthèse protéique avec le facteur d'élongation G (EF-g)

**6.1.2.3. Inhibiteurs des acides nucléiques : Quinolones et Fluoroquinolones, Rifamycines, Nitrofuranes, Novobiocine et Nitro-imidazoles (Tableau IX).**

Les Quinolones et Fluoroquinolones : inhibiteurs des Topo-isomérases :

Les Rifamycines : inhibiteurs de la transcription :

Les dérivés nitrés : Antibiotiques altérant la structure de l'ADN

**Tableau IX : Classification des Quinolones et Fluoroquinolones, Rifamycines, Nitrofuranes, Novobiocine et Nitro-imidazoles (Mohommedi, 2012)**

<b>Famille</b>	<b>Antibiotiques (DCI)</b>	<b>Spectre d'activité</b>	<b>Mode d'action</b>
Quinolones	Acide nalidixique, Acide pipémidique, Acide Oxolinique, Fluméquie	Entérobactéries Les Gram+ sont résistant	Inhibition sélective de la synthèse de l'ADN bactérien en agissant sur les deux enzymes impliquées dans la synthèse de l'ADN gyrase et l'ADN topoisomérase IV
Fluoroquinolones	- Péfloxacin, Ofloxacin Norfloxacin, Ciprofloxacine	Entérobactérie et Staphylocoques	
	Lévofloxacin, Moxifloxacin Sparfloxacin, gatifloxacine	Staphylocoques, Streptocoques, Pneumocoques, Bacillus)	
Rifamycines	Rifamycine Rifamycine SV	- Mycobactéries - Bactéries à Gram+ à développement cellulaire. Divers bacilles à Gram -dont Brucella.	Inhibition de la transcription de l'ADN en ARN messager (ARNm) par inhibition de l'ARN polymérase.
Nitrofuranes	Infection urinaire : Nitrofurantoïne Hydroxyméthyl-nitrofurantoïne Infections intestinales : Furazolidone, Nifuroxazide	Bacilles à Gram- Inactifs sur Pseudomonas, Acinetobacter et autres Gram-	Agissent directement sur l'ADN provoquant diverses lésions (coupures et substitution de bases)
Non classé	Novobiocine	Staphylocoque, cocci à Gram-, Haemophilus et pasteurelles.	Inhibe la réplication de l'ADN

#### 6.1.2.4. Inhibiteurs de la synthèse des folates : Sulfamides, Trimethoprime et association (Tableau X)

La vitamine B9, autre nom de l'acide folique (folate, folacine ou vitamine M, acide pteroyl-L-glutamique, pteroyl-L-glutamate et acide pteroylmonoglutamique), est une vitamine hydrosoluble.

L'acide folique est le précurseur métabolique d'une coenzyme, le tétrahydrofolate (FH4 ou THF4), impliquée notamment dans la synthèse des bases nucléiques, purines et pyrimidines, constituant les acides nucléiques (ADN et ARN) du matériel génétique. Le THF intervient également dans la synthèse d'acides aminés tels que la méthionine, l'histidine et la sérine.

**Tableau X : Classification des Sulfamides, Trimethoprime et association (Mohommedi, 2012)**

Famille	Antibiotiques (DCI)	Spectre d'activité	Mode d'action
Sulfamides	Sulfapyridine, Sulfafurazole Sulfaméthoxydiazine Sulfaméthoxazole Sulfaméthizole Sulfaguanidine	Bactéries à Gram- mais il existe beaucoup de résistances vis-à-vis de ces antibiotiques.	Inhibent la synthèse des folates, acides puriques et acides nucléiques en se fixant sur le dihydroptéroate synthase (DHPS)
2-4 diaminoptéridine	Trimethoprime	Il est utilisé en association avec les sulfamides (voir Sulfamides + Trimethoprime)	Inhibent la synthèse des folates, acides puriques et acides nucléiques en se fixant sur la dihydrofolate réductase
Sulfamides + Trimethoprime	Sulfaméthoxazole + Trimethoprime (cotrimoxazole)	Bactéries à Gram+ et Gram- mais il existe beaucoup de résistance vis-à-vis de ces antibiotiques.	Agit sur les deux enzymes précédents

## 6.2. Résistances des bactéries aux antibiotiques

La résistance bactérienne est la capacité des bactéries à résister aux effets des antibiotiques ou des biocides qui sont censés les tuer ou les contrôler (**Bush et Jacoby, 2010**). L'activité d'un antibiotique sur une souche bactérienne peut être évaluée par une donnée mesurable, caractéristique de la souche, que l'on appelle « concentration minimale inhibitrice » (C.M.I.).

La C.M.I. est la plus petite concentration d'antibiotique qui inhibe, in vitro, toute croissance bactérienne. En comparant la CMI aux concentrations critiques des référentiels de microbiologie (**CA-SFM, EUCAST, CLSI ...**), cad aux concentrations que peut supporter l'homme ou l'animal, on détermine si une souche bactérienne est sensible ou résistante à l'antibiotique testé. La souche est dite sensible si la C.M.I. est inférieure à la concentration critique. Elle est dite résistante ; au contraire, si la C.M.I. est supérieure à la concentration critique (**EUCAST, 2017**)

Il existe de nombreux mécanismes aboutissant à l'expression de la résistance et suivant son caractère inné ou acquis. La résistance naturelle est programmée sur le génome et constitue un critère d'identification stable d'une espèce. Les résistances acquises sont quant à elles consécutives à des modifications de l'équipement génétique (**Sekhsokh et al., 2008**).

### 6.2.1. Résistance naturelle aux antibiotiques

La résistance naturelle ou intrinsèque à un antibiotique fait partie des caractères normaux de l'espèce; elle détermine le niveau de sensibilité « basal » des bactéries et définit le phénotype sauvage d'une espèce. C'est la résistance de base des bactéries face aux médicaments (**Lozniewski, 2010** ).

Elle peut être due à des particularités structurales comme la présence d'une membrane externe les rendant naturellement imperméables aux antibiotiques de poids moléculaire élevé (ou grosses molécules) (**Byappanahalli et al., 2006**) mais aussi à des particularités métaboliques spécifiques aux défenses naturelles propres à chaque bactérie : le bacille de la tuberculose par exemple n'est sensible qu'à un nombre restreint d'antibiotiques en raison de son métabolisme original (**Allen et al., 2010**). La résistance naturelle peut enfin être due à l'expression d'une enzyme d'inactivation ou par la mise en œuvre d'un processus d'échappement vis à vis de l'antibiotique (**Ishii et al., 2006** ).

### 6.2.2. Résistance acquise aux antibiotiques et transfert des gènes par les éléments génétiques

Différents éléments génétiques sont impliqués dans le transfert de gènes. Ce sont les éléments non mobiles tel que le chromosome grâce à une mutation des gènes et les éléments mobiles extra-chromosomiques tels que les plasmides, les intégrons et les transposons. Les plasmides sont des molécules d'ADN bicaténaire extra-chromosomique, généralement circulaires, capables de répliquions autonomes (réplicon) et transmissibles à la descendance (**Novick et Summers, 1997**). Les intégrons ont une organisation commune et sont composés par trois éléments clés : un gène *intI*, un site primaire de recombinaison (*attI*) et un promoteur (Pc) permettant la transcription des gènes capturés ou cassettes (**Hall et al., 1999**). Les transposons sont bordés par des séquences d'insertion (IS) elles-mêmes flanquées par des séquences IR (Répétées inversées) indispensables à la transposition (**Calderon et al., 2011**). Ce type de résistance par éléments mobiles est transmissible d'une souche ou d'une espèce à une autre selon trois modes à savoir la conjugaison (transfert direct entre deux bactéries ayant établi temporairement un contact physique), la transformation (transfert d'ADN nu) et la transduction (transport d'ADN bactérien par des bactériophages) (**Andersson et al., 2010**) (**Figure 12**).

Ce terme est utilisé pour désigner le résultat d'un processus permettant à des bactéries d'une espèce originellement sensible de devenir résistante à un ou plusieurs antibiotiques (**Clermont et al., 2011**). L'acquisition de ces résistances est déterminée par des modifications génétiques consécutives à des mutations ponctuelles ou à l'acquisition « de novo » de gènes de résistance exogènes (**Lehtola et al., 2007**). La capacité de multiplication très rapide des bactéries favorise la sélection d'évènements génétiques favorables et la possibilité d'échange d'information même entre espèces lointaines leur conférant un très grand pouvoir d'adaptation aux contraintes du milieu (**Blanch et al., 2007**) (**Figure 13**).

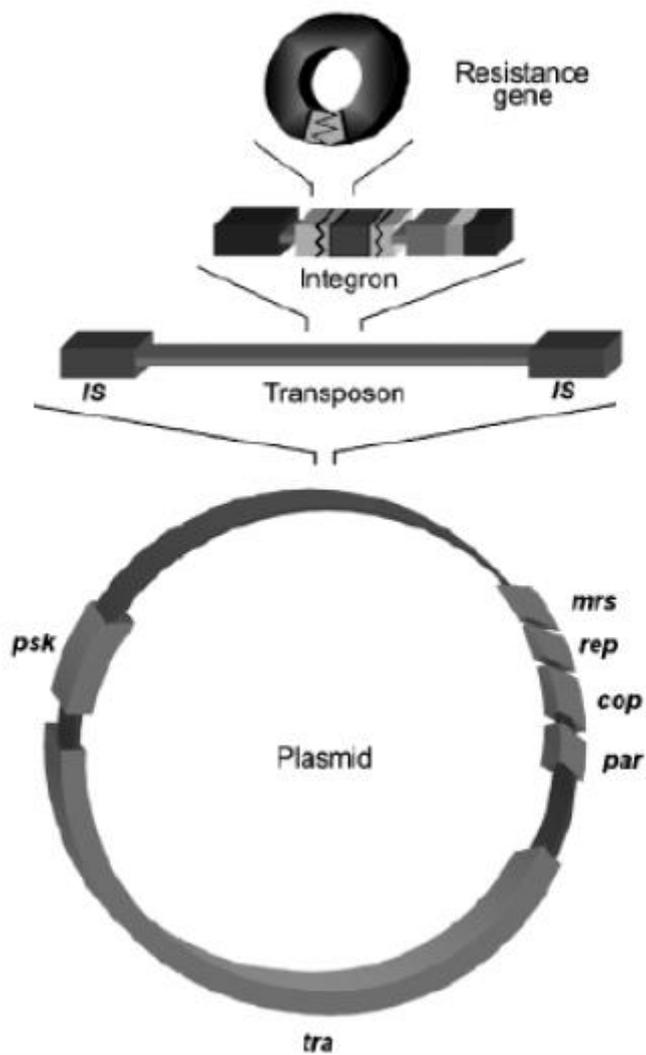
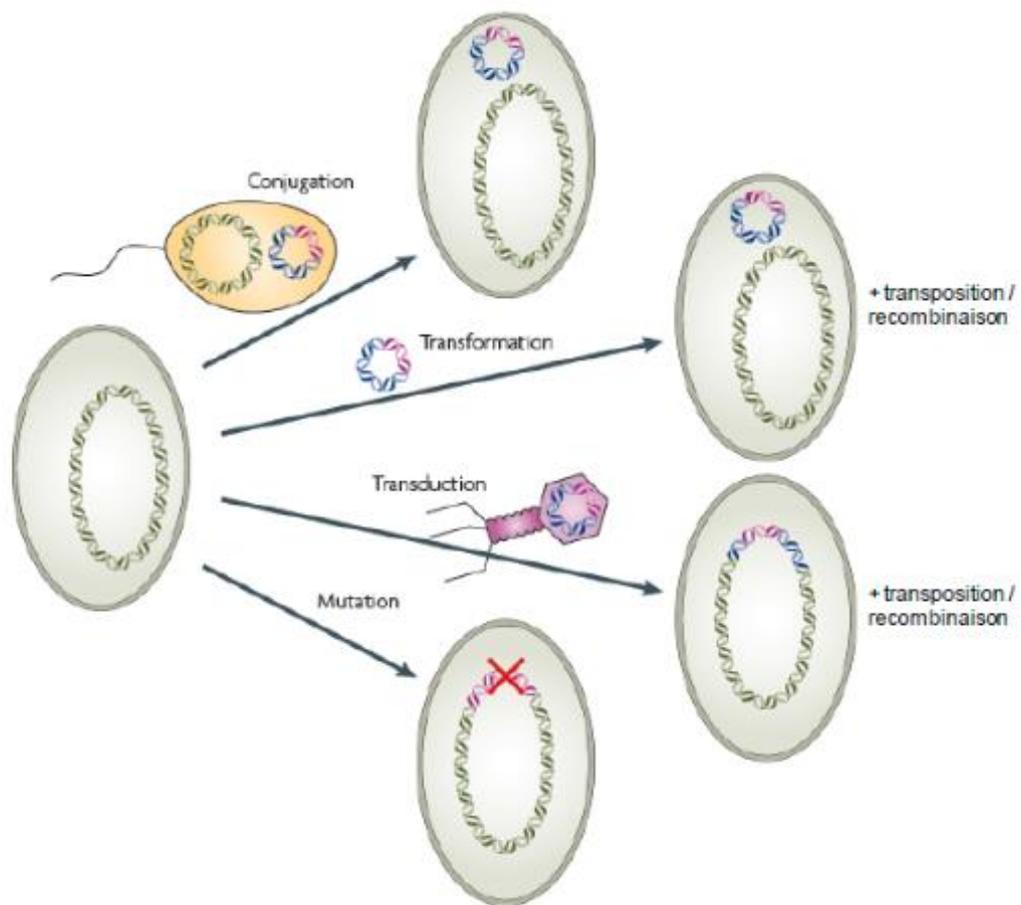


Figure 12 : Schéma des différents supports génétiques et d'une structure en "mosaïque" (Martinez, 2009).



**Figure 13: Mécanismes de dissémination de gènes de résistance aux antibiotiques chez les bactéries (Andersson et Hughes, 2010).**

### **6.2.3. Modes de résistances des bactéries aux antibiotiques (Figure 14)**

#### **6.2.3.1. Résistance bactérienne par mutation du récepteur**

Toute modification du nombre ou de la structure des porines affecte la pénétration des antibiotiques (CloECKaert *et al.*, 2007). Les porines sont des canaux aqueux ou hydrophiles constitués de protéines qui laissent diffuser diverses molécules de faible masse moléculaire comme des substrats ou encore des antibiotiques. Une mutation modifiant la structure des porines affecte le type d'élément pouvant la traverser et une diminution du nombre de porines incluses dans la paroi limite l'importance du flux d'éléments (Schwarz *et al.*, 2010)

#### **6.2.3.2. Résistance bactérienne par modification de l'antibiotique**

La modification de l'antibiotique consiste en la destruction de la molécule ou en son inactivation supprimant ainsi l'interaction avec sa cible. C'est l'expression d'enzymes spécifiques d'un antibiotique qui permet leur destruction. Ce mode de résistance est très répandu dans le monde bactérien et touche essentiellement deux familles d'antibiotiques majeures que sont les lactamines et les aminosides (Schmieder et Edwards, 2012).

#### **6.2.3.3. Résistance bactérienne par diminution de perméabilité**

L'imperméabilisation est un phénomène observé chez les bactéries à coloration de Gram négative après dysfonctionnement ou perte de la porine. La structure même de la paroi et plus particulièrement la présence d'éléments dédiés à la pénétration de molécules exogènes est à l'origine de ce type de résistance (Scheutz *et al.*, 2012). La perméabilité membranaire intervient dans le contrôle de la concentration de différentes classes d'antibiotiques comme les  $\beta$ -lactamines ou les quinolones *via* l'expression des porines ou des transporteurs-pompes (Lozniewski, 2010).

#### **6.2.3.4. Résistance bactérienne par expulsion de l'antibiotique ou efflux**

Les systèmes d'efflux actifs sont constitués de protéines transmembranaires capables de transporter activement du milieu intracellulaire ou péri plasmique (cytoplasmique) vers le milieu extérieur, divers substrats suivant le type de pompe impliquée (Tian *et al.*, 2014). Ces systèmes complexes sont plus ou moins spécifiques en fonction de leur structure en acides aminés et de l'énergie utilisée pour le transport. Le complexe AcrAB-TolC retrouvé chez *E.coli* est capable de prendre en charge une grande variété d'antibiotiques ( $\beta$ -lactamines, quinolones, tétracyclines etc..). (Masters *et al.*, 2011)..

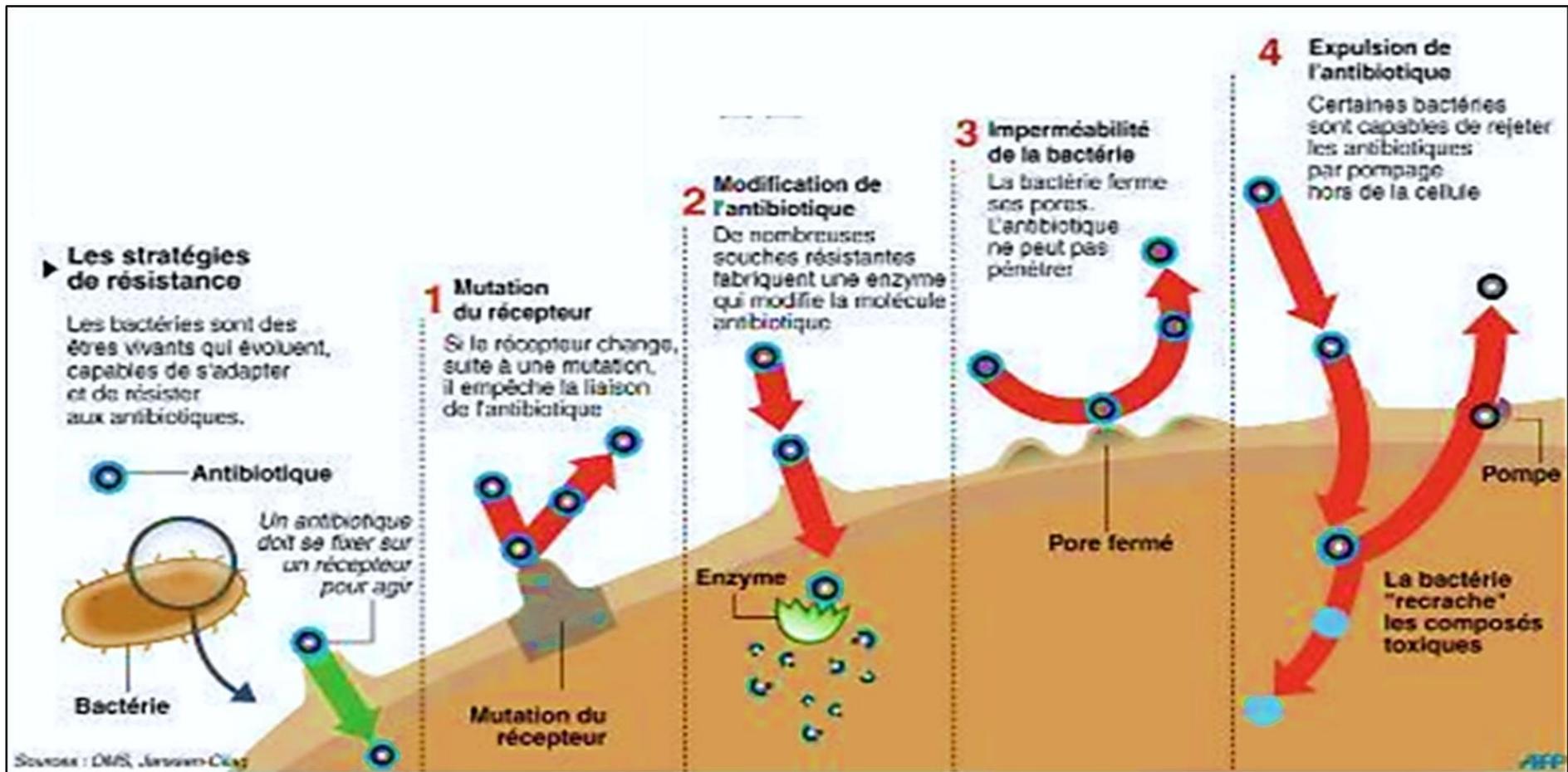


Figure 14. Principaux mécanismes cellulaires mis en jeu par les bactéries pour leur résistance aux antibiotiques (Tian *et al.*, 2014)

### 6.3. Problèmes sanitaires liés à la résistance des bactéries aux antibiotiques

«Les antibiotiques sont victimes de leur succès: leur large utilisation depuis les années 1960-1970 a permis aux bactéries d'apprendre à s'en défendre» (Plésiat, 2019).

Désormais, la résistance aux antibiotiques touche de nombreux germes et l'OMS a engagé des programmes dans le monde entier pour ralentir l'apparition de nouvelles résistances et préserver les traitements disponibles. Dès leur apparition, les bactéries ont appris à résister aux antibiotiques les plus utilisés (Pauline, 2014)

L'intérêt suscité par les enjeux liés à la résistance aux antibiotiques a mené de plus en plus de chercheurs à travailler sur le sujet, aboutissant à la découverte de nombreux mécanismes d'adaptation bactérienne (Juhna *et al.*, 2007 ).

#### 6.3.1. Particularité des *E. coli*

La bactérie *E. coli* représente 80% des coliformes thermotolérants, d'où son importance lors de l'étude des coliformes thermotolérants (Ashbolt *et al.*, 2011). *E. coli* (*E. coli*), découverte en 1855 par Thomas ESCHERICH, est un bacille à Gram négatif appartenant à la classe des  $\gamma$ -protéobactéries et à la famille des Enterobacteriaceae et regroupe plus de 1.000 types antigéniques (Hamelin *et al.*, 2007).

*E. coli* est une entérobactérie commensale du tube digestif de l'homme et des animaux à sang chaud (Goel, 2016). Présente en grande quantité dans les selles chez l'adulte, elles sont nécessaires au bon fonctionnement du microbiote intestinal en luttant contre l'implantation d'autres bactéries pathogènes et interviennent dans la production de vitamine K (Lozniewski, 2010). Elles participent également à la digestion. La majorité des souches d'*E. coli* sont inoffensives, quelques-unes seulement sont pathogènes (Frullani, 2011).

On distingue 6 types de souches pathogènes obligatoires. Les *E. coli* entéro-hémorragiques (EHEC) sont responsables de diarrhées sanglantes accompagnées de douleurs abdominales sans fièvre. Le sérotype le plus impliqué est le 0157 et le sérotype 0157 : H7. Les *E. coli* entérotoxiques (ETEC), responsables de la "diarrhée des voyageurs" ou "turista" et de syndromes diarrhéiques épidémiques chez les enfants de moins de 2 ans dans les pays du tiers-monde. Ils se fixent sur la muqueuse par l'intermédiaire des facteurs d'adhésion CFA/1, CS et élaborent les entérotoxines thermolabiles (LT) et thermostables (ST). Les *E. coli* entéroinvasives (EIEC) sont responsables de syndromes dysentériques avec invasion de la muqueuse intestinale. Ces souches, très voisines des *Shigella* par leurs caractères biochimiques et antigéniques, agissent

par invasion de l'épithélium colique et réaction inflammatoire intense avec libération massive d'interleukine. Les *E. coli* entéropathogènes (EPEC) créent des lésions d'attachement-effacement caractérisées par un effacement des microvillosités de la bordure en brosse des entérocytes et par une adhésion intime des bactéries à la cellule hôte. Elles sont proches des souches EHEC car elles produisent les toxines SLT qui seraient responsable des lésions. Les *E. coli* entéroaggrégatives (EAEC), dont leur pouvoir pathogène se fait par adhésion aux cellules (adhésion agrégative) avec production de l'entérotoxine EAST1 (pour « EA<sub>g</sub>gEC ST-liketoxin »), sont responsables de diarrhées persistantes et de retard de croissance surtout chez les jeunes enfants. Les *E. coli* à adhésion diffuse (DAEC), tout d'abord classées avec les EPEC, sont reconnus comme un groupe à part, du fait de leur phénotype d'adhésion particulier qui n'implique pas d'agrégats microbiens. Elles sont responsables de diarrhées chroniques légères (Walk *et al.*, 2007).

### 6.3.2. Adaptation et résistance des *E. coli* aux antibiotiques

A force d'être agressées, les bactéries s'adaptent par sélection naturelle. Elles mutent aussi génétiquement, deviennent imperméables aux antibiotiques ou produisent des enzymes aptes à décomposer les antibiotiques (Heuvel *et al.*, 2010).

*E. coli*, naturellement très sensible à de nombreux antibiotiques, peut acquérir aisément des résistances au contact d'autres bactéries elles-mêmes résistantes. Elles peuvent parfois transférer le gènes de cette résistance aux bactéries voisines. Certaines bactéries peuvent même devenir résistantes à plusieurs antibiotiques. Elles sont dites multi-résistantes (Cook et Bolster, 2007). Régulièrement, des souches de *E. coli* sont la cause d'intoxications alimentaires via la consommation de produits animaux mal cuits ou consommés crus Les fruits et les légumes frais, ayant été en contact avec ces souches peuvent être également à risque (Frullani, 2011).

Ces principes de résistances sont communs à toutes les classes d'antibiotiques bien que les enzymes ou les structures mises en œuvre par les bactéries, soient spécifiques pour chaque famille de molécule

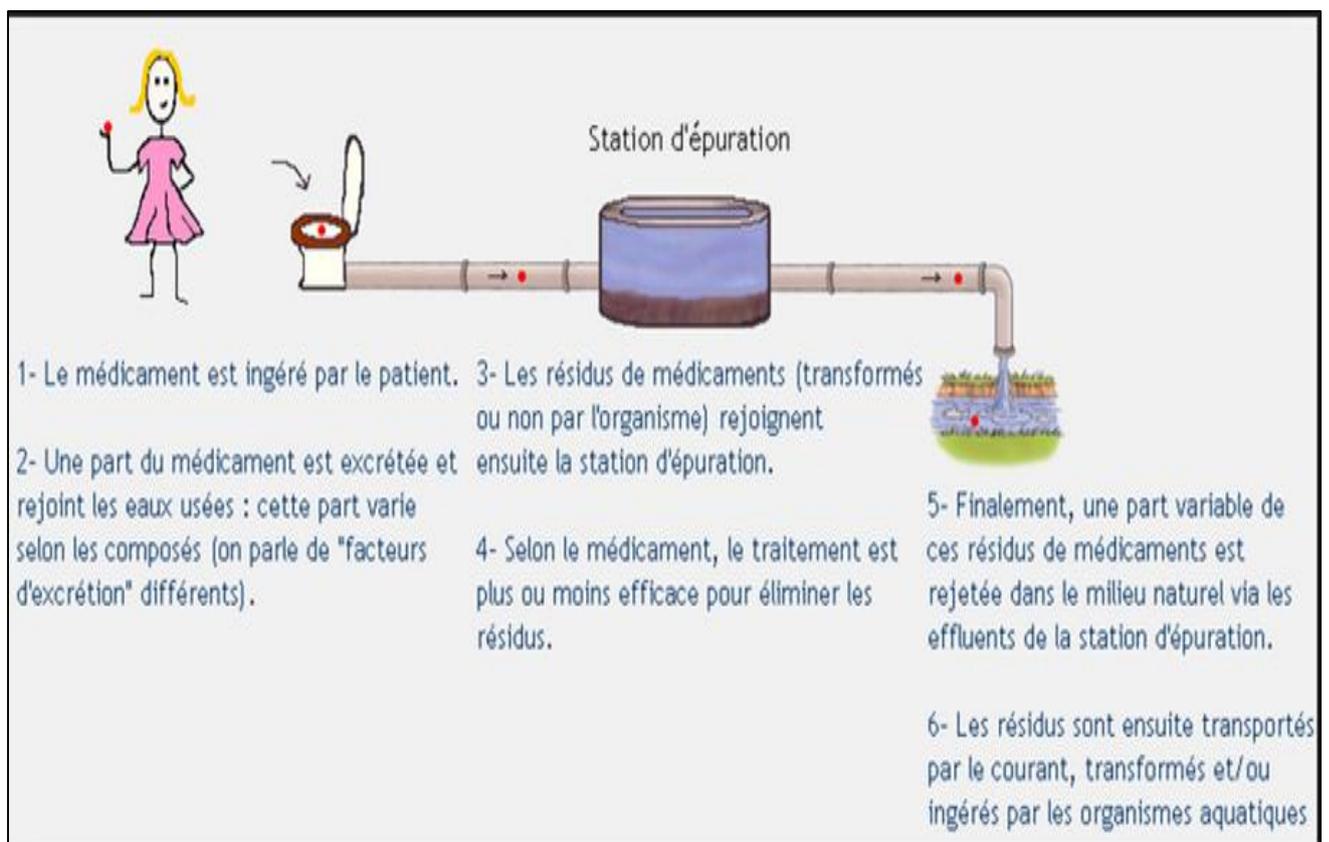
### 6.3.3. Sources de contaminations médicamenteuses de l'environnement

L'origine de la contamination de l'environnement par des résidus médicamenteux est la conséquence des usages en médecine humaine et des pratiques vétérinaires (Sanders *et al.*, 2011). Une fois consommées, ces molécules sont excrétées sous formes peu métabolisées via l'urine et les matières fécales (Christian *et al.*, 2013). Par la suite, la contamination des eaux

de surface s'effectuera par des effluents traités de stations d'épurations (sources ponctuelles) ou des ruissellements et/ou lessivages des sols (sources diffuses) (**Figure 15**).

La particularité des études concernant les populations d'*Escherichia coli*, réside dans le fait qu'en plus d'avoir des gènes de résistances propres, les *Escherichia coli* sont capables d'acquérir des résistances au contact d'autres bactéries elles-mêmes résistantes dans l'environnement. Elles peuvent ainsi indiquer des sources de pollutions d'origines médicamenteuses dans le milieu.

Les rejets de bactéries d'origine fécale dans l'environnement s'accompagnent de la dissémination de leur matériel génétique lors de la lyse cellulaire. Dans l'environnement, les temps de persistance de l'ADN dans l'eau varient de quelques heures à plusieurs mois, selon la méthodologie utilisée (études *in situ*, microcosmes) (**Nielsen et al. 2007**). Dans ces environnements, la concentration en ADN bactérien extracellulaire varie ( $\mu\text{g.L}^{-1}$  à  $10\mu\text{g.L}^{-1}$ ) en fonction de la dégradation enzymatique, la fragmentation et l'inactivation physique et chimique des molécules d'ADN. L'ADN d'une souche d'*E. coli* inoculée dans un sol a été détecté jusqu'à 40 jours alors qu'après 15 jours la souche n'était plus cultivable (**Recorbet et al., 1993**). La persistance d'ADN « nu » dans l'environnement indique qu'il peut être disponible pour des transferts horizontaux de gènes entre bactéries allochtones et autochtones par transformation et ainsi participer à la dissémination de gènes de résistance.



**Figure 15. Mise en place de la résistance aux antibiotiques des microorganismes aquatiques par une source ponctuelle de contamination (Croxen *et al.*, 2010)**

**PARTIE 2 :**  
**MATERIEL ET**  
**METHODES**

---

## CHAPITRE 7 : MATERIEL

---

### 7.1. Matériel biologique

#### 7.1.1. Zone d'étude

La ville de Yamoussoukro, localisée au centre de la Côte d'Ivoire entre 6°40' et 7° de latitude Nord et entre 5°10' et 5°20' de longitude Ouest, est la capitale politique de la Côte d'Ivoire depuis 1983. Elle possède un climat de type tropical humide (FAO, 2009).

Yamoussoukro appartient à la zone soudano-guinéenne qui représente 19 % du pays et est une zone de transition entre la zone forestière du Sud et la zone de savane du Nord. C'est une zone sujette à des épisodes de sécheresse et d'inondations. Les précipitations varient entre 1200 et 1500 mm, mais sont erratiques (FAO, 2009).

#### 7.1.2. Climat de la zone d'étude

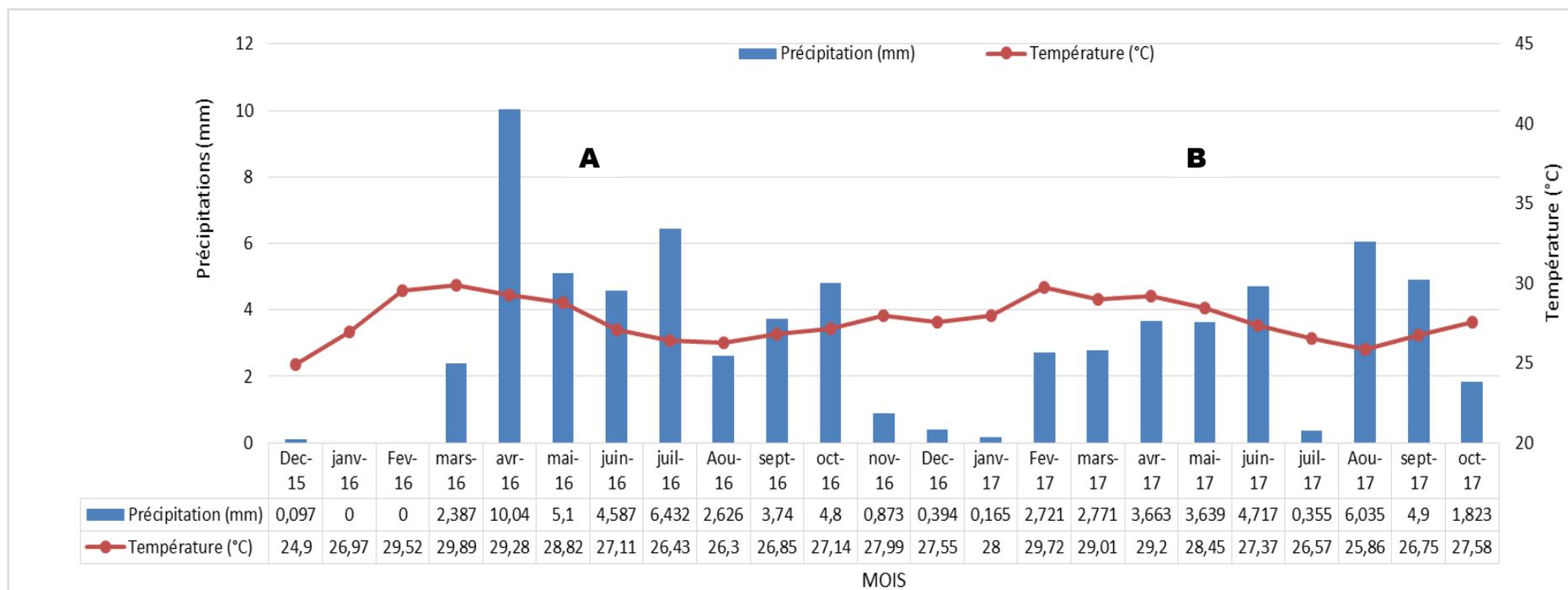
La Côte d'Ivoire est la zone de transition entre le climat équatorial humide et le climat tropical sec. Le pays peut être divisé en deux zones principales : le sud et le nord. Dans le sud, c'est-à-dire en dessous d'une ligne horizontale passant par Yamoussoukro, le climat est équatorial, donc très humide. La température est relativement constante, entre 29 et 32°C. On distingue quatre saisons principales:

- avril à mi-juillet : grande saison des pluies, avec de fréquentes précipitations et de nombreux orages,
- mi-juillet à septembre : petite saison sèche, le ciel pouvant rester couvert,
- septembre à novembre : petite saison des pluies, avec quelques petites précipitations,
- décembre à mars : grande saison sèche, marquée par les alizés du nord (harmattan).

Dans la partie nord, le climat est tropical et plus sec, et les saisons sont moins marqués. La température évolue généralement entre 28°C et 37°C. On distingue deux saisons principales :

- juin à septembre: grande saison des pluies, due aux alizés humides,
- octobre à mai : grande saison sèche.

Les données hydroclimatiques recueillis auprès du service de météorologie nationale de la Société d'Exploitation et de Développement Aéroportuaire, Aéronautique et Météorologique (SODEXAM), ont permis de faire ressortir la variabilité de l'hydroclimat à Yamoussoukro durant la période d'étude (**Figure 16**). Deux (2) paramètres climatiques ont été pris en compte : les précipitations et la température ambiante.



**Figure 16 : Diagramme ombrothermique de Yamoussoukro (Anoman *et al.*, 2019)**

*A : Période de Décembre 2015 à Septembre 2016*

*B : Période de Novembre 2016 à octobre 2017*

### 7.1.3. Eaux des lacs

Les eaux des lacs de chaque zone d'étude ont servi aux analyses physico-chimiques du milieu, et aux analyses microbiologiques.



**Figure 18. Quelques points d'eaux d'arrosages des cultures maraichères (Anoman *et al.*, 2019)**

#### 7.1.4. Légumes analysés

Le matériel végétal utilisé a été la carotte (*Daucus carota*), la laitue (*Lactuca sativa*) et le chou (*Brassica oleracea*) que l'on a fréquemment retrouvé lors des observations sur le terrain et sur tous les sites définis pour l'étude (**Figure 18**).





**Figure 17. Les cultures maraichères choisies pour l'étude (Anoman *et al.*, 2019)**

*A : Cultures de carottes aux abords du Lac A*

*B : Cultures de choux aux abords du Lac C*

*C : Cultures de laitues aux abords du lac B*

### **7.1.5. Milieux de cultures**

Pour les cultures microbiologiques, le matériel comprend les milieux de cultures COMPASS® *Ecc* Agar ((Réf : BK202HA) Biokar Diagnostics F60002 Beauvais Cedex – France), Lysogenic Broth (LB) et Lysogenic Broth Agar (LBA) (Invitrogen™ LS12780052),

Le milieu de culture Lysogenic Broth Agar (LBA) a permis la culture des souches de *E. coli* pour évaluer leurs résistances aux antibiotiques. Les disques d'antibiotiques y ont été déposés pour la réalisation de l'antibiogramme.

## **7.2. Matériel technique**

### **7.2.1. Matériel de prélèvement des eaux et des légumes**

Un Global Positioning System (GPS) portatif, modèle GARMIN eTrex, a été utilisé pour déterminer les coordonnées géographiques de tous les points de prélèvement d'eaux et de légumes. Des bouteilles SHOTT de 500ml et des sachets plastiques ont permis de prélever et de conditionner les échantillons lacustres. Des étiquettes cartonnées ont permis de désigner les échantillons, des marqueurs et stylos pour désigner les échantillons et une daba et des ciseaux pour prélever les légumes. La pesée des échantillons a été effectuée respectivement au moyen d'une balance électronique STARTORIUS BP 160 de précision 0,1 mg.

### **7.2.2. Matériel de mesures des paramètres physicochimiques du milieu**

Un pH-mètre-thermomètre de marque HANNA HI 98240 a servi à mesurer in situ la température et le pH. Un turbidimètre de marque WTW Turb 430 R a servi à mesurer la turbidité. Un oxymètre portatif de type Oxy 92 wtw a servi à mesurer l'oxygène dissous. Un analyseur de carbone DOHRMANN modèle Phoenix 8000 par la méthode d'oxydation chimique par voie humide a servi à mesurer la matière organique.

### **7.2.3. Matériel pour l'étude microbiologique**

Les boîtes de Pétri de diamètre 90mm (Polychimie SA CI), une hotte de culture, du gaz et des brûleurs à bec Bunsen, des pipettes pasteurs, de l'alcool ont permis entre autres, l'isolement

simultané des *E. coli* et des autres coliformes thermotolérants. Un autoclave a permis la stérilisation des milieux de cultures préparés et une étuve a permis la stérilisation à sec de la verrerie. Une chambre de culture a permis la culture des bactéries à 44°C.

#### **7.2.4. Matériel pour la caractérisation moléculaire des *E. coli***

Le matériel est composé d'un thermocycleur GeneAmp System 9700 (Applied Biosystem, Foster City, Californie, USA), des masters mix (Master Mix One Taq Quick load 2X avec tampon standard, New England Biolabs, Etats-Unis), des amorces forwards et reverses (New England Biolabs, Etats-Unis) des micropipettes et des consommables de biologie moléculaires.

#### **7.2.5. Matériel ou outil informatique**

Les données collectées pendant les phases de terrain ou acquises auprès des structures spécialisées en leur production ont été traitées au moyen de plusieurs logiciels. Il s'agit des logiciels : Arc Gis version 10 pour la réalisation des cartes du système lacustre de la ville de Yamoussoukro.; Paint pour l'amélioration des cartes; Kronostat<sup>TM</sup> 1.01 pour détecter les ruptures ; Statistica version 7.1 pour les analyses statistique de variance et les classifications hiérarchiques ascendantes ; R et XLSTAT 2016 version d'évaluation 18.07 pour les ANOVA, les histogrammes, les Boxplots, pour les analyses en composantes principales, les Analyses Factorielles de correspondances multiples et les dendrogrammes ; Microsoft office 2013 (word et excel) pour la mise en forme et la présentation des résultats et la rédaction du document de thèse.

---

## CHAPITRE 8 : METHODES

---

### 8.1. Echantillonnages

#### 8.1.1. Choix des sites

Yamoussoukro est dotée d'un ensemble de lacs artificiels aménagés sur deux cours d'eau, qui communiquent entre eux. Le suivi des charges d'*E. coli*, et de coliformes thermotolérants a été effectué sur cinq (5) lacs parmi les dix (10) du système lacustre (**Figure 4**).

Les lacs ont été choisis du fait de leur position dans le système lacustre et en fonction des activités maraîchères qui sont pratiquées aux abords : Ce sont les lacs situés en amont des deux branches du système, le Lac A et le Lac B ; en passant par les lacs au centre du système, le Lac C et le Lac D ; pour aboutir en aval sur le Lac E (**Figure 17**).

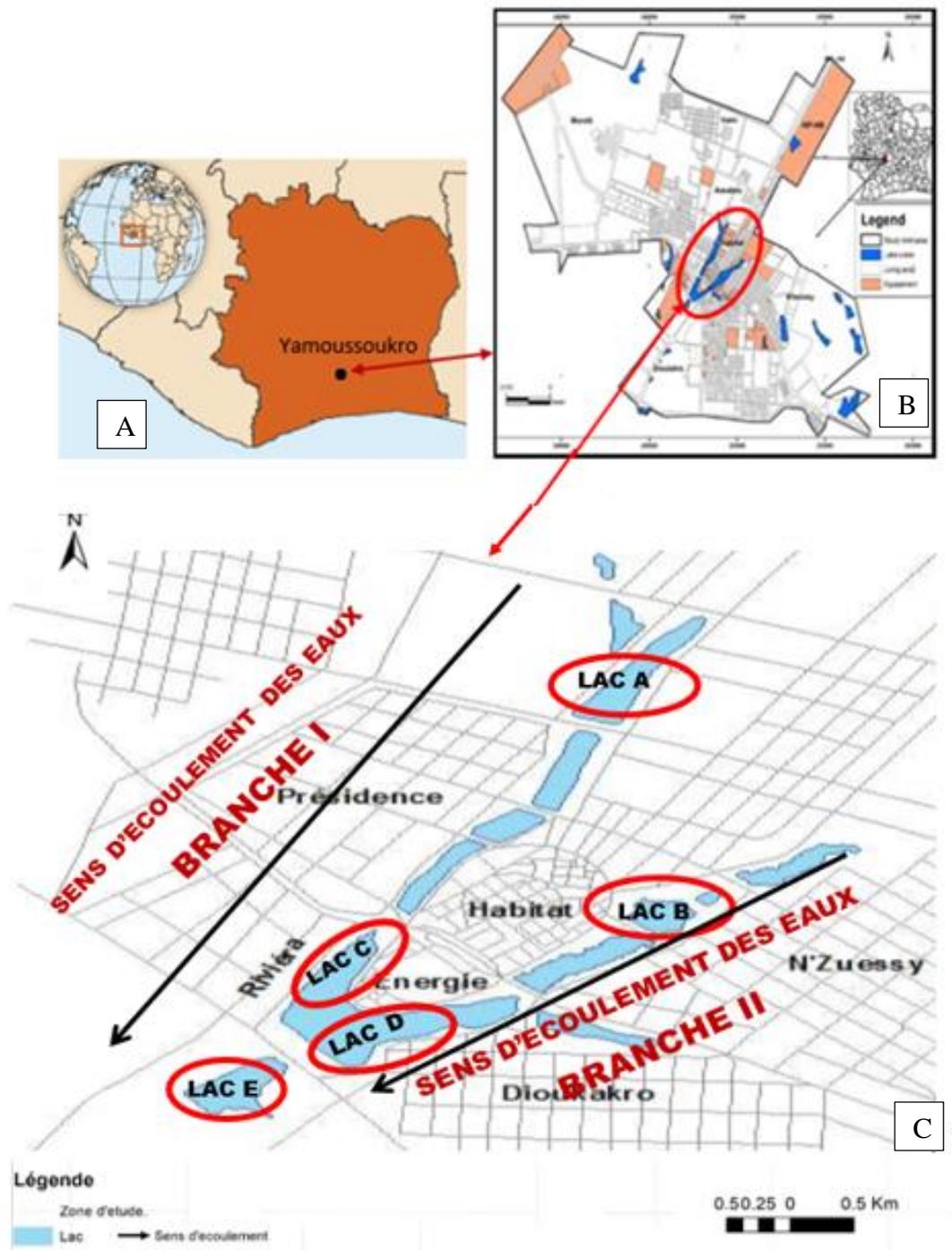
Le Lac A de la première branche (I) est situé dans une zone peu urbanisée et très peu peuplée

Le Lac B de la seconde branche (II) est situé en plein centre urbain très dense et très peuplé.

D'importantes activités agricoles péri-urbaines sont pratiquées sur le bassin versant des 2 lacs.

Le Lac C de la branche (I) fait frontière avec les lacs aux caïmans et est très utilisé par les populations pour la lessive. Le Lac D de la branche (II) fait frontière avec le Centre Hospitalier Régional (CHR). Ce lac reçoit les eaux usées du quartier Dioulabougou et du CHR.

Enfin le Lac E où se rejoignent la première branche (I) et la seconde branche (II) du système lacustre, abrite plusieurs activités agricoles et d'élevages.



### 8.1.2. Prélèvements de l'eau et des légumes

Des prélèvements mensuels ont été effectués de décembre 2015 à septembre 2016 et de novembre 2016 à octobre 2017. Les différents points de prélèvement ont été sélectionnés selon le protocole canadien d'échantillonnage de l'eau (**MDDEFP, 2013**). Ce protocole stipule que les points de prélèvement doivent être définis en fonction du périmètre des lacs à comparer.

Dans le cadre de cette étude, les points représentés par les céans de prélèvements d'eaux d'arrosages des cultures maraichères par les maraichers, ont été désignés suivant ce protocole. Ainsi pour le Lac A, 5 points ont été choisis; 7 points pour le lac B ; 7 pour le Lac C ; 7 pour le lac D et 5 pour le lac E. Au total, 31 céans ont été étudiés pour l'ensemble des cinq (5) lacs étudiés.

Pour chacun des céans identifiés, 500 ml d'eau ont été prélevés selon la méthode canadienne d'échantillonnage de l'eau, c'est à dire en U à 50 cm de profondeur (**MDDEFP, 2013**).

Concernant les échantillons de légumes, six (6) échantillons de chaque légumes (carottes, choux, laitues) ont été prélevés sur deux (2) champs à proximité du puits d'eau, soit 18 légumes par puits d'eau échantillonné (point d'échantillonnage).

Les plants ont été arrachés du sol et introduits soigneusement dans un sachet stérile refermé hermétiquement pour éviter un apport exogène de microorganismes.

Les 24 campagnes de prélèvements (Tableau XII) ont permis de récolter au total, 744 échantillons d'eaux et 13.392 échantillons de légumes (Tableau XI).

Après chaque campagne de prélèvements, les échantillons d'eau et de légumes collectés ont été conservés à l'obscurité et à une température de 4°C [**ISO 11996**] (**2006**), dans une glacière contenant suffisamment de glace.

Tous les échantillons ont été transférés au laboratoire, dans les plus brefs délais, et stockés au réfrigérateur pour les analyses subséquentes.

**Tableau XI. Echantillonnage des eaux et des légumes**

LACS	Points de prélèvements	Campagnes de prélèvements	Echantillons d'eaux	Echantillons de carottes	Echantillons de choux	Echantillons de laitues
LAC A	5 céans	24	120 (1 * 5 * 24)	720 (6 * 5 * 24)	720 (6 * 5 * 24)	720 (6 * 5 * 24)
LAC B	6 céans	24	144 (1 * 6 * 24)	864 (6 * 6 * 24)	864 (6 * 6 * 24)	864 (6 * 6 * 24)
LAC C	7 céans	24	168 (1 * 7 * 24)	1008 (6 * 7 * 24)	1008 (6 * 7 * 24)	1008 (6 * 7 * 24)
LAC D	7 céans	24	168 (1 * 7 * 24)	1008 (6 * 7 * 24)	1008 (6 * 7 * 24)	1008 (6 * 7 * 24)
LAC E	6 céans	24	144 (1 * 6 * 24)	864 (6 * 6 * 24)	864 (6 * 6 * 24)	864 (6 * 6 * 24)
TOTAL	31 céans	24	744	4.464	4.464	4.464
				13.392		

\* 120 = Résultat de la multiplication entre (); l'exemple ci est similaire aux autres cases

1= lac échantillonné;

5: nombre de points ou céans au lac étudié;

24: Nombre total des campagnes de prélèvements (voir tableau XII)

**Tableau XII. Dates des campagnes de prélèvements au cours des années 2015-2016 et 2016-2017**

<b>Campagnes de prélèvements 2015-2016</b>	<b>de Jour de Prélèvement</b>	<b>Campagnes de prélèvements 2016-2017</b>	<b>de Jour de Prélèvement</b>
<b>1</b>	28 Décembre 2015	<b>13</b>	14 Décembre 2016
<b>2</b>	12 Janvier 2016	<b>14</b>	14 Janvier 2017
<b>3</b>	01 Février 2016	<b>15</b>	05 Mars 2017
<b>4</b>	02 Mai 2016	<b>16</b>	11 Avril 2017
<b>5</b>	19 Mai 2016	<b>17</b>	17 Mai 2017
<b>6</b>	06 Juin 2016	<b>18</b>	22 Juin 2017
<b>7</b>	19 Juillet 2016	<b>19</b>	29 Juillet 2017
<b>8</b>	01 Aout 2016	<b>20</b>	09 Aout 2017
<b>9</b>	28 Aout 2016	<b>21</b>	28 Aout 2017
<b>10</b>	12 Septembre 2016	<b>22</b>	19 Septembre 2017
<b>11</b>	30 Septembre 2016	<b>23</b>	05 Octobre
<b>12</b>	26 Novembre 2016	<b>24</b>	26 Octobre

## 8.2. Mesures des différents paramètres physicochimiques

La température de l'eau et le pH ont été mesurés sur le terrain. Les mesures ont été effectuées in situ à l'aide d'une sonde de température de type CTH7000 et d'un Potentiomètre/ sonde HANNA HI 98240.

La turbidité, la teneur en matière organique et l'Oxygène dissous ont été analysés au Laboratoire des Procédés Industriels, de Synthèses des Energies Nouvelles et de l'Environnement (**LAPISEN**) de l'INP-HB.

La turbidité a été mesurée par la réflexion d'un rayon lumineux dans l'eau à l'aide d'un Turbidimètre de type Turb 430 IR/T.

Les mesure de l'oxygène dissous ont été effectués à l'aide d'un oxymètre portatif de type OXY 92 wtw.

Le Carbone Organique Dissous (COD) a été mesuré avec l'Analyseur de carbone, modèle TOC Multi N/C 3100

Toutes ces mesures ont été réalisées selon les normes ISO correspondantes (**Tableau XIII**).

**Tableau XIII. Paramètres physicochimiques mesurés**

<b>Caractéristiques</b>	<b>Paramètres</b>	<b>Unité</b>	<b>Norme</b>
<b>Paramètres physiques</b>	<b>Température</b>	degré Celsius (°C)	-
	<b>Turbidité</b>	NTU (Unité de Turbidité)	<b>ISO 7027-1 (2016)</b>
	<b>pH</b>	-	<b>ISO 9963-1 (1994).</b>
<b>Paramètres chimiques</b>	<b>Oxygène dissous (OD)</b>	mg/L d'O <sub>2</sub>	<b>NF EN ISO 5814 (2012)</b>
	<b>Matière Organique (Carbone Organique Dissous : COD)</b>	mg/L	<b>ISO 8245:1999</b>

### **8.3. Détermination des charges bactériennes dans les échantillons d'eaux et de légumes**

#### **8.3.1. Dénombrement des coliformes thermotolérants et des *E. coli* dans les échantillons d'eaux**

Pour la culture bactérienne, 1ml d'échantillon d'eau a été dilué en série aux 1/10 et 1/100 conformément à la **norme française NF 9308-3 (AFNOR, 2000)**. Un volume de 100 µl de chaque dilution ont été mis en culture par étalement, sur la gélose COMPASS ECC Agar (**EUROFINS IPL Nord SAS , 2010**) à raison de 3 répétitions par dilution. Les boîtes de Pétri ont été incubées à 44 ° C pendant 24h.

Pour les échantillons de légumes, (30) g de feuilles (laitues, choux) ou de carottes ont été mis en suspension dans 5ml d'eau distillée et stomachées (ou agitées vigoureusement) dans un stomacher model 3500. Le liquide obtenu a été filtré à travers une membrane de porosité de 0,45 µm. Cette membrane a ensuite été placée sur le milieu COMPASS ECC Agar pour une incubation à 44°C pendant 24 heures conformément à l'**ISO 4832:2006**.

Après incubation sur la gélose COMPASS ECC Agar, il a été obtenu des colonies de couleur bleues à violettes caractéristiques de *E. coli*, de tailles et de formes variables et des colonies de couleur rose, caractéristiques des autres coliformes thermotolérants (**EUROFINS IPL Nord SAS , 2010**). Les colonies obtenues ont été comptées à l'aide d'un compteur de colonies. L'estimation du nombre de bactérie par unité de volume (ml) ou par (g), a été obtenue en multipliant la valeur moyenne des dénombrements par le taux de dilution auquel ils correspondent (**Schmidt et al., 2010**).

#### **8.3.2. Subculture des souches de *E. coli***

Les isolats bleues à violets caractéristiques des *E. coli* ont été cultivées isolement sur milieu Lysogeny Broth Agar (LBA) pour leur purification (**Bertani G., 1951 ; Bertani, G., 2004**).

Après la culture sur le milieu solide LBA, les *E. coli* ont été mis en culture dans le bouillon Lysogeny Broth (LB).

Après ces cycles d'isolement et de purification effectués à 44°C pendant 24h, les isolats bactériens ont été soit analysés dans l'immédiat pour la confirmation moléculaire par PCR et la réalisation des antibiogrammes et/ ou conservés à -20°C dans 30 % de glycérol (**Shäfer, 2001**) pour constituer une banque de souches.

#### 8.4. Caractérisation moléculaire des *E. coli*

La nature des souches d'*E. coli* a également été confirmée par PCR en utilisant des amorces *E. coli* R et *E. coli* F codant pour 147pb (Tsai *et al.*, 1993) (Tableau XV).

La première étape de cette approche a consisté à extraire et à purifier l'ADN des souches bactériennes. Le marqueur moléculaire utilisé pour cette étude est le marqueur *uidA*, responsable de l'activité  $\beta$ -glucuronidase des *E. coli*.

##### 8.4.1. Extraction de l'ADN

L'ADN total des souches d'*E. coli* a été extrait de 2ml de culture en bouillon LB en phase logarithmique. Le culot a été recueilli par centrifugation à 6000 rpm pendant 10 min. La méthode CTAB (Ly *et al.*, 2012) a été utilisée pour extraire l'ADN total qui a ensuite été stocké à -20°C jusqu'à l'analyse.

Le culot bactérien résultant a été résuspendu dans 800  $\mu$ l de CTAB (Cetyl-Trimethyl-Ammonium-Bromide) à chaud (65°C) dans des tubes eppendorfs de 2ml. Les tubes ont été vortexés légèrement puis mis au bain marie à 65°C pendant 30min, tout en veillant à mélanger les tubes toutes les 10min. Cette étape a permis la rupture des parois bactériennes. Au bout des 30min, une centrifugation à 13000rpm a été effectuée pendant 10min, puis 600  $\mu$ l du surnageant a été recueillis dans un tube eppendorf de 1.5ml.

Un volume égal de 600  $\mu$ l de CIAA (Chloroforme/Alcool iso Amylique (24/1)) a été ajouté puis mélangé par inversion. Une centrifugation à 13000rpm a été effectuée pendant 10min. 500  $\mu$ l du surnageant ont été ensuite prélevés et transférés dans un tube eppendorf de 1.5ml auquel ont été ajoutés un volume égale de 500  $\mu$ l d'isopropanol à 4°C. L'ensemble a été mélangé doucement par inversion jusqu'à obtention d'un précipité blanc, l'ADN.

Les tubes ont été mis à incuber à -20°C pendant 2h au moins ou toute la nuit puis centrifugé à 13 000 rpm pendant 10 min. Le surnageant a été versé puis le culot a été lavé dans 100  $\mu$ l d'éthanol à 70%, centrifugé à nouveau puis séché à température ambiante jusqu'à évaporation complète de l'éthanol.

L'ADN a été remis en suspension dans 100 µl d'eau pure. La détermination de la concentration d'ADN a été effectuée au spectrophotomètre de type NanoDrop 2000 (Thermo Scientific, USA). La révélation des bandes par électrophorèse en gel d'agarose 0,8% a été réalisée dans un tampon TBE (Tris Borate Ethidium) et 0,5 µg/ml de BET (bromure d'Ethidium) ( **Friecker 2008**).

#### 8.4.2. Amplification génique par PCR

L'amplification génique PCR a été réalisée dans un volume total de 25 µl contenant de l'ADN (15ng.µl<sup>-1</sup>), 10 µl de Master Mix, 2.5 µl (5 µM) de chacune des 2 amorces (**Tableau XIV**). Le programme PCR a consisté en une dénaturation initiale de 5min, à 35 cycles de dénaturation à 94°C pendant 50 s, d'annelage à 53°C pendant 40 s et d'élongation à 72°C pendant 1mn30 s. La terminaison a été effectuée à 72°C pendant 5mn, suivie d'un refroidissement de la machine à 4°C (**Schmidt et al., 2010**).

Dix microlitres de chaque amplifiât ont été déposés sur un gel d'agarose à 1% dans un tampon TBE puis dans 0,5 µg/ml de BET (New England Biolabs, Etats-Unis) pour vérifier la taille attendue. Les amplicons ont été déposés dans les puits du gel. Deux microlitres de tampon de charge 6X ont été mélangés avec 10µl d'échantillon et 5 µl marqueur de poids moléculaire 1Kb (New England Biolabs, Etats-Unis), puis déposés. Ils ont subi une électrophorèse pendant 30 mn au minimum, à 50 V (**Friecker, 2010**).

**Tableau XIV : Amorces utilisés pour les réactions de PCR**

Amorces	Séquences (5'→ 3')	Gène	Taille des amplicons (pb)	des Référence
E.coliF	AAAACGGCAAGAAAAGCAG	<i>uidA</i>	147pb	(Tsai <i>et al.</i> , 1993).
E.coliR	ACGCGTGGTTAACAGTCTTGCG			

### 8.5. Antibiogramme des souches de *E. coli*

L'antibiogramme des *E. coli* a été réalisé par la technique de diffusion en disque de Kirby-Bauer (EUCAST, 2017 ; Kirby & Bauer, 1966). Le choix des antibiotiques s'est fait en tenant compte des familles d'antibiotiques utilisés généralement en médecine humaine et animale. Ainsi, l'influence de chaque famille d'antibiotiques ainsi que des combinaisons d'antibiotiques, ont permis d'évaluer les seuils de sensibilité et de résistances des *E. coli*.

Après confirmation des *E. coli* par l'outil moléculaire, un bouillon liquide de culture d'*E. coli* a été étalé sur milieu solide LB. Les souches de *E. coli* ont été résuspendues dans une solution physiologique saline (0,85% de NaCl) en prélevant une seule colonie avec une anse stérile. La turbidité de la solution résultante a été ajustée à 0,5 McFarland standard (en utilisant 0,5 ml de BaCl<sub>2</sub> 0,048 M ajouté à 99,5 ml de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,18 M comme norme de comparaison) qui est approximativement égal à  $1 \times 10^8$  cellules / ml (McFarland, 1907) (CLSI, 2009b). Cent microlitre de l'inoculum bactérien obtenu ont été étalés, à l'aide d'une pipette pasteur sur du milieu gélosé LBA coulé et solidifié au préalable dans une boîte de Pétri de 90mm. L'inoculum bactérien a été mis à sécher à l'étuve 3 à 5 minutes à 44°C.

Les antibiotiques ont été préparés suivant les indications du fabricant. Le chloramphénicol et la tétracycline ont été dissous dans de l'alcool à 50 % et les autres antibiotiques dans de l'eau. Les disques d'antibiotiques ont été ensuite déposés dans les boîtes de Pétri ensemencés avec l'inoculum bactérien et ont été placés à 30 mm les uns des autres et du bord des boîtes de Pétri (CLSI, 2009a). Les boîtes ont ensuite été mises à incubées à 44° C pendant 24 h.

Les seuils de sensibilité aux antibiotiques, après la mesure des zones d'inhibitions, ont été définis suivant les recommandations par le Comité de L'Antibiogramme de la Société Française de Microbiologie CA-SFM, 2017 (Eucast, 2017)

**Tableau XV. Antibiotiques choisis pour l'antibiogramme des *E. coli***

Antibiotiques	Charge du disque ( $\mu\text{g}$ )	Diamètres d'inhibition (mm)		Famille
		Cible	Intervalles acceptables	
<b>Ampicilline</b>	10	18-19	15-22	<i>Bêtalactamines de 1<sup>ère</sup> génération</i>
<b>Céfalotine</b>	30	17	14-20	<i>Bêtalactamines céphalosporine</i>
<b>Céfotaxime</b>	5	28	25-31	<i>Bêtalactamines céphalosporine</i>
<b>Imipénème</b>	10	29	26-32	<i>Bêtalactamines carbapénèmes</i>
<b>Tétracycline</b>	30	19	18-25	<i>Cyclines</i>
<b>Ciprofloxacine</b>	5	33	29-37	<i>Quinolones</i>
<b>Sulfaméthoxazole</b>	25	26	23-29	<i>Sulfamides</i>
<b>Streptomycine</b>	300	17	14-20	<i>Aminosides</i>
<b>Gentamicine</b>	10	23	19-26	<i>Aminosides</i>
<b>Chloramphénicol</b>	30	24	21-27	<i>Phénicolés</i>

## **8.6. Traitement des données et analyses statistiques**

### **8.6.1. Analyse statistiques des données physicochimiques et bactériologiques**

#### **8.6.1.1. Test de normalité des distributions de Shapiro-Wilk**

Avant toute analyse et interprétation de données statistiques, il est nécessaire de vérifier la normalité des données. En effet, le paramètre 'moyenne' a été utilisé dans le commentaire des résultats. Les principales difficultés rencontrées lors de l'analyse des données sont les suivantes:

- (1) Les variables ont souvent des distributions qui ne suivent pas une loi de type 'Gaussien';
- (2) Les séries peuvent comporter des données manquantes.

Ces contraintes nécessitent d'avoir recours à des méthodes numériques "robustes", cad pouvant être utilisées lorsque les séries de données ne sont pas distribuées de manière normale tel que le test de Kruskal-wallis. .

Lorsque les valeurs des abondances bactériennes n'étaient pas distribuées normalement, elles ont tout d'abord été soumises à une transformation logarithmique ( $y$ ) :  $y = \log_{10}(x)$ . Les raisons de cette transformation peuvent se résumer en deux points :

- Elle permet une interprétation graphique plus facile de leurs évolutions.
- Elle permet d'éliminer en partie l'asymétrie souvent rencontrée dans les distributions de fréquence des dénombrements bactériens, cette asymétrie étant limitante pour certaines méthodes numériques utilisées tel le calcul du coefficient de similarité de Gower.

#### **8.6.1.2. Tests de Bartlett**

C'est un test proposé pour la comparaison des variances d'échantillons indépendants.

Une hypothèse importante dans l'analyse de la variance (ANOVA) et de l'Analyses en composantes principales (ACP) est que les variances dans les différents groupes sont égales (homogènes). Pour chaque variable dépendante, une analyse de variance est réalisée sur les écarts absolus des valeurs aux moyennes des groupes respectifs. Si le test de Bartlett est statistiquement significatif, l'hypothèse d'homogénéité des variances doit être rejetée. La statistique de Bartlett suit une loi de Fisher à 1 degré de liberté.

### **8.6.1.3. ANOVA ou test de Kruskal-Wallis suivis de test post-hoc de Newman-Keuls**

Toutes les analyses et représentations graphiques ont été réalisées à l'aide du logiciel statistique R version 3.0.2 (2013-09-25) et XLSTAT 2018. Des différences significatives dans les paramètres physico-chimiques et bactériologiques des lacs ont été étudiées en utilisant l'analyse de variance (ANOVA) à  $\alpha = 0,05$ , si la distribution suit une loi normale. Au cas où les distributions ne suivaient pas une loi normale, le test non paramétrique de Kruskal-Wallis a été utilisé. Ces tests ont été suivis du test post-hoc de Newman-Keuls pour évaluer les différences entre les échantillons.

### **8.6.1.4. Analyses en composantes principales (ACP) et corrélations de Spearman**

Les analyses en composantes principales (ACP) et des corrélations de Spearman ont également été effectuées entre les paramètres bactériens et les paramètres physico-chimiques pour déterminer les différentes relations possibles entre eux.

#### **8.6.1.4.1. Indice de KMO et test d'homoscédasticité des variances de Bartlett**

L'usage de l'ACP devant être justifiée, il a été réalisé des tests de Kaiser, Meyer et Olkin (indice KMO) et le test de Bartlett. L'indice de KMO est une mesure de l'adéquation de l'échantillonnage avec la faisabilité de l'ACP. Une valeur proche de 1 indique que cette adéquation est satisfaisante. Le test de Bartlett permet de vérifier l'égalité des variances entre des populations ou des niveaux de facteurs. Le test de Bartlett pour des valeurs proches de 0, indiquent que les relations entre variables sont significative et justifient l'usage de l'ACP.

#### **8.6.1.5. Régression linéaire**

La régression linéaire a permis l'évaluation graphique et à l'obtention des différents modèles. Ces modèles ont permis d'apprécier dans le temps la contribution des variables. Le logiciel R version Rx64 3.3.2 a été utilisé.

## **8.6.2. Analyse des souches des *E. coli***

### **8.6.2.1. Relations des taxa aux facteurs environnementaux par l'analyse factorielle des correspondances multiples (ACM)**

Il s'agit d'une méthode de description statistique multidimensionnelle d'un tableau de données qualitatives. Comme l'ACP pour les données quantitatives, elle permet pour des données qualitatives :

- de faire des représentations graphiques du contenu du tableau de données : représentation des similitudes entre les individus et entre les modalités des variables qualitatives.
- de faire un recodage en données numériques, sur lesquelles on peut ensuite appliquer d'autres méthodes (par exemple des algorithmes de classification).

La représentation des différentes observations par des points, classées en catégories de variables permet de distinguer les différentes catégories de bactéries. En fonction des caractéristiques morphologiques des souches, elle dessine une ellipse représentant la forme générale du nuage de points liant chaque observation au barycentre de la modalité à laquelle elle appartient.

### **8.6.2.2. Mesure de la ressemblance et de groupement des individus**

A partir des caractéristiques des individus bactériens, il est possible de les comparer afin de les grouper suivant leur degré de ressemblance les uns par rapport aux autres. Deux souches bactériennes ayant eu les mêmes caractéristiques correspondent à deux profils identiques. La traduction graphique du groupement est le dendrogramme. La méthode de groupement a permis d'établir un certain nombre de groupes taxonomiques ou taxa pour un niveau de similarité donné pour les différentes saisons au sein des différents lacs étudiés.

**PARTIE 3 :**  
**RESULTATS ET**  
**DISCUSSIONS**

---

## CHAPITRE 9 : DONNEES PHYSICOCHIMIQUES DES LACS AU FIL DES SAISONS HYDROCLIMATIQUES

---

### 9.1. Normalité des distributions des variables physicochimiques

Les données issues des campagnes de prélèvement ont été regroupées et analysées suivant les saisons du climat ivoirien (Section 7.1). Le test de normalité des distributions de Shapiro et Wilk menés pour chacun des paramètres physico-chimiques dans les lacs, a révélé que les distributions ont été normales pour chacun des paramètres étudiés (**Tableau XVI**).

**Tableau XVI : Distributions de l'ensemble des paramètres physicochimiques évalués au cours des saisons climatiques par le test de normalité des distributions de Shapiro et Wilk**

Shapiro-Wilk	OD	(Turbidité)	COD	T°C	pH
W	0,271	0,064	0,713	0,0645	0,0530
<b>p-value</b>	<b>0,671</b>	<b>0,14</b>	<b>0,461</b>	<b>0,0645</b>	<b>0,0630</b>
alpha	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05

## 9.2. Evolution des caractéristiques physicochimiques des lacs au cours des saisons climatiques des années 2015-2016

### 9.2.1. Variation des caractéristiques physicochimiques de l'eau au cours des saisons climatiques de l'année 2015-2016

Au seuil de 5%, le test paramétrique de Fisher-snedeco a révélé que pour la plupart des paramètres, c'est le facteur LACS qui a eu une influence plus importante notamment sur la turbidité, l'Oxygène Dissous (OD) et le Carbone organique dissous (COD) au seuil de significativité de 5% (**Tableau XVII**).

Le COD et la turbidité ont aussi été fortement influencés par les SAISONS. Dans le cas du pH et de la Température (T°C) aucune influence n'a été révélée au seuil de 5% (**Tableau XVII**).

**Tableau XVII : Interaction des facteurs LACS et SAISONS pour l'ensemble des paramètres physicochimiques des années 2015 à 2016 selon le test ANOVA de Fisher-Snedeco au seuil de 5%**

<b>Facteurs</b>	<b>Turbidité</b>	<b>OD</b>	<b>COD</b>	<b>T°C</b>	<b>pH</b>
<b>LACS (p)</b>	<b>0,000061</b>	<b>0,000000</b>	<b>0,000000</b>	0,07319	0,078937
<b>SAISONS (p)</b>	<b>0,044922</b>	0,055858	<b>0,045081</b>	0,102744	0,594606
<b>LACS*SAISONS (p)</b>	<b>0,004659</b>	<b>0,001197</b>	<b>0,015435</b>	0,547035	0,950156

### **9.2.2. Niveaux de variabilités des paramètres physicochimiques étudiés au cours des saisons climatiques de l'année 2015-2016**

Les résultats ont révélés que pour tous les lacs, les moyennes des turbidités ont été différentes les unes des autres. Les lacs A et B en amont du système lacustre ont présenté les turbidités les plus faibles, tandis que le lac E en aval a présenté les turbidités les plus élevées. En général, l'évolution de la turbidité dans les lacs, a suivi la direction de l'écoulement des eaux dans le système lacustre c'est-à-dire des lacs en amont vers ceux en aval.

Par ailleurs, concernant les saisons climatiques, les saisons pluvieuses (GSP, PSP) possédaient les valeurs moyennes de turbidités les plus élevées tandis que les saisons sèches (GSaS, PSaS) possédaient les valeurs moyennes les plus faibles.

En somme, les résultats concernant la turbidité ont révélés que les valeurs les plus faibles ont été observées au niveau du lac A à toutes les saisons climatiques. Les plus fortes valeurs ont été observées au lac E notamment au cours des grandes et petites saisons pluvieuses (GSP et PSP).

Pour l'Oxygène dissous (OD), les valeurs moyennes d'oxygène dissous (O<sub>2</sub>) ont variée d'un lac à l'autre suivant le gradient d'écoulement des eaux du système lacustre. Les valeurs les plus importantes ont été observées au niveau du lac A et les valeurs les plus faibles ont été observées au niveau du lac E. Les valeurs ont donc été décroissantes du lac A au lac E.

Concernant les saisons, en général, les saisons pluvieuses ont présenté les plus faibles valeurs d'Oxygène Dissous et les valeurs les plus élevés ont été observés aux saisons sèches. La plus forte valeur d'Oxygène Dissous a d'ailleurs été observée à la petite saison sèche (PSaS) du lac A suivie des 3 autres saisons (GSaS, GSP, PSP). Dans le lac B, saisons sèches (respectivement GSaS et PSaS) ont également présentées de fortes valeurs. Les 2 autres saisons du lac B (GSP et PSP) bien que moins élevées que les saisons précitées, ont pourtant présentés des valeurs plus élevées que celles des lacs C, D et E, montrant l'influence du gradient d'écoulement des eaux.

Pour le Carbone Organique dissous (COD), les niveaux de carbone organiques dissous ont été élevés dans le lac E. Les lacs A et B ont présentés les plus faibles valeurs. Ainsi, concernant les lacs, les valeurs de COD ont été croissantes du lac A au lac E.

Au cours des saisons climatiques, les valeurs les plus faibles ont été observées pendant les saisons sèches et les valeurs les plus élevées pendant les saisons pluvieuses.

Concernant le pH et la température des eaux dans les lacs étudiés, les tests n'ont pas montrés de différences statistiques au seuil de 5%.

**Tableau XVIII : Niveaux de variabilités des paramètres physicochimiques au seuil de 5% au cours de l'année 2015 à 2016 selon le test de comparaisons multiples des moyennes de Newman-Keuls**

LACS	SAISONS	Turb (NTU)	OD (mg O <sub>2</sub> /L)	COD (mg C/L)	T (°C)	Ph
LaA	GSaS	136,41 <sup>ab</sup> ± 0,71	4,02 <sup>de</sup> ± 0,05	5,84 <sup>a</sup> ± 0,07	27,74 <sup>a</sup> ± 0,07	6,68 <sup>a</sup> ± 0,05
LaA	GSP	152,82 <sup>bc</sup> ± 0,45	4,29 <sup>de</sup> ± 0,15	6,67 <sup>a</sup> ± 0,22	26,81 <sup>a</sup> ± 1,12	6,64 <sup>a</sup> ± 0,2
LaA	PSaS	120,38 <sup>a</sup> ± 12,34	4,52 <sup>e</sup> ± 0,16	6,69 <sup>a</sup> ± 0,44	26,05 <sup>a</sup> ± 0,19	6,68 <sup>a</sup> ± 0,05
LaA	PSP	119,5 <sup>a</sup> ± 8,58	3,96 <sup>de</sup> ± 0,27	7,93 <sup>ab</sup> ± 1,53	26,42 <sup>a</sup> ± 0,6	6,5 <sup>a</sup> ± 0,16
LaB	GSaS	138,42 <sup>ab</sup> ± 36,1	3,9 <sup>de</sup> ± 0,62	7,77 <sup>ab</sup> ± 0,07	26,82 <sup>a</sup> ± 0,07	6,68 <sup>a</sup> ± 0,62
LaB	GSP	159,24 <sup>c</sup> ± 0,45	3,56 <sup>cde</sup> ± 0,15	7,02 <sup>ab</sup> ± 0,1	26,81 <sup>a</sup> ± 0,51	6,77 <sup>a</sup> ± 0,2
LaB	PSaS	166,34 <sup>bcd</sup> ± 12,27	3,81 <sup>de</sup> ± 0,17	8,17 <sup>abc</sup> ± 0,91	26,68 <sup>a</sup> ± 0,19	6,68 <sup>a</sup> ± 0,62
LaB	PSP	161,43 <sup>bcd</sup> ± 7,13	3,43 <sup>cde</sup> ± 0,27	8,83 <sup>abc</sup> ± 1,3	27,09 <sup>a</sup> ± 0,7	6,52 <sup>a</sup> ± 0,07
LaC	GSaS	169,77 <sup>bcd</sup> ± 24,31	3,11 <sup>abcd</sup> ± 0,38	11,38 <sup>c</sup> ± 0,07	27,57 <sup>a</sup> ± 0,07	6,53 <sup>a</sup> ± 0,38
LaC	GSP	156,45 <sup>bc</sup> ± 0,45	3,3 <sup>bcde</sup> ± 0,15	11,38 <sup>c</sup> ± 0,1	27,71 <sup>a</sup> ± 0,01	6,6 <sup>a</sup> ± 0,2
LaC	PSaS	128,26 <sup>a</sup> ± 23,78	3,07 <sup>abcd</sup> ± 0,18	10,33 <sup>ac</sup> ± 0,5	27,3 <sup>a</sup> ± 0,19	6,53 <sup>a</sup> ± 0,38
LaC	PSP	135,35 <sup>ab</sup> ± 9,77	3 <sup>abcd</sup> ± 0,27	11,46 <sup>bc</sup> ± 1,7	28,16 <sup>a</sup> ± 0,8	6,65 <sup>a</sup> ± 0,11
LaD	GSaS	167,86 <sup>bd</sup> ± 66,32	3,19 <sup>abcde</sup> ± 0,35	11,31 <sup>ac</sup> ± 0,07	27,71 <sup>a</sup> ± 0,07	6,81 <sup>a</sup> ± 0,35
LaD	GSP	173,21 <sup>bd</sup> ± 0,45	3,19 <sup>abcde</sup> ± 0,15	11,44 <sup>bc</sup> ± 0,57	27,34 <sup>a</sup> ± 0,17	6,57 <sup>a</sup> ± 0,2
LaD	PSaS	175,86 <sup>bd</sup> ± 27,42	2,84 <sup>abcd</sup> ± 0,19	12,29 <sup>bcd</sup> ± 0,68	27,2 <sup>a</sup> ± 0,19	6,81 <sup>a</sup> ± 0,35
LaD	PSP	143,33 <sup>b</sup> ± 7,15	2,88 <sup>abcd</sup> ± 0,27	13,25 <sup>bd</sup> ± 1,87	27,98 <sup>a</sup> ± 0,9	6,73 <sup>a</sup> ± 0,02
LaE	GSaS	246,72 <sup>cd</sup> ± 69,3	1,88 <sup>a</sup> ± 0,01	13,84 <sup>cd</sup> ± 0,4	27,41 <sup>a</sup> ± 0,07	6,74 <sup>a</sup> ± 0,01
LaE	GSP	255,9 <sup>d</sup> ± 0,45	2,21 <sup>abc</sup> ± 0,15	13,89 <sup>cd</sup> ± 0,19	26,93 <sup>a</sup> ± 0,41	7,14 <sup>a</sup> ± 0,2
LaE	PSaS	247,09 <sup>cd</sup> ± 84,96	2,33 <sup>abc</sup> ± 0,20	14,74 <sup>d</sup> ± 0,07	27,22 <sup>a</sup> ± 0,19	6,74 <sup>a</sup> ± 0,01
LaE	PSP	253,93 <sup>d</sup> ± 67,2	1,95 <sup>ab</sup> ± 0,27	14,74 <sup>d</sup> ± 1,01	27,26 <sup>a</sup> ± 0,0	6,96 <sup>a</sup> ± 0,38

GSaS : Grande saison sèche    GSP : Grande saison des pluies    PSaS : Petite saison sèche    PSP : Petite saison des pluies

### 9.3. Evolution des caractéristiques physicochimiques des lacs au cours des saisons climatiques des années 2016-2017.

#### 9.3.1. Variation des caractéristiques physicochimiques de l'eau au cours des saisons climatiques de l'année 2016-2017

Au seuil de 5%, le test paramétrique de Fisher-snedeco a révélé que le facteur LACS a eu une influence sur tous les paramètres sauf le pH. Le facteur saison n'a eu d'influence que sur le carbone organique dissous (COD). L'interaction LACS\*SAISONS n'a d'ailleurs été significative que pour le (COD). Le test de comparaisons multiples de moyenne de Newman-Keuls au niveau de signification de 0.05, a été nécessaire pour voir comment ces échantillons ont différés les uns des autres (**Tableau XIX**).

**Tableau XIX: Interaction des facteurs LACS et SAISONS pour l'ensemble des paramètres physicochimiques des années 2016 à 2017 selon le test ANOVA de Fisher-Snedeco au seuil de 5%**

	<b>Turbidité</b>	<b>OD</b>	<b>COD</b>	<b>T°C</b>	<b>pH</b>
<b>LACS</b>	<b>0,000075</b>	<b>0,000006</b>	<b>0,000000</b>	<b>0,011835</b>	0,107503
<b>SAISONS</b>	0,990811	0,679154	<b>0,042246</b>	0,271921	0,448301
<b>LACS*SAISONS</b>	0,935397	0,063735	<b>0,045</b>	0,806217	0,964016

#### 9.3.2. Niveaux de variabilités des paramètres physicochimiques étudiés au cours des saisons climatiques de l'année 2016-2017

Au vu des résultats statistiques, l'évolution de la turbidité dans les lacs, a considérablement variée d'un lac à l'autre et a suivi la direction de l'écoulement des eaux dans le système lacustre, Les lacs A et B en amont du système lacustre ont présenté les turbidités les plus faibles, tandis que le lac E en aval a présenté les turbidités les plus élevées. Les lacs D et C, au centre du système lacustre, ont présenté des valeurs intermédiaires entre le lac A et le lac E.

Les saisons pluvieuses possédaient les valeurs moyennes de turbidités les plus élevées tandis que les saisons sèches possédaient les valeurs moyennes les plus faibles.

Pour l'Oxygène Dissous, les valeurs ont été plus ou moins similaires d'un lac à l'autre, néanmoins les valeurs les plus élevées ont été observées au lac A. Le lac A a présenté les plus fortes valeurs d'oxygène dissous et le lac E, les plus faibles valeurs.

Concernant les saisons, en général, les saisons pluvieuses (GSP) ont présenté les plus faibles valeurs d'Oxygène Dissous et les saisons sèches (PSaS), les plus fortes valeurs.

Pour le Carbone Organique Dissous, concernant les lacs en général, les valeurs ont été décroissantes du lac E au lac A où l'on a observé les plus faibles valeurs. Les niveaux de carbone organiques dissous ont été similaires dans les lacs D et E. Les lacs A et B ont présentés les plus faibles valeurs.

Au cours des saisons climatiques, les valeurs les plus faibles ont été observées en général pendant les saisons sèches (GSaS, PSaS), et les valeurs les plus élevées pendant les saisons pluvieuses (GSP).

La température de l'eau dans les cinq lacs n'a pas varié de manière significative au cours des différentes saisons climatiques des années 2015-2016. Les valeurs se sont situées en moyenne autour de 27°C.

Le pH n'a pas varié statistiquement au seuil de 5% dans les lacs étudiés au cours des saisons climatiques des années 2016-2017. .

**Tableau XX : Niveaux de variabilités des paramètres physicochimiques au seuil de 5% au cours de l'année 2016 à 2017 selon le test post-hoc de comparaisons multiples des moyennes de Newman-Keuls**

LAC	SAISONS	Turb (NTU)	OD (mg O2/L)	DOC (mg C/L)	T (°C)	pH
LaA	GSaS	154,67 <sup>ab</sup> ± 21,83	3,28 <sup>b</sup> ± 0,91	10,2 <sup>a</sup> ± 0,07	27,21 <sup>a</sup> ± 0,07	6,8 <sup>a</sup> ± 0,91
LaA	GSP	176,93 <sup>ab</sup> ± 0,45	2,85 <sup>b</sup> ± 0,16	11,25 <sup>abc</sup> ± 0,98	26,78 <sup>a</sup> ± 0,24	6,86 <sup>a</sup> ± 0,2
LaA	PSaS	137,04 <sup>a</sup> ± 72,78	3,09 <sup>b</sup> ± 0,17	10,69 <sup>ab</sup> ± 0,9	27,04 <sup>a</sup> ± 0,19	6,8 <sup>a</sup> ± 0,91
LaA	PSP	145,42 <sup>a</sup> ± 44,38	2,94 <sup>b</sup> ± 0,27	11,06 <sup>ab</sup> ± 1,57	26,8 <sup>a</sup> ± 0,7	6,67 <sup>a</sup> ± 0,22
LaB	GSaS	158,45 <sup>ab</sup> ± 0,69	2,58 <sup>ab</sup> ± 0,08	9,16 <sup>a</sup> ± 0,07	27,63 <sup>ab</sup> ± 0,07	6,71 <sup>a</sup> ± 0,08
LaB	GSP	178,52 <sup>b</sup> ± 0,45	2,94 <sup>b</sup> ± 0,16	10,94 <sup>ab</sup> ± 0,13	27,1 <sup>a</sup> ± 0,12	7,09 <sup>a</sup> ± 0,2
LaB	PSaS	176,65 <sup>ab</sup> ± 66,99	2,78 <sup>b</sup> ± 0,17	11,51 <sup>b</sup> ± 0,89	27,32 <sup>a</sup> ± 0,19	6,71 <sup>a</sup> ± 0,08
LaB	PSP	184,21 <sup>bc</sup> ± 24,07	2,44 <sup>ab</sup> ± 0,27	11,28 <sup>abc</sup> ± 1,32	27,14 <sup>a</sup> ± 0,7	7,21 <sup>a</sup> ± 0,16
LaC	GSaS	206,38 <sup>bc</sup> ± 68,04	2,11 <sup>ab</sup> ± 0,45	12,3 <sup>ac</sup> ± 0,07	27,93 <sup>ab</sup> ± 0,07	6,78 <sup>a</sup> ± 0,45
LaC	GSP	191,69 <sup>bc</sup> ± 0,45	1,97 <sup>a</sup> ± 0,16	12,28 <sup>ab</sup> ± 0,56	26,93 <sup>a</sup> ± 0,22	6,95 <sup>a</sup> ± 0,2
LaC	PSaS	227,38 <sup>bcd</sup> ± 64,23	2,44 <sup>ab</sup> ± 0,17	12,26 <sup>ac</sup> ± 0,01	27,97 <sup>ab</sup> ± 0,19	6,78 <sup>a</sup> ± 0,45
LaC	PSP	229,29 <sup>bcd</sup> ± 60,09	1,95 <sup>a</sup> ± 0,27	12,71 <sup>acd</sup> ± 1,28	26,83 <sup>a</sup> ± 0,7	6,64 <sup>a</sup> ± 0,02
LaD	GSaS	256,93 <sup>bd</sup> ± 68,55	2,56 <sup>ab</sup> ± 0,06	15,35 <sup>bcd</sup> ± 0,07	27,33 <sup>a</sup> ± 0,07	6,79 <sup>a</sup> ± 0,06
LaD	GSP	263,83 <sup>cd</sup> ± 0,45	2,78 <sup>b</sup> ± 0,16	15,43 <sup>cd</sup> ± 0,62	27,15 <sup>a</sup> ± 0,75	7,06 <sup>a</sup> ± 0,2
LaD	PSaS	265,52 <sup>cd</sup> ± 9,56	2,21 <sup>ab</sup> ± 0,17	15,35 <sup>bcd</sup> ± 0,86	27,09 <sup>a</sup> ± 0,19	6,79 <sup>a</sup> ± 0,06
LaD	PSP	273,13 <sup>cd</sup> ± 2,09	2,12 <sup>a</sup> ± 0,27	16,24 <sup>d</sup> ± 1,44	27,53 <sup>a</sup> ± 0,7	6,94 <sup>a</sup> ± 0,52
LaE	GSaS	304,92 <sup>d</sup> ± 25,27	1,85 <sup>a</sup> ± 0,9	14,31 <sup>c</sup> ± 0,07	26,76 <sup>a</sup> ± 0,07	7,19 <sup>a</sup> ± 0,9
LaE	GSP	349,09 <sup>e</sup> ± 78,11	1,95 <sup>a</sup> ± 0,16	15,66 <sup>cd</sup> ± 0,43	26,35 <sup>a</sup> ± 0,62	7,46 <sup>a</sup> ± 0,2
LaE	PSaS	290,68 <sup>d</sup> ± 0,45	2,18 <sup>ab</sup> ± 0,17	15,39 <sup>cd</sup> ± 0,38	26,72 <sup>a</sup> ± 0,19	7,19 <sup>a</sup> ± 0,9
LaE	PSP	318,65 <sup>de</sup> ± 79,75	1,96 <sup>a</sup> ± 0,27	15,92 <sup>d</sup> ± 1,14	27,19 <sup>a</sup> ± 0,7	7,48 <sup>a</sup> ± 0,38

GSaS : Grande saison sèche    GSP : Grande saison des pluies    PSaS : Petite saison sèche    PSP : Petite saison des pluies

## **9.4. Evolution des paramètres physicochimiques étudiés au cours des saisons climatiques des années 2015-2016 et 2016-2017**

### **9.4.1. Evolution de la température**

La température de l'eau dans les cinq lacs, n'a pas varié significativement durant l'étude. Les valeurs ont été comprises entre 25,6°C et 28,29°C. Les valeurs moyennes se sont situées autour de 27°C dans l'ensemble des lacs.

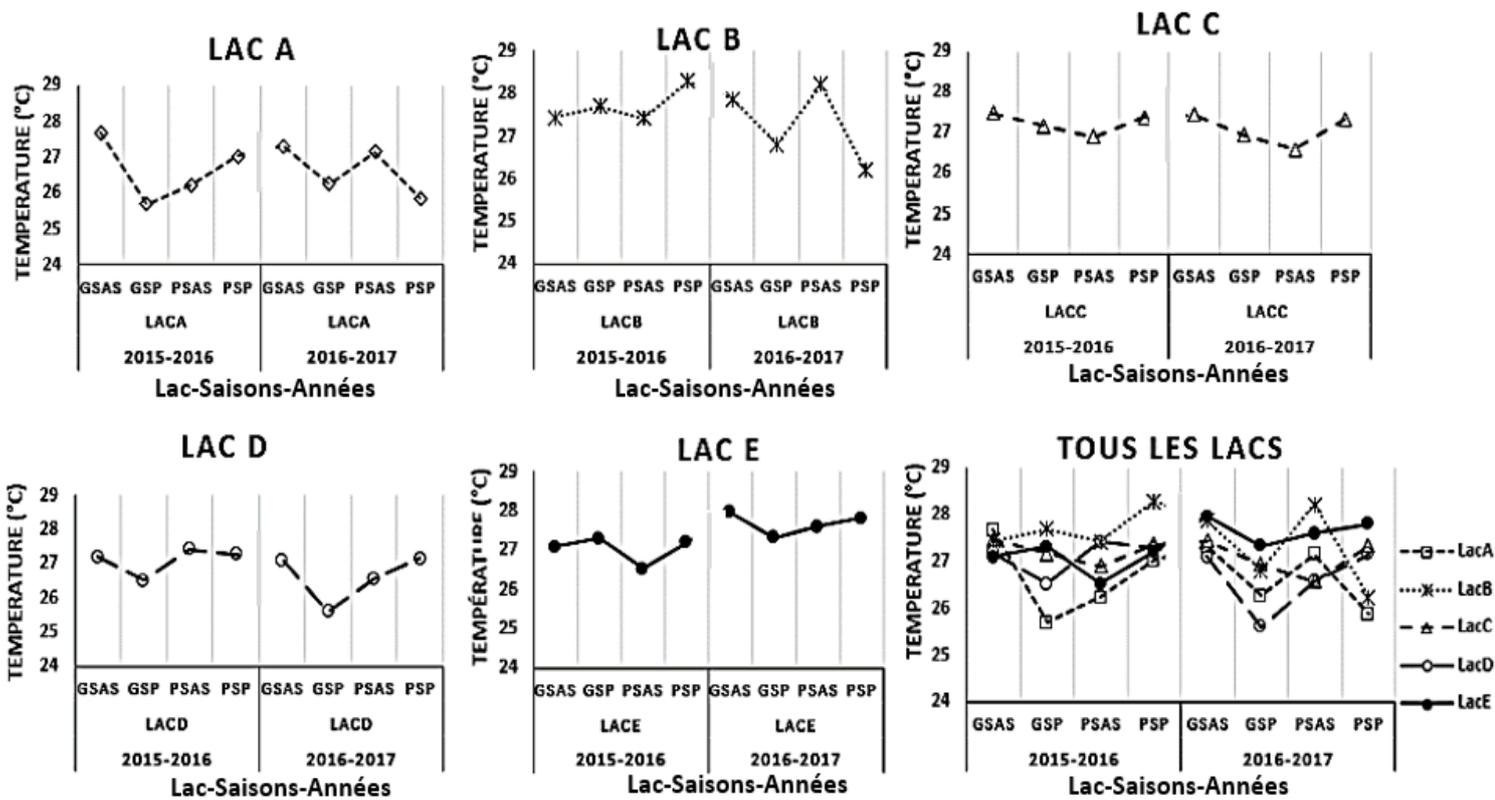
Les grandes saisons pluvieuses (GSP) ont été caractérisées par des baisses des températures et les températures ont généralement atteint leur maximum en Grandes Saisons Sèches (GSaS). De façon générale, les profils de températures d'un lac à l'autre ont été similaires (**Figure 19**).

### **9.4.2. Evolution du pH**

Les valeurs moyennes de pH sur les différents lacs ont varié de 6,35 à 7,16.

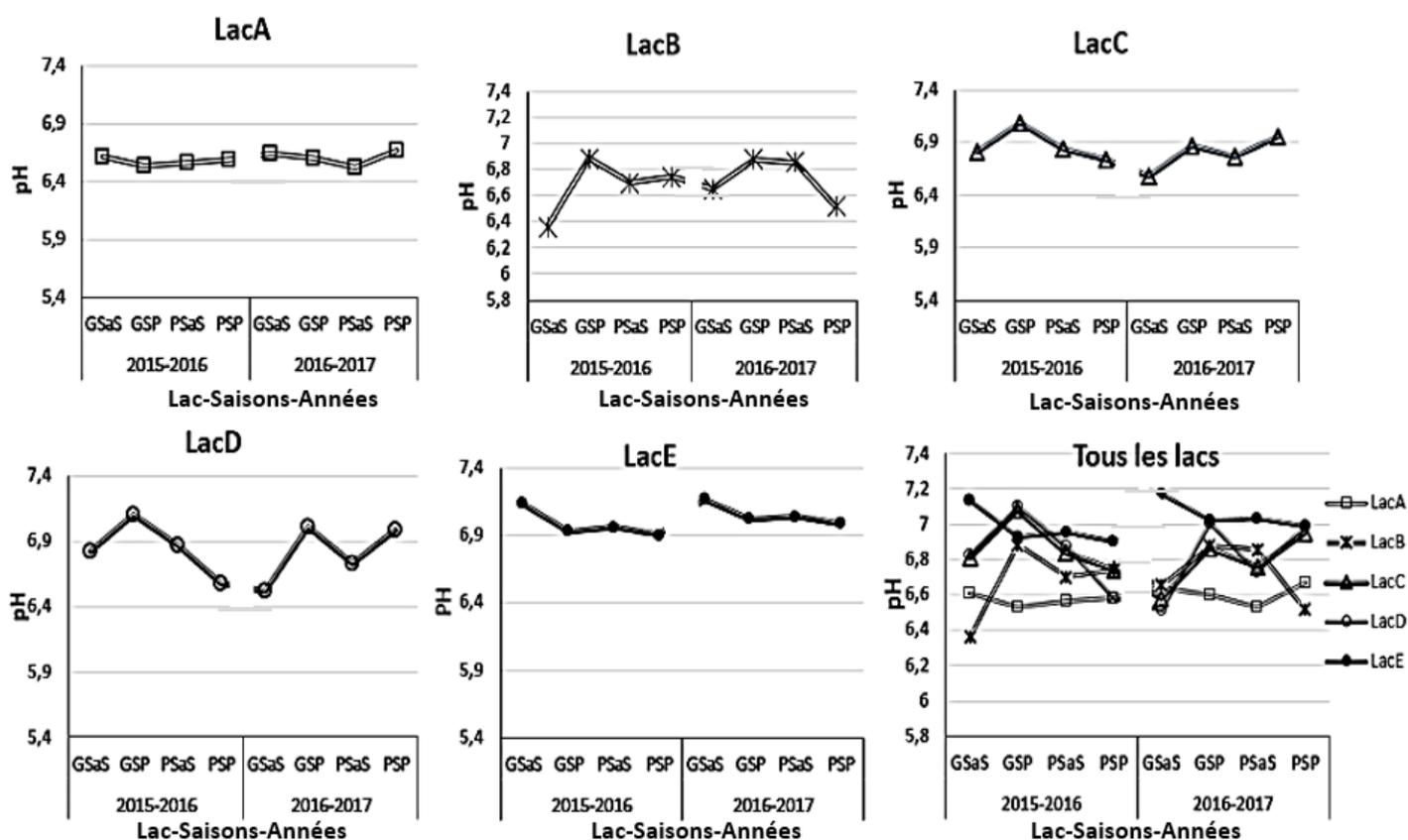
D'un lac à l'autre, la Grande Saison des pluies (GSP) a été marquée par des élévations de pH. Les pH du Lac E, a d'ailleurs présenté les valeurs les plus élevées, en général.

Au lac A où ne se pratique que des activités agricoles les pH ont été plutôt constants. (**Figure 20**).



**Figure 19. Evolution de la température des eaux des cinq lacs au fil des saisons climatiques**

*GSaS : Grande saison sèche    GSP : Grande saison des pluies    PSaS : Petite saison sèche  
 PSP : Petite saison des pluies*



**Figure 20. Evolution du pH des eaux des cinq lacs au fil des saisons climatiques**

*GSaS : Grande saison sèche    GSP : Grande saison des pluies    PSaS : Petite saison sèche  
PSP : Petite saison des pluies*

### 9.4.3. Evolution de la turbidité

Les turbidités des eaux ont considérablement varié d'un lac à l'autre.

Le lac A et le lac B ont présenté les turbidités les plus faibles pendant toutes les saisons climatiques avec des valeurs généralement comprises entre 100 et 150 NTU.

Le lac C et lac D ont présenté des turbidités intermédiaires avec des valeurs comprises entre 150 et 250 NTU. Néanmoins, le lac D a présenté des valeurs plus faibles que le lac C avec qui il communique pourtant. Les apports subis par les lacs C et D sont différents malgré leur proximité.

Le lac E, en aval du système lacustre, a présenté les turbidités les plus élevées avec des valeurs au-delà de 300 NTU (**Figure 21**).

### 9.4.4. Evolution de l'oxygène dissous

Le système lacustre a présenté généralement un taux d'oxygène dissous ( $O_2$ ) assez faible (inférieur à 5mg/L de  $O_2$ ) d'un lac à l'autre au cours des saisons climatiques (**Figure 22**).

Le lac A a présenté les plus fortes teneurs en oxygène dissous au fil des saisons avec des valeurs comprises entre 3,5mg/L et 5mg/L de ( $O_2$ ). Tous les autres lacs ont présenté des valeurs inférieures à 3,5 mg/L de ( $O_2$ ). Le Lac D a particulièrement présenté des teneurs en oxygènes dissous très faibles, en dessous de 2.5 mg/L de ( $O_2$ ).

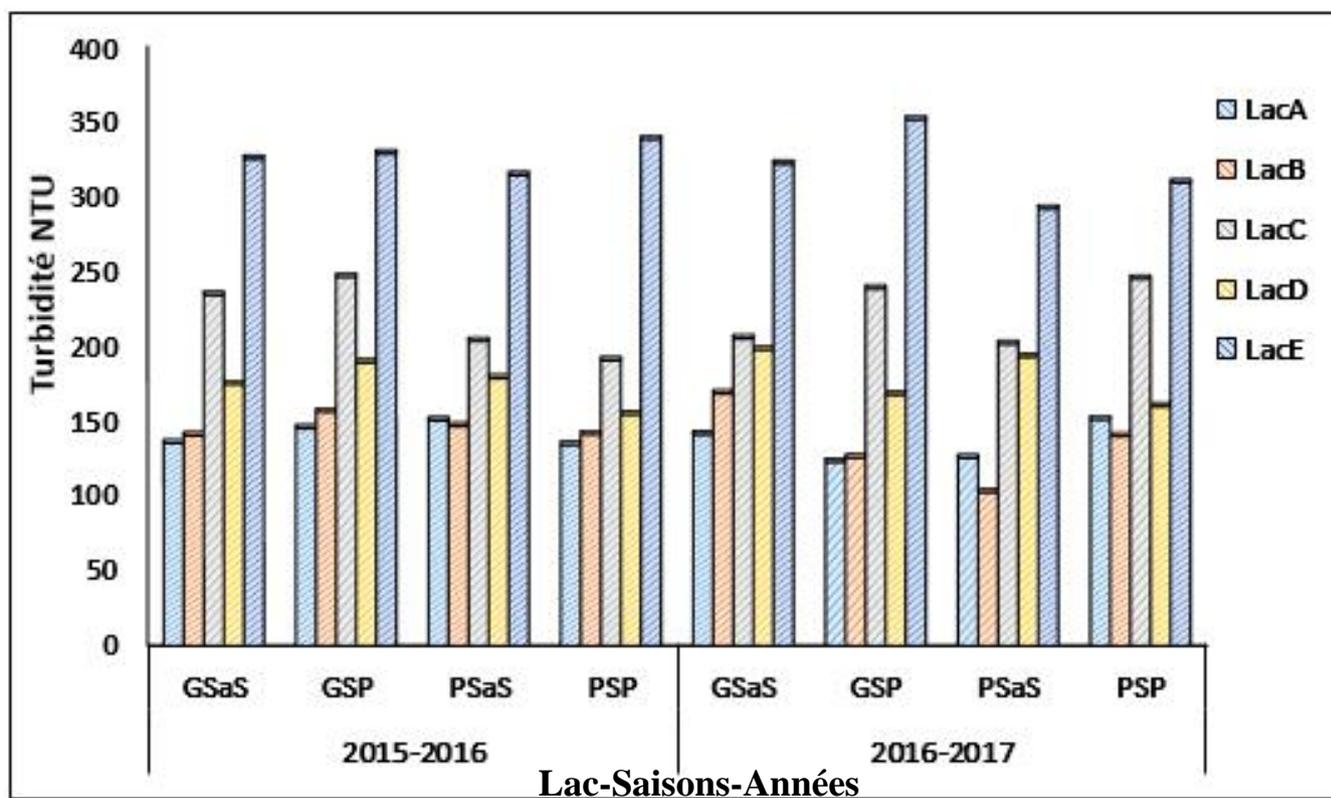
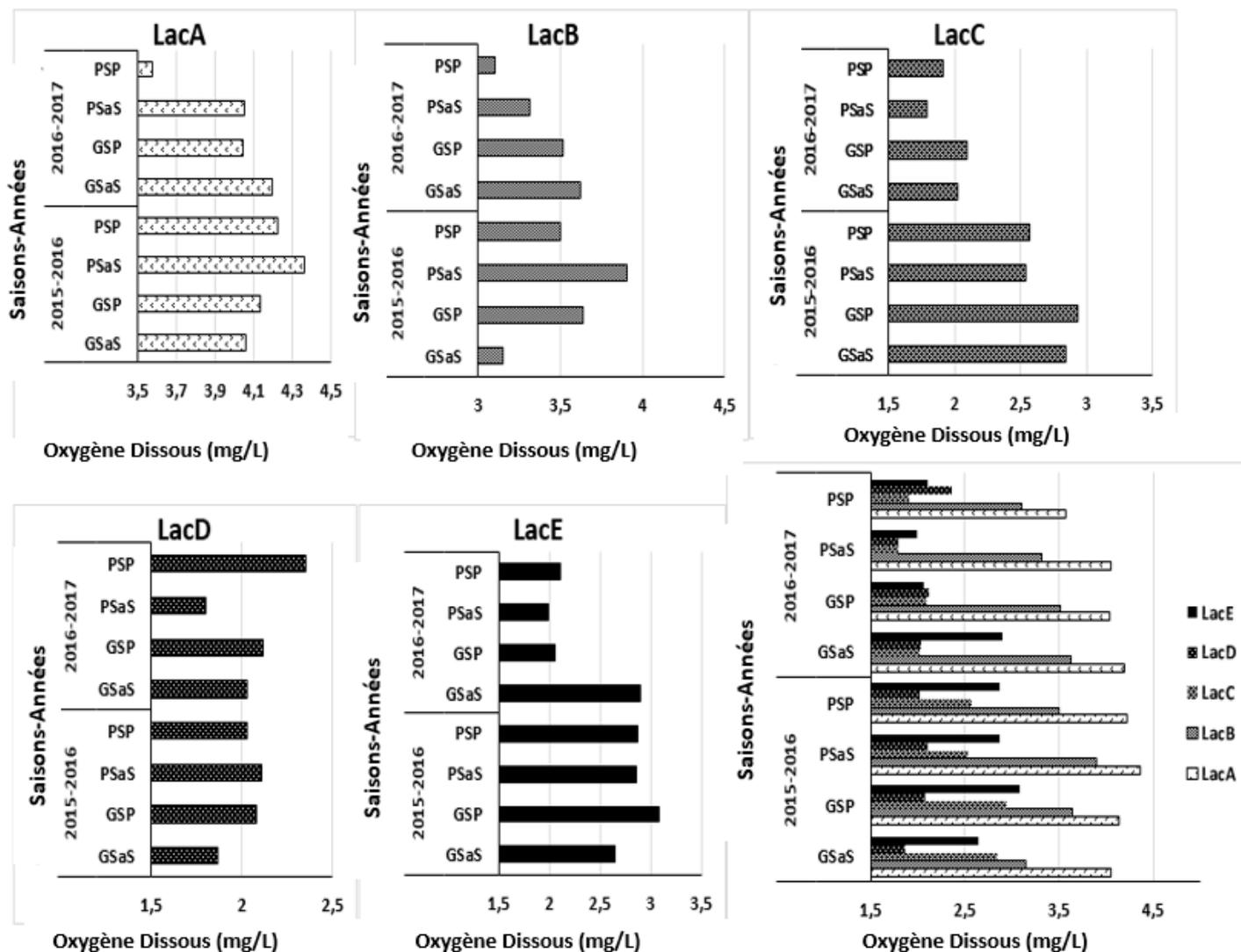


Figure 21. Evolution de la turbidité des eaux des cinq lacs au fil des saisons climatiques

GSaS : Grande saison sèche    GSP : Grande saison des pluies    PSaS : Petite saison sèche  
 PSP : Petite saison des pluies



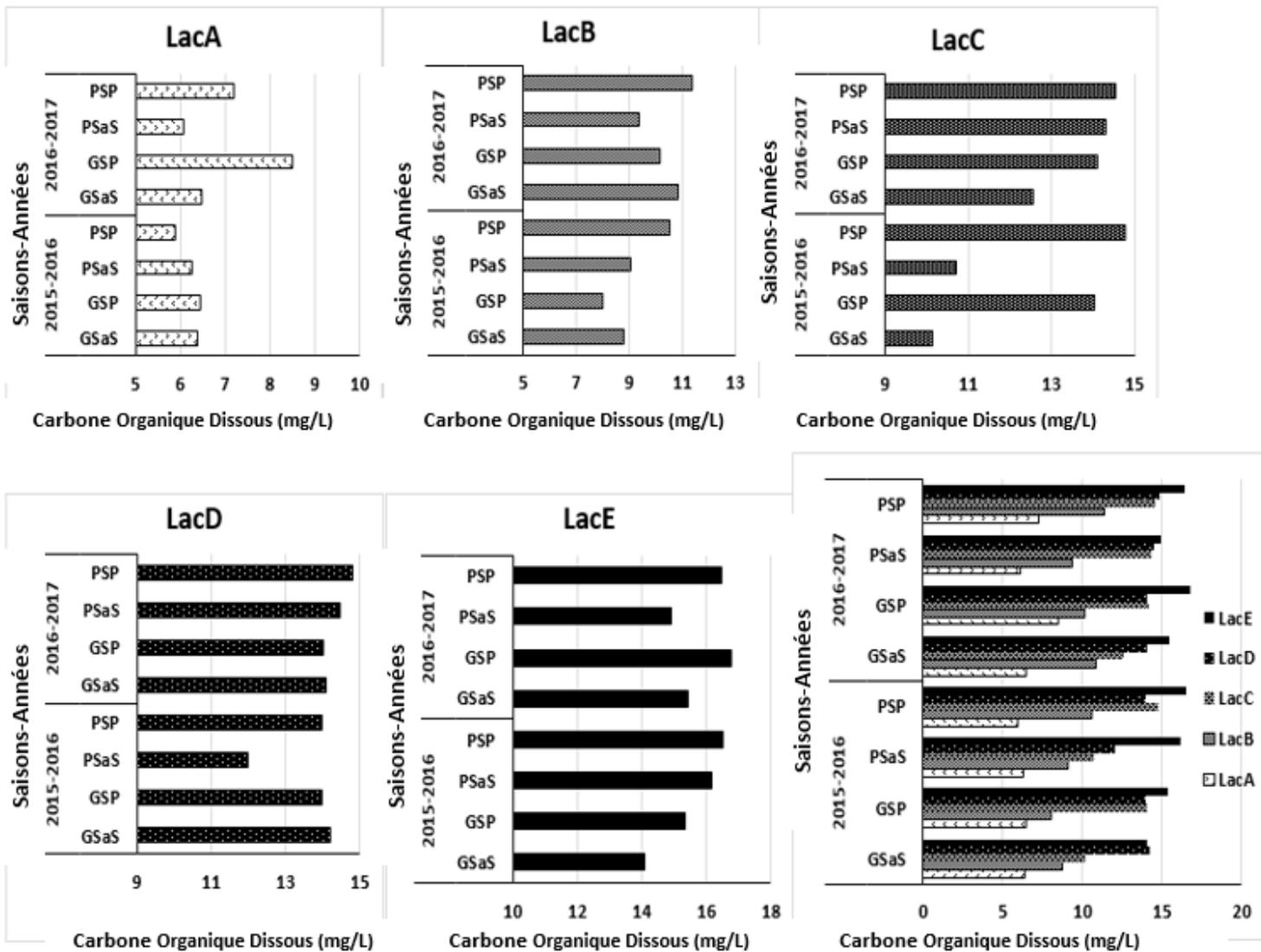
**Figure 22. Evolution de l'Oxygène dissous (O<sub>2</sub>) des eaux des cinq lacs au fil des saisons climatiques**

*GSaS* : Grande saison sèche    *GSP* : Grande saison des pluies    *PSaS* : Petite saison sèche  
*PSP* : Petite saison des pluies

#### 9.4.5. Evolution du Carbone Organique Dissous des eaux

Dans le Lac A, les teneurs en Carbone Organique Dissous ont variés entre 5,89 mg/L et 8,5 mg/L. Dans le Lac B, les teneurs en Carbone Organique Dissous ont variés entre 8 mg/L et 11,38 mg/L. Dans le Lac C, les teneurs en Carbone Organique Dissous ont variés entre 10,14 mg/L et 11,38 mg/L. Dans le Lac D, les teneurs en Carbone Organique Dissous ont variés entre 11,99 mg/L et 14,79 mg/L. Dans le Lac E, les teneurs en Carbone Organique Dissous ont variés entre 14,07 mg/L et 16,76 mg/L.

Les valeurs les plus faibles de Carbone Organique Dissous ont été observées avec le lac A. Les plus fortes teneurs ont été observées dans le lac E. En général, les teneurs en Carbone Organique Dissous ont évolué suivant le gradient d'écoulement des lacs (**Figure 23**).



**Figure 23. Evolution de la teneur en Carbone Organique Dissous des eaux des cinq lacs au fil des saisons climatiques**

*GSaS : Grande saison sèche    GSP : Grande saison des pluies    PSaS : Petite saison sèche  
 PSP : Petite saison des pluies*

## 9.6. Discussion

L'étude a mis en regard les caractéristiques physicochimiques de cinq (5) lacs de Yamoussoukro.

Relativement à ces paramètres, les températures des eaux ont fluctué très peu d'un lac à l'autre et au sein d'un même lac avec des valeurs comprises entre 25°C et 30°C. Les valeurs élevées seraient due à l'influence de la température ambiante sur les lacs (**Khalil, 2016**). En effet, les rayons du soleil traverse la faible épaisseur d'eau et la réchauffe de façon homogène.

Par ailleurs, il est ressorti que les valeurs des températures des eaux des lacs de Yamoussoukro ont été dans la même gamme que celles obtenues par (**Madjiki et al. (2013)** et (**Mustapha et Omotosho, 2015**) obtenues sur le lac municipal d'Ebolowa au Cameroun et sur le lac Moro au Nigeria respectivement. Ces températures se sont situés dans l'intervalle tolérée par les microorganismes thermotolérants des eaux (25 à 30°C) (**Lwamba et al., 2015**). En effet, la majorité des coliformes thermotolérants ont besoin d'une température d'au moins 20°C dans les eaux pour survivre (**Lods-Crozet et Reymond, 2016**).

De ce fait, la température des eaux des lacs urbains de Yamoussoukro a été favorable au développement de la survie microbienne (**Varlet, 2008**).

Concernant les pH, ceux-ci ont fluctué entre 6,69 et 8,5 avec une très faible variation d'un lac à l'autre sur la période d'étude. Les lacs urbains de Yamoussoukro ont eu des valeurs de pH semblables à ceux du lac Nokoué au Benin (**Dovonou et al., 2011**) du lac Danish au Danmark (**Sondergaard et al., 2003 ; Sondergaard, 2007**) et du lac Kuriftu en Ethiopie (**Fayissa et Kifle, 2014**).

Par contre, les pH des lacs Elmenteita et Sonachi au Kenya (**Melack, 2014**) ont été supérieurs à ceux de cette étude. Tout comme la température, les valeurs de pH pourraient être favorables au développement des microorganismes (**Ben Abbou et al., 2014**).

La turbidité a été liée aux emplacements des lacs et a semblé suivre la direction du débit de l'eau du système lacustre. Les lacs en avals ont été plus turbides que ceux en amont du fait d'une plus grande présence de matières en suspensions dans les eaux (**El-Amier et al., 2015**) (**Khalil, 2016**). En effet, Le lac A et le lac B en amont du système lacustre ont présentés les turbidités les plus

faibles pendant toutes les saisons, tandis que le lac E en aval présentait les turbidités les plus élevées. Le lac D et le lac C au centre du système lacustre ont présenté des turbidités intermédiaires. Dans les eaux de surface, la turbidité est généralement créée par des matières en suspension telles que des débris de matière organique, des micro-organismes vivants, des particules inorganiques telles que du limon et de l'argile (**Bilotta et Brazier, 2008**). Selon (**Taylor et al. 2006**) la plupart des bactéries sont associées avec des solides en suspension. Ces solides en suspension pourraient être les matières fécales (**Abril et al., 2004**).

Pour ce qui est de l'oxygène dissous ( $O_2$ ), les concentrations ont été comprises entre 1.7 mg/L et 4.3 mg/L. Les résultats obtenus ont été dans la même gamme que ceux de (**Kishe (2004)**) (3,2 à 6,8 mg/L) au lac Victoria en Tanzanie.

Les faibles teneurs d'( $O_2$ ) obtenues seraient liées à une forte décomposition de la matière organique par les microorganismes (**MDDELCC, 2014 et Palmer et al., 2004**). Ce qui a été constaté dans le lac E où les teneurs en ( $O_2$ ) ont été très faibles.

Par ailleurs, (**Hubert et Legre (2000)**), il a aussi été montré qu'une eau froide contient une plus grande quantité d'oxygène dissous qu'une eau chaude. Ainsi le réchauffement des eaux lacustres étudiées (température supérieure à 24°C) provoquerait une diminution de la dissolution de l'oxygène dissous sans parler des apports en éléments nutritifs, tels que l'azote et le phosphore, contenus entre autres dans les rejets organiques produits par l'activité humaine (**Cossa et al., 1994 ; Orjikh et Roy, 2014**).

Concernant, la teneur en Carbone Organique Dissous, elle a été élevée dans la plupart des lacs de Yamoussoukro, mais encore plus dans les lacs en aval du système lacustre. Cette variable qui révèle la quantité d'éléments nutritifs disponibles dans les lacs selon (**Abdo et al., 2010**), surtout ceux en aval dans notre étude, nous a permis de comprendre les abondances bactériennes (**El-Amier et al., 2015**).

Par ailleurs, l'on a pu remarquer que la turbidité et les niveaux de carbone organique dissous ont évolué dans le même sens. Ce résultat dans les lacs de Yamoussoukro est compréhensible parce que la turbidité est due aux particules en suspension, généralement riches en matières organique (**Smith et al., 2008**).

L'oxygène dissous par contre et les niveaux de carbone organique dissous ont évolué dans des sens opposés. Vu que l'oxygène dissous permet d'estimer la vitesse de la dégradation de la matière

organique selon (Felten, 2009) et est pour ce fait négativement corrélé avec les teneurs en MO selon (Ishii et Sadowsky, 2008).

Les caractéristiques physicochimiques des lacs ont présenté des distinctions nettes d'un lac à l'autre. Cependant, les variations physicochimiques au sein d'un même lac ont été faibles d'une saison à une autre. En somme, au sein d'un même lac les conditions physicochimiques n'ont pas variés au fil des saisons, mais ont grandement varié d'un lac à l'autre. Ces résultats pourraient être dus à la position spatiale des lacs d'amont en aval et au sens d'écoulement des eaux. Ces conditions physicochimiques ont très peu variés avec le temps.

Concomitamment aux les conditions physicochimiques, les caractéristiques microbiologiques des lacs ont été évaluées dans la suite de cette étude, pour comprendre l'ampleur des pollutions dans chacun des lacs en vue d'établir des corrélations entre cette pollution et les conditions du milieu.

---

## CHAPITRE 10 : DYNAMIQUE SPATIALE ET TEMPORELLE DE LA CONTAMINATION BACTERIOLOGIQUE DANS LES DIFFERENTS LACS ETUDIES

---

### 10.1. Normalité des distributions de l'ensemble des variables bactériologiques

Les tests menés pour chacun des paramètres bactériologiques a révélé que les distributions de ceux-ci pour chacun des lacs étudiés et aux différentes saisons climatiques des années 2015-2016 et 2016-2017, ont été des distributions normales sauf pour les paramètres *E. coli* Laitue où p est inférieur à 0.05. (**Tableau XXI**).

**Tableau XXI : Normalité des distributions de l'ensemble des caractéristiques bactériologiques des coliformes thermotolérants et *E. coli***

Shapiro-Wilk	Coliformes thermotolérants				<i>E. coli</i>			
	Eaux	Carottes	Choux	Laitues	Eaux	Carottes	Choux	Laitues
W	0,9391	0,9596	0,9414	0,9627	0,9731	0,9339	0,9496	0,9608
<b>p-value</b>	<b>0,139</b>	<b>0,127</b>	<b>0,211</b>	<b>0,198</b>	<b>0,0895</b>	<b>0,215</b>	<b>0,233</b>	0,00150
alpha	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05

## **10.2. Evaluation spatiale et temporelle de l'évolution des charges moyennes en coliformes thermotolérants et *E. coli***

Une transformation au log (10) des variables a été nécessaire pour l'analyse des données bactériologiques obtenues. Le test non paramétrique de Kruskal-wallis suivi du test post-hoc de Newmann et Keuls, représentés sur les figures par des lettres alphabétiques, ont été effectués pour évaluer l'influence des facteurs LACS et SAISONS sur l'évolution des paramètres étudiés

### **10.2.1. Variation temporelle des charges moyennes en coliformes thermotolérants et *E. coli* dans les eaux des cinq lacs**

Au niveau des lacs, dans l'ensemble, les charges bactériennes des coliformes thermotolérants et des *E. coli*, ont évolués du lac A vers le lac E (**Figure 24&25**).

Concernant les saisons climatiques, il a été observé un changement de ces charges bactériennes.

Dans le lac A, pour les coliformes thermotolérants et les *E. coli*, les pics bactériens ont été observés pendant les saisons de pluies (GSP) (**Figure 24&25**). Chez les coliformes thermotolérants, la plus grande valeur a été observée pendant la Petite Saison des Pluies (PSP) de l'année 2016-2017 avec 5.613 log<sub>10</sub>. UFC/100ml (**Figure 25**). Chez les *E. coli*, la Grande Saison des Pluies (GSP) de l'année 2015-2016 a présenté les plus fortes valeurs 3.592 log<sub>10</sub>. UFC/100ml (**Figure 25**).

Dans le lac B, les charges bactériennes ont été plus élevées pendant les saisons pluvieuses (GSP et PSP), que ce soit pour les coliformes thermotolérants que pour les *E. coli*. (**Figure 24&25**). Chez les coliformes thermotolérants, la plus grande valeur a été observée pendant la Grande Saison des Pluies (GSP) de l'année 2015-2016 avec 5.989 log<sub>10</sub>. UFC/100ml (**Figure 24**). Chez les *E. coli*, la Petite Saison des Pluies (PSP) de l'année 2015-2016 a présenté les plus fortes valeurs avec 4.992 log<sub>10</sub>. UFC/100ml (**Figure 25**).

Dans le Lac C, Les charges bactériennes ont été plus élevées pendant les saisons pluvieuses (GSP et PSP), que ce soit pour les coliformes thermotolérants que pour les *E. coli*. (**Figure**

**24&25**). Chez les coliformes thermotolérants, la plus grande valeur a été observée pendant la Grande Saison des Pluies (GSP) de l'année 2015-2016 avec 5.769 log<sub>10</sub>. UFC/100ml (**Figure 24**). Il a été observé un pic dans l'évolution des charges en *E. coli* pendant les Grande Saison des Pluies (GSP) des 2 années étudiées [5.196 log<sub>10</sub>. UFC/100ml en 2015-2016 et 4.09 log<sub>10</sub>. UFC/100ml en 2016-2017] (**Figure 25**).

Dans le Lac D, concernant les coliformes thermotolérants, la Petite Saison Sèche (PSaS) de l'année 2016-2017, a présenté une forte baisse des charges bactérienne (4.919 log<sub>10</sub>. UFC/100ml), cependant suivie d'une hausse importante à la saison des pluies suivante (5.127 log<sub>10</sub>. UFC/100ml) (**Figure 24**). Tout comme les autres lacs, les saisons pluvieuses ont été marquées par une pollution bactérienne plus accrue.

Le Lac E, en aval du système lacustre, a présenté les plus fortes charges en coliformes thermotolérants et en *E. coli* (**Figure 24&25**). Les pics de charges ont été observés pendant les Saisons Pluvieuses. En particulier, concernant les coliformes thermotolérants, la petite saison des pluies (PSP) de l'année 2015-2016 a présenté les plus fortes charges (7.103 log<sub>10</sub>. UFC/100ml) (**Figure 24**). Concernant les *E. coli*, c'est la grande saison des pluies (GSP) de l'année 2015-2016 qui a présenté la valeur la plus élevée (5.852 log<sub>10</sub>. UFC/100ml) (**Figure 25**). Ainsi dans ce lac, les saisons pluvieuses (GSP, PSP) ont marqué une forte pollution des eaux, comme dans les lacs précédents, et ce quel que soit l'année d'étude (**Figure 25**).

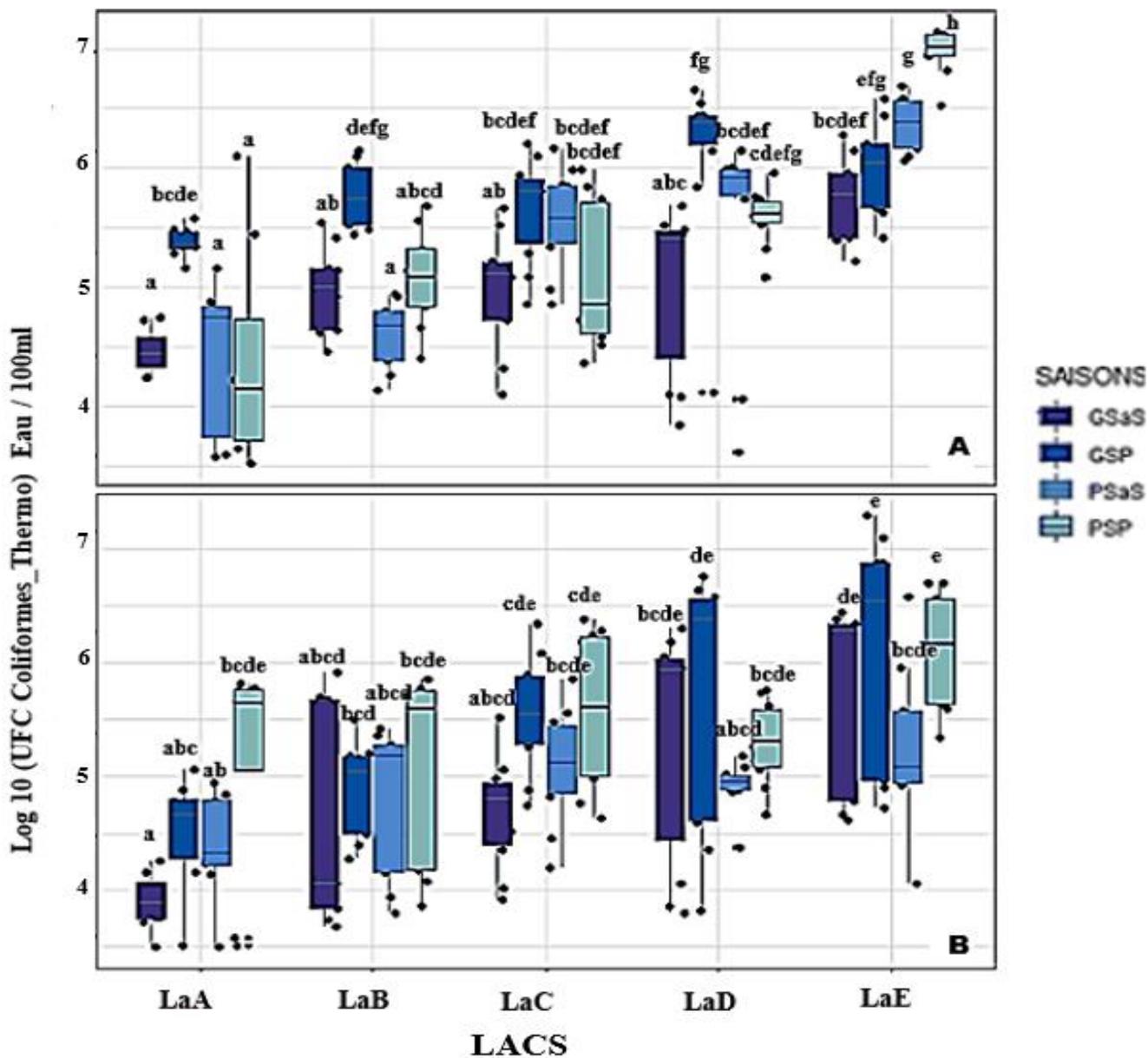
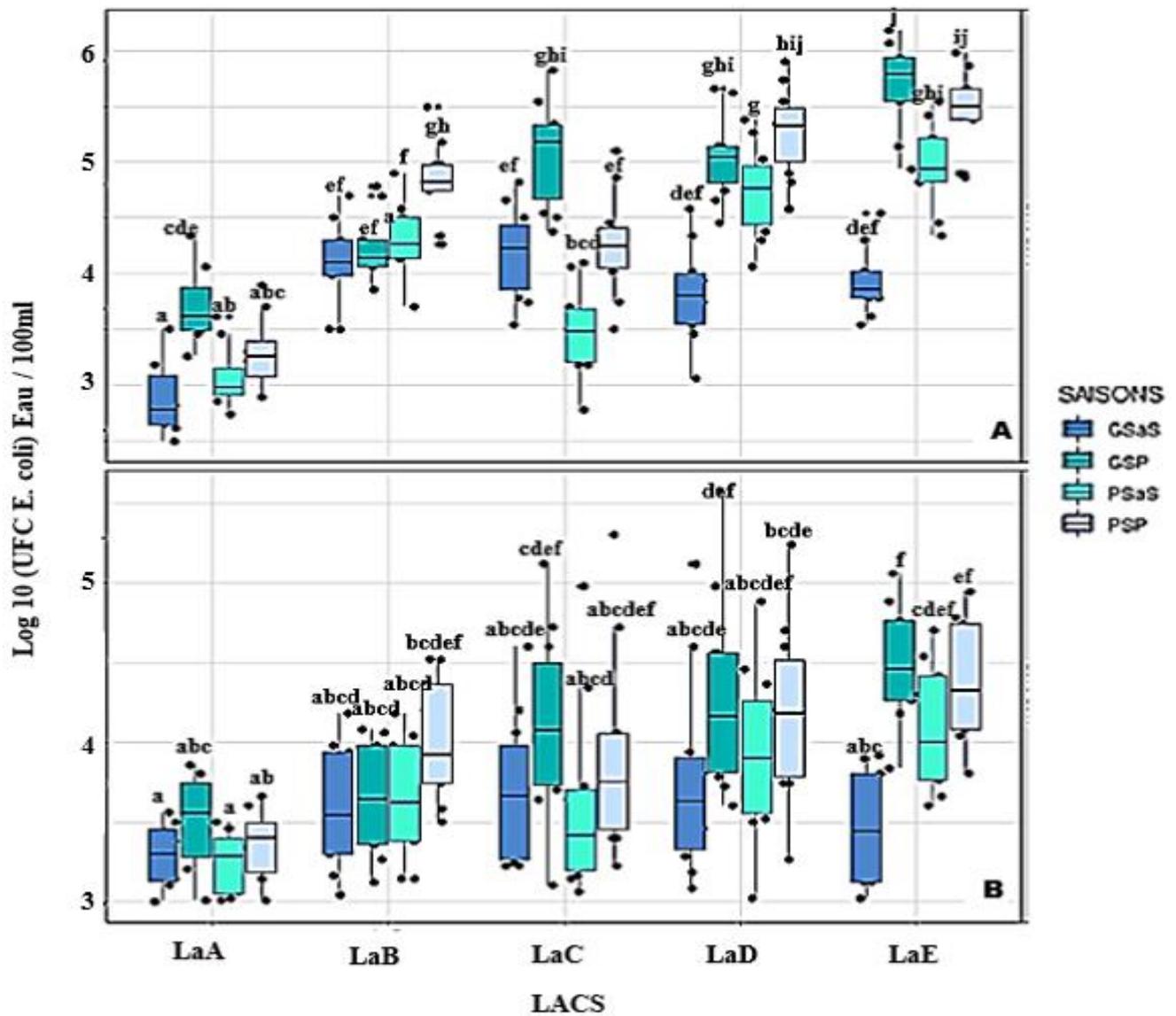


Figure 24. Dynamique des coliformes thermotolérants dans les différents lacs étudiés aux différentes saisons climatiques des années 2015/2016 (A) et 2016/2017 (B)

GSaS : Grande saison sèche GSP : Grande saison des pluies PSaS : Petite saison sèche PSP : Petite saison des pluies C.Th : Coliformes thermotolérants

(Les box portant les mêmes lettres ne sont pas différents significativement selon le test PPDS de Fischer au seuil 5 %)



**Figure 25. Dynamique des *E. coli* dans les différents lacs étudiés aux différentes saisons climatiques des années 2015/2016 (A) et 2016/2017 (B)**

*GSaS* : Grande saison sèche    *GSP* : Grande saison des pluies    *PSaS* : Petite saison sèche    *PSP* : Petite saison des pluies    *C.Th* : Coliformes thermotolérants

(Les box portant les mêmes lettres ne sont pas différents significativement selon le test PPDS de Fischer au seuil 5 %)

## **10.2.2. Niveaux de contamination des légumes cultivés aux abords des lacs par l'évaluation des charges moyennes en coliformes thermotolérants et *E. coli* au cours des saisons climatiques des années 2015-2016 et 2016-2017**

### **10.2.2.1. Niveau de contamination des carottes au cours des saisons climatiques des années 2015-2016 et 2016-2017**

Les charges en coliformes thermotolérants les plus basses ont été retrouvées au Lac A. Les carottes cultivées dans les périmètres du lac A ont présenté les plus faibles charges bactériennes en coliformes thermotolérants et celles cultivées au lac E ont montrés les plus fortes charges bactériennes en coliformes thermotolérants et en *E. coli*. (**Figure 26&27**).

Concernant les saisons climatiques, dans l'ensemble des lacs, les charges bactériennes ont été plus élevée pendant les Saisons sèches et plus faibles pendant les Saisons des pluies.

Les Lac A et B, en amont du système lacustre, ont présentés les plus fortes valeurs pendant les Petites saisons sèches (PSaS) que ce soit pour les coliformes thermotolérants [respectivement 3.913 log<sub>10</sub>. UFC/100ml et 3.873 log<sub>10</sub>. UFC/100ml], que pour les *E. coli*. Les Lac C et Lac D au centre du système lacustre, ont présenté des charges bactériennes plus élevées pendant les Grandes Saisons sèches (GSaS). Concernant le lac E, les charges en coliformes thermotolérants ont été plus hautes pendant les Saisons Sèches et ont considérablement baissées au cours des Saisons de Pluies. Les charges les plus importantes ont été notées pendant les Petites Saisons Sèches (PSaS) des deux années d'étude [4.473 log<sub>10</sub>. UFC/100ml en 2015-2016 et 4.423 log<sub>10</sub>. UFC/100ml en 2016-2017] (**Figure 26&27**).

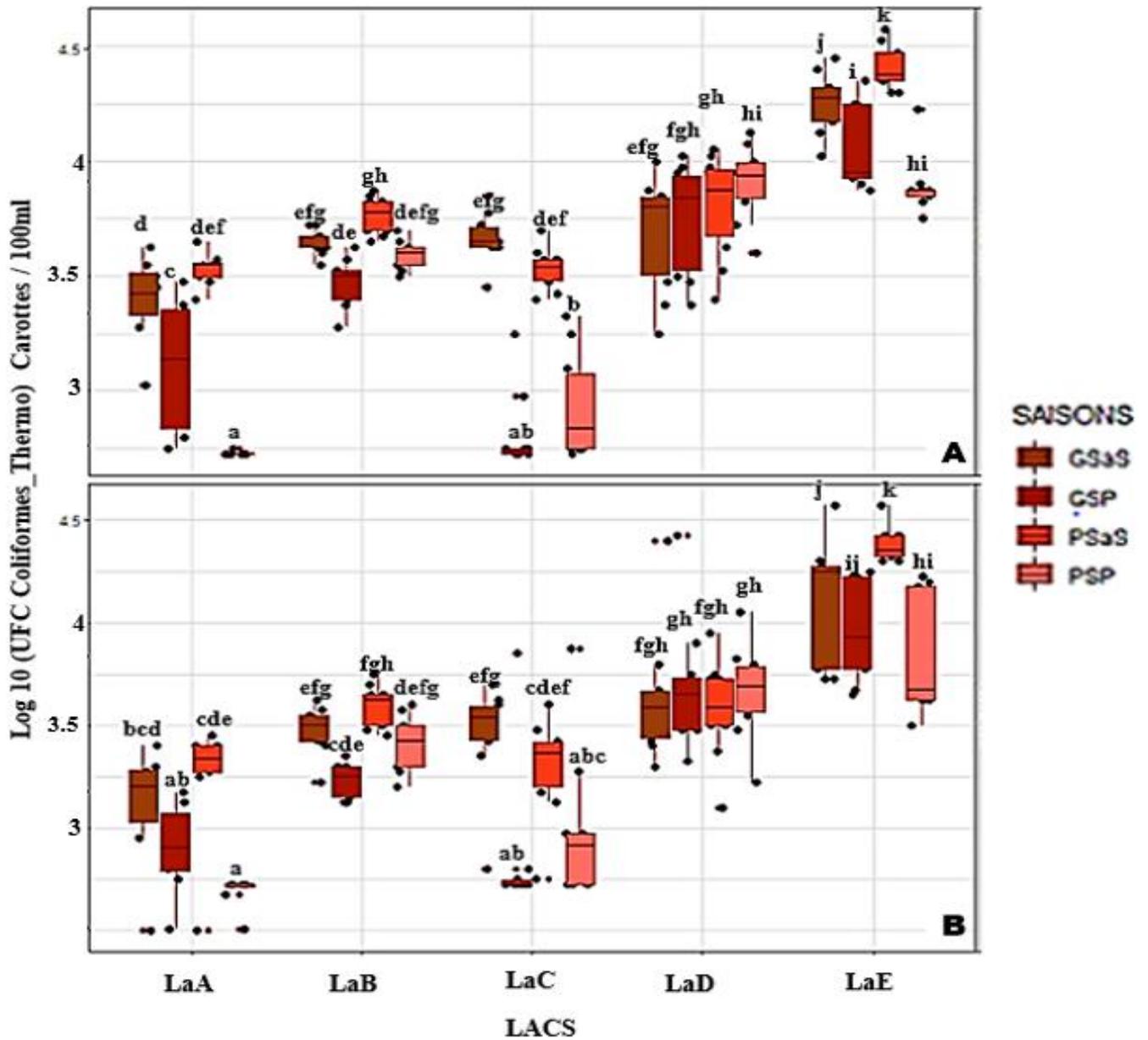
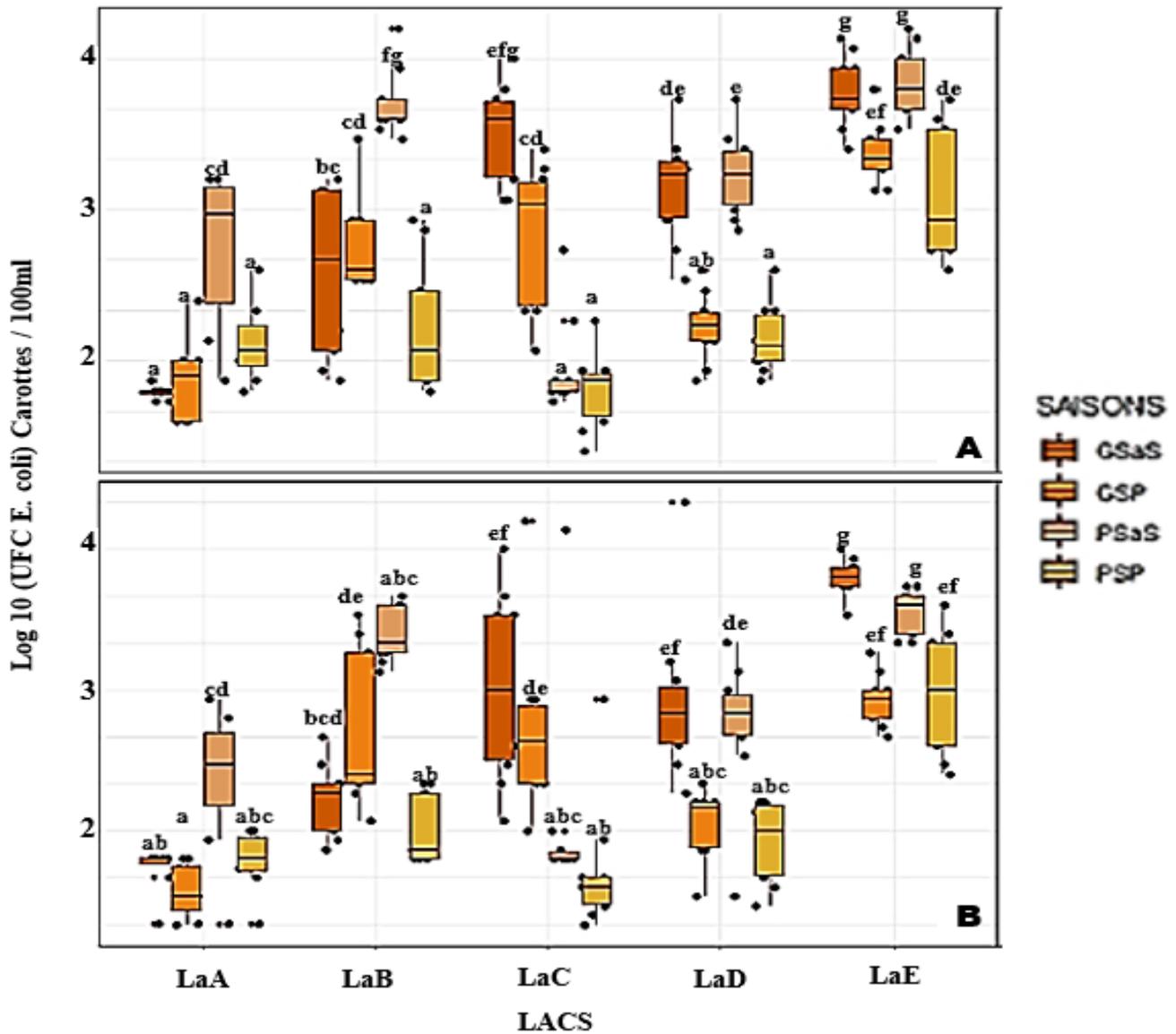


Figure 26. Charges moyennes de coliformes thermotolérants sur les carottes dans l'ensemble des lacs étudiés aux différentes saisons d'échantillonnages des années 2015/2016 (A) et 2016/2017 (B)

GSaS : Grande saison sèche    GSP : Grande saison des pluies    PSaS : Petite saison sèche    PSP : Petite saison des pluies  
 C.Th : Coliformes thermotolérants. (Les box portant les mêmes lettres ne sont pas différents significativement selon le test PPDS de Fischer au seuil 5 %)



**Figure 27. Charges moyennes de *E. coli* sur les carottes dans l'ensemble des lacs étudiés aux différentes saisons d'échantillonnages des années 2015/2016 (A) et 2016/2017 (B)**

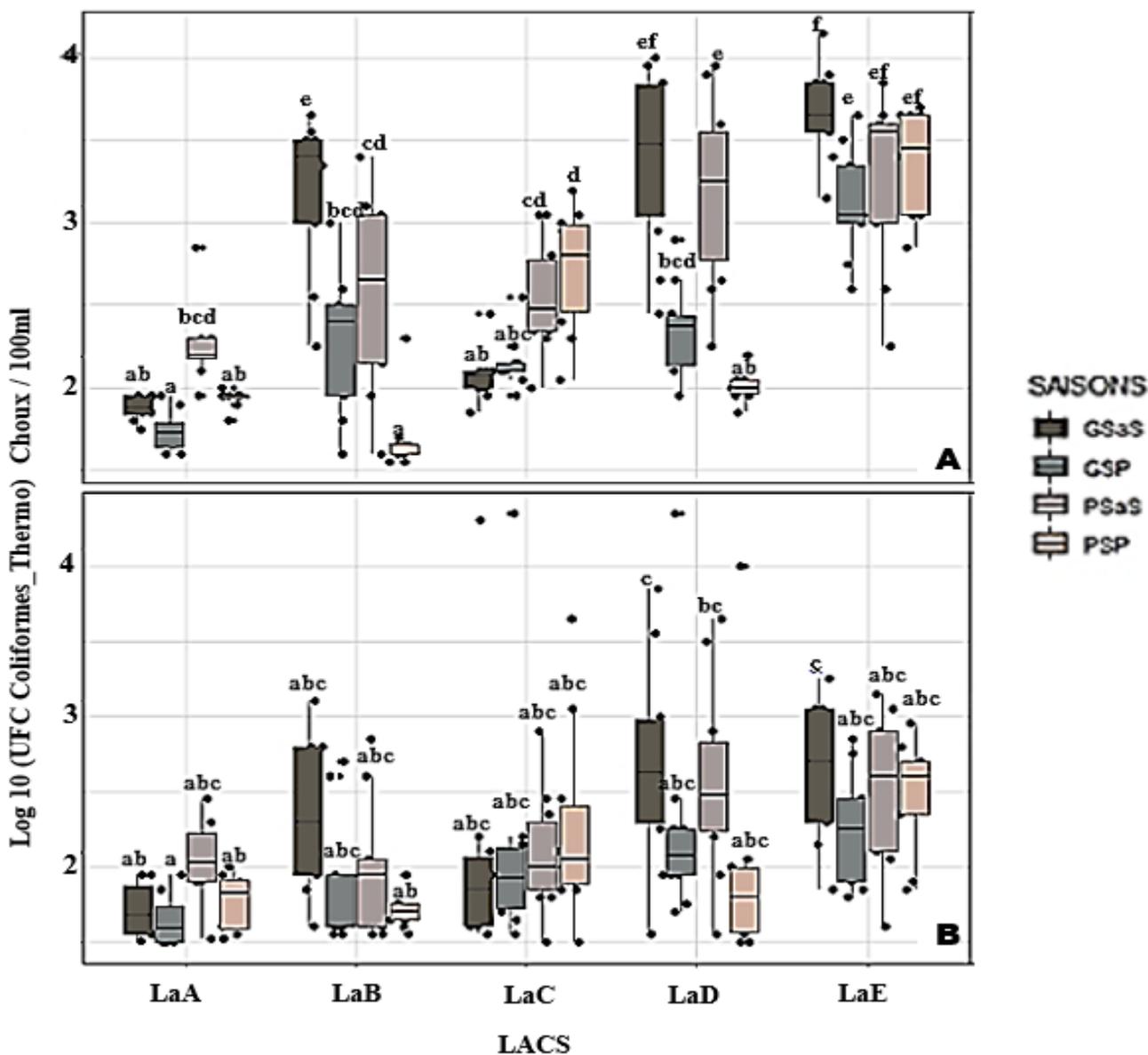
*GSaS* : Grande saison sèche    *GSP* : Grande saison des pluies    *PSaS* : Petite saison sèche    *PSP* : Petite saison des pluies    *C.Th* : Coliformes thermotolérants

(Les box portant les mêmes lettres ne sont pas différents significativement selon le test PPDS de Fischer au seuil 5 %)

#### 10.2.2.2. Niveau de contamination des choux au cours des saisons climatiques des années 2015-2016 et 2016-2017

Sur les choux, les charges des coliformes thermotolérants et des *E. coli* ont présentés des allures différentes d'un lac à l'autre. Néanmoins, le Lac A a présenté les plus faibles valeurs. (**Figure 28&29**).

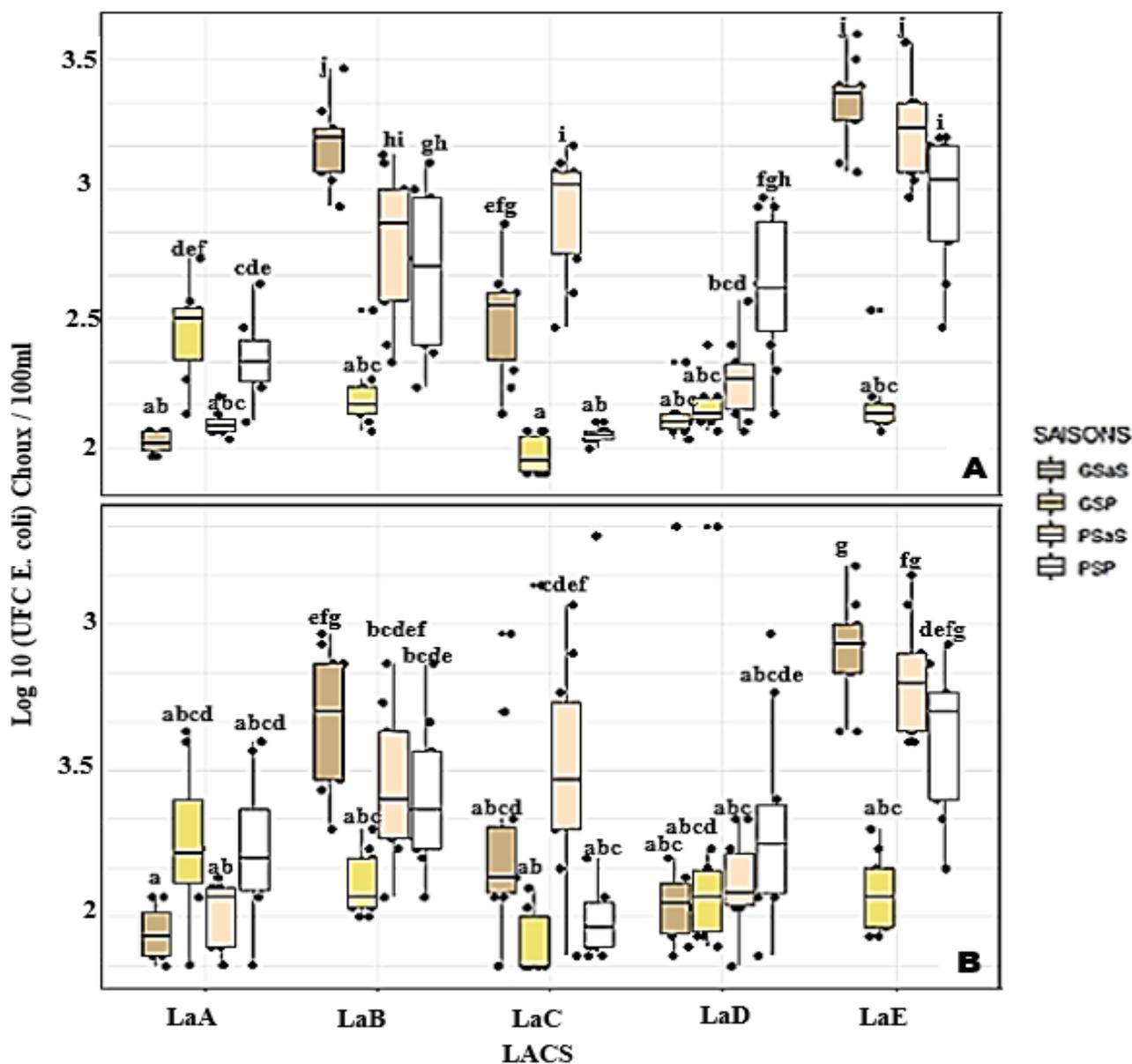
Les charges bactériennes ont considérablement augmentés pendant les Saisons sèches et ont été basses au cours des Saisons de Pluies (**Figure 28&29**). Le lac A a présenté les plus faibles charges bactériennes en coliformes thermotolérants pendant les Grandes Saisons Pluvieuses. Dans le Lac C, par contre, les charges bactériennes en coliformes thermotolérants ont évolués d'une saison à une autre suivant l'évolution des saisons climatiques ivoiriennes. Ce phénomène a été observé au lac D chez les *E. coli*. Les charges bactériennes les plus élevées ont été enregistrées dans le lac E pour les coliformes thermotolérants pendant les Grandes Saisons Sèches (GSaS) de la période des deux années et pour les *E. coli*, pendant les Grandes Saisons Sèches et Grandes Saisons de Pluies (**Figure 28&29**).



**Figure 28. Charges moyennes de coliformes thermotolérants sur les choux dans l'ensemble des lacs étudiés aux différentes saisons climatiques des années 2015/2016 (A) et 2016/2017 (B)**

*GSaS : Grande saison sèche GSP : Grande saison des pluies PSaS : Petite saison sèche PSP : Petite saison des pluies C.Th : Coliformes thermotolérants*

*(Les box portant les mêmes lettres ne sont pas différents significativement selon le test PPDS de Fischer au seuil 5 %)*



**Figure 29. Charges moyennes de *E. coli* sur les choux dans l'ensemble des lacs étudiés aux différentes saisons climatiques des années 2015/2016 (A) et 2016/2017(B)**

*GSaS* : Grande saison sèche    *GSP* : Grande saison des pluies    *PSaS* : Petite saison sèche    *PSP* : Petite saison des pluies    *C.Th* : Coliformes thermotolérants

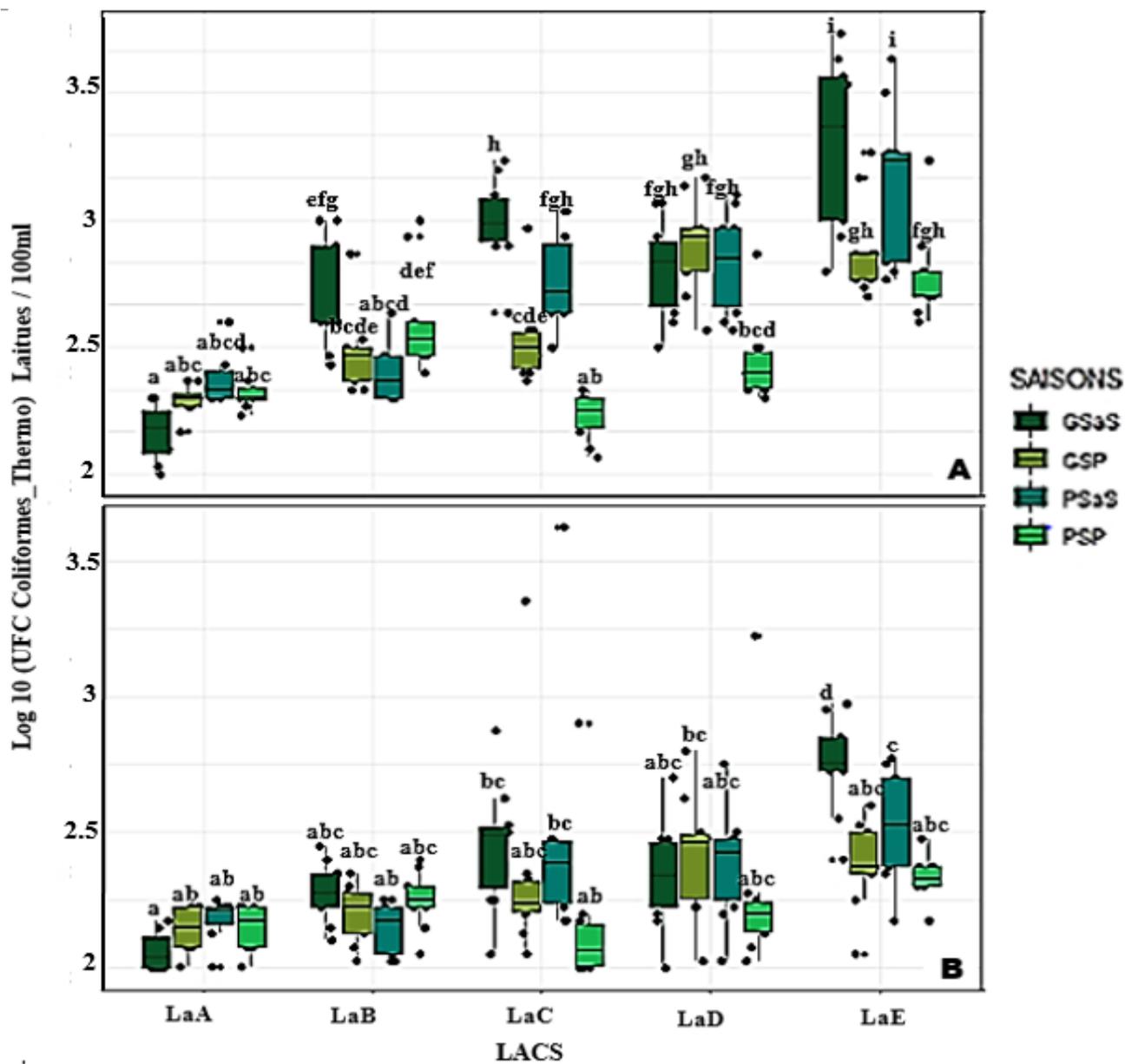
(Les box portant les mêmes lettres ne sont pas différents significativement selon le test PPDS de Fischer au seuil 5 %)

### 10.2.2.3. Niveau de contamination des laitues au cours des saisons climatiques des années 2015-2016 et 2016-2017

Le Lac A a présenté les charges bactériennes en coliformes thermotolérants et en *E. coli* les plus faibles quel que soit la saison ou l'année d'étude. Les Lac C et Lac D au centre du système lacustre, ont présenté des charges bactériennes plus élevées que celles des Lacs A et B en amont du système lacustre. Les deux lacs (C et D) ont présenté des allures différentes dans leur évolution. Les charges bactériennes en coliformes thermotolérants les plus élevées ont été enregistrées dans le Lac E

L'évaluation du niveau de contamination bactérienne des laitues cultivées aux abords des lacs a montré que, les charges bactériennes en coliformes thermotolérants et *E. coli*, ont été les plus élevées pendant les Saisons sèches et ont baissé au cours des Saisons de Pluies pendant les deux années d'étude (**Figure 30&31**). Dans le Lac B, les Petites Saisons Sèches (PSaS) et de Pluies (PSP) ont présenté une décroissance des charges pour les coliformes thermotolérants en 2015-2016. Néanmoins, dans ce lac, les charges ont été plus élevées pendant les Grandes Saisons Sèches (GSaS) et plus faibles pendant Grandes Saisons de Pluies (GSP) comme remarqué précédemment.

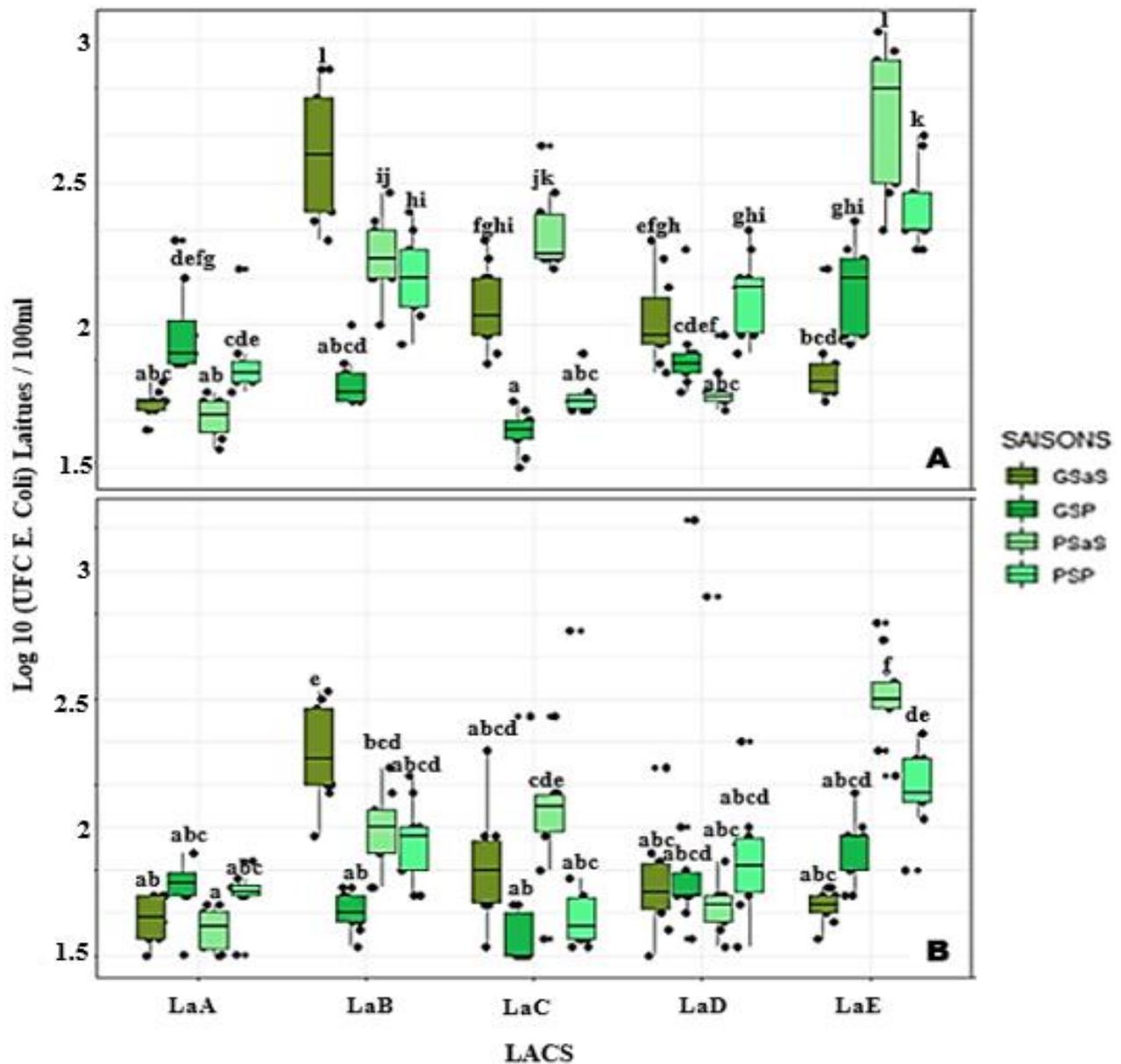
Les pics des coliformes thermotolérants ont été observés pendant la petite saison sèche (PSaS) et la Grande Saison Sèche (GSaS) dans le Lac E, les deux années étudiées (**Figure 30**) et les pics de *E. coli* pendant la Grande Saison Sèche (GSaS) du Lac C et la Petite Saison Sèche (PSaS) du le Lac E au cours des deux années d'études (**Figure 31**).



**Figure 30. Charges moyennes de coliformes thermotolérants sur les laitues des différents lacs étudiés aux différentes saisons climatiques des années 2015/2016 (A) et 2016/2017 (B)**

*GSaS : Grande saison sèche    GSP : Grande saison des pluies    PSaS : Petite saison sèche    PSP : Petite saison des pluies    C.Th : Coliformes thermotolérants*

*(Les box portant les mêmes lettres ne sont pas différents significativement selon le test PPDS de Fischer au seuil 5 %)*



**Figure 31. Charges moyennes de *E. coli* sur les laitues des différents lacs étudiés aux différentes saisons climatiques des années 2015/2016 (A) et 2016/2017 (B)**

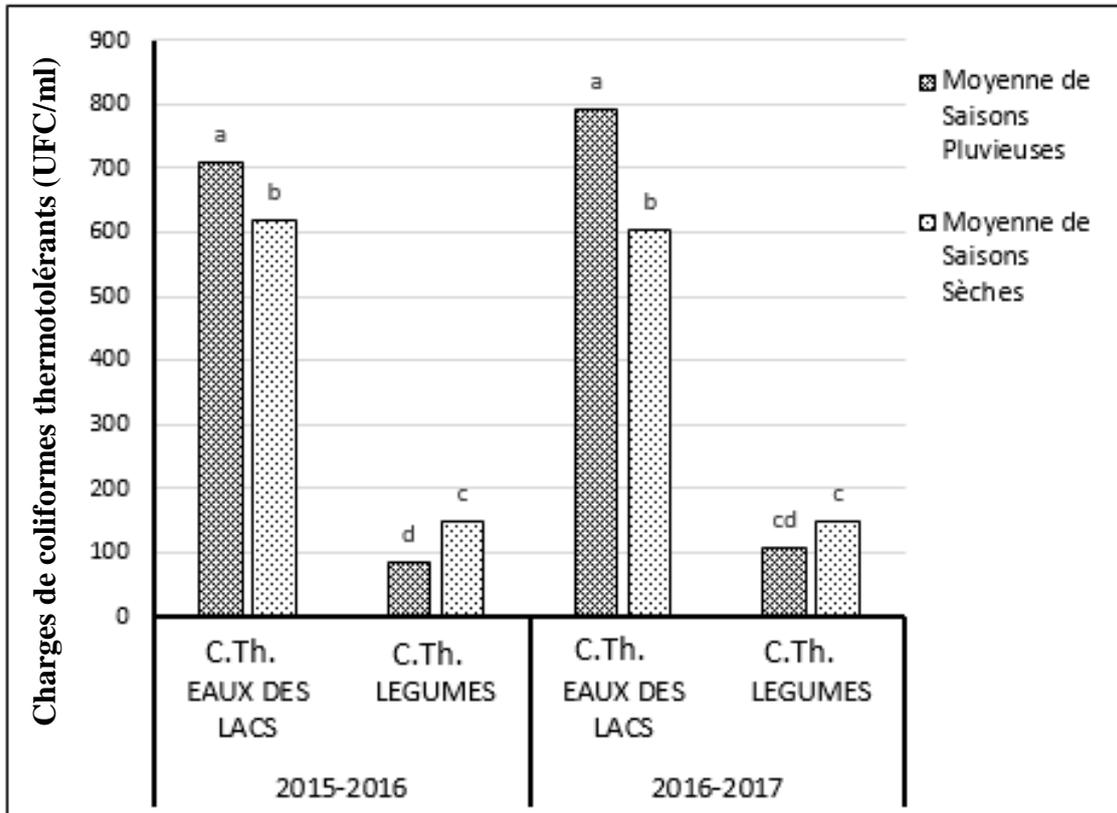
*GSaS* : Grande saison sèche    *GSP* : Grande saison des pluies    *PSaS* : Petite saison sèche    *PSP* : Petite saison des pluies    *C.Th* : Coliformes thermotolérants

(Les box portant les mêmes lettres ne sont pas différents significativement selon le test PPDS de Fischer au seuil 5 %)

### **10.3. Evolution de la pollution bactérienne des eaux lacustres et corrélation avec la qualité des légumes**

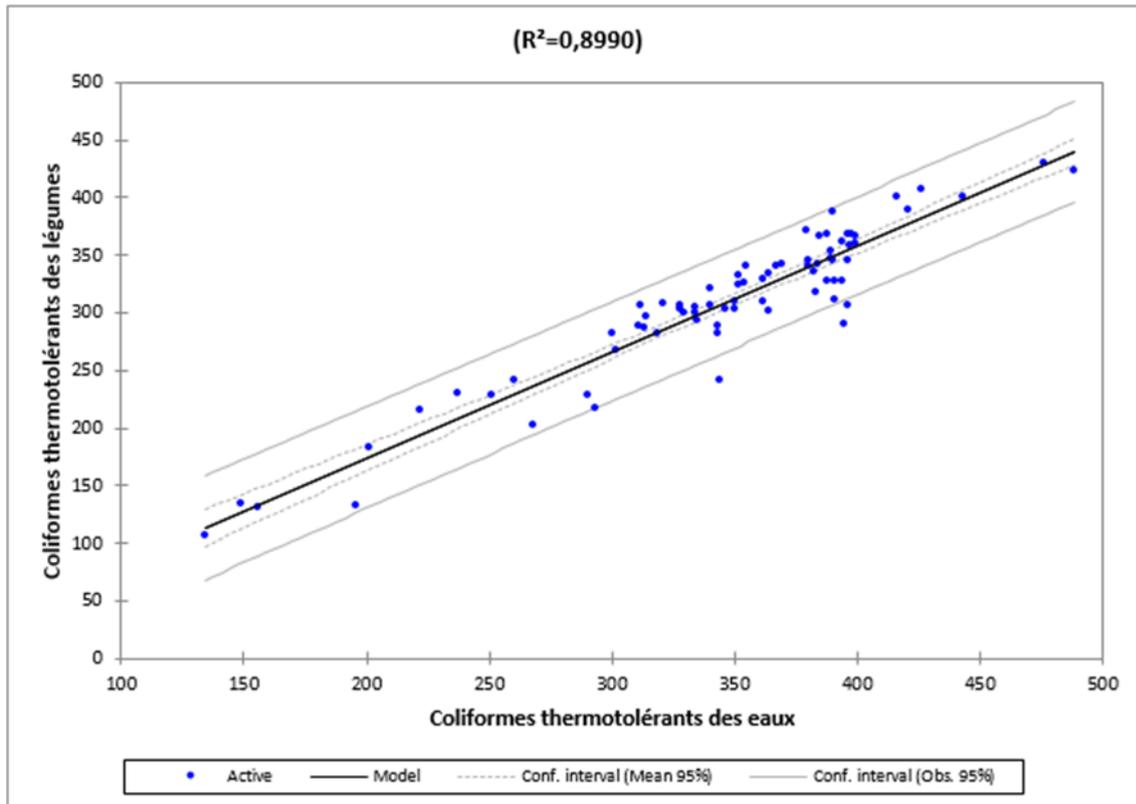
Les plus fortes charges en coliformes thermotolérants de légumes ont été trouvées près des lacs à fortes charges bactériennes. Aussi, une comparaison des charges en coliformes thermotolérants en Saisons Pluvieuses et en Saisons Sèches a été réalisée à la fois dans les lacs que sur les légumes. Il est apparu que les charges bactériennes de l'eau étaient plus importantes pendant la Saison des Pluies et plus faibles pendant la Saison Sèche, alors que les résultats inverses ont été observés sur les légumes où les charges en coliformes thermotolérants étaient plus importantes pendant la Saison Sèche et plus faibles pendant la Saison des Pluies (**Figure 32**).

Afin de vérifier l'impact de la contamination des lacs (eaux utilisées pour l'arrosage) sur celle des légumes cultivés à leurs abords, il a été réalisé une droite de régression linéaire entre les charges bactériennes en coliformes thermotolérants des légumes sur celles des lacs. En effet, seuls les coliformes thermotolérants dont les *E. coli* font parties, ont été considérés dans un but non répétitif. Ainsi, il a été obtenu que les charges bactériennes moyennes en coliformes thermotolérants des cultures maraichères varient proportionnellement avec les charges moyennes en coliformes thermotolérants des eaux des lacs avec une corrélation positive élevée ( $R^2 = 0,8990$ ) (**Figure 33**).



**Figure 32. Evolution des charges bactériennes moyennes en coliformes thermotolérants des légumes en fonction de celle des eaux des lacs**

*C.Th* : Coliformes thermotolérants ; Les histogrammes portant les mêmes lettres ne sont pas différents significativement selon le test PPDS de Fischer au seuil 5 %)



**Figure 33 : Linéarité entre les charges moyennes en coliformes thermotolérants des légumes et les charges moyennes en coliformes thermotolérants des eaux ( $R^2=0.8990$ )**

#### 10.4. Influence des paramètres physicochimiques sur les bactéries (coliformes thermotolérants et les *E. coli*) au cours de l'année 2015-2016

##### 10.4.1. Vérification de la faisabilité de l'ACP par l'évaluation des indices de KMO et test d'homoscédasticité des variances de Bartlett en 2015-2016.

L'indice de KMO (Kaiser, Meyer et Olkin) étant proche de 1 (0,7744), l'adéquation entre l'échantillonnage avec la faisabilité de l'ACP est satisfaisante (**Tableau XXII**).

Le test de Bartlett ( $p < 0,0001$ ) a permis de vérifier l'égalité des variances entre les variables physicochimiques et bactériologiques et les niveaux de facteurs.

Les relations entre variables sont significatives et justifient l'usage de l'ACP (**Tableau XXIII**). Les conditions pour l'ACP, pour l'ensemble des paramètres ont été respectées (**Tableau XXII & Tableau XXIII**).

**Tableau XXII: Mesure de précision de l'échantillonnage de Kaiser-Meyer-Olkin :**

C.Th.	0,8368
<i>E. coli</i>	0,7713
Ph	0,7473
Turb	0,7639
O <sub>2</sub>	0,7477
T°C	0,5336
COD	0,8202
<b>KMO</b>	<b>0,7744</b>

**Tableau XXIII. Vérification de la faisabilité de l'ACP par le test de sphéricité de Bartlett :**

Khi <sup>2</sup> (Valeur observée)	115,4989
Khi <sup>2</sup> (Valeur critique)	32,6706
DDL	321
<b>p-value</b>	<b>&lt; 0,0001</b>
alpha	0,05

#### 10.4.2. Influence des paramètres physico-chimiques des eaux sur les coliformes thermotolérants et les *E. coli* au cours de l'année 2015-2016 par l'usage de l'ACP

L'analyse en composantes principales, réalisée à partir des propriétés physico-chimiques des eaux des cinq lacs étudiés à Yamoussoukro, a abouti aux résultats mentionnés ci-après.

L'éboullis des valeurs propres (**Figure 34.A**) a permis de retenir deux facteurs F1 et F2 pour l'interprétation des résultats. Ces facteurs ont permis d'expliquer respectivement 50,12 et 13,74 % d'où un total de 63,86 % des informations.

La projection des variables (**Figure 34.B**), des observations (**Figure 34.C**) et des deux (**Figure 34.D**) dans le plan factoriel F1-F2 a permis de déceler quelques relations entre les variables et les observations.

En tenant compte de la contribution de chaque observation à l'inertie de l'axe F1, toutes les observations à savoir tous les lacs (Lac A, Lac B, Lac C, Lac D et Lac E), ont été représentés (**Figure 34.C**).

Les contributions des variables à l'inertie de l'axe F1 ont révélé que les variables les mieux représentées ont été les teneurs en matière organique (COD), la turbidité, l'oxygène dissous (OD), la température ( $T^\circ$ ), le pH et les variables bactériologiques notamment les coliformes thermotolérants et les *E. coli* (**Figure 34.B**).

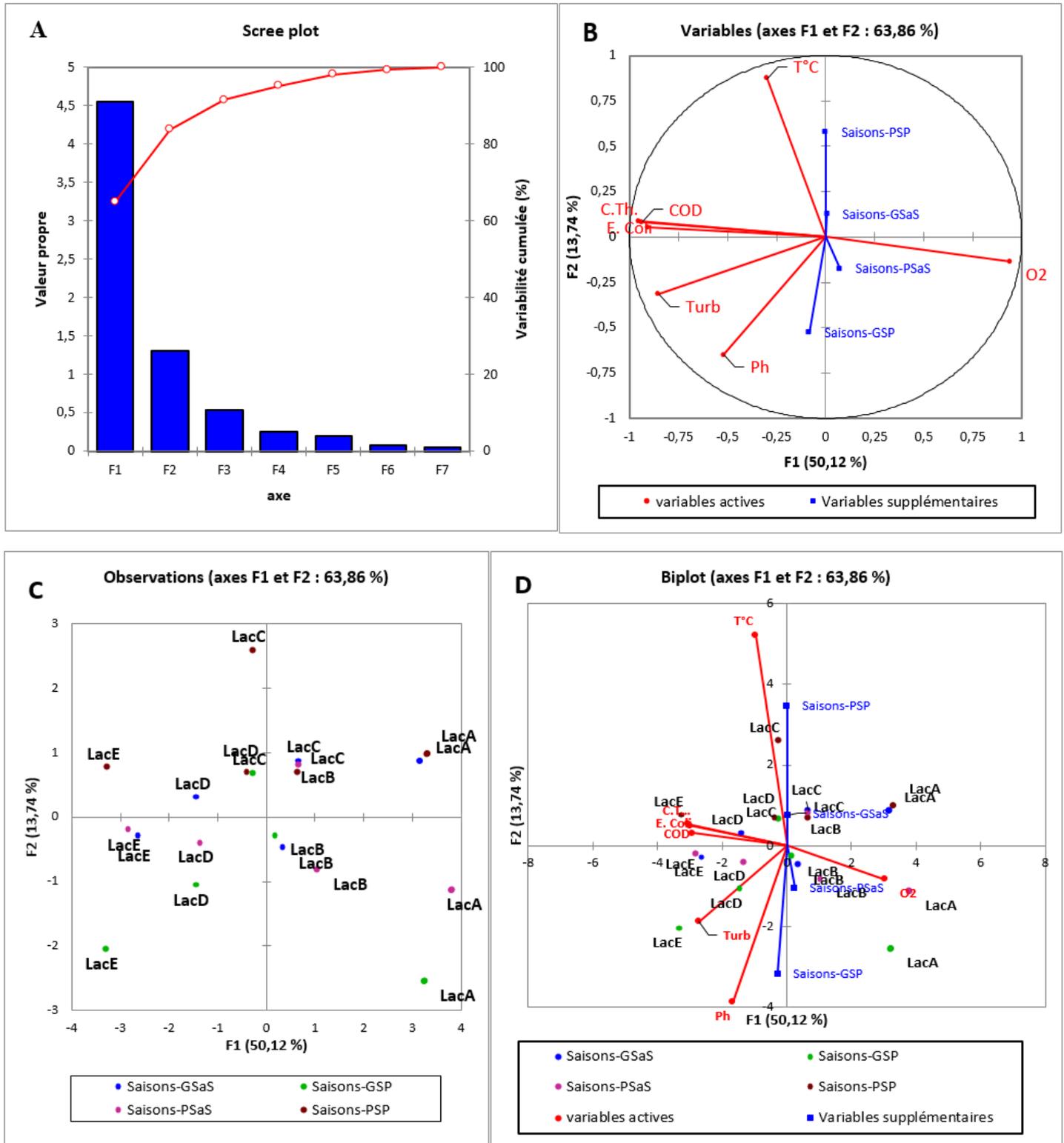
Enfin, en considérant les coordonnées des observations et des variables dans le plan factoriel F1-F2, l'axe F1 isole dans sa partie négative toutes les variables hormis l'oxygène dissous (OD) (**Figure 34.D**).

L'Analyse en Composante Principale (ACP) (**Figure 34**) a montré que l'oxygène dissous ( $O_2$ ) a été corrélé négativement aux variables bactériologiques (coliformes thermotolérants et *E. coli*), à la matière organique (MO) et à la Turbidité.

Les variables bactériologiques (coliformes thermotolérants et *E. coli*), la matière organique (MO) et la Turbidité ont été corrélées positivement.

Quant à la température ( $T^\circ$ ) et au pH, ils ont été éloignés des autres variables.

Les résultats des charges bactériennes globales dans les lacs ont été similaires à ceux décrits dans les résultats de la dynamique bactérienne des coliformes thermotolérants et des *E. coli* (Chapitre 11.2). En effet, les charges bactériennes ont été faibles dans le Lac A et plus abondantes dans le Lac E (**Figure 34**).



**Figure 34.** Analyse en composantes principales des paramètres physico-chimiques et des coliformes thermotolérants dans les cinq lacs étudiés pendant l'année 2015-2016 (axes F1 et F2 : 65,87 %), *A* : Valeurs propres ; *B* : Figure Variables ; *C* : Figure Observations ; *D* : Biplot

#### **10.4.3. Corrélation entre les paramètres physicochimiques et les charges bactériennes en coliformes thermotolérants des lacs en 2015-2016**

La matrice des corrélations de Pearson (**Tableau XXIV**) a révélé des corrélations significatives entre les paramètres bactériologiques eux même et entre les paramètres bactériologiques et quelques paramètres physicochimiques.

En effet les corrélations entre les coliformes thermotolérants et les *E. coli* se sont élevés à (R=0,8995).

Concernant les paramètres physicochimiques, la matière organique (COD) a partagé les plus fortes corrélations avec les coliformes thermotolérants (R=0,879) et les *E. coli* (R=0,783). Elle a également été corrélé positivement à la turbidité (R=0,702) et négativement à l'Oxygène dissous (R=-0,929).

L'Oxygène Dissous a partagé des corrélations négatives avec les coliformes thermotolérants (R=-0,852) et les *E. coli* (R=-0,779) ainsi qu'avec la turbidité (R=-0,747) et le COD.

La turbidité a partagé des corrélations positives avec les coliformes thermotolérants (R=0,74) et les *E. coli* (R=0,771) ainsi que le pH (R=0,515), le COD et l'OD.

La température n'a partagé aucune corrélation avec aucune des variables étudiées.

**Tableau XXIV. Corrélation de Pearson (n) entre les coliformes thermotolérants et les paramètres physico-chimiques des lacs au cours de l'année 2015-2016**

Variables	C.Th.	<i>E. coli</i>	Ph	Turb	OD	T°C	COD
C.Th.	<b>1</b>	<b>0,8995</b>	0,4095	<b>0,7407</b>	<b>-0,8520</b>	0,3273	<b>0,8794</b>
<i>E. coli</i>		<b>1</b>	0,3377	<b>0,7718</b>	<b>-0,7792</b>	0,2563	<b>0,7834</b>
Ph			<b>1</b>	<b>0,5159</b>	-0,3874	-0,2120	0,4428
Turb				<b>1</b>	<b>-0,7478</b>	-0,0381	<b>0,7021</b>
O2					<b>1</b>	-0,3796	<b>-0,9291</b>
T°C						<b>1</b>	0,3272
COD							<b>1</b>

*Les valeurs en gras sont différentes de 0 à un niveau de signification alpha=0,05*

## 10.5. Influence des paramètres physicochimiques sur les bactéries (coliformes thermotolérants et les *E. coli*) au cours de l'année 2016-2017

### 10.5.1. Vérification de la faisabilité de l'ACP par l'évaluation des indices de KMO et test d'homoscédasticité des variances de Bartlett

L'indice de KMO (Kaiser, Meyer et Olkin) étant proche de 1 (0,6977), l'adéquation entre l'échantillonnage avec la faisabilité de l'ACP est satisfaisante (**Tableau XXV**).

Le test de Bartlett ( $p < 0,0001$ ) a permis de vérifier l'égalité des variances entre les variables physicochimiques et bactériologiques et les niveaux de facteurs.

Les relations entre variables sont significatives et justifient l'usage de l'ACP (**Tableau XXVI**). Les conditions pour l'ACP, pour l'ensemble des paramètres sont respectées (**Tableau XXV ; Tableau XXVI**).

**Tableau XXV. Mesure de précision de l'échantillonnage de Kaiser-Meyer-Olkin**

C.Th.	0,8800
<i>E. coli</i>	0,6638
Ph	0,5656
Turb	0,7695
O2	0,7987
T°C	0,3585
COD	0,6452
<b>KMO</b>	<b>0,6977</b>

**Tableau XXVI. Vérification de la faisabilité de l'ACP par le test de sphéricité de Bartlett**

Khi <sup>2</sup> (Valeur observée)	145,9695
Khi <sup>2</sup> (Valeur critique)	32,6706
DDL	321
<b>p-value</b>	<b>&lt; 0,0001</b>
alpha	0,05

### 10.5.2. Influence des paramètres physico-chimiques des eaux sur les coliformes thermotolérants et les *E. coli* au cours de l'année 2016-2017

L'analyse en composantes principales, réalisée à partir des paramètres physico-chimiques des eaux des cinq lacs étudiés à Yamoussoukro, a abouti aux résultats suivants.

L'éboullis des valeurs propres (**Figure 35.A**) a permis de retenir deux facteurs F1 et F2 pour l'interprétation des résultats. Ces facteurs permettent d'expliquer respectivement 53,42 et 12,34 % d'où un total de 65,76 % des informations.

En tenant compte de la contribution de chaque observation à l'inertie de l'axe F1, toutes les observations à savoir tous les lacs (Lac A, Lac B, Lac C, Lac D et Lac E), ont été représentés (**Figure 35.C**).

Les contributions des variables à l'inertie de l'axe F1 ont révélé que toutes les variables ont été représentées [(COD), turbidité, oxygène dissous (OD), température (T°), pH et les variables bactériologiques notamment les coliformes thermotolérants et les *E. coli*] (**Figure 35.B**).

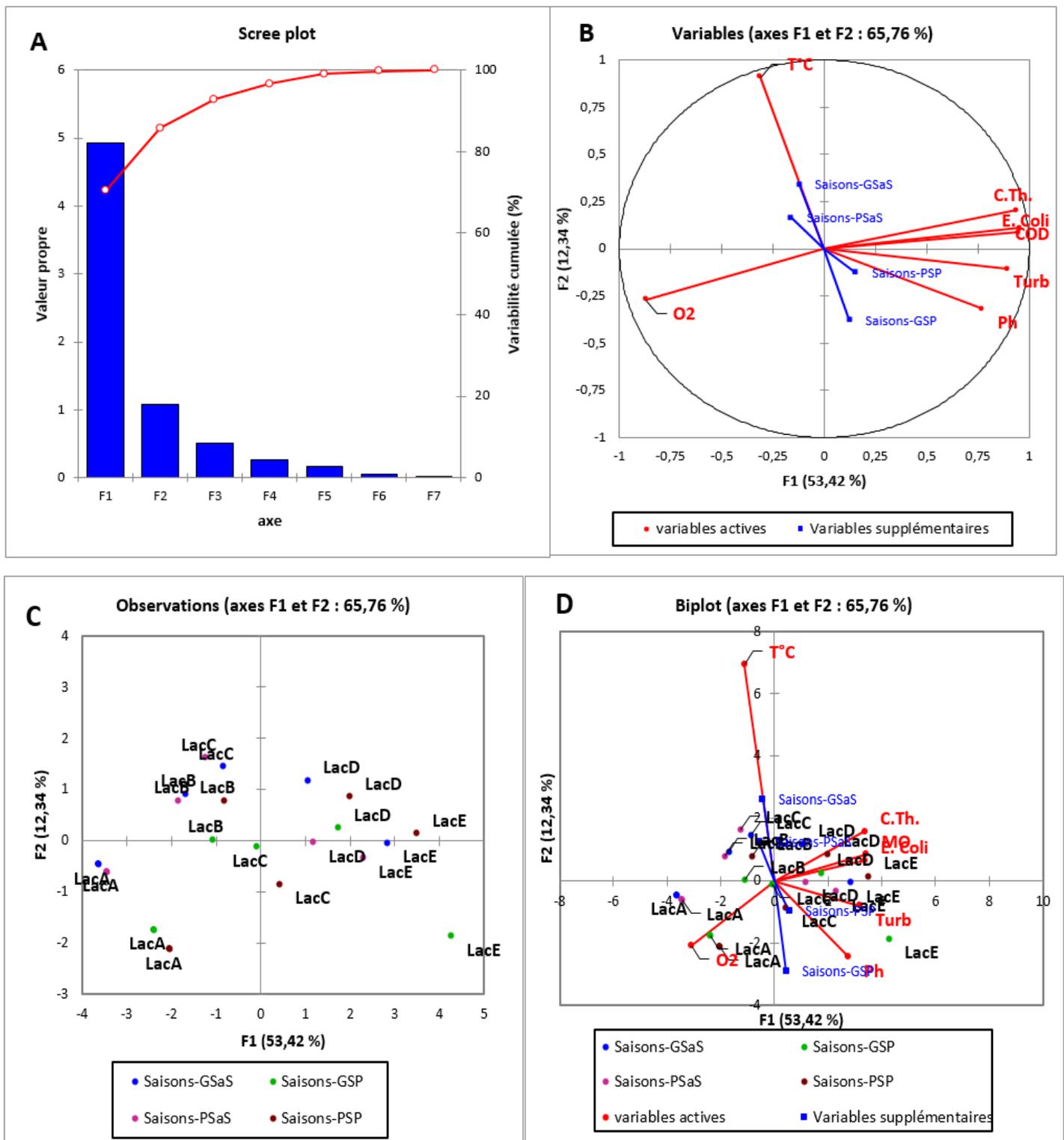
Enfin, en considérant les coordonnées des observations et des variables dans le plan factoriel F1-F2, l'axe F1 isole dans sa partie positive toutes les variables hormis l'oxygène dissous (OD) et la température (**Figure 35.D**).

L'Analyse en Composante Principale (ACP) (**Figure 35**) a montré que l'oxygène dissous(O<sub>2</sub>) a été corrélé négativement aux variables bactériologiques (coliformes thermotolérants et *E. coli*), à la matière organique (MO) et à la Turbidité.

Les variables bactériologiques (coliformes thermotolérants et *E. coli*), la matière organique (MO) et la Turbidité ont été corrélées positivement. Elles ont aussi été faiblement corrélées au pH.

Quant à la température (T°), elle a été éloignée des autres variables.

Les résultats des charges bactériennes globales dans les lacs ont été similaires à ceux décrits dans les résultats de la dynamique bactérienne des coliformes thermotolérants et des *E. coli* (Chapitre 11.2). En effet, les charges bactériennes ont été faibles dans le Lac A et plus abondantes dans le Lac E (**Figure 35**).



**Figure 35. Analyse en composantes principales des paramètres physico-chimiques et des populations des bactérienne dans les cinq lacs étudiés pendant l'année 2016-2017 (axes F1 et F2 : 70,60 %),**

*A : Valeurs propres ; B : Figure Variables ; C : Figure Observations ; D : Biplot*

### **10.5.3. Corrélation entre les paramètres physicochimiques et les charges bactériennes en coliformes thermotolérants des lacs en 2016-2017**

La matrice des corrélations de Pearson (**Tableau XXVII**) a révélé des corrélations significatives entre les paramètres bactériologiques eux même et entre les paramètres bactériologiques et quelques paramètres physicochimiques.

En effet les corrélations entre les coliformes thermotolérants et les *E. coli* se sont élevés à ( $R=0,93$ ).

Concernant les paramètres physicochimiques, la matière organique (COD) a partagé les plus fortes corrélations avec les coliformes thermotolérants ( $R=0,909$ ) et les *E. coli* ( $R=0,921$ ). Elle a également été corrélé positivement avec la turbidité ( $R=0,843$ ) et le pH ( $R=0,583$ ) et négativement avec l'Oxygène dissous ( $R=-0,862$ ).

L'Oxygène Dissous a partagé des corrélations négatives avec les coliformes thermotolérants ( $R=-0,847$ ) et les *E. coli* ( $R=-0,75$ ) ainsi qu'avec la turbidité ( $R=-0,769$ ) et le COD.

La turbidité a partagé des corrélations positives avec les coliformes thermotolérants ( $R=0,74$ ) et les *E. coli* ( $R=0,752$ ) ainsi que le pH ( $R=0,655$ ), le COD et l'OD.

La température n'a partagé aucune corrélation avec aucune des variables étudiées.

**Tableau XXVII. Corrélation de Pearson (n) entre les coliformes thermotolérants et les paramètres physico-chimiques des lacs au cours de l'année 2016-2017**

Variables	C.Th.	<i>E. coli</i>	Ph	Turb	O2	T°C	COD
C.Th.	<b>1</b>	<b>0,9305</b>	<b>0,6723</b>	<b>0,7407</b>	<b>-0,8477</b>	-0,1167	<b>0,9093</b>
<i>E. coli</i>		<b>1</b>	<b>0,7511</b>	<b>0,7520</b>	<b>-0,7501</b>	-0,1958	<b>0,9219</b>
Ph			<b>1</b>	<b>0,6557</b>	-0,4795	-0,3915	<b>0,5835</b>
Turb				<b>1</b>	<b>-0,7695</b>	-0,3534	<b>0,8431</b>
O2					<b>1</b>	0,0935	<b>-0,8629</b>
T°C						<b>1</b>	-0,2452
COD							<b>1</b>

*Les valeurs en gras sont différentes de 0 à un niveau de signification alpha=0,05*

## 10.6. Discussion

Notre étude dans les lacs de Yamoussoukro a été réalisée pour apporter des explications à la dynamique des charges bactériennes en coliformes thermotolérants d'une part et évaluer les risques sanitaires liés à l'irrigation des cultures maraichères par ces eaux d'autres parts. Ces résultats auront pour but de sensibiliser les producteurs et les consommateurs de produits maraichers aux bonnes pratiques afin de se prémunir des risques potentiels pour leurs santé. Pour ce faire l'évolution des charges des coliformes thermotolérants dans les eaux des lacs utilisés pour l'arrosage des cultures et l'analyse de trois cultures environnantes a été suivie suivant la disposition spatiale des lacs et pendant deux ans.

Il découle de l'étude que les charges bactériennes des coliformes thermotolérants et *d'E. coli* des lacs, ont été croissantes selon le gradient d'écoulement des eaux et du facteur spatial des lacs. Dans les eaux des lacs, les charges bactériennes en coliformes thermotolérants, ramenés à 100 ml d'eau, ont été très élevées comparativement aux normes internationales préconisées (OMS, 2016).

Au niveau du Lac A, situé plus en amont du système lacustre, la pollution a été la plus faible suivi du Lac B. Le Lac C et le Lac D ont présenté des charges bactériennes intermédiaires. Le Lac E en aval du système a présenté les charges bactériennes les plus élevées.

Ces résultats ont révélés que dans les lacs de Yamoussoukro, les niveaux de charges bactériennes ont évolués d'amont en aval du système lacustre et ont donc été dépendants du sens d'écoulement des eaux lacustres.

Ces observations sur l'effet de la position spatiale ds lacs ont été similaires à ceux de **Akaninwor et al., (2007)** sur la rivière New Calabar à Rivers au Nigéria. Nonobstant, une pollution ponctuelle des eaux a été remarquée aux Lacs B, D et E pendant les saisons pluvieuses. Ce phénomène pourrait s'expliquer par le fait que des sources de pollutions de ces lacs apportent des charges en polluants, lors des ruissellements occasionnés par les pluies.

Au niveau du lac B, les agriculteurs utilisent les fientes animales en grandes quantité pour la fertilisation de plantes, ajoutée au déversement des ordures aux abords de ce lac (**Tano et al., 2011**). Les pluies entraînent ainsi l'écoulement de ces déchets dans les eaux mais en absence de pluies, elles ne se déversent pas dans le lacs. Or, les fientes animales renferment de grandes quantités de microorganismes (**Dougnon et al., 2014; Mathai et al., 2018**), d'où cette élévation

des charges bactériennes, en saisons pluvieuse, au niveau de ce lac. De plus, le lac B subit une pollution constante par les populations riveraines et la multiplicité de leurs activités pratiquées aux abords. Ce lac est situé dans le quartier le plus peuplé de la ville (**Aw Sadat, 2009**) et renfermant plusieurs activités commerciales (**N'guessan, 2017**).

Au niveau du lac D, pollué en général par les eaux usées, pendant les saisons de pluies, ces eaux se retrouvent en stagnation dans les rues ou les caniveaux en absence de pluies (**Aw et al., 2011**). Les pluies provoquent les débordements de puits perdus et caniveaux ; entraînant fortement ces eaux usées dans les lacs. Il a été remarqué dans ce lac, que les saisons pluvieuses (GSP, PSP) marquent une forte pollution des eaux, due à une influence directe à effet ponctuel de la source de pollution. Néanmoins, le lac D étant le réceptacle du lac B, la pollution dans ce lac a été plus élevée que dans le lac B.

Le lac E étant le réceptacle direct du lac D et de tous les lacs du système lacustre, il a subi ces pollutions, auxquels s'ajoute la pollution engendrée par les déjections des animaux d'élevages aux abords de ce lac E. En général, lorsque des eaux de surface dans une région donnée communiquent, l'étendu d'eau le plus en aval présente les niveaux de polluants les plus élevés (**Menon et al. 2003; Baral et al., 2018**). Ainsi, le lac E qui est le réceptacle de tous les autres lacs a eu de ce fait, le niveau de pollution le plus élevée. Ces observations sur l'effet des sources de contaminations des eaux de surface contaminées ont été similaires à ceux de (**Yehia et Sabae, 2011**) sur le Fleuve Al-Gharraf, au sud de l'Irak.

Les lacs A et C n'ont pas été sujets à ces phénomènes. Néanmoins, dans le lac C, les sources de contaminations n'ont pas eu une très grande influence sur la pollution des eaux. Cependant la proximité du lac C avec le lac D a néanmoins provoqué sa pollution. Ce constat sur l'influence de la proximité des eaux entre elle, a été remarqué par **Gunkel et al., (2007)** au Brésil et **Niewolak, (2015)** en Pologne où il a été accordé une attention particulière à la surveillance et à l'évaluation de la qualité microbiologique des eaux de surfaces.

Concernant les légumes, la moyenne des coliformes thermotolérants et des *E. coli* (environ 200 C.Th. / g) de tous les échantillons ont été significativement supérieure à la moyenne des normes internationales (63 UFC/ g) (**OMS, 2001**). Les résultats obtenus ont indiqué une prédominance plus accrue de microorganismes sur la carotte (en moyenne 207 C.Th. / g), ensuite les choux

(en moyenne 165 C.Th. / g) et enfin les laitues (avec en moyenne 146 C.Th. / g). Ces résultats sont 100 fois plus élevés que les normes. Ils ont été similaires à ceux de **Aw et al. (2011)**, qui a étudié l'abondance relative des groupes phylogénétiques dans les lacs de Yamoussoukro et a attesté que cette abondance bactérienne est plus élevée que les normes en vigueur (**OMS, 2006**).

Par ailleurs, les charges bactériennes en coliformes thermotolérants dans les eaux et sur les légumes ont fluctué en fonction des saisons climatiques et donc du facteur temporel.

Dans les eaux d'arrosages, les charges bactériennes ont été élevées pendant les saisons pluvieuses. Il a quand même été observé une hausse des charges en 2016-2017. Les charges bactériennes sur les légumes ont été plus élevées pendant les saisons sèches. Ainsi, bien que la pollution des lacs ait été plus prononcée pendant les saisons des pluies, la pollution sur les légumes a été plus importante pendant les saisons sèches.

Ces résultats concernant les eaux d'arrosages pourraient s'expliquer par le fait que les charges bactériennes ont été plus élevées pendant les saisons des pluies, en raison des précipitations et des eaux de ruissellement qui ont transporté des matières en suspension. Plusieurs auteurs ont d'ailleurs démontrés l'effet des précipitations sur la pollution bactérienne des eaux de surface (**Naidoo et Olaniran, 2014, Tornevi et al., 2014**).

Cependant, concernant les légumes, il a été remarqué le phénomène inverse. Les précipitations ont plutôt participé au lavage des légumes, des déchets animaux et des eaux usées domestiques occasionnés par la pollution des sites de cultures. Ces résultats ont été similaires à ceux de (**Ribolzi et al., 2011; Pandey et al., 2012; Pandey et Soupir, 2013**).

Pendant les saisons sèches au contraire, des contaminations prononcées des légumes ont été observé. Cela pourrait être, en plus de la pollution des sites de cultures (**Coulibaly-Kalpy et al., 2017**), dues à la résultante des habitudes culturelles des maraichers. En effet, les eaux des lacs sont davantage utilisées pendant les saisons sèches pour l'irrigation selon **Callejon et al., (2015)**. Selon cet auteur, l'eau des lacs est davantage sollicitée pour l'arrosage quand les précipitations deviennent rares. Au Rwanda, environ 60 % des agriculteurs irriguent leurs légumes seulement pendant les saisons sèches, le reste dépendant entièrement des précipitations (**Ssemanda et al. (2018)**). Par conséquent, pendant les saisons sèches, l'eau des céans étant polluée, son utilisation pour l'irrigation contamine encore plus les cultures maraichères (**Janke et al. 2017 ; Onderi, 2011**).

Plusieurs études dont celle menée par **Castro-Rosa**, en (2012) au Mexique ont révélées que la contamination des légumes a probablement pour origine l'eau d'irrigation plutôt que les mauvaises pratiques d'assainissement des restaurants et commerçants sur les marchés (**Downs et al., 1999**).

La présence d'indicateurs de pollution fécale dans les eaux a révélé la présence de nombreux agents biologiques constituant des menaces graves pour la santé, telles que le risque de transmission de nématodes intestinaux et d'infections bactériennes, en particulier aux consommateurs et aux travailleurs agricoles. Chez les personnes sensibles telles que les nourrissons, les personnes âgées et les personnes immunodéprimées, les effets peuvent être plus graves, chroniques ou même fatales (**Santé Canada, 2012**).

L'eau des lacs et les légumes cultivés aux abords des lacs ont été fortement pollués. Comme dans les pays où le contexte est similaire à celui de Yamoussoukro en Côte d'Ivoire, à savoir le Nigéria (**Shenge et al., 2015**) et le Moyen-Orient (**Faour-Klingbeil et al., 2016**), des pratiques agricoles pouvant exposer les légumes frais à une forte contamination microbienne (**FAO, 2008**) ont été observés dans cette étude. En pratique, l'objectif recherché est d'obtenir en dessous de 1000 coliformes thermotolérants dans l'eau destinée à l'irrigation des cultures surtout celles mangées crues (**Beuchat, 2002 ; OMS, 2006**).

Pour prévenir la transmission de nombreuses maladies, il faudrait veiller à adopter de bonnes pratiques urbaines autour des lacs car les multiples usages des lacs contribuent à les rendre impropres pour l'irrigation des cultures. Ces lacs demeurent d'une grande utilité pour l'agriculture urbaine et leurs préservations présenteraient des bénéfices. Les populations mondiale vivant dans des zones de stress hydrique devrait atteindre 44% d'ici 2050 selon (**Scheierling et al., 2011**).

Concernant les corrélations entre les paramètres physicochimiques et les charges bactériennes en coliformes thermotolérants et en *E. coli*. La turbidité et la matière organique (MO) des lacs ont évolué dans le même sens que les microorganismes, tandis que l'oxygène dissous (O<sub>2</sub>) a évolué dans le sens contraire. Selon **Ishii et Sadowsky** en (2008), la matière organique (MO) est une variable qui favorise l'abondance bactérienne car elle fournit des informations sur la quantité d'éléments nutritifs disponibles dans l'environnement. L'un des facteurs importants de survie et de croissance des bactéries, étant la source de carbone. Ainsi, de fortes teneurs en la

matière organique (MO) ont favorisé une augmentation des populations de microorganismes ( **Abdo et al. 2010**).

Par ailleurs, les charges bactériennes et la matière organique (MO) positivement corrélées avec la turbidité s'explique selon **Smith et al. en (2008)** et **El-Amier et al. en (2015)** par le fait que la turbidité est généralement créée par des matières en suspension telles que des débris de matières organiques, des micro-organismes vivants et des particules inorganiques telles que du limon et de l'argile qui eux sont des éléments riches en carbone organique. La turbidité a donc évolué dans le même sens que la matière organique (MO) et donc que les microorganismes. (**Bilotta et Brazier, 2008**) confirment ce résultat et affirment que dans les eaux de surface la turbidité est due aux particules riches en carbone organique. Ainsi, la turbidité peut être positivement corrélée aux charges bactériennes dans les eaux.

Concernant l'oxygène dissous, les résultats ont montré qu'il a été négativement corrélé aux microorganismes, à la turbidité et à la matière organique (MO). L'oxygène dissous est proportionnel à la vitesse de dégradation de la matière organique selon (**Taylor et al., 2011 ; Petitjean et al., 2014**).

En définitive, la pollution des eaux étant moins marquée en amont du système lacustre, il serait préférable que les activités maraichères soient le plus pratiquées en amont des eaux. Les productions en amont pourraient être plus saines que celles en aval. L'eau utilisée pour l'irrigation doit répondre à des exigences d'hygiène et être exempte d'organismes pathogènes et de substances toxiques (**Abdo, 2005**). La présence de souches résistantes aux antibiotiques dans les eaux et sur les cultures représente des facteurs de risques sanitaires à élucider.

---

## CHAPITRE 11 : QUALITE SANITAIRE DES LACS ET DES CULTURES ENVIRONNANTES PAR L'ETUDE DU PROFIL DE RESISTANCES AUX ANTIBIOTIQUES DES *E. COLI*

---

### 11.1. Proportion des *E. coli* dans les lacs étudiés et sur les cultures environnantes

Les données issues du dénombrement total des *E. coli* et des coliformes pour chacun des échantillons ont permis d'obtenir 31109 coliformes thermotolérants pour les eaux des lacs dont 20106 *E. coli* ; 7666 coliformes thermotolérants pour les carottes dont 4277 *E. coli* ; 5975 coliformes thermotolérants pour les choux dont 3501 *E. coli* et 5178 coliformes thermotolérants pour les laitues dont 3142 *E. coli*. Au total, il a été donc obtenu 49928 coliformes thermotolérants dont 31026 *E. coli* dans l'ensemble des lacs.

Le détail des données des différentes saisons climatiques des années 2015-2016 et 2016-2017 ont été résumées dans le (**Tableau XXVIII**).

Les résultats obtenus sur l'ensemble des populations de coliformes thermotolérants ont montré que les *E. coli* à elles seules ont constitué des effectifs de plus de 75% de l'ensemble des coliformes thermotolérants que ce soit dans les eaux des lacs et sur les légumes environnants arrosés avec les eaux lacustres (**Figure 36**).

**Tableau XXVIII : Effectifs totaux des *E. coli* dénombrés et des autres coliformes thermotolérants au cours des saisons climatiques des années 2015-2016 et 2016-2017.**

LACS	ANNEES	SAISONS	LES EAUX		LES CAROTTES		LES CHOUX		LES LAITUES	
			C.T.	<i>E. coli</i>	C.T.	<i>E. coli</i>	C.T.	<i>E. coli</i>	C.T.	<i>E. coli</i>
LAC A	2015-2016	GSaS	196	124	33	27	41	19	33	15
		GSP	201	132	47	30	29	22	26	31
		PSaS	330	237	104	60	67	44	43	26
		PSP	150	69	98	42	111	39	78	36
		<b>Total</b>	<b>877</b>	<b>562</b>	<b>282</b>	<b>159</b>	<b>248</b>	<b>124</b>	<b>180</b>	<b>108</b>
	2016-2017	GSaS	149	134	35	25	20	16	35	32
		GSP	355	156	40	31	39	15	35	16
		PSaS	416	268	101	72	72	32	56	31
		PSP	247	210	60	41	32	26	21	11
		<b>Total</b>	<b>1167</b>	<b>768</b>	<b>236</b>	<b>169</b>	<b>163</b>	<b>89</b>	<b>147</b>	<b>90</b>
LAC B	2015-2016	GSaS	1041	807	183	96	254	144	179	120
		GSP	1128	729	327	92	163	80	155	86
		PSaS	1219	629	312	156	247	128	223	114
		PSP	935	340	240	144	118	76	55	28
		<b>Total</b>	<b>4323</b>	<b>2505</b>	<b>1062</b>	<b>488</b>	<b>782</b>	<b>428</b>	<b>612</b>	<b>348</b>
	2016-2017	GSaS	1022	654	401	128	105	58	244	70
		GSP	1078	591	447	268	136	111	116	90
		PSaS	1364	620	188	86	157	77	149	68
		PSP	1065	471	196	110	177	78	131	69
		<b>Total</b>	<b>4529</b>	<b>2336</b>	<b>1232</b>	<b>592</b>	<b>575</b>	<b>324</b>	<b>640</b>	<b>297</b>
LAC C	2015-2016	GSaS	764	313	101	88	208	134	160	96
		GSP	743	380	216	124	109	86	93	73
		PSaS	714	552	183	96	97	61	64	53
		PSP	689	512	153	106	139	84	79	64
		<b>Total</b>	<b>2910</b>	<b>1757</b>	<b>653</b>	<b>414</b>	<b>553</b>	<b>365</b>	<b>396</b>	<b>286</b>
	2016-2017	GSaS	411	251	36	28	208	124	147	107
		GSP	750	426	304	228	102	74	90	76
		PSaS	811	562	238	110	178	98	128	86
		PSP	752	379	132	72	117	65	133	89
		<b>Total</b>	<b>2724</b>	<b>1618</b>	<b>710</b>	<b>438</b>	<b>605</b>	<b>361</b>	<b>498</b>	<b>358</b>
LAC D	2015-2016	GSaS	862	488	267	123	116	76	198	132
		GSP	800	476	247	123	130	68	129	96

		<b>PSaS</b>	813	528	243	130	231	132	197	128
		<b>PSP</b>	743	568	189	98	219	124	179	108
		<b>Total</b>	<b>3218</b>	<b>2060</b>	<b>946</b>	<b>474</b>	<b>696</b>	<b>400</b>	<b>703</b>	<b>464</b>
	<b>2016-2017</b>	<b>GSaS</b>	795	582	191	136	218	160	250	148
		<b>GSP</b>	792	591	349	228	112	85	129	96
		<b>PSaS</b>	1054	821	183	108	375	176	297	196
		<b>PSP</b>	899	546	180	76	189	72	136	74
		<b>Total</b>	<b>3540</b>	<b>2540</b>	<b>903</b>	<b>548</b>	<b>894</b>	<b>493</b>	<b>812</b>	<b>514</b>
<b>LAC E</b>	<b>2015-2016</b>	<b>GSaS</b>	844	506	85	59	42	25	17	11
		<b>GSP</b>	906	710	282	120	106	90	90	80
		<b>PSaS</b>	1094	984	307	188	269	153	241	129
		<b>PSP</b>	924	706	253	170	236	165	174	90
		<b>Total</b>	<b>3768</b>	<b>2906</b>	<b>927</b>	<b>537</b>	<b>653</b>	<b>433</b>	<b>522</b>	<b>310</b>
	<b>2016-2017</b>	<b>GSaS</b>	1018	788	116	111	386	237	268	126
		<b>GSP</b>	743	566	389	231	97	51	78	34
		<b>PSaS</b>	1203	950	34	26	180	124	151	99
		<b>PSP</b>	1089	750	176	90	143	72	171	108
		<b>Total</b>	<b>4053</b>	<b>3054</b>	<b>715</b>	<b>458</b>	<b>806</b>	<b>484</b>	<b>668</b>	<b>367</b>
<b>TOTAL GENERAL</b>			<b>31109</b>	<b>20106</b>	<b>7666</b>	<b>4277</b>	<b>5975</b>	<b>3501</b>	<b>5178</b>	<b>3142</b>

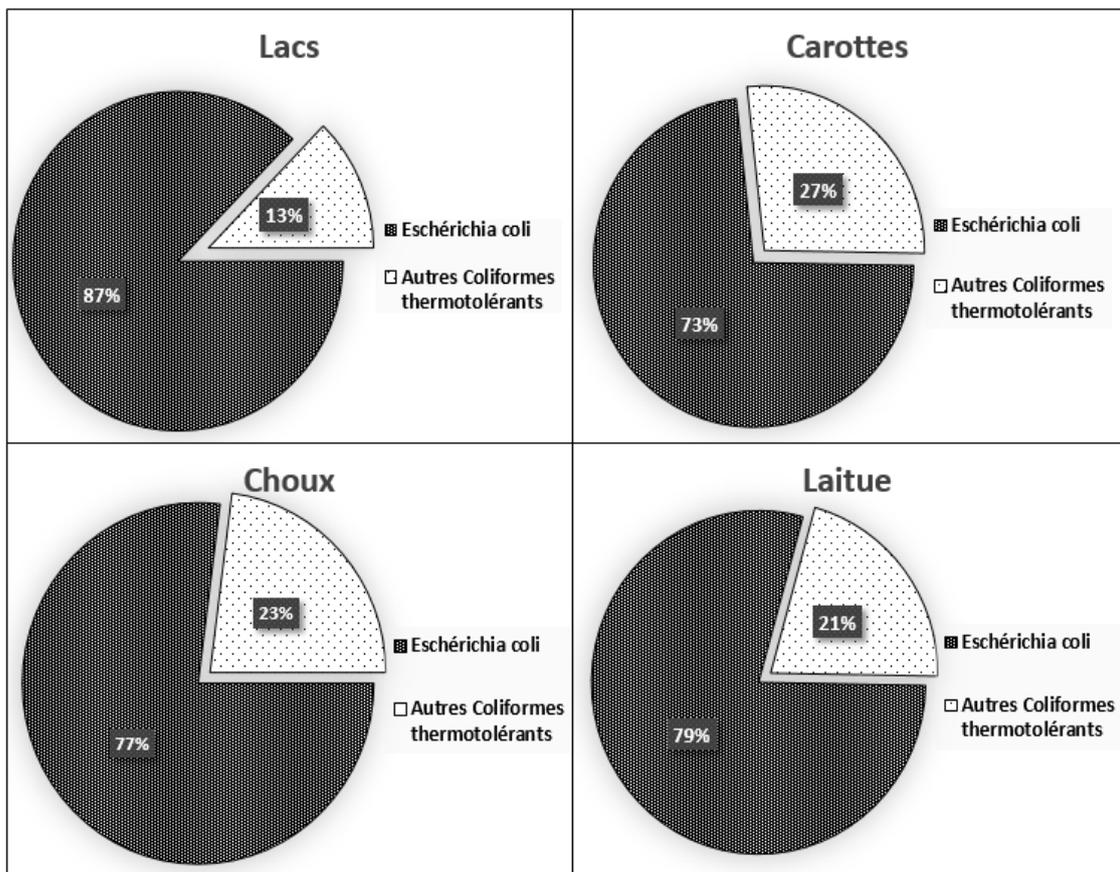
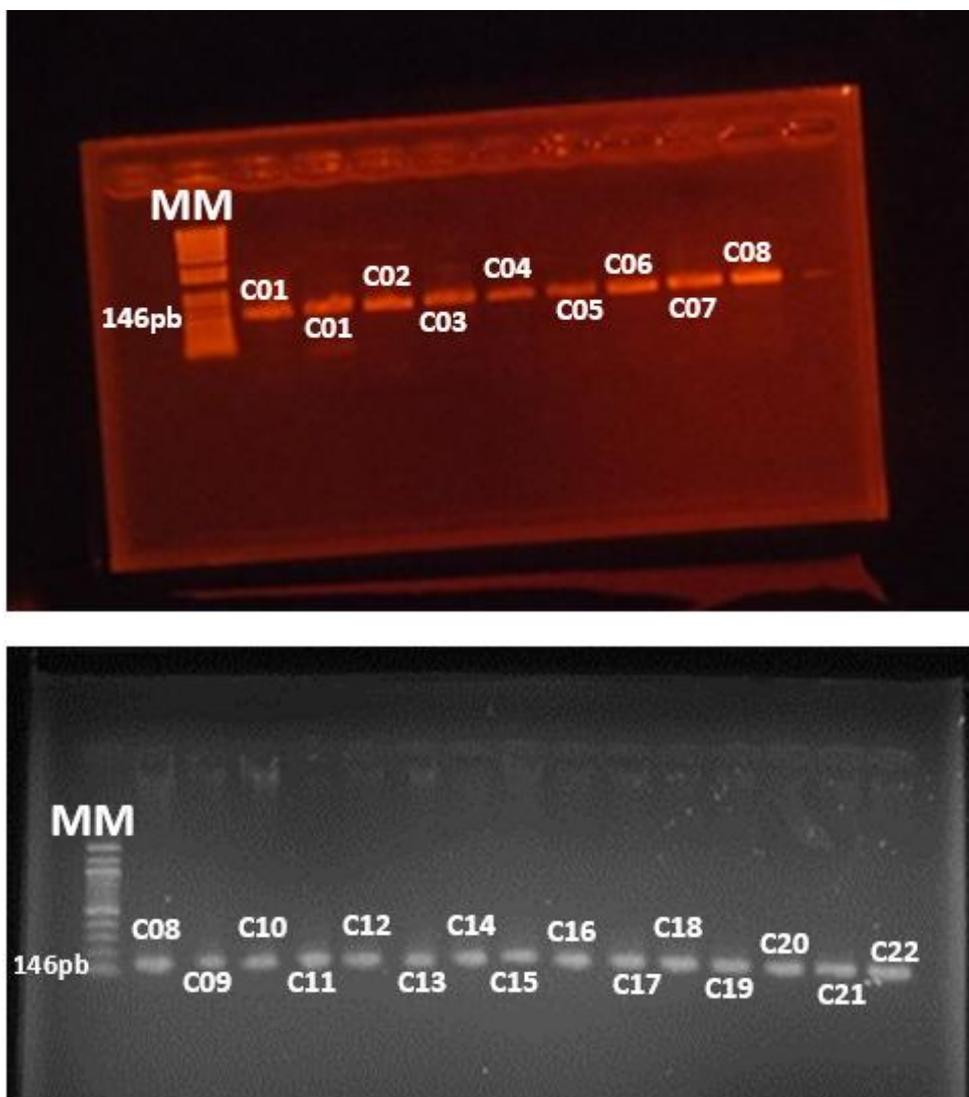


Figure 36 : Proportions relatives des *E. coli* dans l'ensemble des échantillons analysés au fil des saisons climatiques

### 11.2. Confirmation des *E. coli* étudiées par l'outil moléculaire

Les résultats générés après les analyses par PCR ont permis de confirmer que les colonies bleues à violettes visualisée sur le milieu de culture ECC ont été véritablement des *E. coli* (**Figure 37**).

Ainsi les phénotypes observés lors des identifications morphologiques, ont été révélées par PCR pour que l'ensemble des souches présentant ces caractéristiques soient aisément utilisées pour l'étude antibiotique des *E. coli*.



**Figure 37. Profils électrophorétiques de produits d'amplification du gène *UidA* de *E. coli* par PCR**

### 11.3. Diversité et regroupement des *E. coli* obtenues dans les différents lacs étudiés après antibiotypage au cours des saisons climatiques des années 2015-2016 et 2016-2017

Pour chacun des substrats étudiés, les bactéries qui partageaient des caractéristiques antibiotiques communes ont été regroupées par Analyse Factorielle des Correspondances Multiples (ACM) pour chaque saison climatique et année d'échantillonnages (**Figure 38**). Le nombre de classes obtenues en fonction du nombre de bactéries identifiées aux saisons climatiques des années d'échantillonnage est résumé dans le **tableau XXIX**

Pour chacun des lacs, les résultats des antibiogrammes obtenus ont été résumés en annexe.

La représentation des différentes observations par des points, classées en catégories de variables a permis de distinguer les différentes catégories d'antibiotiques présente dans chaque lac. En fonction de la présence des antibiotiques prédominants dans les lacs, elle dessine une ellipse représentant la forme générale du nuage de points liant chaque observation au barycentre de la modalité à laquelle elle appartient. Dans tous les lacs des résistances aux antibiotiques ont été observés (**Figure 38**).

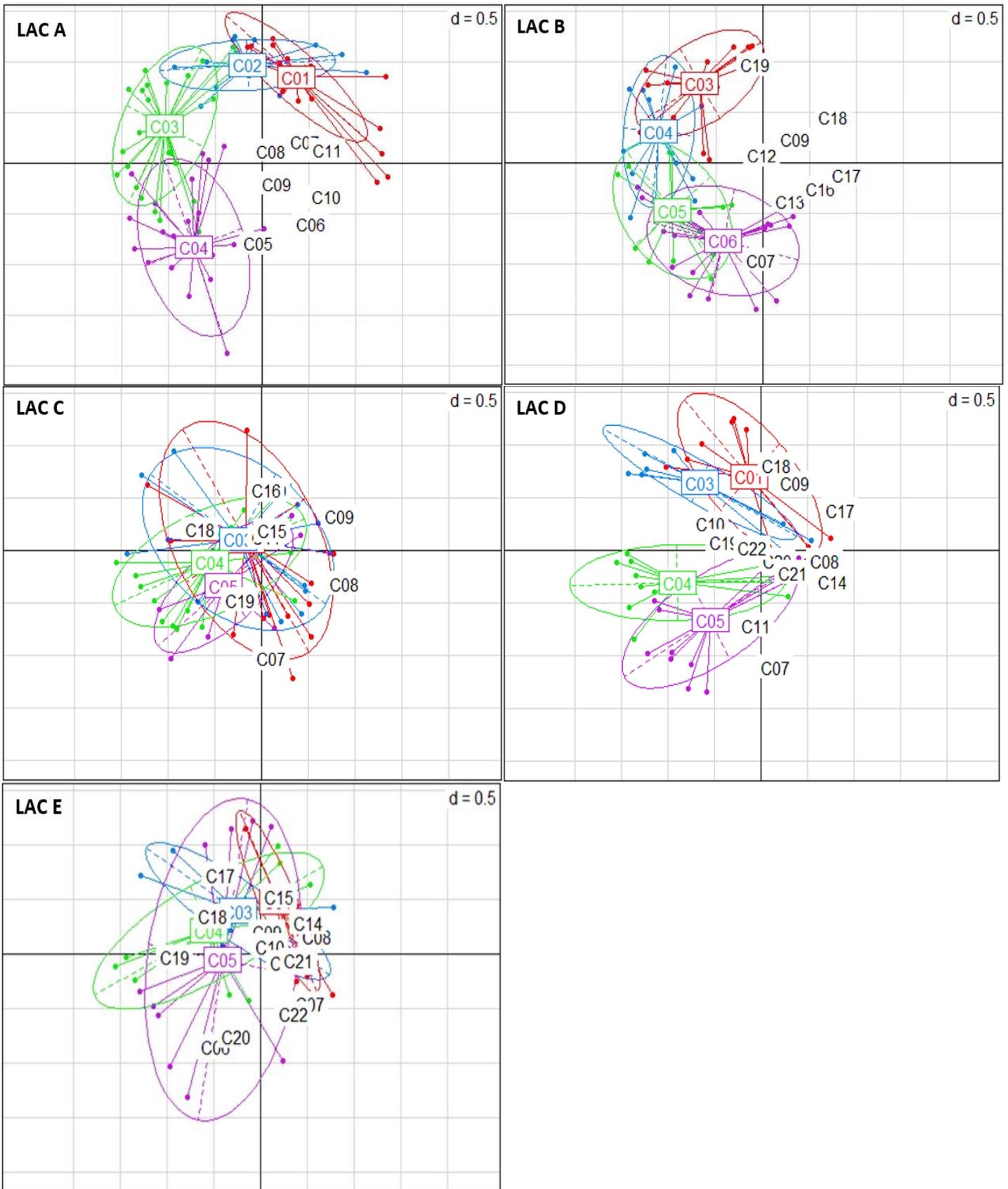
Les nombres des classes des souches antibiorésistantes, ont été inégalement réparties dans les lacs. Il a été observé 11 classes au niveau du Lac A, 13 au niveau du Lac B, 14 au niveau du Lac C, 17 au niveau du Lac D et 19 classes au niveau du lac E.

Dans le lac A, il a été généralement observé des individus allant de la classe 1 à la classe 8. Ces classes ont démontré une prédominance des résistances uniques des *E. coli* aux antibiotiques au sein de ce lac. Dans les lacs B et C, il a été observé une alternance entre les classes représentant des résistances uniques et doubles des *E. coli* aux antibiotiques même si dans le lac C, il a été noté la présence de la classe C18 qui représente une résistance triple des microorganismes aux antibiotiques. Dans les lacs D et E, au contraire des autres lacs, il a été observé une forte prédominance des bactéries appartenant aux classes de doubles et de triple résistance des *E. coli* aux antibiotiques. L'on y a néanmoins observé des résistances uniques (**Figure 38**).

**Tableau XXIX : Effectifs totaux des *E. coli* et profils de résistances aux antibiotiques obtenus au cours des saisons climatiques des années 2015-2016 et 2016-2017.**

LACS	SAISONS	ANNEE	EAUX		CAROTTES		CHOUX		LAITUES	
			<i>E. coli</i>	Classes						
LAC A	GSaS	2015-2016	124	4	27	4	19	3	15	3
		2016-2017	134	5	25	4	16	2	32	2
	GSP	2015-2016	132	3	30	7	22	4	31	2
		2016-2017	156	7	31	2	15	4	16	3
	PSaS	2015-2016	237	3	60	8	44	2	26	5
		2016-2017	268	3	72	4	32	1	31	4
	PSP	2015-2016	69	8	42	2	39	6	36	6
		2016-2017	210	4	41	6	26	3	11	2
<b>Total LAC A : 2068 /11 classes</b>										
LAC B	GSaS	2015-2016	807	3	96	3	144	1	120	2
		2016-2017	654	9	128	4	58	3	70	2
	GSP	2015-2016	729	6	92	4	80	2	86	4
		2016-2017	591	7	268	3	111	4	90	1
	PSaS	2015-2016	629	4	156	2	128	1	114	3
		2016-2017	620	5	86	3	77	2	68	2
	PSP	2015-2016	340	8	144	5	76	6	28	1
		2016-2017	471	3	110	2	78	1	69	2
<b>Total LAC B : 7316 / 13 classes</b>										
LAC C	GSaS	2015-2016	313	8	88	6	134	4	96	3
		2016-2017	251	5	28	4	124	3	107	2
	GSP	2015-2016	380	4	124	2	86	1	73	2
		2016-2017	426	9	228	3	74	4	76	7
	PSaS	2015-2016	552	8	96	7	61	4	53	4

		2016-2017	562	6	110	4	98	5	86	2
	PSP	2015-2016	512	6	106	3	84	5	64	4
		2016-2017	379	9	72	3	65	5	89	3
<b>Total LAC C : 5596 / 14 classes</b>										
LAC D	GSaS	2015-2016	488	9	123	3	76	3	132	5
		2016-2017	582	6	136	5	160	5	148	5
	GSP	2015-2016	476	5	123	3	68	6	96	3
		2016-2017	591	6	228	4	85	4	96	1
	PSaS	2015-2016	528	9	130	8	132	3	128	3
		2016-2017	821	7	108	3	176	6	196	5
	PSP	2015-2016	568	8	98	4	124	4	108	6
		2016-2017	546	5	76	2	72	2	74	4
<b>Total LAC D: 7493 / 17 classes</b>										
LAC E	GSaS	2015-2016	506	5	59	6	25	4	11	3
		2016-2017	788	3	111	6	237	4	126	5
	GSP	2015-2016	710	7	120	3	90	2	80	2
		2016-2017	566	8	231	6	51	5	34	4
	PSaS	2015-2016	984	8	188	8	153	6	129	2
		2016-2017	950	7	26	7	124	6	99	3
	PSP	2015-2016	706	7	170	6	165	5	90	4
		2016-2017	750	9	90	3	72	3	108	2
<b>Total LAC E : 8550 / 19 classes</b>										



**Figure 38. Classifications des *E. coli* dans le plan factoriel de l'Analyse factorielle des correspondances multiples (AFM)**

## 11.4. Résistance des *E. coli* aux antibiotiques dans les lacs

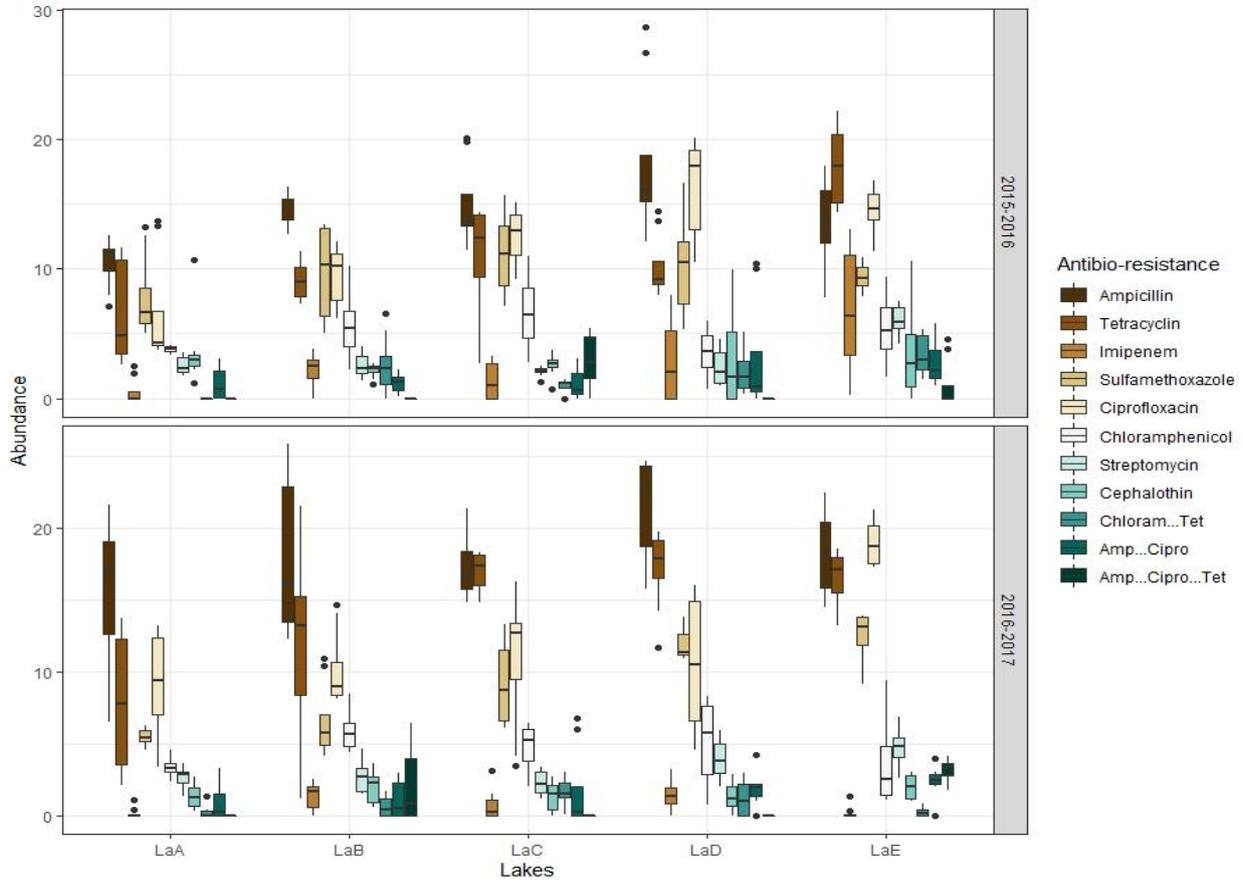
### 11.4.1. Evaluation globale du niveau de résistance des *E. coli* aux antibiotiques dans les lacs

Les résultats des profils de résistances pour chacun des antibiotiques testés ont révélés que les résistances des souches à l'Ampicilline, à la Tétracycline, à la Ciprofloxacine et à la Sulfaméthoxazole ont été les plus remarquables (**Figure 39**).

Leur résistance au Chloramphénicol, à la Streptomycine et à la Céfotaxime a été plus ou moins similaire mais a été inférieures à celles aux antibiotiques précédemment cités.

Certaines souches ont aussi montrés des multi résistances à des combinaisons de 2 ou 3 antibiotiques. Il a été noté des résistances à l'Ampicilline + la Ciprofloxacine, à la Chloramphénicol + la Tétracycline et à l'Ampicilline + Ciprofloxacine + Tétracycline

Aucune souche n'a été résistante au Céfotaxime et à la gentamicine. Ainsi ces antibiotiques n'ont pas été considérés lors de la construction des courbes. (**Figure 39**).



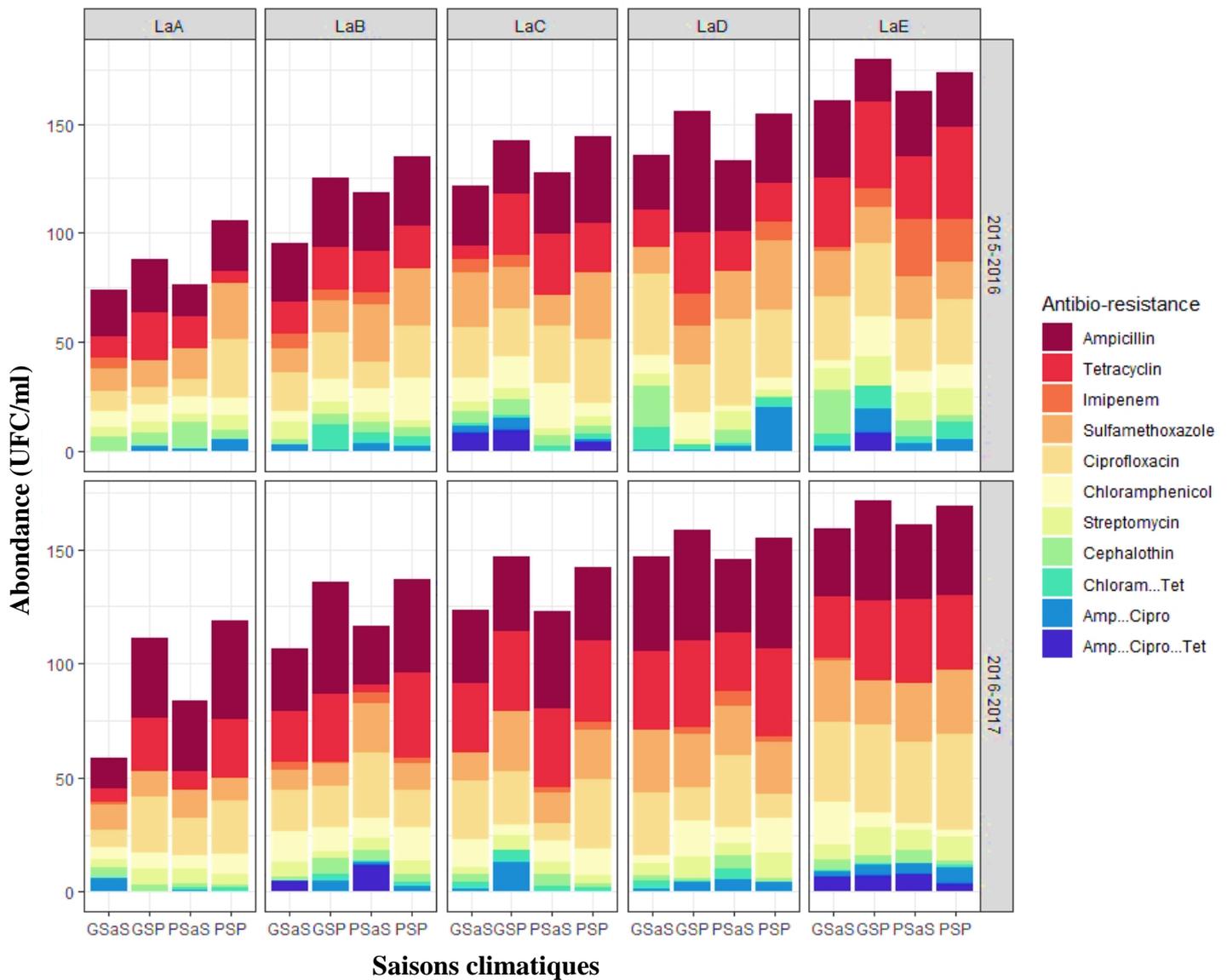
**Figure 39. Profils de résistance des souches d'*E. coli* aux différents antibiotiques dans chaque lac en fonction des années d'échantillonnages**

*LDS : Longue saison sèche ; LRS: Longue saison des pluies ; SDS : Petite saison sèche ; SRS : Petite saison des pluies*

#### **11.4.2. Influence spatiale et temporelle sur la résistance des *E. coli* aux antibiotiques**

Le niveau de résistance aux antibiotiques par saison et par lac a présenté qu'en général, *E. coli* isolé de tous les lacs au cours des deux années des quatre saisons, a été résistant à tous les antibiotiques testés. Cependant, les résistances étaient les plus élevées dans chacun des lacs pendant les périodes pluvieuses (GSP et PSP) au cours des deux années. Des résistances multiples ont également été observées dans tous les lacs en toutes saisons (**Figure 40**).

Les bactéries ont présentées des plus grandes résistances dans tous les lacs et en toutes les saisons à l'ampicilline, la tétracycline, la Ciprofloxacine et le Sulfaméthoxazole. Par ailleurs, le nombre de bactéries antibiorésistantes a été le plus élevé dans les lacs en aval. Dans ces lacs, plusieurs autres souches antibiorésistantes, non présentes dans les lacs en amont, ont été trouvées ainsi que des souches présentant des triples résistances. Une grande abondance de bactéries résistantes aux antibiotiques a également été observée dans le lac D (**Figure 40**).



**Figure 40 : Abondance des *E. coli* résistantes aux antibiotiques**

*LaA* = lac A; *LaB* = lac B; *LaC* = lac C; *LaD* = lac D; *LaE* = lac E; *GSaS* = Grande saison sèche; *GSP* = Grande saison des pluies; *PSaS* = Petite saison sèche; *PSP* = Petite saison des pluies

### 11.4.3. Profil de la résistance des populations d'*E. coli* dans le Lac A

L'effectif total des *E. coli* s'est élevé à 2 069 dans le Lac A (**Tableau XXVIII**). Parmi les 2 069 souches testées, 22,19% des souches ont été résistantes à au moins un antibiotique

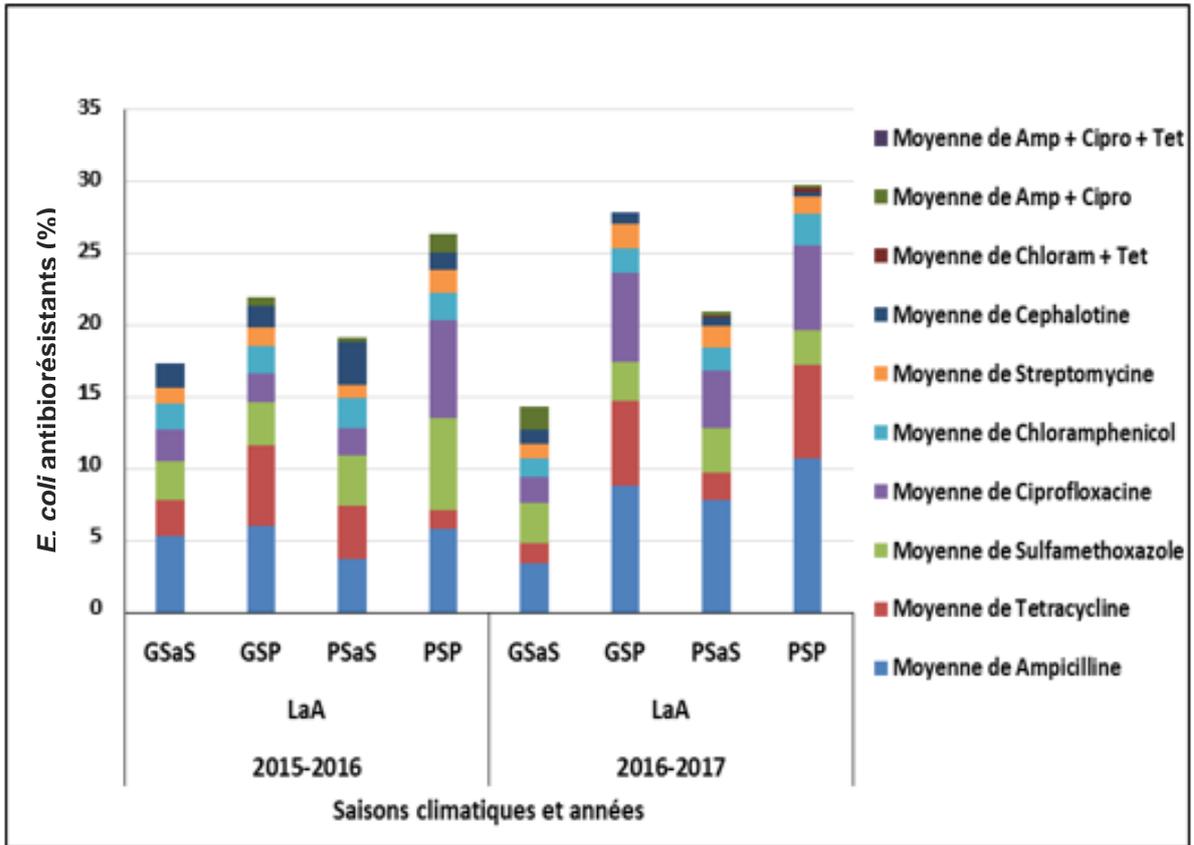
Le profil de résistance aux antibiotiques des souches a permis de déterminer le pourcentage de souches résistantes pour chaque antibiotique sur l'ensemble des souches étudiées. La majorité des souches ont été résistante à l'ampicilline (6.48%) (**Figure 41**).

Ensuite des résistances plus ou moins nombreuses ont été remarquées respectivement au niveau de la Ciprofloxacine (3.88%) de la tétracycline (3.59%), et de la Sulfaméthoxazole (3.34%) (**Figure 41**).

Pour le Chloramphénicol (1.8%), la Streptomycine (1.29%) et la Céfalotine (1.26%), les souches ont présentées des résistances inférieures aux antibiotiques précédemment cités mais plus ou moins similaires entre elles (**Figure 41**).

Certaines souches ont aussi montrés des multi résistances à des combinaisons de 2 antibiotiques. Il a été noté des résistances à l'Ampicilline + la Ciprofloxacine (0.53%) et à la Chloramphénicol + la Tétracycline (0.07%) (**Figure 41**).

La sensibilité des souches aux antibiotiques a varié de 20,64 % à la Grande Saison des Pluies (GSP) de l'année 2016-2017 à 33,53 % de la petite saison sèche (PSaS) de l'année 2015-2016. Au total, il a été obtenu 77.81% de souches sensibles. La majorité des souches ont présenté les résistances les plus élevées pendant les saisons pluvieuses (**Figure 41**).



**Figure 41. Dynamique des souches de *E. coli* antibiorésistantes dans le lac A**

*GSaS* : Grande saison sèche ; *GSP* : Grande saison des pluies ; *PSaS* : Petite saison sèche ; *PSP* : Petite saison des pluies

#### 11.4.4. Profil de la résistance des populations d'*E. coli* dans le LAC B

L'effectif total des *E. coli* s'est élevé à 7 318 dans le Lac B (**Tableau XXVIII**). Parmi les 7 318 souches testées, 29.4% des souches ont été résistantes au moins à un antibiotique.

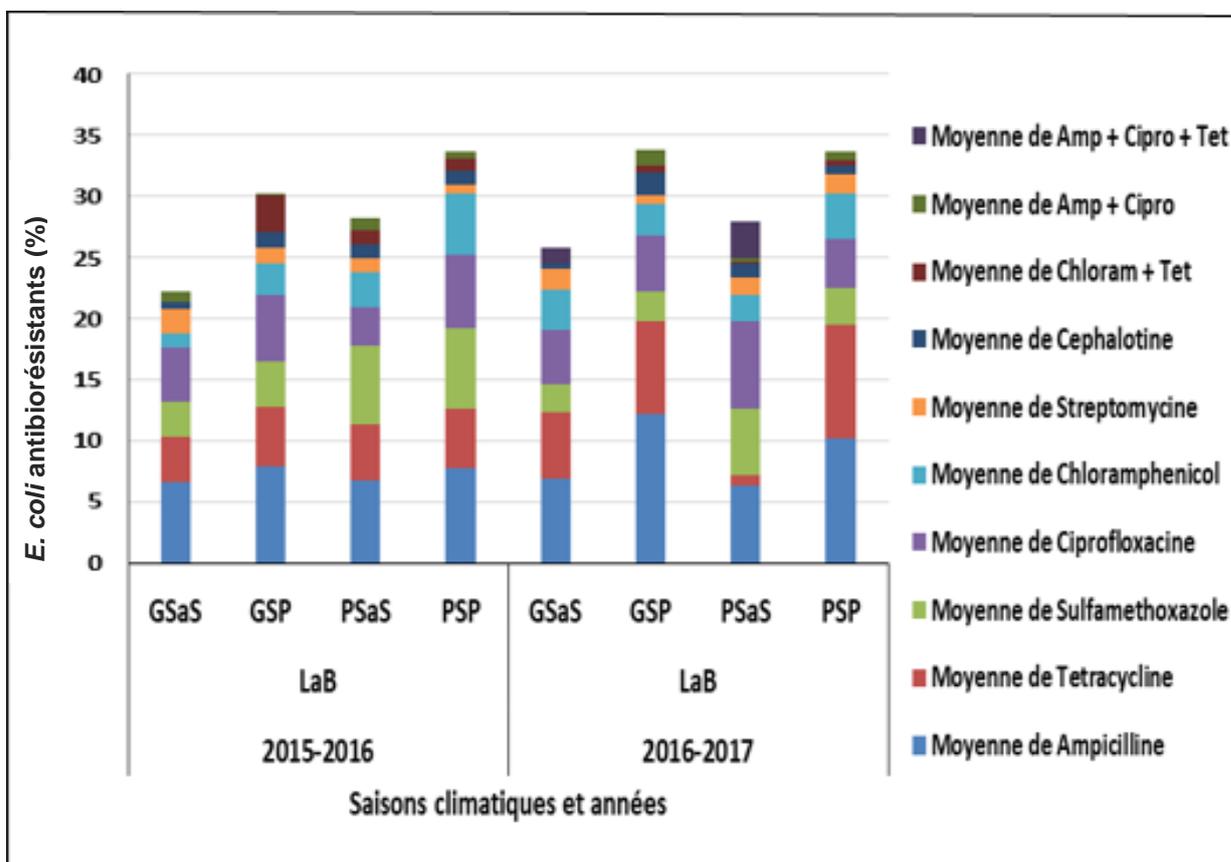
Le profil de résistance aux antibiotiques des souches a permis de déterminer le pourcentage de souches résistantes pour chaque antibiotique sur l'ensemble des souches étudiées. La majorité des souches ont été résistante à l'ampicilline (8.13%) (**Figure 42**).

Ensuite des résistances plus ou moins nombreuses ont été remarquées respectivement au niveau de la tétracycline (5.17%) de la Ciprofloxacine (4.9%), et de la Sulfaméthoxazole (4.08%) (**Figure 42**).

Pour le Chloramphénicol (2.9 %), la Streptomycine (1.31 %) et la Céfalotine (1.05 %), les souches ont présentées des résistances inférieures aux antibiotiques précédemment cités mais plus ou moins similaires entre elles (**Figure 42**).

Certaines souches ont aussi montrés des multi résistances à des combinaisons de 2 antibiotiques. Il a été noté des résistances à la Chloramphénicol + la Tétracycline (0.8%) et à l'Ampicilline + la Ciprofloxacine (0.57%). Une combinaison de résistance à trois antibiotiques ; Ampicilline + Ciprofloxacine + Tétracycline (0.54%) a aussi été trouvée (**Figure 42**).

La sensibilité des souches aux antibiotiques a varié de 20,91 % à la Grande Saison des Pluies (GSP) de l'année 2016-2017 à 30,11 % de la Petite Saison Sèche (PSaS) de l'année 2015-2016. Au total, il a été obtenu 70.6% de souches sensibles. La majorité des souches ont présenté les résistances les plus élevées pendant les saisons pluvieuses (**Figure 42**).



**Figure 42. Dynamique des souches de *E. coli* antibiorésistantes dans le lac B**

*GSaS* : Grande saison sèche ; *GSP* : Grande saison des pluies ; *PSaS* : Petite saison sèche ; *PSP* : Petite saison des pluies

#### 11.4.5. Profil de la résistance des populations d'*E. coli* dans le LAC C

L'effectif total des *E. coli* s'est élevé à 5 597 dans le Lac C (**Tableau XXVIII**) Parmi les 5 597 souches testées, 36,92% des souches ont été résistantes au moins à un antibiotique

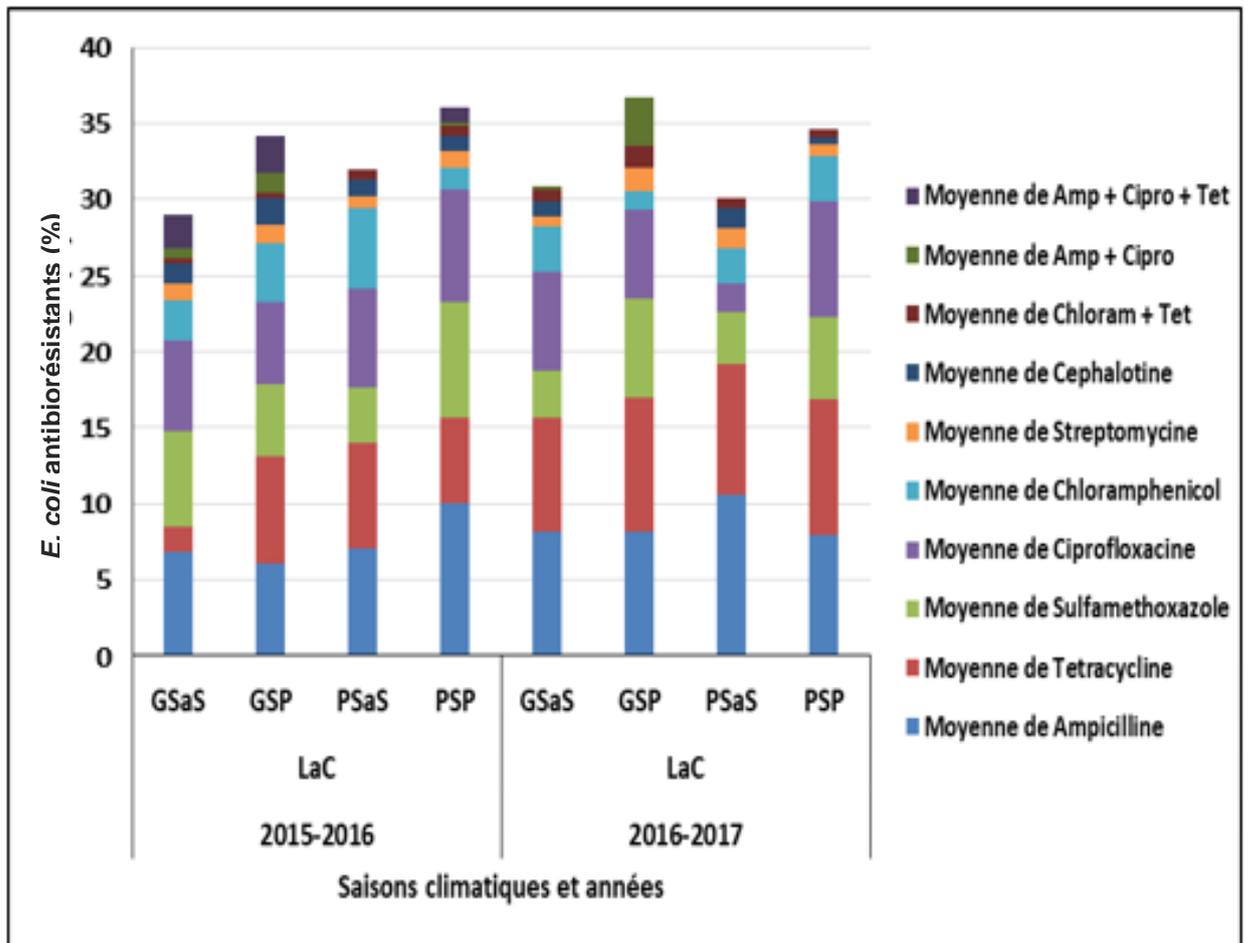
Le profil de résistance aux antibiotiques des souches a permis de déterminer le pourcentage de souches résistantes pour chaque antibiotique sur l'ensemble des souches étudiées. La majorité des souches ont été résistante à l'ampicilline (8.08%) (**Figure 43**).

Ensuite des résistances plus ou moins nombreuses ont été remarquées respectivement au niveau de la Tétracycline (6.91%) de la Ciprofloxacine (5.88%), et de la Sulfaméthoxazole (5.09%) (**Figure 43**).

Pour le Chloramphénicol (2.84 %), la Streptomycine (1.09 %) et la Céfalotine (0.98 %), les souches ont présentées des résistances inférieures aux antibiotiques précédemment cités mais plus ou moins similaires entre elles (**Figure 43**).

Certaines souches ont aussi montrés des multi résistances à des combinaisons de 2 antibiotiques. Il a été noté des résistances à la Chloramphénicol + la Tétracycline (0.67%) et à l'Ampicilline + la Ciprofloxacine (0.71%) (**Figure 43**).

La sensibilité des souches aux antibiotiques a varié de 20,64 % à la Grande Saison des Pluies (GSP) de l'année 2016-2017 à 33,53 % de la Petite Saison Sèche (PSaS) de l'année 2015-2016. Au total, il a été obtenu 63.92% de souches sensibles. La majorité des souches ont présenté les résistances les plus élevées pendant les saisons pluvieuses (**Figure 43**).



**Figure 43. Dynamique des souches de *E. coli* antibiorésistantes dans le lac C**

*GSaS* : Grande saison sèche ; *GSP* : Grande saison des pluies ; *PSaS* : Petite saison sèche ; *PSP* : Petite saison des pluies

#### 11.4.6. Profil de la résistance des populations d'*E. coli* dans le LAC D

L'effectif total des *E. coli* s'est élevé à 7 493 dans le Lac D (**Tableau XXVIII**) Parmi les 7 493 souches testées, 35,95% des souches ont été résistantes au moins à un antibiotique

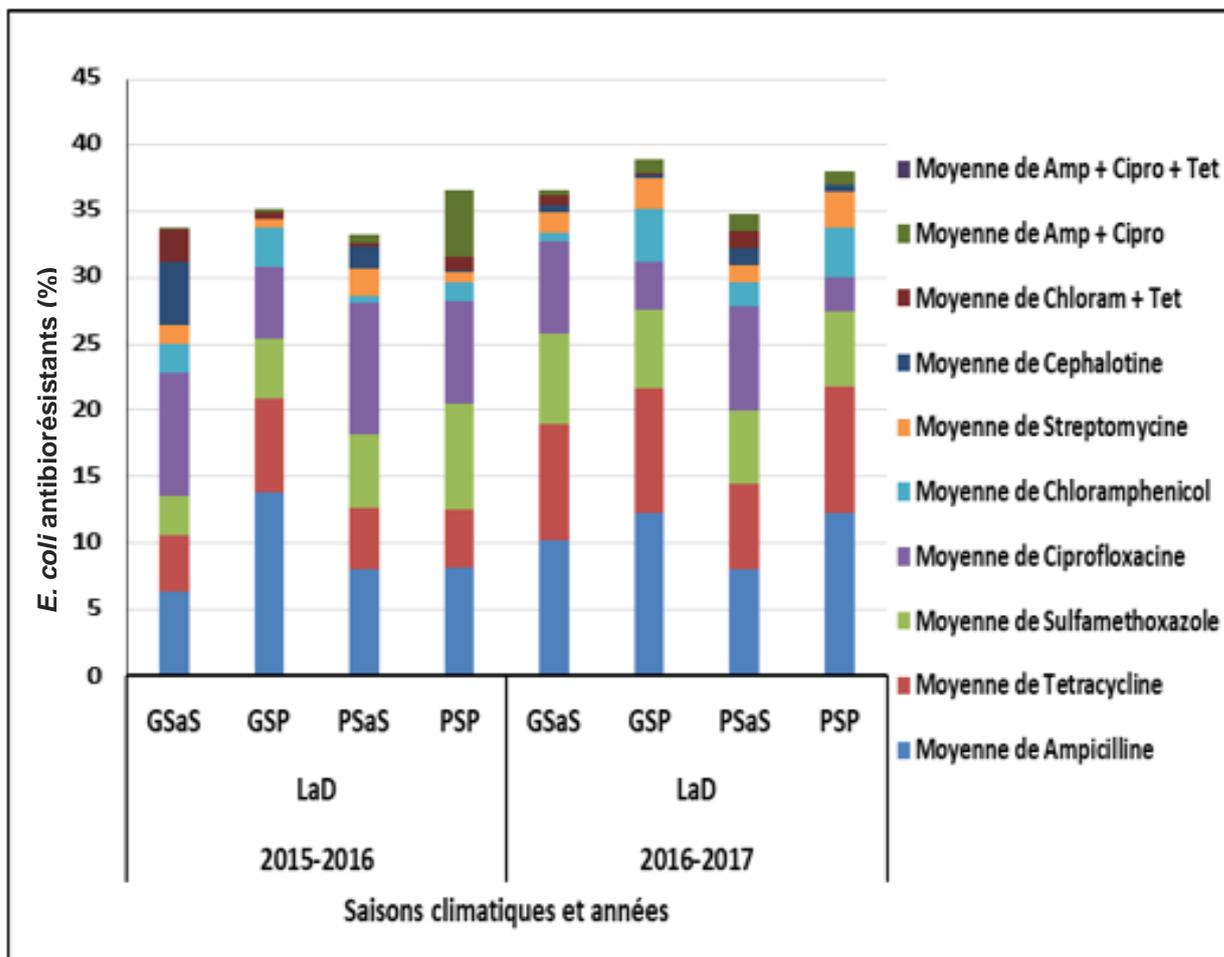
Le profil antibiotique des souches a permis de déterminer le pourcentage de souches résistantes pour chaque antibiotique sur l'ensemble des souches étudiées. La majorité des souches ont été résistante à l'ampicilline (9.86%) (**Figure 44**).

Ensuite des résistances plus ou moins nombreuses ont été remarquées respectivement au niveau de la tétracycline (6.83%) de la Ciprofloxacine (6.71%), et de la Sulfaméthoxazole (5.6%) (**Figure 46**).

Pour le Chloramphénicol (2.18%), la streptomycine (1.58%) et la Céfalotine (1.16%), les souches ont présentées des résistances inférieures aux antibiotiques précédemment cités mais plus ou moins similaires entre elles (**Figure 44**).

Certaines souches ont aussi montrés des multi résistances à des combinaisons de 2 antibiotiques. Il a été noté des résistances à la Chloramphénicol + la Tétracycline (0.83%) et à l'Ampicilline + la Ciprofloxacine (1.24%). Une combinaison de résistance à trois antibiotiques ; Ampicilline + Ciprofloxacine + Tétracycline (0.72%) a aussi été trouvée (**Figure 44**).

La sensibilité des souches aux antibiotiques a varié de 20,64 % à la Grande Saison des Pluies (GSP) de l'année 2016-2017 à 33,53 % de la Petite Saison Sèche (PSaS) de l'année 2015-2016. Au total, il a été obtenu 64.05% de souches sensibles. La majorité des souches ont présenté les résistances les plus élevées pendant les saisons pluvieuses (**Figure 44**).



**Figure 44. Dynamique des souches de *E. coli* antibiorésistantes dans le lac D**

*GSaS* : Grande saison sèche ; *GSP* : Grande saison des pluies ; *PSaS* : Petite saison sèche ; *PSP* : Petite saison des pluies

#### 11.4.7. Profil de la résistance des populations d'*E. coli* dans le LAC E

L'effectif total des *E. coli* s'est élevé à 8 549 dans le Lac E (**Tableau XXVIII**) Parmi les 8 549 souches testées, 40,12% des souches ont été résistantes au moins à un antibiotique

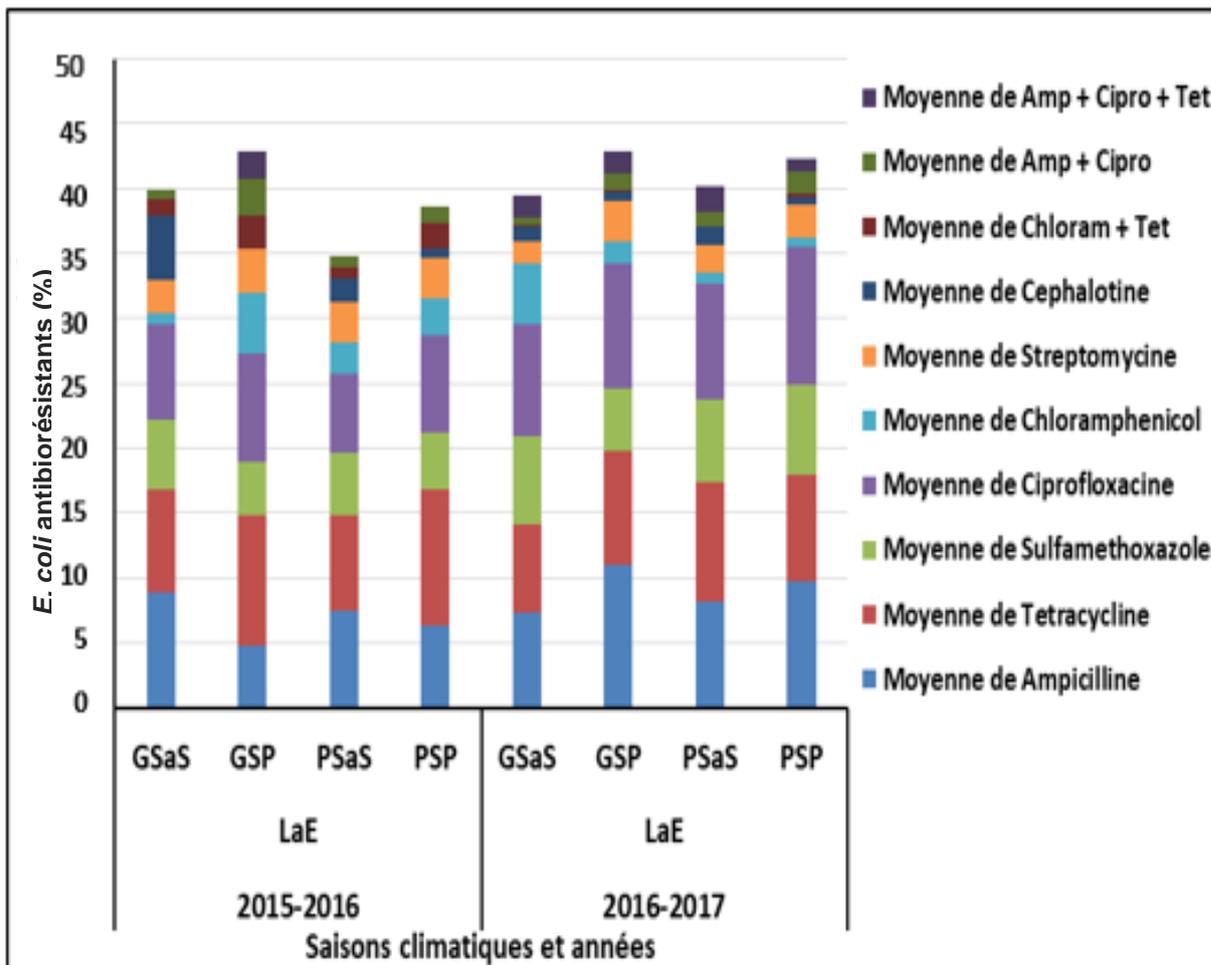
Le profil antibiotique des souches a permis de déterminer le pourcentage de souches résistantes pour chaque antibiotique sur l'ensemble des souches étudiées (**Figure 45**).

La majorité des souches ont été résistantes à l'ampicilline (8.61%). Ensuite des résistances plus ou moins nombreuses ont été remarquées respectivement au niveau de la tétracycline (8.01%) de la Ciprofloxacine (8.38%), et de la Sulfaméthoxazole (5.45%) (**Figure 45**).

Pour la streptomycine (2.71%), le Chloramphénicol (2.31%) et la Céfalotine (1.45%), les souches ont montrés de résistances inférieures aux antibiotiques précédemment cités mais plus ou moins similaires entre elles (**Figure 45**).

Certaines souches ont aussi montrés des multi résistances à des combinaisons de 2 antibiotiques. Il a été noté des résistances à l'Ampicilline + la Ciprofloxacine (1.31%) et la Chloramphénicol + la Tétracycline (0.9%). Une combinaison à trois antibiotiques ; Ampicilline + Ciprofloxacine + Tétracycline (1.05%) a aussi été trouvée (**Figure 45**).

La sensibilité des souches aux antibiotiques a varié de 20,64 % à la Grande Saison des Pluies (GSP) de l'année 2016-2017 à 33,53 % de la Petite Saison Sèche (PSaS) de l'année 2015-2016. Au total, il a été obtenu 59.88% de souches sensibles. La majorité des souches ont présenté les résistances les plus élevées pendant les saisons pluvieuses (**Figure 45**).



**Figure 45. Dynamique des souches de *E. coli* antibiorésistantes dans le lac E**

*GSaS* : Grande saison sèche ; *GSP* : Grande saison des pluies ; *PSaS* : Petite saison sèche ; *PSP* : Petite saison des pluies

### **11.5. Corrélation entre l'abondance bactérienne, les paramètres antibiotique de résistance et les paramètres physicochimiques des lacs de Yamoussoukro**

Des analyses de corrélation de rang Spearman (**Tableau XXX**), précédant l'Analyse des composantes Principales (ACP) (**Figure 46**), ont été menées pour révéler des corrélations entre les fréquences de résistance de *E. coli* aux antibiotiques et les paramètres physico-chimiques de l'eau dans différents lacs.

Comme le montre le tableau XXX, la turbidité a été positivement corrélée avec des souches résistantes à la tétracycline et la streptomycine, et deux combinaisons d'antibiotiques, le chloramphénicol + la tétracycline et l'ampicilline + la ciprofloxacine + la tétracycline, ainsi que le carbone organique dissous.

L'oxygène dissous a été corrélé négativement avec des souches résistantes à la tétracycline et le chloramphénicol + tétracycline.

La température n'a été corrélée qu'avec des souches résistantes à l'ampicilline.

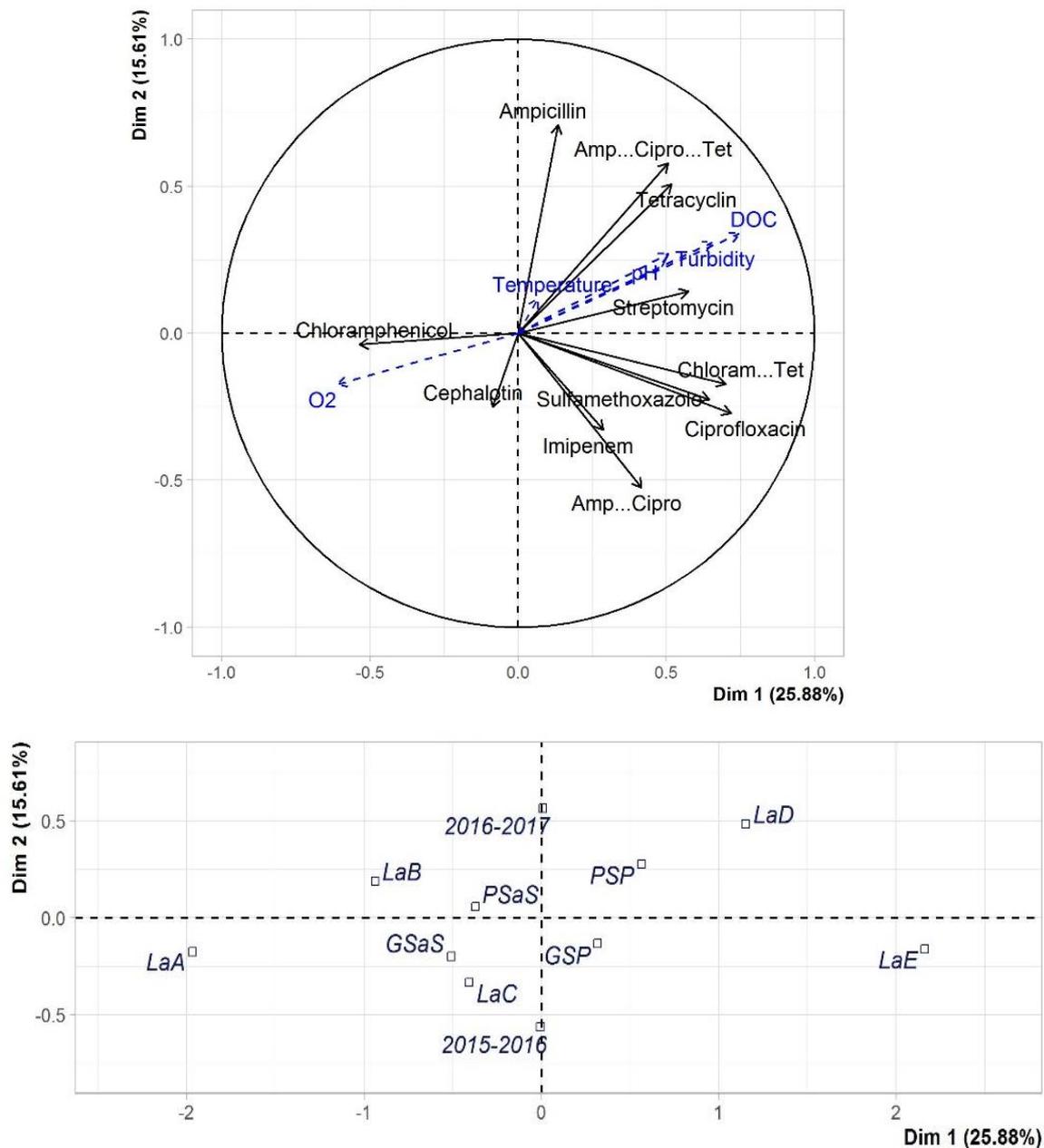
Le pH n'a pas montré de corrélation avec ces souches résistantes aux antibiotiques.

Nous avons également constaté des corrélations significatives entre la résistance des souches à la tétracycline, au chloramphénicol et à la ciprofloxacine

Concernant la **Figure 48**, la turbidité et la température pourraient aider à déterminer la principale résistance aux antibiotiques dans le lac D. La résistance dans les lacs A, B et C a pu être influencée par l'oxygène dissous (**Tableau XXX**).

**Tableau XXX : Corrélation de Spearman Rank entre les caractéristiques physico-chimiques des lacs et les fréquences de résistance des *E. coli* aux antibiotiques**

PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES						ANTIBIOTIQUES										
O2	Turb.	COD	Temp.	pH		Amp	Tet	Imip	Sul	Cipr	Chl	Strpt	Ceph	Amp-Cipro	Chl-Tet	Amp - Cipro-Tet
O2	1	-0,826	-0,783	0,163	-0,485	-0,388	-0,845	-0,386	-0,708	-0,764	0,382	-0,552	0,01	-0,522	-0,651	-0,346
Turb.	1	0,835	-0,107	0,23		0,382	0,828	0,541	0,585	0,624	-0,32	0,65	-0,13	0,633	0,801	0,434
COD		1	-0,064	0,422		0,499	0,732	0,666	0,764	0,567	-0,346	0,528	-0,08	0,449	0,807	0,697
T°C.			1	-0,202		0,527	-0,041	0,057	-0,133	-0,267	0,258	-0,322	-0,029	0,024	-0,12	0,073
pH				1		0,086	0,368	0,048	0,49	0,408	-0,548	0,44	-0,086	0,187	0,292	0,132
Amp						1	0,459	0,197	0,397	0,117	-0,047	-0,185	-0,075	0,183	0,267	0,405
Tet							1	0,477	<b>0,564</b>	0,584	-0,781	0,58	-0,067	0,554	0,57	0,283
Imip								1	0,409	0,388	-0,228	0,58	-0,041	0,142	0,501	0,695
Sul									1	0,429	-0,5	0,297	-0,083	0,633	0,522	0,374
Cipro										1	-0,63	0,566	0,054	0,658	0,386	0,208
Chl											1	-0,49	-0,094	-0,438	-0,223	-0,296
Strp												1	-0,139	0,338	0,609	0,367
Ceph													1	-0,151	-0,14	-0,075
Amp-Cipro														1	0,337	-0,03
Chl-Tet															1	0,627
Amp-Cipro-Tet																1



**Figure 46. Analyse en composantes principales des caractéristiques physico-chimiques et des fréquences de résistance aux antibiotiques**

**(A) diagramme variable (B) diagramme d'observations**

*Turb* = Turbidité; *DO* = oxygène dissous; *DOC* = carbone organique dissous *T* ° = température (° C); *pH* = potentiel hydrogène; *Amp ... Cipro* = ampicilline + ciprofloxacine; *Chloram ... Tet* = Chloramphenicol + tetracycline; *Amp ... Cipro ... Tet* = ampicilline + ciprofloxacine + tetracycline; *LaA* = lac A; *LaB* = lac B; *LaC* = lac C; *LaD* = lac D; *LaE* = lac E; *GSaS* = Grande saison sèche; *GSP* = Grande saison des pluies; *PSaS* = Petite saison sèche; *PSP* = Petite saison des pluies

## 11.6. Discussion

L'objectif de cette étude a été de mettre en évidence dans les lacs, la diversité et la résistance des *E. coli* aux antibiotiques.

Dans les lacs et les cultures de légumes environnants, il a été identifié 22 classes de souches résistantes aux antibiotiques. Ils ont permis de témoigner ainsi d'une grande diversité d'*E. coli* dans l'eau des lacs mais aussi sur les légumes de Yamoussoukro.

Les colorations des colonies obtenues, ont variés des nuances du bleu au violet en fonction de la capacité des souches à produire davantage de la  $\beta$ -galactosidase et la  $\beta$ -glucuronidase (**Milieu COMPASS ECC**).

En effet, l'hétérogénéité génétique d'*E. coli* a plusieurs fois été rapportée (**Staley et Sadowsky, 2016 ; Qu et al., 2017**). Cette diversité intra spécifique serait liée à la capacité de cette bactérie à réaliser les phénomènes de transformation et de conjugaison (**O'Flaherty et al., 2018**).

Ce constat pourraient mettre en évidence des sources diffuses de pollution pour ces souches, rependues dans tous les lacs, cependant leur persistance dans l'environnement étant limitée, elles n'arrivent pas à survivre dans le milieu extérieur et ne se retrouveraient de ce fait à quelques endroits des lacs où les pollutions sont très récente. En effet, *E. coli*, une fois excrété hors de son habitat traditionnel qui est l'intestin, est confronté à la survie dans un milieu aux conditions défavorables pour lui (**Mieszkin, 2010**). Ainsi, sa présence dans un environnement aussi hostile et stressant que le milieu aquatique, peut être brève et est la preuve d'une contamination récente du milieu (**OMS, 2012**).

L'antibiorésistance étudiée sur l'ensemble des souches d'*E. coli*, a montré que la plupart des souches ont présentés des profils de résistances similaires d'un Lac à l'autre. Néanmoins, le nombre de bactéries résistantes a été le plus important dans les lacs en aval. D'ailleurs dans ces lacs, plusieurs autres résistances ont été retrouvées de même que des triples résistances. Selon plusieurs auteurs (**Chen et al., 2011; Ribeiro et al., 2012; Machado et Bordalo, 2014**) les niveaux de résistances ont évolué avec l'abondance des souches. Ainsi, les lacs en aval ayant présentés les plus fortes abondances bactériennes, les taux de résistances des bactéries aux antibiotiques y ont été aussi élevés.

Il a été également observé une grande abondance de bactéries résistantes aux antibiotiques dans le lac D aux abords du CHR. Des études ont montré le fait que, les lacs à proximité des établissements hospitaliers contiennent de fortes concentrations d'antibiotiques et de bactéries résistantes aux antibiotiques (**Kumar et Pal, 2018**). Les antibiotiques et leurs métabolites sont présents dans les eaux usées par l'élimination directe des médicaments non utilisés ou l'excrétion humaine et animale (**Bouki et al., 2013**).

Dans les lacs et sur les cultures environnantes, les profils de résistance identifiés ont témoigné d'une grande diversité de la résistance des *E. coli* aux antibiotiques dans l'eau des lacs mais aussi dans l'eau utilisée pour l'arrosage des cultures maraichères de Yamoussoukro. 39,50% des *E. coli* isolés ont été résistants à au moins un des antibiotiques testés et 12,00% ont présentés des résistances multiples. Les niveaux de la résistance aux antibiotiques ont été comparable à ceux d'autres études menées dans certaines villes de la Côte d'Ivoire (**Kouadio et al., 2013; Toé, 2018 ; Koné et al., 2019**). Ils indiquent tous que le problème de la résistance aux antibiotiques est grave, surtout dans les pays en voie de développement.

La plupart des *E. coli* détectés ont été résistants aux b-lactames (Ampicilline et Ciprofloxacine), suivi par les cyclines (tétracycline), les sulfamides (Sulfametoxazole). Ce résultat a été expliqué dans d'autres études. En effet, ces antibiotiques sont vieux et largement utilisés en médecine humaine et vétérinaire (**Jiang et al., 2013; Maal- Bared et al., 2013; Pereira et al., 2013**).

Dans cette étude, nous avons analysé les liens entre les paramètres physicochimiques et la résistance des *E. coli* aux antibiotiques. La fréquence de résistance des *E. coli* aux antibiotiques a montré de fortes corrélations avec les concentrations en nutriments, tel que le carbone organique dissous, l'oxygène dissous et la turbidité. Ce résultat a été similaire aux études en Colombie-Britannique (**Maal-Bared et al., 2013**) et dans le nord de la Chine (**Zhang et al., 2014**). **Blanco et al., (2009)** a démontré dans une étude que l'ajout des concentrations de nutriments a amélioré le transfert horizontal des éléments génétiques de résistance. Les *E. coli* porteurs d'éléments de résistance génétique avaient une viabilité beaucoup plus forte que les souches sensibles sous des concentrations élevées de nutriments, ce qui participe à l'augmentation de la résistance.

Toujours en lien avec les corrélations entre les paramètres physicochimiques et la résistance des *E. coli* aux antibiotiques, aucune relation n'a existé entre la température de l'eau et le pH.

Ces résultats sont différents de ceux de Williams et al. (Williams *et al.*, 1996) qui ont estimé que des températures plus élevées étaient aussi le stimulant pour l'augmentation des taux de transformation naturelle des micro-organismes. Des conditions alcalines contribueraient à fabriquer des antibiotiques dégradés (Doi, 2000; Maal-Bared *et al.*, 2013). Les écarts avec ces études sont peut-être dû au fait que toutes les valeurs de pH de notre étude tirent vers la neutralité (pH=7) et n'ont pas variés au sein des lacs et des saisons. Pour température de l'eau, même si la plage de variation (14,2–22,7°C) est grande, la température la plus basse a pu convenir à la croissance et l'activité des *E. coli*.

De même, dans cette étude, nous avons également constaté des corrélations significatives entre la résistance à la tétracycline, au chloramphénicol et à la ciprofloxacine. Ces fortes corrélations sont probablement les résultats de la co-sélection (Dang *et al.*, 2006). En effet, concernant la tétracycline, les protéines d'efflux ont une structure similaire en acides aminés et en protéines avec d'autres protéines d'efflux, dont le chloramphénicol et la résistance aux quinolones, qui résulte de la résistance simultanée à plusieurs antibiotiques (Chopra et Roberts, 2001). Cela pourrait indiquer qu'un mécanisme analogue de sélection croisée et / ou la co-sélection parmi ces antibiotiques avait eu lieu comme dans les études de (Courvalin et Trieu-Cuot, 2001; Dang *et al.*, 2006; Zhang *et al.*, 2014). De plus, de nombreux gènes de résistance aux antibiotiques sont souvent trouvés sur le même plasmide ou les mêmes éléments génétiques mobiles (Chopra et Roberts, 2001; Roberts, 2005; Carattoli, 2013), ce qui entraîne les corrélations trouvées entre la résistance à différents antibiotiques. Les relations entre certaines variables de la qualité de l'eau et une résistance aux antibiotiques des bactéries a été rapportée par plusieurs études (Maal-Bared *et al.*, 2013; Staley *et al.*, 2015).

La pollution des eaux d'irrigation et la présence de bactéries résistantes aux antibiotiques augmentent les risques pour la santé humaine, les épidémies de sources hydriques étant la plupart du temps associées à la consommation de légumes frais souillés (Painter *et al.*, 2013). Parfois, ces épidémies sont causées par des bactéries résistantes aux antibiotiques (Raphael *et al.*, 2011 ; Allydice-Francis et Brown, 2012). Ainsi les lacs présentant des souches à résistances multiples aux antibiotiques, ils présentent de grands dangers à la pratique des activités maraichères.

**CONCLUSIONS,  
RECOMMENDATIONS  
ET PERSPECTIVES**

---

## CONCLUSION ET PERSPECTIVES

---

Dans l'environnement aquatique, la connaissance des facteurs régissant la survie des coliformes thermotolérants est un point capital en raison d'une part de l'importance de ces bactéries comme indicatrices de pollution fécale et d'autre part, la capacité de certains pathogènes à engendrer des maladies chez l'homme et les animaux.

La présente étude a montré que les lacs renferment des coliformes thermotolérants dont *Escherichia coli* a constitué plus de 75%, dans l'eau et sur les légumes étudiées. L'évolution des charges bactériennes a été influencée par les conditions de survie environnementales. Les propriétés physicochimiques de chacun des lacs ont varié en fonction des conditions du milieu. La fluctuation des charges bactériennes dans les lacs a été liée aux facteurs physicochimiques tel que la turbidité, la matière organique (MO), mais aussi aux changements de saisons et à la position spatiale des lacs. Une forte association entre les niveaux de matière organique et les charges bactérienne a été observée, ce qui suggère que les communautés bactériennes ont été sensibles aux changements des facteurs abiotiques. L'augmentation du nombre d'espèces bactériennes dans les lacs pourrait être due à une disponibilité accrue d'éléments nutritifs dans les lacs.

Pendant les saisons des pluies, les phénomènes d'érosions ont accumulés des polluants situés aux abords des lacs dans ceux-ci par le phénomène de ruissellement. Ces polluants ont été en grande partie transportés de l'amont vers l'aval du système lacustre. Les légumes, en revanche, ont été plus menacés pendant les saisons sèches. En raison de leur position, les lacs en aval ont maintenu les niveaux de pollution les plus élevés pour l'eau et les cultures. Il est donc important, en fonction de ces résultats, de mener des campagnes de sensibilisation sur les risques encourus pendant ces périodes, en ce qui concerne l'utilisation de l'eau du lac ou des légumes.

Les lacs contaminés par des bactéries résistantes aux antibiotiques peuvent présenter un risque pour la santé publique. La diversité au niveau des biotypes peut s'expliquer par le fait que les souches d'origine diverses (animales et humaines) se sont retrouvés dans le milieu sans

traitement préalable. Les bactéries résistantes à plusieurs antibiotiques ont été capables de transférer leurs déterminants résistants entre différents genres dans l'environnement aquatique. Pour prévenir l'épidémie de résistance des bactéries aux antibiotiques, il est nécessaire de sensibiliser les populations sur la présence de ces bactéries dans l'environnement. Les lacs ayant des points de communications, les bactéries peuvent transmettre les gènes de résistances d'une bactérie à l'autre au sein des lacs. Ainsi, la saisonnalité, la position spatiale des lacs et les paramètres physico-chimiques ont montré des liens forts avec la résistance aux antibiotiques des bactéries. En conclusion, la prévalence de la résistance aux antibiotiques d'*E. coli* dans les eaux du système lacustre de Yamoussoukro indique un risque potentiel pour la santé publique. Le contrôle des émissions polluantes et anthropiques pourrait être une méthode efficace pour réduire le niveau de résistance aux antibiotiques.

Avec la croissance démographique, l'augmentation des activités péri-lacustres et de la production de légumes frais, les gestionnaires de risques devront adopter des approches pour prévenir ou contrôler la propagation d'agents pathogènes chez l'homme. Comme recommandations nous préconisons ces mesures.

Les responsables politiques peuvent:

- intégrer la sécurité sanitaire des aliments dans des politiques et des programmes plus vastes
- encourager une manipulation saine des aliments à l'aide de programmes systématiques de prévention des maladies et de sensibilisation, et moyennant les messages et matériels didactiques
- contribuer à l'amélioration des systèmes alimentaires et des cadres juridiques nationaux, ainsi que la mise en œuvre d'infrastructures adaptées pour gérer les risques au regard de la sécurité sanitaire des aliments
- mettre en place et préserver des systèmes et des infrastructures alimentaires adaptés (des laboratoires, par exemple), afin de tenir compte des risques survenant tout au long de la chaîne alimentaire, y compris pendant les situations d'urgence, et de les gérer;
- encourager la collaboration multisectorielle entre les secteurs chargés de la santé publique, de la santé animale, de l'agriculture et autres afin d'améliorer la communication et d'agir conjointement;

- Aussi, les efforts pour relever les défis de la sécurité microbienne dans les légumes nécessiteront le strict respect de bonnes pratiques liées à l'exploitation des eaux. A long terme, les agriculteurs devraient être formés et / ou disposer d'un incitatif économique, d'une législation pour provoquer un changement de comportement et améliorer les pratiques agricoles hygiéniques. A Yamoussoukro, il a été signalé que les agriculteurs n'étaient généralement pas conscients du lien entre les pratiques de sécurité alimentaire et la contamination microbienne des légumes frais.

Le Règlement (CE) 852/2004 définit les exigences de la qualité de l'eau d'arrosage, d'irrigation ou d'immersion des fruits et légumes consommés crus. Conformément à ce règlement, les laboratoires de recherches peuvent

- le chercheur doit effectivement s'assurer qu'elle n'est pas une source de contamination en réalisant des autocontrôles de deux types microbiologiques et moléculaires
- Les prélèvements d'eau doivent être réalisés avant le démarrage du cycle des productions primaires des végétaux
- La fréquence d'analyse doit être adaptée tant au caractère contaminant de la ressource en eau qu'au risque de transfert à la production végétale. Ainsi, soit une fois tous les deux ans si l'eau apportée entre en contact avec des parties des végétaux ingérées à l'état cru (sans transformation) ; de préférence, une fois tous les cinq ans, si la culture est destinée à la transformation ou est consommée après cuisson par le consommateur, en cressiculture, 1 analyse microbiologique est obligatoire tous les ans ou 2 analyses microbiologiques tous les ans en cas de présence de 2 périodes de production.
- Quant à l'analyse physico-chimique, elle doit être réalisée tous les 5 ans.

Les recommandations d'organisations telles que la FAO et l'OMS devraient être adoptées pour orienter les pratiques relatives à l'utilisation de l'eau présentant le moins de risque possible.

Néanmoins ces organismes devrait aider les dirigeants en :

- fournissant des évaluations scientifiques indépendantes sur les risques microbiologiques et chimiques qui constituent le fondement des normes, lignes directrices et recommandations alimentaires internationales, afin de garantir la salubrité des aliments quelle que soit leur provenance;
- évaluant la sûreté des nouvelles technologies utilisées dans la production alimentaire, comme la modification génétique et la nanotechnologie;

- contribuant à l'amélioration des systèmes alimentaires et des cadres juridiques nationaux, ainsi qu'à la mise en œuvre des infrastructures adaptées pour gérer les risques au regard de la sécurité sanitaire des aliments.

Les pratiques agricoles et des consommateurs sont aussi essentiels pour contrôler et prévenir la présence de dangers microbiens.

- Le travailleur agricole doit éviter les comportements risquant d'entraîner une contamination des légumes par exemple fumer, manger, déféquer ou même cracher à proximité des légumes cultivés
- cultiver des légumes plus sûrs afin de réduire la contamination microbienne
- Le constat est que les populations riveraines utilisent le lac comme un réceptacle de déchets (selles, effluents...). De plus, la présence de fermes et d'enclos à proximité de l'eau, peut également expliquer la biocontamination. Il faudrait donc adopter des pratiques plus saines concernant l'utilisation des lacs.
- Le consommateur doit adopter les bonnes pratiques de santé et d'hygiène pour la santé personnelle et pour la salubrité des aliments
- L'importance de laver les légumes et les conserver dans des récipients salubres est aussi à adopter dans les habitudes du quotidien
- Aussi à Yamoussoukro, l'agriculture maraichère devrait pourrait être davantage pratiquée en amont du système lacustre plutôt qu'en aval.

Des études ultérieures en vue d'évaluer la possibilité d'une résistance croisée entre les souches à résistance aux antibiotiques pourraient être menées. Les mécanismes associés à cette résistance ne sont pas bien caractérisés. Les futures études devraient examiner ces mécanismes et également déterminer les risques potentiels associés à l'ingestion d'autres organismes vivants dans les lacs tels que les poissons, et à d'autres expositions aux bactéries résistantes aux antibiotiques attachés à certains sédiments lacustres.

**REFERENCES**

**BIBLIOGRAPHIQUES**

---

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

- Abakou, J., Brou, K. (2003).** Analyse des systèmes de production et de commercialisation des cultures maraîchères dans la commune de Yamoussoukro. Mémoire du Diplôme d'Ingénieurs des Techniques Agricoles, Ecole de Formation Continue et Perfectionnement des Cadres (EFCPC) de Yamoussoukro, 71.
- Abba E., Nassali H., Benabid M., El Ayadi R., El Ibaoui H (2008)** – Contribution à l'étude physicochimique de l'écosystème lacustre Dayet Aoua au Maroc. *Afrique Science*, 04 (2): 306 - 317.
- Abbaszadegan, M., Monteiro, P., Nwachuku, N., Alum, A., Ryu, H. (2008).** Removal of adenovirus, calicivirus, and bacteriophages by conventional drinking water treatment. *Journal of Environment and Sciences Health Part A Toxic Hazard*, 43(2): 171–177.
- Abdo, M.H., Sabae, S.Z., Haroon, B.M., Refaat, B.M., Mohammed, A.S., (2010).** Physico-chemical characteristics, microbial assessment and antibiotic susceptibility of pathogenic bacteria of Ismailia canal water, River Nile, Egypt. *Journal of American Science*, 6 (5): 234-250.
- Abril, G., Commarieu, M-V., Maro, D., Fontugne, M., Guerin, F., Etcheber H., (2004).** A massive dissolved inorganic carbon release at spring tide in a highly turbid estuary. *Geophysical research letters*, 31: 93-116, doi: 10.1029/2004GL019714.
- Adama E., Michel G., (2004).** La filière des produits horticoles en Côte d'Ivoire. *Diagnostic, objectifs et perspectives*, p.167.
- Adiko F. A., Barbara M., Guéladio C., Bassirou B., Marcel T., Jürg U. (2010).** Relation entre le capital humain des maraîchers urbains et leurs comportements de prévention des risques sanitaires sur les sites de culture à Abidjan (Côte d'Ivoire). *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement*, 10 (2): 2-10

- Adingra AA, Sako A, Kouassi AM. (2010).** Qualité bactériologique des eaux de surface de la rivière Banco, Abidjan, Cote d'Ivoire. *F. Tech. Doc. Vulg.*: 37-42(2010)
- Adopo K. L., Kouakou L. K., Ama V. I. W., Sylvain M., et Kouamé A. (2008)** - Spatial Distribution and Characterisation of the Sediments of the Estuary of Comoe River (Grand-Bassam, Côte d'Ivoire). *European Journal of Scientific Research*, 20 (4) : 817-827.
- Affou, Y.; Tano, K. (1991).** La boucle du cacao en Côte d'Ivoire : une situation migratoire inversée In *Migration, changements sociaux et développement*. Quesnel, A., Vimard, P. Eds.; ORSTOM: Paris, pp 307–315.
- Agossou G.-T., Aklesso Y. G. Egbendewe; Georges A. A. (2016)** Assessing the impact of climate change on smallholder farmers' crop net revenue in Togo. *Journal of Agriculture and Environment for International Development-JAEID*, 110 (2): 229-248 doi: 10.12895/jaeid.20162.453
- Ahmadi-Nedushan B., St-Hilaire A., Ouarda T.B.M.J., Bilodeau L., Robichaud E., Thiémonge N., Bobée B. (2007).** Predicting River Water Temperatures Using Stochastic Models: Case Study of the Moisie River (Québec, Canada), *Hydrological Processes*, 21(1): 21-34.
- Akaninwor, J.O., Anosike, E.O., Egwim, O., (2007).** Effect of indomie industrial effluent discharge on microbial properties of new Calabar River. *Science Ressources*. 2 (1): 1–5.
- Allen, H.K., Donato, J., Wang, H.H., Cloud-Hansen, K.A., Davies, J., Handelsman, J., (2010<sup>a</sup>).** Call of the wild: antibiotic resistance genes in natural environments. *Nature Reviews Microbiology*. 8 (4), 251–259.
- Allen, M.J., Payment, P., Clancy, J.L. (2010<sup>b</sup>).** Rapid microbial methods can improve public health protection. *Journal American of Water Works Association*. 102(8): 44-51.
- Allison, S.D., Martiny, J.B.H., (2008).** Resistance, resilience, and redundancy in microbial communities. *Proceeding National Academical Sciences U. S. A.* 105, 11512–11519.

- Allydice-Francis, K., Brown, P.D., (2012).** Diversity of antimicrobial resistance and virulence determinants in *Pseudomonas aeruginosa* associated with fresh vegetables. *International Journal of Food Microbiology*. 42: 623-641. doi : 10.1155/2012/426241..
- Aloko-N'Guessan, J.; Djako, A.; N'Guessan, K.G. (2014).** Crise de l'économie de plantation et modification du paysage agricole dans l'ancienne boucle du cacao: l'exemple de Daoukro. *European Scientific Journal*, 10 (5): 308–326.
- Alspach, B., Delphos, P., Pressman, J., Beaty, J., Cooke, T., Voutchkov, N., Schaefer, J., Noack, R., Marascia, F., Konstanski, D. (2014).** Metrics and methods for MF/UF system optimization. . Dans : Proceedings of the Membrane Technology Conference. American Water Works Association, Denver, *Colorado Applied Spectroscopy*. 68: 633-641. doi: 10.1366/13-07337.
- Amadji G. L. (2012).** Valorisation des ordures ménagères par la production du chou pommé sur sol sableux du littoral. *Thèse de doctorat* Laboratoire de Science du Sol, Faculté des Sciences Agronomiques, Université d'Abomey-Calavi, Cotonou, Bénin. 99 p.
- Amiot-Carlin M.J., F. Caillavet, M. Causse, P. Combris, J. Dallongeville, M. Padilla, C. Renard, L.G. Soler, (2007).** Les fruits et légumes dans l'alimentation. Enjeux et déterminants de la consommation. Expertise scientifique collective, *synthèse du rapport*, INRA (France), 80 p.
- Amoah, P., Drechsel, P., Abaidoo, R. C., Henseler, M. (2007).** Irrigated urban vegetable production in Ghana: microbiological contamination in farms and markets and associated consumer risk groups. *Journal of Water and Health*,41: 5-13. doi: 10.2166/wh.2007.041
- ANADER [(Agence Nationale d'Appui au Développement Rural)] (2004).** Rapport de présentation de l'enquête sur le développement de l'horticulture urbaine et périurbaine de Yamoussoukro, p. 21.

- ANADER [(Agence Nationale d'Appui au Développement Rural)] (2018).** Les producteurs de maraîchers formés aux bonnes pratiques agricoles à Yamoussoukro. *Agence Ivoirienne de Presse*, 22 Fevrier 2018.
- Anastasi, E. M., Matthews, B., Stratton, H.M., Katouli, M., (2012).** Pathogenic *Escherichia coli* found in sewage treatment plants and environmental waters. . *Journal of Applied and Environmental Microbiology*. 78:5536-5541.
- Andersson, D. I., Hughes, D. (2010).** Antibiotic resistance and its cost: is it possible to reverse resistance? *Nature Reviews Microbiology* 8:260-271.
- Anoman, T. M., Voko R., D., Bi, R., Zeze, A. (2019).** Spatial and temporal dynamics of coliform contamination within Yamoussoukro lakes water in Côte d' Ivoire : impact on the safety of surrounding vegetable cropping. *Microbiology and Nature*, 1:29-43. <http://doi.org/10.26167/6N8H-BE22>
- Antoine VILLA (2018).** Dioxines, Effets toxiques résultant d'expositions professionnelles ou environnementales. Centre Antipoison Consultation de pathologies professionnelles Hôpital Fernand Widal Paris. [http://www.centres-antipoison.net/paris/DIU\\_Tox\\_Med\\_2017\\_2018/20180216/DIU\\_Tox\\_Med\\_2017\\_18\\_A\\_Villa\\_Dioxines.pdf](http://www.centres-antipoison.net/paris/DIU_Tox_Med_2017_2018/20180216/DIU_Tox_Med_2017_18_A_Villa_Dioxines.pdf)
- APHA/AWWA/WEF [(American Public Health Association/American Water Works Association/Water Environment Federation)]. (2015).** Standard methods for the examination of water and wastewater, Washington, DC. 21ème édition.
- Araujo, S., Silva I., A.T., Tacao, M., Patinha, C., Alves, A., Henriques, I., (2017).** Characterization of antibiotic resistant and pathogenic *Escherichia coli* in irrigation water and vegetables in household farms *International Journal of Food Microbiology*. 257, 192–200
- Armon, R.H., Hanninen, O. (2015):** Indicators of waterborne viruses. Dordrecht, Pays-Bas *Environmental indicators*. Springer, 35: 12-27.

- Ashbolt, N.J., Grabow, W.O.K., Snozzi, M. (2011).** Indicators of microbial water quality: Water quality: guidelines, standards and health--assessment of risk and risk management for water-related infectious disease. *IWA Publishing, London, UK*, 10: 289-315.
- Aslan, A., Cole, Z., Bhattacharya, A., Oyibo, O. (2018).** Presence of Antibiotic-Resistant *Escherichia coli* in Wastewater Treatment Plant Effluents Utilized as Water Reuse for Irrigation. *Water*, 10(6), 805. <http://doi.org/10.3390/w10060805>
- Assemian, E.A.; Kouame, F.K.; Djagoua, É.V.; Affian, K.; Jourda, J.P.R.; Adja, M.; Lasm, T.; Biemi, J (2013).** Étude de l'impact des variabilités climatiques sur les ressources hydriques d'un milieu tropical humide. *Revue des sciences de l'eau*, 26 (3) : 247. doi: 10.7202/1018789ar.
- Atinkpahoun, C. N., Soclo, H. H., Pons, M. N., Leclerc, J. P. (2018).** Physico-chemical characterization of domestic wastewaters in the " Vie-Nouvelle" agglomeration, Cotonou, Benin. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 12(1), 542-557.
- Aubriot J. (2007)** - Le Droit à l'eau, émergence, définition, situation actuelle et position des acteurs, Département Technique Service EAH, ACF-France. 94 p.
- Aw S. (2009).** Etudes physico-chimiques et microbiologiques d'un système lacustre tropical: cas des lacs de Yamoussoukro (Côte d'Ivoire), Thèse de doctorat, Université de Poitiers, Poitier, France, 234 pp.
- Aw S., N'goran E. B. Z., Siaka S., Parinet B. (2011).** - Intérêt de l'analyse multidimensionnelle pour l'évaluation de la qualité physico-chimique de l'eau d'un système lacustre tropical : cas des lacs de Yamoussoukro (Côte d'Ivoire), *Journal of Applied Biosciences*, 38 : 2573-2585.
- Bach, T. T. H. (2010).** Évolution physico-chimique des liants bas PH hydrates: Influence de la température et mécanisme de rétention des alcalins (Doctoral dissertation).

- Bakenou H. (2011)** - Gestion des effluents d'assainissement autonome et pollutions des eaux au Togo : cas de la Ville de Lome, *Master International*, Université de Lomé, Togo. 135 p.
- Baral, D., Speicher, A., Dvorak, B., Admiraal, D., Li, X., (2018).** Quantifying the relative contributions of environmental sources to the microbial community in an urban stream under dry and wet weather conditions. *Applied and Environmental Microbiology*, 84: 1–13. doi:10.1128/AEM.00896-18.
- Barrat, J.-M. (2012).** Changements climatiques en Afrique de l’Ouest et Conséquences sur les eaux souterraines; 13; OSS-GICRESAIT.
- Bartram, J., S. Cairncross, (2010).** Hygiene, sanitation, and water: forgotten foundations of health. *PLoS Medecine*.7 (11): 9-25.
- Batz, M., Hoffmann, S., Morris, J.G, (2014).** Disease-Outcome Trees, EQ-5D Scores, and Estimated Annual Losses of Quality-Adjusted Life Years (QALYs) for 14 United States. *Foodborne Pathogens and Disease*, 11(5): 19-35. doi : 10.1089/fpd.2013.1658.
- Bauer, A.W., Kirby, W.M., Sherris, J.C., Turck, M., (1966).** Antibiotic susceptibility testing by a standardized single disk method. *American Journal of Clinical Pathology*, 45 (4), 493–496.
- Behrsing, J., Winkler, S., Franz, P., Premier, R. (2016).** Efficacy of chlorine for inactivation of *Escherichia coli* on vegetables. *Postharvest Biology and Technology*, 19: 187–192.
- Bellou, M.I., Syngouna, V.I., Tselepi, M.A., Kokkinos, P.A., Paparrodopoulos, S.C., Vantarakis, A., Chrysikopoulos, C.V. (2015).** Interaction of human adenoviruses and coliphages with kaolinite and bentonite. *Sciences of Total Environment*, 517: 86–95.
- Ben Abbou M., Fadil F. El Haji M. (2014)** - Évaluation de la qualité des cours d’eau de la ville de Taza utilisés dans l’irrigation des cultures maraîchères (Maroc). *Journal of Applied Biosciences*, 77 : 6462– 6473.

- Bengherbia A., Hamaidi F., Zahraoui R., Hamaidi M. S., Megateli S. (2012).** - Impact des rejets des eaux usées sur la qualité physico-chimique et bactériologique de l'oued Beni Aza (Blida,Algérie), *Lebanese Science Journal*, 15 (2): 30-51.
- Benhin, J.K.A.; Barbier, E.B. (2004).** Structural Adjustment Programme, deforestation and biodiversity loss in Ghana. *Environmental and Resource Economics*, 27 (3): 337–366. doi: 10.1023/B:EARE.0000017653.15107.0f.
- Bennett, S. D., Littrell, K. W., Hill, T. A., Mahovic, M., Behravesh, C. B. (2015).** Multistate foodborne disease outbreaks associated with fresh tomatoes, United States, 1990–2010: a recurring public health problem. *Epidemiology and Infection*. 143 : 1352–1359. doi: 10.1017/S0950268814002167
- Bentley, R., Bennett, J.W. (2003)** « What is an Antibiotic? Revisited », *Advances in applied microbiology*, vol. 52, p. 303-331
- Benyahya L. (2007)** - Modélisation statistique de la température de l'eau en rivière et en régime non-hivernal. *Thèse de Doctorat* en sciences de l'eau, Université du Québec. 175 p.
- Berger B. (2013).** Performance environnementale des circuits courts : la perception de la dimension environnementale des producteurs en circuits courts. *CIVAM Bretagne*. 16 p.
- Bertani, G. (1951).** Studies on lysogenesis. I. The mode of phage liberation by lysogenic *Escherichia coli*. *Journal of Bacteriology*, 62:293-300.
- Bertani, G. (2004).** Lysogeny at mid-twentieth century: P1, P2, and other experimental systems. *Journal of Bacteriology*, 186:595-600.
- Betatache, H., Aouabed, A., Drouiche, N., Lounici, H. (2014).** Conditioning of sewage sludge by prickly pear cactus (*Opuntia ficus Indica*) juice. *Ecological Engineering*, 70, 465-469.
- Beuchat, L.R., (2002).** Ecological factors influencing survival and growth of human pathogens on raw fruits and vegetables. *Microbes and Infection* 4: 413-423.

- Bigot, S. (2005).** Variabilité climatique, interactions et modifications environnementales : l'exemple de la Côte d'Ivoire; Université des Sciences et Technologies de Lille: Lille, France.
- Bigot, S.; Brou, T.Y.; Oszwald, J.; Diedhiou, A (2005).** Facteurs de la variabilité pluviométrique en Côte d'Ivoire et relations avec certaines modifications environnementales. *Sécheresse*, 16 (1) : 5–13.
- Bilotta, G.S. Brazier, R.E., (2008).** Understanding the influence of suspended solids on water quality and aquatic biota. *Water research*, 42: 2849–2861. doi:10.1016/j.watres.2008.03.018.
- Birnboim, H. C., Doly, J. (1979).** A rapid alkaline extraction procedure for screening recombinant plasmid DNA. *Nucleic Acids Research*, 7(6), 1513-1523. <http://doi.org/10.1093/nar/7.6.1513>
- Blanch A.R., Galofré, B., Lucena, F., Terradillos, A., Vilanova, X., Ribas, F. (2007).** Characterization of bacterial coliform occurrences in different zones of a drinking water distribution system. *Journal of Applied Microbiology*, 102:711-721.
- Blanco, M., Schumacher, S., Tasara, T., Zweifel, C., Blanco, J. E., Dahbi, G. (2015).** Serotypes, intimin variants and other virulence factors of eae positive *Escherichia coli* strains soucheed from healthy cattle in Switzerland. Identification of a new intimin variant gene (eae-eta2). *BMC Microbiology*, 5(23) 1471-14880. <http://doi.org/10.1186/1471-2180-5-23>
- BNETD [(Bureau National d'Etudes Techniques et de Développement)] (2007).** Atlas des Villes (Abengourou, Abidjan, Bondoukou, Bouaké, Daloa, Korhogo, Man, Odienné, San-Pédro, Yamoussoukro), 137p.
- Bonilla, J.A., Bonilla, T.D., Abdelzaher, A.M., Scott, T.M., Lukasik, J., Solo-Gabriele, H.M., Palmer, C.J. (2015).** Quantification of protozoa and viruses from small water volumes. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 12(7): 7118– 7132.

- Bony Y. K. (2016)** - Biodiversité et écologie des mollusques gastéropodes en milieu continental ivoirien (bassins de la Mé, de l'Agnéby et du Banco). Traits d'histoire de vie d'une espèce invasive *Indoplanorbis bissexatus*. *Deshayes*, 1834. 215 p.
- Bouki, C., Venieri, D., Diamadopoulos, E., (2013).** Detection and fate of antibiotic resistant bacteria in wastewater treatment plants: a review. *Ecotoxicology Environment Safety*. 91, 1–9. doi.10.1016/j.ecoenv.2013.01.016.
- Brandt, M.; Rasmussen, K.; Peñuelas, J.; Tian, F.; Schurgers, G.; Verger, A.; Mertz, O.; Palmer, J.R.B.; Fensholt, R. (2017).** Human population growth offsets climate-driven increase in woody vegetation in sub-Saharan Africa. *Nature Ecology and Evolution*, 1 (4): 0081. doi: 10.1038/s41559-017-0081.
- Bush, K., G. A. Jacoby. (2010).** Updated functional classification of beta-lactamases. *Antimicrobial Agents Chemother* 54:969-976.
- Byappanahalli M.N., Whitman, R.L., Shively, D.A., Sadowsky, M.J., Ishii, S. (2006).** Population structure, persistence, and seasonality of autochthonous *Escherichia coli* in temperate, coastal forest soil from a Great Lakes watershed. *Environment Microbiology*, 8(3): 504-513.
- Calderon, V. E., Q. Chang, M. McDermott, M. B. Lytle, G. McKee, K. Rodriguez, D. A. Rasko, V. Sperandio, A. G. Torres. (2011).** Outbreak caused by cad-negative Shiga toxin-producing *Escherichia coli* O111, Oklahoma. *Foodborne Pathogenic Diseases*, 7:107-109.
- Callejon, R. M., Rodriguez-Naranjo, M. I., Ubeda, C., Hornedo-Ortega, R., Garcia-Parrilla, M. C., Troncoso, A. M. (2015).** Reported foodborne outbreaks due to fresh produce in the United States and European Union: Trends and causes. *Foodborne Pathogens and Disease*, 12(1): 32-38. doi: 10.1089/fpd.2014.1821.
- Camenen, B., Naudet, G., Dramais, G., Le Coz, J., Paquier, A. (2019).** A multi-technique approach for evaluating sand dynamics in a complex engineered piedmont river system. *Science of The Total Environment*, 657: 485-497.

**Carr G M. et J.P. Neary (2008).** Water Quality for Ecosystem and Human Health. United Nations Environment Programme (UNEP), *Global Environment Monitoring System/Water Programme*, 2nd Edition, 130p.

**Castro-Rosas, J., Cerna-Cortes, J. F., Mendez-Reyes, E., Lopez-Hernandez, D., Gomez-Aldapa, C. A., Estrada-Garcia, T. (2012).** Presence of faecal coliforms, *Escherichia coli* and diarrheagenic *Escherichia coli* pathotypes in ready-to-eat salads, from an area where crops are irrigated with untreated sewage water. *International Journal of Food Microbiology*, 156(2): 176-180. doi : 10.1016/j.ijfoodmicro.2012.03.025. Epub 2012 Mar 30

**CCNUCC [(Convention Cadre des Nations unies sur les Changements Climatiques)] (1992).** Organisation des Nations Unies: New York City, USA.

**CDC [(Centers for Disease Control and Prevention)] (2007).** Multistate outbreaks of *Salmonella* infections associated with fresh tomatoes eaten in restaurants-United States, 2005-2006. *Morbidity and Mortality Weekly Report*. 56: 909–911.

**CDC [(Centers for Disease Control and Prevention)] (2013).** Surveillance for waterborne disease outbreaks associated with drinking water and other non-recreational water-United States, 2009-2010. *Morbidity and Mortality Weekly Report*, 62(35): 714–720.

**CEP [(Centre d'Etudes et de Prospective)]. (2014).** Consommations et pratiques alimentaires durables : analyse de données nationales issues d'enquêtes d'opinion. Paris: CEP. *Analyse*: 69p.

**Chappell, A.; Agnew, C.T (2004).** Modelling climate change in West African Sahel rainfall(1931–90) as an artifact of changing station locations. *International Journal of Climatology*, 24 (5): 547–554. doi: 10.1002/joc.1021.

**Charbit, Y., Maryse G., (2015)** « Mortalité et santé », La bombe démographique en question. *Presses Universitaires de France*, pp. 63-123.

- Chase, J. A., Partyka, M. L., Bond, R. F., Atwill, E. R. (2019).** Environmental inactivation and irrigation-mediated regrowth of *Escherichia coli* O157:H7 on romaine lettuce when inoculated in a fecal slurry matrix. *Peer Journal* 7: 65-91. doi :10.7717/peerj.6591
- Chen, Z., Yu, D., He, S., Ye, H., Zhang, L., Wen, Y., Chen, S. (2017).** Prevalence of Antibiotic-Resistant *Escherichia coli* in Drinking Water Sources in Hangzhou City. *Frontiers in Microbiology*. <http://doi.org/10.3389/fmicb.2017.01133>
- CHR [(Centre Hospitalier Régional)] (2014).** Annuaire épidémiologique, service statistique de la Direction Départementale de la Santé de Yamoussoukro, *Synthèse de données épidémiologiques, rapport*. 73 p.
- Cirelli, G.L., Consolia, S., Licciardello, F., Aiello, R., Giuffrida, F., Leonardi, C., (2012).** Treated municipal wastewater reuse in vegetable production. *Agricultural Water Manage.* 104, 163–170.
- Cissé G., Tanner M. (2002)** - De la recherche au développement durable: l'agriculture urbaine à Nouakchott (Mauritanie) et à Ouagadougou (Burkina Faso). *Bioterre N° Spécial*. pp. 192-201.
- Cissé, G.; Koné, B.; Bâ, H.; Mbaye, I.; Koba, K.; Utzinger, J.; Tanner, M. (2011).** Ecohealth and Climate Change: Adaptation to Flooding Events in Riverside Secondary Cities, West Africa In *Resilient Cities*. doi: 10.1007/978-94-007-0785-6\_6; Springer Netherlands: Dordrecht, pp 55–67.
- Clermont, O., M. Olier, C. Hoede, L. Diancourt, S. Brisse, M. Keroudean, J. Glodt, B. Picard, E. Oswald, E. Denamur (2011).** Animal and human pathogenic *Escherichia coli* strains share common genetic backgrounds. *Infections Genetic Evolution* 11:654-662.
- Cloeckaert, A., K. Praud, B. Doublet, A. Bertini, A. Carattoli, P. Butaye, H. Imberechts, S. Bertrand, J. M. Collard, G. Arlet, F. X. Weill. (2007).** Dissemination of an extended-spectrum- beta-lactamase blaTEM-52 gene-carrying IncII plasmid in various

*Salmonella enterica* serovars soucheed from poultry and humans in Belgium and France between 2001 and 2005. *Antimicrobial Agents Chemother* 51:18-25.

**CLSI [(Clinical and Laboratory Standards Institute)] (2009<sup>a</sup>).** Performance standards for antimicrobial disk susceptibility tests; approved standard-tenth edition. . CLSI document M02-A10. CLSI, Wayne, PA.

**CLSI [(Clinical and Laboratory Standards Institute)] (2009<sup>b</sup>).** Performance standards for antimicrobial testing; 19th informational supplement. . Document M100-S19. CLSI, Wayne, PA.

**Compaoré, E, L.S. Nanema, S. Bonkougou, M.P. Sedogo, (2010).** Évaluation de la qualité de composts de déchets urbains solides de la ville de Bobo-Dioulasso, Burkina Faso pour une utilisation efficiente en agriculture. *Journal of Applied Biosciences*, 33:2076 – 2083

**Connolly-Boutin, L.; Smit, B. (2016)** Climate change, food security, and livelihoods in sub-Saharan Africa. *Regional Environmental Change*, 16 (2): 385–399. doi: 10.1007/s10113-015-0761-x.

**Constantin de Magny, G.; Guégan, J.-F.; Petit, M.; Cazelles, B. (2007).** Regional-scale climate-variability synchrony of cholera epidemics in West Africa. *BMC Infectious Diseases*, 7 (1): 20. doi: 10.1186/1471-2334-7-20.

**Cook, K.L., Bolster, C.H. (2007).** Survival of *Campylobacter jejuni* and *Escherichia coli* in groundwater during prolonged starvation at low temperatures. *Journal of Applied of Microbiology*, 103: 573-583.

**Corsi, S.R., Borchardt, M.A., Spencer, S.K., Hughes, P.E.; Baldwin, A.K. (2014).** Human and bovine viruses in the Milwaukee River watershed: Hydrologically relevant representation and relations with environmental variables. *Sciences of Total Environment*, 490: 849–860.

**Coulibaly, G.; Ouattara, M.; Dongo, K.; Hürlimann, E.; Bassa, F.K.; Koné, N.; Essé, C.; Yapi, R.B.; Bonfoh, B.; Utzinger, J.; Raso, G.; N’Goran, E.K. (2018).** Epidemiology

of intestinal parasite infections in three departments of south-central Côte d'Ivoire before the implementation of a cluster-randomised trial. *Parasite Epidemiology and Control*, 3 (2): 63–76. doi: 10.1016/j.parepi.2018.02.003.

**Coulibaly-Kalpy, J., Agbo, E. A., Dadie, T. A., Dosso, M. (2017).** Microbiological quality of raw vegetables and ready to eat products sold in Abidjan (Cte d'Ivoire) markets. *African Journal of Microbiology Research*, 11(5), 204-210.

**Croxen, M. A., Finlay B. B. (2010).** Molecular mechanisms of Eschérichia coli pathogenicity. *Nature Revue of Microbiology*, 8:26-38.

**CUN/INRSP [(Communauté Urbaine de Nouakchott/Institut National de Recherche en Santé Publique)] (2009).** Évaluation de la qualité physico-chimique et bactériologique de l'eau des différents circuits d'approvisionnement à Nouakchott (Mauritanie). *Rapport d'étude*, Nouakchott, novembre, 25p.

**Dai, A.; Lamb, P.J.; Trenberth, K.E.; Hulme, M.; Jones, P.D.; Xie, P (2004).** The recent Sahel drought is real. *International Journal of Climatology*, 24 (11): 1323–1331. doi: 10.1002/joc.1083.

**Danyluk, M. (2013).** Produce and irrigation water quality: are EPA standards appropriate for fresh produce application. International Association for Food Protection (IAFP) Annual Meeting Abstracts. 102: S1–S2.

**De Nicola E, Aburizaiza OS, Siddique A, Khwaja H, Carpenter DO. (2015).** Climate change and water scarcity: The case of Saudi Arabia. *Annals of Global Health*, 81(3): 342–353. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aogh.2015.08.005>.

**De Oliveira, M. A., De Souza, V. M., Bergamini, A. M. M., De Martinis, E. C. P. (2011).** Microbiological quality of ready-to-eat minimally processed vegetables consumed in Brazil. *Food Control*, 22(8): 1400-1403. doi : 10.1016/j.foodcont.2011.02.020

**Dèdjiho, C. A., Mama, D., Tomètin, L., Nougbodé, I., Chouti, W., Sohounhloué, C. K. D., Boukari, M. (2013).** Évaluation de la qualité physico-chimique de certains tributaires d'eaux usées du lac Ahémé au Bénin. *Journal of Applied Biosciences*, 70(1), 5608-5616.

- Derwich, E., Beziane, Z., Benaabidate, L., Belghyti, D. (2008).** Evaluation de la qualité des eaux de surface des Oueds Fès et Sebou utilisées en agriculture maraîchère au Maroc. *LARHYSS Journal* P-ISSN 1112-3680/E-ISSN 2602-7828, (7).
- Devleesschauwer, B., Marvasi, M., Giurcanu, M. C., Hochmuth, G. J., Speybroeck, N., Havelaar, A. H., (2017).** High relative humidity pre-harvest reduces post-harvest proliferation of Salmonella in tomatoes. *Food Microbiology*. 66: 55–63. doi: 10.1016/j.fm.2017.04.003
- Diwan, V., Tamhankar, A. J., Khandal, R. K., Sen, S., Aggarwal, M., Marothi, Y., Stålsby-Lundborg, C. (2010).** Antibiotics and antibiotic-resistant bacteria in waters associated with a hospital in Ujjain, India. *BMC Public Health*, 10(1), 414. <http://doi.org/10.1186/1471-2458-10-414>
- Dorner, S.M., Anderson, W.B., Gaulin, T., Candon, H.L., Slawson, R.M., Payment, P., Huck, P.M. (2007).** Pathogen and indicator variability in a heavily impacted watershed. *Journal of Water and Health*, 5: 241-257.
- Dosani Sabina (2005).** Penicillin Man: Alexander Fleming and the Antibiotic Revolution: *British Medical Journal*, 7481 330: 50.
- Dosso Mireille, Coulibaly M., Kadio A., (1998).** Place des diarrhées bactériennes dans les pays en développement. *Bulletin de la Société de pathologie exotique* 5: 402–405.
- Dougnon, T. V., Bankolé, H. S., Klotoé, J. R., Legonou, M., Dougnon, T. J., Dadié, T. A., Boko, M. (2014).** Digestion en anaérobiose des fientes de poulets: impacts sur la qualité microbiologique des feuilles de Solanum macrocarpon Linn (Solanaceae) cultivé au Bénin [Anaerobic digestion of poultry manure: impact on the microbiological quality of leaves of Solanum macrocarpon Linn (Solanaceae) produced in Benin]. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 5(3), 241.
- Dovonou E. F. (2008)** - La pollution des plans d'eau au Bénin, mémoire de thèse, Université d'Abomey-calavi (Bénin), *Mémoire de thèse*, Université de Cotonou, Benin. 147 p.

- Dovonou F., Aina M., Boukari M. et Alassane A. (2011).** Pollution physico-chimique et bactériologique d'un écosystème aquatique et ses risques écotoxicologiques : cas du lac Nokoué au Sud Benin, *International journal of Biological and Chemical Sciences* 5 (4) : 1590-1602.
- Drayna, P., McLellan, S.L., Simpson, P., Li, S-H., Gorelick, M.H. (2010).** Association between rainfall and pediatric emergency department visits for acute gastrointestinal illness. *Environmental Health Perspectives*, 118(10) : 1439– 1443.
- Drouet, E. (2019).** Changement climatique : quels effets sur notre santé ? In *Encyclopédie de l'Environnement*.
- Druyan, L.M (2011).** Studies of 21st-century precipitation trends over West Africa. *International Journal of Climatology*, 31 (10): 1415–1424. doi: 10.1002/joc.2180.
- Dupont, J. (2014).** La problématique des lacs acides au Québec. Ministère de l'Environnement, Direction du suivi de l'état de l'environnement, 18 p. [http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/eau/eco\\_aqua/lacs\\_acides/2014/lacs-acides-Qc.pdf](http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/eau/eco_aqua/lacs_acides/2014/lacs-acides-Qc.pdf).
- ECDC [(European Centre for Disease Prevention and Control)]. (2015).** Leptospirosis. Annual epidemiological report for 2015. <http://ecdc.europa.eu/sites /portal/files /documents/AER for 2015-leptospirosis.pdf>
- ECOWAS-SWAC/OECD, (2008).** Climate and Climate Change In *Atlas on Regional Integraion in West Africa*. Environment; ECOWAS-SWAC/OECD: Abuja, Nigeria, p 24.
- Edberg S.C., Rice, E.W., Karlin, R.J., Allen, M.J. (2010).** Eschérichia coli: the best biological drinking water indicator for public health protection. *Journal of Applied Microbiology*, 88: 106S-116S.
- Effler, P.; Isaäcson, M.; Arntzen, L.; Heenan, R.; Canter, P.; Barrett, T.; Lee, L.; Mambo, C.; Levine, W.; Zaidi, A.; Griffin, P.M. (2001).** Factors contributing to the emergence of Escherichia coli O157 in Africa. *Emerging Infectious Diseases*. 7 (5): 812–819. doi: 10.3201/eid0705.017507.

**El-Amier, Y., Zahran M. Al-Mamory, S. (2015).** Assessment the Physico-Chemical Characteristics of Water and Sediment in Rosetta Branch, Egypt. *Journal of Water Resource and Protection*, 7: 1075-1086. doi:10.4236/jwarp.2015.713088.

**Elkhatat, A.M., Sadek, M.A., Salem, W.M. Elshahat, M.F. (2013).** Impacts of Dams on the Chemical and Isotopic Properties of Damietta Branch of River Nile. *Journal of Environmentally Friendly Processes*, 1 : 1-13. doi: 10.14266/jefp11-2

**EPENAC [(Evaluation des Procédés Nouveau Pour l'Assainissement des Collectivités)]. (2015).** Elements de methode pour la definition des niveaux de rejets du petit collectif. En association avec l'Agences de l'eau, la DDT, la SATESE, l'IRSTEA, l'ONEMA, la MEDDE, Ministère de la Santé. [https://epnac.irstea.fr/wp-content/uploads/2016/05/Element-de-methode-pour-la-definition-des-niveaux-de-rejet-du-petit-collectif\\_vf.pdf](https://epnac.irstea.fr/wp-content/uploads/2016/05/Element-de-methode-pour-la-definition-des-niveaux-de-rejet-du-petit-collectif_vf.pdf)

**Équiterre. (2016).** Fermes maraîchères. Équiterre, section Fiches d'information. <http://www.equiterre.org/fiche/fermes-maraicheres>

**EUCAST [(European Committee on Antimicrobial Susceptibility Testing)] (2017).** Recommandation 2017.

**EUCAST [(European Committee on Antimicrobial Susceptibility Testing)] (2017).** The Breakpoint Tables for Interpretation of MICs and Zone Diameters. Available online: [https://www.sfm-microbiologie.org/wp-content/uploads/2018/12/CASFMV2\\_SEPTEMBRE2018.pdf](https://www.sfm-microbiologie.org/wp-content/uploads/2018/12/CASFMV2_SEPTEMBRE2018.pdf).

**EUROFINS IPL Nord SAS (2010).** Milieu COMPASS® cc Agar pour la recherche et le dénombrement des Eschérichia coli et des bactéries coliformes dans les eaux destinées à la consommation humaine

**FAO [(Food and Agriculture Organisation of the United Nations)] (2008).** Contributing to “One World, One Health”. A strategic framework for reducing risks of infectious diseases at the animale humane ecosystems interface. <https://ftp.fao.org/docrep/fao/011/aj137e/aj137e00.pdf>

- FAO [(Food and Agriculture Organisation of the United Nations)] (2012).** On-farm practices for the safe use of wastewater in urban and peri-urban horticulture. A training handbook for farmer field schools. <http://www.fao.org/docrep/016/i3041e/i3041e.pdf>.
- FAO [(Food and Agriculture Organisation of the United Nations)]. (2009).** Rapport national sur l'état des ressources phylogénétiques pour l'alimentation et l'agriculture. État des ressources phylogénétiques pour l'alimentation et l'agriculture: *Second rapport national*. <http://www.fao.org/3/i1500e/Cote%20Ivoire.pdf>
- FAO/WHO [(Food and Agriculture Organisation of the United Nations/World Health Organization of the United Nations)] (2017).** Microbiological hazards in fresh leafy vegetables and herbs. *Meeting report*. <http://www.fao.org/3/a-i0452e.pdf> .
- Faour-Klingbeil D.; Ewen C., David T., Victor K. (2016<sup>b</sup>).** Microbiological quality of ready-to-eat fresh vegetables and their link to food safety environment and handling practices in restaurants, *Food Science and Technology*. 73 : 129-133 doi: 10.1016/j.lwt.2016.07.051
- Faour-Klingbeil, D., Murtada, M., Kuri, V., Todd, E. C. D. (2016<sup>a</sup>).** Understanding the routes of contamination of ready-to-eat vegetables in the Middle East. *Food Control*. 62: 125-133.
- Fayissa Z. D., Kifle D. (2014).** The Study of temporal dynamics of phytoplankton biomass and species composition in relation to some physical and chemical factors, Lake Kuriftu, Oromia Region, Ethiopia. *Fisheries and Aquaculture Journal*, 4 (1): 1-7
- Ferrer, A., Nguyen, V.H., Zinsstag J., (2012).** Quantification of diarrhea risk related to wastewater contact in Thailand. *EcoHealth*. 9:49–59. doi: 10.1007/s10393-012-0746-x.
- Fewtrell, L., Bartram, J. (2001).** Guidelines, Standards and Health : Assessment of risk and risk management for water-related infectious disease. IWA Publishing. <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/42442/924154533X>.

- Firouzi, Mehdi, Homae, Erwin, Klumpp, Roy, Kasteel, Wolfgang, Tappe, (2015).** Bacteria transport and retention in intact calcareous soil columns under saturated flow conditions. *Journal of Hydrology and Hydromechanical*. 63 (2), 102–109.
- Fofana K., (2011).** Cours de cultures Maraichères. Ingénieur des Techniques Agricoles option Agriculture Générale, ESA, Yamoussoukro p 19.
- Fofana, O.; Kouassi, E.A.; Avy, S.K. (2017).** Cartographie et identification des activités sources de nuisances et de pollutions dans le bassin versant du barrage du Kan de Bouake (Côte d’Ivoire). *European Scientific Journal*, 13 (5): 303–316.
- Foppen J.W.A., Schijven, J.F. (2006).** Evaluation of data from the literature on the transport and survival of *Escherichia coli* and thermotolerant coliforms in aquifers under saturated conditions. *Water Resources*. 40: 401-426.
- Fresco L. O., Bouwstra R. J., de Jong, M. C. M., van der Poel, W. H. M., Scholten, M. C. T., Takken, W. (2015).** Global one health e a new integrated approach. The global one health task force of Wageningen University and Research Centre. [http://www.wur.nl/upload mm/e/a/c/d734f322-b66d-4ec0-aa5b\\_3ceb31001fe0\\_GOH\\_Final\\_20150602.pdf](http://www.wur.nl/upload_mm/e/a/c/d734f322-b66d-4ec0-aa5b_3ceb31001fe0_GOH_Final_20150602.pdf).
- Fricker C.R., Bullock S., Murrin K., Niemela S.I. (2008).** Use of the ISO 9308-1 procedure for the detection of *Escherichia coli* in water utilizing two incubation temperatures and two confirmation procedures and comparison with defined substrate technology. *Journal of Water and Health*, 6: 389-397.
- Fricker, C.R., Warden, P.S., Eldred, B.J. (2010).** Understanding the cause of false negative  $\beta$ -d-glucuronidase reactions in culture media containing fermentable carbohydrate. *Letters in Applied Microbiology*. 50: 547-551.
- Fried, J.S.; Torn, M.S.; Mills, E. (2004).** The Impact of Climate Change on Wildfire Severity: A Regional Forecast for Northern California. *Climatic Change*, 64 (1/2): 169–191. doi: 10.1023/B:CLIM.0000024667.89579.ed.
- Fromols, J. (1947).** Pénicilline. *Précis de posologie américaine*. 181 p

**Gandonou, E. Agbossou, K. Sintondji, L. (2007).** Etude de la durabilité environnementale et économique des pratiques d'irrigation en agriculture périurbaine et urbaine (APU) à Cotonou et sa périphérie Volet socio-économie. FSA/UAC Bénin, 39p.

**Ganyu G., Laura K. S., David O. O., Jie Z., Elizabeth A. R., Andrea R. O., Rebecca L. B., Yuhuan C., Steven D., David T. I., Mark S. R., Rachel P., Eric W. B. and Steven L. R. (2018) :** Agricultural Practices Influence Salmonella Contamination and Survival in Pre-harvest Tomato Production. *Frontiers in Microbiology*. doi. 10.3389/fmicb.2018.02451

**GIEC [(Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat)] (2007).** Bilan 2007 des changements climatiques - Conséquences, adaptation et vulnérabilité. Contribution du Groupe de travail III au quatrième Rapport d'Evaluation; Bernstein, L., Bosch, P., Canziani, O., Chen, Z., Christ, R., Davidson, O., Hare, W., Huq, S., Karoly, D., Kattsov, V., Kundzewicz, Z., Liu, J., Lohmann, U., Manning, M., Matsuno, T., Menne, B., Metz, B., Mirza, M., Nicholls, N., Nurse, L., Pachauri, R., Palutikof, J., Parry, M., Qin, D., Ravindranath, N., Reisinger, A., Ren, J., Riahi, K., Rosenzweig, C., Rusticucci, M., Schneider, S., Sokona, Y., Solomon, S., Stott, P., Stouffer, R., Sugiyama, T., Swart, R., Tirpak, D., Vogel, C., Yohe, G., Pachauri, R.K., Andy Reisinger, Eds.; GIEC: Geneve, Suisse.

**GIEC [(Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat)] (2014).** Changements climatiques: Rapport de synthèse. Contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat; Pachauri, R.K., Meyer, L.A., Eds.; GIEC: Genève, Suisse.

**GIEC [(Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat)] (2014):** Rapport de synthèse. Contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat; Pachauri, R.K., Meyer, L.A., Eds.; GIEC: Genève, Suisse.

**Gil, M. I., Selma, M. V., Suslow, T., Jacxsens, L., Uyttendaele, M., Allende, A. (2015).** Pre- and postharvest preventive measures and intervention strategies to control microbial

food safety hazards of fresh leafy vegetables. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 55(4): 453-468. doi. 10.1080/10408398.2012.657808

**Gleeson, T., Novakowski, K., Kurt Kyser, T. (2009).** Extremely rapid and localized recharge to a fractured rock aquifer. *Journal of Hydrology*, 376 (34): 496–509.

**Goel, P. K. (2016).** Water Pollution: Causes, Effects and Control. *New Age International* - 418p.

**Goldscheider, N., Hunkeler, D., Rossi, P. (2006).** Microbial biocenoses in pristine aquifers and an assessment of investigative methods. *Hydrogeology Journal*, 14(6), 926-941.

**Goula, B. T. A., Issiaka, S., Brou, K., Vamoryba, F. E. G., Béatrice, K. (2006).** Impact de la variabilité climatique sur les ressources hydriques des bassins de n'zo et n'zi en cote d'ivoire (afrique tropicale humide). *VertigO*. La revue en sciences de l'environnement, 7(1). <https://journals.openedition.org/vertigo/2038>

**Goula, B.T.A.; Savané, I.; Fadika, V.; Konan, B.; Kouadio, G.B (2006).** Impact de la variabilité climatique sur les ressources hydriques des bassins du N'Zo et N'Zi en Côte d'Ivoire (Afrique Tropicale Humide). *VertigO*, 7 (1) : 1–12. doi: 10.4000/vertigo.2038. En ligne : <http://vertigo.revues.org/2038>.

**Goula, B.T.A.; Savané, I.; Fadika, V.; Konan, B.; Kouadio, G.B. (2006).** Impact de la variabilité climatique sur les ressources hydriques des bassins du N'Zo et N'Zi en Côte d'Ivoire (Afrique Tropicale Humide). *VertigO*, 7 (1) : 1–12. doi: 10.4000/vertigo.2038. En ligne : <http://vertigo.revues.org/2038>.

**Gunkel, G., Kosmol, J., Sobral, M., Rohn, H., Montenegro, S., Aureliano, J., (2007).** Sugar cane industry as a source of water pollution-case study on the situation in Ipojuca River, pernambuco, Brazil. *Water Air Soil Pollution* 180 (14), 261–269.

**H Hall, R. M., Collis, C. M., Kim, M. I. J., Partridge, S. R., Recchia, G. D., and Stokes, H. W. (1999)** Mobile gene cassettes and integrons in evolution. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 870(1), 68–80.

- Haberecht, H. B., Nealon, N. J., Gilliland, J. R., Holder, A. V., Runyan, C., Opper, R. C., Schrupp, F. (2019).** Antimicrobial-Resistant *Escherichia coli* from Environmental Waters in Northern Colorado. *Journal of Environmental and Public Health*. <http://doi.org/10.1155/2019/3862949>
- Ham, Y. S., Kobori, H., Kang, J. H., Matsuzaki, T., Iino, M., Nomura, H. (2012).** Distribution of antibiotic resistance in urban watershed in Japan. *Environmental Pollution*, 162, 98–103. <http://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.11.002>
- Hastenrath, S.; Polzin, D (2011).** Long-term variations of circulation in the tropical Atlantic sector and Sahel rainfall. *International Journal of Climatology*, 31 (5): 649–655. doi: 10.1002/joc.2116.
- Havelaar, A. H., Kirk, M. D., Torgerson, P. R., Gibb, H. J., Hald, T., Lake. (2015).** World Health Organization global estimates and regional comparisons of the burden of foodborne disease in 2010. *PLoS Medicine*. 12 (12):1001923. doi. 10.1371/journal.pmed.1001923.
- Hellmer, M., Paxeus, N., Magnius, L., Enache, L., Arnholm, B., Johansson, A., Bergstrom, T., Norder, H. (2014).** Detection of pathogenic viruses in sewage provided early warnings of hepatitis A virus and norovirus outbreaks. *Applied and Environmental Microbiology*, 80(21): 6771–6781.
- Heuvel, A.V., McDermott, C., Pillsbury, R., Sandrin, T., Kinzelman, J., Ferguson, J., Sadowsky, M., Byappanahalli, M., Whitman, R., Kleinheinz, G.T. (2010).** The green alga, *Cladophora*, promotes *Escherichia coli* growth and contamination of recreational waters in Lake Michigan. *Journal of Environmental Quality*, 39 (1): 333-344.
- Hijnen, W.A., Beerendonk, E.F., Medema, G.J. (2006).** Inactivation credit of UV radiation for viruses, bacteria and protozoan oocyst in water: A review. *Water Resources*. 40: 3-22.

**HLPE [(High Level Panel of Experts )] (2015).** Water for food security and nutrition. A report by the High Level Panel of Experts on Food Security and Nutrition of the Committee on World Food Security, Rome, Italy

**Holvoet, K., Sampers, I., Seynnaeve, M., Jacxsens, L., Uyttendaele, M., (2014).** Agricultural and management practices and bacterial contamination in greenhouse versus open field lettuce production. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 12 (1), 32–63.

**Hubert S. et Legre S. (2000)** - Suivi de la qualité de l'eau des rivières et petits cours d'eau. Direction du suivi de l'état de l'environnement, *Ministère de l'Environnement*, Gouvernement du Québec. 5 p.

**Hynds, P.D., Misstear, B.D. Gill, L.W. (2012).** Development of a microbial contamination susceptibility model for private domestic groundwater sources. *Water Resources Research*. 48(12).

**IAGU [(Institut Africain de Gestion Urbaine Dakar, Sénégal) / RUAF / DGIS, Pays-Bas, CRDI] (2008).** Promouvoir les innovations de l'agriculture urbaine Magazine agriculture urbaine-ISSN 1 574-6244 N° 19, 48p. <https://www.ruaf.org> , [www.iagu.org](http://www.iagu.org) ;

**Ibenyassine, K., AitMhand, R., Karamoko, Y., Cohen, N., Ennaji, M. M. (2006).** Use of repetitive DNA sequences to determine the persistence of enteropathogenic *Escherichia coli* in vegetables and in soil grown in fields treated with contaminated irrigation water. *Letters in Applied Microbiology*, 43(5) : 528-533. doi : 10.1111/j.1472-765X.2006.01997.

**IBGE [(Institut bruxellois pour la gestion de l'environnement)] (2018).** Eaux pluviales et inondations « L'eau à Bruxelles », Collection des fiches documentées, thématique eau. p.1-8. [http://document.leefmilieu.brussels/doc\\_num.php?explnum\\_id=5383](http://document.leefmilieu.brussels/doc_num.php?explnum_id=5383)

**INADES [(Institut Africain pour le Développement Economique et social)] (2009).** Formation Burkina Faso. Les cultures maraichères, Tome 1, p 112.

- INRA [(Institut national de la recherche agronomique)] (2007).** Les fruits et légumes dans l'alimentation : enjeux et déterminants de la consommation. Expertise scientifique collective, synthèse du rapport. INRA. 80 p.
- Ishii, S. and Sadowsky M. J., (2008).** Eschérichia coli in the environments: Implication for water quality and human health. *Microbes and Environments*. 23(2) : 101-108. doi: 10.1264/jsme2.23.101
- Ishii, S., Ksoll, W.B., Hicks, R.E. et Sadowsky, M.J. (2006).** Presence and growth of naturalized Eschérichia coli in temperate soils from Lake Superior watersheds. *Applied and Environmental Microbiology*. 72(1): 612-621.
- Ishii, S., Nakamura, T., Ozawa, S., Kobayashi, A., Sano, D., Okabe, S. (2014).** Water quality monitoring and risk assessment by simultaneous multipathogen quantification. *Environmental Science and Technology*. 48: 4744–4749. doi: 10.1021/es500578s.
- ISO [(International Organization for Standardization) 11996] (2006).** Qualité de l'eau - Échantillonnage pour analyse microbiologique.
- ISO [(International Organization for Standardization) 16649-2]. (2001).** Microbiology of food and animal feeding stuffs-horizontal method for the enumeration of beta-glucuronidase-positive Eschérichia coli Part 2: Colony-count technique at 44 degrees C using 5-bromo-4-chloro-3-indolyl beta- D-glucuronide. Geneva, Switzerland:
- ISO [(International Organization for Standardization) 7027-1](2016).** Qualité de l'eau - Détermination de la turbidité - Partie 1: Méthodes quantitatives
- ISO [(International Organization for Standardization) 8245:1999]:** Qualité de l'eau - Lignes directrices pour le dosage du carbone organique dissous (COD)
- ISO [(International Organization for Standardization) 9308-3] (1999).** Qualité de l'eau - Recherche et dénombrement des *Eschérichia coli* et des bactéries coliformes dans les eaux de surface et résiduaires.

**ISO [(International Organization for Standardization) 9963-1:1994] : Qualité de l'eau - Détermination de l'alcalinité - Partie 1: Détermination de l'alcalinité totale et composite**

**Ivanovsky, A., Criquet, J., Dumoulin, D., Alary, C., Prygiel, J., Duponchel, L., & Billon, G. (2016).** Water quality assessment of a small peri-urban river using low and high frequency monitoring. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 18(5), 624-637.

**Jagai, J.S., Li, Q., Wang, S., Messier, K.P., Wade, T.J., Hilborn, E.D., (2015).** Extreme precipitation and emergency room visits for gastrointestinal illness in areas with and without combined sewer systems: an analysis of Massachusetts data, 2003-2007. *Environment Health Perspective*, 123 (9), 873.

**Jang, J., Hur, H.G., Sadowsky, M.J., Byappanahalli, M.N., Yan, T., Ishii, S., (2017).** Environmental Escherichia coli: ecology and public health implications a review. *Journal of Applied Microbiology*, 123: 570–581. doi.10.1111/jam.13468.

**Johnson, W.P., Ma, H. et Pazmino, E. (2011).** Straining credibility: A general comment regarding common arguments used to infer straining as the mechanism of colloid retention in porous media. *Environmental Science and Technology*, 45(9): 3831–3832.

**Jokinen, C.C., Schreier, H., Mauro, W., Taboada, E., Isaac-Renton, J.L., Topp, E., Edge, T., Thomas, J.E., Gannon, V.P.J. (2010).** The occurrence and sources of Campylobacter spp., Salmonella enterica, and Escherichia coli O157:H7 in the Salmon River, British Columbia, Canada. *Journal of Water and Health*, 8: 374-386.

**Juhna, T., Birzniece, D., Larsson, S., Zulenkov, D., Sharipo, A., Azevedo, N.F., Ménard-Szczebara, F., Castagnet, S., Féliers, C. et Keevil, C.W. (2007).** Detection of Escherichia coli in biofilms from pipe samples and coupons in drinking water distribution networks. *Applied and Environmental Microbiology* 73: 7456-7464.

**Jung, Y., Jang, H., Matthews, K.R., (2014).** Effect of the food production chain from farm practices to vegetable processing on outbreak incidence. *Microbial. Biotechnology*. 7 (6), 517–527.

- Kabour A., Hani A. et Chebbah L. (2011)** - Impact des eaux usées domestiques sur l'environnement, et évaluation de l'indice de risque sur la santé publique: Cas de la ville de Bechar, SW Algérien, *European Journal of Scientific Research* 53 (4) :.582-589.
- Kakoul B., Dominik L., Vignati D., Arpagaus P. Santiago S. Ouddane B. et Benaabidate L. (2014)** - Assessment of water quality and toxicity of polluted rivers Fez and Sebou in the region of Fez (Morocco), *Environmental pollution*. 131: 163-172.
- Kanda M, Akpavi S, Wala K, Djaneye-Boundjou G, Akpagana K, (2014).** Diversité des espèces cultivées et contraintes à la production en agriculture maraîchère au Togo. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*. 8(1): 115-127.
- Karim, M.R., Manshadi, F.D., Karpiscak, M.M., Gerba, C.P. (2004).** The persistence and removal of enteric pathogens in constructed wetlands. *Water Ressources*. 38: 1831-1837.
- Kazi, T. G., Arain, M. B., Jamali, M. K., Jalbani, N., Afridi, H. I., Sarfraz, R. A., Baig, J. A., Shah A. Q. (2009)** - Assessment of water quality of polluted lake using multivariate statistical techniques: A case study. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 72: 301-309.
- Khalil, R. K. S. (2016).** Effect of abusive storage temperatures on growth and survival of *Escherichia coli* O157:H7 on leafy salad vegetables in Egypt. *LWT - Food Science and Technology*, 65: 954-962. doi: 10.1016/j.lwt.2015.09.034
- Khan, I.U.H., Hill, S., Nowak, E., Edge, T.A., (2013).** Effect of incubation temperature on the detection of thermophilic *Campylobacter* species from freshwater beaches, nearby wastewater effluents, and bird fecal droppings. *Applied of Environment Microbiology*. 79, 7639–7645.
- Kim, J.-H.; Mogasale, V.; Im, J.; Ramani, E.; Marks, F. (2017).** Updated estimates of typhoid fever burden in sub-Saharan Africa. *The Lancet Global Health*, 5 (10): 969. doi: 10.1016/S2214-109X(17)30328-5.

- Kimbatsa FG, Mahoungou E, Ofoueme YB, (2018).** L'importance de l'horticulture dans la lutte contre l'insécurité alimentaire. *Etudes caribéennes* 24: 39-40; doi :10.4000/etudescaribeennes 12382
- Kirby, & Bauer, A. (1966).** Antibiotic susceptibility testing by a standardized single disc method. *American Journal of Clinical Pathology*. Consulté à l'adresse <https://ci.nii.ac.jp/naid/10024190092/>
- Kirmeyer, G.J., Thomure, T.M., Rahman, R., Marie, J.L., LeChevallier, M.W., Yang, J., Hughes, D.M., Schneider, O. (2014).** Effective microbial control strategies for main breaks and depressurization. *Water Research Foundation*. Denver, Colorado.
- Kishe M., (2004).** Physical and chemical characteristics of water in selected locations in lake victoria, Tanzania. *Journal of Sciences*. 30 (2) : 65-72.
- Koffi D.H.K., 2012.** Utilisation des pesticides en maraichage urbain : Risques sanitaire et environnementaux, cas de la ville de Yamoussoukro : Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du Diplôme d'Ingénieur des Techniques Agricoles (ITA), options Agriculture Générale, ESA, Yamoussoukro, p.46
- Koffie-Bikpo, C. Y., Adaye, A. A. (2014).** Agriculture commerciale à Abidjan : le cas des cultures maraîchères. *Pour*, 4(224), 141-149. doi : 10.3917/pour.224.0141
- Koffi-Nevry R., Judicaël A., Assemant E., Wognin A., Koussemon M. (2012).** Origine de contamination fécale de l'eau d'arrosage de la laitue cultivée dans d'Abidjan. *Journal of Applied BioSciences*. <https://52:3669-75.no> ENV 2001 0141.
- Koné B., Mohamed D., Ibrahima S., Kouassi D., Yveline A., Pascal V.H., Benjamin F., Bassirou B., Marcel T., Guéladio C. (2014)** Étude des diarrhées en milieu périurbain à Abidjan par l'approche écosanté. *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement*. Hors-serie 19
- Kone D. (2010)** - Gestion des effluents issus des broyeuses de manioc dans la Commune de Yamoussoukro. Etude sur les déchets liquides, District de Yamoussoukro, Côte d'Ivoire. 43 p.

- Kone, A. N. T., Ouattara, B. M., Tiekoura, B., Konan, F. K., Koffi, E., Kouadio, I. K., Dadié, A., Guessennd, N. K. (2019).** Bio-activities of Tetracycline and Algae Food Supplement Algo-Bio® on Escherichia coli Antimicrobial Resistance Soucheed from Piglet's Intestinal Flora. *Microbiology Research Journal International*, 1-8.
- Kouadio, I. K., Guessennd, N., Dadié, A., Gbonon, V., Tiékoura, B., Ouattara, M. B., Dosso, M. (2017).** Occurrence and antimicrobial resistance of Enterococcus spp. soucheed from lettuce and irrigation water in Abidjan, Côte d'Ivoire. *Journal of food quality and hazards control*, 4(1), 20-23.
- Kouadio, I. K., Guessennd, N., Dadié, A., Koffi, E., & Dosso, M. (2018).** Comparative study of the impact of the administration of Amoxicillin and Algo-Bio® alternative substance to antibiotics, on the level of selection of resistant Enterobacteriaceae in the digestive flora of piglets. *Journal of global antimicrobial resistance*, 13, 161-164.
- Kouahi A. (2010)** - Etude de la productivité des forages en milieu cristallin : cas de la région du Denguélé (Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire). *Mémoire d'Ingénieur de Conception*, Institut National Polytechnique Félix Houphouët Boigny, Côte d'Ivoire, 81 p.
- Kouakou S. K., A., Kouassi M., Adingra A. A., Dongui, Gnakri B. K. D. (2008)** - Variations saisonnières des paramètres Abiotiques des eaux d'une lagune tropicale : La lagune de Grand-Lahou, Côte d'Ivoire, 21 (3) :376-393.
- Kouamé, P.K., Nguyen-Viet, H.,3 Dongo, K., Zurbrügg, C, Biémi, J., Bonfoh, B., (2017).** Microbiological risk infection assessment using QMRA in agriculture systems in Côte d'Ivoire, West Africa. *Environmental Monitoring and Assessment*. 189(11): 587. doi: 10.1007/s10661-017-6279-6
- Kouassi, A.M.; Kouamé, K.F.; Ahoussi, K.E.; Oularé, S.; Biemi, J. (2012).** Impacts conjugués des changements climatiques et des pressions anthropiques sur les modifications de la couverture végétale dans le bassin versant du N'Zi-Bandama (Côte d'Ivoire). *Revue Ivoirienne des Sciences et Technologie*, 20 : 124-146.

- Kouassi<sup>a</sup> A.M., Ahoussi K.E., Koffi Y.B., Aké A.Y., Biémi J. (2012)** Caractérisation hydrogéochimique des eaux des aquifères fissurés de la zone Guiglo-Duekoué (Ouest de la Côte d'Ivoire). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 6(1) : 504- 518.
- Kouassi<sup>a</sup> A.M., Koffi F.K, Bi Tie A. G., Lasme T., Paturel J.E., Biémi J. (2008)** - Influence de la variabilité climatique et de la modification de l'occupation du sol sur la relation pluie-débit a partir d'une modélisation globale du bassin versant du N'Zi (Bandama) en Côte d'Ivoire. pp. 207-229.
- Kouassi<sup>a</sup> K. L. (2007)** - Hydrologie, transport solide et modélisation de la sédimentation dans les lacs des barrages hydroélectriques de Côte d'Ivoire : Cas du lac de Taabo. *Thèse Unique de doctorat* de l'Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny, Yamoussoukro, Côte d'Ivoire, 250 p.
- Kouassi<sup>b</sup>, J.-L. (2019).** Variabilité climatique, dynamique des feux de végétation et perceptions locales dans le bassin versant du N'Zi (Centre de la Côte d'Ivoire). *Thèse Unique* de l'Université d'Abobo-Adjamé, Abidjan, Côte d'Ivoire, 202 p. DOI: 10.13140/RG.2.2.23425.20323
- Koukal B., Dominik J., Vignati D. et Arpagaus P. (2014).** La pauvreté et la protection de l'environnement à Brazzaville (République du Congo). *Environment pollution*. 131 : 163-172.
- Koulikoff, F. (2018).** Résistance aux antibiotiques, Un phénomène massif et préoccupant. *Inserm*, <https://www.inserm.fr/information-en-sante/dossiers-information/resistance-antibiotiques>
- Kozuskanich, J.C., Novakowski, K.S., Anderson, B.C., Crowe, A.S. et Balakrishnan, V.K. (2014).** Anthropogenic impacts on a bedrock aquifer at the village scale. *Groundwater*. 52(3) : 474–486

- Krejci V., Frutiger A., Kreikenbaum S. et Rossi L. (2015)** - Impact des rejets pluviaux urbains sur les milieux récepteurs, *Institut fédéral pour l'aménagement, l'épuration et la protection des eaux (EAWAG)*. 36 p.
- Kumar, A., Pal, D., (2018)**. Antibiotic resistance and wastewater: correlation, impact and critical human health challenges. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 6, 52–58. doi. 10.1016/j.jece.2017.11.059.
- Kummerer K. (2009)**. Antibiotics in the Aquatic Environment—A Review-Part I. *Chemosphere*, 75, 417-434. <http://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2008.11.086>
- Larsson, D.G.J., Andremont, A., Bengtsson-Palme, J., Brandt, K.K., de Roda Husman, A.M., Fagerstedt, P., Fick, J., Flach, C.-F., Gaze, W.H., Kuroda, M., Kvint, K., Laxminarayan, R., Manaia, C.M., Nielsen, K.M., Plant, L., Ploy, M.-C., Segovia, C., Simonet, P., Smalla, K., Snape, J., Topp, E., van Hengel, A.J., Verner-Jeffreys, D.W., Virta, M.P.J., Wellington, E.M., Wernersson, A.-S., (2018)**. Critical knowledge gaps and research needs related to the environmental dimensions of antibiotic resistance. *Environment International* 117: 132–138. doi: 10.1016/j.envint.2018.04.041.
- Launay, M., Dugué, V., Faure, J. B., Coquery, M., Camenen, B., & Le Coz, J. (2019)**. Numerical modelling of the suspended particulate matter dynamics in a regulated river network. *Science of the total environment*, 665, 591-605.
- Le Chevallier, M.W. et Au, K.K. (2014)**. Water treatment and pathogen control: Process efficiency in achieving safe drinking water. *IWA Publishing*, Londres, Royaume-Uni, Pour l'Organisation mondiale de la Santé, Genève.
- Leclerc, H., Mossel, D.A.A., Edberg, S.C., Struijk, C.B. (2011)**. Advances in the bacteriology of the Eschérichia coliform group: their suitability as markers of microbial water safety. *Annual Review of Microbiology*, 55: 201-234.
- Lehtola, M.J., Torvinen, E., Kusnetsov, J., Pitkänen, T., Maunula, L., von Bonsdorff, C.H., Martikainen, P.J., Wilks, S.A., Keevil, C.W., Miettinen, I.T. (2007)**. Survival

of *Mycobacterium avium*, *Legionella pneumophila*, *Escherichia coli*, and Caliciviruses in drinking water-associated biofilms grown under high-shear turbulent flow. *Applied of Environment Microbiology*, 43: 2854-2859.

**Lhote Antoine (2000).** Critères d'évaluation de la qualité de l'eau d'un système lacustre tropical. Approche statistique, *Thèse de doctorat*, Université de Poitiers, Poitiers, France, 154 pp.

**Lin, J. et Ganesh, A. (2013).** Water quality indicators: Bacteria, coliphages, enteric viruses. *International Journal of Environmental Health Research*. 23(6) : 484–506.

**Liu, L., Chu, X., Chen, P., Xiao, Y., Hu, J., (2016).** Effects of water quality on inactivation and repair of *Microcystis viridis* and *Tetraselmis suecica* following medium-pressure UV irradiation. *Chemosphere* 163, 209–216. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.08.027>.

**Locas, A., Barthe, C., Margolin, A.B. et Payment, P. (2008).** Groundwater microbiological quality in Canadian drinking water municipal wells. Canada. *Canadian Journal of Microbiology*, 54 (6):472-478.

**Locas, Annie (2015).** Évaluation de la qualité microbiologique d'eaux souterraines utilisées comme source d'approvisionnement en eau potable au Québec *Thèse*. Université du Québec, Institut National de la Recherche Scientifique, Doctorat en biologie, 146 p.

**Lods-Crozet J. et Reymond O. (2016)** - Evolution du zoobenthos profond du Léman. *Rapport de la Commission internationale de la protection d'eau du Léman contre pollution*, campagne 2005. pp. 141-146.

**Lokerse, R. F. A., Maslowska-Corker, K. A., van de Wardt, L. C., Wijtzes, T. (2016).** Growth capacity of *Listeria monocytogenes* in ingredients of ready-to-eat salads. *Food Control*, 60, 338-345. doi.10.1016/j.foodcont.2015.07.041

**Lorette, G., Peyraube, N., Lastennet, R., Denis, A., Sabidussi, J., Fournier, M., Villanueva, J. D. (2020).** Tracing water perturbation using NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, doc, particles size determination, and bacteria: A method development for karst aquifer water quality hazard assessment. *Science of The Total Environment*, 138 : 5-12.

- Lozniewski A., Rabaud C., (2010).** Resistance bacterienne aux antibiotiques. Infections associées aux soins *Fiches conseils pour la prévention du risque infectieux*, Agence nationale de santé publique France
- Lubes-Niel H., Masson J. M., Paturel J. E. et Servat E. (1998)** - Variabilité climatique et statistiques. Etude par simulation de la puissance et de la robustesse de quelques tests utilisés pour vérifier l'homogénéité de chroniques. *Revue des sciences de l'eau*. . 3. pp.383-408.
- Lwamba B. J., Katim M. A., Kiwaya A. T. Ipungu L. R. et Nyongombe U. N. (2015)** - Variations de la température de l'eau des étangs en période froide à Lubumbashi (République Démocratique du Congo) et implications pour la production des poissons, *Journal of Applied Biosciences*. 90 : 8429-8437.
- Maal-Bared, R., Bartlett, K. H., Bowie, W. R., Hall, E. R. (2013).** Phenotypic antibiotic resistance of *Escherichia coli* and *Escherichia coli* O157 soucheed from water, sediment and biofilms in an agricultural watershed in British Columbia. *Sciences of the Total Environment*, 443, 315–323. <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.10.106>
- Madjiki A. G., Pial A. C., Ndam N. J. R. et Amougou A. (2013).** Caractérisation hydrologique, morpho-métrique et physicochimique d'un hydrosystème urbain : le lac municipal d'Ebolowa (Sud-Cameroun). *Afrique Science*. 9 (3): 122 -134.
- Majule A, Kauzeni A, Mujwahuzi M. (2013).** Exploring opportunities for climate change adaptation in semi arid areas of Tanzania: A case of Nzega District in Tabora region. *African Journal of Environmental Science and Technology*, 7(8):758–769. <http://dx.doi.org/10.5897/AJEST12.230>
- Malesu, M. M., Oduor, A., Chrogony, K., Nyolei, D., Gachene, C., Biamah, E., (2010).** Rwanda irrigation master plan. Nairobi, Kenya: The Government of Rwanda, Ministry of agriculture and animal resources. Ebony Company Limited and World Agro-forestry Centre (ICRAF). [http://www. Worl dagroforestry.org/ downloads/ Publications/ PDFS/B16738.pdf](http://www.Worl dagroforestry.org/downloads/Publications/PDFS/B16738.pdf).

- Mama D. (2010)** - Méthodologie et résultats du diagnostic de l'eutrophisation du lac Nokoué (Bénin), *Thèse de Doctorat*, Université de Limoges, France. 157 p.
- Mama D., M. Aina, A. A., Ousmane T. B., Waris C., Véronique D., James B., Abel A., Michel B. (2011)**, Caractérisation physico-chimique et évaluation du risque d'eutrophisation du lac Nokoué (Bénin), *International Journal of Biology Chemical Sciences*, 5 (5) : 2076-2093.
- Marion, J.W., Lee, C., Lee, C.S., Wang, Q., Lemeshow, S., Buckley, T.J., Saif, L.J., Lee, J. (2014)**. Integrating bacterial and viral water quality assessment to predict swimming-associated illness at a freshwater beach: A cohort study. *Plos One*. 9(11).
- Marti, E., Variatza, E., Balcazar, J. L. (2014)**. The role of aquatic ecosystems as reservoirs of antibiotic resistance. *Trends in Microbiology*, 22, 36-41.
- Martinez, J. L. (2009)**. The role of natural environments in the evolution of resistance traits in pathogenic bacteria. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 276(1667), 2521–2530.
- Masters, N., Wiegand, A., Ahmed, W., Katouli, M., (2011)**. Eschérichia coli virulence genes profile of surface waters as an indicator of water quality. *Water Research*. 45:6321-6333.
- Mathai, P.P., Dunn, H.M., Magnone, P., Brown, C.M., Chun, C.L., Sadowsky, M.J., (2018)**. Spatial and temporal characterization of epiphytic microbial communities associated with Eurasian water milfoil: a highly invasive macrophyte in North America. *FEMS Microbiology Ecology*. 94 : 1–9. doi.10.1093/femsec/fiy178.
- MCAU [(Ministère de la Construction de l'Assainissement et de l'Urbanisme- Côte d'Ivoire)] (2016)** - Actualisation du schéma directeur d'assainissement et de drainage de Yamoussoukro, Rapport d'étude, Schéma directeur d'assainissement et de drainage. 110 p.

- McLellan, S.L., Boehm, A.B., Shanks, O.C., (2013).** Marine and freshwater fecal indicators and source identification. In: Kanki, P., Grimes, D.J. (Eds.), *Infectious Diseases*. Springer New York, 252: 199–235. doi :10.1007/978-1-4614-5719-0-9.
- MDDEFQ [(Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs- Québec)] (2013)** - Critère de qualité de l'eau de surface, 3ème Edition, Québec, *Direction du Suivi de l'état de l'Environnement*. 510 p.
- MDDELCC [(Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques – Québec)] (2014)** - Rapport annuel de gestion 2013-2014, développement durable, environnement, faune et parcs. 96 p.
- MEDD [(Ministère de l'Écologie et du Développement Durable- Québec)] (2003).** Système d'évaluation de la qualité des cours d'eau, grilles d'évaluation *SEQ-EAU*, (version 2). 40 p.
- MEDDE [(Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie- Québec)] (2015).** Les polluants organiques persistants. *Direction générale de la Prévention des risques*. 7p
- Melack, J. M. (2014).** Diel variability and community metabolism in African soda lakes, Bren School of Environmental Science and Management, University of California, Santa Barbara, *Natural Resources and Environmental*. 15(28): 153-160.
- MEMIS [(Ministère d'Etat, ministère de l'Intérieur et de la Sécurité- Côte d'Ivoire)] (2014)** Loi n°2014-454 du 05 août 2014 portant statut du District Autonome de Yamoussoukro. *Journal officiel*. 14 p.
- Menon, P., Billen, G., Servais, P., (2003).** Mortality rates of autochthonous and fecal bacteria in natural aquatic ecosystems. *Water Resources* 37 (17): 4151-4158. doi: 10.1016/S0043-1354(03)00349-X.
- Mertz, O.; D'haen, S.; Maiga, A.; Moussa, I.B.; Barbier, B.; Diouf, A.; Diallo, D.; Dapola Da, E.; Dabi, D. (2012)** Climate variability and environmental stress in the Sudan-Sahel zone of West Africa. *Ambio*, 41 (4), 380–392. doi: 10.1007/s13280-011-0231-8.

- Mertz, O.; Halsnæs, K.; Olesen, J.E.; Rasmussen, K. (2009a).** Adaptation to Climate Change in Developing Countries. *Environmental Management*; 43 (5), 743–752. doi: 10.1007/s00267-008-9259-3.
- Mertz, O.; Mbow, C.; Nielsen, J.Ø.; Maiga, A.; Diallo, D.; Reenberg, A.; Diouf, A.; Barbier, B.; Moussa, I.B.; Zorom, M.; Ouattara, I.; Dabi, D. (2010).** Climate factors play a limited role for past adaptation strategies in West Africa. *Ecology and Society*, 15 (4), art25. doi: 10.5751/ES-03774-150425.
- Mertz, O.; Mbow, C.; Reenberg, A.; Diouf, A. (2009b).** Farmers' perceptions of climate change and agricultural adaptation strategies in rural sahel. *Environmental Management*, 43 (5), 804–816. doi: 10.1007/s00267-008-9197-0.
- Mertz, O.; Mbow, C.; Reenberg, A.; Genesio, L.; Lambin, E.F.; D'haen, S.; Zorom, M.; Rasmussen, K.; Diallo, D.; Barbier, B.; Moussa, I.B.; Diouf, A.; Nielsen, J.; Sandholt, I. (2011).** Adaptation strategies and climate vulnerability in the Sudano-Sahelian region of West Africa. *Atmospheric Science Letters*, 12 (1), 104–108. doi: 10.1002/asl.314. En ligne : <http://doi.wiley.com/10.1002/asl.314>.
- Merzougui, W. (2017).** Etude des performances d'un déssableur" Station d'épuration de la Ville d'Ain Beida".
- METI [(Ministry of Economy, Trade and Industry. Republic of Rwanda)]. (2012).** "Organic Pigments That Can Unintentionally Contain Polychlorinated Biphenyl.", Retrieved fevrier, 2012, [http://www.meti.go.jp/english/press/2012/0210\\_04.html](http://www.meti.go.jp/english/press/2012/0210_04.html).
- Mezrioui, N., Baleux, B. (1992).** Effets de la température, du pH et du rayonnement solaire sur la survie de différentes bactéries d'intérêt sanitaire dans une eau usée épurée par lagunage. *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*. 5 (4) : 573–591. doi: 10.7202/705148ar
- Mieszkin, S. (2010).** Diagnostic moléculaire de l'origine des contaminations fécales dans l'environnement littoral - Développement de marqueurs Bacteroidales spécifiques de l'hôte. *Thèse de doctorat université de Bretagne occidentale*, 344pp.

- Mihu-Pintilie, A., Stoleriu, C., Romanescu, G. (2014).** The seasonal changes of the temperature, pH and dissolved oxygen in the Cuejdel Lake, Romania Carpathian. *Journal of earth and environmental sciences*, 9(2), 113-123.
- MINAGRI. [(Ministry of Agriculture and Animal Resources. Republic of Rwanda)]. (2012).** Strategic and investment plan to strengthen meat industry in Rwanda. Final report July 2012. [http://www.minagri.gov.rw/fileadmin/user\\_upload/ documents /STRAT.PLC/Final report Rwanda Meat industry final.pdf](http://www.minagri.gov.rw/fileadmin/user_upload/documents/STRAT.PLC/Final%20report%20Rwanda%20Meat%20industry%20final.pdf).
- MINEF [(Ministère des Eaux et Forêts - Côte d'Ivoire)] (2008) - Arrêté n°01164/MINEF/CIAPOL/SDIIC du 04 novembre 2008 portant réglementation des rejets et émissions des installations classées pour la protection de l'environnement. Journal officiel. 23 p.**
- Ming, H., Zhu, L., Zhang, Y. (2011).** Rapid quantification of infectious enterovirus from surface water in Bohai Bay, China using an integrated cell culture-qPCR assay. *Marine Pollution Bulletin*. 62(10) : 2047–2054.
- Misztal, P.K., Hewitt, C.N., Wildt, J., Blande, J.D., Eller, A.S.D., Fares, S., Goldstein, A.H. (2015).** Atmospheric benzenoid emissions from plants rival those from fossil fuels. *Scientific Reports*. 5: 12064. doi: 10.1038/srep12064
- Mizukawa K., Hideshige T., Maki Ito, Yeo B. G., Junki H., Rei Y., Mahua S., Satoru S., Carlos M., João F. (2013),** Monitoring of a wide range of organic micropollutants on the Portuguese coast using plastic resin pellets, *Marine Pollution Bulletin*, 70 (12), 296-302.
- Mohammedi D. (2012).** Classification et mode d'action des antibiotiques. <http://www.sante.dz/aarn/classification.pdf>
- Mohiuddin Mahi, Steven R. Botts, Athanasios Paschos, Herb E. Schellhorn, (2019).** Temporal and spatial changes in bacterial diversity in mixed use watersheds of the Great Lakes region. *Journal of Great Lakes Research*. 45: 109–118

- Mohiuddin, M., Schellhorn, H.E., (2015).** Spatial and temporal dynamics of virus occurrence in two freshwater lakes captured through metagenomic analysis. *Frontiers in Microbiology* 61: 23-36
- Mohiuddin, M.M., Salama, Y., Schellhorn, H.E., Golding, G.B., (2017).** Shotgun metagenomic sequencing reveals freshwater beach sands as reservoir of bacterial pathogens. *Waters Ressources* 115: 360–369.
- Mokhtari, W., Nsaibia, S., Majouri, D., Ben Hassen, A., Gharbi, A., Aouni, M., (2012).** Detection and characterization of Shigella species soucheed from food and human stool samples in Nabeul, Tunisia, by molecular methods and culture techniques. *Journal of Applied Microbiology*. 113: 209–222.
- Moore, S.M.; Azman, A.S.; Zaitchik, B.F.; Mintz, E.D.; Brunkard, J.; Legros, D.; Hill, A.; McKay, H.; Luquero, F.J.; Olson, D.; Lessler, J. (2017).** El Niño and the shifting geography of cholera in Africa. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 114 (17), 4436–4441. doi: 10.1073/pnas.1617218114.
- Mougeot, L.J.A. et P. Moustier (2004) ;** Introduction générale en Développement durable de l’agriculture urbaine en Afrique francophone : Enjeux, concepts et méthodes, *CIRAD, CRDI*, p 11-21
- MSUA [(Ministère de la Salubrité Urbaine et de l’Assainissement- Côte d’Ivoire)] (2016)** - Actualisation du schéma directeur d'assainissement et de drainage de Yamoussoukro, *Rapport d'étude*, Schéma directeur d'assainissement et de drainage. 110 p.
- Muniesa, M., Hammerl, J.A., Hertwig, S., Appel, B., Brüßow, H., (2012).** Shiga toxinproducing Eschérichia coli O104: H4: a new challenge for microbiology. *Applied and Environmental Microbiology*. 78: 4065–4073.
- Murphy, H.M., Thomas, M.K., Medeiros, D.T., McFadyen, S., Pintar, K.D. (2016).** Estimating the number of cases of acute gastrointestinal illness (AGI) associated with Canadian municipal drinking water systems. *Epidemiology and Infection*. 144(7): 1371–1385.

- Mustapha M. K., Omotosho J. S. (2015).** An assessment of the physico-chemical properties of moro lake, *African journal of applied and environmental biology*. 7 : 73-77.
- Mweu, E.; English, M. (2008).** Typhoid fever in children in Africa. *Tropical Medicine & International Health*. 13 (4), 532–540. doi: 10.1111/j.1365-3156.2008.02031.x.
- N’Guessan K.A., Kouassi A. M., Gnaboa R., Traoré K. S., Houenou P. V. (2014).** Analyse de phénomènes hydrologiques dans un bassin versant urbanisé: cas de la ville de Yamoussoukro, *Larhyss journal*,17 : 135-154
- N’Guessan, K., Konan, K., Bony, K., Edia, O. (2011).** Prospects for rehabilitation of man-made lake system of Yamoussoukro (Ivory Coast). *Procedia Environmental*, 9(2011), 140 – 147. <http://doi.org/10.1016/j.proenv.2011.11.022>
- Naah, M. (2013) -** Impact temporel développement urbain du bassin versant de la rivière Mingoa sur la qualité du lac municipal de (Cameroun), *Thèse de doctorat*, Université de Yaoundé, Yaoundé, Cameroun. 213 p.
- Naidoo, N. and Olaniran, A O. (2014).** Treated wastewater effluent as a source of microbial pollution of surface water resources. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 11: 249-270. doi:10.3390/ijerph110100249.
- Narasimhan, R., Brereton J., Abbaszadegan, M., Alum, A. et Ghatpande, P. (2004).** Sample collection procedures and locations for bacterial compliance monitoring. AWWA Research Foundation, Denver, Colorado. *Applied and Environmental Microbiology*. 42: 506-512
- Ndiaye L., (200.** Impacts sanitaires des eaux d’arrosage de l’agriculture urbaine de Dakar. *Thèse de Doctorat en Sciences*, Faculté des sciences de l’université de Genève p. 163.
- Ndungu J. N. (2014) -** Assessing water quality in Lake Naivasha, *Thesis of University of Twente*, Kenya. 151 p.

- Newcombe, C. P. (2003).** Impact assessment model for clear water fishes exposed to excessively cloudy water 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 39(3), 529-544.
- Nguendo Yongsu HB. (2010).** Suffering for water: Access to drinking water and associated health risks in Cameroon. *J Health Popul Nutr.*, 28: 424-435.
- N'Guessan, K. A. (2017).** Gestion intégrée de l'hydrosystème lacustre urbain de la commune de Yamoussoukro : caractérisation de la pollution anthropique et approche de restauration, *Thèse Unique*, Université Nangui Abrogoua, Côte d'Ivoire, 189 pp.
- NHMRC [(National Health and Medical Research Council)] (2011).** Australian drinking water quality guidelines paper 6., Natural Resource Management Ministerial Council, Canberra, Commonwealth of Australia.
- Niase, M.; Afouda, A.; Amani, A (2004).** Réduire la vulnérabilité de l'Afrique de l'ouest aux impacts du climat sur les ressources en eau, les zones humides et la désertification: élément de stratégie régionale de préparation et d'adaptation; UICN: Glan, Suisse et Cambridge, Royaume-Uni.
- Nicholson, S.E, (2008).** The intensity, location and structure of the tropical rainbelt over west Africa as factors in interannual variability. *International Journal of Climatology*, 28 (13), 1775–1785. doi: 10.1002/joc.1507.
- Nielsen, K. M., Johnsen, P. J., Bensasson, D., Daffonchio, D. (2007).** Release and persistence of extracellular DNA in the environment. *Environmental biosafety research*, 6(12), 37–53.
- Niewolak, S., (2000).** Bacteriological monitoring of River water quality in the north area of Wigry national park. *Polish Journal of Environmental Studies*. 9 (4), 291–299.
- NISR [(National Institute of Statistics of Rwanda)]. (2012).** Ministry of Finance and Economic Planning, Rwanda. Rwanda fourth population and housing census. Thematic Report: Data quality assessment. <http://www.statistics.gov.rw/publication/rphc4-final-report-data-quality-assessment>.

**Norme Française [NF EN ISO 5814 (Octobre 2012)] : Qualité de l'eau - Dosage de l'oxygène dissous - Méthode électrochimique à la sonde**

**Novick, R. and Summers, D. K. (1997).** The biology of plasmids. *Trends in Genetics*, 13(2), 82–83.

**Nyatanyi, T., Wilkes, M., McDermott, H., Nzietchueng, S., Gafarasi, I., Mudakikwa. (2017).** Implementing one health as an integrated approach to health in Rwanda. *BMJ Global Health*, 2(1) : 000121.

**O'Flaherty, E., Borrego, C.M., Balcazar, J.L., Cummins, E., (2018).** Human exposure assessment to antibiotic-resistant *Escherichia coli* through drinking water. *Sciences of the Total Environment* 616–617, 1356–1364.

**O'Flaherty, E., Cummins, E., (2017).** Antibiotic resistance in surface water ecosystems: presence in the aquatic environment, prevention strategies, and risk assessment. *Human and Ecological Risk Assessment*. 23 (2), 299–322.

**Ogorzaly, L., Bonot, S., Moualij, B.E., Zorzi, W. Cauchie, H. (2013).** Development of a quantitative immunocapture real-time PCR assay for detecting structurally intact adenoviral particles in water. *Journal of Virological Methods*. 194(12): 235–241.

**Okeke, I.N. (2010).** Diarrheogenic *Escherichia coli* in sub-Saharan Africa: Status, Uncertainties and Necessities. *The Journal of Infection in Developing Countries.*, 3 (11) doi: 10.3855/jidc.586.

**Oliver D. M., L. Heathwaite, P. M. Haygarth, C. D. Clegg. (2015).** Transfer of *Escherichia coli* to water from drained and undrained grass land after grazing. *Journal Environ. Quality*. 34: 918- 925.

**Olivry, J.-C.; Bricquet, J.P.; Mahe, G. (1998).** Variabilité de la puissance des crues des grands cours d'eau d'Afrique intertropicale et incidence de la baisse des écoulements de base au cours des deux dernières décennies In *Water Resources Variability in Africa during the XXth Century*. IASH: Abidjan, Côte d'Ivoire, pp 189–197.

**Olstadt, J., Schauer, J.J., Standridge, J. Kluender, S. (2007).** A comparison of ten USEPA approved total coliform/*Escherichia coli* tests. *Journal Water Health*. 5:267-282.

**Omoleke, S.A.; Mohammed, I.; Saidu, Y. (2016).** Ebola viral disease in West Africa: a threat to global health, economy and political stability. *Journal of Public Health in Africa*. 7 (1) doi: 10.4081/jphia.2016.534.

**OMS [(Organisation mondiale de la Santé)] - Bureau régional de l'Afrique (2011).** La santé et l'environnement en Afrique : Les risques pour la santé liés à l'environnement en Afrique.

<https://reliefweb.int/sites/reliefweb.int/files/resources/CBEC6A962D16EE3A4925722E00053D3A-who-afr-22nov1.pdf>

**OMS [(Organisation mondiale de la Santé)] (2004).** Directives de qualité pour l'eau de boisson, 3e édition. Vol. 1 : recommandations. Organisation mondiale de la Santé, Genève, Suisse. [https://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/dwq/gdwq3\\_prel\\_1a5.pdf](https://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/gdwq3_prel_1a5.pdf)

**OMS [(Organisation mondiale de la Santé)] (2010).** La face cachée des villes : mettre au jour et vaincre les inégalités de santé en milieu urbain. Rapport UN-Habitat-OMS, Genève, 145p. <https://www.who.int/publications/list/9789211322798/fr/>

**OMS [(Organisation mondiale de la Santé)] (2012).** Micro-organismes. [https://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/publications/gdwq4-with-add-fr-chap11.pdf](https://www.who.int/water_sanitation_health/publications/gdwq4-with-add-fr-chap11.pdf)

**OMS [(Organisation mondiale de la Santé)] (2014).** Liens entre l'eau, l'assainissement, l'hygiène et la santé. 142 p. [https://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/publications/facts2004/fr/](https://www.who.int/water_sanitation_health/publications/facts2004/fr/)

**OMS [(Organisation mondiale de la Santé)] (2019).** Sécurité sanitaire des aliments. <https://www.who.int/fr/news-room/fact-sheets/detail/food-safety>

**OMS/UNICEF [(Organisation mondiale de la Santé / Fonds des Nations Unies pour l'Enfance)] (2014).** Improved and Unimproved Water and Sanitation Facilities. <http://www.wssinfo.org/definitions-methods/watsan-categories/>.

- Orjikh A. (2014).** Profil physico-chimique de l'eau du lac Memphrémagog, saison estivale 2014, *Memphrémagog Conservation Inc.*, 32 p.
- Orsini F, Kahane R, Nono-Womdim R, Gianquinto G. (2013).** Urban agriculture in the developing world: A review. *Agronomy for Sustainable Development*. 33(4): 695–720.
- Orskov, F. et Orskov I., (2012).** Eschérichia coli serotyping and disease in man and animals. *Canadian Journal of Microbiology* 38: 699–704.
- Ouédraogo B. (2011).** Etat des lieux et opportunité pour une politique d'observation hydrométéorologique de long terme en zone tropicale. Hydrometeorological observations in areas. Constraints, limits and perspectives. *La houille blanche*, n°2. pp. 5-11.
- Oyinlola L.A., Obadina A.O., Omemu A.M., Oyewole O.B. (2017).** Prevention of microbial hazard on fresh-cut lettuce through adoption of food safety and hygienic practices by lettuce farmers. *Food Sciences and Nutrition*. 5 (1): 67-75
- Ozer P, Hountondji YC, Ahomadegbe MA, Djaby B, Thiry A, De Loguevillef. (2013).** Évolution Climatique, Perception Et Adaptation Des Communautés Rurales Du Plateau D'Abomey (Benin). *XXVIème colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, 440–445.
- Paeth, H.; Capo-Chichi, A.; Endlicher, W. (2008)** Climate change and food security in Tropical West Africa — A dynamic-statistical modelling approach. *Erdkunde*. 62 (2), 101–115. doi: 10.2307/25648102.
- Pagadala, S., Marine, S. C., Micallef, S. A., Wang, F., Pahl, D. M., Melendez, M. V. (2015).** Assessment of region, farming system, irrigation source and sampling time as food safety risk factors for tomatoes. *International Journal of Food and Microbiology*. 196 : 98–108. doi: 10.1016/j.ijfoodmicro.2014.12.005
- Painter, J. A., Hoekstra, R. M., Ayers, T., Tauxe, R. V., Braden, C. R., Angulo, F. J. (2013).** Attribution of foodborne illnesses, hospitalizations, and deaths to food commodities by

using outbreak data, United States, 1998-2008. *Emerging Infectious Diseases*, 19(3) : 407-415. doi. 10.3201/eid1903.111866.

**Palmer M. A., Bernhardt E. S., Chornesky E A, Collins S. L, Dobson A. P., Duke C. S., Gold B. D. (2004).** Ecological science and sustainability for the 21st century, *Ecology and the Environment*. 3 (1).4–11.

**Pandey, P.K., Soupir, M.L., (2013).** Assessing the impacts of *Escherichia coli* laden streambed sediment on *Escherichia coli* loads over a range of flows and sediment characteristics. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* 49 (6) : 1261–1269.

**Pandey, P.K., Soupir, M.L., Haddad, M., Rothwell, J.J., (2012).** Assessing the impacts of watershed indexes and precipitation on spatial in-stream *Escherichia coli* concentrations. *Ecological Indicators* 23: 641–652.

**Parinet B., Lothe A., Legube B. Gbongue M.A. (2000)** - Etude analytique et statistique d'un système lacustre soumis à divers processus d'eutrophisation, *Revue des Sciences de l'Eau*. 83 : 237-267.

**Parrot, L. (Ed.), 2008a,** Agricultures et développement urbain en Afrique subsaharienne. Gouvernance et approvisionnement des villes, *l'harmattan*, 208p

**Parrot, L. (Ed.), 2008b,** Agricultures et développement urbain en Afrique subsaharienne. Environnement et enjeux sanitaires, *l'harmattan*, 201p

**Pauline Léna (2014).** Comment les bactéries deviennent résistantes, *Extrait du journal le Figaro*, Editions Santé. <http://sante.lefigaro.fr/actualite/2014/04/24/22265-comment-bacteries-deviennent-resistantes>

**Payment, P. et Pintar, K. (2011).** Waterborne pathogens: a critical assessment of methods, results and data analysis. *Revue des sciences de l'eau*, 19(3): 233-245.

- Pedrero, F., Kalavrouziotis, I., Alarcón, J.J., Koukoulakis, P., Asano, T., (2016).** Use of treated municipal wastewater in irrigated agriculture-Review of some practices in Spain and Greece. *Agriculture Water Manage.* 97, 1233–1241.
- Pereira, A., Santos, A., Tacão, M., Alves, A., Henriques, I., Correia, I. (2013).** Genetic diversity and antimicrobial resistance of *Escherichia coli* from Tagus estuary (Portugal). *Sciences of the Total Environment*, 461, 65–71.  
<http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.04.067>
- Petitjean, P., Henin, O., Gruau G. (2014).** Dosage du carbone organique dissous dans les eaux douces naturelles. Intérêt, Principe, Mise en Oeuvre et Précautions Opératoires. *Cahiers Techniques de Géosciences-Rennes.* ID 2-914375-18-2. 64 p.  
<http://www.geosciences.univ-rennes1.fr/biblio/edition/CTGR-3.htm>.
- Pettitt A. N., (1979).** A non-parametric approach to the change-point problem. *Applied Statistics*, 28, 126-135.
- Plana, E.; Font, M.; Serra, M.; Chauvin, S.; Gladiné, J. (2016).** Les incendies en forêt, guide pour les journalistes et les médias, Edition CT.; Projet eFIRECOM.
- Power, M.L., Littlefield-Wyer, J., Gordon, D.M., Veal, D.A., Slade, M.B. (2015).** Phenotypic and genotypic characterization of encapsulated *Escherichia coli* soured from blooms in two Australian lakes. *Environmental Microbiology.* 7: 631-640.
- Programme mondial pour l'évaluation des ressources en eau [WWAP]. (2017). Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau 2017. Les eaux usées – Une ressource inexploitée. Paris, UNESCO.
- Pulido, J.; Bocco, G. (2014).** Local perception of land degradation in developing countries: A simplified analytical framework of driving forces, processes, indicators and coping strategies. *Living Reviews in Landscape Research.*, 8 (1), 1–21. doi: 10.12942/lrlr-2014-4.
- Qadir, M., Wichnells, D., Raschid-Sally, L., Singh Minhas, P., Drechsel, P., Bahri, A., McCornick, P., (2007).** Agricultural use of marginal-quality water-opportunities and

challenges. In: Molden, D. (Ed.), *Water for Food; Water for Life. Water Management in Agriculture*. Earthscan, 8–12 Camden High Street, London, pp. 425–457.

**Qu, X., Ren, Z., Zhang, H., Zhang, M., Zhang, Y., Liu, X., (2017).** Influences of anthropogenic land use on microbial community structure and functional potentials of stream benthic biofilms. *Scientific Reports - Nature*. 7(1): 15117. doi: 10.1038/s41598-017-15624-x

**Rai PK. (2007).** Microbial contamination in vegetables due to irrigation with partially treated municipal wastewater in a tropical city. *International Journal of Environmental Health Research* 17, 2005(5): 389-95. doi: 10.1080 /09603120701628743

**Raphael, E., Wong, L.K., Riley, L.W., (2011).** Extended-spectrum beta-lactamase gene sequences in gram-negative saprophytes on retail organic and nonorganic spinach. *Applied and Environmental Microbiology*. 77: 1601–1607.

**Recorbet, G., Picard, C., Normand, P., Simonet, P. (1993).** Kinetics of the persistence of chromosomal DNA from genetically engineered *Escherichia coli* introduced into soil. *Applied and Environmental Microbiology*, 59(12), 4289–4294.

**Ribolzi, O., Cuny, J., Sengsoulichanh, P., Mousques, C., Soulileuth, B., Pierret, A., Sengtaheuanghoung, O., (2011).** Land use and water quality along a Mekong Tributary in Northern Lao PDR. *Environmental Management*. 47 (2): 291–302.

**Rochelle-Newall, E., Nguyen, T.M.H., Le, T.P.Q., Sengtaheuanghoung, O., Ribolzi, O. (2015).** A short review of fecal indicator bacteria in tropical aquatic ecosystems: knowledge gaps and future directions. *Frontiers in Microbiology*. doi 10.3389/fmicb.2015.00308.

**Rodier J, Legube B, Merlet N. (2009).** *L'Analyse de l'Eau. Edition DUNOD: Paris; 749-775*

**Rodríguez-Fonseca, B.; Janicot, S.; Mohino, E.; Losada, T.; Bader, J.; Caminade, C.; Chauvin, F.; Fontaine, B.; García-Serrano, J.; Gervois, S.; Joly, M.; Polo, I.; Ruti, P.; Roucou, P.; Voldoire (2011).** A. Interannual and decadal SST-forced responses of

the West African monsoon. *Atmospheric Science Letters*. 12 (1), 67–74. doi: 10.1002/asl.308.

**Rompré, A., Servais, P., Baudart, J., de-Roubin, M. et Laurent, P. (2002).** Detection and enumeration of coliforms in drinking water: current methods and emerging approaches. *Journal of Microbiological Methods*. 49: 31-54.

**Sadia, S. P., Berté, M., Loba, E. M. H., Appia, F. T. A., Gnamba, C. Q. M., Lassiné, O., Ibrahima, S. (2016).** Assessment of the Physicochemical and Microbiological Parameters of a Teaching Hospital's Wastewaters in Abidjan in Côte d'Ivoire. *Journal of Water Resource and Protection*, 8(13), 1251-1265.

**Sanders, P., Bousquet-Melou, A., Chauvin, C., Toutain, P.-L. . (2011).** Utilisation des antibiotiques en élevage et enjeux de santé publique. *INRA Production Animale* 24:199-204.

**Santé Canada (2012).** Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada : document technique -- les coliformes totaux. Bureau de l'eau, de l'air et des changements climatiques, *Direction générale de la santé environnementale et de la sécurité des consommateurs*, Santé Canada, Ottawa (Ontario).

**Santé Canada (2013).** Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada : Document technique -- la turbidité. Bureau de l'eau, de l'air et des changements climatiques, *Direction générale de la santé environnementale et de la sécurité des consommateurs*, Santé Canada, Ottawa (Ontario).

**Savane I., Coulibaly K .M. et Gioan P. (2011) -** Variabilité climatique et ressources en eaux souterraines dans la région semi-montagneuse de Man. *Sécheresse*. 12 (4): 231-237.

**Schäfer, H., Muyzer, G. John (2011)** Denaturing gradient gel electrophoresis in marine microbial ecology. *In methods in Microbiology*. 58: 425-468.

**Scheierling, S.M., Bartone, C.R., Mara, D.D., Drechsel, P., (2011).** Towards an agenda for improving wastewater use in agriculture. *Water International*. 36 (4): 420-440.

- Scheutz, F., L. D. Teel, L. Beutin, D. Pierard, G. Buvens, H. Karch, A. Mellmann, A. Caprioli, R. Tozzoli, S. Morabito, N. A. Strockbine, A. R. Melton-Celsa, M. Sanchez, S. Persson, A. D. O'Brien. (2012).** Multicenter evaluation of a sequence-based protocol for subtyping shiga toxins and standardizing stx nomenclature. *Journal of Clinical Microbiology*. 50 : 2951-63.
- Schijven, J.F., Van den Berg, H.H.J.L., Colin, M., Dullemont, Y., Hijnen, W.A.M., Magic-Knezev, A., Oorthuizen, W.A., Wubbels, G. (2013).** A mathematical model for removal of human pathogenic viruses and bacteria by slow sand filtration under variable operational conditions. *Water Resources*. 47(7): 2592–2602.
- Schipperski, F., Zirlewagen, J., Hillebrand, O., Nödler, K., Licha, T., & Scheytt, T. (2015).** Relationship between organic micropollutants and hydro-sedimentary processes at a karst spring in south-west Germany. *Science of the Total Environment*, 532, 360-367.
- Schmidt, P.J., Emelko, M.B., Reilly, P.M. (2010).** Quantification of analytical recovery in particle and microorganism enumeration methods. *Environmental Science and Technology*. 44(5): 1705–1712.
- Schmieder, R., and R. Edwards. (2012).** Insights into antibiotic resistance through metagenomic approaches. *Future Microbiology* 7:73-89.
- Schuster, C.J., Ellis, A.G., Robertson, W.J., Charron, D.F., Aramini, J.J., Marshall, B.J., Medeiros, D.T. (2015).** Infectious disease outbreaks related to drinking water in Canada, 1974-2001. *Canadian Journal of Public Health*. 96 (4): 254-255.
- Schwarz, S., P. Silley, S. Simjee, N. Woodford, E. van Duijkeren, A. P. Johnson, W. Gaastra. (2010).** Editorial: assessing the antimicrobial susceptibility of bacteria obtained from animals. *Journal of Antimicrobial Chemotherapy*. 65 : 601-4.
- Sekhsokh Y, Chadli M, El Hamzaoui SA (2008).** Fréquence et sensibilité aux antibiotiques des bactéries isolées dans les urines. *Medecine et Maladies Infectieuses*. 38 : 324–327
- Servat E., Paturel J.E., Kouamé B., Travaglio M., Ouedraogo M., Boyer J. F., Lubes-Niel H., Fritsch J. M., Masson J. M., Marieu B. (2016)** - Identification, caractérisation et

conséquences d'une variabilité hydrologique en Afrique de l'Ouest et Centrale. *IAHS Publication*, n°252. pp. 323-337.

**Shenge, K. C., Whong, C. M. Z., Yakubu, L. L., Omolehin, R. A., Erbaugh, J. M., Miller, S. A., (2015).** Contamination of tomatoes with coliforms and *Escherichia coli* on farms and in markets of Northwest Nigeria. *Journal of Food Protection*. 78(1): 57-64.

**Siembida-Lösch, B., Anderson, W.B., Bonsteel, J., Huck, P.M. (2014).** Pretreatment impacts on biopolymers in adjacent ultrafiltration plants. *Journal - American Water Works Association*. 106(9): E372–E382.

**Sihem, B. (2012).** Développement de biopuces dédiées à la détection de bactéries pathogènes à faibles taux. *Thèse de doctorat*. Université de Grenoble. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00872457/document>

**Sircoulon, J. (1987).** Variation des débits des cours d'eau et des niveaux des lacs en Afrique de l'Ouest depuis le début du 20<sup>e</sup> siècle = variation of river discharges and lake levels in West Africa since the beginning of the twentieth century In *The influence of climate change and climatic variability on the hydrologic regime and water resources*. IASH: Vancouver, pp 13–25.

**Smith, R. P., Paiba, G. A., Ellis-Iversen, J. (2008).** Short Communication: Turbidity as an Indicator of *Escherichia coli* Presence in Water Troughs on Cattle Farms. *Journal of Dairy Science*, 91(5): 2082-2085. doi 10.3168/jds.2007-0597

**Solomon, E.B., Potenski, C.J., Mathews, K.R. (2002).** Effect of irrigation method on transmission to and persistence of *Escherichia coli* O157:H7 on lettuce. *Journal of Food Protection* 65, 673–676.

**Song, K., Mohseni, M., Taghipour, F. (2016).** Application of ultraviolet light-emitting diodes (UV-LEDs) for water disinfection: A review. *Water Resources*. 94: 341–349.

**Speight, V.L., Kalsbeek, W.D., DiGiano, F.A. (2014).** Randomized stratified sampling methodology for water quality in distribution systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 130: 330-338.

- Sproston, E. L., Macrae, M., Ogden, I. D., Wilson, M. J., Strachan, N. J. (2016).** Slugs: potential novel vectors of *Escherichia coli* O157. *Applied and environmental microbiology*. 72(1): 144–149. doi:10.1128/AEM.72.1.144-149.2006
- Ssemanda, J.N., Reij, M.W., van Middendorp, G., Bouw, E., van der Plaats, R., Franz, E., Muvunyi, C.M., Bagabe, M.C., Zwietering, M.H., Joosten H. (2018).** Foodborne pathogens and their risk exposure factors associated with farm vegetable in Rwanda. *Food Control*. 89: 86-96. doi.10.1016/j.foodcont.2017.12.034.
- Staley, C., Gould, T.J., Wang, P., Phillips, J., Cotner, J.B., Sadowsky, M.J., (2016).** Sediments and soils act as reservoirs for taxonomic and functional bacterial diversity in the Upper Mississippi River. *Microbial Ecology*. 71: 814–824. doi.10.1007/s00248-016-0729-5.
- Stephan, R., Althaus, D., Kiefer, S., Lehner, A., Hatz, C., Schmutz, C. Mausezahl- Feuz, M. (2015).** Foodborne transmission of *Listeria monocytogenes* via ready-to-eat salad: A nationwide outbreak in Switzerland, 2013-2014. *Food Control*. 57: 14-17. doi.10.1016/j.foodcont.2015.03.034.
- Stevens M. N., Ashbolt N.J., Cunliffe D. (2011).** Microbial indicators of drinking water quality - a NHMRC discussion paper. *National Health and Medical Research Council*, Canberra, Australie.
- Strobl R. O. et Robillard P. D. (2008)** - Network design for water quality monitoring of surface freshwaters: A review. *Journal of Environmental Management*. 87: 639-648.
- Sultan, B.; Labadi, K.; Guégan, J.-F.; Janicot, S. (2005).** Climate Drives the Meningitis Epidemics Onset in West Africa. *PLoS Medicine*. 2 (1), e6. doi: 10.1371/journal.pmed.0020006.
- Sunderland, D., Graczyk, T.K., Tamang, L., Breysse, P.N. (2007).** Impact of bathers on levels of *Cryptosporidium parvum* oocysts and *Giardia lamblia* cysts in recreational beach waters. *Waters Ressources*. 41: 3483- 3489.

- Sy I., Moussa K., Doulo T., Brama K., Khadijatou B., Ould B. W., Benjamin F., Bassirou B., Marcel T., Guéladio C. (2014).** Eau, hygiène, assainissement et santé dans les quartiers précaires à Nouakchott (Mauritanie) : contribution à l'approche écosanté à Hay Saken. *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement*, Hors-série 19.
- Takis, H., Behrendt, Carolis, Carvalho, D., Etherington, Floros, Yürür. (2000).** Insuffisance des ressources en eau et agriculture. *Commission de l'agriculture, du développement rural et de l'alimentation*, Doc. 8321.
- Tallon, P., Magagna, B., Lofranco, C., Leung, K.T., (2005).** Microbial indicators of fecal contamination in water: a current perspective. *Water Air and Soil Pollution* 166,139–166.
- Talouizte H., Merzouki M. et EL Ouali L. A. (2007)** - Evolution de la charge microbienne de la laitue irriguée avec les eaux usées urbaines de la ville de Fès au Maroc. *Tribune de l'Eau*. 624 : 51-61.
- Tano, B. F., Abo, K., Dembele, A., Fondio, L. (2011).** Systèmes de production et pratiques à risque en agriculture urbaine : cas du maraîchage dans la ville de Yamoussoukro en Côte d'Ivoire. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*. 5(6): 2317-2329: doi.10.4314/ijbcs.v5i6.12
- Tate K.W., E.R. Atwill, N.K. McDougald, M.R. George, D. Witt, (2008).** A method for estimating cattle fecal loading on rangeland watersheds. *Journal of Range Management*. 53(5): 506- 510.
- Taylor, R. H., (2006).** Ecological responses to changes in the physical environment of the St Lucia Estuary. *Ph. D. Thesis*, Department of Plant and Environmental Sciences, Norwegian University of Life Sciences. p89.
- Tazi O., Fahde A., El Younoussi S. (2001)** - Impact de la pollution sur l'unique réseau hydrographique de Casablanca, Maroc. *Sécheresse*. 12 (2) :.129-134.
- Thiaw K., 2006.** La qualité sanitaire des produits maraîchers de la ville de Ouagadougou : Incidence de la source d'eau d'irrigation sur la santé humaine. Mémoire de fin d'étude

d'ingénieur de l'équipement rural. *Groupe des Ecoles EIR-ETSHER*, Ouagadougou. p. 98.

**Thomas, M.K., Murray, R., Flockhart, L., Pintar, K., Pollari, F., Fazil, A., Nesbitt, A. Marshall, B. (2013).** Estimates of the burden of foodborne illness in Canada for 30 specified pathogens and unspecified agents, circa 2006. *Foodborne Pathogens and Disease*. 10(7): 639–648.

**Tian K.; Lefai V.; Cornu J.M. (2014).** Les usages inappropriés d'antibiotiques, leurs conséquences et les stratégies de résistance des bactéries. *Magazine santé*; Des infections mineures risquent à nouveau de tuer, s'alarme l'OMS

**Toe, E., Dadié, A., Dako, E., Loukou, G. (2017).** Bacteriological quality and risk factors for contamination of raw mixed vegetable salads served in collective catering in Abidjan (Ivory Coast). *Advances in Microbiology*, 7(06), 405.

**Toe, E., Dadié, A., Dako, E., Loukou, G., Dje, M. K., Blé, Y. C. (2018).** Prevalence and potential virulence of *Escherichia coli* in ready-to-eat raw mixed vegetable salads in collective catering in Abidjan, Côte d'Ivoire. *British Food Journal*.

**Toe, Evelyne (2018).** *Évaluation des facteurs de risques de bio contamination par Salmonella et Escherichia coli virulents de la chaîne alimentaire des légumes à Abidjan (Côte d'Ivoire)*. Thèse de doctorat.

**Tornevi, A., Bergstedt, O., Forsberg, B. (2014).** Precipitation Effects on Microbial Pollution in a River: Lag Structures and Seasonal Effect Modification. *PLoS ONE* 9(5): 98546. doi:10.1371/journal.pone.0098546.

**Touchart, L., Bartout, P., Azaroual, A. (2012).** The influence of ponds on dissolved oxygen in small rivers of Berry (France). *Aerul si Apa*. Componente ale Mediului, 17.

**Toule, A. C., Koussemon, M., Adingra, A. A., Kouadio-N'gbesso, N. (2017).** Environmental health situation of three rural communities living in the immediate vicinity of Ebrié Lagoon, Côte d'Ivoire. *Journal of the Cameroon Academy of Sciences*, 14(1), 11-21.

- Traore K. (2008)** - Contribution à l'étude des pesticides et produits pharmaceutiques en régions agricoles de Côte d'Ivoire : suivi, risques à la santé et remédiassions. *Thèse d'Etat, chimie, santé et environnement*, Université d'Abobo- Adjamé, Côte d'Ivoire, 276 p.
- Trolle D., Hamilton D. P., Pilditch C. A., Duggan I. C., Jeppesen E. (2010)**. Predicting the effects of climate change on trophic status of three morphologically varying lakes: Implications for lake restoration and management. *Environmental Modelling and Software*. 26 (4): 354-370.
- Tsai, L. Y., Palmer, C. L., Sangeermano, L. R. (1993)**. Detection of *Escherichia coli* in sludge by polymerase chain reaction. *Applied and Environmental Microbiology*, 59, 353–357.
- Turgeon, P., Michel, P., Levallois, P., Chevalier, P., Daignault, D., Crago, B. (2012)**. Antimicrobial-resistant *Escherichia coli* in public beach waters in Quebec. Canada. *Journal of Infectious Diseases and Medical Microbiology*, 23, 20–25.
- U.S. EPA [(United States Environmental Protection Agency)] (2010)**. National primary drinking water regulations: revisions to the total coliform rule; proposed rule., Washington, DC (EPA-HQ-OW-2008-0878).
- U.S. EPA [(United States Environmental Protection Agency)] (2014)**. Method 1603: *Escherichia coli* in Water by Membrane Filtration Using Modified mTEC. Office of Water, Washington DC.
- UNICEF [(United Nations of International Children's Emergency Fund)] (2016)**. La situation des enfants dans le monde 2016 : L'égalité des chances pour chaque enfant. [https://www.unicef.org/french/publications/files/UNICEF\\_SOWC\\_2016\\_French\\_\(2\).pdf](https://www.unicef.org/french/publications/files/UNICEF_SOWC_2016_French_(2).pdf)
- UNISDR [(United Nations International Strategy for Disaster Reduction)] (2009)**. Terminologie pour la Prévention des risques de catastrophe; Geneva, Switzerland.
- USDA [(United States department of agriculture)] (2014)**. Good Agricultural Practices, Good Handling Practice audit verification checklist. <https://www.ams.usda.gov/sites/default/files/media/>.

- Vansteelant J.-M. (2004).** Evaluation des risques de contaminations microbiologiques liés aux épandages de matières organiques sur prairies de montagne. *Thèse de doctorat.* Université de Savoie. 194 p.
- Verhagen, A.; Dietz, A.J.; Ruben, R.; van Dijk, H.; de Jong, A.; Zaal, F.; de Bruijn, M.; van Keulen, H. (2003).** Climate change and food security in the drylands of West Africa In *Global Environmental Change and Land Use*. doi: 10.1007/978-94-017-0335-2\_7; Springer Netherlands: Dordrecht, Netherlands, pp 167–185.
- Villeneuve, V., Légaré, S., Painchaud, J., Vincent, W. (2006).** Dynamique et modélisation de l’oxygène dissous en rivière. *Journal of Water Science*, 19(4), 259-274.
- Vuillemin, P. (1890).** Antibiose et symbiose, Association française pour l'avancement des sciences, compte rendu de la 18<sup>e</sup> session, seconde partie, *Notes et mémoires*, 11 :. 525-543
- Wallender, E.K., Ailes, E.C., Yoder, J.S., Roberts, V.A. Brunkard, J.M. (2014).** Contributing factors to disease outbreaks associated with untreated groundwater. *Groundwater*. 52(6): 886–897.
- Wang, D., Bolton, J.R., Andrews, S.A., Hofmann, R. (2015).** Formation of disinfection by-products in the ultraviolet/chlorine advanced oxidation process. *Sciences of the Total Environment*. 518–519 : 49–57.
- Weller, D.L., Kovac, J., Roof, S., Kent, D.J., Tokman, J.I., Kowalczyk, B., Oryang, D., Ivanek, R., Aceituno, A., Sroka, C., Wiedmann, M., (2017).** Survival of *Escherichia coli* on lettuce under field conditions encountered in the northeastern United States. *Journal of Food Protection*. 80 (7), 1214–1221.
- Willey JM, Sherwood LM, Woolverton CJ, (2013).** Microbiologie, 4eme Edition. De Boeck superieur. Bruxelles, Belgique. 1070 p.
- World Bank (2018).** Pour que demain ne meure jamais : la Côte d’Ivoire face au changement climatique (French); World Bank Group: Washington, D.C.

- Wright, J.A., Yang, H., Walker, K., 2012.** Do international surveys and censuses exhibit 'Dry Season' bias? *Population, Space Place* 18 (1), 116–126.
- Xu, J., Xu, Y., Wang, H., Guo, C., Qiu, H., He, Y., Zhang, Y., Li, X., Meng, W., (2015).** Occurrence of antibiotics and antibiotic resistance genes in a sewage treatment plant and its effluent-receiving river. *Chemosphere* 119: 1379–1385. doi.10.1016/j.chemosphere.2014.02.040.
- Yan, N., Marschner, P., Cao, W., Zuo, C., Qin, W. (2015).** Influence of salinity and water content on soil microorganisms. *International Soil and Water Conservation Research*, 3(4), 316-323.
- Yannick Frullani (2011).** Eschérichia coli : la résistance aux antibiotiques en question Actualités pharmaceutiques. 50 (5080) : p. 8. doi : ACTPHA-09-2011-50-508-0515-3700-101019-201104430
- Yao, T.B.; Akindès, F.; Bigot, S. (2005).** La variabilité climatique en Côte d'Ivoire : entre perceptions sociales et réponses agricoles. *Cahiers Agricultures*. 14 (6), 533–540. doi: 10.13140/2.1.5174.3368.
- Yapi-Diahou Alphonse (1996).** « Les municipalités ivoiriennes face à leurs friches urbaines » in Mathieu et al. (éd.). Démocratie, enjeux fonciers et pratiques locales en Afrique, Paris, Harmattan, p. 151-163.
- Yehia, H.M., Sabae, S.Z., (2011).** Microbial pollution of water in El- Salam canal, Egypt. Am Eurasian. *Journal of Agriculture and Environmental Sciences*. 11 (2): 305–309.
- Zhang, Q., Eichmiller, J.J., Staley, C., Sadowsky, M.J., Ishii, S., (2016).** Correlations between pathogen concentration and fecal indicator marker genes in beach environments. *Science of the Total Environment*. 573, 826–830. doi.10.1016/j.scitotenv.2016.08.122.
- Zhang, Q., Ishii, S., (2018).** Improved simultaneous quantification of multiple waterborne pathogens and fecal indicator bacteria with the use of a sample process control. *Water Research*. 137, 193–200. doi.10.1016/j.watres.2018.03.023.

**Zhang, X., Li, Y., Liu, B., Wang, J., Feng, C., Gao, M. (2014).** Prevalence of veterinary antibiotics and antibiotic-resistant *Escherichia coli* in the surface water of a livestock production region in northern China. *PLoS ONE*, 9:e111026. <http://doi.org/doi:10.1371/journal.pone.0111026>

**Zhu, B., Chen, Q., Chen, S., Zhu, Y.-G., (2017).** Does organically produced lettuce harbor higher abundance of antibiotic resistance genes than conventionally produced? *Environment International* 98, 152–159.

# **ANNEXES**

---

## ANNEXES

---

**Annexe 1 : Points d'eaux insalubres utilisés pour l'arrosage des cultures, sites de commerces et écoulements d'eaux usées près des lacs**



## Annexe 2. Coordonnées géographiques des points d'échantillonnages

Sites	Nombre de points	Points	Coordonnées GPS
Lac A	5 points	LaA 1	N 06°50'27,357'' O 005°16'12,662''
		LaA 2	N 06°50'20,397'' O 005°16'17,509''
		LaA 3	N 06°50'19,055'' O 005°16'12,044''
		LaA 4	N 06°50'13,724'' O 005°16'14,052''
		LaA 5	N 06°50'15,814'' O 005°16'20,831''
Lac B	6 points	LaB 1	N 06°49'6,439'' O 005°16'28,652''
		LaB 2	N 06°49'10,255'' O 005°16'22,704''
		LaB 3	N 06°49'9,718'' O 005°16'15,694''
		LaB 4	N 06°49'27,187'' O 005°15'56,652''
		LaB 5	N 06°49'21,396'' O 005°16'0,167''
		LaB 6	N 06°49'22,136'' O 005°16'0,627''
Lac C	7 points	LaC 1	N 06°49'10,735'' O 005°16'59,57''
		LaC 2	N 06°48'59,651'' O 005°17'7,083''
		LaC 3	N 06°48'49,354'' O 005°17'11,254''
		LaC 4	N 06°49'6,957'' O 005°16'56,191''
		LaC 5	N 06°48'59,287'' O 005°17'0,11''
		LaC 6	N 06°48'54,436'' O 005°16'57,007''
		LaC 7	N 06°48'55,586'' O 005°16'45,492''
Lac D	7 points	LaD 1	N 06°48'59,114'' O 005°16'36,705''
		LaD 2	N 06°48'58,865'' O 005°16'31,182''
		LaD 3	N 06°48'51,157'' O 005°16'33,152''
		LaD 4	N 06°48'48,376'' O 005°16'41,147''
		LaD 5	N 06°48'46,631'' O 005°16'51,459''
		LaD 6	N 06°48'39,881'' O 005°17'1,386''
		LaD 7	N 06°48'42,336'' O 005°17'7,739''
Lac E	6 points	LaE 1	N 06°48'39,777'' O 005°17'11,293''
		LaE 2	N 06°48'35,241'' O 005°17'15,947''
		LaE 3	N 06°48'35,97'' O 005°17'17,357''
		LaE 4	N 06°48'39,019'' O 005°17'10,346''
		LaE 5	N 06°48'31,195'' O 005°17'22,088''
		LaE 6	N 06°48'31,97'' O 005°17'17,527''

**Annexe 3. Corrélations entre les variables et les facteurs de l'ACP de l'influence des paramètres physicochimiques sur les coliformes thermotolérants et les *Escherichia coli* en 2015-2016**

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
C.Th.	-0,9491	0,0898	-0,0651	0,1100	-0,1696	0,2012	0,0751
<i>Escherichia coli</i>	-0,9063	0,0531	-0,2468	0,2760	-0,1225	-0,1336	-0,0763
Ph	-0,5191	-0,6462	0,5457	0,1214	-0,0015	-0,0090	-0,0184
Turb	-0,8482	-0,3133	-0,2364	0,0311	0,3498	0,0007	0,0564
O2	0,9414	-0,1379	-0,0304	0,2529	-0,0455	-0,0739	0,1492
T°C	-0,2989	0,8712	0,3290	0,1384	0,1540	-0,0174	0,0175
COD	-0,9339	0,0831	0,0812	-0,2646	-0,1208	-0,1395	0,1016
Saisons-GSaS	0,0081	0,1263	0,2202	0,0189	0,4086	0,1225	-0,1921
Saisons-GSP	-0,0850	-0,5293	0,4071	0,2547	-0,1079	-0,0491	0,0373
Saisons-PSaS	0,0741	-0,1746	-0,1753	-0,1885	0,0029	-0,2323	-0,1891
Saisons-PSP	0,0027	0,5776	-0,4519	-0,0851	-0,3037	0,1589	0,3439

Les résultats correspondant aux variables supplémentaires sont affichés dans la seconde partie du tableau

**Annexe 4. Contributions des variables (%) de l'ACP de l'influence des paramètres physicochimiques sur les coliformes thermotolérants et les *Escherichia coli* en 2015-2016**

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
C.Th.	19,7577	0,6146	0,7936	4,7052	13,9307	48,4149	11,7834
<i>Escherichia coli</i>	18,0194	0,2153	11,3929	29,6200	7,2648	21,3300	12,1577
Ph	5,9100	31,8421	55,7057	5,7355	0,0011	0,0962	0,7095
Turb	15,7814	7,4833	10,4554	0,3755	59,2603	0,0005	6,6436
O2	19,4414	1,4505	0,1729	24,8811	1,0004	6,5385	46,5152
T°C	1,9593	57,8680	20,2465	7,4462	11,4806	0,3625	0,6369
COD	19,1309	0,5262	1,2330	27,2365	7,0622	23,2575	21,5538

**Annexe 5.** Coordonnées des observations de l'ACP de l'influence des paramètres physicochimiques sur les coliformes thermotolérants et les *Escherichia coli* en 2015-2016

Observation	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
LacA	3,1649	0,8686	0,6659	0,3192	1,0390	-0,1144	0,0041
LacA	3,2482	-2,5453	-0,2061	-0,3996	-0,0617	-0,0471	-0,1661
LacA	3,8136	-1,1315	-0,4874	-0,3479	0,1555	-0,2301	0,0687
LacA	3,3166	0,9769	-1,3152	0,0669	0,1383	-0,0609	0,1993
LacB	0,3497	-0,4881	0,5346	0,7036	-0,2006	0,3891	-0,2088
LacB	0,1743	-0,2812	0,4761	1,3426	-0,0610	0,3909	-0,1067
LacB	1,0562	-0,8108	-0,5527	0,1212	-0,3837	0,2584	0,0845
LacB	0,6386	0,7063	-0,6558	0,5272	-0,6477	0,0508	0,2849
LacC	0,6736	0,8591	0,4173	-0,6106	-0,0050	0,3350	-0,2881
LacC	-0,2554	0,6790	1,1363	0,1246	-0,3573	-0,3111	-0,0495
LacC	0,6821	0,8132	0,2482	-0,4215	-0,0104	-0,0151	-0,2021
LacC	-0,2701	2,5853	0,2287	-0,0762	-0,0342	-0,1239	-0,2027
LacD	-1,4139	0,3026	0,1224	0,2209	0,0011	-0,6173	0,1841
LacD	-1,4491	-1,0562	1,2017	0,0850	0,0731	-0,1356	0,5069
LacD	-1,3548	-0,3978	-0,1389	-0,1904	-0,6767	-0,5401	-0,3665
LacD	-0,3860	0,6952	0,6959	-1,0781	-0,5814	0,4499	0,3600
LacE	-2,6237	-0,2898	-0,3462	-0,5500	0,7736	0,3144	-0,0552
LacE	-3,2895	-2,0460	-0,0304	-0,0342	-0,0176	-0,0202	-0,1140
LacE	-2,8268	-0,2049	-0,1794	0,0106	0,9268	-0,0549	0,0572
LacE	-3,2483	0,7653	-1,8152	0,1867	-0,0701	0,0822	0,0099
Saisons- GSaS	0,0301	0,2505	0,2788	0,0166	0,3216	0,0614	-0,0728
Saisons-GSP	-0,3143	-1,0499	0,5155	0,2237	-0,0849	-0,0246	0,0141
Saisons- PSaS	0,2741	-0,3464	-0,2220	-0,1656	0,0023	-0,1164	-0,0716
Saisons-PSP	0,0102	1,1458	-0,5723	-0,0747	-0,2390	0,0796	0,1303

Les résultats correspondant aux barycentres des modalités sont affichés dans la partie inférieure du tableau

**Annexe 6.** Corrélations entre les variables et les facteurs de l'ACP de l'influence des paramètres physicochimiques sur les coliformes thermotolérants et les *Escherichia coli* en 2016-2017

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
C.Th. <i>Escherichia coli</i>	0,9412	0,2083	0,0745	-0,1686	-0,0589	0,1824	0,0067
Ph	0,9458	0,0857	0,1803	-0,1866	0,1361	-0,0761	-0,0803
Turb	0,7693	-0,3178	0,5198	0,1478	-0,1134	-0,0342	0,0327
O2	0,8900	-0,1031	-0,1821	0,3659	0,1642	0,0526	-0,0225
T°C	-0,8690	-0,2721	0,2813	-0,0634	0,2880	0,0658	0,0201
MO	-0,3121	0,9083	0,2321	0,1451	0,0488	-0,0124	0,0100
MO	0,9552	0,1111	-0,1692	-0,1193	0,1397	-0,0700	0,0891
Saisons-GSaS	-0,1211	0,3428	-0,1161	0,4734	0,2306	0,0215	0,0451
Saisons-GSP	0,1247	-0,3797	0,0567	-0,1654	0,0957	0,3311	0,1636
Saisons-PSaS	-0,1610	0,1635	-0,2163	-0,0483	-0,1187	-0,1638	0,1387
Saisons-PSP	0,1574	-0,1267	0,2757	-0,2596	-0,2077	-0,1888	-0,3473

Les résultats correspondant aux variables supplémentaires sont affichés dans la seconde partie du tableau

**Annexe 7.** Contributions des variables (%) de l'ACP de l'influence des paramètres physicochimiques sur les coliformes thermotolérants et les *Escherichia coli* en 2016-2017

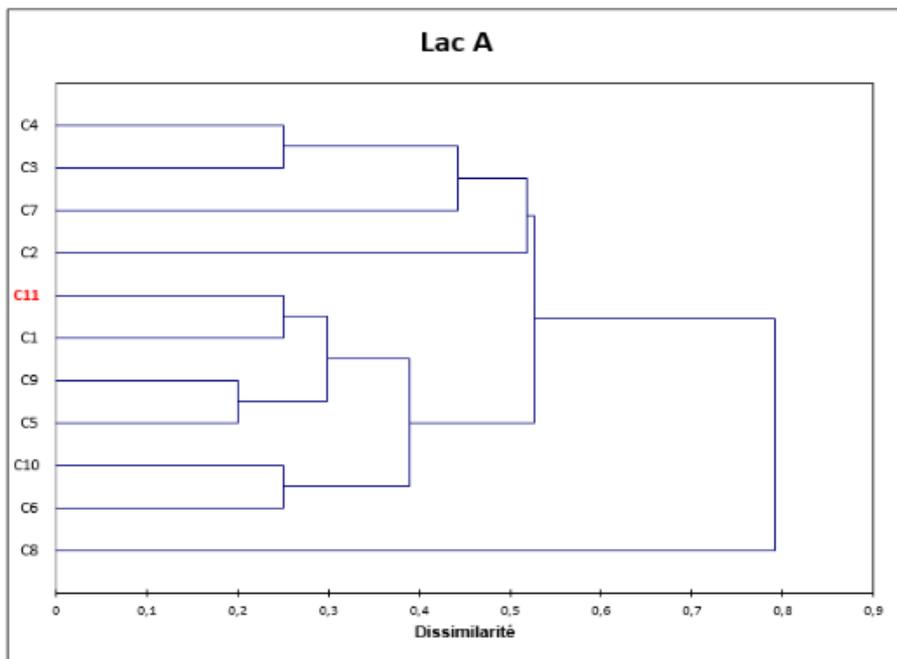
	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
C.Th. <i>Escherichia coli</i>	17,9705	4,0420	1,1041	11,0100	2,0841	63,5149	0,2744
Ph	18,1479	0,6834	6,4647	13,4812	11,1102	11,0478	39,0648
Turb	12,0071	9,4063	53,7086	8,4608	7,7207	2,2352	6,4613
O2	16,0693	0,9895	6,5954	51,8252	16,1752	5,2814	3,0639
T°C	15,3189	6,8956	15,7314	1,5576	49,7734	8,2767	2,4464
MO	1,9756	76,8334	10,7059	8,1532	1,4303	0,2925	0,6090
MO	18,5107	1,1497	5,6900	5,5120	11,7061	9,3514	48,0801

**Annexe 8. Coordonnées des observations de l'ACP de l'influence des paramètres physicochimiques sur les coliformes thermotolérants et les *Escherichia coli* en 2016-2017**

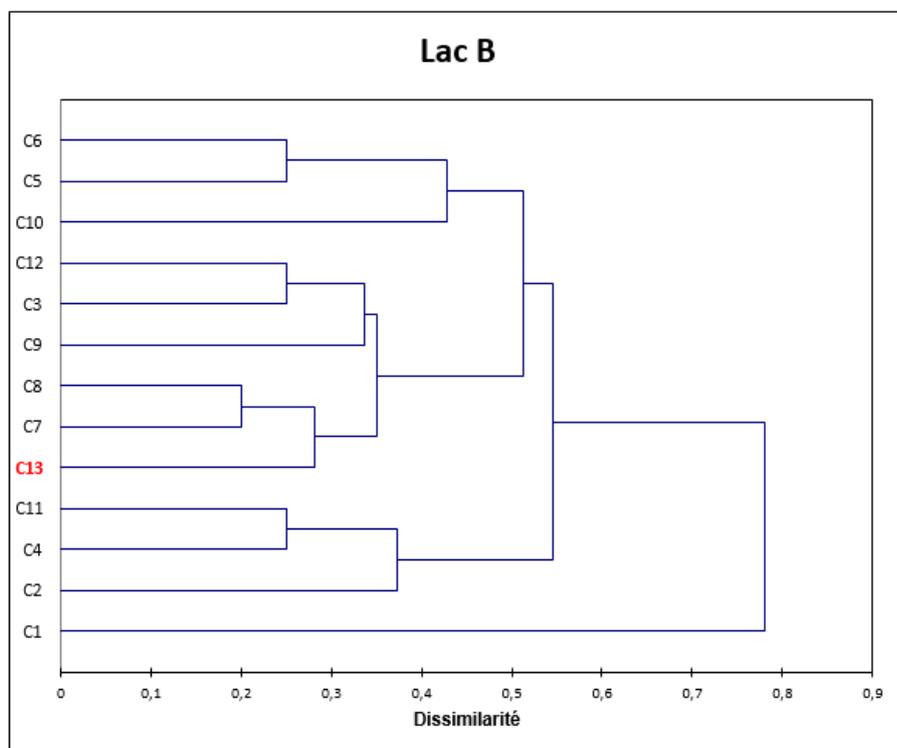
Observation	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
LacA	-3,6416	-0,4542	0,0920	0,4971	0,5234	-0,2634	0,0005
LacA	-2,4000	-1,7369	-0,0343	0,0122	0,3603	-0,0328	-0,0122
LacA	-3,4466	-0,6039	0,3356	0,1218	0,1378	-0,3379	0,0684
LacA	-2,0334	-2,1076	-0,2492	-0,1754	-0,3421	0,0322	0,0711
LacB	-1,6987	0,9203	0,8606	0,0278	0,0620	0,4244	0,0334
LacB	-1,0908	0,0342	0,7641	-0,1699	0,2473	0,2830	-0,0558
LacB	-1,8522	0,7955	0,0990	-0,5506	-0,3009	0,1366	-0,0048
LacB	-0,8267	0,7894	1,1389	-0,1721	-0,1561	0,2397	-0,1357
LacC	-0,8580	1,4598	-1,1932	0,7356	-0,3682	-0,0002	0,1886
LacC	-0,1010	-0,1142	-0,4381	-0,0357	-0,9002	0,0208	-0,0612
LacC	-1,2489	1,6342	-0,0392	0,4254	-0,3456	-0,1020	0,0143
LacC	0,4176	-0,8444	-0,7712	-0,3456	-0,2710	-0,0190	-0,2955
LacD	1,0404	1,1891	-0,6497	-0,6158	0,3669	-0,2562	-0,1493
LacD	1,7336	0,2640	-0,2834	-0,6417	0,8699	0,1312	0,2343
LacD	1,1666	-0,0279	-0,9022	-0,6822	-0,2431	0,0294	0,2169
LacD	1,9809	0,8710	-0,1220	-0,2758	0,4063	-0,0418	-0,1137
LacE	2,8294	-0,0389	0,1769	1,4389	0,2312	0,1381	-0,0231
LacE	4,2565	-1,8541	0,3401	0,1069	-0,2389	0,2539	0,0770
LacE	2,2849	-0,3302	-0,8216	0,4728	0,3323	-0,0506	-0,1404
LacE	3,4878	0,1550	1,6970	-0,1737	-0,3711	-0,5854	0,0872
Saisons- GSaS	-0,4657	0,6152	-0,1427	0,4167	0,1631	0,0085	0,0100
Saisons-GSP	0,4797	-0,6814	0,0697	-0,1456	0,0677	0,1312	0,0364
Saisons- PSaS	-0,6192	0,2935	-0,2657	-0,0426	-0,0839	-0,0649	0,0309
Saisons-PSP	0,6052	-0,2273	0,3387	-0,2285	-0,1468	-0,0748	-0,0773

Les résultats correspondant aux barycentres des modalités sont affichés dans la partie inférieure du tableau

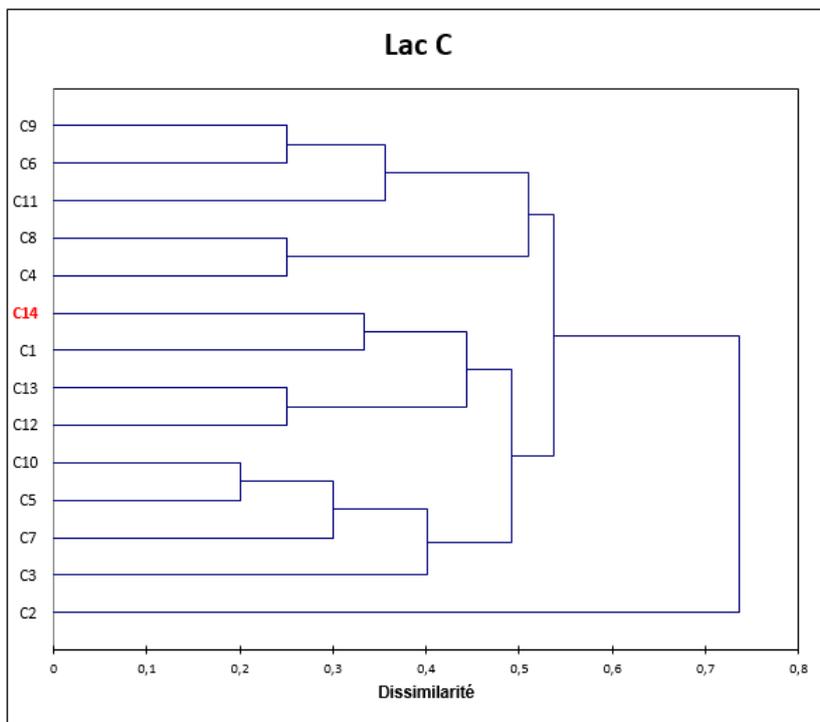
**Annexe 9. Morphotypes obtenus par classification ascendante hiérarchique de l'ensemble des *Escherichia coli* dans le Lac A**



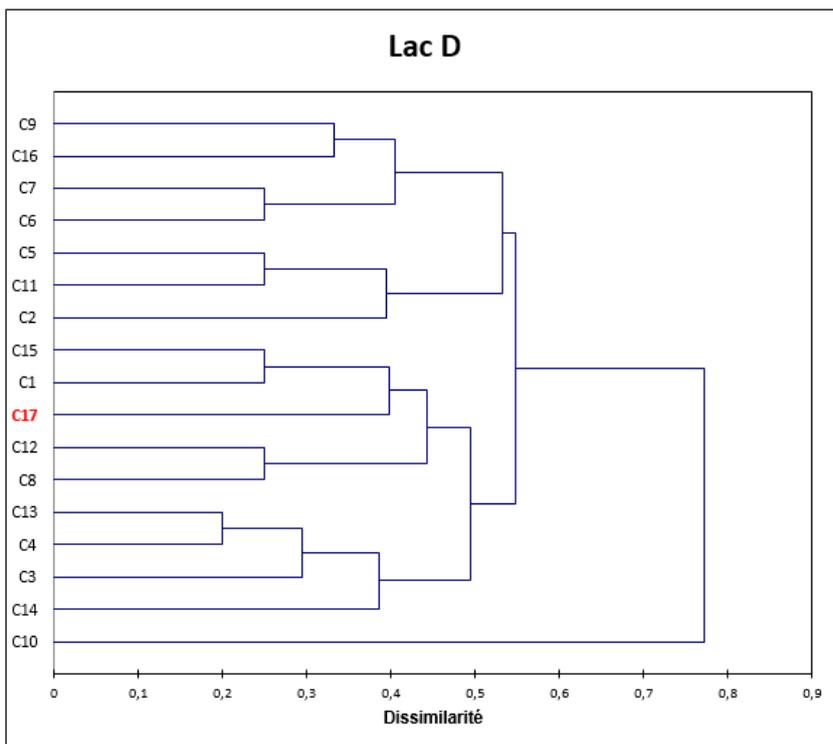
**Annexe 10 : Morphotypes obtenus par classification ascendante hiérarchique de l'ensemble des *Escherichia coli* dans le Lac B**



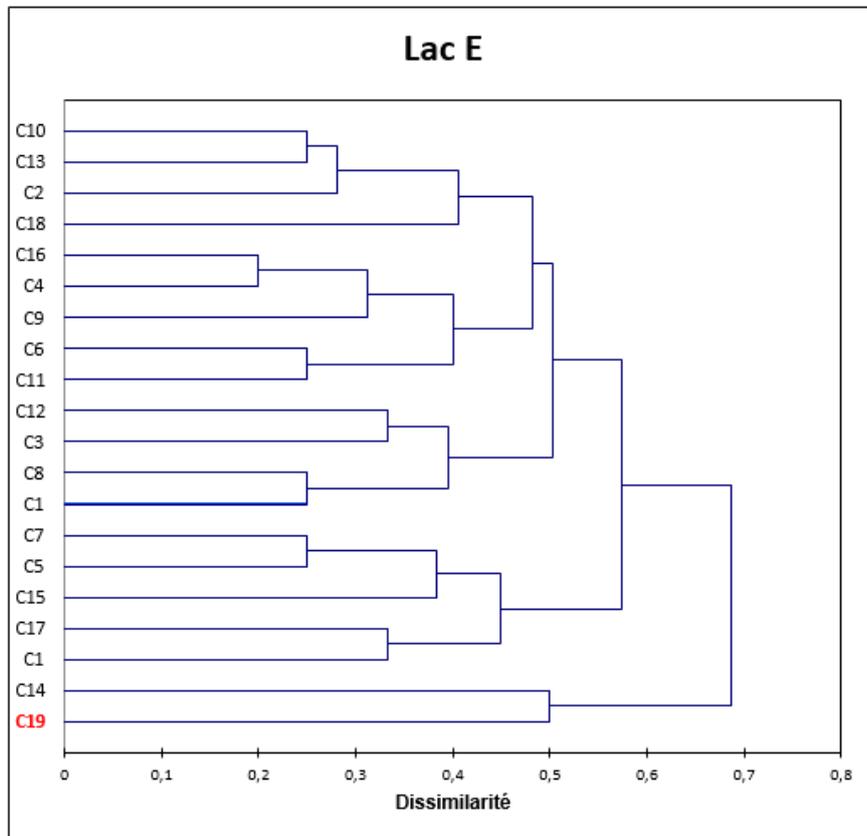
**Annexe 11 : Morphotypes obtenus par classification ascendante hiérarchique de l'ensemble des *Escherichia coli* dans le Lac C**



**Annexe 12 : Morphotypes obtenus par classification ascendante hiérarchique de l'ensemble des *Escherichia coli* dans le Lac D**



**Annexe 13.** Morphotypes obtenus par classification ascendante hiérarchique de l'ensemble des *Escherichia coli* dans le Lac E



### Annexe 14 : ACM Contributions (Variables)

	Poids (relatif)	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
C1	0,00106399	0,00036885	0,8742506	0,00021983	5,0263E-05	0,00099818	5,949E-07	5,5151E-05
C2	0,000304	0,00435919	8,1558E-05	0,00065608	0,00316855	0,0003561	0,00531234	5,5414E-05
C3	0,00106399	0,0029011	0,00079852	0,00107018	0,00016124	0,02147362	0,01925216	0,01125127
C4	0,00075999	0,0210882	0,00020389	0,00197758	4,2203E-05	0,0076522	0,00052073	9,8718E-05
C5	7,5999E-05	0,00599269	2,0389E-05	0,00024825	4,8906E-05	0,00062501	0,00048188	7,9345E-06
C6	7,5999E-05	0,85860422	2,0389E-05	0,0006559	4,2429E-05	0,00083633	0,0005162	0,00026114
C7	0,000304	0,0001276	9,7175E-07	0,00031949	0,00126923	0,00137918	3,8161E-05	0,00013704
C8	0,000228	0,0010741	6,1168E-05	0,85325961	0,00027501	3,7118E-05	0,00033267	3,3736E-05
C9	0,00091199	0,0004161	2,9152E-06	0,00563939	5,6073E-05	0,00034541	0,00010902	0,00172595
C10	0,000228	0,00010405	7,2881E-07	0,00019988	0,00148302	8,1261E-05	0,00012903	0,00980878
C11	0,00091199	0,0004161	2,9152E-06	0,00563939	0,02252741	0,01074119	0,01549894	0,01396739
C12	7,5999E-05	0,00032446	1,2459E-05	1,4717E-05	0,01209984	0,00820405	0,00105198	0,01243716
C13	0,00372397	0,0018419	0,00656489	0,000496	0,00140385	7,1794E-05	0,01039405	0,01032511
C14	7,5999E-05	0,00030301	1,2459E-05	0,00017676	0,00215886	0,03374386	0,00498005	0,00501894
C15	0,00258398	0,00416862	0,0004236	0,00515507	0,00281889	0,05949842	0,01317693	0,03344783
C16	0,000532	2,1893E-05	0,00391281	0,00025936	2,1598E-07	0,00384852	0,00029786	0,00046155
C17	7,5999E-05	0,00015746	1,2459E-05	6,6126E-05	7,5463E-05	0,01097812	0,03235305	0,10318135
C18	7,5999E-05	0,00015863	2,3056E-06	6,396E-06	0,00982052	0,01504497	0,04875234	0,03679936
C19	7,5999E-05	6,2389E-05	2,4294E-07	9,8825E-05	0,00012689	0,01364277	0,03906784	4,0592E-05
C20	0,00121599	0,00019588	0,00146339	0,00014352	0,03954921	0,00097113	3,024E-06	0,01783128
C21	7,5999E-05	0,00031766	2,0389E-05	0,00248733	0,60353708	0,00437256	0,02723012	0,00170748
C22	0,000304	0,00709264	0,00029159	0,03278629	0,0063414	0,00065712	0,03210588	0,0127805

## **Annexe 15 : Publications scientifiques issues de la thèse**

**Anoman, T. M., Voko R., D., Bi, R., Zeze, A. (2019).** Spatial and temporal dynamics of coliform contamination within Yamoussoukro lakes water in Côte d' Ivoire : impact on the safety of surrounding vegetable cropping. *Microbiology and Nature*, 1:29-43. <http://doi.org/10.26167/6N8H-BE22>

**Anoman, T. M., KANH K., H., M., AHOUDJO K., S., Zeze, A. (2020).** Impact of quality of lacustrine waters on vegetable crops and risk of dissemination of thermotolerant coliform populations in Yamoussoukro lakes, Côte d'Ivoire. *African Journal of Agricultural Sciences (ACCEPTED)*

**Anoman, T., Kouadio, A. N., Doga, D., Ahoudjo, K., & Zeze, A. (2020).** Antimicrobial resistance of *Escherichia coli* isolated from irrigation waters in selected urban fields around Yamoussoukro lakes in Côte d'Ivoire. *Journal of Wetlands Ecology*, 2020, 13 pages. <https://doi.org/10.3126/jowe.v2020i0.31022>