



UNIVERSITE
JEAN LOROUGNON GUEDE

UFR ENVIRONNEMENT

REPUBLIQUE DE CÔTE D'IVOIRE

Union-Discipline-Travail

Ministère de l'Enseignement Supérieur et
de la Recherche Scientifique

MASTER

PRODUCTION AQUACOLE ET PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT

Option : Protection de l'Environnement et Gestion
des Risques

THEME :

EVALUATION DU POTENTIEL DE
PHYTOREMEDIATION DE QUELQUES PLANTES
EN MILIEU URBAIN : CAS DE LA VILLE DE DALOA

ANNEE ACADEMIQUE :
2017-2018

N° D'ORDRE
0128/2019

CANDIDAT

NOM : BAH
PRENOMS : Aristide
Armand

JURY

Président : M. KONE TIDIANI, Professeur Titulaire,
Université Jean LOROUGNON GUEDE

Directeur : M. DONGUI Bini Kouamé, Professeur Titulaire,
Université Jean LOROUGNON GUEDE

Encadreur : M. AKPETOU Lazare, Maître-Assistant,
Université Jean LOROUGNON GUEDE

Examineur : M. AKESSE Djamatché Paul.V, Maître-Assistant,
Université Jean LOROUGNON GUEDE

Soutenu publiquement

le : 20/05/2019

DEDICACE

Je dédie ce travail à ma famille :

mon Père, BAH Bonébo Bruno ;

ma Mère, DJA Mondjibi Christine,

pour tous les sacrifices qu'ils consentent pour mon éducation et ma réussite.

Ma Sœur BAH Solange et Frères, BONEBO Serge Pacôme et BAH Bonahin Stéphane qui m'ont toujours soutenu et encouragé.

----- Que ce travail soit pour vous un grand motif de satisfaction -----

TABLE DES MATIERES

Pages

DEDICACE	I
TABLES DES MATIERES	II
AVANT PROPOS	V
REMERCIEMENTS	VI
LISTE DES ABREVIATIONS ET SIGLES.....	VII
LISTE DES TABLEAUX.....	VIII
LISTE DES FIGURES	VIII
LISTE DES ANNEXES.....	IX
INTRODUCTION.....	2
PREMIERE PARTIE : GENERALITES SUR LA VILLE DE DALOA ET PHYTOREMEDIATION DES POLLUTIONS	
I. GENERALITES SUR LA VILLE DE DALOA.....	4
I.1. Situation géographique.....	5
I.2. Eau potable.....	5
I.3. Gestion des eaux usées.....	6
II. PHYTOREMEDIATION, POLLUTIONS METALLIQUES ET ORGANIQUES.....	6
II.1. Phytoremédiation.....	6
II.2. Polluants métalliques.....	8
II.2.1. Toxicité et source de pollution de l'Arsenic (As)	8
II.2.2. Toxicité et source de pollution du cuivre (Cu).....	8
II.2.3. Toxicité et source de pollution du zinc (Zn)	9
II.2.4. Toxicité et source de pollution du manganèse (Mn)	9
II.2.5. Toxicité et source de pollution du Nickel (Ni).....	9
II.2.6. Toxicité et source de pollution du chrome (Cr).....	10
II.2.7. Toxicité et source de pollution du Plomb (Pb).....	10
II.2.8. Toxicité et source de pollution du cadmium (Cd).....	10
II.2.9. Toxicité et source de pollution du mercure (Hg).....	11
II.3. Propriétés et capacités de phytoremédiation de certains végétaux de couverture des réseaux d'évacuation des eaux usées à Daloa.....	11
II.3.1. <i>Oenothera biennis</i> L	12
II.3.2. <i>Eichhornia crassipes</i> C. Mart.....	12
	II

II.3.3. <i>Alternanthera philoxeroides</i>	13
II.3.4. <i>Phalaris arundinacea</i>	13
II.4. Paramètres physico-chimiques et organiques des eaux usées étudiés.....	14
II.4.1. pH (Potentiel Hydrogène).....	14
II.4.2. Température	14
II.4.3. Salinité	15
II.4.4. Oxygène dissous.....	15
II.4.5. Conductivité.....	15
II.4.6. Azote.....	15
II.4.7. Phosphore.....	16
II.4.8. Sulfates.....	16
DEUXIEME PARTIE : MATERIEL ET METHODES	
I. MATERIELS.....	20
I.1. Matériel de mesures <i>in situ</i>	20
II. METHODES.....	21
II.1. Mesurages <i>in situ</i> des paramètres physico-chimiques.....	21
II.2. Dosage des sels nutritifs et la pollution organique.....	21
II.2.1. Sels de l'azote	21
II.2.1.1. Nitrites.....	22
II.2.1.2. Nitrates.....	22
II.2.1.3. Ammonium.....	22
II.2.1.4. Azote kjeldhal ou NTK	23
II.2.2. Sels du phosphore.....	23
II.2.3. Extraction des métaux lourds totaux des sédiments et plantes	24
II.2.4. Analyse statistiques des données de l'étude.....	25
TROISIEME PARTIE : RESULTATS ET DISCUSSION	
I. RESULTATS.	27
I.1. Analyses univariées des paramètres physico-chimiques des eaux usées étudiées..	27
I.2. Pollution organique des eaux usées à Daloa	28
I.3. Pollution métallique des eaux usées à Daloa.....	29

I.4. Profils physico-chimiques et métalliques des eaux usées, des sédiments et des plantes étudiées	31
I.4.1. Absorption des polluants des eaux usées par <i>Oenothera biennis L.</i> à la station de Gbokora	31
I.4.2. Absorption des polluants des eaux usées par <i>Eichhornia crassipes</i> à la station de Kennedy.....	32
I.4.3. Absorption des polluants des eaux usées par <i>Alternanthera philoxeroides</i> à la station du Commerce.....	33
I.4.4. Absorption des polluants des eaux usées par <i>Phalaris arundinacea</i> à la station d'Abattoir.....	33
I.5. Analyses multivariées des résultats d'observations	34
I.5.1. Corrélations entre paramètres physicochimiques et charges métalliques des sédiments	34
I.5.2. Corrélation entre paramètres physico-chimiques et les plantes aux différentes stations.....	35
I.5.3. Coinerties entre paramètres physico-chimiques et charges métalliques des eaux usées.....	36
I.5.4. Spéciation de la composition métallique des eaux usées étudiées.....	37
II. DISCUSSIONS.....	38
CONCLUSION	42
REFERENCES.....	44
ANNEXES	

AVANT-PROPOS

L'Unité Régionale d'Enseignement Supérieur (URES) de Daloa, créée en 1996 par le décret N°96-613 du 09 Aout 1996, est devenue une Université depuis le 10 Octobre 2012 grâce au décret N°2012-986 avec pour dénomination Université Jean Lorougnon Guédé (UJLoG). C'est l'une des plus jeunes Universités de la Côte d'Ivoire qui renferme cinq Unités de Formation et de Recherche (UFR). L'UFR Environnement renferme cinq filières notamment protection de l'Environnement et Production Aquacole qui avec l'option Protection de l'Environnement et de Gestion des Risques. La principale vocation est de former des spécialistes dans la protection de l'environnement urbain, naturel et industrie. La formation comprend un volet théorique assuré aux moyens de cours magistraux et de travaux dirigés et pratiques et d'un stage académique à la fin du Master. Le thème de notre stage de recherche est "l'impact de la macroflore sur la dynamique de la pollution organique et métallique en milieu urbain : cas de la ville de Daloa".

La question de l'environnement se pose non seulement en termes de protection des milieux, des ressources, des équilibres biologiques et écologiques ainsi que la préservation des sites, des paysages et du patrimoine. Cette étude se veut une contribution à l'établissement d'une base de données sur les pollutions organique et métallique des eaux de surfaces à Daloa. Aussi, elle contribuera à améliorer la qualité des eaux de surface par phytoremédiation.

REMERCIEMENTS

Je remercie l'Eternel DIEU pour toutes les grâces qu'il manifeste à mon égard ;
J'exprime toute ma reconnaissance à la Présidente de l'Université Jean Lorougnon Guédé,
Madame le Professeur **TIDOU Abiba Sanogo** pour la gouvernance de notre institution ;
Je dis un grand merci au Directeur de l'UFR Environnement, Docteur **KOUASSI Lazare**, pour
les facilités administratives et la formation dont nous avons bénéficiée durant notre parcours
Universitaire ;

J'exprime ici toute ma gratitude à l'égard du président du jury Monsieur **KONE Tidiani**
Professeur Titulaire et à mon examinateur Monsieur **AKESSE Djamatchè Paul** Enseignant-
Chercheur, Maître-Assistant de Chimie à l'Université Jean Lorougnon Guédé de Daloa
(UJLoG)

Je suis reconnaissant à Monsieur **DONGUI Bini Kouamé**, mon Directeur Scientifique,
Enseignant-Chercheur, Professeur Titulaire Cames de Chimie à l'Université Jean Lorougnon
Guédé de Daloa (UJLoG) pour avoir accepté d'assurer la direction scientifique de cette étude,
pour sa disponibilité et tous les efforts consenti pour sa réalisation.

J'exprime ici toute ma gratitude à l'égard du Monsieur **AKPETOU Lazare** mon
Encadreur, Enseignant-Chercheur, Maître-Assistant de Chimie à l'Université Jean Lorougnon
Guédé de Daloa (UJLoG) pour sa disponibilité et les moyens mis à notre disposition pour la
réalisation de ce travail ;

Je tiens à remercier le Docteur **ASSEMIAN Emmanuel**, Responsable de la filière
Production Aquacole et Protection de Environnement, Maître de Conférence de physiologie
animal à l'Université Jean Lorougnon Guédé de Daloa (UJLoG) et également tous les
enseignants de la dite filière pour leur soutien et leur assistance dont j'ai bénéficiés
pendant l'étude.

Je dis un grand merci à mon binôme **BALLO Bahi Arnaud** pour le soutien moral,
financier et intellectuel durant toute cette étude ;

Je remercie mes grand-frères **BONEBO Oscare Roméo** et **Gléo Yve** pour leur soutien
et leurs encouragements dans les moments de difficulté.

J'exprime ma gratitude à mon ami fidèle **ORE Olivier** pour tout ce qu'il a fait pour moi
et pour tout ce qu'il continue de faire comme encouragement et soutien moral ou financier. Je
remercie de tout cœur mes amis qui ont contribué à la réalisation de ce travail en particulier
ceux de la promotion de Production Aquacole et Protection de Environnement de 2014 à 2017.

LISTE DES ABREVIATIONS ET SIGLES

°C	: Degré Celsius
ADE4	: Analyse de Données Environnementales version 4
ATSDR	: Agency for Toxic Substances and Disease Registry (Agence américaine d'inventaire de substances toxiques et des maladies)
CAFOP	: Centres d'Animation et de Formation Pédagogique
CCT	: Centre de Cartographie et de Télédétection
CE	: Commission Européenne
CEC	: Capacité d'Echange Cationique
CSHP	: Conseil Supérieur de l'Hygiène Publique
ETM	: Eléments Trace Métalliques
FAO	: Food and Agriculture Organization of the United Nations (Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture)
INS	: Institut National de la Statistique
AFSSET	: Agence Française de Sécurité Sanitaire de l'Environnement et du Travail
OMS	: Organisation Mondiale de la Santé
PME/PMI	: Petite et Moyenne Entreprise/ Petite et Moyenne Industrie
ppm	: Partie par million (ou mg. kg ⁻¹ de sol sec)
RGPH	: Recensement Général de la Population et de l'Habitat
SODECI	: Société de Distribution d'Eau de Côte d'Ivoire
Z	: Numéro atomique
μS/cm	: micro-Siemens par centimètre

LISTE DES TABLEAUX

Pages

	17
Tableau I : Normes Ivoiriennes de rejets d'eaux usées.....	

LISTE DES FIGURES

Pages

Figure 1 : Carte de la ville de Daloa avec ses différents quartiers	5
.....	7
Figure 2 : Schéma représentant différents mécanismes de phytoremédiation.....	12
Figure 3 : <i>Oenothera biennis</i> plante de la station de Gbokora.....	12
Figure 4 : <i>Eichhornia crassipes</i> plante de la station de la station de Kennedy	13
Figure 5 : <i>Alternanthera philoxeroides</i> plante de couverture de la station du Commerce	14
Figure 6 : <i>Phalaris arundinacea</i> plante de la station d'Abattoir	19
Figure 7 : Localisation des stations d'études sur la carte de la ville de Daloa.....	20
Figure 8 : Multiparamètre de marque Hi 9828 pH/ORP/EC/DO.....	20
Figure 9 : Spectromètre d'absorption moléculaire ICP.....	21
Figure 10 : Spectromètre d'absorption atomique à plasma induit.....	27
Figure 11 : Conductivité des eaux usées à Daloa	28
Figure 12 : Oxygène dissous des eaux usées à Daloa	28
Figure 13 : Ammonium des eaux usées à Daloa.....	29
Figure 14 : Nitrite et du phosphate des eaux usées à Daloa	31
Figure 15 : Pollution métallique des eaux usées à Daloa lors de notre étude.....	
Figure 16 : Charge métallique d' <i>Oenothera biennis L.</i> par rapport à l'eau usée et le sédiment à la station de Gbokora.....	32
Figure 17 : Charge métallique d' <i>Eichhornia crassipe</i> par rapport à l'eau usée et le sédiment à la station de Kennedy.....	33
Figure 18 : Charge métallique de <i>Alternanthera philoxeroides</i> par rapport à l'eau usée et le sédiment à la station de Commerce.....	34
Figure 19 : Charge métallique de <i>Phalaris arundinacea</i> par rapport à l'eau usée et le sédiment à la station d'Abattoir.....	34
Figure 20 : Plan factoriel des paramètres physicochimiques et des eaux usées aux stations d'étude.....	35

Figure 21 : Plan factoriel des sédiments et plantes aux stations d'étude.....	36
Figure 22 : Représentation individuelle des facteurs.....	
Figure 23 : Coinertie entre les paramètres physico-chimiques et charges métalliques des eaux usées à Daloa.....	37
Figure 24 : Dynamique de l'influence des paramètres physico-chimiques sur les charges métalliques des eaux usées à Daloa.....	37
Figures 25 : Variation de la spéciation des métaux lourds dans les eaux usées en début de saison sèche (février 2018) à Daloa.	38
Figures 26 : Variation de la spéciation des métaux lourds dans les eaux usées en fin de saison sèche (avril 2018) à Daloa.....	38

LISTE DES ANNEXES

- Annexe 1** : Moyennes des paramètres physico-chimiques des eaux usées à nos sites d'étude
- Annexe 2** : Valeurs moyennes des sels nutritifs aux sites d'étude
- Annexe 3** : Charges métalliques moyennes des eaux usées à nos stations d'étude
- Annexe 4** : Valeurs moyennes des charges métalliques des *O. biennis L* par rapport à celles
de l'eau usée et du sédiment à la station de Gbokora
- Annexe 5** : Charges métalliques moyennes des eaux usées, des sédiments et des plantes à la
station de Kennedy
- Annexe 6** : Charges métalliques moyennes des eaux usées, des sédiments et des plantes à la
station du Commerce
- Annexe 7** : Charges métalliques moyennes des eaux usées, des sédiments et des plantes à la
station d'Abattoir

INTRODUCTION

La gestion des pollutions urbaines a conduit au développement de plusieurs techniques. Parmi celles-ci, la phytoremédiation ou l'épuration des eaux usées par les plantes qui connaît un essor certain ces dernières années (Abhilash *et al.*, 2009). Cette technique se révèle de plus en plus comme un outil indispensable dans la mitigation des pollutions organiques et métalliques.

Les rejets urbains sont considérés comme l'une des principales causes de dégradation de l'environnement urbain (Gromaire *et al.*, 2001). Par contre, les populations de ces pays ne sont pas éduquées forcément aux initiatives de gestion des déchets (tri, entreposage, etc.). L'urbanisation croissante, l'industrialisation et la surpopulation sont les principales causes de la dégradation de l'environnement et de la pollution (Singh *et al.*, 2011).

Aussi, le traitement des eaux usées demeure-t-il un défi lointain dans les pays en développement. Particulièrement dans les pays d'Afrique de l'Ouest qui ne disposent pas encore de réseaux d'évacuation des déchets élaborés (Coulibaly *et al.*, 2008).

Si la phytoremédiation exploite les propriétés de certaines plantes à accumuler de grandes quantités anormales de métaux lourds (Gherib *et al.*, 2016) ; il n'en demeure pas moins qu'elle met en exergue le danger que constituerait l'utilisation de ces eaux usées (Thi, 2009).

Or, les pratiques culturelles sont fréquentes dans les zones humides urbaines en Côte d'Ivoire. Alors que ces eaux ne résultent dans leur majorité que de rejets divers contenant des polluants organiques et métalliques susceptibles de contaminer la chaîne alimentaire (Koukougnon., 2012). Les métaux étant connus pour leur toxicité pour la santé humaine (ATSDR, 2007).

Ainsi, la maîtrise des capacités de remédiation de certaines plantes pourrait aider à segmenter le couvert végétal et les périmètres des réseaux d'évacuation des eaux usées d'une part. Cette thématique pourrait constituer l'outil incontournable de la mitigation des populations des pays en développement d'autre part. Certes, il existe de nombreuses méthodes physico-chimiques et biologiques spécifiques de traitement des déchets, mais elles sont coûteuses et lourdes à mettre en œuvre. Elles provoquent également des impacts sur l'environnement (Singh *et al.*, 2011). De fait, le besoin développement de nouvelles techniques, économiquement compétitives et pouvant préserver les caractéristiques des écosystèmes s'est fait sentir. Les techniques regroupées sous le terme générique de bioremediation font appel soit à des microorganismes et aux produits de leur métabolisme, soit à des végétaux supérieurs et autres bactéries de leur rhizosphère pour aboutir à la restauration des milieux pollués (Pilon-Smits, 2005). Par ailleurs, la faiblesse de la bibliographie sur la séquestration des polluants par les plantes constitue un sujet d'intérêt pour la recherche.

L'objectif général de cette étude est d'évaluer la capacité de remédiation des polluants organiques et métalliques de certaines plantes de couverture des zones humides urbaines à Daloa (Côte d'Ivoire). Pour ce faire, les mesurages des charges polluantes des eaux usées ont été faits pendant la saison sèche, afin d'éviter les perturbations due à l'effet de chasse des pluies.

Les objectifs spécifiques de la présente étude sont :

- caractériser l'état de pollutions organiques et métalliques des eaux usées de la ville de Daloa
- évaluer les fractions captées par le sédiment celles de 4 plantes découverte des réseaux d'évacuation des eaux usées ;
- étudier les corrélations entre croissance végétale et charges polluantes organiques et métalliques des eaux usées à Daloa.

Le présent mémoire est subdivisé en trois parties en plus de l'introduction et la conclusion. La première partie présente les généralités sur la phytoremédiation des pollutions organiques, métalliques et la ville de Daloa. La deuxième partie décrit les matériels et méthodes utilisés pour mener ce travail. La troisième et dernière partie présente les principaux résultats acquis et leur discussion.

PREMIERE PARTIE :
GENERALITES

I. GENERALITES SUR LA VILLE DE DALOA

1.1. Situation géographique

Daloa est une ville située dans le Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire à 6°53 de latitude Nord et à 6°27 de longitude Ouest. Le département de Daloa est le chef-lieu de la région du haut Sassandra (Boris, 2005). Il couvre une superficie de 5305 km². Ce chef-lieu de département se trouve à environ 383 km de la capitale économique (Abidjan) et à environ 140 km de Yamoussoukro la capitale politique (Boris, 2005).

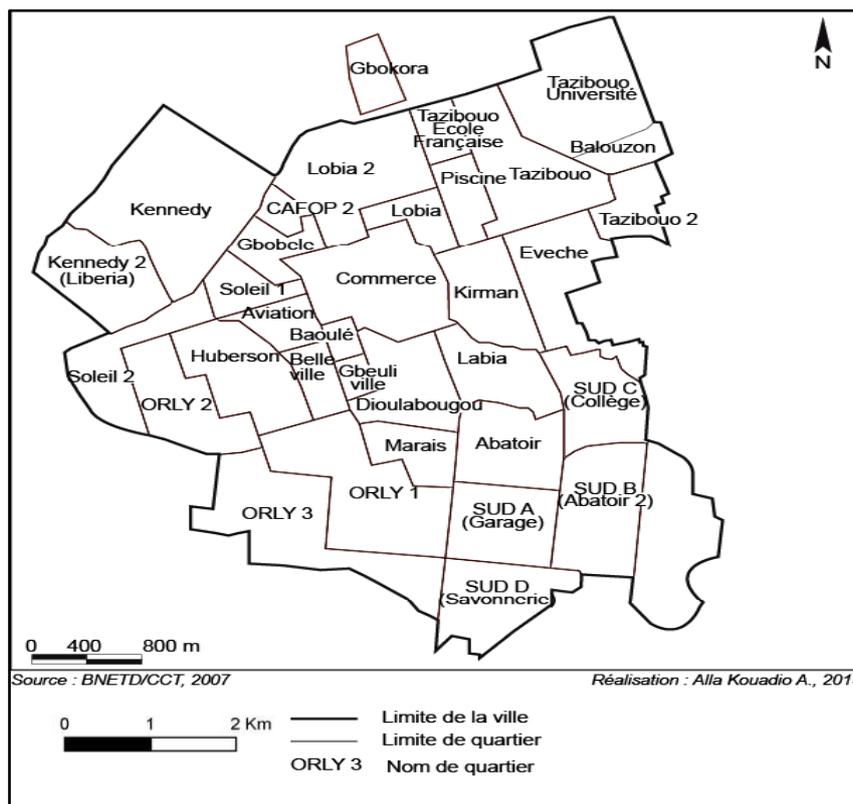


Figure 1 : Carte de la ville de Daloa avec ses différents quartiers (Coulibaly *et al.*, 2008)

1.2. Climat et relief

1.2.1. Climat

Daloa appartient à une zone où la quantité moyenne annuelle des précipitations est comprise entre 1 300 et 1 400 mm. Le nombre moyen de jours de pluies dans l'année est d'environ 110. Le déficit hydrique global est inférieur à 500 mm et l'humidité atmosphérique comprise entre 75 et 80 % (Zah, 2015). La grande saison des pluies s'étend sur quatre mois (de mars à juillet). Le mois de Juin, en est le mois le plus humide. Les températures sont élevées et constantes toute l'année avec une amplitude moyenne annuelle faible de 2,9°C tous les mois (Zah, 2015).

1.2.2. Relief

L'espace périurbain de la capitale du Centre-Ouest et particulièrement de Daloa, se développe sur un relief de plateau d'altitude moyenne comprise entre 200 et 300 mètres, aux interfluves tabulaires ou arrondis, légèrement incliné vers le Sud (Ministère de l'Agriculture et des Ressources Animales, 2000). Un second axe d'inclinaison du relief se fait par rapport à la ligne de partage des eaux des bassins versants de la Lobo à l'Ouest et du Goré à l'Est. C'est sur cette ligne d'orientation générale Sud-Sud-Ouest Nord-Nord-Est, de faible extension spatiale et entaillée de part et d'autre par un réseau dense de vallées. Le relief est résiduel et constitué d'inselbergs isolés (Ministère de l'Agriculture et des Ressources Animales, 2000).

1.3. Population et activités humaines

1.3.1. Population

La population de la ville de Daloa était estimée à plus de 245 000 habitants en 2014 (RGPH, 2014). C'est la troisième ville la plus peuplée de la Côte d'Ivoire après Abidjan et Bouaké. Cette population de la ville est majoritairement jeune et constituée par les élèves, étudiants et travailleurs, (RGPH, 2014 ; Zah, 2015). Les anciens villages des populations autochtones (Bété) que sont : Gbeuliville, Labia, Lobia et Tazibouo ont été absorbés par l'expansion spatiale de la ville et sont devenus des quartiers urbains. D'autres populations aux alentours vont massivement peupler ces villages. Ils sont constitués de : Niaboua, Niédéboua et Kouzié à l'ouest de la Lobo, de Kouya et Gouro au Nord, Nord-Est et Est de Daloa, le milieu humain s'est enrichi d'éléments non autochtones (populations allogènes) venus d'horizons divers. Parmi les allogènes, Dioula, Baoulé et Mossi constituent les éléments les plus nombreux et ceux dont l'afflux ne peut passer inaperçu (Kipré, 1985).

1.3.2. Principales activités des populations

La ville de Daloa est devenue un creuset d'accueil de populations immigrantes grâce à sa riche végétation et son potentiel agricole. On rencontre plusieurs activités dont le commerce (plusieurs marchés, supermarchés et magasins) touchant la majeure partie de la population, le transport routier avec plusieurs compagnies telles que UTB ... ainsi que les taxis communaux. On y trouve aussi des industries de bois (SOCOPAD, Coulibaly-Scierie...) qui embauchent bon nombre de personnes (Zah, 2015).

1.4. Eau potable

La fourniture d'eau potable en Côte d'Ivoire est un service public. En effet, cette charge est une prérogative de l'Etat ivoirien. Celui-ci l'a dévolue à la SODECI (Société de Distribution d'Eau de Côte d'Ivoire), qui devient le fournisseur de cette denrée à l'échelle nationale (Koukougnon, 2012).

La ville de Daloa bénéficie des efforts de cette société ; qui de façon générale capte l'eau de boisson de forages divers (Diarra *et al.*, 2016). Lorsque ceux-ci sont irréalisables, la SODECI capte, traite et distribue l'eau des rivières et fleuves. Cette option a longtemps couvert les besoins en eau potable des populations à Daloa (Diarra *et al.*, 2016). Mais, des crises ont marqué ce service (Badele, 2005). Les raisons tiennent, entre autres, à la poussée démographique qui maintient les quartiers hors des réseaux d'adduction d'eau potable. Quant au changement climatique, son impact sur les réserves d'eaux (surface et souterraines) exacerbe l'incapacité de la SODECI à satisfaire quantitativement et qualitativement la demande de plus en plus croissante des populations en eaux (Koukougnon, 2012).

Les puits et autres sources (Gbokora, Lobia extension et de Taglohéhi à Labia) ont une place prépondérante dans l'approvisionnement en eau de boisson des populations de Daloa. Les raisons du recours aux puits concernent l'intermittence de la distribution et la mauvaise qualité de l'eau du robinet. A cela, s'ajoutent des pratiques culturelles des ménages et surtout ses qualités organoleptiques et sa gratuité (Diarra *et al.*, 2016).

1.5. Gestion des eaux usées

Environ trente outils de drainage d'eaux pluviales ont été dénombrés dans la ville de Daloa (Coulibaly *et al.*, 2008). Il s'agit de quatre bassins d'orages, caniveaux et six égouts. Ces outils longent la plupart des principaux axes routiers (Issia-Vavoua et Bouaflé-Duékoué). Cependant, ils sont globalement en état de dysfonctionnement avancé (Coulibaly *et al.*, 2008).

II. PHYTOREMEDIATION, POLLUTIONS METALLIQUES ET ORGANIQUES

2.1. Phytoremédiation

Le terme phytoremédiation fait référence à la remédiation biologique de contaminants environnementaux. Cette méthode utilise les végétaux et microorganismes qui leur sont associés (Gherib *et al.*, 2016) pour séquestrer la charge polluante d'un substrat. Les modalités de cette fonction sont décrites en rapport avec le devenir du contaminant une fois intégré par le système de phytoremédiation.

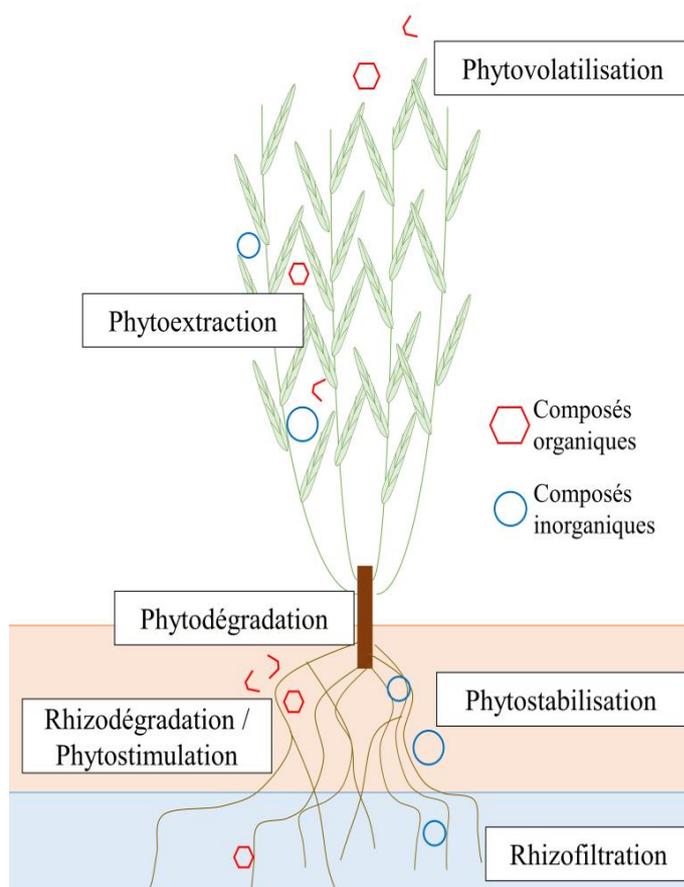


Figure 2 : Schéma représentant différents mécanismes de phytoremédiation (source : Desjardins, 2016)

La phytoextraction consiste au prélèvement des composés du sol et concentration de ceux-ci dans les tissus récoltables de la plante (Desjardins, 2016). La phytostabilisation représente la diminution de la mobilité des contaminants par l'absorption ou l'adsorption aux tissus souterrains de la plante. Concernant la phytodégradation, elle consiste à l'importation et la dégradation des contaminants par le métabolisme interne de la plante ou par exsudats racinaires (Desjardins, 2016). La rhizodégradation ou rhytostimulation est la biodégradation des polluants organiques par les microorganismes rhizosphériques stimulés par les exsudats racinaires. La phytovolatilisation est la volatilisation des contaminants depuis le sol vers l'atmosphère par le processus d'évapotranspiration (figure 2). Et enfin la rhizofiltration est L'absorption ou l'adsorption de contaminants présents dans l'eau (Desjardins, 2016).

On estime à environ un dixième le coût de la phytoremédiation comparé aux techniques conventionnelles (Akpétou *et al.*, 2010). Son application *in situ* optimise son rapport coût/efficacité et réduit les risques potentiels d'exposition des substrats contaminés aux humains, à la faune et à l'environnement (Pilon-Smits, 2005). Elle gagne aussi en popularité dans un contexte global d'exigence d'alternatives plus vertes et respectueuses de

l'environnement (Akpétou *et al.*, 2010). La phytoremédiation s'applique aux déchets liquides, solides et gazeux. Elle est particulièrement efficace dans la séquestration des Eléments Trace Métalliques (Pilon-Smits, 2005). La fixation et l'enracinement est un déterminant de l'action des végétaux sur les polluants (Pilon-Smits, 2005).

2.2. Polluants métalliques

2.2.1. Toxicité et source de pollution de l'Arsenic (As)

L'Arsenic existe naturellement dans les roches, principalement sous forme d'arsénopyrite (FeAsS) souvent associée à de la présence d'or (ATSDR, 2007). Il est présent à la fois, comme constituant naturel de la géologie locale et comme sous-produit (déchet) des usines de concentration de minerais. Cependant, les installations actuelles de traitement génèrent peu de contaminants dans l'environnement (Mélinda, 2015). Le caractère non spécifique des intoxications chroniques à l'Arsenic nécessite une approche par anticipation en santé environnementale. Cette contamination fréquemment d'origine naturelle, pourra demeurer longtemps insoupçonnée, à moins qu'on ne consacre du temps et des ressources pour vérifier sa présence (Mélinda, 2015). L'Arsenic est utilisé dans la construction immobilière, les équipements pour l'automobile, les chemins de fer et dans la fabrication de produits laminés ou formés (INERIS, 2005). Il constitue un intermédiaire dans la fabrication d'autres composés et sert d'agent réducteur en chimie organique et de réactif en chimie analytique (Ouali, 2013). Malheureusement, le manque de connaissances sur les facteurs prédictifs de cette contamination rend ce travail exploratoire plutôt ardu et il risque de s'écouler encore bien du temps avant qu'on ait fait le tour des jardins de Daloa.

2.2.2. Toxicité et source de pollution du cuivre (Cu)

Le Cuivre est l'un des métaux les plus employés à cause de ses propriétés physiques et de sa conductibilité électrique et thermique. Il est utilisé dans la métallurgie, dans la fabrication des alliages de bronze (avec étain), de laiton (avec Zinc) ou de bijouterie (avec Or et Argent). Les principales sources anthropiques sont l'industrie du Cuivre et des métaux en général, du bois, l'incinération des ordures ménagères, la combustion de charbon, d'huile et d'essence et la fabrication de fertilisants comme le phosphate (ATSDR, 2008). La toxicité vis à vis des organismes marins dépend de la forme chimique du cuivre et de son état d'oxydation. En particulier, la concentration létale en 48 h pour 50 % des larves d'huîtres plates serait de 1 à 3 µg/L et des inhibitions de croissance du phytoplancton se produisent à partir de 4 µg/l (ATSDR, 2007). La capacité d'un végétal à accumuler des concentrations supérieures 4 µg/L pourrait être

utilisée en phytoremédiation du cuivre des eaux usées. A Daloa, l'incinération des ordures ménagères, les feux de brousses et les rejets des PME (Petites et Moyennes Entreprises) et PMI (Petites et Moyennes Industries) dans les réseaux d'évacuation des eaux usées constituent les sources d'exposition aux fortes doses de Cuivre.

2.2.3. Toxicité et source de pollution du zinc (Zn)

Une grande partie de la pollution au Zinc provient de la métallurgie. Mais, il est aussi transporté par les vents de particules de sol. Les épandages agricoles (alimentation animaux, lisiers) et des activités urbaines (trafic routier, incinération ordures) en sont une source importante (Ouali, 2013). Sa toxicité pour les organismes marins n'est prouvée, qu'à de fortes concentrations (INERIS, 2005). Mais, il est connu agir sur la reproduction des moules et la croissance larvaire des espèces aquatiques (ATSDR, 2008). Les épandages agricoles (alimentation animaux, lisiers) et des activités urbaines en sont une source importante observée à Daloa.

2.2.4. Toxicité et source de pollution du manganèse (Mn)

Par ses propriétés, le Manganèse se trouve dans de nombreuses applications industrielles telles que les alliages en métallurgie, les batteries sèches, glace et céramique, peintures et vernis, encre et colorants, allumettes et fusées pour les feux d'artifice (Elbetieha *et al.*, 2001).

Le Manganèse peut être relargué dans les eaux, de manière naturelle, par lessivage des terrains miniers. Il aurait un effet sur le métabolisme du phytoplancton et la libération de l'oxygène durant la photosynthèse (Elbetieha *et al.*, 2001). Son introduction quotidienne dans l'organisme humain par l'eau est d'ordinaire de 0,01 mg et dépasse très rarement 1 mg. Son élimination par le corps humain se fait presque exclusivement par le tractus gastro-intestinal et très largement à travers la bile. L'élimination par l'urine est très faible et ne représentant que 0,1 à 3 % du total (Ponnapakkam, 2003). Le drainage des sols et litières entraîne dans la ville de Daloa une certaine quantité de manganèse dans les eaux (Ponnapakkam, 2003).

2.2.5. Toxicité et source de pollution du Nickel (Ni)

La principale source de rejet de Nickel dans les eaux résiduaires est représentée par l'industrie métallurgique, notamment les opérations de revêtement. Une source secondaire, non moins importante, concerne les eaux résiduaires de raffineries d'argent, des fabriques d'acier, des fonderies, des industries automobiles et des fabriques de peintures (Given, 2001).

Le Nickel semble moins toxique pour les poissons que le Cuivre et le Zinc. Mais son accumulation, chez un mollusque bivalve d'eau de mer, devient significative à des concentrations comprises entre 0,03 et 0,107 mg/L (Given, 2001). L'industrie du cuir occupe une place importante dans l'économie à Daloa. Les peintures et autres substances de protection militent en faveur de la phytoremédiation du Nickel des eaux usées dans cette ville.

2.2.6. Toxicité et source de pollution du Chrome (Cr)

Le chrome est essentiellement obtenu à partir de la chromite. Il est pratiquement associé au magnésium ($MgCr_2O_4$) et au fer ($FeCr_2O_4$) dans l'environnement (ATSDR, 2008). Le chrome trivalent est un oligo-élément essentiel pour le métabolisme du sucre chez l'être humain. Une déficience en chrome peut affecter le potentiel de l'insuline à réguler le niveau de sucre dans l'organisme. Une alimentation adéquate en Chrome améliore la croissance et la longévité ; et de pair avec l'insuline, favorise un bon métabolisme du glucose, des lipides et des protéines. La toxicité du Chrome dépend des organismes en présence. Certains légèrement sont plus sensibles au Chrome trivalent qu'à l'hexavalent et vice-versa (ATSDR, 2008). Il s'agit, entre autres des sources principales de chromes rencontrées dans la ville de Daloa, que sont l'industrie des couleurs et laques, films et photographie, bois, cuir, métallurgique, textile, etc.

2.2.7. Toxicité et source de pollution du Plomb (Pb)

La présence de plomb dans l'environnement résulte de la combustion des carburants automobiles (Miquel, 2001). Dans les sédiments, le Plomb peut être remis en solution par dégradation aérobie de la matière organique particulaire à laquelle il est associé. Cette solubilisation s'observe également en sub-surface par dissolution des oxydes de Fer et de Manganèse (ATSDR, 2008). La toxicité du Plomb peut se traduire par une compétition avec des métaux essentiels. Chez la moule, *Mytilus edulis*, en présence de Plomb (0,1 mg/L), il y a perturbation du métabolisme des autres métaux divalents notamment le Calcium, le Magnésium et le Cuivre (ATSDR, 2008). Enfin, le saturnisme désigne l'ensemble des manifestations de l'intoxication humaine par le plomb. Ses principaux organes cibles sont le système nerveux, les reins et le sang. Cette maladie se caractérise par une anémie et une perturbation du métabolisme par compétition avec les ions Ca^{2+} . A Daloa, les principales sources émissions du Plomb sont aussi le carburant et les sociétés minières.

2.2.8. Toxicité et source de pollution du Cadmium (Cd)

Le Cadmium est un élément rencontré en milieu aquatique sous formes physiques (dissoute, colloïdale, particulaire) et chimiques (minérale ou organique). Un ensemble de variables physico-chimiques du milieu (salinité, pH, potentiel redox, caractéristiques sédimentologiques, nature géochimique des particules, concentration en Chlorures) gouvernent les transformations du Cadmium dans l'environnement (Chiffolleau *et al.*, 2001). Le Cadmium primaire est principalement associé au Zinc, Cuivre, Plomb et Phosphates naturels dans les minerais. Les usages de Cadmium se situent principalement en électricité (accumulateurs), en électronique, en métallurgie (traitement des surfaces par cadmiage) et dans l'industrie des matières plastiques comme stabilisateur de polymères (Othumpangat *et al.*, 2005). Contrairement à de nombreux métaux, le Cadmium n'a aucun rôle métabolique connu et ne semble pas biologiquement essentiel ou bénéfique au métabolisme des êtres vivants. Il remplace parfois, le Zinc dans des systèmes enzymatiques carencés en Zinc chez le plancton (Lane & Morel, 2000). Au niveau subléthal, des concentrations de 0,05 à 1,2 mg/L peuvent provoquer des effets physiologiques (anomalies dans le développement embryonnaire et larvaire chez les mollusques bivalves) et des inhibitions de croissance (Chiffolleau *et al.*, 2001). Les rejets sauvages et incinérations d'ordures ménagères sont fréquents à Daloa (Coulibaly *et al.*, 2008)

2.2.9. Toxicité et source de pollution du mercure (Hg)

La principale source Mercuries est la rémission de Mercure anthropique. Les sources ponctuelles anthropiques sont par ordre d'importance. En premier lieu la combustion des hydrocarbures fossiles, en particulier le charbon, l'incinération d'ordures ménagères, hospitalières et les procédés industriels (fabrication de la soude caustique, métallurgie non ferreuse, etc.). Le mercure est dégazé ou émis vers l'atmosphère par différents processus naturels qui sont principalement le dégazage par les sols et la végétation, la volatilisation du mercure à partir des eaux naturelles et les émissions d'origine volcanique (Yoshizawa, 2002). Les eaux usées à Daloa ne subissent aucun traitement préalable. Aussi, la gestion des déchets est-elle encore à l'état de projets. Or, les pratiques de l'ensemble de la population favorisent la contamination des eaux usées par les polluants organiques et métalliques. C'est pourquoi, il importe d'évaluer l'impact de certains végétaux sur la dynamique de ces pollutions.

2.3. Propriétés et capacités de phytoremédiation de certains végétaux de couverture des réseaux d'évacuation des eaux usées à Daloa

Les plantes assimilent les nutriments, de l'eau à travers leurs racines et s'en nourrissent. Les polluants prélevés par les plantes sont par la suite bioaccumulés dans les tissus et biodégradés par divers processus métaboliques. Les performances épuratoires à ce jour sont globalement efficaces et se situent au-delà de 80% pour la plupart des paramètres considérés (ONA, 2014b). Ainsi quatre plantes ont servi à l'étude il s'agit de *Oenothera biennis*, *Eichhornia crassipes*, *Alternanthera philoxeroides* et *Phalaris arundinacea*.

2.3.1. *Oenothera biennis* (Onagraceae)

Oenothera biennis (Onagre bisannuelle) est une espèce de la famille des Onagraceae. La plante est originaire d'Amérique du Nord (Rostański, 2010). Les onagres ont été introduites en Europe pour la production d'huile pour l'industrie cosmétique.



Figure 3 : *Oenothera biennis* plante à la station de Gbokora

Les impacts sur la biodiversité sont limités, car elles se développent essentiellement dans des habitats anthropiques. Leur comportement reste à surveiller dans les milieux plus sensibles, comme les dunes (Fried, 2012).

2.3.2. *Eichhornia crassipes* C. Mart. Solms (Pontédériaceae)

E. crassipes (Jacinthe d'eau) est une espèce de catégorie flore de la famille des Pontédériaceae. L'espèce est flottante à comportement annuel originaire Amérique du Sud et, plus précisément, du Brésil.



Figure 4 : *Eichhornia crassipes* plante à la station de Kennedy

Elle se développe dans les eaux stagnantes des mares temporaires, des lacs, ainsi que dans les eaux à faible courant des rivières et des canaux (Coetzee, 2009). A Daloa, elle est principalement présente sur le site de Kennedy.

2.3.3. *Alternanthera philoxeroides* (Chenopodiaceae)

Alternanthera philoxeroides de la famille des Chenopodiaceae, les tiges de *A. philoxeroides* sont grandes (20 à 60 cm) et creuses pour permettre une bonne flottabilité. En milieu terrestre on a des tiges plus petites et solides, puis légèrement creuses (Chatterjee & Dewanji, 2012). Les feuilles, opposées et sessiles, de couleur verte sombre brillante sont ovales elliptiques.



Figure 5 : *Alternanthera philoxeroides* plante à la station du Commerce

Les fleurs papyracées, sont groupées en petits glomérules blancs argentés. Un pic de croissance a lieu en été une floraison (LiLi *et al.*, 2008). Cette espèce est originaire du Sud du Brésil. Elle se retrouve à travers une vaste gamme de latitudes en Amérique du Sud (Pan *et al.*, 2013), indiquant, ainsi, sa capacité à proliférer sous diverses régions phytogéographiques (Chatterjee & Dewanji, 2012). Elle a ainsi envahi de nombreuses aires à travers le monde (LiLi *et al.*, 2008), y compris les zones riveraines comme le cas de Daloa (Pan *et al.*, 2013) et les terres agricoles.

2.3.4. *Phalaris arundinacea* (Poaceae)

Phalaris arundinacea (Ruban de bergère) est une espèce de catégorie flore de la famille des Poaceae. *Phalaris arundinacea* est une graminée originale au feuillage vert, ressemblant aux feuilles de bambous.

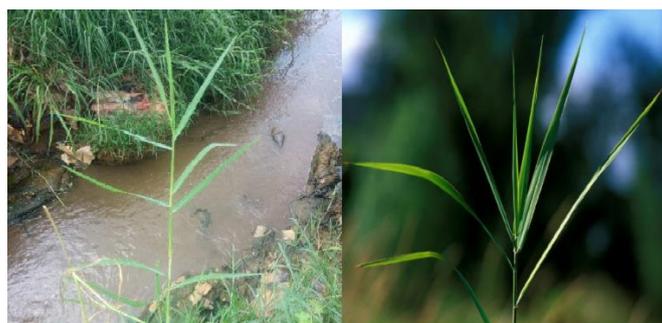


Figure 6 : *Phalaris arundinacea* plante à la station d'Abattoir

Ce feuillage persistant porte de beaux épis de fleurs violet verdâtre pendant l'été. Très bon couvre-sol de par ses capacités de colonisation des milieux frais et humides, on peut facilement limiter sa progression si nécessaire. *Phalaris arundinacea* préfère les sols acides et les feuillages s'utilisent principalement en couvre-sol (Lepage, 2016).

2.4. Paramètres physico-chimiques et organiques des eaux usées étudiées

2.4.1. pH

Le pH (Potentiel Hydrogène) mesure la concentration en ions H^+ de l'eau. Il traduit la balance entre acide et base sur une échelle de 0 à 14 ; 7 étant le pH de neutralité et de l'eau douce. Ce paramètre conditionne un grand nombre d'équilibres physico-chimiques et dépend de facteurs multiples dont la température et l'origine de l'eau (Makhoukh *et al.*, 2011).

2.4.2. Température (T)

La température joue un rôle très important dans la solubilité des sels et surtout des gaz. Elle conditionne les équilibres de dissociation. La température est exprimée en degré Celsius ($^{\circ}C$) ou degré Fahrenheit ($^{\circ}F$). La température de l'eau est un facteur qui entraîne d'importantes répercussions écologiques. Elle agit sur la densité, la viscosité, la solubilité des gaz dissous. Elle détermine la dissociation des sels dissous, de même que les réactions chimiques et biochimiques. Elle influe, le développement et la croissance des organismes vivants dans l'eau et particulièrement des microorganismes (Makhoukh *et al.*, 2011).

2.4.3. Salinité (Sal)

Dans de nombreux bassins sédimentaires, la salinité des eaux de formation augmente avec la profondeur ou la compaction. La conductivité est généralement mesurée en micro-Siemens par cm ($\mu S/cm$) ; approximativement la valeur en $\mu S/cm$ correspond à la salinité en mg/L (Rodier *et al.*, 2009).

2.4.4. Oxygène dissous (O_2)

L'oxygène est l'un des paramètres particulièrement utile pour l'eau et constitue un excellent indicateur de sa qualité, sensibilité à la pollution. Sa valeur renseigne sur le degré de pollution et le degré d'auto-épuration d'un cours d'eau. Une valeur inférieure à 1 mg d' O_2 par litre indique un état proche de l'anaérobie (Rodier *et al.*, 2009). Cet état se produit lorsque les

processus d'oxydation des déchets minéraux, de la matière organique et des nutriments consomment plus d'oxygène que celui disponible. Une faible teneur en oxygène dissous provoque une augmentation de la solubilité des éléments toxiques qui se libèrent des sédiments. Une valeur de 1 à 2 mg d'O₂ par litre indique une rivière fortement polluée mais de manière réversible (Hébert et Légaré, 2000). Une teneur de 4 à 6 mg d'O₂ par litre caractérise une eau de bonne qualité. Des teneurs supérieures à la teneur naturelle de saturation en oxygène indiquent une eutrophisation du milieu se traduisant par une activité photosynthétique intense (Hébert & Légaré, 2000).

2.4.5. Conductivité (Cond)

La conductivité se définit comme la quantité de sels dissous (ions) présents dans l'eau. On la mesure en faisant passer un courant alternatif de très basse tension entre deux électrodes. La conductivité s'exprime en micro-siemens par centimètre (µS/cm). Elle donne une idée sur la salinité, permet une bonne appréciation des matières en solution (surtout minérales) dans une eau naturelle et permet de déceler les variations de la composition chimique de l'eau. Une conductivité élevée traduit soit un pH anormal, soit, le plus souvent, une salinité élevée d'origine naturelle ou anthropique (Rodier *et al.*, 2009).

2.4.6. Azote

L'azote se présente sous deux formes à savoir une forme organique non oxydée, peu soluble (protéines, acides aminés, urée...) et une forme minérale soluble, résultant de la dégradation de la forme organique par hydrolyse.

L'azote minéral se présente en solution dans l'eau sous 3 formes principales :

- l'azote ammoniacal (ammoniac (NH₃) et ammonium (NH₄⁺)),
- les nitrites NO₂⁻ ;
- les nitrates NO₃⁻.

L'Azote ammoniacal et les nitrites sont oxydables, contrairement aux nitrates qui constituent la forme oxydée finale (Vilagines, 2003). L'ammonium est la forme sous laquelle l'azote est assimilé par la plupart des organismes aquatiques (algues et végétaux) et prédomine dans le milieu aquatique pour des valeurs de pH inférieures à 9. Or ces matières en suspensions (MES) dans l'eau constituent des surfaces d'adsorption des métaux lourds, influençant ainsi leur spéciation dans les sédiments (Vilagines, 2003).

2.4.7. Phosphore

Le phosphore est issu de l'altération des roches (sa réserve atmosphérique n'étant pas significative, contrairement à l'azote). L'ion phosphate, qui en résulte, se concentre préférentiellement dans les fonds. Son électronégativité favorise sa liaison à la majeure partie des cations dont les métaux lourds notamment, pour former des sels. Il subsiste alors dans les milieux aquatiques les deux fractions (minérales et organiques) capables d'y influencer la spéciation des métaux lourds. Les phosphates étant disponibles (fraction minérale), ils sont directement dosables sur les échantillons bruts. A l'opposé, le phosphore organique doit subir une minéralisation (attaque acide à chaud) pour libérer l'ion phosphate engagé dans les composés. Le dosage du phosphate s'est fait indépendamment de celui des métaux. Cependant, selon les caractéristiques physico-chimiques du milieu, la fraction totale des charges métalliques des sédiments sera rapportée aux quantités de phosphates (Rodier *et al.*, 2009).

2.4.8. Sulfates (SO_4^{2-})

Les sulfates sont généralement d'origine industrielle. Ils peuvent provenir de l'oxydation de sulfures métalliques (sulfate de Fer, sulfate de Nickel, sulfate de Cuivre...). Ils peuvent être également d'origine agricole ; le soufre étant nécessaire à la synthèse de protéines, il peut être assimilé sous forme d'ions sulfates dans les engrais. Cependant un excès d'ions sulfites dans les eaux de chaudières peut avoir des effets néfastes car il abaisse le pH et peut alors développer la corrosion. En cas de rejet dans l'environnement, les sulfites se combinent à l'oxygène en donnant des sulfates (Rodier *et al.*, 2008). Le suivi des paramètres suscités s'appuie sur des standards internationaux (OMS, ONU,...) ou nationaux.

Tableau I : Normes ivoiriennes de rejets d'eaux usées

Paramètres		Normes ivoiriennes	Normes O.M.S. (1998)	
		Valeurs limites des eaux usées (rejets)	Niveau guide	Maximum admissible
1	pH	6,5 ≤ pH ≤ 8,5		6,5 ≤ pH ≤ 8,5
2	Conductivité (µS.cm ⁻¹)	50 et 1500	400	
4	Sulfates (mg.L ⁻¹)	200		250
10	Nitrate	50		50
11	Nitrites (mg.L ⁻¹)	1	0,01	0,2
12	Ammonium (mg.L ⁻¹)	0,5	0,05	0,5
13	Phosphate total (P) (mg.L ⁻¹)	2	3	2
14	Oxydabilité (mg.L ⁻¹ d'O ₂)	2	5	
15	Fer (mg.L ⁻¹)	5	200	0,3
16	Manganèse (mg.L ⁻¹)	1	100	0,5
17	Cuivre (mg.L ⁻¹)	0,5	50	1
18	Cadmium (mg.L ⁻¹)	0,005		0,003
19	Plomb (mg.L ⁻¹)	0,5		0,01
20	Arsenic (mg.L ⁻¹)	0,5		0,01
21	Chrome (mg.L ⁻¹)	0,1		0,05
23	Mercure (mg.L ⁻¹)	0,003		0,001
24	Nickel (mg.L ⁻¹)	0,5		0,02
25	Zinc (mg.L ⁻¹)	2		3

Les normes ivoiriennes sont instituées selon l'ARRETE N°01164 du 04 novembre 2008 portant Règlementation des Rejets et Emissions des installations Classées pour la Protection de l'Environnement.

DEUXIEME PARTIE :
MATERIELS ET METHODES

I. MATERIELS

La présente étude a été menée sur les eaux usées générées par les populations à Daloa. Les mesures ont été faites à quatre stations. La première station est dans une zone périurbaine se situe dans le quartier Gbokora la deuxième au Kennedy, borde une zone industrielle. La troisième au Commerce en plein centre urbain et la dernière dans un quartier populaire à l'Abattoir (figure 7).

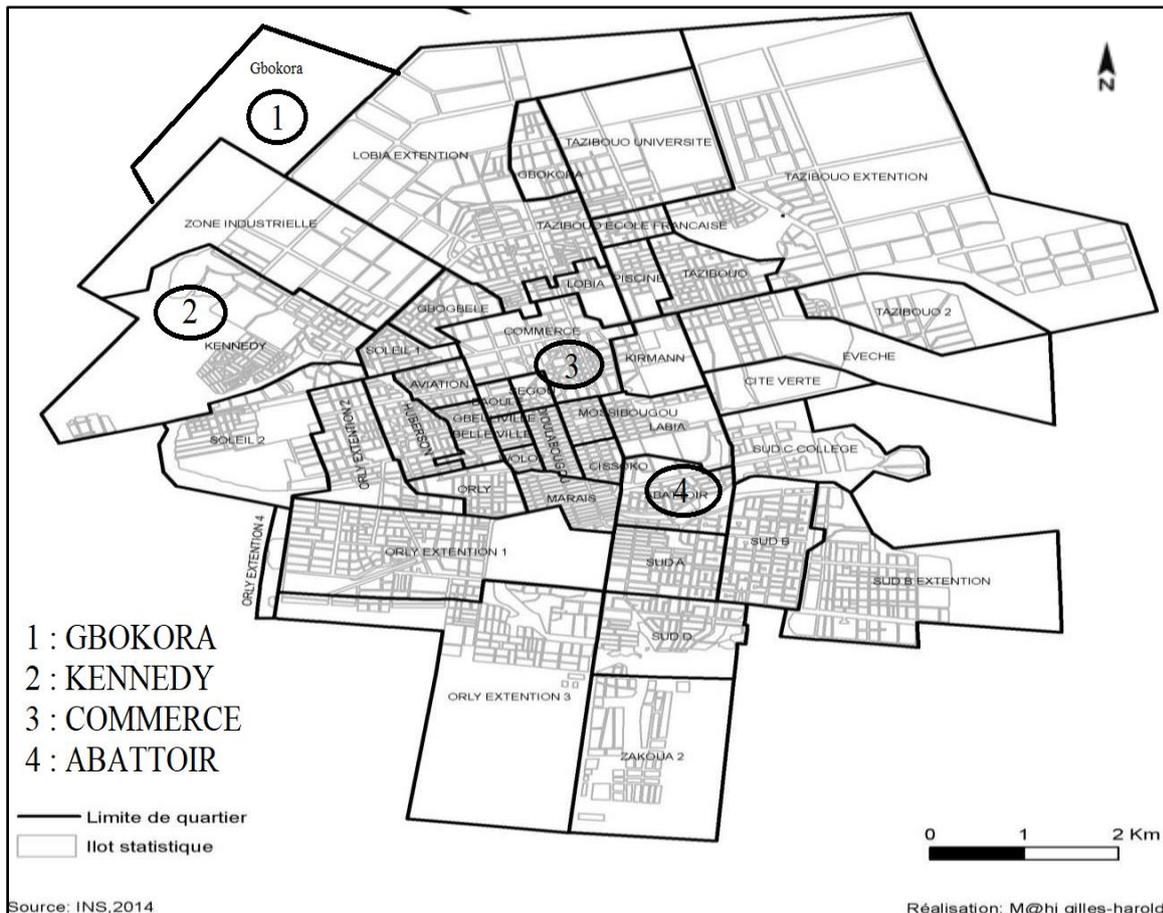


Figure 7 : Localisation des stations d'études sur la carte de la ville de Daloa

1.1. Matériel de mesures *in situ*

Le matériel pour notre étude à comprendre le matériel biotique et abiotique, technique et les outils statistiques.

➤ Matériel biotique

Le matériel biotique est composé de quatre plantes ce sont *Oenothera biennis L*, *Eichhornia crassipes*, *Alternanthera philoxeroides*, *Phalaris arundinacea*. Elles ont servi de matrice d'études de la séquestration des charges métalliques des eaux usées.

➤ **Matériel abiotique**

Cette composante concerne les échantillons d'eaux usées et les sédiments. Ils ont été prélevés à des sites définis pour notre étude, le long des réseaux d'évacuation des eaux usées à Daloa.

➤ **Matériel technique**

Le multiparamètre de marque Hi 9828 (figure 8) a servi pour les mesures *in situ* des paramètres physico-chimiques (ces mesures ont concerné la température, salinité, oxygène dissous et le couple redox). La pipette automatique a servi à prélever des petites quantités de liquide. Les autres matériels techniques utilisés sont le tube à essai, un mortier en agate, un spectromètre d'absorption moléculaire et atomique (figure 9 et 10), une glacière. Les produits chimiques utilisés sont l'acide chlorhydrique, l'acide nitrique et le peroxyde d'hydrogène.



Figure 8 : Multiparamètre de marque Hi 9828 pH/ORP/EC/DO



Figure 9 : Spectromètre d'absorption moléculaire ICP (Varian 2000)



Figure 10 : Spectromètre d'absorption atomique à plasma induit (ICP-AES)

II. METHODES

Un échantillonnage d'eaux usées, de sédiments et de plantes a été mené dans quatre quartiers de la ville de Daloa. Cette étude s'est réalisée au cours de la saison sèche afin de réduire les biais d'appréciation. En effet, les saisons de pluies provoquent des ruissellements diffus et, quelque fois des inondations. Ces épisodes pluviaux défigurent sensiblement la cartographie des pollutions. Pareils scénarios serait utiles pour l'évaluation des risques.

Les analyses chimiques ont été menées en laboratoires (CRO et LANADA). Ainsi, les sels nutritifs et la pollution organique ont été dosés au moyen d'un spectromètre d'absorption moléculaire (ICP). Quant aux métaux lourds, leur dosage a été réalisé au moyen d'un spectromètre d'absorption atomique à plasma induit (ICP-AES).

2.1. Mesurages *in situ* des paramètres physico-chimiques

La mesure *in situ* des paramètres physico-chimiques requiert l'introduction de la sonde du multiparamètre Hi 9828 dans l'eau (Rodier *et al.*, 2009). La sélection de la fonction désirée affiche sa valeur à l'écran. Celles-ci ont été enregistrées dans la mémoire de l'appareil. Une fois au laboratoire, les données ont été reportées dans le registre. Elles ont été traitées sous fichier Excel à chaque opération.

2.2. Dosage des sels nutritifs et la pollution organique

2.2.1. Sels de l'azote (nitrites, nitrates, ammonium)

L'azote peut se trouver dans l'air, Il est donc recommandé de doser les échantillons sur le terrain, après l'observation des précautions d'échantillonnage. Les contraintes matérielles ont rendu quasi impossible cette disposition. Dans ce cas, les échantillons d'eau ont été conservés en-dessous de 4°C dans une glacière pour des analyses en moins de 24 heures au laboratoire. Ces échantillons ont été recueillis dans des piluliers en plastique de volume égal à un litre en

sub-surface (Aminot & K erouel, 2007). Les nitrites, l'ammonium, les nitrates et les orthophosphates ont été dosés directement sur l'eau brute au moyen des méthodes décrites ci-après ; tandis que l'azote Kjeldhal et le phosphore total ont exigé une minéralisation préalable.

2.2.1.1. Nitrites

Les nitrites réagissent, dans une prise d'essai (10 mL)   pH 1,9 avec l' amino-4 benzène sulfonamide en présence d'acide orthophosphorique, pour former un sel diazoique qui donne un complexe de coloration rose avec le dichlorhydrate de N-(naphtyl-1) diamino-1, 2 éthane. L'intensité de la coloration est fonction des concentrations en nitrites (mg/L) dont l'absorbance est mesurée à 540 nm au spectrophotomètre d'absorption moléculaire (Aminot et K erouel, 2007).

2.2.1.2. Nitrates

On procède au mesurage spectrométrique du composé jaune issu de la réaction des nitrates avec l'acide sulfosalicylique (formé par addition à l'échantillon, de volume 25 mL, de salicylate de sodium et d'acide sulfurique) après traitement à l'alcali. En même temps que l'alcali, on ajoute du sel disodique de l'acide éthylènediamine tétraacétique (Na₂EDTA) pour empêcher la précipitation des sels de calcium et de Magnésium (Aminot & K erouel, 2007). On y ajoute finalement de l'azoture de sodium pour neutraliser l'interférence des nitrites (ISO 7890-3, 1989). L'absorbance est mesurée à 415 nm et la teneur en nitrates (mg/L) de l'échantillon est obtenue selon la formule suivante :

$$[\text{NO}_3^-] = \frac{M(\text{N})}{V}$$

Avec V : volume, en millilitres (25 mL), de la prise d'essai.

M (N) : Masse molaire de l'azote,

[NO₃⁻] : Concentration de nitrates.

2.2.1.3. Ammonium

L'ammonium des eaux usées a été dosé selon la méthode spectrométrique au bleu d'indophénol. Celle-ci permet la formation, en milieu alcalin (10,4 < pH < 11,5) d'un composé type indophénol par réaction des ions ammonium avec du phénol et de l'hypochlorite, en présence de nitroprussiate comme catalyseur (Aminot & K erouel, 2007). Enfin, on mesure au spectrophotomètre d'absorption moléculaire, l'intensité de la coloration obtenue à la longueur d'onde voisine de 630 nm (Rodier *et al.*, 2009).

2.2.1.4. Azote kjeldhal ou NTK

L'azote organique contenu dans un volume d'eau (50 mL) est oxydé à chaud en ammoniac par l'acide sulfurique (H_2SO_4) concentré, en présence d'un catalyseur ($K_2Cr_2O_7$ + sélénium). Le montage est porté lentement à ébullition et évaporation pendant 2 heures dans une rampe de minéralisation munie de pierre ponce. L'ammoniac est récupéré par ajout d'eau déminéralisée et de soude à 400 mg/L jusqu'au virage de la solution au rose. Finalement, l'ammoniac est titré par dosage direct au moyen d'une solution d'acide sulfurique (0,1 mol/L) en présence d'acide borique (10 g/L) et les teneurs calculées grâce à l'expression (Aminot & Kérouel, 2007) suivante :

$$[NTK] = \frac{(V_1 - V_0) \times C \times 1000 \times 14}{V}$$

[NTK] : Concentration d'azote Kjeldhal,

V_1 : Volume de l'aliquote

V_0 : Volume d'acide sulfurique

L'azote total est quant à lui égal à la somme de toutes les fractions (organique et minérale) déterminées ci-dessus.

2.2.2. Sels du phosphore

Le dosage des phosphates s'est fait au laboratoire conformément à la Norme NF T 90-023 selon les méthodes de dosage spectrométrique des orthophosphates (1) et de phosphore total (2).

Spectrométrie des orthophosphates (1)

Le dosage photométrique des orthophosphates a lieu sur l'eau brute (10 ml). Il se déroule selon le principe de la formation en milieu acide d'un complexe avec le molybdate d'ammonium et le tartrate double d'antimoine et de potassium. On procède à sa réduction par l'acide ascorbique en un complexe coloré en bleu qui présente deux valeurs maximales d'absorption, l'une vers 700, l'autre, plus importante à 880 nm. Le dosage spectrométrique de la coloration a donc lieu finalement à 880 nm (Aminot & Kérouel, 2007). La teneur globale C, en orthophosphates de l'échantillon, exprimée en milligrammes de P par litres, est donnée par l'expression :

$$[C] = k. d. \frac{1000 \times 14}{V} (A_e - A_B)$$

C : Teneur globale en orthophosphates,

V : Volume de l'aliquote

A_e : Absorbance du banc,

A_B : Absorbance de l'échantillon.

Phosphore total (2)

Le dosage du phosphore (P) total après minéralisation à chaud au ballon de kjeldhal, en présence d'acide sulfurique et de persulfate de sodium, a pour finalité de réduire les phosphores organiques en orthophosphates. Les quantités de phosphore total sont obtenues par différence entre ces dernières concentrations et celles de l'eau brute (sans minéralisation). La teneur en phosphore total de l'échantillon, exprimée en milligrammes de P par litre, est donnée par la même formule que précédemment (Rodier *et al.*, 2009).

2.2.3. Extraction des métaux lourds totaux des sédiments et plantes

Les échantillons de sédiments et de plantes ont été séchés à température ambiante (T°C). Ces échantillons secs ont été broyés dans un mortier en agate afin de les homogénéiser. Les broyats ont été ensuite passés au tamis plastique de maille égale à 63 µm pour séparer les grosses particules sédimentaires des petites car les éléments traces métalliques sont le plus souvent associés à celles-ci (Morillo *et al.*, 2004). Ces sous-échantillons ont alors été conservés à 4°C jusqu'à l'analyse.

L'extraction totale des métaux lourds des sédiments et de plantes s'est faite par digestion à l'eau régale, couplée à une attaque d'acide fluorhydrique (HF) selon UNEP (2017). Le principe de la méthode repose sur la mise en solution totale des métaux contenus dans un échantillon de sol. L'eau régale (HNO₃ : HCL ; 1 : 3, v/v) digère les métaux liés à la matrice pédologique ou végétale jusqu'au treillis silicaté, qui seul peut être digéré par l'acide fluorhydrique. L'utilisation de cet acide visant essentiellement la mise en solution des ions métalliques engagés dans les interstices de cette matrice. On a prélevé 0,30 ± 0,01 g de sédiment ou des plantes secs qu'on a placé dans des tubes en téflon préalablement lavés à l'acide nitrique. Spécifiquement pour les plantes ; 0,1 g de chaque partie (feuilles, tige, racines) a été prélevé afin de constituer le sous-échantillon de 0,3 g à analyser. On y a ajouté 1 mL d'eau régale et 6 mL de HF concentré (48 % pur) pour la minéralisation à chaud (100°C) au bain marie pendant 2 heures 30 minutes. Les capsules retirées du bain sont refroidies à la température de la salle. Le minéralisât est repris dans une solution d'acide borique H₃BO₃ (2,70 g dans 20 mL d'eau déminéralisée). Puis le volume final est ramené à 50 mL avec de l'eau déminéralisée (Morillo *et al.*, 2004). La décantation des silicates résiduels nécessite la mise au repos de cette solution pendant une nuit

avant analyse. Finalement, le dosage des métaux totaux mis en solution s'est fait par Spectrométrie d'Absorption Atomique ICP contre des blancs d'extraction. Ceux-ci ayant subi les mêmes traitements que les échantillons fournis par la division standards de chimie analytique marine du Canada, concernant la comparaison des teneurs métalliques d'un sédiment certifié de référence CRM-BCSS-1. La courbe d'étalonnage a été tracée au moyen d'étalons préparés avec les mêmes réactifs que les échantillons.

2.2.4. Analyse statistique des données de l'étude

L'analyse en composantes principales (APC) est un outil extrêmement puissant de synthèse de l'information. L'objectif est d'établir la corrélation entre les paramètres physico-chimiques et charges métalliques des eaux usées puis les charges métalliques des plantes. Elle est très utile lorsque l'on est en présence d'une somme importante de données quantitatives à traiter et interpréter que sont les plantes, les sédiments et les eaux usées. Les résultats d'une APC sont habituellement discutés en termes de score par rapport à une composante ou même de charge (liaison) à une ou plusieurs composantes (Shaw, 2003). Grâce au critère de Kaiser-Guttman, l'essentiel de l'information peut être réduite en pratique à deux ou trois composantes principales, ce qui fournit à l'utilisateur une représentation graphique simple en 2 ou 3 dimensions permettant d'enquêter aisément sur les relations potentielles entre toutes les variables (Galay-Burgos *et al.*, 2003). Finalement, si l'ACP est majoritairement utilisée pour visualiser des données, il ne faut pas oublier que c'est aussi un moyen de corrélérer ces données, en considérant que les axes que l'on décide d'oublier sont des axes bruités. L'analyse de la co-inertie est employée sur des échantillons prélevés et traités dans les mêmes conditions. Ainsi, seuls les résultats d'analyses des échantillons d'eaux usées ont été soumis à ce test. L'objet étant de vérifier la solidité des influences des paramètres physico-chimiques sur les charges métalliques, chose qui les rend disponibles à assimilation par les plantes (Akpétou *et al.*, 2010). Les données générées ont été traitées grâce au logiciel Excel. Les analyses statistiques ont été faites au moyen du logiciel ADE4 de la bibliothèque R.

TROISIEME PARTIE : RESULTATS ET DISCUSSION

I. RESULTATS

Les résultats présentés dans cette partie du travail concernent les mesures in situ des paramètres physico-chimiques et les analyses chimiques au laboratoire. Ils ont fait l'objet d'analyses uni et multivariées. Les résultats de ces analyses ont permis d'évaluer l'impact des plantes sur les pollutions organiques et métalliques des eaux à Daloa.

1.1. Analyses univariées des paramètres physico-chimiques des eaux usées étudiées

L'état des paramètres physico-chimiques des eaux usées des réseaux d'évacuation lors de notre étude sont consignés dans le tableau suivant. On a utilisé dans notre travail est la moyenne géométrique du fait de l'éloignement des stations les unes par rapport aux autres. En outre les valeurs utilisées ont été confrontés aux normes ivoiriennes de rejets. Celle-ci est matérialisée par un trait rouge sur chacun de nos graphiques.

La température le long du réseau d'évacuation des eaux usées a varié entre 29°C et 34°C. La moyenne était voisine de 31°C, avec un écart-type (σ) de 1,71. La température maximale a été enregistrée à la station de Kennedy.

Le pH des eaux usées étudiées s'est révélé plus acide que les normes de rejets ivoiriennes. Celles-ci recommandent que les eaux de distributions aient un pH compris entre $6,5 \leq \text{pH} \leq 8,5$. En revanche, le lac de Gbokora respecte ces normes de qualité des eaux de distribution, contrairement au site de Kennedy.

Les valeurs élevées de conductivité élevées sont en conformité avec l'acidité des eaux usées étudiées. La conductivité a varié d'une station à l'autre ($\sigma = 595 \mu\text{s}/\text{cm}$). On observe une minéralisation très faible pour le site de Gbokora ($\text{cond} = 33 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$).

Une minéralisation excessive pour le site du Commerce avec une conductivité supérieure à $1000 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. Une minéralisation relativement importante au site d'Abattoir due à conductivité de l'ordre de $719 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ (figure 11).

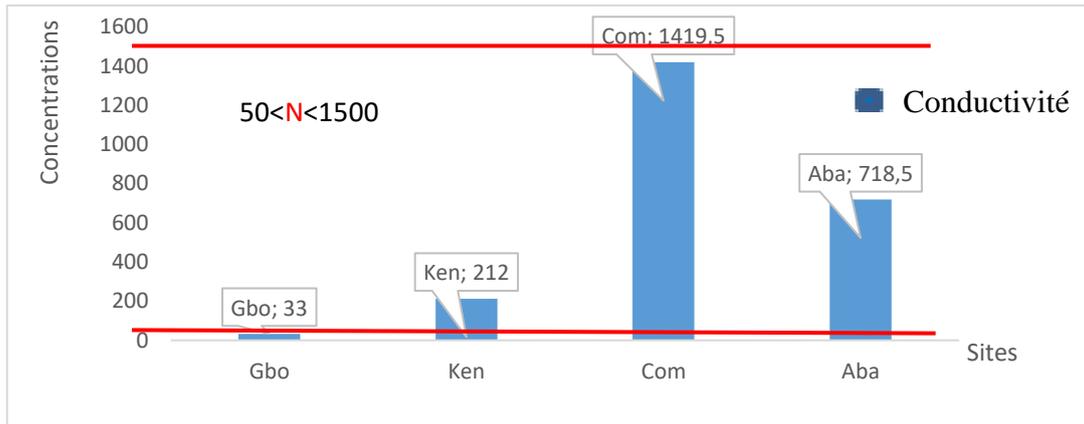


Figure 11 : Conductivité des eaux usées à Daloa Gbo (Gbokora); Ken (Kennedy); Com (commerce); Aba (Abattoir)

Les sites de Kennedy, du Commerce et d'Abattoir ont des valeurs anormales proches de 1 mg/L (figure 12). Le site de Gbokora a le plus fort taux d'oxygène dissous dans les différents sites étudiés.

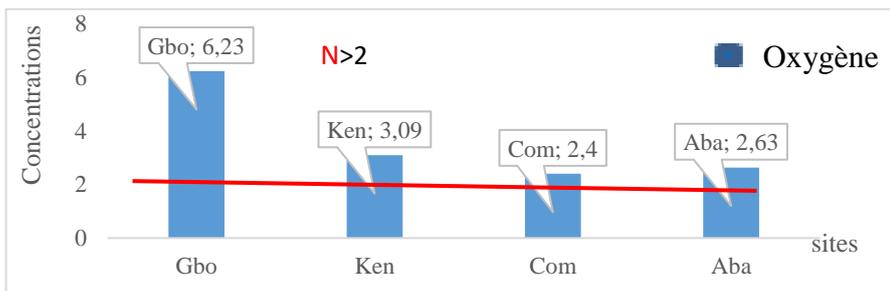


Figure 12 : Oxygène dissous des eaux usées à Daloa

Le tableau ci-dessus présente les différentes proportions de salinités avec la moyenne de 0,231mg/L et son écart-type de ($\sigma = 0,296$). La salinité du bas-fond du commerce est la plus élevée suivie du site d'Abattoir. Cependant, les eaux usées à Daloa ont présenté globalement une salinité très faible.

Les sites de Gbokora et de Kennedy possèdent de faibles concentrations en solides totaux dissous par rapport aux sites de Commerce et d'Abattoir. L'écart-type ($\sigma = 297,42$) est une preuve de la dispersion élevée des différents sites étudiés. Ceux-ci reçoivent des pressions anthropiques en rapport avec la densité populaire alentour.

1.2. Pollution organique des eaux usées à Daloa

Les résultats d'analyses des différents sels aux sites sont présentés dans le tableau ci-dessous. Il s'agit des ions nitrate (NO_3), nitrite (NO_2^-), phosphates (PO_4^{3-}), sulfate (SO_4^{2-}),

ammonium (NH_4^+). Les interprétations nous permettront de vérifier certaines hypothèses émises plus haut et de voir l'impact de l'environnement urbain sur les eaux.

Le site de Kennedy présente une teneur au-dessus des normes de rejet ivoiriennes. Les sites de Commerce et d'Abattoir ont présenté les teneurs les plus fortes en ammoniums contrairement au site de Gbokora qui se situe en dessous à la norme de qualité (figure 13). Ce Phénomène qui est favorisé par l'acidité de ces eaux.

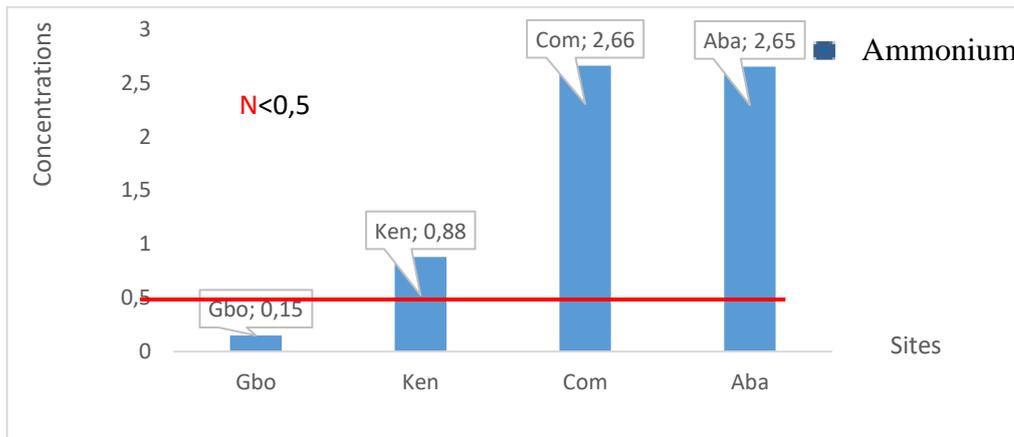


Figure 13 : Ammonium des eaux usées à Daloa

Les nitrates ont présenté une moyenne géométrique (0,64 mg/l) et l'écart-type mesurée est élevé ($\sigma = 1,28$). Les nitrates étaient élevés à la station du Commerce (6,05mg/l). Elle était faible à la station Kennedy (1,55mg/l).

Les eaux du lac de Gbokora et la source d'eaux répondent aux normes de critères de qualité ivoiriennes ($0,2 \text{ mg/L}^{-1}$) au regard des nitrites. Seule la station d'Abattoir (0,38mg/l) a présenté des concentrations en nitrites 100 fois plus élevée que la norme (figure 14). Elle était faible à la station Kennedy (1,55mg/l). La station du Commerce a présenté la plus faible proportion (0.04mg/l). On a une moyenne géométrique de 0.05mg/l et un écart-type de 0.16

Les mesures de sels du phosphore ont généré des résultats épars. Les concentrations ont varié (0,60 à 18,8 mg/L) avec un écart-type élevé ($\sigma = 7,94$). Le taux de phosphate est plus élevé à Abattoir (18,8mg/L) suivi du Commerce (3,77mg/L) à ces stations le taux est au-dessus des normes de rejets urbains. Par contre les sites de Gbokora et de Kennedy répondent aux normes de qualité de rejets urbains.

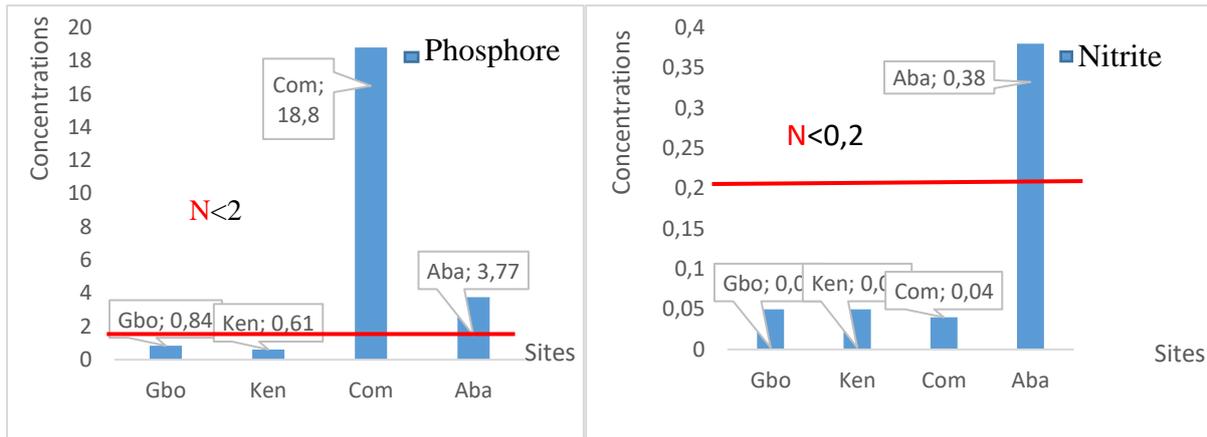


Figure 14 : Nitrite et du phosphate des eaux usées à Daloa

Les valeurs de sulfates obtenues sont élevées pour la source d'eau. La valeur minimale (12,74 mg/L) est obtenue au niveau du site de Kennedy alors que la valeur maximale (104,27 mg/L) est obtenue au niveau source d'eau. Toutes ces valeurs observées concernant le taux de phosphates sont au-dessous de la norme ivoirienne de rejets urbains.

1.3. Pollution métallique des eaux usées à Daloa

Quelques polluants métalliques ont fait l'objet d'analyse. Il s'agit du Cadmium, Manganèse, Plomb, Chrome, Cuivre, Mercure, Nickel, Arsenic et du Zinc.

Les concentrations en Mercure mesurées lors de notre étude ont dépassé les normes de qualité ($< 0,003$ mg/L). La station de Kennedy a observé la plus forte proportion de mercure (3,205mg/l). On observe une moyenne (0,43 mg/l) avec un écart-type ($\sigma = 1,5$) légèrement élevé.

La station d'Abattoir s'est révélée la plus affectée par les rejets de chrome (0,355 mg/L). Elle est suivie de la station de Kennedy (0,21 mg/L). Selon les normes ivoiriennes la valeur limite de rejets est de 0,1mg/l (Figure 11). La concentration de Cr des sites sont proches avec une moyenne 0,07 mg/l et sont écart-types soit de $\sigma = 0,16$.

Le plomb (Pb) des quatre (4) sites dépasse les normes de qualité de rejets ivoiriennes. La station d'Abattoir (3,9 mg/L) la sortie des eaux des usées suivie de la station de Gbokora (2,61 mg/L) l'entrée des eaux usées, puis de Kennedy. La concentration en plomb des différents sites à une moyenne 2,33 mg/l est presque semblable ($\sigma = 1$).

Le Cadmium est fortement présent à la station de Gbokora (0,565 mg/L) suivie de celle de Commerce. Les stations de Kennedy et d'Abattoir sont sensiblement les mêmes correctement. Les normes ivoiriennes fixent les proportions limites du Cadmium à 0,005mg/l des rejets dans

les eaux de surfaces (figure 10). Les valeurs observées au niveau de l'échantillon (moyenne de 0,29 mg/l) sont très proche ($\sigma = 0,17$ mg/L).

Le Manganèse est plus élevé dans le bas-fond de Kennedy. Celle-ci dépasserait les normes ivoiriennes de rejets de manganèse (1mg/L). Par contre les sites de Kennedy, du Commerce et d'Abattoir respectent ses Normes de qualités (figure 10). La moyenne est de 0,2 mg/L et la dispersion des mesures n'est pas forte, en dehors de la station de Kennedy qui dépasse les normes de qualité ($\sigma = 1,22$).

Les concentrations de Nickel aux différents sites ont dépassé les normes ivoiriennes. La station du Commerce a présenté la plus forte concentration en Nickel (5,21 mg/L) que les autres stations. La moyenne est estimée à 3,45 mg/l avec une dispersion plus ou moins faible ($\sigma = 1,68$).

La proportion de zinc du site de Kennedy n'a pas respecté les Normes par contre les sites autres sites respectes la limite ivoirienne de rejets de zinc. La moyenne est d'environ 0,80 mg/l avec une dispersion plus ou moins élevée ($\sigma = 0,90$). La majeure partie de la pollution au zinc pourrait provenir des vents de particules de sol.

Son seuil selon les normes ivoiriennes est de 0.5 mg/L (Figure 15). Les proportions de cuivres observées sur nos différents sites sont en dessous des normes ivoiriennes. Tous les sites se trouvent en-dessous des normes ivoiriennes. La concentration moyenne observée est de 0,07 mg/L les valeurs sont proches des unes des autres ($\sigma = 0,16$).

Toutes nos stations d'étude ont dépassé les normes ivoiriennes de rejets d'arsenic (0,05 mg/L). Le lac de Gbokora (1,86 mg/L) semble plus affecté, suivi du Commerce (1,60 mg/L). La moyenne est estimée à 1.41 mg/l avec une dispersion relativement faible ($\sigma = 0,37$).

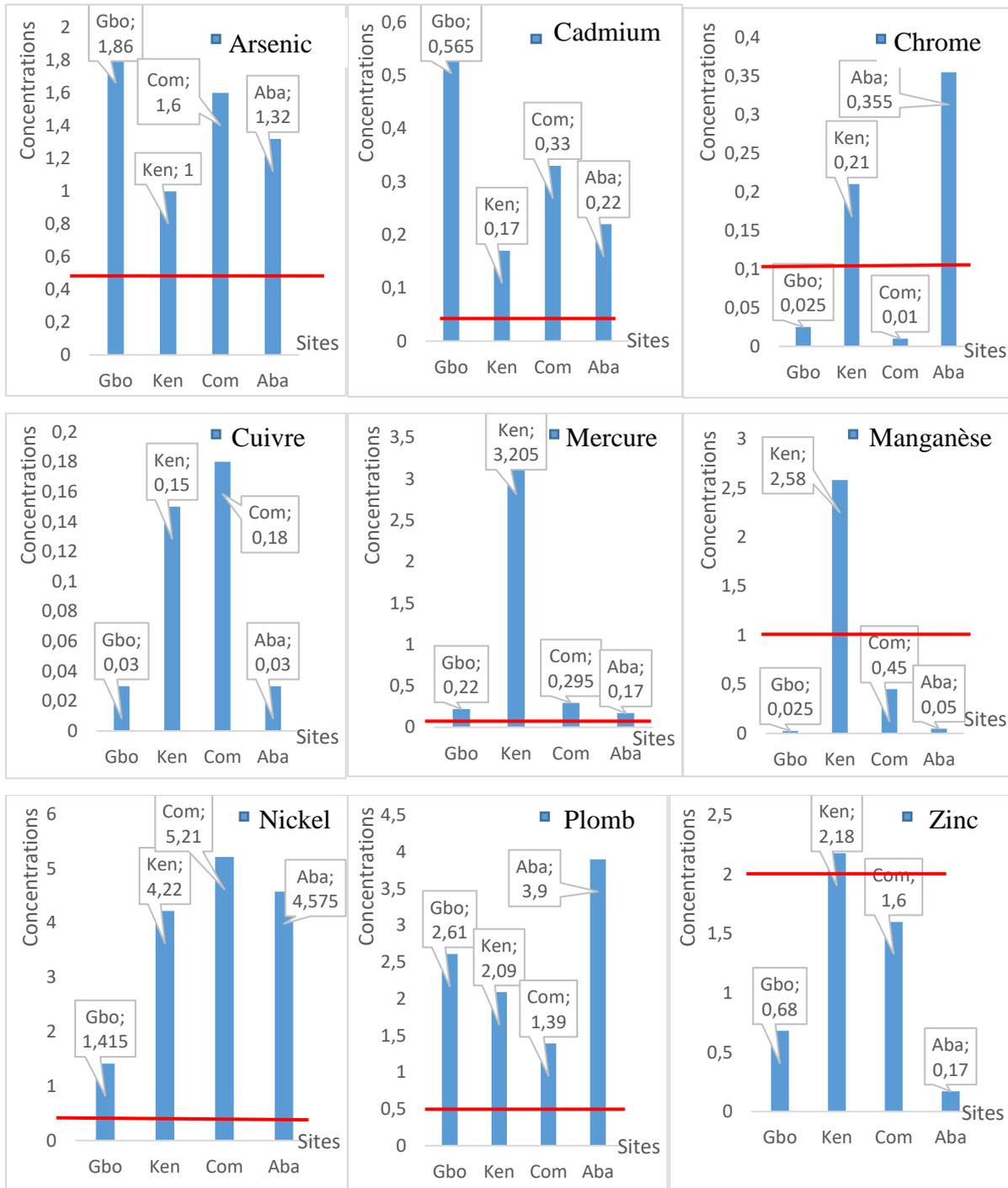


Figure 15 : Pollution métallique des eaux usées à Daloa lors de notre étude.

1.4. Profils physicochimique et métalliques des eaux usées, sédiments et plantes étudiées

1.4.1. Absorption des polluants des eaux usées par *Oenothera biennis L.* à la station de

Gbokora

Les métaux comme l'Arsenic, le Cadmium, le Mercure, le Nickel et le Plomb ont dépassé les normes de qualités ivoiriennes de rejet. L'analyse des résultats a montré qu'une fraction d'Arsenic, de Nickel et de Plomb des eaux usées est captée par les sédiments et l'autres

Oenothera biennis (Figure 16). *Oenothera biennis* a absorbé plus d'Arsenic et de Nickel durant les deux périodes d'échantillonnage. Constat que nous chercherons à vérifier au cours des analyses statistiques.

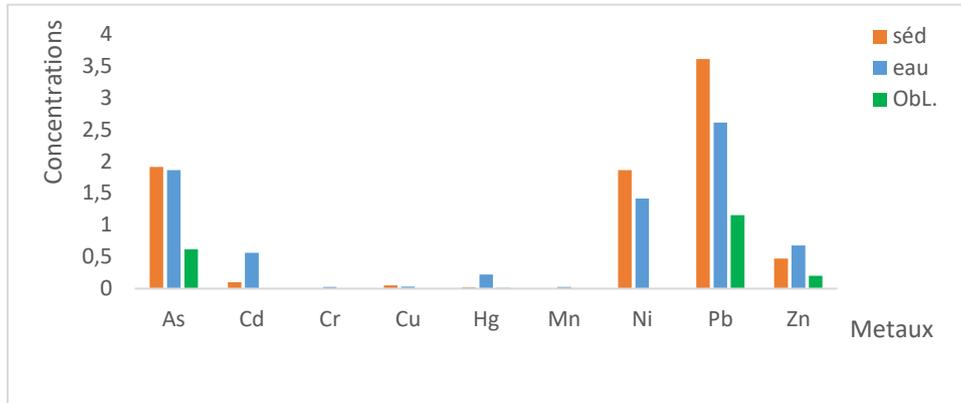


Figure 16 : Charge métallique d'*Oenothera biennis* par rapport à l'eau usée et le sédiment à la station de Gbokora

1.4.2. Absorption des polluants des eaux usées par *Eichhornia crassipes* à la station de Kennedy

La plante utilisée à la station de Gbokora est *Eichhornia crassipes*. Celle-ci a accumulé l'Arsenic (0,125mg/l), le Mercure (0,78 mg/l), le Manganèse (1,16mg/l), et le Nickel (1,305mg/l). La fraction restant se dépose dans les sédiments, on a l'Arsenic (1,635mg/l), le Cadmium (0,975 mg/l), le Cuivre (0,41 mg/l), le Nickel (3,4 mg/l), le Zinc (1 mg/l) et le Plomb (1,65 mg/l).

Au vu de ces observations, *Eichhornia crassipes* assimile bien le Mercure, le Manganèse, le Nickel, le Plomb et le Zinc qui sont des métaux potentiellement dangereux (figure 17). L'extraction de ces polluants par la plante est liée à l'augmentation de leurs quantités dans l'eau.

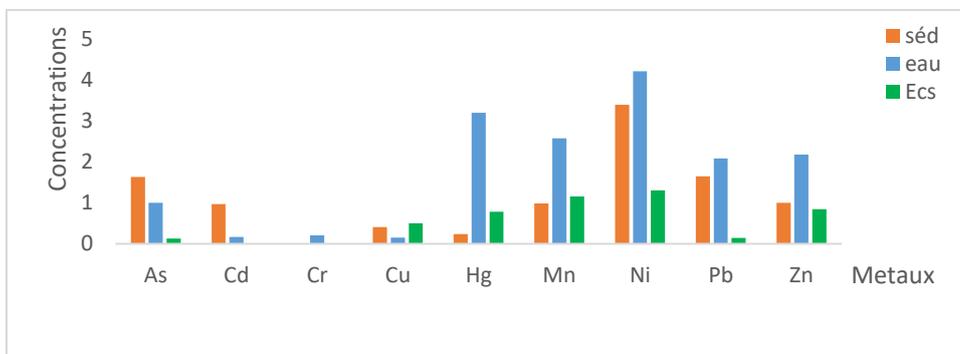


Figure 17 : Charge métallique de *Eichhornia crassipes* par rapport à l'eau usée et le sédiment à la station de Kennedy

1.4.3. Absorption des polluants des eaux usées par *Alternanthera philoxeroides* à la station du Commerce

L'Arsenic (As), Cadmium (0,33mg/L), Mercure (0,295mg/L), Manganèse (0,45mg/L), Nickel (5,21mg/L) et Plomb (1,39mg/L) ont largement dépassé les valeurs limites de rejets (Tableau 1 normes ivoiriennes de rejets).

La station de Kennedy présente une forte composition en Zinc, Plomb, Nickel, Manganèse, Mercure et Arsenic (14,18 mg/Kg) dans les sédiments du commerce. La composition métallique dans les sédiments est plus élevée que celle présente dans les plantes et l'eau usée (figure 18).

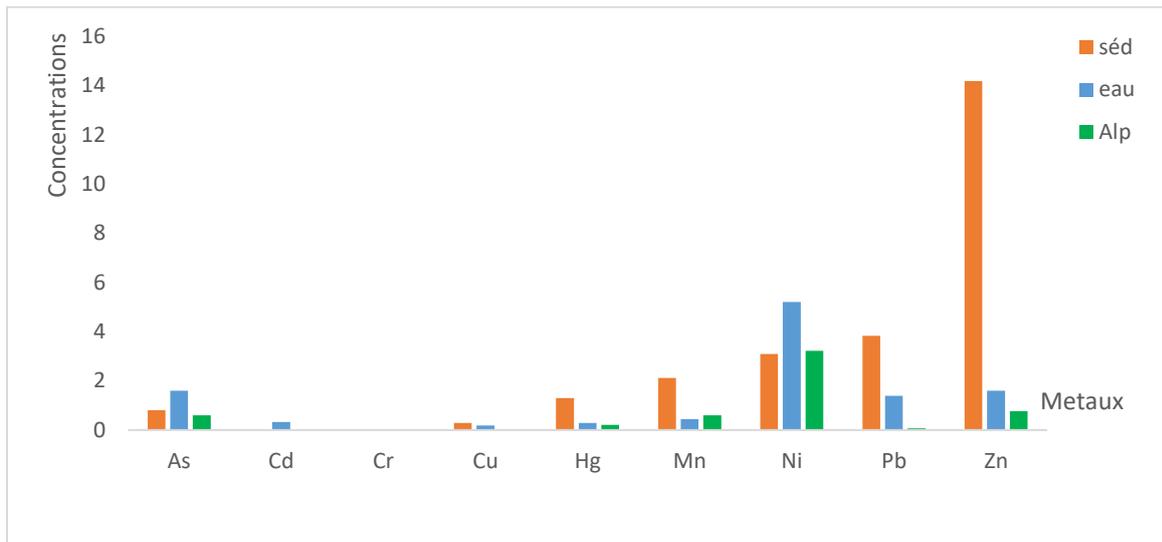


Figure 18 : Charge métallique d'*Alternanthera philoxeroides* par rapport à l'eau usée et le sédiment à la station de Commerce

1.4.4. Absorption des polluants des eaux usées par *Phalaris arundinacea* à la station d'Abattoir

Les polluants captés par les sédiments sont : As (0,37mg/L) ; Cd (0,08mg/L) ; Mn (0,92mg/L) ; Ni (0,8mg/L) ; Pb (0,93mg/L) ; Zn (0,39mg/L). Une fraction est captée par les sédiments à travers les dépôts et l'autre est assimilée par les plantes.

On observe que *Phalaris arundinacea* était toutefois capable de tolérer et d'assimiler une concentration plus forte d'arsenic (0,67mg/L), de cadmium (0,01mg/L), de chrome (0,09 mg/L), de mercure (0,03 mg/L), manganèse (0,6 mg/L), de Nickel (1,73 mg/L), et plomb (0,99 mg/L) dans notre station (figure 19).

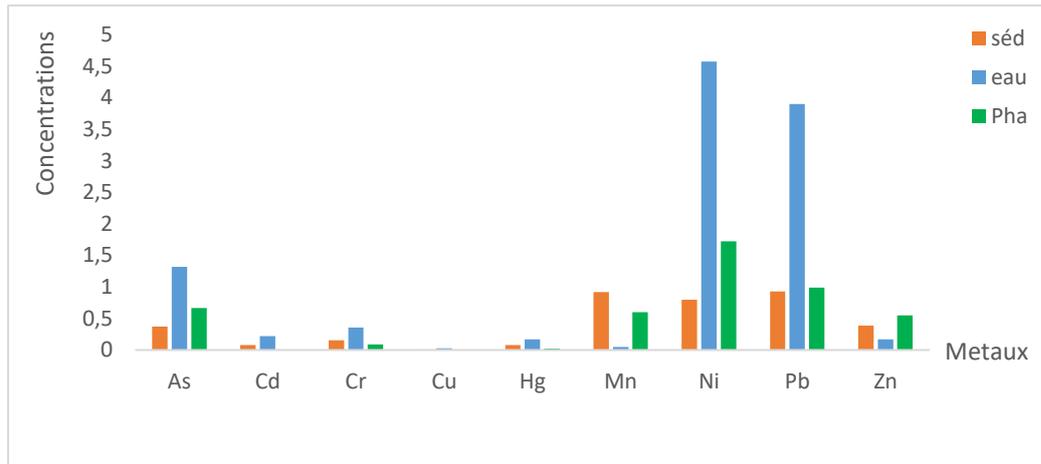


Figure 19 : Charge métallique *Phalaris arundinacea* par rapport à l'eau usée et le sédiment à la station d'Abattoir

1.5. Analyses multivariées des résultats d'observations

1.5.1. Corrélations entre paramètres physico-chimiques et charges métalliques des sédiments

Le premier plan factoriel (figure 20 et 21) montre une nette corrélation entre l'Arsenic, Cadmium, Plomb et les Nitrates, Sulfates, Oxygène ; avec des valeurs positives sur F1. Ce qui signifie que l'augmentation des concentrations de ces métaux suit celle de ces paramètres physico-chimiques. Bien plus, la minéralisation des déchets organiques, en sulfures et nitrates, libère l'Arsenic, Cadmium et le Plomb contenus dans les matrices organiques et sédimentaires.

.Le pH et les phosphates connaissent une augmentation (corrélation positive sur F2), inversement à la nitratisation du milieu. Ce groupe de paramètres est en opposition de phase avec le Mercure, Manganèse, Cuivre, Chrome et Zinc. Ceux-ci sont quant à eux fortement corrélés avec la température qui a une valeur négative sur F2. Ce qui implique que la minéralisation des rejets organiques est tributaire de la température du milieu. Elle a affiché une moyenne de 31°C qui semble être optimale pour la minéralisation des rejets organiques dans les eaux usées Daloo.

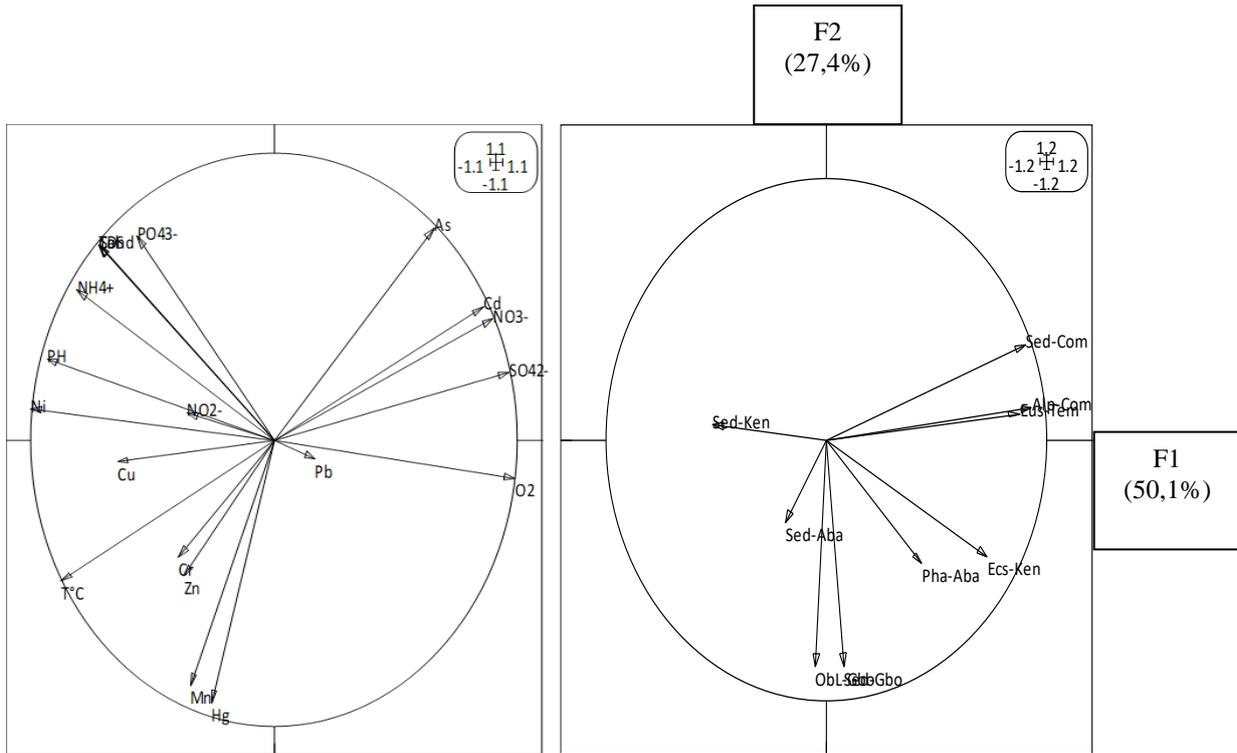


Figure 20 : Plan factoriel des paramètres physicochimique et des eaux usées aux stations d'étude

Figure 21 : Plan factoriel des sédiments et plantes aux stations d'étude

1.5.2. Corrélation entre paramètres physico-chimiques et charge métalliques des plantes aux stations

Phalaris arundinacea et *Eichhornia crassipes* ont montré une forte corrélation (valeur positive sur F1) avec le Plomb. *Alternanthera philoxeroides* a, été fortement associée au Cadmium et Arsenic. *Oenothera biennis* a montré une forte affinité pour le Mercure et Manganèse. Cette affinité a décri du Zinc, Chrome au Cuivre. Seul le Nickel a montré une corrélation négative avec toutes les plantes étudiées. Spécifiquement, les eaux et sédiments de la station d'Abattoir étaient chargées en Cuivre, Chrome et Zinc. La station de Kennedy a présenté des charges significatives en Nickel. Cependant, *Phalaris arundinacea* et *Eichhornia crassipes* ont montré une très forte corrélation positive avec le Plomb ; indépendamment de ses quantités. Ce qui montre une affinité spécifique de ces plantes pour ce métal. Les paramètres qui ont une valeur factorielle absolue supérieure à 0,5 ont un poids significatif. Le reste n'est qu'une tendance (figure 22).

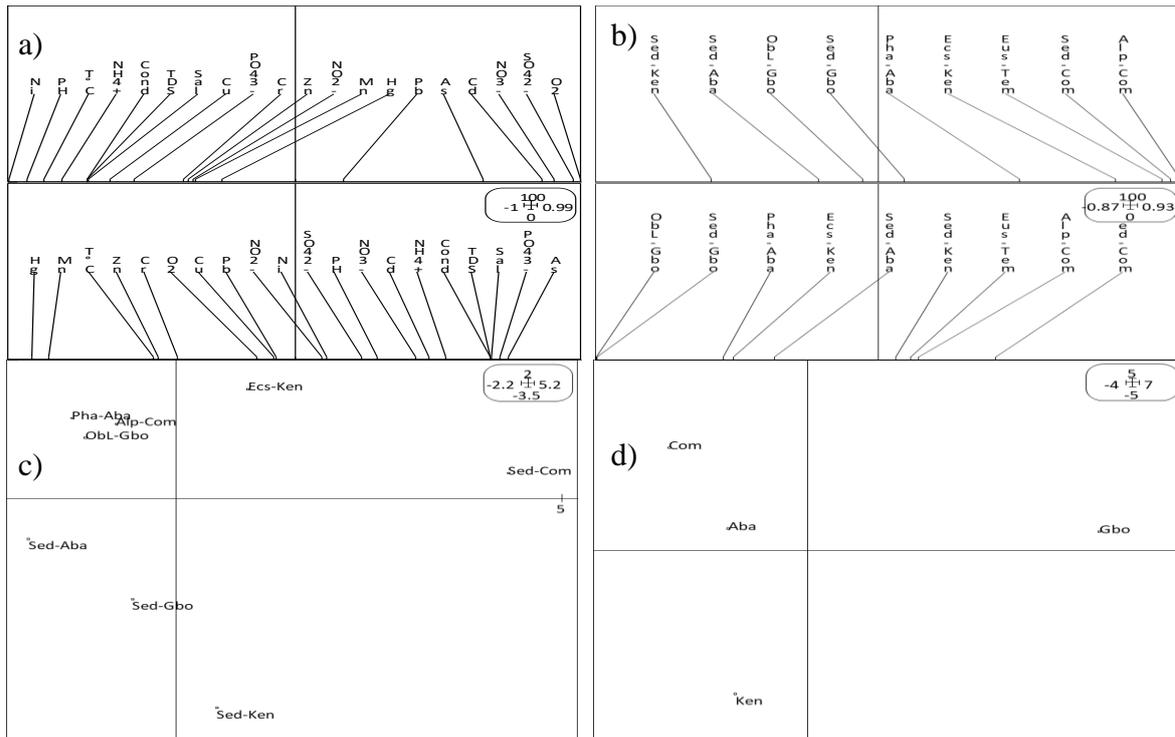


Figure 22 : Représentation individuelle des facteurs (a)-Représentations du poids des paramètres physico-chimiques et des Métaux (F1 en haut et F2 en bas). (b)-Représentations du poids des sédiments et plantes (F1 en haut et F2 en bas). Typologie des plantes en fonction des sédiments (c) et des stations (d)

Ainsi, le Nickel et le Cuivre sont significativement influencés et corrélés avec le pH, la Température, l'Ammonium, la Conductivité, la Salinité, Solides Totaux Dissous et les Phosphates. Ce groupe est opposé aux Sulfates, Nitrates et Oxygène dissous qui influencent le Cadmium et Arsenic. Les plantes assimilant au mieux ces deux métaux sont donc *Phalaris arundinacea* et *Alternanthera philoxeroides*.

1.5.3. Coinerties entre paramètres physicochimiques et charges métalliques des eaux usées

Il est apparu que le Nickel, le Cuivre et le Chrome ont montré une coinertie quasi générale, avec tous les paramètres physico-chimiques étudiés (figure 23 et 24). Ce constat s'est vérifié avec le pH, l'Ammonium, la Température, la Conductivité, les Solides Totaux dissous, la Salinité, le Phosphate.

Le Cadmium et l'Arsenic présentent coinertie avec le Nitrate, et le sulfate. Le Mercure et le Zinc montrent coinertie avec la température uniquement. Le Nickel a une forte coinertie avec le pH, l'Ammonium, la Conductivité les Solides Totaux Dissous et la Salinité.

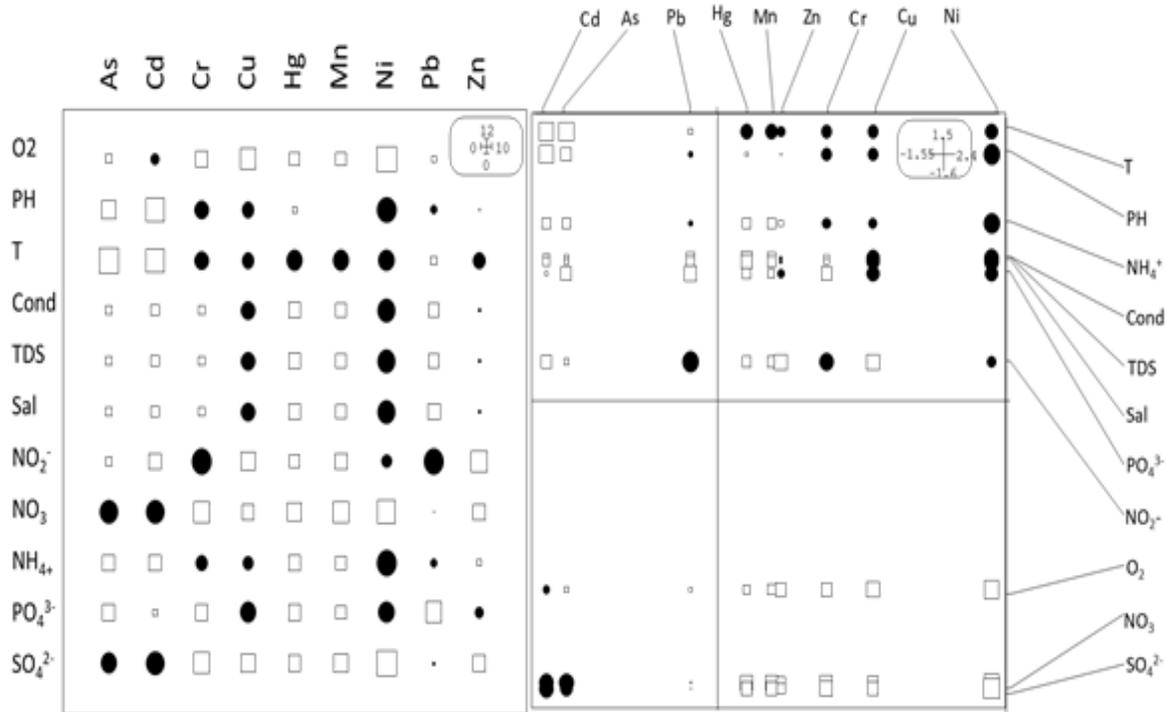


Figure 23 : Coinertie entre les paramètres physico-chimiques et charges métalliques des eaux usées à Daloa.

Figure 24 : Dynamique de l'influence des paramètres physico-chimiques sur les charges métalliques des eaux usées à Daloa.

- Coinertie positive ; □ Coinertie négative ; Le poids des relations détermine la taille des symboles.

1.5.4. Spéciation de la composition métallique des eaux usées étudiées au cours de la saison sèche à Daloa

Les relations (coinerties) sont fortes, la catégorisation des métaux donne deux étoiles dont les centres sont proches (figures 25 et 26). En effet, les centres des étoiles symbolisant les rejets et minéralisations sont proches sur les deux périodes. En début de saison sèche (février ou étoile 1), on a observé que les rejets de matières organiques étaient importants dans les eaux usées. Cela est vérifié par les valeurs positives sur le facteur F1, contrairement à l'Arsenic et le Mercure. Les métaux lourds qu'ils contenaient étaient adsorbés sur les matières organiques, en dehors du Chrome et Nickel (valeurs positives sur le facteur F2). En fin de saison sèche (avril) les rejets eux, n'ont pas varié notablement, même si les quantités de Cuivre et Plomb se sont réduits.

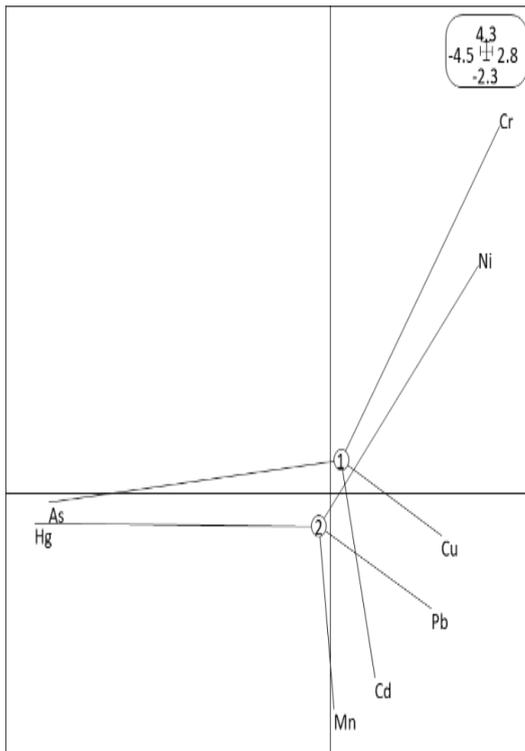


Figure 25 : Variation de la spéciation des métaux lourds dans les eaux usées en début de saison sèche (février 2018) à Daloa.

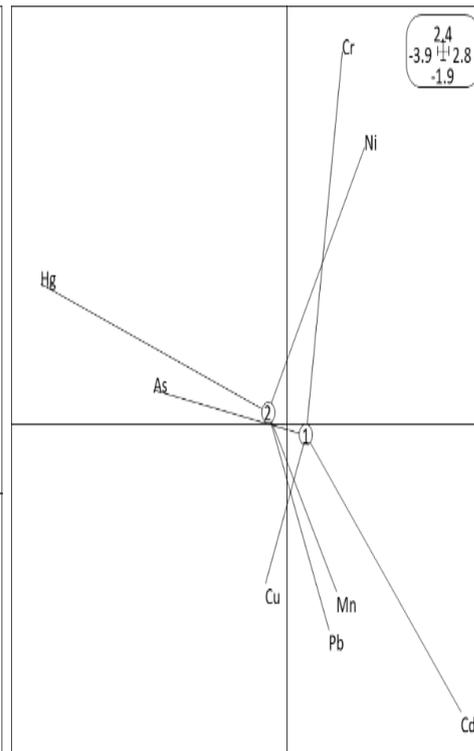


Figure 26 : Variation de la spéciation des métaux lourds dans les eaux usées en fin de saison sèche (avril 2018) à Daloa.

II. DISCUSSION

Cette étude a montré que la teneur de pH, de Sulfate, de Phosphate et de Nitrate de la ville de Daloa sont conformes aux normes requises pour la réutilisation agricole. Concernant les paramètres (TDS, NO_2^- , PO_4^{3-} , et NH_4^+) ces concentrations dans les eaux ne sont pas conformes aux normes de réutilisation et de préservation du milieu récepteur requises. Les solides totaux dissous sont fortement observés dans les stations du Commerce et Abattoir. Les nitrites sont au-dessus des normes ivoiriennes dans le site d'Abattoir dû à une intense activité bactérienne de décomposition de la matière organique. Ces nitrites sont toxiques pour les espèces aquatiques (Aminot & Kérouel, 2007). Le phosphate est au-dessus des valeurs limites pour la réutilisation agricole dans les sites du Commerce et d'Abattoir. En l'absence d'industrie lourde, ces charges en phosphates sont attribuables aux rejets d'industries agro-alimentaires et domestiques. On peut aussi ajouter le lessivage des terres cultivées renfermant des engrais phosphatés et certains pesticides (Rodier *et al.*, 2009). La proportion d'Ammonium se situe au-dessus des valeurs limites dans les stations de Kennedy, du Commerce et d'Abattoir. L'Ammonium est la forme sous laquelle l'azote est assimilé par la plupart des organismes aquatiques (Aminot & Kérouel, 2007). Elle prédomine dans le milieu aquatique pour des

valeurs de $\text{pH} < 9$ (Rodier *et al.*, 2005). Ce constat pourrait être le signe d'activités bactériennes élevées.

En effet, l'oxydation des matières organiques est tributaire de l'oxygène. Celui-ci est le socle de la respiration. L'oxygène dissout joue un rôle important pour la vie aquatique (Hébert & Légraré, 2000). Les eaux usées du Commerce et d'Abattoir, les plus polluées avaient une odeur caractéristique des émonctoires. L'odeur de l'eau est un facteur de qualité important (Rodier *et al.*, 2009).

Les métaux comme le Cadmium, le Plomb, l'Arsenic, le Nickel et le Mercure ont dépassé les normes ivoiriennes de rejets et constitueraient des risques sanitaires importants dans la ville de Daloa. Le Cadmium résulte de l'érosion naturelle, au lessivage des sols (engrais phosphatés) ou les effluents miniers des localités plus ou moins éloignées (Othumpangat *et al.*, 2005). Le Cadmium, selon Lane & Morel (2000) n'a aucun rôle métabolique connu et ne semble pas biologiquement essentiel ou bénéfique au métabolisme des êtres vivants. Selon Miquel (2001), les principales sources de pollution au plomb sont les peintures, les carburants automobiles et les industries. L'Arsenic existe, naturellement, dans les roches, principalement, sous forme d'arsénopyrite (FeAsS), souvent associée à de la présence d'or (ATSDR, 2007). Le Nickel, la principale source de pollution des différents sites est issue des eaux usées résiduelles, de peintures. Selon Given (2001), le nickel est moins toxique pour les poissons que le cuivre et le Zinc. Le Mercure selon Cossa & Ficht (2001), est principalement anthropique il provient particulièrement du charbon, de l'incinération d'ordures ménagères et hospitalières et des procédés industriels.

L'analyse des résultats révèle que les plantes des différentes stations n'ont pas présenté de stress environnemental. Elles utilisent les métaux pour leur métabolisme. A défaut, elles les accumulent de façon significative. À la station de Gbokora les métaux assimilés par *Oenothera biennis* sont l'Arsenic, le Mercure, le Plomb et le Zinc. La phytoremédiation chez *Eichhornia crassipes* (station de Kennedy) a été observée à l'égard de l'As, Hg, Mn, Ni. *Alternanthera philoxeroides* assimile la pollution d'un grand nombre que sont le Ni, As, Mn, Pb et Zn. À la station d'abattoir, les résultats ont montré que *Phalaris arundinacea* était toutefois capables de tolérer et d'assimiler une concentration plus forte d'arsenic (As), de cadmium (Cd), de chrome (Cr), de mercure (Hg), manganèse (Mn), de Nickel (Ni), et plomb (Pb). L'extraction de ces polluants par la plante semble être liée à l'augmentation de leurs quantités dans l'eau (Coetzee, 2009). Dans les organismes vivants, il est estimé que la concentration en élément trace métallique (Zn, Cu, Hg, Cd, Ni, Fe, As, Mn...) est en-dessous de 0,01 % de la matière sèche (Mench & Baize, 2004).

Ce travail a ont montré que le Manganèse, Cuivre, Chrome et Zinc sont, majoritairement, adsorbés dans les couches superficielles riches en matières organiques des sédiments. Les sédiments de la station d'Abattoir sont fortement corrélés avec cuivre, chrome et zinc. Il en est de même pour Gbokora qui a montré une affinité pour le mercure et manganèse. Tandis que la station de Kennedy est fortement corrélée au Nickel. Quant à la station du Commerce, il a été observé une forte corrélation avec l'arsenic et le cadmium.

La corrélation des paramètres physico-chimiques et des plantes aux différentes stations a montré que Nickel et Cuivre sont significativement influencés et corrélés. Ils sont corrélés avec le pH, T, ammonium, conductivité, salinité, TDS et les phosphates. Ce groupe est opposé aux sulfates, nitrates et oxygène dissous qui influencent le cadmium et arsenic. Les plantes assimilant au mieux ces deux métaux sont donc *Phalaris arundinacea* et *Alternanthera philoxeroides*. Chatterjee & Dewanji (2012) ont constaté que *A. philoxeroides* résiste au stress par l'activation de peroxydases. Cela lui permet de moduler les températures élevées, souvent, nécessaires à la minéralisation des composés organiques. En revanche, la tolérance au Chrome, au Zinc, au Manganèse et au mercure par *Oenothera biennis* n'est pas statistiquement significative. Cela pourrait s'expliquer par le nombre élevé de ces métaux simultanément assimilés ou tolérés par cette plante (Akpetou *et al.*, 2010). En outre, les matières en suspension (MES) et sables adsorbent majoritairement les métaux lourds (INERIS, 2007). Ainsi, la croissance d'*Oenothera biennis* serait plus dépendante des sels nutritifs que des métaux lourds (utilisés comme oligo-éléments). Cela s'explique par la corrélation positive entre les groupes formés du Chrome, du Zinc, du Manganèse et du mercure puis l'Ammonium, le Phosphate.

L'étude de la coïncidence entre paramètres physicochimiques et de charges métalliques des eaux usées a révélé que le Cadmium et Arsenic sont effectivement associés aux nitrates (NO_3^-) et sulfates (SO_4^{2-}). Selon ATSDR (2007), le Cd se combine très facilement avec le soufre minéral et organique. C'est ce qui explique sa présence dans le cadran négatif de F2 (minéralisation). De la même façon, le Ni est significativement corrélé à Température, pH, l'Ammonium, la Conductivité, les Solides Totaux Dissous, la Salinité et le Phosphate. Cela voudrait dire que ce métal est présent dans les eaux usées sous forme minérale et ne serait pas forcément assimilé par les plantes. Par contre, le Cuivre et le Chrome sont associés aux paramètres sus-cités de façon significative et seraient plus facilement assimilés par les plantes. Il en est de même pour le Mercure, le Manganèse et le Zinc qui sont présents à l'état minéral et dépendent exclusivement de la température. En d'autres termes, l'élévation de la température favorise la remédiation de ces métaux par *Oenothera biennis* L. De fait, les formes des métaux ont différé en fonction de nos périodes d'échantillonnages.

En début de saison sèche (février ou étoile 1), il a été observé que les rejets de matières organiques étaient importants dans les eaux usées. Cela est vérifié par les valeurs positives sur le facteur F1, contrairement à As et Hg où les rejets n'étaient pas suffisamment minéralisés. Les métaux lourds qu'ils contenaient étaient adsorbés sur les matières organiques, en dehors du Chrome et du Nickel (valeurs positives sur le facteur F2). En fin de saison sèche (avril), le taux de minéralisation a accru, mais faiblement. Les rejets eux, n'ont pas varié notablement ; même si les quantités de Cu et Pb se sont réduits. En définitive, les stations d'Abattoir et du Commerce ont présenté un niveau élevé de minéralisation des rejets organiques, contrairement à Kennedy. La station de Gbokora s'est illustrée comme celle qui est la plus sujette aux rejets. Il s'agit, en fait, d'apport en métaux lourds, dus aux entrées d'eaux usées provenant des zones aurifères autour du département de Daloa.

CONCLUSION

Les paramètres physicochimiques des eaux usées à Daloa ont présenté une variabilité importante lors de notre étude. Les températures sont élevées et une anoxie générale a été constatée. Les eaux usées rejetées à Daloa ont présenté un faible niveau de minéralisation.

En effet, les rejets se sont montrés importants. Ils ont supplanté les minéralisations des polluants organiques. Les métaux sont majoritairement adsorbés (tous ceux soumis à notre étude hors le Zn). Ainsi, une fraction importante est absorbée par les sédiments. En face les plantes étudiées ont accumulé des proportions élevées de métaux lourds. Cette activité est influencée significativement par les paramètres physico-chimiques particulièrement la Température, le pH, l'Ammonium, la Conductivité, la Salinité, les Solides Totaux Dissous et le Phosphate. Ils permettent l'assimilation du Plomb par *Phalaris arundinacea* et *Eichhornia crassipes* indépendamment des quantités. *Alternanthera philoxeroides* a, quant à elle, présenté des charges anormales en cadmium et arsenic. *Oenothera biennis* a montré une forte affinité pour le mercure et manganèse. Les plantes n'ont montré aucun signe extérieur de stress environnemental lors de notre étude. Leur affinité a décliné du Zinc, chrome au cuivre. Seul le nickel ne serait pas remédié par toutes les plantes étudiées.

Les résultats de notre étude permettent deux approches. D'une part, les plantes étudiées pourraient constituer un « groupement métallicole ». Cette approche est prometteuse pour la bioindication dans la démarche classique d'évaluation des risques. En d'autres termes, ces regroupements de plantes seraient des indicateurs de pollution en divers métaux, notamment, celles ayant montré une corrélation statistiquement significative avec les métaux. D'autre part, ces plantes pourraient être utilisées pour remédier les contaminants métalliques des eaux usées à Daloa. Cette technologie serait peu coûteuse et relativement facile à mettre en œuvre par la municipalité. Même s'il est encore très difficile de prévoir une stratégie de remédiation à cause de la faiblesse des connaissances sur le devenir des polluants d'un site contaminé. L'utilisation anthropique de ces supports de remédiation des contaminants métalliques doit être proscrite. Afin, de limiter le transfert des polluants organique et métallique vers les organismes vivant vers les organismes vivants. Pour ce faire, des tests en mésocosmes pourraient permettre de mieux cerner les performances en bioremédiation de ces « groupements métallicoles ».

REFERENCES

- Abhilash P.C., Jamil S. & Singh N. (2009). Transgenic plants for enhanced biodegradation and phytoremediation of organic xenobiotics. *Biotechnology Advances*, 27 : 47-488
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). (2007). Toxicological profile for lead. Atlanta, GA: US Department of Health and Human Services.
- Akpétou K.L., Kouassi A.M., Goula B.T.A., Assémian S. & Aka K. (2010). Nutrients induction on lead, cadmium, manganese, zinc and cobalt speciation in the sediments of Aby lagoon (Côte d'Ivoire), *International Journal of Engineering Science and Technology*, Volume 2, n° 8:3894-3900.
- Aminot A. & Kérouel R. (2007). Dosage automatique des nutriments dans les eaux marines : méthodes en flux continu. *Méthodes d'analyse en milieu marin*, Edition Ifremer, 188 p.
- ATSDR. (2008). "Draft Toxicological Profile For Chromium, TP7." *U.S. Department of Health and Human Services*".
- Badele K. (2005). Amélioration de la qualité de l'eau distribuée de la ville de Daloa. Rapport de mission SODECI, 23 p.
- Baize D. (2006). Cours sur les éléments traces dans les sols - Université de Poitiers – Les Éléments Traces Métalliques (ETM) dans les sols. Tout ce qu'il faut savoir ! Site de Baize Denis, pédologue.
http://www.denisbaize.fr/index.php?option=com_content&task=view&id=5&Itemid=9.
Consulté le 22/06/2018.
- Boris J. P. (2005). Commerce inéquitable, le roman noir des matières premières. *Hachette, collection Hachette littérature*. 15 p.
- Chatterjee A. & Dewanji A. (2012). Peroxidase as a metric of stress tolerance and invasive potential of alligator weed (*Alternanthera philoxeroides*) growing in aquatic habitats. *Management of biological invasions*, 65 p.
- Chiffolleau J.F., Claisse D., Cossa D., Ficht,A., Gonzalez G., Guyot T., Michel P., Miramand P., Oger C. & Petit F. (2001). *La contamination métallique, Programme scientifique Seine Aval*. 39 p.
- Coetzee J.A., Hill M.P., Julien M.H., Center T.D. & Cordo H.A. (2009). *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms–Laub. (Pontederiaceae). In : *Biological Control of Tropical Weeds Using Arthropods*, Edition Rangaswamy Muniappan, Gadi V.P.Reddy, Anantanarayanan Raman: 183-210.

- Coulibaly A.S., Mondé, Wognin V.A. & Aka K. (2008). State of anthropic pollution in the estuary of Ebrié lagoon (Côte d'Ivoire) by analysis of the metal elements traces. *European Journal of Scientific Research*, 19 (2): 372-390.
- Desjardins D., Pitre F.E., Guidi Nissim W. & Labrecque M. (2016). Differential uptake of silver, copper and zinc suggests complementary species-specific phytoextraction potential. *International Journal of Phytoremediation*, 18: 598–604.
<https://doi.org/10.1080/15226514.2015.1086296>.
- Diarra A., Guy C.D. & Sekongo L.G. (2016). Crise de l'eau potable en milieu urbain : cas de la ville de Daloa. *Revue de Géographie de l'Université Ouaga I Pr Joseph KI-ZERBO*, 2 : 132-151.
- Elbetieha A., Bataineh H., Darmani H. & Al-Hamood M.H. (2001). Effects of longterm exposure to manganese chloride on fertility of male and female mice. *Toxicology Letters*, 119:193-201.
- Fried G. (2012). Espèce non-réglémentée. *Guide des plantes invasives*, 272 p.
- Galay-Burgos M., Spurgeon D.J., Weeks J.M., Stürzenbaum S.R., Morgan A.J. & Kille P. (2003). Developing a new method for soil pollution monitoring using a molecular genetic biomarker. *Biomarkers*, 8(3-4):229-239.
- Gherib A., Boufendi M., Temime A., & Bedouh Y. (2016). Applications de la phytoremediation dans le traitement des eaux usées en algerie. *Larhyss Journal*, ISSN 1112-3680, 26:99-112.
- Given B., Dixon B., Douglas G., Mihoc R. & Mudder T. (2001). Combined aerobic and anaerobic biological treatment of tailings solution at the Nickel Plate mine. The Cyanide Monograph, Second Edition, Editeurs : Terry I. Mudder et Michael M. Botz, *Mining Journal Books Limited*, Londres, 388-420.
- Gromaire M.C., Garnaud S., Saad M. & Chebbo G. (2001). Contribution of different sources to the pollution of wet weather flow in combined sewers. *Water Research*, 35:521–533.
- Hou D. & Al-Tabbaa A. (2014). Sustainability: A new imperative in contaminated land remediation. *Policy* 39, 25–34. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2014.02.003>
- INERIS. (2005). *Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques*. Version N°2, 69p.
- Kipré P. (1985). Daloa, une cité dans l'histoire 16 p.
- Koukougnon W.G. (2012). Milieu urbain et accès à l'eau potable : cas de Daloa (Centre- Ouest de la Côte d'Ivoire). *Thèse de Doctorat, Université Félix Houphouët-Boigny*, 370p.

- Lane T.W., & Morel F.M.M. (2000). A biological function for cadmium in marine diatoms. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 97(9):4627-4631.
- Lepage V.L. (2016). *Phalaris arundinacea* "Pure Gold". *Ruban de bergère*, 2:312 p.
- LiLi C., Yan Y. & XingJin H. (2008). Historical invasion and expansion process of *Alternanthera philoxeroides* and its potential spread in China. *Sheng wu duo yang xing*, 16:6-578.
- Makhoukh M., Sbaa M., Berrahou A. & Clooster M.V. (2011). Contribution à l'étude physico-chimique des eaux superficielles de l'oued moulouya (Maroc oriental), *Larhyss Journal*, 9:149-169.
- Mélinda M. (2015). Impact de l'arsenic inorganique sur la physiologie *in vitro* des cellules dendritiques humaines. <http://tel.archives-ouverte.fr/tel-01135887>. Consulté le 22/06/2018.
- Mench M. & Baize D. (2004). Contamination des sols et de nos aliments d'origine végétale par les éléments en traces : mesures pour réduire l'exposition. *Courrier de l'Environnement de l'INRA*, 52:31-56.
- Ministère d'Etat, Ministère de l'Agriculture & des Ressources Animales. (2000). Etude de faisabilité techno-économique du projet d'aménagement de 1600 ha dans la région Centre-ouest. *Rapport principal*, 190 p.
- Miquel M. (2001). Les effets des métaux lourds sur l'environnement et la santé. *Rapport Office Parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques*, (261) : 360.
- Morillo J., Usero J. & Gracia I. (2004). Heavy metal distribution in marine sediments from the southwest coast of Spain. *Chemosphere*, 55 : 431–442.
- Office Nationale d'Assainissement. (2014b). Présentation de l'unité pilote de traitement des eaux usées du vieux ksar de Timacine dans la wilaya d'Ouargla, 9 P.
- Othumpangat S., Kashon M. & Joseph P. (2005). Eukaryotic translation initiation factor 4E is a cellular target for toxicity and death due to exposure to cadmium chloride. *Journal of Biological Chemistry*, 280: 162-169.
- Ouali A. FZ., El Abid A., Mouhir L., Fekhaoui M., Serghini A., & El Mohrit M. (2013). Evaluation de la Contamination par le Cadmium, le Zinc et le Plomb du sol de la région de Rabat-Salé-Zemmour-Zaër (Maroc). *Science Liberté*, Editions Mersienne, 5 : 01-11.
- Pan X.Y., Xin J., Fu J.D. & Li B. (2013). Geographical diversification of growth–defense strategies in an invasive plant. *Journal of Systematics and Evolution Special Issue: Human and human-influenced evolution*, 51, 3: 308–317

- Pilon-Smits E. (2005). Phytoremediation. *Annuaire. Revue of Plants Biology*, 56: 15–39.
- Ponnappakkam T.P., Bailey K.S., Graves K.A. & Iszard M.B. (2003). Assessment of male reproductive system in the CD-1 mice following oral manganese exposure. *Reproductive Toxicology* 17 ; 547-551.
- RGPH. (2014). *Résultats Recensement Général de la Population et de l'Habitat 2014*, 6p.
- Rodier J., Bazin C., Broutin J.P., Chambon P., champsaur H., Rodi L. (2005). L'analyse de l'eau, eaux naturelle, eaux résiduaires, eaux de mer, eaux chimie, physico-chimie, microbiologie, biologie, interpretation des resultats. Edition. Dunod, 1384p.
- Rodier J., Legube B. & Merlet N.C. (2009). *L'Analyse de l'eau*. Neuvième édition Dunod, 1526p. ISBN : 978-2-10-054179-9.
- Shaw P.J.A. (2003). *Multivariate statistics for the Environmental Sciences*. London (UK). *Hodder-Arnold*. 233p.
- Singh D., Gupta R. & Tiwari A. (2011). Phytoremediation of Lead From Wastewater Using Aquatic Plants. *International Journal of Biomedical Research*, 124 2(1) : 1-11.
- Thi M.D.H. (2009). Impacts des métaux lourds sur l'interaction plante/ ver de terre/ microflore tellurique. *Thèse de doctorat*, Université Paris Est Paris, 145p.
- UNEP. (2017). Phytoremediation: An environmentally sound technology for pollution prevention, control and redmediation. An introductory guide to decision-makers. <http://www.unep.or.jp/ietc/Publications/Freshwater/FMS2/3.asp> (accessed 12.21.17) Consulté le 22/06/2018.
- Vilagines R. (2003). Eau, environnement et santé publique. *Introduction à l'hydrologie*. Deuxième édition. Paris : Tec et Doc lavoisier, 190 p.
- Yoshizawa K., Rimm E.B., Morris J.S., Spate V.L, Hsieh C.C., Spiegelman D., Stampfer M.J. & Willett W.C. (2002). Mercury and the risk of coronary heart disease in men. *New England Journal of Medicine*, 347 :1755-1760.
- Zah B.T. (2015). Impact de la migration sur la démographie en Côte d'Ivoire. *Revue de géographie du laboratoire Leïdi*, 13 : 284-300.

Annexes

Annexe 1 : Moyennes des paramètres physico-chimiques des eaux usées à nos sites d'étude

Stations	Gbokora (Gbo)	Kennedy (Ken)	Commerce (Com)	Abattoir (Aba)	Moyennes géométriques	Ecart-types
O ₂ (mg/l)	6,23	3,09	2,4	2,63	3,59	1,65
% O ₂	80,88	45,15	33,9	38,1	50	20
pH	6,98	5,64	6,4	6,44	5,95	0,92
T (°C)	32,84	33,65	31,96	32,29	31,94	1,71
Cond (µs/cm)	33	212	1419,5	718,5	184,55	594,48
TDS (mg/l)	16,5	105,5	710	359,5	92,21	297,42
Sal (‰)	0,015	0,095	0,7	0,345	0,231	0,296

Annexe 2: Valeurs moyennes des sels nutritifs aux sites d'étude

Stations	Gbokora (Gbo)	Kennedy (Ken)	Commerce (Com)	Abattoir (Aba)	Moyenne	Ecart-type
NO ₂ ⁻ (mg/l)	0,05	0,05	0,04	0,38	0,05	0,16
NH ₄ ⁺ (mg/l)	0,15	0,88	2,66	2,65	0,64	1,28
PO ₄ ³⁻ (mg/l)	0,84	0,61	18,8	3,77	1,4	7,94
SO ₄ ²⁻ (mg/l)	22,19	12,74	25,58	16,42	26,21	38,35

Annexe 3: Charges métalliques moyennes des eaux usées à nos stations d'étude.

Métaux	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Mn	Ni	Pb	Zn
Gbokora	1,86	0,565	0,025	0,03	0,22	0,025	1,415	2,61	0,68
Kennedy	1,00	0,17	0,21	0,15	3,205	2,58	4,22	2,09	2,18
commerce	1,60	0,33	0,01	0,18	0,295	0,45	5,21	1,39	1,60
Abattoir	1,32	0,22	0,355	0,03	0,17	0,05	4,575	3,9	0,17
Moyenne	1,41	0,29	0,07	0,07	0,43	0,20	3,45	2,33	0,80
Ecart-type	0,37	0,18	0,16	0,08	1,49	1,22	1,68	1,06	0,90

Annexe 4: Charges métalliques des *O. biennis L* par rapport à celles de l'eau usée et du sédiment à la station de Gbokora.

Métaux	moyenne sédiment Mg/Kg	moyenne eau mg/l	<i>Oenothera biennis L</i> Mg/Kg	Ecart-type plante/sédiment	Ecart-type plante/eau
As	1,91	1,86	0,62	0,91	0,88
Cd	0,1	0,565	0	0,07	0,40
Cr	0	0,025	0	0	0,02
Cu	0,05	0,03	0	0,04	0,02
Hg	0,02	0,22	0,01	0,01	0,15
Mn	0	0,025	0	0	0,02
Ni	1,86	1,415	0	1,31	1,00
Pb	3,605	2,61	1,155	1,73	1,03
Zn	0,475	0,68	0,2	0,19	0,34

Annexe 5: Charges métalliques moyennes des eaux usées, des sédiments et des plantes à la station de Kennedy

Métaux	Moyenne sédiments Mg/Kg	Moyenne eau mg/l	<i>Eichhornia crassipes</i> Mg/Kg	Ecart-types plante/sédiment	Ecart-type plantes/eau
As	1,635	1,000125	0,125	1,07	0,62
Cd	0,975	0,1682432	0	0,69	0,12
Cr	0,005	0,21	0	0,01	0,15
Cu	0,41	0,15	0,5	0,06	0,25
Hg	0,24	3,205	0,78	0,38	1,71
Mn	0,985	2,58	1,16	0,12	1,00
Ni	3,4	4,2192636	1,305	1,48	2,06
Pb	1,65	2,0855636	0,145	1,06	1,37
Zn	1	2,18	0,845	0,11	0,94

Annexe 6 : Charges métalliques moyennes des eaux usées, des sédiments et des plantes à la station du Commerce.

Métaux	Moyenne sédiment	Moyenne eau	<i>Alternanthera philoxeroides</i>	Ecart-types plante/sédiments	Ecart-types plante/eau
As	0,81	1,595	0,6	0,15	0,70
Cd	0	0,33	0,005	0,003	0,23
Cr	0	0,01	0	0	0,01
Cu	0,29	0,18	0	0,21	0,13

Hg	1,295	0,295	0,21	0,77	0,06
Mn	2,115	0,45	0,6	1,07	0,11
Ni	3,09	5,21	3,215	0,09	1,41
Pb	3,835	1,39	0,065	2,67	0,94
Zn	14,18	1,595	0,775	9,48	0,58

Annexe 7 : Charges métalliques moyennes des eaux usées, des sédiments et des plantes à la station d'Abattoir.

Métaux	Moyenne sédiments	Moyenne eau	<i>Phalaris arundinacea</i>	Ecart-types plante/sédiment	Ecart-types plante/eau
As	0,37	1,32	0,67	0,21	0,46
Cd	0,08	0,22	0,01	0,05	0,15
Cr	0,16	0,36	0,09	0,05	0,19
Cu	0,01	0,03	0	0,01	0,02
Hg	0,078	0,17	0,03	0,04	0,10
Mn	0,92	0,05	0,6	0,23	0,39
Ni	0,8	4,58	1,73	0,65	2,02
Pb	0,93	3,9	0,99	0,04	2,06
Zn	0,39	0,17	0,55	0,11	0,27

RESUME

La détermination de la capacité de phytoremédiation de certaines plantes de rivage du réseau d'évacuation des eaux usées à Daloa a été menée pendant la saison sèche. Les mesures ont eu lieu à quatre (4) stations notamment Gbokora, Kennedy, Commerce et Abattoir. Les rejets organiques contenant les métaux lourds sont importants à la station de Gbokora. Ceux-ci sont fortement minéralisés au Commerce et à l'Abattoir, contrairement aux stations de Gbokora et Kennedy. Cela s'explique par l'intrusion de matières fécales et de rejets animaux dans les eaux usées à ces endroits respectivement. En sorte que les métaux majeurs dans les eaux usées (tous ceux soumis à notre étude hors le Zn) restent principalement adsorbés aux matières organiques. Cette adsorption est influencée par les paramètres physico-chimiques tels que la température, pH, ammonium, conductivité, salinité, TDS et les phosphates. Ils permettent l'assimilation du plomb par *Phalaris arundinacea* et *Eichhornia crassipes* indépendamment des quantités. *Alternanthera philoxeroides* a, quant à elle, présenté des charges anormales en cadmium et arsenic. *Oenothera biennis L.* a montré une forte affinité pour le mercure et manganèse. Qui par conséquent, n'ont montré aucun signe extérieur de stress environnemental lors de notre étude. Cette affinité a décré du zinc, chrome au cuivre. Seul le nickel ne serait pas remédié toutes chez les plantes étudiées.

Mots clés : Phytoremediation, potentiel, pollution organique et métallique

ABSTRACT

Determination of some plants ability to remediate organic and metal pollution was run during the dry season. Measurements were conducted at four sites, namely Gbokora, Kennedy, Commerce and Abattoir, through the network of waste waters evacuation. Organic discharges containing heavy metals were important at the Gbokora site. These were strongly mineralized at Commerce and Abattoir. That is explained by the intrusion of feces and animal waste into the wastewater at these locations respectively. So that the major metals in the wastewater (all those subjected to our study except the Zn) remain mainly adsorbed with the organic matters. This adsorption is influenced by physical and chemical parameters such as temperature, pH, ammonium, conductivity, salinity, TDS and phosphates. They allow the assimilation of lead by *Phalaris arundinacea* and *Eichhornia crassipes* irrespective of the quantities. *Alternanthera philoxeroides* has, on the other hand, presented abnormal charges in cadmium and arsenic. *Oenothera biennis L.* showed a strong affinity for mercury and manganese. Which consequently, showed no external sign of environmental stress during our study. This affinity decreased from zinc, chromium to copper. Only nickel would not be remedied all in the plants studied.

Keywords : Phytoremediation, dynamics, pollution organic and metallic.

