

**UNIVERSITE CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR**  
**FACULTE DE MEDECINE, DE PHARMACIE ET D'ODONTOLOGIE**  
**LABORATOIRE DE TOXICOLOGIE ET HYDROLOGIE**



N° : 235

**MASTER EN**  
**BIOTOXICOLOGIE APPLIQUEE A L'ENVIRONNEMENT,**  
**A L'INDUSTRIE ET A LA SANTE**

**ANNEE UNIVERSITAIRE : 2016/2017**

**MEMOIRE DE STAGE**

**ETUDE DE LA TOXICITE GLOBALE DES SEDIMENTS MARINS**  
**DE LA PRESQU'ILE DU CAP-VERT (SENEGAL)**

Présenté par M. Amidou SONKO

Le 29 juillet 2017

Membres du Jury

<b>Président :</b>	M. Amadou	DIOUF	Professeur
<b>Membres :</b>	M. Mamadou	FALL	Professeur
	Mme. Mathilde	CABRAL	Maitre de conférences agrégé
	M. Guillaume	CONSTANTIN DE MAGNY	Chercheur de l'IRD-IPD
<b>Directeurs de stage :</b>	M. Patrice	BREHMER	Chercheur IRD-Lemar/CRODT
	M. Massal	FALL	Directeur du CRODT-ISRA
<b>Directeurs de mémoire :</b>	M. Cheikh	DIOUF	Maitre-assistant

## Dédicaces

C'est avec un grand plaisir que je dédie le travail à mon père Ibrahima SONKO et à ma mère Mariama SANE, qui ont parfaitement joué leur rôle tout au long de mes études.

Je dédie également ce travail à mes grands-parents Ismaïla SANE, Aminata SAGNA et Fatoumata DIATTA, avec qui j'ai reçu une bonne éducation de base.

A mes oncles et à mes tantes.

A mes frères et à mes sœurs.

A mes amis et promotionnaires.

Je dédie aussi ce travail à tous ceux qui ont participé d'une manière ou d'une autre à mes études.

## Remerciements

Ce mémoire est une partie d'un travail de recherche de 12 mois. En préambule, je souhaite adresser mes remerciements à toutes les personnes qui ont contribué d'une manière ou d'une autre à la réalisation de ce travail.

Tout d'abord mes sincères remerciements à DIEU qui m'a donné la santé et la force de pouvoir terminer ce travail.

Mes profonds remerciements aux Dr. Patrice BREHMER et Dr. Ibrahima CISSE qui m'ont impliqué dans ce programme de recherche. Leur disponibilité, leurs apports pédagogiques et matériels m'ont permis non seulement d'avoir une notion de la recherche scientifique mais, également, d'acquiescer de belles expériences. J'en serais toujours reconnaissant.

Je remercie mon encadreur, le Dr. Cheikh DIOP pour sa simplicité, sa disponibilité et les connaissances qu'il m'a transmises dans ce travail. Je n'oublierai jamais votre soutien.

Je remercie le Pr. François GALGANI et le Dr. Maryvonne HENRY de l'IFREMER, le Pr. Amy Gassama SOW de l'IPD (Institut Pasteur Dakar & Pr UCAD), le Dr. Guillaume CONSTANTIN DE MAGNY de l'IRD/IPD, M. Luc FINOT (responsable du laboratoire de chimie) et Mme Mary Pierre TINE de l'US IMAGO de l'IRD, M. Ousmane DIANKHA de la DAMCP, Mme Hawa DIALLO du LEA (Laboratoire des Essais et des Analyses) et à tous les équipes de l'IFREMER, de l'IPD, du LEA et de l'US IMAGO pour leurs aides et implications dans l'analyse des paramètres étudiés.

Je remercie également le Directeur CRODT, le Dr. Massal FALL pour son accord et l'accessibilité de tout le matériel nécessaire pour ce travail ainsi qu'aux docteurs, doctorants, étudiants et personnel administratif du CRODT pour leur sens d'intégration aux nouveaux venus.

Je remercie, amplement, les responsables du Master en Biotoxicologie le Pr. Amadou DIOUF et le Pr. Mamadou FALL qui m'ont accepté et m'ont permis de suivre une des formations les plus intéressantes de l'UCAD, voir dans la sous-région.

Mes remerciements spéciaux aux chimistes du CRODT : M. Cheikh NDOUR (responsable du laboratoire de chimie) et M. Limallé DEME pour leur participation à ma formation sur le terrain.

Mes grands remerciements au Dr Oumar SADIO, à M. Ibrahima DIACK et à Mlle Yoba KANDE pour leur implication dans le traitement des données statistiques sur le logiciel R et la réalisation des images sur Matlab.

Je remercie profondément les partenaires financiers et techniques de ce projet : IRD Lemar, CRODT-ISRA, DEEC, DAMCP, IPD, IFREMER, FSS, CP, Kirène eau, ONG Path, IRD IMAGO, IPD, LEA et TTSM qui ont rendu possible la réalisation de ce travail.

## Sommaire

Sommaire.....	iii
Liste des Tableaux.....	vi
Liste des Figures.....	vii
Listes des acronymes.....	viii
Résumé.....	ix
Abstract.....	x
Introduction.....	1
1. Chapitre I : Pollution marine et côtière.....	3
1.1. Définition de la pollution marine.....	3
1.2. Etat de la pollution marine au Sénégal.....	3
1.2.1. Sédiment.....	3
1.2.2. Eau.....	4
1.2.3. Flore et Faune.....	5
2. Chapitre II : Matériels et méthodes.....	7
2.1. Cadre de l'étude.....	7
2.2. Choix des sites.....	8
2.3. Mode d'échantillonnage des sédiments marins et des eaux marines.....	9
2.4. Techniques analytiques.....	10
2.4.1. Cas des sédiments.....	10
2.4.1.1. Granulométrie.....	10
2.4.1.2. Rapport Carbone et Azote.....	11
2.4.1.3. Quantification du mercure dans les sédiments (Hg <sub>s</sub> ).....	12
2.4.1.4. Toxicité globale des sédiments marins par la méthode ANFOR XP-T-90-382.....	12
2.4.2. Cas des eaux marines.....	14
2.4.2.1. Paramètres physico-chimiques.....	14
2.4.2.2. Eléments Traces Métalliques (ETM).....	14
2.4.3. Analyses statistiques.....	16
3. Chapitre III: Résultats.....	16
3.1. Sédiments.....	16
3.1.1. Paramètres physiques.....	16
3.1.2. Paramètres chimiques.....	17
3.1.3. Paramètres toxicologiques.....	18
3.2. Eaux marines.....	19
3.2.1. Paramètres physicochimiques.....	19
3.2.2. Eléments Traces Métalliques (ETM).....	22
3.3. Analyses statistiques.....	23
3.3.1. Table des corrélations.....	23

3.3.2. Régression linéaire multiple .....	24
3.3.3. Analyse des Composantes Principale (ACP).....	24
4. Chapitre IV: Discussion.....	25
4.1. Sédiments : Granulométrie, Carbone total, Azote, Teneur en mercure, Toxicité globale des sédiments.....	25
4.2. Qualité des eaux marines .....	29
4.2.1. Aspects physicochimiques.....	29
4.2.2. Les Eléments Traces Métalliques (ETM).....	33
4.3. Analyses statistiques.....	35
4.3.1. Tableau de corrélation.....	35
4.3.2. Régression linéaire .....	36
4.3.3. Analyse des Composantes Principales (ACP) .....	36
Conclusion et perspectives .....	37
Références Bibliographiques .....	38
Annexes.....	44
Annexe 1 : Analyse granulométrique .....	44
Annexe 2 : Récapitulatif des résultats obtenus sur les sédiments .....	45
Annexe 3 : Teneur en éléments traces métalliques (ETM) .....	45
Annexe 4 : Paramètres physicochimiques .....	45
Annexe 5 : Régression linéaire .....	46
Annexe 6 : Météorologie locale .....	47
Annexe 7 : Paramètres microbiologiques.....	47
A7.1. Echantillonnage .....	47
A7. 2. Analyse.....	47
A7. 2.1. Escherichia coli (E. coli) .....	47
A7. 2.1.1. Principe de la norme NF EN ISO 9308-1 .....	47
A7. 2.1.2. Mode opératoire.....	48
A7. 2.2. Entérocoques intestinaux.....	48
A7. 2.2.1. Principe de la norme NF EN ISO 7899-2 .....	48
A7. 2.2.2. Mode opératoire.....	48
A7. 2.3. Salmonelles .....	48
A7. 2.3.1. Principe de la norme NF EN ISO 19250. ....	48
A7. 2.3.2. Mode opératoire.....	49
A7. 2.4. Vibrions : Vibrio cholerae, Vibrio parahaemolyticus et Vibrio vulnificus .....	49
A7. 2.4.1. Principe .....	49
A7. 2.4.2. Mode opératoire.....	50

A7. 3. Résultats .....	51
Annexe 8 : <i>Crassostrea gigas</i> .....	52
Annexe 9 : Feuille d'enquête de terrain AWATox.....	52
Annexe 10: Publications scientifiques .....	54
Annexe 11: Communications scientifiques de l'auteur .....	54

## Liste des Tableaux

Tableau 1: Différents sites de prélèvement, leurs coordonnées GPS et leurs sources de pollution potentielles ainsi que les débits estimés des effluent. ....	9
Tableau 2: Matrice de corrélation entre les ETM et la TGS (Toxicité Globale des Sédiments). En gras les corrélations significatives entre la TGS et ETM et ETM. ....	24
Tableau 3 : Comparaison des teneurs en Hg dans les sédiments entre différente études. ....	28
Tableau 4 : Temps de chute des argiles et limons et celui des argiles seulement en fonction de la température pour une profondeur de 10cm. ....	44
Tableau 5 : Récapitulatif des résultats des analyses faites sur les sédiments : toxicité générale des sédiments (% d'anomalies), teneur en Hg <sub>s</sub> (mg kg <sup>-1</sup> ), teneur en carbone total (%), teneur en azote (%), la granulométrie (% argile, % limons fins, % limons grossiers, % sable fin et %sable grossier), profondeur et distance à l'effluent. ....	45
Tableau 6 : Teneur en ETM dans les eaux marines au niveau de la presqu'île du Cap-Vert.....	45
Tableau 7 : Paramètres physicochimiques des eaux marines au niveau de la presqu'île du Cap-Vert. ....	45
Tableau 8 : Régression linéaire multiple des métaux et de la TGS (première estimation). ....	46
Tableau 9 : Régression linéaire multiple des métaux et de la TGS (dernière estimation).....	46
Tableau 10 : Météo du Mercredi 1 juin 2016 par model GFS i.e. Windguru à Dakar. La direction du vent a été validée en mer par nos observations.....	47
Tableau 11 : Paramètres microbiologiques ( <i>E. coli</i> , Entérocoques, Salmonelles et Vibrions) dans les eaux marines au niveau de la presqu'île du Cap-Vert.....	51

## Liste des Figures

Figure 1 : Carte des sites d'échantillonnage montrant la position des effluents (rouge) et (jaune) les points de prélèvement autour de la presqu'île du Cap Vert. ....	8
Figure 2 : Granulométrie ; % d'argiles, de limons fins et grossiers et sable fins et grossiers (a) et % d'argiles, limons fins et limons grossiers (b) dans les sédiments marins au niveau de la presqu'île du Cap-Vert.....	17
Figure 3 : Rapport Carbone/Azote dans les sédiments marins au niveau de la presqu'île du Cap-Vert .....	18
Figure 4 : Teneur en mercure dans les sédiments (Hg <sub>s</sub> ) au niveau de la presqu'île du Cap-Vert....	18
Figure 5 : Toxicité globale des sédiments au niveau de la presqu'île du Cap-Vert. ....	19
Figure 6 : Paramètres physicochimiques : les MES dans les eaux au niveau de la presqu'île du Cap-Vert.....	20
Figure 7 : Paramètres physicochimiques : Température, Salinité, saturation en Oxygène Dissous et Turbidité dans les eaux de la presqu'île du Cap-Vert. ....	21
Figure 8 : Concentration en ETM [Al, Co, Cr, Ni (a) ; Cu, Fe, Zn (b) ; Cd, Mn, et Hg (c)] dans les eaux de surface au niveau de la presqu'île du Cap-Vert.....	22
Figure 9 : Facteurs de pollution des ETM sur la presqu'île du Cap vert (valeur moyenne de l'ensemble des sites) par rapport aux critères de protection de la vie aquatique ; effets chroniques (Critères canadiens).....	23
Figure 10 : a) Histogrammes des valeurs propres. b) Cercle de corrélation des variables mesurées. (c) Graphe des individus (sites). (e) Représentation simultanée individus et variables. ....	25
Figure 11 : Mode opératoire de la recherche des salmonelles. ....	49
Figure 12 : Mode opératoire de la recherche des <i>vibrio cholerae</i> , <i>Vibrio parahaemolyticus</i> et <i>Vibrio vulnificus</i> .....	50
Figure 13 : Illustration de l'huître creuse du Pacifique <i>Crassostrea gigas</i> .....	52

## Listes des acronymes

**ACP** : Analyse des Composantes Principales

**ADL** : Anomalies de Développement Larvaire

**AFNOR** : Association Française de Normalisation

**CMR** : Cancérigène, mutagène, reprotoxique

**CPC (EO)** : Critère de prévention de la contamination (eau et organisme aquatiques)

**CPC (O)** : Critère de prévention pour la contamination (organismes aquatiques seulement)

**CPC** : Critère de prévention de la contamination

**CRODT** : Centre de Recherche Océanographique Dakar Thiaroye

**CSEO** : concentration sans effets observables

**CVAA** : Critère de vie aquatique aigu

**CVAC** : Critère de la vie aquatique chronique

**D** : Développement

**ETM** : Eléments traces métalliques

**FE** : Facteur d'Enrichissement

**Fh** : Facteur d'humidité

**FT** : Facteur de Transfère

**GEODE** : Groupement d'Etude et d'Observation des activités de Dragage sur l'Environnement

**GESAMP** : Groupe mixte d'experts chargé d'étudier les aspects scientifiques de la protection de l'environnement marin en grande Bretagne.

**Ifremer** : Institut française de Recherche pour l'Exploitation de la Mer

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

**IP** : Institut Pasteur

**IPS** : Indice de Pollution Sédimentaire

**IRD** : Institut de Recherche pour Développement

**ISRA** : Institut Sénégalaise de Recherche Agricoles

**MES** : Matières en suspension

**ND** : Non Déterminé

**NQE** : Normes de qualité environnementale

**PBA** : Pourcentage Brute d'Anomalies

**PLI** : Pollution Load Index

**PNA** : Pourcentage Net d'Anomalies larvaires

**PVAC** : Critère de vie aquatique chronique

**SAA** : Spectromètre d'Absorption Atomique

**TGS** : Toxicité Globale des Sédiments

**UCAD** : Université Cheikh Anta Diop de Dakar

**Uta** : Unité de Toxicité aiguë

**Utc** : Unité de Toxicité chronique

**VAF<sub>e</sub>** : Valeur aiguë finale à l'effluent

## Résumé

Treize pourcent (13 %) des eaux usées domestiques produites, quotidiennement, à Dakar font l'objet d'un traitement avant leur rejet. Notre travail porte sur l'évaluation de la toxicité globale des sédiments marins (TGS) autour de la presqu'île du Cap-Vert, actuelle région dakaroise. Onze (11) sites de prélèvement ont été sélectionnés puis étudiés. Nos résultats montrent que 73 % des sites présentent une toxicité élevée, 9 % une toxicité moyenne et 18 % une toxicité faible. Les teneurs en mercure dans les sédiments ( $Hg_s$ ) sont faibles et une variabilité inter-sites a été observée. Dans l'eau, des teneurs globalement élevées en Eléments Traces Métalliques (ETM) [Aluminium (Al), Cadmium (Cd), Chrome (Cr), Cobalt (Co), Cuivre (Cu), Mercure (Hg), Nickel (Ni) et Zinc (Zn)], sont observées à l'exception du Fer (Fe) et du Manganèse (Mn) dont les teneurs sont faibles. La moyenne des facteurs de pollution (seuil : effets chroniques - critères canadiens 2013) a permis de classer les ETM par ordre de pollution décroissante: le Cu arrive en tête suivi du Ni, Cr, Cd, Co, Al, Hg, Zn, et les deux derniers (le Mn et le Fe) sont eux en dessous du seuil considéré. Les métaux constituent un groupe dangereux (rémanent, bioaccumulable, bioamplifiable, toxique) et peuvent avoir des effets néfastes sur les ressources halieutiques et la santé humaine. A forte absorption, on peut observer des effets sur le système nerveux (*e.g.* Hg, Pb), des lésions rénales (*e.g.* Al, Cd) ; des perturbations de Hématose (Pb), des effets sur la reproduction et le développement (*e.g.* Cu), des effets cancérogènes (Cr, Co, Ni, Pb). Nos analyses révèlent des corrélations positives (Cd/Co, Cd/Fe, Co/Fe, Fe/Ni) et négatives (Cu/Cd, Cu/Co, Cu/Fe, Cd/ $Hg_s$ , Cr/Ni, Fe/ $Hg_s$ , et Ni/ $Hg_s$ ) entre les ETM. On observe sur l'ensemble des sites que seuls le Cd, le Cr, le Zn et le  $Hg_s$  ont des effets significatifs sur la TGS. La pollution en ETM a été caractérisée par site, ainsi, Soumbédioune se distingue par le Cu ; Cambéréne par le Co, le Ni, le Fe, et le Cd ; Hann1 par le  $Hg_s$  et le Cr ; Yoff Tonghor par le Ni et le Hg ; le Port de Dakar par le Cr et Ngor par le Zn et le Mn. La faible variabilité de la TGS observée entre les sites est caractéristique de la nature et de l'intensité de la pollution. Bien qu'il soit faible dans les sédiments, la présence du mercure présente des risques pour les organismes marins via sa méthylation et sa bioaccumulation-bioamplification. Sa variabilité inter-sites semble sensible à des facteurs physiques tels que la granulométrie, la turbidité et la courantologie. La pollution en ETM des eaux peut être attribuée, en fonction des éléments concernés, aux aérosols, aux rejets des systèmes septiques et/ou industriels, des systèmes de traitement des eaux usées et des décharges informelles ou non ainsi qu'aux décharges issues des petites entreprises : *e.g.* forges, bijouteries, menuiserie métallique et/ou aluminium. Les corrélations observées entre les ETM indiquent que ces éléments ont tendance à se mettre sous la même forme dissoute ou particulaire (corrélation positive) ou à évoluer dans le sens opposé *i.e.* si l'un tend vers la forme dissoute, l'autre tend vers la forme particulaire et vice versa (corrélation négative). Les effets significatifs du Cd, du Cr, du Zn et du  $Hg_s$  sur la TGS sont probablement dus à leurs biodisponibilités, leurs interactions et leurs effets maximaux sur l'espèce (*Crassostrea gigas*) utilisée pour nos analyses de la TGS.

## Abstract

Thirteen percent of domestic wastewater produced daily in Dakar is treated. In this work we have evaluated the global toxicity of sediments (TGS) around the Cape Verde peninsula. Eleven sites were selected and studied. The results show that all sites are toxic, and 73% present a high toxicity of their sediment, 9% have a medium toxicity and 18% a low toxicity. Mercury levels in sediments ( $Hg_s$ ) are low and there is variability between sites. In the water, high level of ETM, that have acute or chronic effects on aquatic life, is reported [Aluminium (Al), Cadmium (Cd), Chromium (Cr), Cobalt (Co), Copper (Cu), Mercury in water (Hg), Nickel Zinc (Zn)], except for Iron (Fe), Manganese (Mn). The average pollution factors (threshold: chronic effects - Canadian criteria 2013) rank the metals by decreasing level of pollution: Cu had the lead followed by Ni, Cr, Cd, Co, Al, Hg, Zn and the two last were below the threshold considered Mn and Fe. Metals are a hazardous group (persistent, bioaccumulative, biomagnifiable, toxic) and can have adverse effects on fish resources and human health. At high absorption, effects on the nervous system (e.g. Hg, Pb), renal lesions (e.g. Al, Cd); Haematosi s disturbances (Pb), reproductive and developmental effects (e.g. Cu), carcinogenic effects (Cr, Co, Ni, Pb) can be observed. Statistical analysis show positive (Cd / Co, Cd / Fe, Co / Fe, Fe / Ni) and negative correlations (Cu / Cd, Cu / Co, Cu / Fe, Cd /  $Hg_s$ , Cr / Ni, Fe /  $Hg_s$ , and Ni /  $Hg_s$ ) between the ETM. We report that only Cd, Cr, Zn and  $Hg_s$  have significant effects on TGS. Principal component analysis on the ETM characterizes the sites in relation to the ETM: Soumbédioune is distinguished by Cu; Cambérène by Co, Ni, Fe, and Cd; Hanni by  $Hg_s$  and Cr; Yoff Tonghor by Ni and Hg; The Port of Dakar by Cr, and Ngor by Zn and Mn. The low variability of TGS observed between sites is characteristic of the nature and intensity of pollution. Although low level in sediments was reported, the presence of mercury can be a risk for marine organism health through its methylation and bioaccumulation-biomagnification. Its variability between sites seems sensitive to physical factors as granulometry, turbidity and current. ETM water pollution can be attributed to aerosols, discharges from septic systems, industrial discharges, wastewater treatment systems, informal discharges from municipal waste dumps. The correlations observed between the ETM indicate that these elements tend to be in the same dissolved or particulate form (positive correlation) or to evolve in the opposite direction *i.e.* if one tends towards dissolved form, the other tends towards particulate form and vice versa (negative correlation). The significant effects of Cd, Cr, Zn and  $Hg_s$  on TGS are probably due to their bioavailability, their interactions and maximal effects on the species (*Crassostrea gigas*) used for the TGS tests.

## Introduction

Avec le développement industriel, surtout la démographie galopante, l'environnement connaît tous les jours d'intenses modifications. Ces modifications entraînent des perturbations sur l'ensemble des écosystèmes (interactions entre les écosystèmes, entre biotope et biocénose, et entre espèces). Le milieu marin, qui représente près de 71 % de la superficie terrestre, est sans doute le plus vulnérable. En effet, tous les déchets solides et liquides finissent dans les océans qui deviennent ainsi le réservoir de toute sorte de polluant qu'on peut imaginer. La pollution du milieu marin est caractérisée selon l'origine, la nature, la destination et l'effet des polluants dans le milieu. On a, ainsi, la pollution par les microorganismes, les matières organiques, les produits chimiques usuels, industrielle, les pétroles (hydrocarbures), radioactive, les microplastiques, pour les plus connues. L'impact de cette pollution dépend, essentiellement, de l'état physique et de la nature chimique des rejets (Soudan, 1968) et bien sûr des aspects quantitatifs de ces derniers.

Les principales causes de la dégradation de la biodiversité et des habitats côtiers dans l'ouest africain sont dues à la pollution, à l'érosion côtière et à la surexploitation des ressources halieutiques. L'urbanisation, le développement industriel et l'implantation des populations sur la côte entraînent la dégradation des zones côtières (Lindeboom, 2002). En cela s'ajoute l'exploitation des gisements de pétrole et de gaz dans certaines régions côtières (Abdelatif et coll., 2003) et dans un futur proche pour le Sénégal.

Contrairement aux autres pays de l'Afrique de l'Ouest, le Sénégal s'est doté avant l'indépendance d'un réseau d'assainissement collectif inspiré du modèle européen. Ce réseau d'évacuation était raccordé à 05 stations d'épuration de standard européen de l'époque. Mais le manque de moyens financiers pour la maintenance et le non-respect des normes de dimensionnement ont fait qu'une seule station, celle de Cambérène, est encore fonctionnelle. Cette station qui a une capacité de traitement de 9600 m<sup>3</sup> par jour ne répond pas aux attentes de la population en matière d'assainissement car elle ne traite que 13 % des eaux usées domestiques produites par jour à Dakar, sans compter les rejets non raccordés au système d'assainissement collectif. Les activités industrielles (*e.g.* minières, chimiques, métallurgiques, production de plastiques), les activités agricoles, la pêche et les déchets domestiques sont à l'origine d'une importante pollution de l'environnement marin et côtier au Sénégal (Diop et coll., 2012 ; Sané, 2014).

Cette étude vise, spécifiquement, à faire évaluer, sur la presqu'île du Cap-Vert, la toxicité globale des sédiments et à identifier les polluants (dans notre cas les Eléments Traces

Métalliques : ETM), potentiellement, impliqués dans cette toxicité. Ces paramètres sont déterminés ( $\alpha$ ) dans les sédiments : le mercure ( $Hg_s$ ), la granulométrie, le rapport C/N (Carbone/Azote) et ( $\beta$ ) dans les eaux : paramètres chimiques *i.e.* teneurs en métaux traces, *e.g.* Al, Cd, Cr, Co, Cu, Fe, Mn, Hg, Ni, Zn et certains paramètres physicochimiques : ammonium ( $NH_4^+$ ), Nitrates ( $NO_3^-$ ), Nitrite ( $NO_2^-$ ), Oxygène dissous, pH, Phosphate, Conductivité, Température, Turbidité, Salinité, ainsi que les Matières en suspension (MES). Les points de prélèvement choisis, situés à proximité de sorties des effluents à différents niveaux de débit, sont supposés pollués. La détermination des paramètres physicochimiques nous permet de mieux comprendre et nous facilite l'interprétation des résultats : *e.g.* la granulométrie apporte des renseignements sur la dynamique sédimentaire mais également sur la spéciation des polluants dans les sédiments, le rapport C/N donne des informations intéressantes sur l'origine et l'éventuelle transformation de la matière organique des sédiments marins, les MES et la turbidité sont fonction de la courantologie du milieu et la nature des effluents (dans le cas de notre étude) et influe particulièrement sur la transparence du milieu, la pénétration de la lumière et donc la photosynthèse des espèces aquatique végétales. L'oxygène dissous est un paramètre important car il intervient dans la majorité des réactions chimiques et biochimiques du milieu, il est nécessaire à la respiration des poissons et un bon indicateur de pollution parce qu'il renseigne sur l'autoépuration du milieu.

Le travail est réparti en 4 chapitres : le chapitre 1 fait l'état des lieux sur la pollution marine, le chapitre 2 présente les « Matériels et méthodes » utilisés, dans le chapitre 3 nous présentons les « Résultats » ensuite dans le chapitre 4 nous présentons notre « discussion » et enfin nous tirons les conclusions ainsi que quelques perspectives d'application au Sénégal qui peuvent être étendue à la sous-région.

## **1. Chapitre I : Pollution marine et côtière**

L'accroissement de la population, le développement industriel, la mauvaise gestion des déchets et le non-respect des réglementations environnementales font que la pollution marine est, aujourd'hui, observée au quotidien. Elle est devenue un problème majeur et touche tous les pays du monde, en particulier les pays en développement.

### **1.1. Définition de la pollution marine**

La pollution marine est définie comme: « *l'introduction par l'homme, directement ou indirectement, de substances ou d'énergie dans le milieu marin (y compris les estuaires) occasionnant des effets néfastes tels que des nuisances envers les ressources biologiques, des risques pour la santé de l'homme, des entraves aux activités maritimes (y compris la pêche), une altération de la qualité de l'eau de mer du point de vue de son utilisation et une dégradation des valeurs d'agrément* ». Selon la nature des polluants, on distingue trois (3) types de pollution : chimique, biologique et physique (Gesamp, 2010).

### **1.2. Etat de la pollution marine au Sénégal**

A notre connaissance, peu d'études ont été menées sur la pollution marine (Diop et coll, 2012) pour déterminer la qualité des quatre matrices (sédiment, eau, flore et faune) de ce milieu simultanément.

#### **1.2.1. Sédiment**

Le niveau de contamination des sédiments par les éléments traces métalliques a été étudié par Diop et coll. (2012) sur la côte de Dakar et Bodin et coll (2012). Diop et coll (2012) avaient pour objectif de déterminer les profils de concentration de 06 éléments traces métalliques (Cd, Cr, Cu, Co, Pb et Zn) des sédiments dans les zones présumées être contaminées par les rejets des eaux usées à Dakar et d'évaluer leur qualité en se basant sur les facteurs d'enrichissement 'FE'. Ceux-ci, souvent utilisés pour estimer la contamination des sédiments par des métaux traces, fournissent le nombre de fois qu'un élément est enrichi par rapport à sa concentration dans un matériau de référence, *i.e.* la teneur naturelle de cet élément dans les sédiments (Diop et coll 2012)). Les résultats obtenus montrent que les sites sont fortement contaminés en Cd (FE moyenne Cd = 23) et Pb (FE moyenne Pb = 86), faiblement enrichis pour les autres éléments traces métalliques par rapport aux valeurs de fonds géologiques produits par Kikouama et coll. (2009). Dans cette étude, la moyenne des FE de tous les éléments traces métalliques est supérieure à 1,5 ; suggérant l'origine anthropique des métaux dans les sédiments, si on se réfère à Zhang et Liu (2000).

Pour Zhang et Liu (2000), en effet, si  $0,05 \leq FE \leq 1,50$ , alors le métal dans les sédiments est d'origine naturelle alors que  $FE > 1,50$ , suggère plutôt une origine anthropique du métal.

Bodin et coll (2012), sur l'évaluation de la contamination métallique dans les mangroves du Sénégal, ont déterminé les niveaux de pollution des ETM (Al, Fe, Ag, Cd, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb and Zn) dans les sédiments du Sine Saloum (Dionewar, Niodor, Falia) et la Petite côte (Fadiouth). Les résultats obtenus dans les sédiments montrent que le site de Fadiouth est très pollué en Cd, Hg et Ni par rapport à ceux du Sine Saloum. Du point de vue écotoxicologique, ces concentrations sont inférieures à la limite-seuil des effets faibles « ERL » de la directive suivante : « Sediments Quality Guideline (SQGs) » (Donald, 1996).

### 1.2.2. Eau

La pollution sur la colonne d'eau a été étudiée, sur la côte de Dakar et l'estuaire de Saint Louis (Nord su Sénégal) par Diop et coll. (2014), sur la Baie de Hann par Arfi (Com. Pers. 2017). Diop et coll avait pour objectif de faire le point sur le niveau de contamination des éléments traces en déterminant leur spéciation. Les paramètres comme le pH, la température ( $T^\circ$ ), la conductivité électrique (CE), le potentiel redox (Eh), l'oxygène dissous (OD) et la salinité ont été déterminés *in situ*. Les autres paramètres ont été mesurés au laboratoire : carbone organique dissous, chlorures, fluorures dissous, nitrates, sulfates et phosphates. Les résultats sur les caractéristiques physicochimiques ont montré que certains anions présentent une variation saisonnière (e.g. les concentrations de chlorures  $Cl^-$  et les sulfates  $SO_4^{2-}$  ont baissé en saison chaude et humide à cause de la dilution de la colonne d'eau due à l'écoulement des rivières) les concentrations du carbone organique dissous diminuent pendant la saison sèche puis augmentent pendant la saison humide dans tous les sites (Diop et coll 2014). Les résultats sur les métaux traces ont montré que la contamination de l'estuaire de Saint-Louis était plus importante que celle de la côte de Dakar pour le Co ( $0,36 \mu g l^{-1}$ ), le Cr ( $3,61 \mu g l^{-1}$ ), le Ni ( $2,26 \mu g l^{-1}$ ), le Pb ( $1,72 \mu g l^{-1}$ ) et le Zn ( $33,14 \mu g l^{-1}$ ). Par contre la contamination au Cd et au Cu était plus élevée à Dakar qu'à Saint-Louis avec des valeurs moyennes suivantes : Cd ( $0,27 \mu g l^{-1}$ ) et Cu ( $4,33 \mu g l^{-1}$ ). La spéciation des métaux montre que le Cr est lié de 78 à 96 % avec la fraction particulaire et que le Zn est principalement dans la fraction dissoute aussi bien pour la côte de Dakar et que pour Saint-Louis. Une variation saisonnière a été observée pour le Cd et le Ni qui ont une fraction particulaire plus élevée pendant la saison sèche et fraîche. Par contre, le Co, le Cu, le Mn et le Pb ne montrent pas de variabilité claire. Ainsi, les métaux sont classés par ordre décroissant suivant le pourcentage de la fraction dissoute : Zn (82 %) > Cd (70 %) > Ni (61 %) > Pb (48 %) > Mn (45 %) = Cu (45 %) > Co (42 %) > Cr (14 %). Dans l'ensemble,

la fraction organique est variable (10 – 90 %) en fonction de la colonne d'eau (la fraction organique est plus élevée sur la côte de Dakar que dans l'estuaire de Saint-Louis) et de la saison (la fraction organique est plus élevée pendant la saison des pluies que la saison sèche). Dans leur étude, Diop et coll. (2014) ont montré que la mobilité des métaux est contrôlée par le carbone organique dissous (estuaire de Saint-Louis) et par les chlorures (eau de mer : côte de Dakar). Arfi Robert de l'IRD (*Com. Pers.* 2017) a étudié la qualité des eaux d'une baie fortement anthropisée, la baie de Hann, afin de dégager les causes et les conséquences de la pollution observée in situ. Selon l'auteur, les causes sont d'origine naturelles (courantologie régionale, topographie locale) et artificielles (activités domestiques et industrielles produites sans contrôle ni contraintes). A cela, il ajoute le développement excessif des ulves (algues vertes appelées *Ulva lactuca*) dans cette zone lorsque les conditions sont favorables. Ce qui occasionne l'enrichissement en nutriments (par l'upwelling, mort des ulves qui produisent de la matière organique), l'accumulation des polluants dans les sédiments et dans la matière vivante

### 1.2.3. Flore et Faune

La contamination de la faune et la flore par les métaux traces a été étudiée par Diop (1997) au niveau des côtes sénégalaises, par Diop et coll. (2015 ; 2016) le long de la côte sénégalaise, par Bodin et coll (2012) au niveau du Sine Saloum (Dionewar, Niodor, Falia) et de la Petite Cote (Fadiouth) et par Le Croizier et coll (2016) au niveau de Dakar (Baie Hann) et Ziguinchor (Estuaire de la rivière Casamance) durant la campagne du projet AWA 2014. Diop (1997) a déterminé le mercure dans les seiches et les poulpes pêchés entre 1995 et 1997. Les résultats obtenus lors de son étude montraient que les teneurs en mercure étaient en deçà des normes internationales tolérées avec une moyenne de 0,05708 mg Kg<sup>-1</sup> de produits. Par comparaison entre les espèces, Diop conclut que les poulpes contenaient plus de mercure que les seiches. L'auteur a également observé qu'en 1915, les teneurs en mercure sont significativement plus élevées que celles de 1996 d'une part et de 1997 d'autre part et il note une différence non significative entre 1996 et 1997. Pour Diop et coll (2015), les objectifs de leurs études étaient d'évaluer l'état de contamination des éléments traces métalliques (As, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Se/Sélénium, V/Vanadium et Zn) dans les tissus de cinq espèces marines de différents niveaux trophiques, d'importance commerciale et/ou pertinente pour la santé humaine. Ces espèces, représentatives des eaux côtières sénégalaises peu profondes, sont les suivantes : algue vertes (*Ulva lactuca*), moule brune (*Perna perna*), la crevette (*Penaeus kerathurus*), mullet à tête plate (*Mugil cephalus*) et tilapia (*Sarotherodon melanotheron*). En 2016, leur travail consistait à évaluer l'état de contamination de ces mêmes éléments métalliques dans deux

espèces de poissons (*Sardinella aurita* et *Solea senegalensis*). En ce qui concerne les moules et les crevettes, l'étude a été portée sur les tissus musculaires et pour les poissons sur le foie. Diop et coll. (2015) avaient déterminé également les facteurs de transfert (FT) pour l'eau et les sédiments. Ces études ont montré que le fer est l'élément le plus accumulé dans les algues avec 91 % de la concentration totale des métaux mesurés, le fer et le zinc représentent 94 % de la concentration totale des métaux dans les tissus musculaires des moules et le zinc 60 % dans les crevettes. Pour les deux espèces de poisson (*M. cephalus* et *S. melanotheron*), le fer et le cuivre étaient les éléments les plus accumulés avec une représentativité de 94 %. Il n'y avait aucune tendance saisonnière sauf pour un site dont certains éléments avaient des valeurs plus élevées pour certaines espèces pendant la saison des pluies. Le Site de Joal était moins contaminé que les autres. Pour les espèces étudiées en 2016 (*S. aurita* et *S. senegalensis*), les éléments analysés sont classés par ordre de concentrations décroissantes : Fe > Zn > Cu > As > Se > Mn > Cd > Cr > V > Ni > Pb. Diop et coll. (2016) ont constaté que les concentrations de Fe, Cd et Pb étaient plus élevées dans la sardinelle alors que celles de As, Cu, Mn, Cr et Se dans la sole. Les différences saisonnières ont été observées pour certains éléments. Pour la sardinelle, les concentrations d'As, Se et V étaient plus élevées pendant la saison sèche alors que celles de Cd et Zn pendant la saison humide. Pour la sole, les concentrations de Mn, V et Zn étaient plus élevées au cours de la saison des pluies alors celle du Cr à la saison sèche. Des différences de concentrations des éléments ont été notées entre les poissons des cinq sites. Elles concernent principalement Saint-Louis et Soubédioune dont pour la plupart des éléments (sauf l'As) les concentrations étaient plus élevées à Soubédioune (en particulier pendant la saison sèche) et plus faible à Joal. Les résultats ont montré, également, que les concentrations de Cd et Pd dans la sardinelle ronde et dans la sole ne dépassent pas les limites fixées par la commission européenne (CE, 2014, 2015) et ne posent pas de menace pour la santé publique. Par contre les concentrations en As dans le foie et dans les muscles de la sardinelle sont élevées mais il n'y avait pas de réglementation européenne qui fournit une limite légale pour les viscères. Bodin et coll (2012), sur l'évaluation de la contamination métallique dans les mangroves du Sénégal, montrent que les concentrations des métaux dans les coquillages des mollusques sont plus fortes que celles trouvées dans les sédiments, sauf pour le Ni et le Pb. Les concentrations du Cd présentent des préoccupations sur la comestibilité et la commercialisation des mollusques. Le Croizier et coll (2016) avaient pour objectif de déterminer la répartition de métaux entre les espèces de réseaux trophiques différents. Dans cette étude, treize (13) éléments traces métalliques (As, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Li/Lithium, Mn, Ni, Pb, Sn/Etain, U/Uranium et Zn) ont été quantifiés dans le foie des poissons classés en trois (03) groupes selon la quantité des acides

gras dans le foie et des isotopes stables dans les muscles. Les résultats obtenus montrent que dans les zones exposées à la pollution métallique, les espèces pélagiques représentent le premier groupe de poissons contaminés par la pollution métallique et les espèces benthiques constituent la principale voie de transfert de métaux entre les poissons. La contamination des espèces pélagiques est liée à la production primaire (micro, pico et nanoplancton), et suggère que le microplancton affiche une plus importante contribution à la contamination que les pico et les nanoplanctons.

## **2. Chapitre II : Matériels et méthodes**

### **2.1. Cadre de l'étude**

Situé entre 12°80 et 16°41 N et 11°21 et 17°32 O, le Sénégal est un pays de l'Afrique de l'Ouest dont la côte (y compris la zone maritime commune/ ZMC entre le Sénégal et la Guinée) représente la partie la plus occidentale du continent (Sané, 2014) avec une longueur d'environ 715 km (*Com. Pers.* 2017). Cette côte est constituée de deux (02) grands ensembles dont les caractéristiques géomorphologiques, sédimentologiques et hydrologiques sont très différentes et qui sont séparés par la presqu'île du Cap-Vert : la grande côte au nord (Saint-Louis à Dakar) et la petite côte au sud (Dakar à la Gambie). Au Sénégal, le climat est caractérisé par deux saisons : une saison sèche, fraîche de novembre à mars et chaude d'avril à mai et une saison pluvieuse de juin à octobre (Auger et coll 2016). La presqu'île du Cap-Vert est essentiellement rocheuse. Le pied des falaises est constitué de matériels volcaniques basaltiques alors que leur partie supérieure est entassée de blocs latéritiques. Les entrants de la côte sont souvent occupés par des petites plages formées de sables grossiers (Domain, 1977). On observe une alternance des Alizés (hiver : décembre - mai) et de la Mousson (été : juillet - octobre) sur la côte du Sénégal. Les Alizés entraînent le courant des canaries qui apportent les eaux froides et riches en nutriments (azote et phosphore) (Auger et al 2016), c'est l'upwelling alors que la Mousson donne le contre-courant équatorial qui amène les eaux océaniques chaudes et pauvres en nutriment (Robert Arfi, *Com Pers* IRD). La topographie peut jouer un rôle très important sur l'upwelling. On observe ainsi un upwelling strictement côtier au nord de la presqu'île du Cap-Vert alors qu'au sud, il est maximal au large à la limite du plateau continental (Rebert, 1982 ; Ndoye et al. 2014). L'Anse de Bel Air et la digue de BIMA (Bataillon d'Infanterie de Marine) forment un obstacle à l'écoulement de la veine de courant qui longe les isobathes et favorisent l'isolement de la bande côtière au niveau de la baie de Hann (baie de Hann = une cellule isolée) (Robert Arfi, *Com Pers* IRD). La côte sénégalaise a des activités portuaires (surtout le port de Dakar qui est international), touristiques, et surtout de pêche, mais aussi concentre plus de 60

% de la population. La région de Dakar qui représente 0,3 % de la superficie du pays (Ba et coll., 2011) et 23 % de la population nationale (ANSD, 2013), regroupe le plus grand nombre d'industries (70 %) : *e.g.* les industries agroalimentaires, les manufactures du tabac, les cimenteries, les industries énergétiques, les industries de poisson, les savonneries. (Ba et coll., 2011). Vu sa population et son industrialisation, la région de Dakar subit de très fortes activités anthropiques. Malgré tout, Dakar ne dispose que d'une seule station d'épuration fonctionnelle avec un réseau d'évacuation de 623 km tandis que 70 % des effluents rejetés dans la mer sont d'origine industrielle et peuvent contenir divers polluants : *e.g.* les ETM, les colorants, les polluants organiques. Ce qui se traduit par une dégradation du milieu aquatique (Diop et coll., 2012).

Notre étude a été réalisée sur la presqu'île de Dakar, de Cambérène (Station 1) au Port Autonome de Dakar (Station 11), en passant par Yoff Tonghor (Station 2), Ngor (Station 3), Almadies Vivier (Station 4), Ouakam (Station 5), l'Île de la Madeleine (Station 6), Soubédioune *i.e.* dit Sortie du canal 4 (Station 7), Dakar le Dantec (Station 8), Hann1 (Station 9) et Hann2 (Station 10). La Figure 1 ci-dessous montre les différents points de prélèvement et la trajectoire parcourue.



Figure 1 : Carte des sites d'échantillonnage montrant la position des effluents (rouge) et (jaune) les points de prélèvement autour de la presqu'île du Cap Vert.

## 2.2. Choix des sites

Le choix des sites de prélèvement a été basé sur leur contamination potentielle par les déchets liquides domestiques et/ou industriels. Ces sites correspondent à des sorties d'effluents identifiés (Tableau 1).

### 2.3. Mode d'échantillonnage des sédiments marins et des eaux marines

La campagne de prélèvement a été effectuée le 1<sup>er</sup> juin 2016 à bord d'un hors-bord de TTSM (Tout Travaux Sous-Marins). Le prélèvement des sédiments a été réalisé avec une benne à sédiment. Environ 300 à 600 g de sédiments des trois (3) premiers centimètres ont été prélevés. Les échantillons ont été conservés dans des flacons en polyéthylène de 250 ml puis stockés au frais (4°C) jusqu'aux analyses. Pour les ETM, les prélèvements ont été effectués en surface (5 premiers centimètres) avec les flacons en polyéthylène (bouteilles de prélèvement). Les échantillons ont été transvasés dans des flacons en polyéthylène de 250 ml (bouteilles de conservation) dans lesquels, nous avons mis 0,5 ml d'acide nitrique (HNO<sub>3</sub>) concentré (0,2 % v/v, qualité ultra trace) pour ramener le pH à 2. Ces bouteilles de conservation sont placées dans des sacs stériles en plastique à fermeture métallique puis stockés au réfrigérateur (entre 0 et +5 °C) pour éviter toute contamination extérieure et ralentir toute réaction physico-chimique possible (Rodier et coll., 2009).

**Tableau 1: Différents sites de prélèvement, leurs coordonnées GPS et leurs sources de pollution potentielles ainsi que les débits estimés des effluent.**

Noms des sites	Coordonnées GPS	Description du type de sources de pollution	Débit
Cambérène	14.771338N, -17.431724W	Rejets des eaux usées traitées (Sané, 2014)	Fort
Yoff Tonghor	14.766937N, -17.478672W	Rejets des eaux usées, Fortes activités anthropiques (pêches)	moyen
Ngor	14.748700N, -17.520144W	Rejets d'eaux usées (canal)	Moyen
Vivier	14.738355N, -17.519112W	Rejets d'eaux usées domestiques	Très faible
Ouakam	14.713744N, -17.491012W	Rejets d'eaux usées	Faible
Ile de la Madeleine	14.653854N, -17.468710W	Épave (bateau) Absence de rejet d'eaux	Nul
Soumbédioune	14.677953N, -17.460680W	Importante décharge des eaux usées urbaines non traitées (Sané, 2014)	Fort
Dantec	14.654729N, -17.438689W	Sorties des eaux usées domestiques et médicales	Moyen
Hann1	14.714914N, -17.430293W	Mixte eaux usées urbaines et industrielles rejetées directement, emplacement près du port de Dakar (Sané, 2014). Hann1 proximité directe canal	Fort
Hann2	14.730725N, -17.417036W		Fort
Port	14.678542N, -17.420338W	Rejets de produits chimiques (traitement des minerais dans le Port : Cd) (Diop et coll, 2014)	Fort

Pour les paramètres physicochimiques, les prélèvements ont été effectués avec des flacons propres en polyéthylène. Les échantillons ont été conservés dans les flacons en polyéthylène de 250 ml dans lesquels on a mis 0,5 ml d'acide sulfurique concentré pour ramener le pH à 2.

Ensuite, ces flacons sont stockés à 4 °C jusqu'aux analyses (dans les 72 heures). Les flacons utilisés pour le Phosphate ont été lavés à l'acide chlorhydrique au ½ hydraté (HCl, ½ H<sub>2</sub>O) et rincés à l'eau déionisée (Hach Company, 2009).

## 2.4. Techniques analytiques

### 2.4.1. Cas des sédiments

#### 2.4.1.1. Granulométrie

L'objectif est de connaître les différentes tailles de particules qui constituent les sédiments suivant 5 classes (définition granulométrique selon VNF : Voie Navigable de France) : argiles (< 2 µm), limons fins 'Lf' (2 µm < Lf < 20 µm), limons grossiers 'Lg' (20 µm < Lg < 50 µm), sables fins 'Sf' (50 µm < Sf < 200 µm), et sables grossiers 'Sg' (200 µm < Sg < 2000 µm) (INERIS, 2010).

Son principe est d'abord de détruire la matière organique, de désagréger les ciments organo-minéraux et de disperser le sédiment en allonge ; puis, en appliquant la loi des stocks (vitesse différentielle de sédimentations) et à l'aide de la pipette de Robinson, de déterminer les fractions d'argiles et de limons fins et ensuite de déterminer les fractions de limons grossiers, de sables fins et de sables grossiers par tamisage.

Dans un bécher de 1000 ml, on met exactement 10 g de sédiments humectés avec de l'eau déminéralisée et on y ajoute 50 ml d'eau oxygénée diluée à 30 % qui détruit la matière organique et pour une destruction complète on fait une attaque à chaud sur plaque chauffante à 150 °C pendant 01<sup>h</sup>00. 25 ml de solution de pyrophosphate de sodium ont été ajoutés et le mélange est agité pendant 02<sup>h</sup>00 avant d'être mis dans les allonges.

✓ Argiles et limons fins

La température du blanc permet de connaître le temps d'attente des argiles et des limons fins avant les prélèvements en fonction du tableau qui donne le temps de chute des argiles et limons fins pour une profondeur de 10 cm (Annexe 1 ; Tableau 4). Le prélèvement se fait à l'aide d'une pipette de Robinson. Verser dans une capsule tarée et faut mettre à sécher dans une étuve à 105 °C. Après séchage, on mesure les masses M<sub>al</sub> (masse argiles et limons fins) et M<sub>a</sub> (masse argiles). Les pourcentages d'argiles et de limons fins sont déterminés par les calculs suivants :

$$\% \text{ Argiles} = (M_a - T_a - T) * 10000 * F_h / \text{Vol}$$

$$\% \text{ Limon fins} = (M_{al} - T_{al} - (m_a - T_a)) * 10000 * F_h / \text{Vol}$$

Avec,  $T_a$  : masse de la tare d'argile (mg) ;  $T$  : masse moyenne de la tare pyrophosphate de sodium (mg) ;  $T_{al}$  : masse de la tare d'argile et limons fins (mg) ;  $F_h$  : facteur d'humidité ;  $Vol$  : volume de la pipette de Robinson (ml).

✓ Limons grossiers et sable

On aspire le surnageant avec une pompe à vide et on ajoute 10 cl d'eau contenant un peu de pyrophosphate de sodium (un dispersant). On agite et attend 04 minutes pour aspirer à nouveau l'eau. L'opération est répétée jusqu'à avoir une eau claire. L'échantillon est ensuite transvasé dans un petit creuset en porcelaine puis séché à l'étuve à 105°C. Après séchage, la masse  $M_s$  (masse total sable + limons grossiers) est mesurée et l'échantillon est passé au tamis de 200  $\mu m$  puis de 50  $\mu m$ . Les masses de sables fins ( $M_{sf}$ ) et grossiers ( $M_{sg}$ ) sont mesurées. Les pourcentages des fractions de limons grossiers, sables fins et sables sont donnés par les relations suivantes :

$$\% \text{ Limons grossier} : (M_s - M_{sg} - M_{sf}) * 10 * F_h$$

$$\% \text{ Sables fins} : M_{sf} * 10 * F_h$$

$$\% \text{ Sables grossiers} : M_{sg} * 10 * F_h$$

Avec  $M_s$  = Masse de sable ;  $M_{sg}$  = Masse de sable grossier ;  $M_{sf}$  = Masse de sable fin ;  $F_h$  = facteur d'humidité.

#### 2.4.1.2. Rapport Carbone et Azote

La quantification du carbone et de l'azote a été effectuée par l'auto analyseur CHN EA 1112 Termo Finnigan. L'objectif est de connaître la concentration en carbone et en azote dans les sédiments qui apporte de multiples renseignements sur la disponibilité de l'azote pour les organismes, la biodisponibilité et la toxicité des substances organiques non polaires pour les espèces benthiques. Basée sur le principe de la méthode de DUMAS, l'échantillon contenu dans une petite capsule d'étain est introduit automatiquement dans un réacteur constitué d'un tube vertical en quartz maintenu en 900 °C dans lequel circule en continu un gaz vecteur (Hélium N50). A l'introduction de l'échantillon, le courant d'hélium est enrichi par une quantité d'oxygène pur, provoquant ainsi une combustion flash. Les gaz de combustion, entraînés par le courant d'hélium passent sur un catalyseur d'oxydes de cobalt et d'oxyde de chrome. A ce stade, les gaz obtenus sont sous forme :  $CO_2$ ,  $H_2O$ ,  $N_xO_y$ . Ces gaz passent sur un deuxième catalyseur à 750 °C constitué de cuivre qui réduit les oxydes d'azote et retient les excédents d'hydrogène. A la sortie de ce catalyseur, il ne reste que  $N_2$ ,  $CO_2$ , et  $H_2O$ . L'eau sera piégée par le perchlorate de magnésium anhydre lors du passage des gaz. Les gaz  $N_2$  et  $CO_2$  sont ensuite

séparés sur une colonne de chromatographie en phase gazeuse et quantifiés au moyen d'un détecteur de type catharomètre (conductivité thermique). Les signaux produits par l'analyseur sont convertis en une série de valeurs numériques. Le logiciel EAGER Xperience1 permet l'acquisition, le traitement, le stockage des données ainsi que l'enregistrement automatique des pesées réalisées au moyen d'une balance Sartorius CUBIS MSE125 connectée à l'auto analyseur.

#### **2.4.1.3. Quantification du mercure dans les sédiments (Hg<sub>s</sub>)**

Direct Mercury analyzer (Analyseur automatique du mercure, type DMA-80) est un appareil qui permet de déterminer la teneur du mercure dans les échantillons liquides ou solides sans prétraitement préalable. Il s'applique sur les basses teneurs allant de 0 à 1000 ng de Hg réparties en trois (3) gammes qui correspondent aux trois cellules de lecture : Cuvette 1 : 0-10 ng, Cuvette 2 : 10-20 ng et Cuvette 3 : 20-1000 ng.

Le principe est de prélever 0,1 g d'échantillon avec les bateaux (petits récipients en forme de bateau adaptés au dispositif au DMA-80) et de les introduire dans le passeur automatique de l'appareil. Ce dernier conduit les échantillons dans le four à combustion où ils subissent d'abord un séchage grâce à un flux continu d'oxygène (4 bar de pression) puis une combustion. Les produits de combustion sont envoyés par le flux d'oxygène dans le four catalytique où ils sont décomposés à 750 °C. Les halogénures et les oxydes sont piégés dans ce four et le reste passe dans l'amalgamateur qui piège sélectivement à son tour le mercure et le restant des produits de combustion est évacué à la sortie par l'oxygène. L'amalgamateur est rapidement chauffé à 900 °C, désorbant ainsi la vapeur de mercure vers les cellules de mesures (qui donnent les quantités de mercure) où la hauteur du pic d'absorbance est mesurée en 253,7 nm. Les valeurs affichées (qui correspondent à 0,1 g d'échantillon) sont rapportées à 1 kg d'échantillon en appliquant le calcul de la règle de trois.

#### **2.4.1.4. Toxicité globale des sédiments marins par la méthode ANFOR XP-T-90-382**

La méthode AFNOR XP-T-90-382, portée par différente publication, *e.g.* Brehmer et coll. 2011, 2013, décrit un test utilisant le développement embryo-larvaire de bivalves marins comme outil d'évaluation de la toxicité potentiel d'une substance ou d'un échantillon aqueux. Cet essai s'applique pour les salinités comprises entre 20 et 40 psu pour les moules, 25 et 35 psu pour les huîtres et permet de déterminer les concentrations induisant une anomalie du développement embryo-larvaire. Cette méthode est applicable : i) aux substances et préparations chimiques ; ii) aux eaux marines et estuariennes ; iii) aux cours d'eau et aux

effluents aqueux (urbains, agricoles, industriels) sous réserve d'ajuster la salinité et/ou de limiter la dilution afin de respecter les gammes de salinités définies ci-dessus ; iv) et aux extraits aqueux de sédiments et de produits pétroliers (Afnor, 2009).

Le principe de cette méthode est de mettre dans l'eau reconnue non toxique (eau de référence prise au large de l'océan) les sédiments à analyser puis d'agiter. Les œufs d'huîtres creuses (*Crassostrea gigas*) fraîchement fécondés sont mis dans le surnageant (élutriat) à différentes concentrations. Les anomalies de développement larvaire sont alors notées, permettant ainsi d'établir la relation entre l'effet toxique mesuré et la concentration en élutriat (c'est-à-dire la concentration du sédiment).

Pour le test de développement larvaire, le choix porté sur l'huître creuse du Pacifique *Crassostrea gigas* (Annexe 8 et Figure 13) est basé sur le fait que les analyses de toxicité globale des sédiments ont été faites en France et que cette espèce y est cultivée. Ce bivalve est très sensible aux polluants et a un développement larvaire très rapide. Soixante (60) g de chaque échantillon est mélangé avec 240 ml d'eau de référence filtrée et agité pendant 08 h et décanté pendant 08 h. Les microplaques de cultures stériles IWAKI à puits de 03 ml sont remplies avec le surnageant (élutriat). Pour chaque échantillon, 05 cuves formant les réplicats sont remplies et les cuves témoins (0 %) sont remplies par l'eau de mer filtrée. Trois cent (300) larves sont alors introduites dans chaque cuve et les plaques sont mises en développement dans une enceinte thermo régulée à 23 °C ± 1 °C pendant 24h. Après incubation, les larves sont fixées au formaldéhyde 40 %. Celles-ci décantent et le comptage sous microscope de 100 larves (comptage aléatoires sur les 300 inoculées) par cuves permet d'en tirer le taux d'anomalies. La détermination de ces taux dépend fortement des définitions des larves au stade D (développement) normales et des larves anormales. Les larves considérées normales sont définies exhaustivement par les deux valves de la coquilles formant un D parfait, associées à un vélum (massa de chair du futur manteau) parfaitement en place. Toutes les autres formes de larves sont considérées comme anormales. Seuls les pourcentages d'anomalies mesurés pour une concentration maximum en élutriat (P 100 %) et pour le témoin (P 0 %) sont pris en compte dans les calculs.

$$PNA = \frac{PBA \text{ essai} - PBA \text{ témoin}}{100 - PBA \text{ témoin}} * 100$$

Avec : PBA : pourcentage brut (comptage) d'anomalies larvaires observées, PNA (pourcentage net d'anomalies larvaires) correspond au taux d'anomalies maximum mesuré corrigé du taux d'anomalies mesuré dans le témoin.

Pour bien départager les sites par leurs toxicités, on répète la manipulation en diluant les échantillons jusqu'à la classification complète des sites.

Ce mode d'expression de la toxicité permet la mise en relation des données, toutes exprimées dans la même unité (% anomalies).

## **2.4.2. Cas des eaux marines**

### **2.4.2.1. Paramètres physico-chimiques**

A part les matières en suspension (MES), les paramètres physicochimiques ont été mesurés par le photomètre Hanna 83203 selon les méthodes suivantes : la méthode Nessler (Azote ammonium), la méthode de réduction au cadmium (Nitrate – azote), la méthode diazotation (Nitrite – azote), la détermination colorimétrique au rouge de phénol (pH), la méthode amino-acide pour les concentrations fortes (jusqu'à 30 mg l<sup>-1</sup>) et la méthode d'acide ascorbique (Phosphate) et par la sonde Hanna 9829 qui donne directement les valeurs de la température, de l'oxygène dissous, de la salinité, de la turbidité et du potentiel d'oxydoréduction.

L'analyse du photomètre Hanna 83203 est basée sur la possibilité de développer une absorbance spécifique d'un élément à partir de la réaction entre l'échantillon à doser et les réactifs spécifiques à l'élément. Une lumière d'intensité  $I_0$  émise par la lampe de tungstène traverse la cuvette de diamètre  $d$ , contenant l'échantillon et le réactif spécifique. A la sortie de la cuvette, la lumière d'intensité  $I$  non absorbée est filtrée puis arrive au niveau du détecteur qui la convertit en courant électrique produisant ainsi un potentiel en mV. Le microprocesseur convertit à son tour ce potentiel en une valeur sur l'écran du photomètre.

Au laboratoire, les MES sont mesurées de la manière suivante : 100 ml d'échantillon prélevé est centrifugé, le surnageant est retiré et le résidu séché à l'étuve à 60 °C pendant une nuit. Le contenu est encore séché dans un dessiccateur puis pesé à l'aide d'une balance de précision. Le calcul des MES est fait comme suit :

$$\text{MES (mg/l)} = \frac{M_f - M_i}{V} * 1000$$

Avec  $M_i$  (mg) : masse initiale (masse du flacon vide) ;  $M_f$  (mg) : masse finale (masse du flacon après séchage à l'étuve ;  $V$  (ml) : volume prélevé de la solution à analyser.

### **2.4.2.2. Eléments Traces Métalliques (ETM)**

Les ETM ont été dosés par spectrométrie d'absorption atomique de type VARIAN sauf le mercure qui a été dosé par Direct Mercury Analyzer (DMA-80).

## Spectrométrie d'Absorption Atomique (SAA).

Lorsqu'un atome est à l'état fondamental, le niveau d'énergie de ses électrons périphériques est stable : l'orbitale décrite par ceux-ci reste stationnaire. Lorsque l'on apporte une certaine énergie à un tel atome, sous forme thermique ou lumineuse, l'orbitale des électrons périphérique change de niveau pour passer à un niveau supérieur ; l'atome récupère donc temporairement cette énergie et passe à l'état excité. A cet état instable, l'atome libère rapidement cette énergie sous forme d'une radiation lumineuse à une longueur d'onde  $\lambda$  parfaitement définie, dépendant de la nature de l'atome et du niveau d'énergie de la transition. Le niveau d'énergie fournissant de telles transitions dépend des lois de la mécanique quantique. Les phénomènes d'absorption et de démission sont donc liés ; chaque fois qu'un atome absorbe de l'énergie, il la restitue sous la forme d'une raie d'émission.

La source de radiation caractéristique de l'élément à doser, d'intensité initiale  $I_0$ , est focalisée dans le nuage d'atomes formés dans un atomiseur par les éléments présents dans l'échantillon ou l'étalon introduit dans l'atomiseur ; le rayonnement  $I_t$  (énergie transmise) est ensuite envoyé dans le monochromateur afin d'isoler la radiation de sensibilité souhaitée, le détecteur quantifie ensuite le niveau d'énergie  $I_t$  en fonction du temps.

Il existe une relation entre la quantité de l'énergie absorbée ou émise et la concentration des atomes de l'élément concerné dans un tel atomiseur. Cela va nous permettre de faire le calcul des concentrations des métaux : c'est la loi de BÉER-LAMBERT.

$$A = \log (I_0/I_t) = a * b * c$$

Avec:  $A$  = absorbance ;  $I_0$  = intensité lumineuse incidente ;  $I_t$  = intensité lumineuse transmise ;  $a$  = absorptivité ou coefficient d'extinction molaire ( $l \text{ mol}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ ) ;  $b$  = trajet optique (cm) ;  $c$  = concentration de la solution ( $\text{mol l}^{-1}$ ).

Les échantillons déjà filtrés sont lus au spectromètre d'absorption atomique de type VARIAN 220 FS avec comme blanc un échantillon d'eau minérale. Seul le point haut de la gamme étalon est préparé à partir d'une solution prête à l'emploi de  $1 \text{ g l}^{-1}$ . Le choix de la concentration de ce point haut est sélectionné en fonction de la teneur en élément recherché dans les échantillons. L'appareil, relié à l'ordinateur, donne directement les concentrations des ETM de l'échantillon dilué sur une feuille Excel. La concentration en ETM est calculée suivant la formule ci-dessous :

$$\text{Concentration (mg l}^{-1}\text{)} = \text{CONC} * \text{DIL}$$

Avec CONC : concentration en ETM de l'échantillon dilué et DIL : facteur de dilution.

L'analyse du mercure dans les eaux par Direct Mercury Analyzer (MDA-80) est faite de même façon que dans les sédiments (voir plus haut en 2.4.1.3).

### **2.4.3. Analyses statistiques**

Le lien entre la TGS et les ETM a été mis en évidence par les méthodes statistiques suivantes : la matrice de corrélation qui permet de voir est-ce que deux (2) variables évoluent dans le même sens, dans le sens contraire ou dans aucun des deux mais elle n'entraîne pas la causalité entre les variables, la régression linéaire multiple permet de savoir les variables qui ont un effet significatif et qui entraînent une causalité avec la variable à expliquer et l'analyse des composantes principales (ACP) permet de caractériser les sites par rapport aux ETM.

## **3. Chapitre III: Résultats**

Dans notre étude, deux matrices du milieu marin ont été étudiées : celle des sédiments et celle de l'eau.

### **3.1. Sédiments**

Dans les sédiments, les paramètres qui ont été déterminés sont la granulométrie, les teneurs en carbone total, en azote total et en mercure ainsi que la toxicité globale des sédiments (Annexe 2 ; Tableau 5).

#### **3.1.1. Paramètres physiques**

L'analyse granulométrique montre une prédominance (i) de sables fins au niveau des sites d'étude (Cambérène : 96 % ; Yoff Tonghor : 91 % ; Hann1 : 89 % ; Soubédioune : 68 % ; Dakar le Dantec : 53 % et Hann2 : 43 %) avec un minimum de 0,1 % à Ngor, et (ii) de sables grossiers (Ile de la Madeleine : 96 % ; Ngor : 96 % ; Ouakam : 85 % ; et Almadies-Vivier : 66 %) avec un minimum de 2 % à Cambérène. Les fractions très fines sont en proportion très faibles dans tous les sites sauf Hann1 et Hann2 qui présentent des pourcentages de 3 % (Hann1) et 7 % (Hann2) d'argiles ; 1 % (Hann1) et 3 % (Hann2) de limons fins et 4 % (Hann1) et 12 % (Hann2) de limons grossiers. Les sites présentent une forte variabilité pour les deux fractions dominantes (sables fins et sables grossiers) qui sont inversement proportionnelles (Figure 2a et Figure 2b).

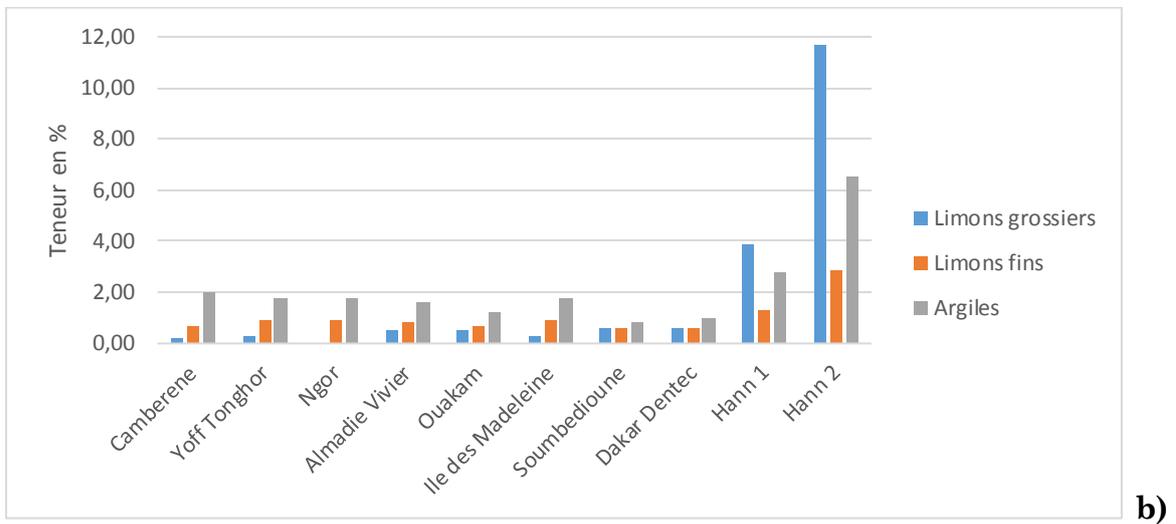
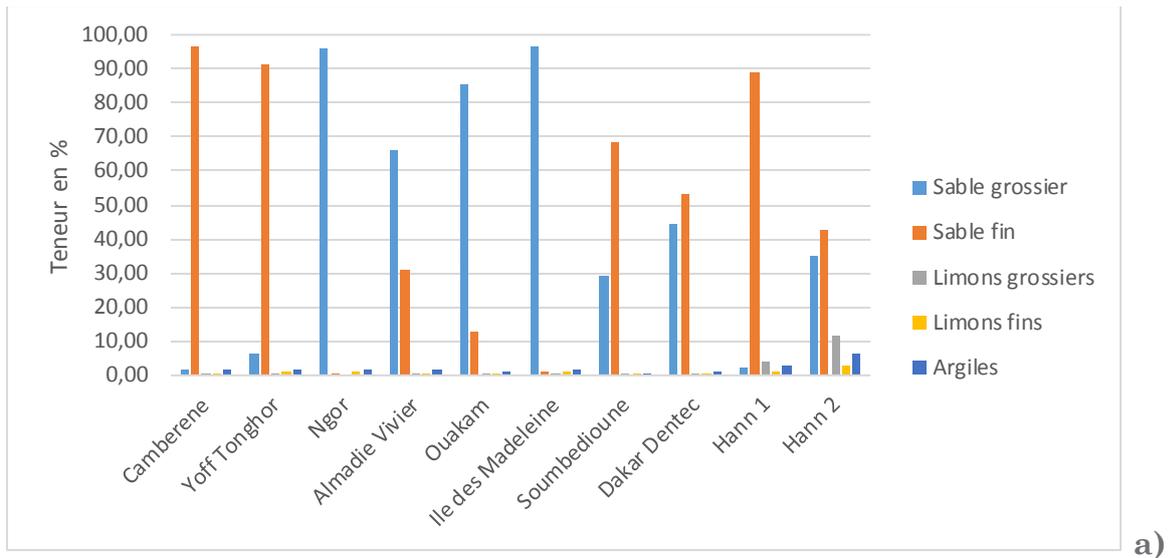


Figure 2 : Granulométrie ; % d'argiles, de limons fins et grossiers et sable fins et grossiers (a) et % d'argiles, limons fins et limons grossiers (b) dans les sédiments marins au niveau de la presqu'île du Cap-Vert.

### 3.1.2. Paramètres chimiques

✓ Carbone et azote total (C/N)

Le rapport C/N obtenu est très élevé à Almadies-Vivier, à l'Ile de la Madeleine, à Ouakam, à Dantec et à Ngor. Il est faible à Hann2, Hann1 et Soumbédioune. Les sites de Cambérène et Yoff Tonghor sont caractérisés par l'absence d'azote (Figure 3).

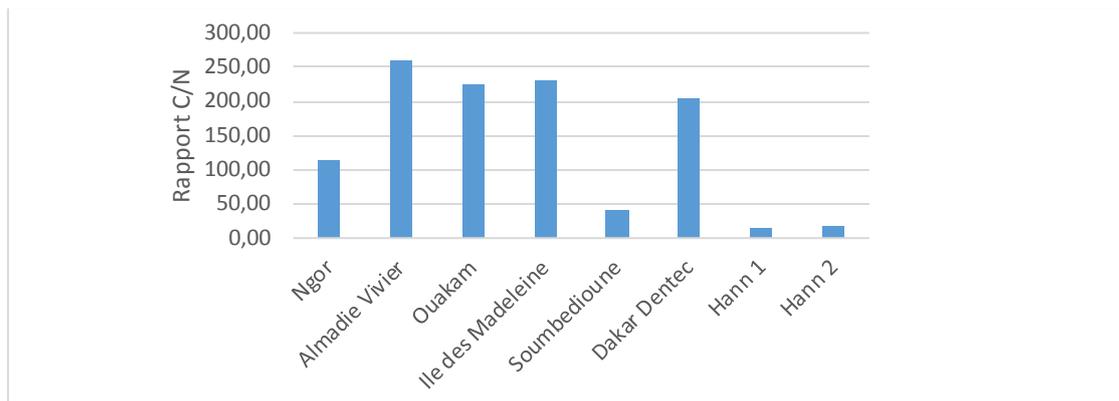


Figure 3 : Rapport Carbone/Azote dans les sédiments marins au niveau de la presqu'île du Cap-Vert.

✓ Mercure

Les teneurs en mercure dans les sédiments sont très faibles (Figure 4). On observe, également, une variabilité nette entre les sites du nord (Cambérène, Yoff Tonghor, Ngor) et certains site de l'ouest (Almadies-Vivier, Ouakam et Ile de la Madeleine) qui présentent des teneurs très faibles (entre  $0,0019 \text{ mg kg}^{-1}$  à Cambérène et  $0,0051 \text{ mg kg}^{-1}$  à Ngor) et ceux du sud et d'autres sites de l'ouest (Soubédioune et Dakar le Dantec) qui donnent des teneurs nettement supérieures (entre  $0,0116 \text{ mg kg}^{-1}$  à Dakar Dantec et  $0,0349 \text{ mg kg}^{-1}$  à Hann1). L'Ile de la Madeleine, se trouvant dans le sud, présente une teneur en  $\text{Hg}_s$  comparable à celles des sites du Nord.

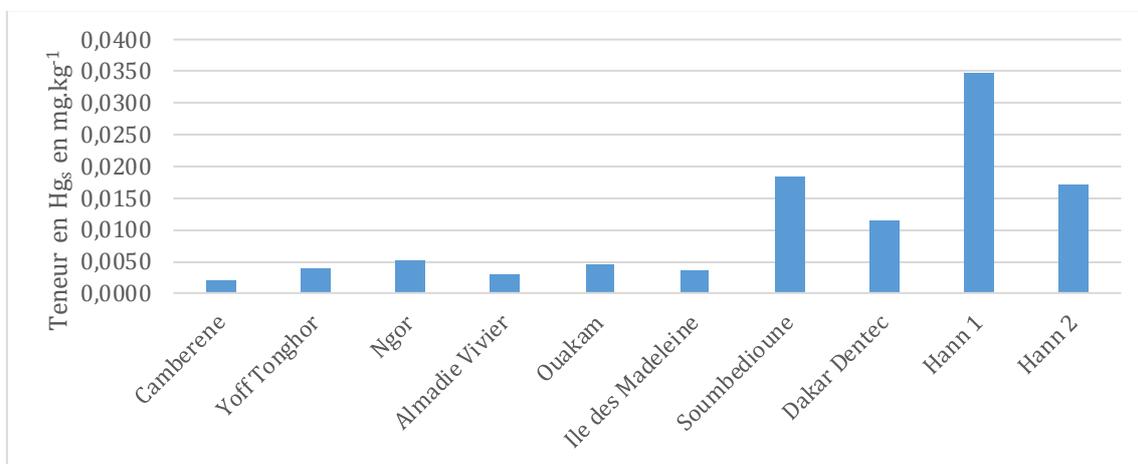


Figure 4 : Teneur en mercure dans les sédiments ( $\text{Hg}_s$ ) au niveau de la presqu'île du Cap-Vert.

### 3.1.3. Paramètres toxicologiques

Les résultats de cette étude révèlent que tous les sédiments sont toxiques à divers niveaux avec une variabilité allant de 27 à 100 % d'anomalies de développement larvaire (ADL). Soixante-treize 73 % des sites (Yoff Tonghor, Ngor, Ile de la Madeleine, Soubédioune, Dakar Dantec, Hann1, Hann2 et Port de Dakar) ont une toxicité très élevée et présentent 100 % d'ADL. Les sites faiblement toxiques (Cambérène et Almadies-Vivier) dont les pourcentages d'ADL vont jusqu'à 30, représentent 18 % des sites. Le site intermédiaire (Ouakam) a une toxicité moyenne (60 % d'ADL). On remarque que tous les sites de la partie sud et sud-ouest de la

presqu'île ont des pourcentages d'ADL maximaux alors que ceux de la partie nord et nord-ouest présentent des toxicités faibles, moyennes et élevées (Figure 5).

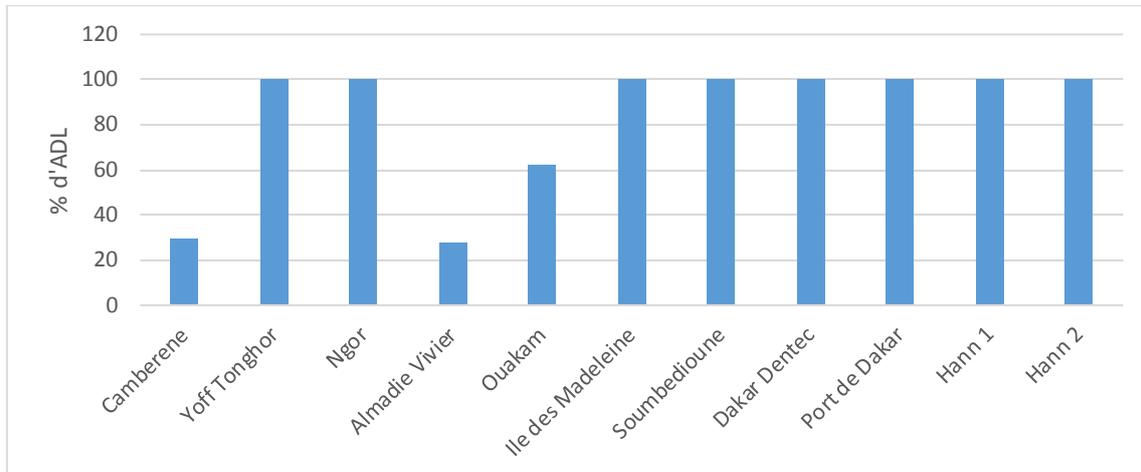


Figure 5 : Toxicité globale des sédiments au niveau de la presqu'île du Cap-Vert.

## 3.2. Eaux marines

### 3.2.1. Paramètres physicochimiques

Dans l'évaluation de la qualité des eaux de surface, les paramètres physicochimiques souvent étudiés sont la température, le pH, la salinité, l'oxygène dissous, les MES, la turbidité et les nutriments ( $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ , et  $\text{PO}_4^{3-}$ ) (Annexe 4 et Tableau 7).

#### ✓ Température de l'eau

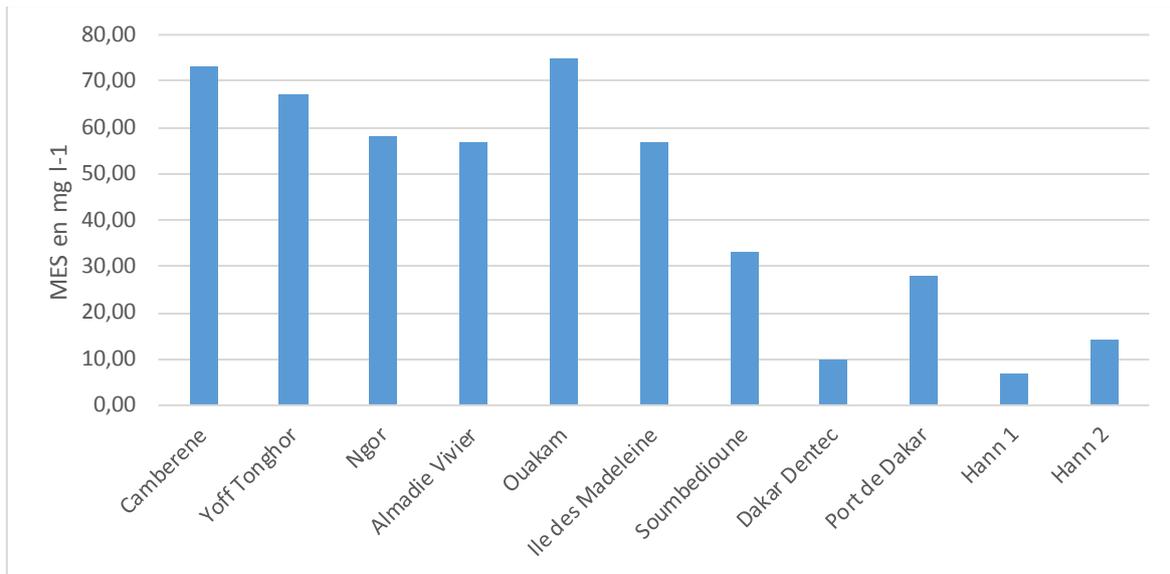
Dans la presqu'île du Cap-Vert, les moyennes des températures observées sont aux alentours de 19,0 °C en surface au cours de nos collectes avec un minimum de 17,8 °C à Hann2 et un maximum à de 20,8 °C à Yoff Tonghor.

#### ✓ pH

A l'exception du site de Soubédioune, où on observe un pH de 8,3, les valeurs de pH pour les autres sites dépassent la limite supérieure de quantification de notre appareil de mesure dont les limites sont les suivantes : 6,5 à 8,5.

#### ✓ Matières en suspension

Dans les sites du nord, y compris l'Ile de la Madeleine, on constate que les concentrations en MES sont élevées et comprises entre 57 (Ile de la Madeleine et Almadies-Vivier) et 75 mg l<sup>-1</sup> (Ouakam). Dans le sud de la presqu'île, les sites présentent des concentrations moyennes (Soubédioune = 33 mg l<sup>-1</sup> ; Port de Dakar = 28 mg l<sup>-1</sup>) et faibles (Dantec = 10 mg l<sup>-1</sup>; Hann1 = 7 mg l<sup>-1</sup>; Hann2 = 14 mg l<sup>-1</sup>) en MES (Figure 6).



**Figure 6 : Paramètres physicochimiques : les MES dans les eaux au niveau de la presqu'île du Cap-Vert.**

✓ Turbidité

Les valeurs de la turbidité observées sont faibles (entre 1,2 et 5,2 FNU) pour la majorité des sites (Camberène, Yoff Tonghor, Almadies-Vivier, Ouakam, Ile de la Madeleine, Dakar le Dantec et Port de Dakar). Toutefois les valeurs élevées et moyennes sont observées dans certains sites : Soubédioune = 29,7 FNU, Hann1 = 36,5 FNU et Hann2 = 17,5 FNU. On n'observe pas une relation de proportionnalité entre les MES et la Turbidité de l'eau (Figure 7).

✓ Oxygène dissous

Les résultats obtenus montrent une variabilité de saturation en oxygène entre les sites allant de 33 % soit 8 mg l<sup>-1</sup> (Soubédioune) à 52 % soit 14 mg l<sup>-1</sup> (Camberène). La majorité des sites (Almadies-Vivier, Ouakam, Ile de la Madeleine, Dantec, Hann1, Hann2 et Port de Dakar) présente des teneurs voisines de 35 % et dans le site de Yoff Tonghor on observe 48 % soit 13 mg l<sup>-1</sup> (Figure 7).

✓ Salinité

Elle est légèrement élevée et constante (40 psu) pour tous les sites (Figure 7). (NB : les mesures ont été faites le 1 juin 2016 avant la saison des pluies à Dakar).

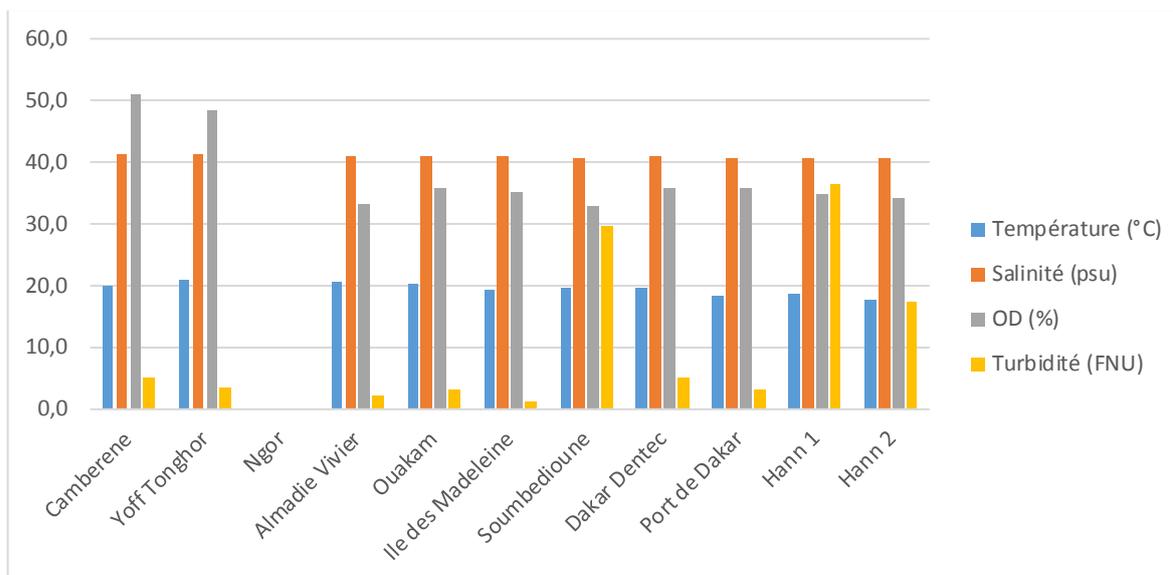


Figure 7 : Paramètres physicochimiques : Température, Salinité, saturation en Oxygène Dissous et Turbidité dans les eaux de la presqu'île du Cap-Vert.

#### ✓ Phosphore

Les valeurs élevées sont observées à Ngor (30,0 mg l<sup>-1</sup>), à Hann2 (26,1 mg l<sup>-1</sup>), à Hann1 (21,9 mg l<sup>-1</sup>), à Yoff Tonghor (20,4 mg l<sup>-1</sup>) et à Almadies-Vivier (18,4 mg l<sup>-1</sup>). Les valeurs intermédiaires sont notées à Ouakam (14,4 mg l<sup>-1</sup>) et à Soumbédioune (7,2 mg l<sup>-1</sup>). Les faibles concentrations sont enregistrées à l'Ile de la Madeleine (4,6 mg l<sup>-1</sup>), à Rufisque1 (3,5 mg l<sup>-1</sup>), au Port de Dakar (2,5 mg l<sup>-1</sup>), à Dakar le Dantec (1,1 mg l<sup>-1</sup>) et à Cambérène (0,2 mg l<sup>-1</sup>).

#### ✓ Azote

L'azote est un indicateur majeur de pollution. Les composés azotés souvent déterminés dans l'étude de la qualité des eaux sont sous la forme d'ion ammonium, de nitrates et de nitrites.

#### ✓ Ion ammonium

Les concentrations obtenues de l'ion ammonium sont très élevées dans tous les sites et la variabilité entre les sites est assez faible (comprise entre 9,80 mg l<sup>-1</sup> à Hann2 et 12,90 mg l<sup>-1</sup> au Port de Dakar).

#### ✓ Nitrates et Nitrites

Une forte variabilité a été observée entre les sites. Les teneurs en nitrates sont, généralement, faibles et moyennes pour les sites de Cambérène (1,3 mg l<sup>-1</sup>), Yoff Tonghor (7,7 mg l<sup>-1</sup>), Ngor (3,8 mg l<sup>-1</sup>), Almadies-Vivier (0,8 mg l<sup>-1</sup>), Ile de la Madeleine, Dakar le Dantec (5,9 mg l<sup>-1</sup>), Hann1 (1,2 mg l<sup>-1</sup>), Hann2 (4,6 mg l<sup>-1</sup>) et Port de Dakar (6,3 mg l<sup>-1</sup>). Les teneurs élevées n'ont été observées que dans les sites de Ouakam (12,0 mg l<sup>-1</sup>) et Soumbédioune (19,7 mg l<sup>-1</sup>). Les nitrites ont des valeurs élevées dans les sites de Cambérène, Almadies Vivier, Ouakam, Hann1, Hann2 et Port de Dakar. Les teneurs faibles sont observées dans les sites Yoff Tonghor, Ngor, Ile de la Madeleine, Soumbédioune et Dakar Dantec.

### 3.2.2. Eléments Traces Métalliques (ETM)

Les résultats des analyses sur les ETM (Annexe 3 et Tableau 6) ont montré des concentrations globalement élevées. Le Cr, le Co, l'Al et le Ni présentent les concentrations les plus élevées (0,20000 à 1,10000 mg l<sup>-1</sup>) avec une variabilité relativement faible entre les sites à l'exception du Cr dont les concentrations dans les sites du sud et du sud-ouest (Dakar le Dantec, Hann1, Hann2 et Port de Dakar) sont nettement supérieures à celles des autres sites (Figure 8a).

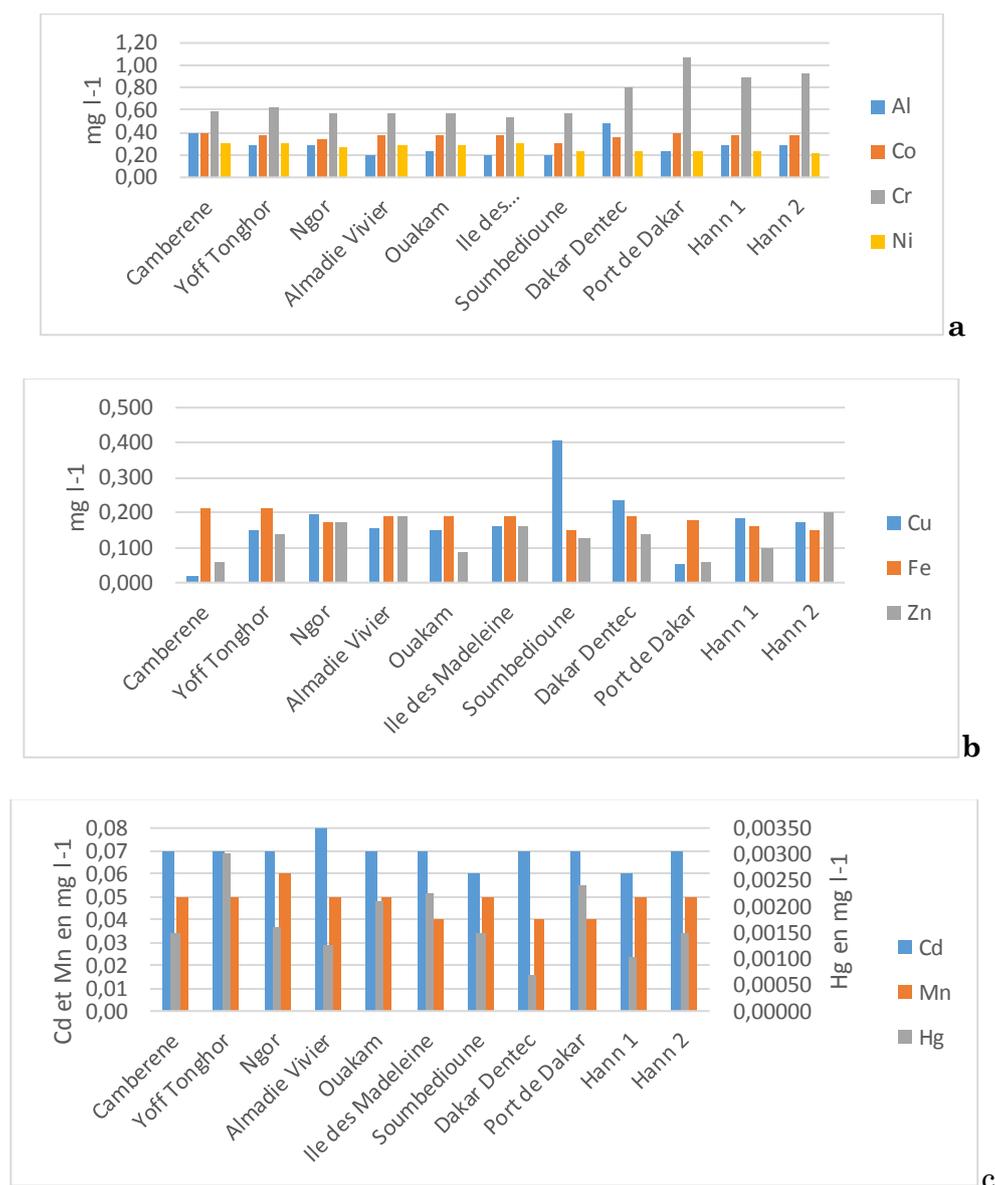


Figure 8 : Concentration en ETM [Al, Co, Cr, Ni (a) ; Cu, Fe, Zn (b) ; Cd, Mn, et Hg (c)] dans les eaux de surface au niveau de la presqu'île du Cap-Vert.

Les teneurs intermédiaires (0,05000 à 0,20000 mg l<sup>-1</sup>) sont observées pour le Cu, le Fe et le Zn. La variabilité entre les sites est notée pour le Cu et pour le Zn : un pic fort à Soumbédioune (0,40000 mg l<sup>-1</sup>) et deux pics faibles à Cambérène (0,02100 mg l<sup>-1</sup>) et au Port de Dakar (0,05000 mg l<sup>-1</sup>) pour la teneur en Cu ; et deux pics faibles à Cambérène et au Port de Dakar (0,06000

mg l<sup>-1</sup>) pour la teneur du Zn. Pour le Fe, la variabilité est relativement faible pour tous les sites (Figure 8b). Le Cd, le Mn et Hg présentent les concentrations les plus faibles (0,00060 à 0,08000 mg l<sup>-1</sup>) avec une faible variabilité entre les sites qui tournent respectivement autour de 0,07000 mg l<sup>-1</sup> pour le Cd et de 0,05000 mg l<sup>-1</sup> pour le Mn. Le mercure présente plus de variabilités entre les sites avec des pics forts à Yoff Tonghor (0,00303 mg l<sup>-1</sup>), au Port de Dakar (0,00242 mg l<sup>-1</sup>), à Ile de la Madeleine (0,00227 mg l<sup>-1</sup>) et à Ouakam (0,00210 mg l<sup>-1</sup>), et des pics faibles à Dakar le Dantec (0,00060 mg l<sup>-1</sup>), à Hann1(0,00104 mg l<sup>-1</sup>), et Almadies Vivier (0,00125) (Figure 8c). Le calcul des facteurs de pollution des métaux par rapport aux critères canadiens sur la protection de la vie aquatique (effets chroniques) classe les teneur en ETM pour la presqu'île de Dakar (valeur moyenne divisée par le critère canadien) par ordre décroissant : Cu, Ni, Cr, Cd, Co, Al, Hg, Zn, Mn et Fe (Figure 9).

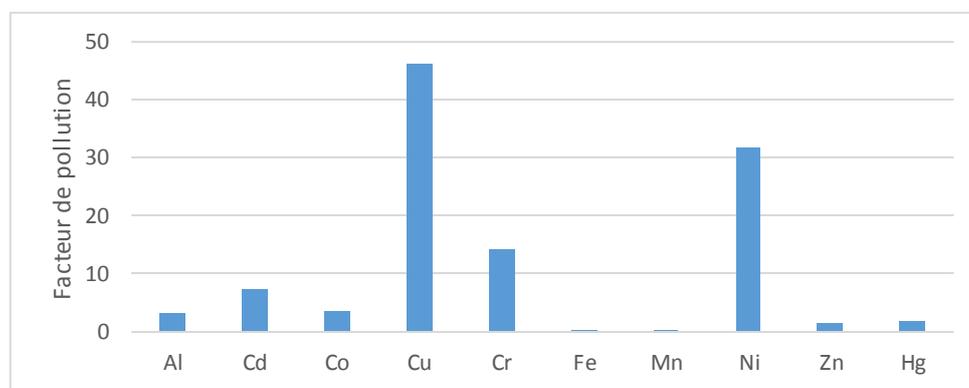


Figure 9 : Facteurs de pollution des ETM sur la presqu'île du Cap vert (valeur moyenne de l'ensemble des sites) par rapport aux critères de protection de la vie aquatique ; effets chroniques (Critères canadiens).

### 3.3. Analyses statistiques

#### 3.3.1. Table des corrélations

L'analyse de corrélations significatives (à 5%) montre que seuls le Cd et le Ni ont une corrélation négative avec la toxicité globale des sédiments (TGS). Cependant, une corrélation positive entre les ETM a été observée : le Cu corrélié avec le Cd, le Co et le Fe ; Cd corrélié avec Co, Fe et Hgs ; Co corrélié avec Fe ; Cr corrélié avec le Ni ; Fe corrélié avec Ni et Hgs et Ni corrélié avec le Hgs (Tableau 2).

Tableau 2: Matrice de corrélation entre les ETM et la TGS (Toxicité Globale des Sédiments). En gras les corrélations significatives entre la TGS et ETM et ETM.

	Cu	Al	Cd	Co	Cr	Fe	Hg	Mn	Ni	Zn	Mr	Tox
Cu	1											
Al	-0,155	1										
Cd	<b>-0,502</b>	-0,013	1									
Co	<b>-0,929</b>	0,167	<b>0,556</b>	1								
Cr	-0,22	0,196	-0,191	0,341	1							
Fe	<b>-0,603</b>	0,29	<b>0,532</b>	<b>0,543</b>	-0,372	1						
Hg	-0,321	-0,453	0,119	0,268	-0,114	0,381	1					
Mn	0,142	-0,135	-0,055	-0,245	-0,387	-0,22	-0,078	1				
Ni	-0,411	-0,085	0,466	0,301	<b>-0,756</b>	<b>0,813</b>	0,458	0,128	1			
Zn	0,403	-0,175	0,347	-0,207	-0,226	-0,302	-0,17	0,245	-0,051	1		
Mr	0,467	0,054	<b>-0,74</b>	-0,328	0,441	<b>-0,708</b>	-0,496	0,081	<b>-0,704</b>	0,012	1	
Tox	0,436	0,008	<b>-0,558</b>	-0,367	0,403	-0,489	0,178	-0,185	<b>-0,507</b>	0,159	0,422	1

### 3.3.2. Régression linéaire multiple

La liaison de la TGS et les ETM est déterminée par une régression linéaire multiple. La première estimation montre que tous les métaux ont des effets non significatifs sur la TGS. Par régression linéaire multiple descendante, les résultats finaux montrent que le Cd, le Cr, le Zn et le Hg<sub>s</sub> expliquent à 71 % (R<sup>2</sup> ajusté) la TGS. Le test de Fisher (p-value de 0,018) indique que le modèle est globalement significatif (Annexe 5 et Tableau 8 et Tableau 9). Cette régression linéaire multiple sera approfondie par la méthode séquentielle.

### 3.3.3. Analyse des Composantes Principale (ACP)

Les deux (02) premiers axes retenus expliquent 60 % de l'information. Au niveau du cercle de corrélation, la représentation met en évidence une corrélation positive entre la composante principale (l'axe 1) et le Fe, Ni, Cd et Hg. Elle met en évidence, également, une corrélation négative entre cette composante et Hg<sub>s</sub> et Cu. La seconde composante a une corrélation positive avec le Cr et une corrélation négative avec le Zn et le Mn. Les sites contribuant plus, significativement, à la construction de l'axe principal sont Cambérène avec 14 %, Soumbédioune avec 33 %, Hann1 avec 19 % et Yoff Tonghor avec 11 %. Pour l'axe 2 nous avons Port de Dakar (32 %), Hann1 (10 %) et Ngor (14 %). Soumbédioune est fortement pollué en Cu et parallèlement on y note les plus faibles quantités en Co, Ni, Fe et Cd contrairement à Cambérène où ils sont plus élevés. Hann1 a un taux plus élevé en Hg<sub>s</sub>. Yoff Tonghor est très pollué en Ni et Hg. Le Port et Hann1 sont pollués en Cr et parallèlement on y note des quantités faibles en Zn et Mn qui a des quantités plus élevé en Ngor (

Figure 10 ; Hg<sub>s</sub> = Mr sur la courbe).

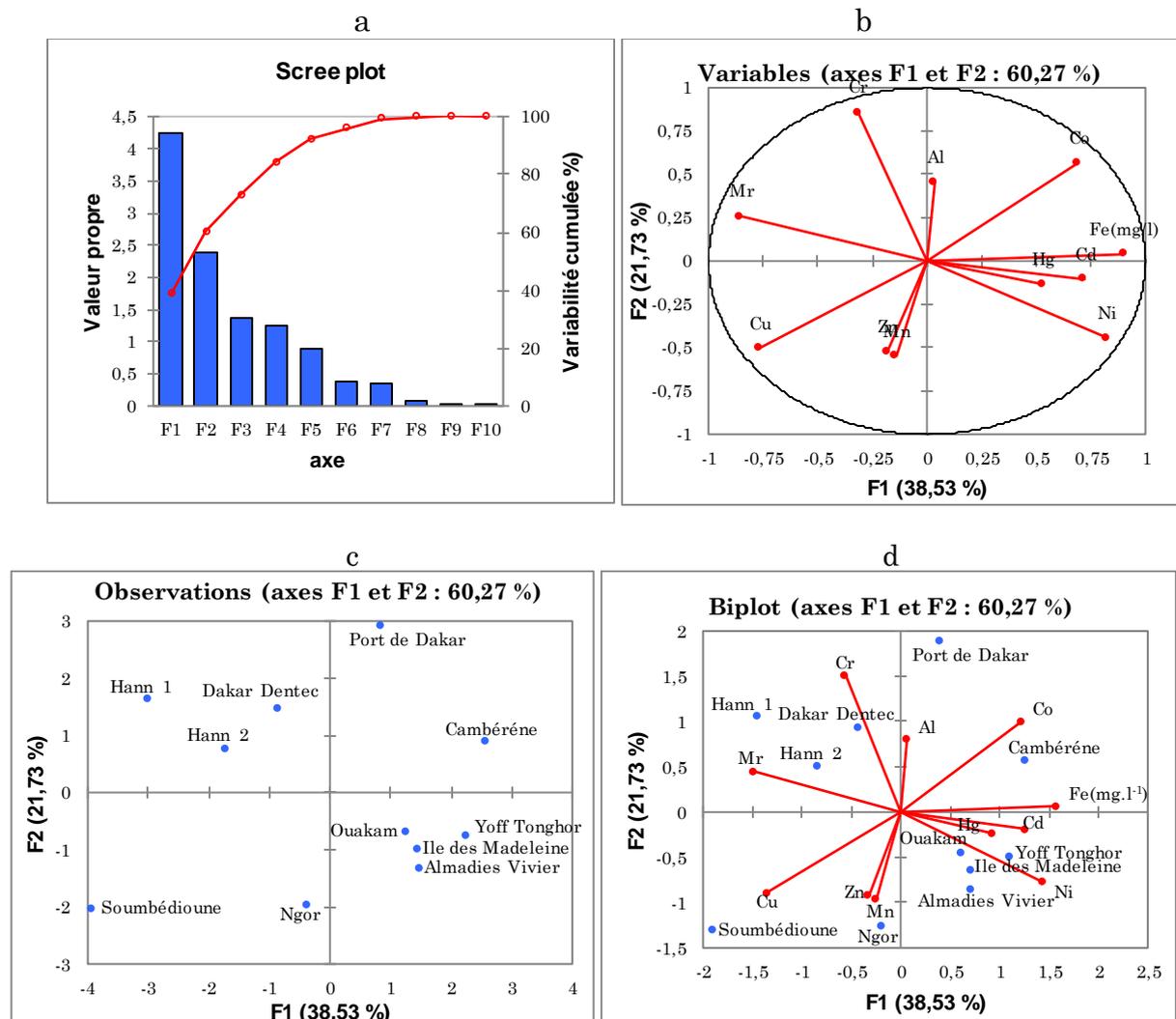


Figure 10 : a) Histogrammes des valeurs propres. b) Cercle de corrélation des variables mesurées. (c) Graphe des individus (sites). (d) Représentation simultanée individus et variables.

## 4. Chapitre IV: Discussion

### 4.1. Sédiments : Granulométrie, Carbone total, Azote, Teneur en mercure, Toxicité globale des sédiments

#### ✓ Granulométrie

Les résultats de la granulométrie confirment les travaux de Domain (1977) qui a montré qu'au niveau de la presqu'île du Cap-Vert, les plages sont constituées de sables grossiers biogènes. Cependant, ces résultats ne correspondent pas à ceux de Diop et coll. (2012) qui a observé une prédominance de la fraction fine (argiles). Ceci peut s'expliquer par la différence du niveau de prélèvement des échantillons effectué sur la côte auprès des effluents (distance à la côte : 5 à 10 m et profondeur très faibles : 0,5 m) alors que nos prélèvements ont été faits

plus au large, beaucoup plus loin des effluents (60 à 400 m de la côte avec des profondeurs allant de 2 à 20 m). La granulométrie apporte des renseignements sur la dynamique sédimentaire (Environnement Canada, 2007) mais, également, sur la spéciation des polluants dans les sédiments (Diop, 2014).

La prédominance des sables grossiers et fins dans nos échantillons s'explique par de fortes activités hydrodynamiques dues aux vents (upwelling) et aux courants qu'on observe entre décembre et mai et aux houles NW (observées toute l'année au Sud en hivernage) qui favorisent le brassage en milieu de faible profondeur. Ces particules grossières (sable fins et grossiers), qui sont moins cohésives, présentent de faibles surfaces de contact avec les polluants ; ce qui réduirait la fixation des polluants (e.g. ETM) dans les sédiments (Geffard, 2001 ; Le Hir, 2008 ; Baldovini, 2011). Sur l'axe des sites de Ngor, Almadies Vivier, Ouakam et Ile de la Madeleine, la prédominance du sable grossier, par rapport au sable fin, peut s'expliquer par le fait que cet axe correspond à la direction des courants du nord (courant des Canaries) alors que les autres sites (Cambérène, Yoff Tonghor, Soumbédioune, Dakar le Dantec, Hann1 et Hann2) sont un peu déviés, ce qui entraîne une faible diminution de la courantologie dans ces sites. Cette déviation qui s'accroît dans la baie de Hann occasionne la faible présence de particules fines (argiles, limons fins et limons grossiers) dans Hann1 et Hann2.

✓ Carbone et azote total

Les résultats sont comparativement plus élevés que ceux de Diop (2012) qui a travaillé dans la même zone et dont le rapport C/N (Carbone/Azote) variait entre 12,6 et 33,2. De la même façon, ces résultats sont en désaccord avec les travaux de Leaute (2008) et Rauch (2007) menés en France qui ont trouvé, dans les sédiments de surface, des rapports C/N inférieurs à 10.

Le rapport C/N donne des informations intéressantes sur l'origine et l'éventuelle transformation de la matière organique des sédiments marins. Un rapport C/N élevé (supérieur à 12) indique une influence des apports de matières organiques d'origine terrigène (cas de nos résultats). A l'inverse, un rapport C/N faible (inférieur à 12) montre une origine biogène/autochtone de la matière organique due à la dégradation du phytoplancton riche en azote (Diop et coll., 2012 ; Diop, 2014 ; Geffard, 2001 ; Leaute, 2008 ; Environnement Canada, 2002, 2010).

La différence notable observée entre les sites peut être attribuée à celle des apports en matières organiques (Ile de la Madeleine) et de la dégradation de ces matières due à l'activité phytoplanctonique, ce qui peut être le cas des sites de Cambérène et Yoff Tonghor. Comme cette étude est côtière (mélange d'apports de matières organiques marines et terrestres), nous pouvons aussi penser à la diagenèse précoce qui augmenterait le rapport C/N (forte labilité de

composés azotés, comme les protéines), ce qui induirait aux erreurs d'interprétation (Ile de la Madeleine, Almadies Vivier et Ouakam) (Tregnier, 2005). En effet, si on se réfère aux résultats microbiologiques dans les eaux (Annexe 7 et Tableau 11), les sites qui ont des rapports C/N élevés correspondent à ceux qui présentent les concentrations plus faibles de bactéries et vice versa. Le rapport C/N s'avère un indicateur de pollution microbiologique : plus la qualité microbiologique est bonne plus le rapport C/N est élevé et plus la qualité microbiologique est mauvaise plus le rapport est faible (voir résultats microbiologie en annexe 7 ; Tableau 11).

#### ✓ Mercure

A notre connaissance, aucune étude n'a déterminé le mercure dans les sédiments de la côte sénégalaise. Cependant, les études menées dans l'estuaire du fleuve Konkouré par Onivogui et coll. (2013) en République de Guinée et en Côte d'Ivoire dans la lagune Aghien par Traoré et coll. (2014) montrent des teneurs en mercure, respectivement, moins (Guinée :  $0,0001 \text{ mg kg}^{-1}$ ) et plus élevées (côte d'Ivoire :  $0,06$  à  $1,12 \text{ mg kg}^{-1}$ ) que nos résultats. Ferrara et Maserti (1992) ont trouvé des teneurs en mercure dans les sédiments de la mer adriatique (entre Croatie et Italie) modérément plus élevées que nos résultats, variant de  $0,02$  à  $1,3 \text{ mg kg}^{-1}$ . Les concentrations très élevées (entre  $32$  à  $43 \text{ mg kg}^{-1}$ ) ont été observées dans les sédiments de surface (Jusqu'à  $8 \text{ cm}$ ) de la baie de Kastela en Croatie par Foucher (2002). Dans la rade de Toulon, les teneurs en mercure dans les sédiments de surface varient entre  $6$  et  $8 \text{ mg kg}^{-1}$  (près du port de commerce) et entre  $2$  et  $3 \text{ mg kg}^{-1}$  (baie du Lazaret) (Démoulin, 2014) (Tableau 3).

Si on compare nos résultats à ceux Onivogui et coll., (2013) qui peuvent être considérés comme le bruit de fond du mercure dans la sous-région, on peut dire que la presqu'île du Cap-Vert subit une forte pollution en mercure. Par rapport aux valeurs guides établies par GEODE (Geffard, 2012) et les critères canadiens, les sédiments de la presqu'île du Cap-Vert peuvent être qualifiés de bonne qualité en mercure. Cependant, le mercure fait partie des métaux les plus toxiques qu'on retrouve dans le milieu marin (Cossa et coll., 2002) et sous l'activité bactérienne, le mercure se trouve plus souvent sous forme de méthylmercure qui est beaucoup plus toxique et plus bioaccumulable pour les espèces aquatiques. Cette méthylation s'observe mieux dans les sédiments que dans les eaux ; ainsi le curage et le dragage des sédiments entraînent une libération permanente de méthylmercure dans la colonne d'eau (Rodier, 2009 ; Foucher, 2002).

Si on tient compte de cette méthylation du mercure dans les sédiments, de son pouvoir à se bioaccumuler dans les tissus des espèces aquatiques et à se bioamplifier tout le long de la chaîne alimentaire, sa faible présence dans les sédiments de la presqu'île du Cap-Vert présenterait un risque pour les espèces benthiques mais également pour la santé humaine (e.g.

disfonctionnement rénal pour le mercure inorganique ; mort pour le méthylmercure) (INERIS, 2010).

Bien que les teneurs en Hg<sub>s</sub> obtenues dans cette étude soient très faibles, la forte variabilité observée entre les sites prouve qu'il y a bien une pollution anthropique. Si on se réfère à l'étude de la DEEC (2014), cette pollution anthropique peut être due à l'extraction de l'or par des méthodes autres que l'amalgamation au mercure, à l'extraction de l'or à l'aide du mercure sans usage de la cornue (un récipient solide utilisé pour séparer l'or du mercure une fois le minerai est broyé en sable fin), aux systèmes de traitement des eaux usées, aux décharges informelles de déchets municipaux et autres équipements médicaux et de laboratoire à mercure. Cette variabilité observée peut être attribuée, en partie, à la granulométrie, à la turbidité et à la courantologie des sites. La zone sud (Hann1 et Hann2) contient beaucoup plus de fractions fines et elle est caractérisée par une forte turbidité (favorisant la sédimentation des polluants). Au nord, la courantologie est plus intense avec des quantités plus faibles de fractions fines pouvant ainsi diminuer la sédimentation du mercure.

**Tableau 3 : Comparaison des teneurs en Hg dans les sédiments entre différentes études.**

Localité (Pays)	Concentration min	Concentration max	Auteur et année
Presqu'île du Cap-Vert (Sénégal)	0,0019	0,0349	nos résultats
Estuaire du fleuve Konkouré (République de Guinée)	0,0001	0,0001	Onivogui et coll (2013)
Lagune Aghien (Côte d'Ivoire)	0,06	1,12	Traoré et coll (2014)
Mer Adriatique (Entre Croatie et Italie)	0,02	1,3	Ferrara et Maserti (1992)
Baie de Kastela (Croatie)	32	43	Foucher (2002)
Port de commerce (Rade de Toulon) France	6	8	Démoulin (2014)
Baie du Lazaret (France)	2	3	Démoulin (2014)

#### ✓ Toxicité globale des sédiments

A notre connaissance, c'est la première fois en Afrique de l'Ouest qu'on évalue la toxicité globale des sédiments. Une étude similaire menée en Tunisie par Badreddine (2015), sur l'évaluation de la toxicité des sédiments par une série de tests bio essais, montre que les sédiments sont toxiques et 32 % des sites présentent de fortes mortalités des larves exposés.

Les sédiments de la presqu'île du Cap-Vert sont comparativement beaucoup plus toxiques que ceux du littoral des bouches du Rhône (toxicité varie entre 0 et 100 % ADL avec 16 % de stations très toxiques) (Galgani, 2007), ceux des lagunes méditerranéennes (toxicité varie entre 1,8 et 100 % ADL avec 2,1 % de stations très toxiques) (Galgani et coll., 2009) et ceux du littoral du Languedoc Roussillon, du Var et des Alpes Maritimes (toxicité varie entre 0 et 100 % ADL avec 33,2 % de stations très toxiques) (Galgani et Baldi, 2010). C'est une méthode

utilisée pour évaluer la qualité des sédiments. Elle permet de mesurer l'effet biologique global et maximal de tous les polluants présents dans les sédiments en mettant en évidence les interactions entre les composés (effet synergiques et antagonistes des polluants) et la biodisponibilité des contaminants (Galgani, 2007 ; Galgani et Baldi, 2010 ; Galgani et coll., 2009 ; Mamindy-Pajany et coll., 2011).

Vu les résultats de TGS obtenus dans notre étude, cela indique que les espèces benthiques de la presqu'île du Cap-Vert sont exposées à une forte pollution. Cette exposition peut se répercuter jusqu'à l'homme si les polluants impliqués dans cette toxicité sont bioaccumulables et bioamplifiables. La faible variabilité de la toxicité observée entre les sites est caractéristique de la nature et de l'intensité de la pollution [rejets des eaux usées traitées à Cambérène, rejets des eaux usées urbaines non traitées à Soumbédioune (haut débit) et Ngor (débit moyen), effluents d'hôpitaux à Dakar le Dantec, rejets des eaux usées urbaines et industrielles non traitées à Hann1 et Hann2, rejets des produits chimiques au Port, épave et fientes d'oiseaux à l'île de la Madeleine, forte activité anthropique (rejets des engins de pêche) à Yoff Tonghor, rejets des eaux usées domestiques à Ouakam et Almadies-Vivier]. La granulométrie pourrait apporter une information de plus (lien entre TGS et granulométrie) si on avait dilué les échantillons pour la TGS qui allait permettre de voir et de classer par ordre les sites les plus toxiques.

## **4.2. Qualité des eaux marines**

### **4.2.1. Aspects physicochimiques**

#### ✓ Température de l'eau

C'est un paramètre majeur dans l'équilibre des écosystèmes aquatiques (Makhoukh et coll., 2011 ; Reggam, 2015 ; De Villiers, 2005). Dans le cas de notre étude, nous ne pouvons pas évoquer la variabilité temporelle puisque nous n'avons pas fait un suivi temporel. Cette température de l'eau est également influencée par la température ambiante et les eaux résiduaires chaudes (De Villiers, 2005). Ainsi, les résultats obtenus montrent que les températures observées pour la majorité des sites correspondent plutôt à la température ambiante (voire la météo du jour de prélèvement en annexe 6 et Tableau 10) avec une différence environ de 1 °C entre la température de surface et celle du fond sauf les sites de Soumbédioune, Port de Dakar et Hann1 où les différences sont environ à 2 °C. Cette variabilité de température (2 °C) en faible profondeur peut faire penser à l'influence des rejets sur la température des eaux de surface dans ces derniers sites.

#### ✓ Le pH

Les valeurs du pH observées dans les sites indiquent qu'au niveau de la presqu'île du Cap-Vert, la qualité des eaux pour les activités récréatives (baignade) est mauvaise (*i.e.* pH > 8,5) et mérite bien une attention particulière sur la vie des espèces aquatiques. Puisqu'on ne connaît pas les valeurs exactes de ce paramètre, nous ne pouvons discuter ni de la variabilité spatiale ni des causes de cette alcalinité. Cependant, le pH faiblement basique (8,3) noté à Soubédioune est, peut-être, lié aux réactions de nitrification qui produisent des nitrates qui y sont plus élevés que dans les autres sites. La forte présence en matière organique accentue cette réaction de nitrification, qui produit de l'acide carbonique (Deronzier et coll, 1990) qui, à son tour, a tendance à baisser le pH.

#### ✓ Matières en suspension

Par rapport aux travaux de Diop et coll. (2014), les résultats obtenus sont faibles pour les sites de Soubédioune et Hann et sont comparables à Cambérène. Les matières en suspension sont fonction de la courantologie, de la nature des rejets (Makhoukh et coll., 2011 ; De Villiers, 2005 ; Hannoucha, 2012), ce qui explique la variabilité des teneurs en MES observée entre les sites : forte courantologie (Cambérène, Yoff Tonghor, Ngor, Almadie Vivier, Oukam et Ile de la Madeleine), faible courantologie (Hann1, Hann2, Port de Dakar, Dakar le Dantec et Soubédioune) et nature des rejets (Soubédioune, Port de Dakar). A concentration élevée, *i.e.* supérieure à 25 mg l<sup>-1</sup> (Cambérène, Yoff Tonghor, Ngor, Almadie Vivier, Oukam, Ile de la Madeleine, Soubédioune et Port Autonome de Dakar), les MES gênent la respiration des poissons, réchauffent l'eau et diminuent la transparence du milieu, la pénétration de la lumière ainsi que la photosynthèse des espèces aquatiques végétales (Makhoukh et coll., 2011 ; De Villiers, 2005 ; Hannouche, 2012).

#### ✓ Turbidité

C'est une mesure de la limpidité ou de l'opacité relative de l'eau (Santé Canada, 2012). Elle est liée à la présence des MES et présente les mêmes conséquences que ces MES (Hannouche, 2012). Les zones turbides ( $T > 8$  FNU) sont enregistrées à Soubédioune = 29,7 ; Hann1 = 36,5 et Hann2 = 17,5 où les MES sont un peu élevées (Soubédioune) et faibles (Hann1 et Hann2). La relation MES/Turbidité a été observée par une corrélation négative. Cette relation dépend de plusieurs paramètres : les caractéristiques géométriques et optiques qui peuvent varier en fonction des heures, des jours et des événements pluviaux (Hannouche, 2012). Ceci pourrait s'expliquer par la nature des MES qui augmenteraient la transparence du milieu.

#### ✓ Oxygène dissous

Ces résultats ne correspondent pas à ceux de Diop et coll. (2014) qui avaient trouvé des concentrations beaucoup plus élevées. C'est un paramètre instable car elle est fonction de plusieurs paramètres : *e.g.* la pression partielle de l'atmosphère, la température, la salinité, la pénétration de la lumière, l'agitation de l'eau, la disponibilité en nutriments, la vitesse d'appauvrissement en oxygène (due aux activités des organismes aquatiques et aux processus d'oxydation), la décomposition de la matière organique ; ce qui pourrait expliquer la non concordance observée entre nos résultats et ceux de Diop et coll (2014) et la faible augmentation de l'oxygène dans le site Cambérène et Yoff Tonghor (forte agitation de l'eau) (Makhoukh et coll., 2011 ; De Viller, 2005).

#### ✓ Salinité

Ces résultats sont supérieurs à ceux de Diop et coll. (2014) qui ont obtenu une conductivité électronique maximale de  $48,9 \text{ ms cm}^{-1}$  qui correspondrait à 32 psu. Dans les eaux côtières, la salinité varie en fonction de plusieurs paramètres : *e.g.* les apports fluviaux, les eaux souterraines, la vitesse d'évaporation, des courants périodiques et océaniques (Conseil canadien des ministres, 1999). Ces paramètres influençant la salinité, surtout la vitesse d'évaporation, pourraient expliquer la différence observée entre nos résultats et ceux de Diop et coll (2014). Les résultats obtenus dépassent un peu la limite supérieure de la salinité des océans (38 psu) pour tous les sites. La valeur constante de la salinité observée pour l'ensemble des sites fait penser à l'influence d'un paramètre généralisé, tel que la vitesse d'évaporation.

#### ✓ Phosphore

A des concentrations élevées, le phosphore peut entraîner l'eutrophisation. Les résultats obtenus pour la majorité des sites sont très élevés comparés à la normalisation canadienne et aux travaux de Diop et coll. (2014) déduisant que la presqu'île du Cap-Vert est très polluée en matières organiques. On observe, cependant, des différences importantes entre un site non traité comme Soubédioune *vs.* Cambérène dont les eaux sont traitées ; de même au niveau de Hann1, Hann2 et Ngor (sites où les eaux sont non traitées) les teneurs en  $\text{PO}_4^{3-}$  sont très élevées par rapport à Cambérène (eaux traitées) et à Dakar le Dentec (supposé en partie traitées). La grande variabilité des teneurs en phosphore s'explique surtout par la nature et le débit des effluents mais également par l'érosion des côtes et à la dégradation de la matière organique. La faible teneur observée à Cambérène est caractéristique des résultats de la station d'épuration de Cambérène. Les effluents sortant de Dentec sont surtout de nature biomédicale. La faible teneur du phosphore dans ce site s'explique, soit par un traitement des effluents, soit par l'utilisation d'autres produits (Iode par exemple) dans les services de radiologie. L'île de la Madeleine est

un parc forestier pouvant ainsi libérer de la matière organique dans le milieu. Les autres sites, dont les teneurs sont très élevées, sont caractérisés par des eaux usées urbaines et industrielles non traitées apportant beaucoup de matières organiques.

✓ Azote

L'azote est un indicateur majeur de pollution ; les composés azotés souvent déterminés dans l'étude de la qualité des eaux sont l'ion ammonium, les nitrates et les nitrites.

✓ Ion ammonium

Dans les eaux superficielles naturelles, l'ammonium provient de la matière organique azotée et des échanges gazeux entre l'eau et l'atmosphère et se trouve en faible concentration (souvent inférieur à  $0,1 \text{ mg l}^{-1}$ ) (Makhoukh et coll., 2011 ; Reggam et coll., 2015). Les teneurs obtenues pour l'ensemble des sites dépassent de loin cette valeur montrant ainsi que les sites sont très pollués en ammonium qui provient de la matière organique azotée due à l'érosion des côtes (Almadies Vivier, Ouakam), à la dégradation de la matière végétale et animale (Ile de la Madeleine, Hann1, Hann2, Yoff Tonghor), aux eaux usées urbaines (Soumbédioune, Hann1, Hann2, Cambérène, Ngor) et industrielles (Hann1, Hann2, Port).

✓ Nitrates et Nitrites

Les travaux de Diop et coll. (2014) montrent des teneurs en nitrates très faibles par rapport à nos résultats, déduisant ainsi une intensification des activités anthropiques. Globalement, les teneurs en nitrates et nitrites dépassent les critères de vie aquatique chronique ( $3,60 \text{ mg l}^{-1}$  pour les nitrates et  $0,02 \text{ mg l}^{-1}$  pour les nitrites). Dans le milieu aquatique, les nitrates et les nitrites sont issus les uns des autres via des réactions de nitrification (milieu aérobie) et de dénitrification (milieu anaérobie). Ces réactions dépendent des conditions du milieu telles que par *e.g.* la présence ou non de l'oxygène, la nature microbiologique du milieu et la nature de la source de pollution (Makhoukh et coll., 2011 ; Reggam et coll., 2015), ce qui entraîne la variabilité observée entre les sites. A Cambérène, la faible teneur en nitrates obtenue est liée à l'activité de la station d'épuration qui est, paradoxalement, à l'origine de la pollution en nitrites souvent utilisés comme agent inhibiteur de la corrosion dans les stations de traitement des eaux. Soumbédioune est surtout caractérisé par une nitrification plus intense que les autres sites, entraînant ainsi une élévation des teneurs en nitrates et une faible diminution du pH. La présence de nitrates à Ouakam est due, essentiellement, à une nitrification modérée à partir de l'azote. Les teneurs élevées en phosphore témoignent de la présence de la matière organique qui est une source de pollution de l'ammoniaque. Les teneurs moyennes en nitrates et en nitrites notées à

Yoff Tonghor, Ngor, Almadies Vivier, Port, Hann1 et Hann2 sont le résultat d'une autoépuration due aux activités des bactéries et des algues (photosynthèse).

#### 4.2.2. Les Eléments Traces Métalliques (ETM)

Globalement, les valeurs obtenues sont très élevées par rapport aux résultats de Diop et coll. (2014) qui ont travaillé dans la même zone pour les éléments suivants : Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Ni et Zn. Plusieurs études en Afrique révèlent, par comparaison, que la presqu'île du Cap-Vert est très polluée en ETM. C'est le cas de Ngaram (2011) au Tchad pour Mn et le Fe ; de Oumar (2014) au Cameroun pour Cd, Cr, Ni et Zn ; de Basraoui (2010) au Maroc pour Cd, Cu et Fe et de Onivogui et coll. (2013) en République de Guinée pour Cd et Hg. Par contre, pour certains métaux, les valeurs obtenues sont inférieures par rapport aux résultats de Ngaram (Cu, Ni, et Zn) ; de Oumar (Fe) et d'Onivogui et coll. (2013) (Co, Ni et Zn).

Par rapport aux résultats d'Ould Bilal et coll. (2015) qui ont quantifié les métaux sur l'arche *Anadara senilis* en Mauritanie, on peut dire que la présence du Cd, Pb et Hg dans les eaux littorales du Parc National du Banc d'Arguin présente un risque pour la qualité des espèces aquatiques et la santé humaine par les phénomènes de bioaccumulation (accumulation de toxines / polluants au sein d'un organisme acquis à partir de son environnement et son alimentation.) et de bioamplification (augmentation progressive des toxines à mesure que nous progressons dans la chaîne alimentaire). En Mauritanie, la qualité de la baie du Lévrier a été mise en évidence par l'étude de la bioaccumulation du Cd et du Pb sur la moule *Perna perna*. Les résultats obtenus dans cette étude indiquent que la baie de Lévrier est de bonne qualité, contrairement, aux résultats attendus surtout pour le Cd qui pose le plus grand des problèmes pour l'environnement marin en Mauritanie (Wagne, 2013).

Les métaux constituent un groupe très dangereux (e.g. rémanent, bioaccumulable, toxique) et peuvent avoir des effets néfastes sur les ressources halieutiques et la santé humaine. A forte absorption, on peut observer : e.g. des effets sur le système nerveux (Hg : cas de Yoff Tonghor et Hann1 ; Pb), des lésions rénales (Al; Cd : cas de Cambérène) ; des perturbations de Hématose (Pb), des effets sur la reproduction et le développement (Cu : cas de Soubédioune), des effets cancérogènes (Cr : cas de Hann1 et Port de Dakar ; Co : cas de Cambérène ; Ni : cas de Cambérène et Yoff Tonghor ; Pb), d'où l'intérêt de déterminer leurs concentrations dans l'évaluation de la qualité chimique des eaux (Diop et coll., 2014 ; Diop et coll., 2012 ; INERIS, 2005, 2005, 2005, 2005, 2006, 2006, 2010, 2012, et 2014).

Les teneurs observées sur la presqu'île du Cap-Vert sont au-dessus des critères de la protection de la vie aquatique (effets chroniques) sauf le Fe et Mn (pour tous les sites) et Hg (pour le site de Dakar le Dantec) qui sont nettement inférieurs à ces critères, ce qui pourrait justifier la bonne

gestion du mercure dans l'hôpital le Dantec. D'ailleurs, Touré et coll. (2016) ont montré que les effluents sortant de cet hôpital respectent les normes sénégalaises (NS 05-061 de rejet des ETM dans les effluents destinés à être déversés en mer) en ce qui concerne les métaux suivants : As, Cd, Cu, Ni, Pb et Zn.

Les métaux proviennent, essentiellement, des mines et fonderies des métaux, des industries, de l'agriculture, des dépôts de déchets sur le sol, des retombés atmosphériques (aérosols). Au Sénégal, les fortes concentrations d'aérosols sont observées pendant la saison sèche et les faibles concentrations, en saison des pluies. Cette variabilité s'associe souvent au gradient de pression atmosphérique, à l'origine du vent et aux précipitations. Les métaux souvent rencontrés dans ces aérosols sont : Al, Fe (origine naturelle), Cd, Pb, Zn (trafic urbain, combustion carburant), Ni, Mn, Co, Cr, Cu, As, origine naturelle et/ou anthropique (Geffard, 2001 ; Dieme, 2011 ; Dijon, 2011).

La forte présence de l'aluminium dans la presqu'île du Cap-Vert [teneur supérieur au critère de la protection de vie aquatique (effets chronique)], est probablement due aux aérosols, à son utilisation dans la fabrication d'alliages, les constructions immobilières (portes et fenêtres), les forgeries artisanales, certaines peintures, les cosmétiques et dentifrices. Les pics observés à Cambérène et Dakar le Dantec sont le résultat de son emploi dans le traitement des eaux et boues d'épuration (Cambérène) et dans les matériaux d'impression dentaire (Dakar le Dantec). La présence du Cadmium avec des teneurs supérieures aux critères de la protection de la vie aquatique (effets aigus et chroniques) est potentiellement causée par *e.g.* par les aérosols ou la remise en suspension naturelle par les courants. Ces aérosols sont, également, la principale source de pollution du Cobalt dans la presqu'île dont les teneurs sont au-dessus des critères de la protection de la vie aquatique (effets aigus et chroniques).

Le Cuivre est, fortement, présent dans la presqu'île par rapport aux critères cités ci-dessus. Les systèmes septiques sont surtout à l'origine de cette présence. Les faibles teneurs observées à Cambérène et au Port sont le résultat de l'activité de la station d'épuration (Cambérène) et la non-présence des rejets septiques (à la sortie du Port). Par contre, les effluents à haut débit à Soumbédioune expliquent les teneurs élevées en cuivre qui y sont enregistrées.

Les teneurs en chrome notées dans la presqu'île sont supérieures aux critères de la protection de vie aquatiques (effets chroniques) et sont dues aux retombés atmosphériques et aux rejets industriels (*e.g.* plastique, raffinerie). La variabilité entre les sites (les sites du Nord et nord-ouest et les sites du sud et sud-ouest) est caractéristique de la nature des effluents : rejets industriels, électropolissage des prothèses dentaires, produits chimiques à Dakar le Dantec, Hann1, Hann2 et Port et eaux usées domestiques pour le reste des sites.

Le Fer et le Manganèse présentent des teneurs très faibles par rapport aux critères et aucune variabilité notable n'a été observée. Leur présence dans le milieu marin est peut être liée à une source naturelle. Les teneurs élevées en nickel par rapport aux mêmes critères s'expliquent par les retombés atmosphériques (aérosols).

Supérieur aux critères, la présence du Zinc est liée aux retombés atmosphériques (aérosols), aux rejets industriels (usines de plastique qui l'utilisent comme stabilisant des PVC), à l'utilisation des fertilisants et des pesticides. Les faibles teneurs obtenues à Cambérène et au Port sont dues à l'activité de la station d'épuration (Cambérène) et l'absence d'usines de plastique à la sortie du Port. Les sources de pollution du mercure au Sénégal sont mentionnées ci-dessus (voir § 1.10.1). Les teneurs observées sont au-dessus des critères de la protection de la vie aquatique (effets chroniques) sauf le site de Dakar le Dantec qui présente une valeur nettement inférieure à ces critères.

### **4.3. Analyses statistiques**

Dans le milieu aquatique, la spéciation des métaux conditionne la mobilité et la biodisponibilité de ces métaux. Cette spéciation (répartition d'un élément en ses différentes formes : sous forme ion hydraté, sous forme complexé par des ligands organiques et/ou inorganiques, sous forme adsorbé sur les colloïdes ou particules inorganique (FeOOH, Fe(OH)<sub>3</sub>, Oxydes de Mn, Ag<sub>2</sub>S, argiles) et organiques) dépend essentiellement des conditions physicochimiques du milieu (force ionique, du pH, de la présence d'autres cations majeurs et traces) (Diop, 2014 ; Louis, 2007).

#### **4.3.1. Tableau de corrélation**

Les fortes corrélations des teneurs en ETM dans un milieu aquatique peuvent indiquer les mêmes sources de pollution, les sources similaires ou les affinités des réactions physicochimiques (Diop, 2014, Nadem et coll., 2015 ; Fahssi et Chafi, 2015). Notre étude est portée sur la forme dissoute des ETM qui ne représente pas la totalité des quantités en métaux émises dans le milieu. Par conséquent, les fortes corrélations observées entre les métaux s'expliquent beaucoup plus sur la mobilité de ces éléments par rapport aux conditions du milieu. Une corrélation positive montre que les éléments ont tendance à se mettre sous la même forme (dissoute ou particulaire) (c'est le cas : Cd/Co, Cd/Fe, du Co/Fe, Fe/Ni). A l'inverse, une corrélation négative montre que les éléments ont tendance à évoluer dans le sens opposé (l'un tend vers la forme dissoute et l'autre vers la forme particulaire, et vice versa) (c'est le cas du Cu/Cd, Cu/Co, Cu/Fe, Cd/Hg<sub>s</sub>, Cr/Ni, Fe/Hg<sub>s</sub>, et Ni/Hg<sub>s</sub>).

#### **4.3.2. Régression linéaire**

La TGS met en évidence la toxicité (biodisponibilité), les interactions et les effets maximaux des polluants. Elle relate également la sensibilité de l'espèce étudiée (Galgani, 2007 ; Galgani, 2010 et coll). Les effets significatifs du Cd, du Cr, du Zn et du Hg<sub>s</sub> sur la TGS s'expliquent par des effets synergiques et antagonistes des polluants (métaux et autres contaminants non déterminés) qui ont donné une toxicité atteignant le développement larvaire de l'huître creuse et entraînant les Anomalies de Développement Larvaire (ADL) observées.

#### **4.3.3. Analyse des Composantes Principales (ACP)**

L'Analyse en Composantes Principales (ACP) nous permet de résumer et de faire ressortir les résultats les plus pertinents. A l'issue de cette analyse, on a observé la pollution métallique caractéristique de chaque site :

Soumbédioune est particulièrement pollué par le Cu. Cette pollution est principalement due par exemple aux effluents à haut débit enregistrés à Soumbédioune en provenance des systèmes septiques.

Le site de Cambérène est caractérisé par une pollution au Co, Ni, Fe et Cd. Les aérosols sont sans doute à l'origine de cette pollution, car la variabilité observées entre tous les sites pour ces métaux (Co, Ni, Fe et Cd) semble confirmer cette hypothèse.

A Hann1, on observe une pollution au Hg<sub>s</sub> et Cr. Cette pollution est causée par les aérosols et les rejets sauvages (canal non traité) et sans doute industriels. La faible courantologie qui favorise la sédimentation du Hg<sub>s</sub> et les rejets industriels à Hann1 explique, respectivement, l'accentuation du Hg<sub>s</sub> et du Cr dans ce site. C'est ce même phénomène qu'on observe au Port de Dakar concernant la pollution du Cr.

Yoff Tonghor est marqué par le Ni et Hg. Ce sont surtout les aérosols (Ni), les systèmes de traitement des eaux usées, les décharges informelles de déchets municipaux. (Hg) qui ont entraîné cette pollution. Ngor est singularisé par la pollution en Mn qui est très faible et en Zn. Leur présence dans ce site s'explique sans doute par les aérosols.

## Conclusion et perspectives

Notre étude menée sur la presqu'île du Cap-Vert, nous permet de retenir, au-delà de la faisabilité d'une telle étude à faible coût et du fort intérêt qu'elle a suscité, que les sédiments marins et les eaux de surface de la presqu'île du Cap-Vert sont, globalement, de mauvaise qualité en se basant sur des critères canadiens sur la protection de la vie aquatique établit en 2013. Les sédiments présentent tous une certaine toxicité vis à vis des espèces aquatiques benthiques. Les résultats d'analyses en SAA indiquent des concentrations, globalement, élevées des ETM (Al, Cd, Cr, Co, Cu, Hg, Ni et Zn), à l'exception du Fe et Mn, qui sont inférieurs aux critères de « protection de la vie aquatique » (effets aigus et chroniques). La moyenne des facteurs de pollution de chaque métal pour la presqu'île a permis de classer les ETM par ordre de pollution décroissante: Cu, Ni, Cr, Cd, Co, Al, Hg, Zn, Mn et Fe dont les deux derniers sont en dessous du seuil canadien considéré. Les analyses statistiques montrent des corrélations<sup>1</sup> positives (Cd/Co, Cd/Fe, Co/Fe, Fe/Ni) et négatives (Cu/Cd, Cu/Co, Cu/Fe, Cd/Hg<sub>s</sub>, Cr/Ni, Fe/Hg<sub>s</sub>, et Ni/Hg<sub>s</sub>) entre les ETM. Seuls le Cd, le Cr, le Zn et le Hg<sub>s</sub>, par leur biodisponibilité, leurs interactions et leurs effets maximaux, ont des effets significatifs sur la TGS montrant ainsi une faible implication des ETM étudiés (pris dans leur ensemble) dans cette toxicité (TGS). L'Analyse en Composantes Principales des ETM explique 60 % de l'information et caractérise la pollution des sites de la manière suivante : Soumbédioune (Cu) ; Cambérène (Co, Ni, Fe, Cd) ; Hann1 (Hg<sub>s</sub>, Cr) ; Yoff Tonghor (Ni et Hg) ; Port de Dakar (Cr) et Ngor (Zn et Mn). L'ensemble des résultats obtenus nous laisse envisager des effets sur le niveau de la pollution selon les polluants, l'importance de la granulométrie des sédiments, de la nature de la pollution, de la taille des effluents, des apports anthropiques et des retombées atmosphériques comme celle des comportements des populations. Dans le but de réaliser un diagnostic en support à la recherche d'une solution durable à cette pollution de l'environnement marin urbain, nous souhaiterons élargir cette étude à d'autres polluants (*e.g.* hydrocarbures, micro et mésoplastiques, pesticides) ainsi qu'à la réalisation des bioessais dans les différents compartiments de ce milieu (sédiments, eaux, faune et flore) afin de mettre en place un réseau de surveillance écotoxicologique au niveau national, sous régional ou régional. Une analyse statistique intégrant la variabilité spatiale et temporelle plus approfondie permettra par ailleurs d'optimiser les stratégies de surveillance, d'échantillonnage et d'analyse écotoxicologiques. Ces observations sont désormais requises au plus haut niveau de l'état via les engagements pour développement durable (ODD14) et le changement de la constitution sénégalaise qui donne le droit à chaque citoyen de jouir d'un environnement sain, y compris marin.

---

<sup>1</sup> Sans application du test de Benfouilli

## Références Bibliographiques

- Abdelatif C., Adrichem E. V., Ali A. E., Araujo A., Ba A., Baba M. L. O., Balde D., Stratégie régionale pour les aires marines protégées en Afrique de l'Ouest, 2003, 74p.
- Afnor, Qualité de l'eau – Bio-indicateur de la toxicité potentielle de milieu aqueux – Détermination de la toxicité potentielle d'échantillons aqueux sur le développement embryonnaire de bivalve, norme XP (T90-382), Septembre 2009, Afnor, Agence française de normalisation, Paris.
- Agence Nationale de la Statistique et de la Démographie (ANSD), Recensement général de la population et de l'habitat, de l'agriculture et de l'élevage (RGPHAE) 2013, Atlas démographique du Sénégal, rapport final, Aout 2015, 67p.
- Auger P-A., Gorgues T., Machu E., Aumont O., Brehmer P., What drives the spatial variability of primary productivity and matter fluxes in the North-West African upwelling system? A modelling approach and box analysis. *Biogeosciences Discuss.*, 13, 2016, 6419-6440, doi:10.5194/bg-2016-156.
- Ba K., Diagne B., Ndour A., Diédhiou C., Dabo B., Inventaire des initiatives de protection côtières de Saint-Louis à Mbour, Rapport final du projet d'intégration de l'adaptation aux changements climatiques dans le développement durable au Sénégal (INTAC), 2011, 97p.
- Badreddine B., Biosurveillance de la pollution de la lagune de Bizerte (Tunisie) par l'analyse comparée des niveaux de contamination et de l'écotoxicité des sédiments et du biote, PhD Thesis Univ. Bordeaux Ecole doc. Sci. et Environnement, Fac. Sci. De Bizerte, France, 2015, 313p.
- Baldovini J., Etude de la teneur en mercure dans les sédiments de la rade de Toulon. Rapport de stage de Master 1, Université du sud de Toulon-Var, France, 2011, 34p.
- Basraoui Y., Zegmout M., Eladdouli J., Demnati S., Chahlaoui A., Chafi A., Contribution à l'étude de la pollution de la zone cotière Saidia/Mouluya (Maroc Nord Oriental), ISSN : 1813-548X, 2010, 11p.
- Bobin N., N'Gom-Ka R., Ka S., Thiaw T. O., Tito de Morais L., Le Loc'h F., Rozuel-Chartier E., Auger A., Chiffolleau J. F. Assessment of trace metal contamination in mangrove ecosystems from Senegal, West Africa, *Chemosphere* 2012, 9p. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.06.019>
- Brehmer P., Thang D., C., Laugier T., Galgani F., Laloë F., Darnaude A. M., Fiandrino A., Caballero P. I., Mouillot D., Field investigations and multi-indicators for management and conservation of shallow water lagoons: practices and perspectives. *Aquatic Conservation, Marine and Freshwater Ecosystems*, doi 10.1002/aqc.1231., 21(7), 2011, 728-742 pp.
- Brehmer P., Laugier T., Kantoussan J., Galgani F., Mouillot D., Does coastal lagoon habitat quality affect fish growth rate and their recruitment? Insights from fishing and acoustic surveys. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 126, 2013, 01-06 pp.
- Conseil canadien des ministres de l'environnement, Recommandations canadiennes pour la qualité des eaux : protection de la vie aquatique salinité (eau de mer), dans Recommandations canadiennes pour la qualité de l'environnement, 1999, Winnipeg, le conseil.
- Cossa D., Coquery M., Nakhlé K., Claisse D., Dosage du mercure total et du monométhylmercure dans les organismes et les sédiments marins, ISBN : 2-84433-105-X, 2002, 27p.
- De Villers J., Squilbin M., Yourassowsky C., Qualité physico-chimique et chimique des eaux de surface : cadre général, Les données de l'IBGE : l'eau à Bruxelles, 2005, 16p.

[http://www.ibgebim.be/uploadedFiles/Contenu\\_du\\_site/Centre\\_de\\_documentation/Fiche\\_Eau\\_02\\_FR.pdf?langtype=2060](http://www.ibgebim.be/uploadedFiles/Contenu_du_site/Centre_de_documentation/Fiche_Eau_02_FR.pdf?langtype=2060).

- DEEC, Inventaire national des rejets et émissions de mercure au Sénégal, Rapport final, Ministère de l'environnement et du développement durable, 2014, 57p.
- Démoulin L., Cartographie de la contamination chimique des sédiments de la Rade de Toulon, RST.ODE/LER-PAC/4-10, 2014, 54p.
- Deronzier G., Schétrite S., Racault Y., Canler J. P., Liénard A., Héduit A., Duchène P., Traitement de l'azote dans les stations d'épuration biologique des petites collectivités, Ministère de l'agriculture et de la pêche, Document technique FNDAE n° 25, ISBN : 2-11-092852-2, 1990, 79p.
- Dieme D., Caractérisation physicochimique et étude des effets toxiques sur les cellules pulmonaires BEAS-2B des polluants particulaires de la ville de Dakar (Sénégal), PhD Thesis Univ. du Litt. Côte d'Opale, Médecine humaine et pathologie, France, NNT : 2011 DUNK 0309, 2011, 159p.
- Dijon M.D., La pollution de l'air à Dakar, Phd memoria. Univ. Bourgogne, U.F.R Sci. Humaines, Dpt Géographie, France, 2011, 71p.
- Diop C., Dewaelé D., Diop M., Touré A., Cabral M., Cazier F., Fall M., Diouf A., Ouddane B., Assessment of contamination, distribution and chemical speciation of trace metals in water column in the Dakar coast and the Saint Louis estuary from Senegal, West Africa, Marine Pollution Bulletin, 86, 539–546, 2014, 8p.
- Diop C., Dewaelé D., Touré A., Cabral M., Cazier F., Fall M., Ouddane B., Diouf A., Etude de la contamination par les éléments traces métalliques des sédiments côtiers au niveau des points d'évacuation des eaux usées à Dakar (Sénégal), ISSN : 1718-8598, 2012, 10p.
- Diop C., Etude de la contamination, de la spéciation et de la biodisponibilité des éléments traces métalliques dans les eaux et sédiments côtiers et estuariens aux Sénégal : Evaluation de la toxicité potentielle. PhD Thesis UCAD, Dpt pharma. Dakar, Sénégal, 2014, 224p.
- Diop M., Howsam M., Diop C., Cazier F., Goossens J. F., Diouf A., Amara R., Spatial and seasonal variations of trace elements concentrations in liver and muscle of round Sardinelle (*Sardinella aurita*) and Senegalese sole (*Solea senegalensis*) along the Senegalese coast, Chemosphere 144, 758 – 766, 2016, 9p.
- Diop M., Howsam M., Diop C., Goossens J. F., Diouf A., Amara R., Assessment of trace element contamination and bioaccumulation in algae (*Ulva lactuca*), muscles (*Perna perna*), shrimp (*Penaeus kerathurus*), and fish (*Mugil cephalus*, *Sarotherodon melanotheron*) along the senegalese coast. Marine Pollution Bulletin (2015), 2015, 5p, <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.12.038>.
- Diop T. B., Teneurs mercurielles des céphalopodes des côtes sénégalaises, PhD memoria. ENCR (Ecole Nationale des Cadres Ruraux), Bambey Sénégal, 1997, 45p.
- Domain F., Carte sédimentologiques du plateau continental sénégalais. Extension à une partie du plateau continental de la Mauritanie et de la Guinée Bissau, O.R.S.T.O.M., ISBN : 2-7099-0438-1, 1977, 27p.
- Donald D. M., Scott R. C., Fred D. C., Edward R. L., Christopher G. I., Development and evaluation of sediment quality guidelines for florida coastal waters, Ecotoxicology 5, 253-278 (1996), 26.

- Environnement Canada et ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec, Critères pour l'évaluation de la qualité des sédiments au Québec et cadres d'application : prévention, dragage et restauration, 2007, 39p.
- Environnement Canada, Guide pour l'étude du suivi des effets sur l'environnement aquatique par les mines de métaux, 2002, 69p.  
[http://www.ec.gc.ca/eem/pdf\\_publications/francais/chapitre1.pdf](http://www.ec.gc.ca/eem/pdf_publications/francais/chapitre1.pdf)
- Environnement Canada, Guide Technique pour l'étude de suivi des effets sur l'environnement (ESEE) des pâtes et papiers, 2010, 556p. [https://www.ec.gc.ca/esee-eem/AEC7C481-D66F-4B9B-BA08-A5DC960CDE5E/COM-1434---Tec-Guide-for-Metal-Mining-Env-Effects-Monitoring\\_Fr\\_02.pdf](https://www.ec.gc.ca/esee-eem/AEC7C481-D66F-4B9B-BA08-A5DC960CDE5E/COM-1434---Tec-Guide-for-Metal-Mining-Env-Effects-Monitoring_Fr_02.pdf).
- European Commission, Directive n° 2000/60/CE du 23/10/00 établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau.  
[http://www.ineris.fr/aida/consultation\\_document/995](http://www.ineris.fr/aida/consultation_document/995).
- European Commission, No 2015/1005 of 25 June 2015 amending regulation (EC) no 1881/2006 as regards the maximum levels for lead in foodstuffs. Official, J, Eur, 2015, 161 (9) (5 pp).
- European Commission, No 488/2014 of 12 May 2014 amending regulation (EC) no 1881/2006 as regards the maximum levels for cadmium in foodstuffs official, J. Eur, 2014, 138 (75) (5) pp.
- Fahssi A., Chaf A., 2015. Contribution à l'étude de la bioaccumulation métallique dans les sédiments et les organismes aquatiques du littoral de Saïdia (Maroc oriental), ISSN : 1857 – 7881, 2015, 27p.
- Ferrara R., Maserti B. E., Mercury concentration in the water, particulate matter, plankton and sediment of the Adriatic sea. Marine Chemistry, 38, 237-249, 1992, 237-249pp.
- Foucher D., Géochimie du mercure dans les sédiments estuariens et côtiers : cas de la Seine (France) et la baie de Kastela (Croatie), PhD Thesis USTL/Ecole doct., Des Sciences de la matière et du rayonnement. UFR de chimie, Spécialité: Spectrochimie, Molécules, Solides, Réactivité, France, 2002, 279p.
- Galgani F., Baldi Y., Evaluation de la toxicité globale des sédiments du littoral du Languedoc Roussillon, du Var et des Alpes Maritimes par un bio essai : Développement larvaire de l'huître creuse *Crassostrea gigas* en présence d'élutriats de sédiments, Document Ifremer, RST/DOP/LER/PAC/10-02, Direction des Opérations, Laboratoire Environnement Ressources Provence Azur Corse, 2010, 29p.
- Galgani F., Evaluation de la toxicité globale des sédiments du littoral des bouches du Rhône par un bio essai : développement larvaire de l'huître creuse *Crassostrea gigas* en présence d'élutriats de sédiments, RST.DOP/LER-PAC/07-06, 2007, 23p.
- Galgani F., Senia J., Guillou J. L., Laugier T., Munaron D., Andral B., Guillaume B., Coulet E., Boissery P., Brun L., Bertrand M. C., Assessment of the environmental quality of french continental mediterranean lagoons with oyster embryo bioassay, DOI 10.1007/s00244-009-9302-2, 2009, 12p.
- Geffard O., Toxicité potentielle des sédiments marins et estuariens contaminés : évaluation chimiques et biologique, biodisponibilité des contaminants sédimentaires, PhD Thesis UvBI. DPT écotoxicologie Bordeaux, France, 2001, 351p.

- Gesamp, 2010, IMO/FAO/UNESCO-IOC/UNIDO/WMO/IAEA/UN/UNEP joint of Experts of the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection) ; Bowler, T., and Kershaw, P. J., (Eds.), Proceedings of the Gesamp international workshop on microplastic particles as a vector in transporting persistent, bioaccumulating and toxic substances in the oceans. Gesamp rep. Stud. No, 82, 2010, 68pp.
- Hach Company, Colorimètre DR/890 Méthode d'analyses, Jk/te/dk 02/09 4<sup>ème</sup> Edition, 2009, 438p.
- Hannouche A., Chebbo G., Ruban G., Tassin B., Joannis C., Relation entre la turbidité et les matières en suspension en réseau d'assainissement unitaire, Techniques Sciences Méthodes, ASTEE/EDP Sciences, 2011, 2010 (10), 10p.
- INERIS, Aluminium et ses dérivés, Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques, INERIS -DRC-02-25590-02DF41.doc Version N°2-2-janvier 2005, 53p.
- INERIS, Cadmium et ses dérivés, Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques, INERIS -DRC-11-117259-10308B.doc Version N°3-avril 2014, 111p.
- INERIS, Chrome et ses dérivés, Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques, INERIS -DRC-01-05590-00DF253.doc Version N°2-4-février 05, 2005, 80p.
- INERIS, Cobalt et ses dérivés, Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques, INERIS -DRC-02-25590-02DF55.doc Version N°2-1avril 2006, 55p.
- INERIS, Cuivre et ses dérivés, Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques, INERIS -DRC-02-25590-02DF54.doc Version N°1-5-mars 05, 2005, 66p.
- INERIS, Mercure et ses dérivés, Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques, INERIS -DRC-10-100074-00926A Version N° 4-septembre 2010, 120p.
- INERIS, Nickel et ses dérivés. Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques, INERIS -DRC-02-25590-02DF44.doc Version N°1-2juillet 2006, 71p.
- INERIS, Qualité chimique des sédiments fluviaux en France, Synthèse des bases de données disponibles. Rapport d'étude 03/06/2010, N° INERIS-DRC-10-105335-04971A, 2010, 100p.
- INERIS, Zinc et ses dérivés, Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques, INERIS -DRC-01-25590-00DF259.doc Version N° 2-2mars 2005, 69p.
- Kikouama Odilon J.R., Konan K. L., Katty A., Bonnet J. P., Baldé L., et Yagoubi N., (2009). Physicochemical characterization of edible clays and release of trace elements. *Appl. Clay Sci.*, 43, 2009, 135-141 p.
- Le Croizier G., Schaal G., Gallon R., Fall M., Le Grand F., Munaron J-M., Rouget M-L., Machu E., Le Loc'h F., Lae R., De Morais L. T., Trophic ecology influence on metal bioaccumulation in marine fish : inference from stable isotope and fatty acid analysis
- Le Hir P., Aide-mémoire de dynamique sédimentaire, Ifremer centre de Brest, Dpt DYNECO, Laboratoire PHYSED, 2008, 74p. <http://archimer.ifremer.fr/doc/2008/rapport-6273.pdf>
- Leaute F., Biochimie des contaminants organiques HAP, PCB et pesticides organochlorés dans les sédiments de l'étang de Thau, PhD Thesis UPMC, Dpt Biochimie marine, Paris, France, 2008, 255p.
- Lindeboom H., The coastal zone: an ecosystem under pressure, in: Field J. G. et coll., (Ed.) Oceans 2020: science, trends, and the challenge of sustainability, 2002, 49-84pp.

- Louis Y., Garnier C., Omanovic D., Pizeta I., Lenoble V., Gonzalez J-L., Mounier S., Analyse et modélisation des interactions cation/métaux traces-Matière organique naturelle dissoute en milieu marin : intérêts de la pseudopolarographie 8<sup>ème</sup> colloque IHSS-France sur les rôles et fonction des matières organiques dans l'environnement, Lyon, France. <hal-00761856>, 2007. <https://memsic.ccsd.cnrs.fr/GIP-BE/ha1-00761856>.
- Makhoukh M., Sbaa M., Berrahou A., Clooster M. V., Contribution à l'étude physicochimique des eaux superficielles de l'Oued Moulouya (Maroc oriental), ISSN: 1112-3680, 2011, 21p.
- Mamindy-Pajany Y., Hamer B., Roméo M., Gêret F., Galgani F., Durmisi E., Marmier N., The toxicity of composted sediments from Mediterranean ports evaluated by several bioassays, *Chemosphere* 82 (2011) 362–369, 2011, 8p.
- Nadem S. et coll., El Baghdadi M., Rais J., Barakat A., Evaluation de la contamination en métaux lourds des sédiments de l'estuaire du Bou Regreg (Côte atlantique, Maroc). ISSN: 2028-2508, 2015, 8p.
- Ndoye S., Capet X., Estrade P., Dagorne D., Sow B. A., Lazar A., Gaye A., Brehmer P., Sea Surface temperature 'SST' patterns and dynamics of the Southern Senegal-Gambia upwelling center. *Journal of Geophysical Research – Oceans*, 119, 2014, 8315-8335.
- Ngaram N., Contribution à l'étude analytique des polluants (en particulier de type métaux lourds) dans les eaux de fleuve Clari lors de sa traversée de la ville de N'giamena, PhD Thesis Univ Claude Bernard Lyon1, Ecole doctorale de chimie de Lyon, 2011, 166p.
- Onivogui G., Balde S., Bangoura K., Barry M. K., Evaluation des risques de pollution en métaux lourds (Hg, Cd, Pb, Co, Ni, Zn) des eaux et des sédiments de l'estuaire du fleuve Konkouré (Rep. De Guinée), ISSN : 1813-548X, 2013, 9p.
- Ould Bilal S., Tounkara H., Ould Zamel M. L., Yahya Dartige A., Ould Elmahmoud M. S., Ould Brahim M., Sidoumou Z., Dennai N., Contamination de l'arche Anadara senilis par les métaux lourds, Cas du Cadmium, Plomb et Mercure au niveau des eaux littorales du Parc National du Banc d'Arguin (PNBA), Mauritanie, *Afrique Science*, Vol.11, N°5 (2015), ISSN 1813-548X, <http://www.afriquescience.info/document.php?id=5184>.
- Oumar B., Ekengele N. L., Balla O. A. D., Evaluation du niveau de pollution par les métaux lourds des lacs Bini et Dang, Région de l'Adamaoua, Cameroun, 2014, ISSN 1813-548X, 15p.
- Rauch M., Processus de minéralisation benthique au sein des systèmes sédimentaires intertidaux de Manche orientale. PhD thesis Univ. des Sc. et Tech. de Lille Fre 2816ELICO, Spécialité : Biodiversité et Ecosystèmes Fossiles et Actuelle, France, 2007, 244p.
- Rebert J., P., Hydrologie et dynamique des eaux du plateau continental sénégalais, Documents scientifique du CRODT, Sénégal, 1982, 101p.
- Reggam A., Bouchelaghem H., Houhamdi M., Qualité physicochimique des eaux de l'Oued Seybouse (nord-est de l'Algérie): caractérisation et analyse en composantes principales (physicochemical quality of the waters of the Oued Seybouse (north-eastern Algeria): characterization and principal component analysis, ISSN: 2028-2508, 2015, 9p.
- Rodier J., Legube B., Merlet N., L'analyse de l'eau, 9<sup>ème</sup> Edition, Dunod, Paris. ISBN : 978-2-10-054179-9, 2009, 1526p.
- Sané M., Contribution à l'étude des polluants métalliques dans le littoral du Sénégal : cas de la cote de Dakar et l'estuaire de Saint Louis deux zones sous forte pression anthropique, PhD Thesis UCAD, Dpt pharm., Dakar, 2014, 72p.

- Santé Canada, Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada : document technique — La turbidité. Bureau de la qualité de l'eau et de l'air, Direction générale de la santé environnementale et de la sécurité des consommateurs, Santé Canada, Ottawa (Ontario). (Numéro de catalogue H144-9/2013F-PDF), 2012, 93p.
- Soudan F., Incidences de la pollution sur la vie marine, Science et Pêche, Bulletin Institut Pêches maritimes, N° 169, avril 1968, 10p, Open Access version : <http://archimer.ifremer.fr/doc/00000/7280/>.
- Touré A., Garat A., Diop C., Cabral M., Epote M. J., Leroy E., Fall M., Diouf A., Dehon B., Allorge D., Présence de métaux lourds et de résidus médicamenteux dans les effluents des établissements de santé de Dakar (Sénégal). ISSN 1997-342X, 2016, 1422-1432p-p.
- Traoré A., Soro G., Ahoussi K. E., Bamba B. S., Soro N., Biemi J., Niveau de contamination en métaux lourds des sédiments d'une lagune tropicale : la lagune Aghien (Sud-Est de la côte d'Ivoire). ISSN : 1813-548X, 2014, 16p.
- Tregnier C., Apports en matière organique marine et terrigène sur la marge équatoriale ouest africaine : rôle joué par le canyon sous-marin du Zaïre. Approche par les biomarqueurs lipidiques, PhD Thesis U.P.M.C., Spéc. Biogéochimie marine, 2005, 129p.
- Wagne M. M., Dartige A., Sefrioui S., Ould Zamel M. L., Touunkara H., Bah M. L. B., Utilisation de la moule *Perna perna* en biosurveillance du cadmium et du plomb dans les eaux de la baie du Lévrier, Mauritanie. Journal des Sciences Halieutique et Aquatique, 7, 2013, 287-295pp.
- Zhang J., Lui C. L., Riverine composition and estuarine geochemistry of particulate metal in China - Weathering features, anthropogenic impact and chemical fluxes, Estuarine and Coastal Shelf Sciences, 54, 2000, 1051-1070pp.

## Annexes

### Annexe 1 : Analyse granulométrique

Tableau 4 : Temps de chute des argiles et limons et celui des argiles seulement en fonction de la température pour une profondeur de 10cm.

Température en °C	Temps de chute argiles et limons	Temps de chute argile
15	5 mn 27 s	9 h 05 mn
16	5 mn 19 s	8 h 51 mn
17	5 mn 10 s	8 h 37 mn
18	5 mn 3 s	8 h 24 mn
19	4 mn 55 s	8 h 12 mn
20	4 mn 48 s	9 h 00 mn
21	4 mn 41 s	7 h 48 mn
22	4 mn 34 s	7 h 37 mn
23	4 mn 28 s	7 h 26 mn
24	4 mn 22 s	7 h 16 mn
25	4 mn 15 s	7 h 06 mn
26	4 mn 10 s	6 h 56 mn
27	4 mn 04 s	6 h 47 mn
28	3 mn 59 s	6 h 38 mn
29	3 mn 54 s	6 h 29 mn
30	3 mn 48 s	6 h 21 mn
31	3 mn 44 S	6 h 13 mn
32	3 mn 40 s	6 h 06 mn

## Annexe 2 : Récapitulatif des résultats obtenus sur les sédiments

Tableau 5 : Récapitulatif des résultats des analyses faites sur les sédiments : toxicité générale des sédiments (% d'anomalies), teneur en Hg<sub>s</sub> (mg kg<sup>-1</sup>), teneur en carbone total (%), teneur en azote (%), la granulométrie (% argile, % limons fins, % limons grossiers, % sable fin et %sable grossier), profondeur et distance à l'effluent.

Site	Dist. Effluent (m)	Profond (m)	Gran. (arg. %)	Gran. (lim. f. %)	Gran. (lim. gr. %)	Gran. (sab. f. %)	Gran. (sab. gr. %)	Carb. t. (%)	Az. t. (%)	C/N molaire	T. G. S. (%)	Hg (mg kg <sup>-1</sup> )
Camberene	474	7,3	2,00	0,70	0,20	96,40	1,80	0,97	0	-	29,5	0,0019
Yoff Tonghor	143	2,2	1,80	0,90	0,30	91,40	6,30	0,65	0	-	100	0,0038
Ngor	102	3,0	1,80	0,90	0,00	0,10	96,10	1,51	0,02	114,6	100	0,0051
Almadie Vivier	176	5,2	1,60	0,80	0,50	31,00	65,90	4,62	0,02	259,9	27,6	0,0031
Ouakam	104	4,3	1,20	0,70	0,50	12,70	85,20	2,80	0,02	225,0	61,9	0,0044
Ile des Madeleine	2868	6,0	1,80	0,90	0,30	1,00	96,40	11,67	0,06	232,0	100	0,0035
Soumbédioune	62	3,7	0,80	0,60	0,60	68,40	29,50	0,40	0,01	41,7	100	0,0185
Dakar le Dantec	149	6,0	1,00	0,60	0,60	53,30	44,50	1,15	0,01	204,6	100	0,0116
Hann1	76	1,9	2,80	1,30	3,90	89,20	2,40	0,57	0,05	13,6	100	0,0349
Hann2	161	4,0	6,50	2,90	11,70	42,80	35,10	1,36	0,09	17,4	100	0,0171
Port de Dakar	44	9,0	Na	Na	Na	Na	Na	Na	Na	Na	100	Na

Dist. Effluent = Distance par rapport à l'effluent ; Profond = Profondeur ; Gran. (arg. %) = Granulométrie (argiles %) ; Gran. (Lim. F. %) = Granulométrie (limons fins %) ; Gran. (lim. gr. %) = granulométrie (limons grossiers %) ; Gran. (sab. Gr. %) = Granulométrie (Sables grossiers %) ; Gran. (Sab. f. %) = Granulométrie (sables fins %) ; Carb. T. (%) = carbone Total (%) ; Az. T. (%) = Azotetotal (%) ; T. G. S. (%) = Toxicité générale des sédiments (% d'anomalies) ; Hg<sub>s</sub> (mg kg<sup>-1</sup>) = Mercure (mg kg<sup>-1</sup>).

## Annexe 3 : Teneur en éléments traces métalliques (ETM)

Tableau 6 : Teneur en ETM dans les eaux marines au niveau de la presqu'île du Cap-Vert.

Site	Al (mg.l <sup>-1</sup> )	Cd (mg.l <sup>-1</sup> )	Co (mg.l <sup>-1</sup> )	Cu (mg.l <sup>-1</sup> )	Cr (mg.l <sup>-1</sup> )	Fe (mg.l <sup>-1</sup> )	Mn (mg.l <sup>-1</sup> )	Ni (mg.l <sup>-1</sup> )	Zn (mg.l <sup>-1</sup> )	Hg (mg.l <sup>-1</sup> )
Cambérène	0,39	0,07	0,39	0,021	0,59	0,21	0,05	0,30	0,06	0,00148
Yoff Tonghor	0,29	0,07	0,38	0,149	0,62	0,21	0,05	0,30	0,14	0,00303
Ngor	0,29	0,07	0,35	0,193	0,57	0,17	0,06	0,27	0,17	0,00162
Almadies Vivier	0,20	0,08	0,38	0,153	0,58	0,19	0,05	0,28	0,19	0,00125
Ouakam	0,24	0,07	0,37	0,151	0,57	0,19	0,05	0,29	0,09	0,00210
Ile Madeleine	0,20	0,07	0,37	0,162	0,54	0,19	0,04	0,30	0,16	0,00227
Soumbédioune	0,20	0,06	0,31	0,404	0,58	0,15	0,05	0,23	0,13	0,00149
Dakar le Dantec	0,49	0,07	0,36	0,236	0,80	0,19	0,04	0,24	0,14	0,00068
Hann1	0,29	0,06	0,37	0,187	0,90	0,16	0,05	0,23	0,10	0,00104
Hann2	0,29	0,07	0,38	0,174	0,93	0,15	0,05	0,22	0,20	0,00149
Port de Dakar	0,24	0,07	0,39	0,053	1,08	0,18	0,04	0,23	0,06	0,00242

Al = Aluminium ; Cd = Cadmium ; Co = Cobalt ; Cu = Cuivre ; Cr = Chrome ; Fe = Fer ; Mn = Manganèse ; Ni = Nickel ; Zn = Zinc ; Hg = Mercure.

## Annexe 4 : Paramètres physicochimiques

Tableau 7 : Paramètres physicochimiques des eaux marines au niveau de la presqu'île du Cap-Vert.

Site	Moy. T (°C)	pH	Moy. S (psu)	Moy. O.D. (%)	Moy. O.D. (mg.l <sup>-1</sup> )	Moy. Turb. (FNU)	M.E.S (mg.l <sup>-1</sup> )	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg.l <sup>-1</sup> )	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg.l <sup>-1</sup> )	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (mg.l <sup>-1</sup> )	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> (mg.l <sup>-1</sup> )
Cambérène	19,9	>8,5	41,4	51,1	13,98	5,2	73,00	12,39	1,3	0,05	0,2
Yoff Tonghor	20,8	>8,5	41,5	48,4	12,96	3,6	67,00	11,92	7,7	0,02	20,4
Ngor	no	>8,5	No	no	8,91	no	58,00	12,72	3,8	0,01	30,0
Almadies Vivier	20,8	>8,5	41,1	33,3	8,28	2,2	57,00	11,89	0,8	0,03	18,4
Ouakam	20,3	>8,5	40,9	35,7	8	3,1	75,00	11,41	12,0	0,03	14,4
Ile Madeleine	19,3	>8,5	41,1	35,1	7,92	1,2	57,00	9,97	5,9	0,02	4,6
Soumbédioune	19,8	8,3	40,6	32,8	7,56	29,7	33,00	10,61	19,7	0,02	7,2
Dakar le Dantec	19,5	>8,5	40,9	35,7	7,89	5,2	10,00	11,71	5,9	0,02	1,1
Hann1	18,8	>8,5	40,8	34,8	8,35	36,5	7,00	12,15	1,2	0,03	21,9
Hann2	17,8	>8,5	40,7	34,4	8,24	17,5	14,00	9,80	4,6	0,07	26,1
Port de Dakar	18,5	>8,5	40,6	35,9	13,98	3,3	28,00	12,90	6,3	0,04	2,5

Moy. T = Moyenne Température ; pH = Potentiel d'hydrogène ; Moy. S = Moyenne salinité ; Moy. O.D. = Moyenne Oxygène Dissout ; Moy. Turb. = Moyenne Turbidité ; M.E.S = Matières En Suspension ; NH<sub>4</sub><sup>+</sup> = Ammonium ; NO<sub>3</sub><sup>-</sup> = Nitrates ; NO<sub>2</sub><sup>-</sup> = Nitrites ; PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> = Phosphates.

## Annexe 5 : Régression linéaire

Tableau 8 : Régression linéaire multiple des métaux et de la TGS (première estimation).

```
Call:
lm(formula = Tox ~ Al + Cd + Cu + Cr + Hg + Mn + Ni + Zn + Mr,
    data = data2)

Residuals:
    1     2     3     4     5     6     7     8
-1.58325 -2.02978  0.07316 -2.03101  5.49609  0.52313 -1.53288  0.54785
     9    10    11
-0.49813  2.03264 -0.99782

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)   -878.69     294.36  -2.985  0.2058
Al            -232.71      76.61  -3.037  0.2025
Cd          -13842.71    2260.49  -6.124  0.1030
Cu             754.00     165.98   4.543  0.1379
Cr             909.93     185.11   4.916  0.1278
Hg          -73369.25   21209.79  -3.459  0.1792
Mn            3139.38     949.48   3.306  0.1870
Ni            4479.23    1005.54   4.455  0.1406
Zn            645.52     100.57   6.419  0.0984 .
Mr          -7396.47    1499.72  -4.932  0.1274
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 7.019 on 1 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.9943,    Adjusted R-squared:  0.9433
F-statistic: 19.48 on 9 and 1 DF,  p-value: 0.1742
```

Tableau 9 : Régression linéaire multiple des métaux et de la TGS (dernière estimation).

```
Call:
lm(formula = Tox ~ Cd + Cr + Zn + Mr, data = data2)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-19.879 -10.048   5.869   9.828  12.723

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)   503.95     116.22   4.336  0.00490 **
Cd          -7849.17    1831.42  -4.286  0.00517 **
Cr           117.99      34.44   3.426  0.01404 *
Zn           511.71     137.98   3.709  0.00998 **
Mr          -2867.69    1021.39  -2.808  0.03085 *
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 15.93 on 6 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.8248,    Adjusted R-squared:  0.708
F-statistic:  7.06 on 4 and 6 DF,  p-value: 0.01869
```

## Annexe 6 : Météorologie locale

Tableau 10 : Météo du Mercredi 1 juin 2016 par model GFS<sup>2</sup> i.e. Windguru à Dakar. La direction du vent a été validée en mer par nos observations.

Heure	03h	06h	09h	12h	15h	18h	21h
Vitesse du Vent (nœuds)	5	4	3	5	10	9	9
Rafales (nœuds)	6	5	4	6	11	11	12
Direction vent	NEE	NEE	SEE	SEE	NEE	NEE	NEE
Vague (m)	1,6	1,5	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
Période des vagues (s)	8	12	12	14	14	14	15
Direction des vagues	NE	SE	SE	SE	SE	SE	SE
Température aire (°C)	23	23	24	25	25	24	24
Couverture nuageuse (%)	0	0	0	0	6	9	12

## Annexe 7 : Paramètres microbiologiques

### A7.1. Echantillonnage

Les échantillons ont été prélevés en surface (5 premiers centimètres) avec des flacons en verre de 1 litre puis conservés au frais (10-12 °C).

### A7. 2. Analyse

#### A7. 2.1. *Escherichia coli* (*E. coli*)

La recherche et le dénombrement de *E. coli* sont fait selon la norme française NF EN ISO 9308-1.

##### A7. 2.1.1. Principe de la norme NF EN ISO 9308-1

« La méthode est fondée sur la filtration sur membrane et comprend deux parties, l'essai standard de référence et l'essai rapide optionnel, qui peuvent être réalisés en parallèle. L'essai standard comprend une incubation de la membrane sur un milieu sélectif suivi d'une caractérisation biochimique des colonies typiques lactose-positives, dont découlent la recherche et le dénombrement des bactéries coliformes et les *E. coli*, en deux ou trois jours. L'essai rapide consiste en deux étapes d'incubation permettant la recherche et le dénombrement des *E. coli* dans (21 ±3) h. Si ces deux essais sont appliqués en parallèle, la valeur correspondant au résultat final des *E. coli* doit être la plus élevée des deux » (NF EN ISO 9308-1). Dans notre étude, nous avons choisi l'essai rapide optionnel.

---

<sup>2</sup> GFS signifie Global Forecast System - système de prévision global. Il est calculé par le National Centers for Environmental Prediction (NCEP) un département du NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), NWS (National Weather Service), États-Unis. GFS is a global model so it cover all the Earth! Since January 2015 GFS produce forecasts with resolution of 27 km out to 240 hours.

#### A7. 2.1.2. Mode opératoire

Après filtration, placer la membrane sur le TSA et incuber à  $(36 \pm 2)$  °C pendant 4 à 5h. Placer ensuite la membrane sur le milieu TBA et incuber à  $(44 \pm 0,5)$  °C pendant 19 à 20h. Après la période d'incubation, placer la membrane sur le disque en papier-filtre imbibé à saturation de réaction pour la recherche d'indole et l'irradier sous une lampe à ultraviolet pendant 10 à 30 minutes en fonction de l'apparition d'une coloration. Compter toutes les colonies rouges sur la membrane comme étant les *E. coli*. En fonction du volume filtré (exemple 250 ml pour l'eau embouteillée), calculer le nombre *E. coli* dans 100 ml d'échantillon.

#### A7. 2.2. Entérocoques intestinaux

La recherche et le dénombrement des entérocoques intestinaux sont faits selon la norme française NF EN ISO 7899-2.

##### A7. 2.2.1. Principe de la norme NF EN ISO 7899-2

Le dénombrement des entérocoques intestinaux est fondé sur la filtration d'un volume spécifique d'un échantillon d'eau à travers une membrane filtrante d'une porosité de 0,45 µm suffisante pour retenir les bactéries. Le filtre est placé sur un milieu sélectif solide contenant de l'azoture de sodium (pour supprimer la croissance des bactéries gram-négative) et chlorure de 2,3,5-triphényltétrazolium (un colorant incolore) qui est réduit en formazan rouge par les entérocoques intestinaux. Les colonies typiques sont bombées, avec une couleur rouge, marron ou rose, soit au centre soit sur l'ensemble de la colonie.

##### A7. 2.2.2. Mode opératoire

Après filtration, placer la membrane filtrante sur le milieu gélosé de Slanetz et Bartley. Faire incuber les boîtes à  $36 \pm 2$  °C pendant  $44 \pm 4$  h. S'il a des colonies typiques, transférer la membrane et les colonies au moyen de pinces stériles, sans retournement, sur une boîte de gélose bile-esculine-azoture qui a été préchauffé à 44 °C. Faire incuber à  $44 \pm 0,5$  °C pendant 2h. Considérer toutes les colonies typiques montrant une couleur brune à noie dans le milieu environnant comme donnant une réaction positive et les compter comme entérocoques intestinaux. En fonction du volume filtré, calculer le nombre entérocoques intestinaux dans 100 ml d'échantillon.

#### A7. 2.3. Salmonelles

La recherche des salmonelles est faite selon la norme française NF EN ISO 19250.

##### A7. 2.3.1. Principe de la norme NF EN ISO 19250.

La recherche des salmonelles nécessite quatre phases successives (pré-enrichissement non sélectif, enrichissement sélectif, isolement et identification et confirmation). Un pré-enrichissement est souvent nécessaire pour permettre la recherche de salmonelles en nombre relativement faible ou salmonelles ayant subi une altération. Certains salmonelles et celles ayant subi un dommage sublétaux peuvent nécessiter une période d'incubation supplémentaire. Par ailleurs les salmonelles peuvent être présentes en petit nombre et sont souvent accompagnés d'autres membres de la famille des *Enérobactériacées* ou d'autres familles, en nombre largement plus important. Un enrichissement sélectif est, donc, nécessaire.

### A7. 2.3.2. Mode opératoire

La recherche des salmonelles est résumé comme décrit le schéma suivant (Figure 11).

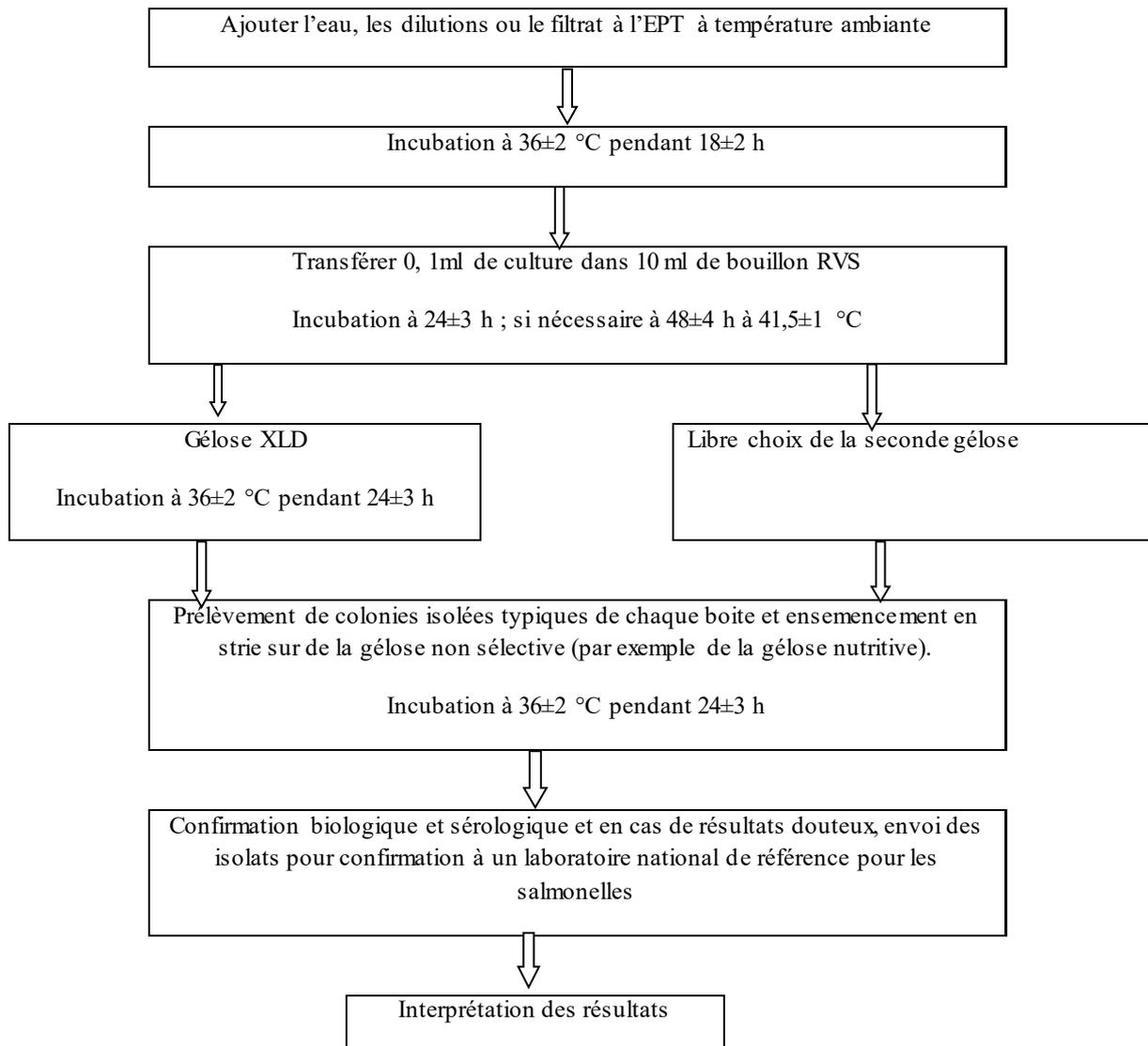


Figure 11 : Mode opératoire de la recherche des salmonelles.

### A7. 2.4. Vibrions : *Vibrio cholerae*, *Vibrio parahaemolyticus* et *Vibrio vulnificus*

La recherche de *Vibrio cholerae*, *Vibrio parahaemolyticus* et *Vibrio vulnificus* est fait selon la norme française XP ISO/TS 21872-1 : 2007.

#### A7. 2.4.1. Principe

La recherche de *Vibrio cholerae*, *Vibrio parahaemolyticus* et *Vibrios vulnificus* nécessite quatre phases successives (Premier enrichissement sélectif, second enrichissement sélectif, premier et second isolement et confirmation). Les *Vibrio cholerae*, *Vibrio parahaemolicus* et *Vibrio vulnificus* peuvent être présents en petit nombre et sont souvent accompagnés d'un nombre beaucoup plus grand d'autres microorganismes appartenant à la famille des *Vibrionacées* ou d'autres familles. Par conséquent, deux enrichissements sélectifs successifs sont nécessaires pour la recherche des microorganismes cibles.

### A7. 2.4.2. Mode opératoire

La recherche de *vibrio cholerae*, *Vibrio parahaemolyticus* et *Vibrio vulnificus* est résumée comme décrit la Figure 12.

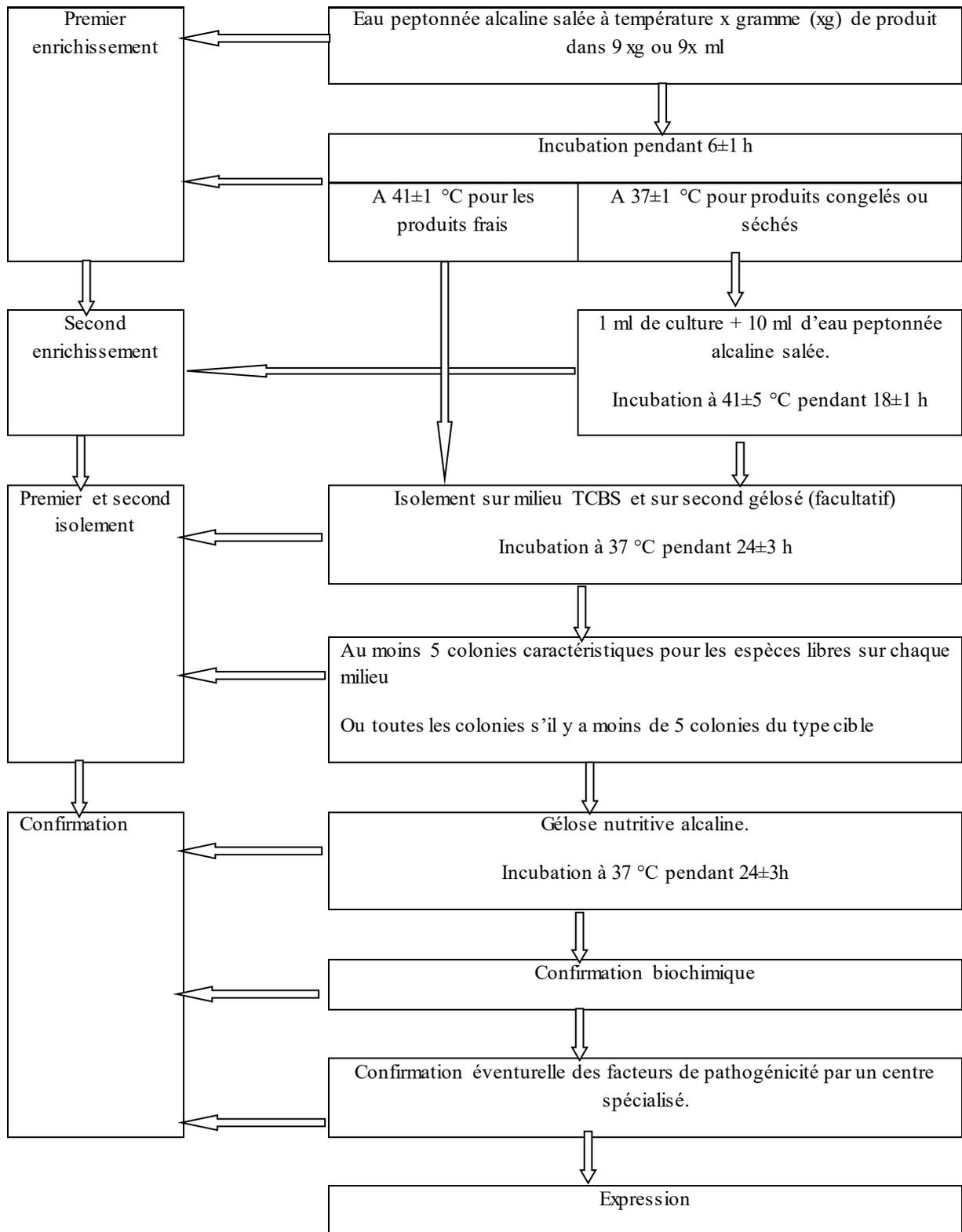


Figure 12 : Mode opératoire de la recherche des *vibrio cholerae*, *Vibrio parahaemolyticus* et *Vibrio vulnificus*).

### A7. 3. Résultats

Tableau 11 : Paramètres microbiologiques (*E. coli*, Entérocoques, Salmonelles et Vibrions) dans les eaux marines au niveau de la presqu'île du Cap-Vert.

Site	Distance cote(m)	Distance effluent(m)	<i>E. coli</i> en (nombre)	Entérocoques (en nombre)	Salmonelles	Vibrions Cholerae	Vibrio parahaemolyticus	Vibron vulnificus
Cambérène	447	474	10000	390	P	-	-	-
Yoff Tonghor	122	143	3000	<15	A	-	-	-
Ngor	84	102	4500	1700	A	-	-	+
Almadies Vivier	145	176	<15	<15	A	-	-	-
Ouakam	89	104	<15	<15	A	-	-	-
Ile des Madeleine	2200	2868	<15	<15	A	-	-	-
Soumbédioune	54	62	34000	4700	A	-	-	-
Dakar le Dantec	149	149	740	230	A	-	-	+
Hann1	62	76	3900	180	A	-	-	-
Hann2	505	161	4500	620	A	+	-	+
Port de Dakar	44	44	<15	<15	A	+	-	+

*E. coli* = *Escherichia coli*, P = Présence, A = Absence, (+) = Présence, (-) = Absence.

## **Annexe 8 : *Crassostrea gigas***



Figure 13 : Illustration de l'huitre creuse du Pacifique *Crassostrea gigas*.

## **Annexe 9 : Feuille d'enquête de terrain AWATox**

L'enquête a été effectuée sur le terrain grâce au questionnaire ci-dessous, les enquêteurs étaient munis de smartphone avec l'application ODK3 administré par Philippe Guinot. Le questionnaire a été établi par la commission environnement de la FSS puis amendé et corrigé par l'IDP, le CRODT et l'IRD. A noté l'existence d'une mini enquête menée par la FSS sur la zone de Ngor.

- Date
- Prénom et Nom de l'enquêteur
- Coordonnées GPS de la zone d'enquête
- Sexe de la personne enquêtée (féminin, masculin)
- Age de la personne enquêtée
- Profession de la personne enquêtée (cultivateur, artisan, ménagère, éleveur, ouvrier, fonctionnaire, pêcheur, élève commerçant, étudiant, chercheur, aucune, autorité, autres.)
- Vous a-t-on déjà consulté sur la pollution marine ? (oui ou non)
- Si oui quand (moins d'1 an, entre 1 et 5 ans, plus de 5 ans)
- Avez-vous déjà entendu parler de manifestations ou revendications contre la pollution marine (oui ou non)
- Si oui quand (moins d'1 an, entre 1 et 5 ans, plus de 5 ans)
- A quel endroit utilisez-vous principalement le littoral/l'océan ? (là où nous sommes, grande côte, Guédiawaye, Yoff-virage, Almadies)
- Quelle est votre perception du niveau de pollution de l'océan à l'endroit cité dans la question 10 (très faible, faible, modéré, élevée, extrêmement élevée)
- Quelles utilisations faites-vous de l'eau de mer (aucune utilisation, nettoyage d'aliments, maraichage, lavage du corps, linge, lavage d'animaux, usage rituel, baignade, surf, plongée ou pêche, autres)

- Quel est votre fréquence d'utilisation de l'eau de mer ou contact avec de l'eau de mer (quotidienne, plusieurs fois par semaine, une fois par semaine, une fois par quinzaine, autres)
- Quelles sont selon vous les principales causes de la pollution maritime (rejets d'égout, plastiques, rejets industriels, cadavres d'animaux, rejets des bateaux en mer, autre)
- Avez-vous été malade suite à une baignade (oui, non)
- Avez-vous eu connaissance de cas de personne malade suite à une baignade (oui, non)
- Avez-vous déjà été malade suite à la consommation de produits de la mer (oui non)
- Avez-vous eu connaissance de cas de personne malade suite à la consommation de produits de la mer (oui ou non)
- Avez-vous été malade par respiration de l'air en bord de mer (oui ou non)
- Avez-vous eu connaissance de cas de personne malade par respiration de l'air en bord de mer (oui ou non)
- Quel impact la pollution marine a-t-elle sur votre vie quotidienne (aucun impact, cela m'inquiète mais je n'ai pas ou ne peux pas changer mes habitudes, je n'utilise plus l'eau de mer, je ne mange plus les produits de la mer ou j'évite le littoral, autre)
- Quel impact la pollution marine a-t-elle sur votre santé (aucun impact ; toux, bronchite, maux de gorges, difficultés à respirer ; mal aux yeux, conjonctivites ; éruption cutanées [boutons, démangeaison], fièvre, rhume, nez qui coule, autres)
- Avez-vous plutôt ressenti ces symptômes plutôt ? (toute l'année, saison sèche, hivernage, toute l'année et surtout la saison sèche, toute l'année et surtout hivernage)
- Selon vous au cours des 10 dernières années le niveau de pollution s'est-t-il plutôt (fortement aggravé, aggravé, resté le même, amélioré, beaucoup amélioré)
- Êtes-vous satisfait de l'implication des autorités nationales concernant la pollution du littoral (pas du tout, partiellement, complètement)
- Êtes-vous satisfait de l'implication des autorités locales concernant la pollution du littoral (pas du tout, partiellement, complètement)
- En matière de pollution maritime, quelles solutions souhaiteriez-vous voir mis en place (i- test réguliers de la qualité des eaux avec alerte aux populations ; ii- sensibilisation, éducation et informations des populations ; iii- arrêt des rejets d'égout ; iv- ramassage des ordures ; v- arrêt de la pollution industrielle ; vi- traitement des eaux usées ; vii- autres)
- Êtes-vous prêts à vous impliquer dans une action collective contre la pollution du littoral
- Si oui, pouvez-vous me donner votre numéro de téléphone

## **Annexe 10: Publications scientifiques**

Brehmer P., Constantin de Magny G., Sonko A., Guinot P., Diallo B., Mesures microbiologiques, chimiques, microplastiques et écotoxicologiques des eaux maritimes proches d'effluents de la presqu'île de Dakar et enquête auprès de la population littorale. Rapport de mission AWATox 1, 2, 3 et 4, **2016**, 30p.

## **Annexe 11: Communications scientifiques de l'auteur**

*Invited communication*, Brehmer P., Constantin de Magny G., Sow A G., Sonko A., Diop C., Fall M., Finot L., Henry M., Kandé Y., Cissé I., Diankha O., Diara M., Galgani F., 2016. « Projet de démonstration AWATOX: étude de la pollution marine sur la presqu'île de Dakar ». Atelier de concertation, d'harmonisation et rationalisation des interventions sur le littoral sénégalais, 12 juillet, Ministère de l'environnement et du développement durable (MEED), Direction de l'Environnement et des Etablissements Classés (DEEC), Dakar, Sénégal.

Oduor N. A., El-Shorbaji E., Sonko A., Nutrient variation and its relation to phytoplankton community structure in Benguela upwelling systems (BUS), RGNO **2017**: Microbial and Geochemical Oceanography in Upwelling Ecosystems, Ministry of fisheries and marine resources, Namibia.

Oduor N. A., El-Shorbaji E., Sonko A., How macronutrients regulate phytoplankton community structures in the northern Benguela upwelling system (BUS), RGNO **2017**: Microbial and Geochemical Oceanography in Upwelling Ecosystems, Ministry of fisheries and marine resources, Namibia.

Sonko A, Study of the global toxicity of sediments, water quality and microplastics of the Cape Verde peninsula, RGNO **2017**: Microbial and Geochemical Oceanography in Upwelling Ecosystems, UNAM, Namibia.

Sonko A., Brehmer P., Diara M., Constantin de Magny G., Gassama A S., Fall M., Finot L., Henry M., Kandé Y., Diallo H., Diankha O., Diop C., Cissé I., François Galgani F. **2017**, Toxicité Globale des Sédiments, de la qualité des eaux et des microplastiques. United Nations Water: Journée mondiale de l'eau; Thème Edition 2017 : Les eaux usées. 22 mars, Thiès, Senegal.

Sonko A., Brehmer P., Cissé I., Constantin de Magny G., Gassama A. S., Diop C., Fall M., Finot L., Henry M., Kandé Y., Diara M., Diankha O., Galgani F. **2017**. Étude des microplastiques, de la toxicité des sédiments et de la qualité des eaux au niveau de la péninsule du Cap Vert: intérêt AWATox d'une extension sous-régionale. Atelier Omega (Greenpeace Afrique), 13 janvier 2017, hôtel fleur de Lys, Dakar, Sénégal.

Kandé Y., Brehmer P., Cissé I., Constantin de Magny G., Gassama A. S., Diop A., Fall M., Finot L., Henry M., Sonko A., Diara M., Diankha O., Galgani F et al. **2017**. Etude de la variabilité spatiale de la pollution marine autour de la presqu'île du Cap vert. Atelier Omega (Greenpeace Afrique), 13 janvier 2017, hôtel fleur de Lys, Dakar, Sénégal.

- Sonko A., Brehmer P., Constantin de Magny G., Gassama A. S., Diop C., Cisse I., Fall M., Finot L., Henry M., Kandé Y., Diara M., Diankha O., Galgani F. **2016**. Étude de la toxicité des sédiments, de la qualité de l'eau et des microplastiques de la péninsule du Cap-Vert. 3ème conférence internationale "ICAWA" (CSRP, IRD, GIZ, PNUD-UE) 13 au 15 décembre 2016, Dakar, au Sénégal.
- Kandé Y., Brehmer P., Constantin de Magny G., Gassama A. S., Diop A., Cisse I., Fall M., Finot L., Henry M., Sonko A., Diara M., Diankha O., Galgani F et al. **2016**. Etude de la variabilité spatiale de la pollution marine autour de la presqu'île du Cap vert. In 3rd international conference "ICAWA", Session 3, 13rd-15th December 2016, Dakar, Senegal. (1er prix du Jury).
- Sonko A., Brehmer P., Cisse I., Gassama A. S., Constantin de Magny G., Henry J. C., Diop C., Diara M. **2015**. Etude écotoxicologique autour de la péninsule de Dakar, combinant l'écotoxicité des sédiments, la microbiologie de la colonne d'eau, les métaux traces, les analyses physicochimiques et les microplastiques. 2ème conférence internationale "ICAWA" (CSRP, IRD, GIZ, PNUD-UE) du 17 au 19 novembre 2015, à Dakar, au Sénégal.