

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

المدرسة الوطنية العليا لعلوم البحر وتهيئة الساحل

Ecole Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral



MEMOIRE DE FIN D'ETUDE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME
D'INGENIEUR ET DE MASTER EN SCIENCES DE LA MER

OPTION : ENVIRONNEMENT

**Dynamique spatiale et temporelle des polluants
métalliques dans les sédiments marins :
Impact de la contamination métallique**

Présenté par : M. HOGGAS Charef Eddine

Soutenu le 03/07/2018 devant le jury suivant :

M. HAMDI Bouâlem	Professeur (ENSSMAL)	Président
Mme. Fouzia Houma-Bachari	Professeur (ENSSMAL)	Promotrice
Mme. Ghomrassi Sofia	Ingénieur (CRD-SONATRACH)	Co-promotrice
M. Grimes Samir	MCA (ENSSMAL)	Examineur
M. Kada Mouhamed	MAA (ENSSMAL)	Examineur
M.Aoudj Cherif	Cadre (MICLAT)	Invité

Promotion : 2017/2018

Remerciements

Remerciements

Tout d'abord, nous remercions **Allah** le tout puissant pour nous avoir donné la santé, le courage et la volonté, pour réaliser ce modeste travail.

J'adresse une pensée spéciale à mes parents pour leur soutien dans mes choix et leur attention sans faille, ainsi qu'à ma bonne-maman, dont les encouragements et l'amour inconditionnel m'accompagnent depuis toujours.

Mes plus vifs remerciements à :

Mme Bachari Fouzia, Professeur à l'école nationale

Supérieure des sciences de la mer et d'aménagement de littoral, de m'avoir encadré, C'est avec une grande pédagogie et beaucoup de patience qu'elle m'a transmis sa passion pour ce travail.

J'exprime ma profonde gratitude envers Mme Ghomrassi.S, Ingénieur au sein de centre de recherche et de développement à sonatrach pour son aide permanent, pour faire réussir ce travail

Je tiens a remercié également Mme Aissani Amel, qui n'a pas arrêté de m'aide dans toute les étapes élaboré, sa patience, ses conseils indépassables.

J'exprime ma profonde gratitude envers M. Hamdi Bouâlem, Professeurs à ENSSMAL, pour m'avoir fait l'honneur d'accepté de présider le jury et aussi je le remercie pour sa confiance, sa disponibilité,

Je tiens également à remercier sincèrement Messieurs Grimes S et Kada M enseignants à l'ENSSMAL qui m'ont fait l'honneur d'accepter d'examiner mon mémoire.

Mes vifs remerciements s'adressent à M. Aoudj C. Cadre au MICLAT de m'avoir honoré par sa présence aujourd'hui

Je n'oublie pas de remercier toutes les personnes, qui m'ont apporté aide et soutien pour la réalisation de ce travail de près ou de loin, elles sont nombreuses, sans les citer, elles se reconnaîtront.

Dédicace

Dédicace

À mes parents.

Grâce à leurs tendres encouragements et leurs grands sacrifices, ils ont pu créer le climat affectueux et propice à la poursuite de mes études.

Aucune dédicace ne pourrait exprimer mon respect, ma considération et mes

Profonds sentiments envers eux. Je prie le bon Dieu de les bénir, de veiller sur eux, en espérant qu'ils seront toujours présent et fiers de moi à chaque réussite.

A mes sœurs Soumia et Rania et à mes frères Hamza, Islem et Adam. Ils vont trouver ici l'expression de mes sentiments de respect et de reconnaissance pour le soutien qu'ils n'ont cessé de me porter je prie mon dieu que vous protégiez. Sans oublié ma nièce Alae que je l'aime trop.

A ma chère médecin 'Imen Yaakoub' qui était toujours à mes coté.

L'expression de mes sentiments de respect et d'amour pour le soutien qu'elle n'a cessé de me porter.

A tous mes professeurs. Leur générosité et leur soutien m'oblige de leurs témoigner mon profond respect et ma loyale considération. A tous mes proches, mes amis et mes collègues. Mes amis (es) de l'ENSSMAL, Saleh, Cherif et Miloud Ainsi l'équipe de géochimie minérale de centre de recherche CRD-SOBATRACH.

Ils vont trouver ici le témoignage d'une fidélité et d'une amitié infinie.

& à la fin : À vous cher lecteur d'avoir consacré votre temps à lire ce travail.

Liste des figures

Chapitre I : Synthèse bibliographique

Figure (I.1) : Augmentation de la concentration des contaminants avec le temps dans la chaîne trophique.....	8
Figure (I.2) : Le rôle des agents complexants dans l'assimilation des métaux (M) par les organismes aquatiques.....	9
Figure (I.3) : l'Augmentation de concentration du métal le long du réseau trophique.....	10
Figure (I.4) : Cycle simplifié des éléments traces métalliques (ETM) dans les milieux aquatiques côtiers.....	11
Figure (I.5) : Organisation du domaine marin en différentes aires sédimentaires en contexte de marge continentale stable ou passive, et approvisionnement du processus sédimentaire.....	15
Figure (I.6) : Mécanismes et résultats d'un écoulement gravitaire.....	16
Figure (I.7) : Comportement des particules dans l'eau et capacité de sédimentation.....	17
Figure (I.8) : Les différents modes de transport des particules en mer.....	18
Figure (I.9) : Schéma explicatif de transport par charriage.....	19
Figure(I.10) : l'influence de la vitesse de l'écoulement sur le mode de transport	19

Chapitre II : Zone d'étude

Figure (II.1) : Présentation de la zone d'étude avec ses différents reliefs 3D.....	19
Figure (II.2) : Système urbain (Le cadre en rouge représente notre zone d'étude)...	20
Figure (II.3) : la répartition des différents types de sédiment au niveau de la baie de Bou-Ismaïl.....	21
Figure (II.4) : Diagramme ombrothermique d'Alger pendant 10 ans (2007-2017)....	24
Figure (II.5) : Débits de l'Oued Mazafran entre 1980 et 2003.....	25
Figure (II.6) : Réseau hydrographique du bassin versant de l'oued Mazafran.....	26
Figure (II.7) : Roses saisonnières et annuelle des vents 2010-2017.....	29

Chapitre III : Etude comparative entre les méthodes d'analyses

Figure (III.1) : Principe de fonctionnement de l'équipement de l'ICP-MS.....	32
Figure (III.2) : Différentes composantes de l'ICP-MS Agilent 7700x (Source : Manuel de l'équipement).....	32
Figure (III.3) : comparaison pratique entre deux protocoles d'analyses.....	36
Figure (III.4) : l'étape de minéralisation sur une plaque chauffante à 120 °C en suivant le protocole de l'IAEA.....	37
Figure (III.5) : Les différentes étapes minéralisation, filtration, et dilution en suivant le protocole de l'AFNOR.....	37
Fig. (III.6) : Exemple de courbe de calibration de Plomb (Pb).....	41
Figure (III.7) : Droite de régression des concentrations calculées (en utilisant la méthode d'AFNOR) en fonction des concentrations de référence.....	48
Figure (III.8) : Droite de régression des concentrations calculées (en utilisant la méthode d'IAEA) en fonction des concentrations de référence.....	49

Chapitre IV : Analyse, évaluation et cartographie de la pollution métallique

Figure (IV.1) : Présentation des stations de prélèvement et les principales sources de pollutions.....	52
Figure (IV.2) : Pollution due aux rejets d'Oued Mazafran.....	52
Figure (IV.3) : résumé de notre stratégie d'échantillonnage	53
Figure (IV.4) : Sonde multi paramètre de type HANNA-HI9828.....	53
Figure (IV.5) ICP-MS Agilent technologies series 7700x.....	55
Figure (IV.6) : Résumé de protocole de l'analyse granulométrique de l'AFNOR...	57
Figure (IV.7) : Interface de l'outil GRADISTAT	58
Figure (IV.8) : Différents indices granulométrique et statistique qui sont inclus dans l'outil de GRADISTAT (Source : Manuel de GRADISTAT).....	59
Figure (IV.9) : Résumé des résultats obtenus par GRADISTAT sur les différents indices paramètre granulométrique exemple de la station 8 de l'Ouest de la Baie de Bou Ismail.....	68
Figure (IV.10) : La répartition spatiale des métaux lourds (As, Cd, Co, Mn, Cr, Cu, Mo, Zn, Pb, Se et Ni).....	71

Figure (IV.11) : La répartition spatiale de l'indice de géo-accumulation.....	74
Figure (IV.12) : La répartition spatiale de l'indice de facteur de contamination.....	75
Figure (IV.13) : Projection des métaux lourds et de MOP comme variables dans le plan factoriel 1et2.....	78
Figure (IV.14) : Projection des métaux lourds et de MOP et les stations comme variables dans le plan factoriel 1et2.....	79

Chapitre V : Modélisation de la dynamique hydro-sédimentaire et la diffusion des polluants

Figure (V.1) : Différents domaines d'utilisation de DHI Mike Zero.....	84
Figure (V.2) : L'interface de module de model couplé (MIKE 21/3 Coupled Model).....	85
Figure (V.3) : Principe de fonctionnement de Model Couple.....	86
Figure (V.5) : Interface de site de navionics	89
Figure (V.7) : Bathymétrie de la zone d'étude.....	91
Figure (V.8) : Relation entre l'intensité des vents et les différents facteurs qui influent la houle, vague.....	92
Figure (V.6) : Le maillage de la Bathymétrie de la zone d'étude.....	93
Figure (V.9) : La variation de vents dans l'Ouest de Bou Ismail entre 2007-2017....	94
Figure (V.10) : Rose des vents de Bou Ismail 2007-2017.....	94
Figure (V.11) : Fichier output de la table sédimentaire qui montre la configuration de la table sédimentaire utilisée dans notre cas d'étude.....	95
Figure (V.4) : Classification des transports sédimentaire selon.....	95
Figure(V.12) : Données modélisées (Output) de l'élévation de niveau de la mer, courants et sa direction.....	96
Figure (V.13) : Données modélisées (Output) de la vitesse et direction de transport sédimentaire.....	98
Figure (V.14) : Données modélisées (Output) de la hauteur significative de la houle et sa direction.....	100
Figure (V.11) : Champs des courants de secteur Nord-Est.....	100
Figure (V.12) : Champs des courants de secteur Ouest.....	102
Figure (V.13) : Champs de transport sédimentaire de secteur Nord-Est.....	102
Figure (V.14) : Champs de transport sédimentaire de secteur Ouest.....	102

Figure (V.15) : La variation spatiale des concentrations des polluants métalliques dans les sédiments marins..... **103**

Figure (V.16) : Etapes d'étude d'impact de la diffusion de pollution **106**

Figure (V.17) : Interface de Module ECOLAB **108**

Figure (V.18) : Variables d'état intégrés dans logiciel avec le type de variation spatiale d'output..... **109**

Figure (V.19) : Les différentes constantes utilisées par le module ECOLAB heavymetal..... **109**

Figure (V.20) : Les variables de forçages..... **109**

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau (I.1) : Domaines d'utilisation des éléments métalliques.....	6
Tableau(I.2) : Caractéristiques physico-chimiques des métaux et distribution dans l'environnement.....	7
Tableau (I.3) : la spéciation des différents éléments traces métalliques dans le milieu aquatique.....	11
Tableau (I.4) : Effet toxique de quelques métaux sur les organismes aquatiques.....	20
Tableau(I.5) : Effet toxique des métaux lourds sur la santé humaine.....	20

Chapitre II

Tableau (II.1) : Moyennes mensuelles de 10 ans des températures de l'air, précipitation et vitesse du vent 2007-2017.....	23
Tableau (II.2) : Total jours de pluie et de tempête durant 2007-2017	23
Tableau (II.3) : Fréquence mensuelle (1 mois = 100%) par direction de houle, au large de Bou- Ismail.....	30

Chapitre III

Tableau (III.1): Composition et teneurs des solutions mères utilisées pour les gammes d'étalonnage.....	43
Tableau (III.2) : Les limites de détection et de quantification ICP-MS Agilent 7700x	47
Tableau (III.3): Résultats de l'ICP-MS AGLAE 17M9.1 et 17M92 en (µg/g) avec les paramètres de Z_{score}	48
Tableau (III.4) : Résultats de l'ICP-MS AGLAE 17M9.1 et 17M92.....	49

Chapitre IV

LISTE DES TABLRAUX

Tableau (IV.1) : La classification de Müller de l'indice de géo-accumulation.....	65
Tableau (IV.2) : Classification d'Hakanson pour le facteur de contamination.....	65
Tableau (IV.3) : Classification d'Hakanson pour le degré de contamination.....	66
Tableau (IV.4) : Classification de PLI.....	67
Tableau (IV.5) : classification des différentes classes de l'IPS.....	67
Tableau (IV.6) : Pourcentage des différentes fractions granulométriques pour chaque station de prélèvement	70
Tableau (IV.7) : Résultats des indices granulométriques	74
Tableau (IV.8) : Teneurs des métaux lourds en ($\mu\text{g/g}$), et de la matière organique en (g) dans les sédiments de partie ouest de la baie de Bou Ismail.....	73
Tableau (IV.9) : Les résultats de l'indice de géo-accumulation de l'Ouest de Bou Ismail	76
Tableau (IV.10) : Les valeurs de facteur de contamination (C_f) au niveau des différentes stations.....	77
Tableau (IV.11) : Les résultats de C_f , Cd, PLI et IPS de notre zone d'étude.....	80
Tableau (IV.12) : Matrice de corrélation pour les métaux lourds et de MOP dans les sédiments de notre zone d'étude.....	83

Chapitre V

Tableau (V.1) : Condition de la houle au large de Bou Ismail.....	100
Tableau (V.2) : Résumé de paramétrage utilisé, avant la simulation.....	101

Liste des acronymes

LISTE DES ACRONYMES

A

ACP : Analyse en Composantes Principales
 ANRH : Agence Nationale des Ressources
 Hydriques
 ArcGis : Logiciel de Système d'Information
 Géographique
 AFNOR : Association Française de Normalisation

I

IDW : Pondération de la **D**istance **I**nverse
I_{géo} : Indice de **G**éo-accumulation
IPS : Indice de **P**ollution **S**édimentaire
ICP-MS : Spectrométrie de **M**asse par
Plasma à **C**ouplage **I**nductif
IAEA : **I**nternational **A**tomic **E**nergy
 Agency

C

C_d : **D**egré de **C**ontamination
C_f : **F**acteur de **C**ontamination
 CRD : Centre de Recherche et de Développement

L

LEM : Laboratoire des **E**tudes **M**aritimes

D

DHI : **I**nstitut **H**ydraulique **D**anois

N

N : Nord
NE : Nord **E**st
NNE : Nord Nord **E**st

E

E : Est
 ENSSMAL : Ecole Nationale Supérieure des
 Sciences de la Mer et de l'Aménagement du
 Littoral

P

PLI : Indice de charge en pollution
PNUE : Programme des Nations Unis
 pour l'Environnement

H

HNO₃ : **A**cide **N**itrique
HCL **A**cide **C**hlorhydrique
HF : **A**cide **F**luorhydrique
H_s : **H**auteur **S**ignificative
HD : **H**ydrodynamique

S

SIG : **S**ystème d'**I**nformation
 Géographique
S_k : **S**kenwnness de trask
S₀ : **S**orting de trask.

Table des matières

Remerciement	ii
Dédicace	iv
Liste des figures	vi
Liste des tableaux	xi
Liste des acronymes	xiv
Table des matières	xvi
Introduction	2

Chapitre I : Synthèse bibliographique

Introduction	5
I.1. Sources des éléments traces métalliques	5
I.1.1. Sources naturelles	5
I.1.2. Sources anthropiques	5
I.2. Classification des éléments traces métalliques	5
I.2.1. Eléments essentiels ou oligo-éléments	6
I.2.2. Eléments non essentiels	6
I.3. Caractéristiques physico-chimiques des métaux traces et leurs distributions dans l'environnement.....	7
I.4. Devenir des éléments traces métalliques.....	7
I.4.1. La biodisponibilité	7
I.4.2. Bioaccumulation	8
I.4.3. L'assimilation.....	8
I.4.4. La bioconcentration.....	9
I.4.5. La biomagnification ou bioamplification.....	9
I.5. Comportement des éléments traces métalliques dans le milieu aquatique.....	10
I.5.1. Spéciation.....	10
I.5.2. Complexation	11
I.5.3. Adsorption.....	12
I.6. Origines et devenir des sédiments	14
I.6.1. Les différents apports de sédiments	14
I.6.2. Devenir des lignées détritiques, ioniques, et organiques	15
I.7. Les facteurs qui influencent la dynamique spatiale des polluants métalliques	16
I.7.1. Dynamique sédimentaire.....	16
I.8. Impacts de la contamination métallique dans le milieu marin	19
I.8.1. Effet sur les organismes aquatiques.....	20
I.8.2. Effet sur la santé humaine.....	20

Chapitre II : Zone d'étude

II.1. Présentation de la zone d'étude.....	22
---	-----------

II.1.1. Situation géographique	22
II.1.2. Occupation des sols	23
II.2. Contexte géomorphologique, sédimentologique et topographique	23
II.2.1. Sédimentologie	23
II.2.2. Topographie.....	24
II.2.3. Géomorphologie	25
II.3. Environnements bioclimatiques et hydrographiques.....	25
II.3.1. Le climat	25
II.3.2. Environnements bioclimatiques.....	26
II.3.3. Données climatologiques	26
II.3.4. Température de l'air.....	26
II.3.5. Précipitation.....	27
II.3.3. Réseau hydrographique.....	27
II.4. Contexte hydrodynamique	29
II.4.1. Les vents	30
II.4.2. La houle.....	32

Chapitre III : Etude comparative entre les méthodes d'analyses

Introduction.....	34
III.1. Matériels et méthodes.....	34
III.1.1. Appareillages.....	34
III.1.1.1. Présentation de l'ICP-MS.....	34
III.1.1.2. Principe, fonctionnement et composantes de l'ICP-MS	34
III.1.1.3. Sources d'interférences	36
III.1.2. Méthodologie.....	37
III.1.2.1. Préparation des échantillons	37
III.1.2.2. Traitement des échantillons.....	37
III.1.2.7. Mesure des interférences	41
III.1.2.3. Mise en pratique de l'équipement ICP-MS	42
III.1.2.4. Préparation d'une séquence d'analyse.....	42
III.1.2.5. Validation de la méthode.....	45
III.1.2.5.1. Estimation de la limite de détection et de la limite de quantification.....	45
III.2. Résultats et discussions.....	46
III.2.1. Limite de détection et de quantification	47
III.2.2. Résultats de Z_{score}	48
III.2.2.1. Méthode d'AFNOR	48
III.2.2.2. Méthode de l'IAEA	48
III.2.2.3. Comparaison entre la méthode de l'AIEA et AFNOR	49

Conclusion	52
 Chapitre IV : Analyse, Evaluation et cartographie de la pollution métallique	
Introduction	55
IV.1. Matériels & Méthodes	55
IV.1.1. Stratégie d'échantillonnage.....	55
IV.1.2. Travaux sur terrain	57
IV.1.2.1. Prélèvement de sédiment.....	57
IV.1.2.2. Mesure des paramètres physico-chimiques	57
IV.1.2.3. Analyses des polluants métalliques.....	58
IV.1.2.4. Analyse de la matière organique particulière	59
IV.1.2.5. Analyse granulométrique	60
IV.1.3. Évaluation de l'impact de la contamination métallique	64
IV.1.3.1. Indice de géo-accumulation (Igeo).....	64
IV.1.3.2. Facteur de contamination (C _f).....	65
IV.1.3.3. Le degré de contamination (C _d).....	66
IV.1.3.4. Indice de charge de pollution ou Pollution load index (PLI)	66
IV.1.3.5. Indice de pollution sédimentaire (IPS).....	67
IV.1.4. Cartographie de la pollution métallique	68
IV.1.4.1. Système d'information géographique	68
IV.1.4.2. Présentation de logiciel ArcGis.....	68
IV.1.4.3. Les outils de l'analyse spatiale.....	68
IV.2. Résultats & Discussion	70
IV.2.1. Analyse granulométrique	70
IV.2.1.1. Caractéristiques granulométriques	70
IV.2.1.2. Teneurs des métaux lourds et de la matière organique.....	73
IV.2.2. Evaluation de la contamination métallique	76
IV.2.2.1. Indice de géo-accumulation	76
IV.2.2.2. Facteur de contamination	77
IV.2.2.3. Indice de charge de pollution	80
IV.2.2.4. Indice de pollution sédimentaire	80
IV.2.3. Analyses en composante principale	81
Conclusion et perspectives	84
 Chapitre V : Modélisation de la dynamique hydro-sédimentaire et la diffusion des polluants	
Introduction	86

V.1. Matériels et méthodes	87
V.1.1. Présentation du logiciel (Mike Zéro).....	87
V.1.2. Présentation de module (<i>CoupledModel_FM</i>).....	88
V.2. Méthodologie de travail.....	91
V.2.1. Modélisation de l'hydrodynamique et de la houle	91
V.2.1.1. Principe de module HD	91
V.2.1.2. Principe de module SW	92
V.2.2. Modélisation de transport sédimentaire (ST)	93
V.2.2.1.Principe.....	93
V.2.3. Préparation des Inputs	95
V.2.3.1. Préparation du maillage de la bathymétrie	95
V.2.3.2. Préparation de la table des vents.....	97
V.2.3.3. Préparation de la table sédimentaire	99
V.2.3.4. Les conditions de la houle et des vagues	100
V.2.3.5. Paramétrage de logiciel	100
V.3.Résultats et discussion	101
V.3.1. Hydrodynamique	102
V.3.2. Transport sédimentaire	103
V.3.3. Dynamique des polluants métalliques dans les sédiments marins.....	108
Conclusion et perspectives	109
Bibliographie	113
Annexes	124

Introduction générale

Introduction

Le milieu marin représente un enjeu considérable en termes de développement socio-économique. Ces dernières décennies, la pollution des océans s'est amplifiée à travers le monde ceci est devenu un sujet de préoccupation croissante à l'échelle internationale (Houma, 2009), ce développement humain sur le littoral est particulièrement lié aux activités touristiques et industrielles qui contribuent à la forte pression exercée sur le littoral, et affecte la faune et la flore côtière (Bachouche, 2017). D'après le Programme des Nations Unis pour l'Environnement (PNUE), plus de 80 % de la pollution des mers proviennent de la terre via les zones côtières. Une grande partie de ces activités anthropiques utilisent des produits chimiques dans les processus de fabrications de ces produits, parmi ces derniers nous citons les métaux lourds qui font partie des polluants les plus toxiques. La majorité des polluants métalliques sera piégée dans les sédiments (Sin et al., 2001) . Par conséquent, les sédiments sont souvent utilisés pour évaluer le degré de pollution des milieux aquatiques (Khan et al., 2003 ; Buggy et al., 2008).

L'évaluation et la caractérisation de la charge de polluants dans les sédiments représentent une étape très sensible et qui consiste à faire un diagnostic sur l'état environnemental des zones côtières marines. Pourquoi les sédiments? Qu'est-ce qui les rend si spéciaux et qui ont besoin d'une «évaluation de la qualité»? (Murphy et al., 2003) L'activité humaine a entraîné une contamination étendue de l'environnement dont dépend la vie et, finalement, nous en dépendons. Certains de ces contaminants sont des composants naturels de la terre, mais mobilisés et redistribués sous des formes potentiellement toxiques par nos activités industrielles (par exemple les métaux), (Guangming, 2017) et d'autres sont d'origine humaine et n'existaient pas auparavant dans le monde naturel. À l'exception de certains qui sont volatils ou se dégradent rapidement, un grand nombre de ces contaminants finissent par se déverser dans l'environnement aquatique. De plus, beaucoup d'entre eux ont une forte tendance à l'adsorption. (Zhao, 2008 ; Cartier, 2011 ; Duc, 2015 ; James et al., 2018) Les sédiments constituent un problème majeur dans la gestion et la restauration des écosystèmes aquatiques, ils contiennent une concentration beaucoup plus élevée de nutriments que la colonne d'eau et peuvent être une source importante de nutriments dans la colonne d'eau. Des études récentes en Suède indiquent qu'en été, jusqu'à 99% du flux brut de nutriments provient des sédiments (Cheikh et al., 2012 ; Wenqiang et al., 2016)

Notre cas d'étude se localise à l'ouest de la baie de Bou Ismail, elle représente une zone d'activités touristiques et anthropiques qui reçoit plusieurs effluents de la pollution métallique dues aux différentes installations qui rejettent dans les oueds, cette pollution sera charriée vers la mer. (Bachouche et al., 2017)

On ne peut pas arrêter le progrès, mais la pollution, elle, grandit en même temps. !!

La problématique développée dans notre travail nous a naturellement amené à proposer des solutions d'études et éclaircir l'aspect surveillance par rapport à une matrice complexe étant le sédiment marin. En traitant trois grandes approches (Analytique, environnementale et modélisatrice), dans un premiers temps nous allons essayer valider une méthode adéquate aux analyses des métaux lourds dans les sédiments marins, cette dernière sera utilisé pour évaluer de le degré de contamination métallique dans notre zone d'étude, afin de développer une méthodes de gestion et surveillance du milieu marin et littoral, pour cela notre travail se résume dans (5 chapitre) :

Le premier s'intitule synthèse bibliographique, met en évidence toutes les caractéristiques de ces polluants ainsi que l'impact que nous pouvons avoir par ces éléments métalliques ;

Le second, présente les différentes caractéristiques environnementales, et bioclimatiques de notre zone d'étude ;

Le troisième chapitre consiste à valider les deux méthodes analytiques qui souvent utilisés pour l'analyse des métaux lourds celle de l'AFNOR X 31-147 et celle de l'IAEA, une étude comparative sera effectué entre ces derniers pour déterminer la méthode analytique qui dispose d'un taux d'erreur le plus faible, avec des résultats qualitatifs à partir des quels nous faisons notre évaluation de l'état de santé de notre zone d'étude.

Le chapitre qui suit se consacre à l'évaluation de l'état de pollution de notre zone d'étude, en calculant les différents indices d'évaluation de la contamination métallique ainsi que la détermination de la spatialisation de ces polluants dans les sédiments marins de notre zone d'étude. Et ceci par le biais des outils de cartographies d'une part, d'autre part nous allons utiliser les modèles statistiques pour comprendre les relations de ces polluants entre eux même, et avec la taille des grains de sédiment et la matière organique particulière.

Le dernier chapitre démontre l'effet de la dynamique côtière (Hydrodynamique, houle et transport sédimentaire) sur la dynamique des polluants au niveau de notre zone d'étude.

Notre travail sera clôturé par une conclusion générale et des perspectives qui résument l'ensemble des chapitres.

Chapitre I :

Synthèse bibliographique

Introduction

Une grande partie des éléments du système périodique possède des propriétés dites métalliques, ce sont les métaux, et la majorité de ces derniers sont présents à l'état de trace. Et par définition les éléments traces métalliques ce sont des corps simples doués d'un éclat particulier appelé «éclat métallique», conduisant bien en général, la chaleur et l'électricité et qui possèdent, en se combinant à l'oxygène, au moins un oxyde basique (Miquel, 2001). En sciences de l'environnement, un métal lourd est lié étroitement par trois notions (Benetto, 1997).

- ▶ Une densité supérieure à 5 gramme/cm³.
- ▶ Un nombre atomique supérieur à celui de sodium (Z=11).
- ▶ Une notion de toxicité.

I.1. Sources des éléments traces métalliques

Les métaux sont originellement présents dans la croûte terrestre et sont persistants par définition ; leurs spéciations peuvent cependant évoluer et ils peuvent migrer dans les différents compartiments (Book, 2014). Il existe différentes sources des éléments traces métalliques dans l'environnement, ces sources peuvent être d'origine naturelle ou anthropique.

I.1.1. Sources naturelles

Les sources naturelles proviennent principalement de l'altération physique et chimique, des roches, et des émissions volcaniques (Bentahar, 2008) :

- ▶ L'altération et le lessivage des roches terrestres contenant les métaux sous forme de trace.
- ▶ Le volcanisme sous-marin.
- ▶ Les sources hydrothermales sous-marines.
- ▶ La dégradation de la matière organique (végétale, animale et fossile) contenant les métaux trace en concentration plus ou moins faibles.
- ▶ Les poussières cosmiques entrant dans la terre et précipitant dans l'océan.

I.1.2. Sources anthropiques

Les sources anthropiques sont multiples, les principales proviennent de l'exploitation des minerais (extraction), de l'industrie métallurgique (fonderies), de l'agriculture (pesticides, engrais), de la combustion des hydrocarbures, des incinérateurs etc. Ces différentes sources participent à l'enrichissement du milieu aquatique par les retombées

Chapitre I : Synthèse bibliographique

atmosphériques (sèches et humides), par les apports fluviatiles, par les eaux de ruissellement sur les surfaces imperméabilisées, par les exutoires urbains et industriels, et par les rejets des stations d'épuration (Gerard, 2000 ; Ifremer., 2003; BenTaher, 2008).

Tableau (I.1) : Domaines d'utilisation des éléments métalliques (Gerard, 2000).

Utilisations	Métaux
Batteries et autres appareils électriques	Cd, Hg, Pb, Zn, Mn, Ni, Ti,
Pigments et peintures	Ti, Cd, Hg, Pb, Zn, Mn, Sn, Cr, Al, As, Fe
Alliages et soudures	Cd, As, Pb, Zn, Mn, Sn, Ni, Cu
Biocides (pesticides, herbicides, conservateurs)	As, Hg, Pb, Cu, Sn, Zn, Mn
Agents de catalyse	Ni, Hg, Pb, Cu, Sn
Verre	As, Sn, Mn
Engrais	Cd, Hg, Pb, Al, As, Cr, Cu, Mn, Ni, Zn
Matières plastiques	Cd, Sn, Pb
Produits dentaires et cosmétiques	Sn, Hg,
Textiles	Cr, Fe, Al
Raffineries	Ni, V, Pb, Fe, Mn, Zn
Carburants	Ni, Hg, Cu, Fe, Mn, Pb, Cd

I.2. Classification des éléments traces métalliques

La classification des éléments traces métalliques a été faite selon son rôle biologique, qui est à la fois indispensable pour la biologie et toxique quand ils dépassent certains dose, donc on distingue deux classes des éléments traces métalliques.

I.2.1. Eléments essentiels ou oligo-éléments

Appelés aussi « Oligo-éléments », Ils sont indispensables au métabolisme, et qui entrent dans leurs processus biochimiques et nutritionnels, exemple de : Fe, Cu, Co, Zn, Cr, Mn, Mo, V, Se, Ni, Sn (Bliefert et al., 2011). L'Organisation mondiale de la santé (OMS) estime qu'il s'agit des éléments dont la concentration peut être exprimée en ppm dans les sédiments ou biotes et en ppm dans la matrice eau (WHO., 1996).

I.2.2. Eléments non essentiels

L'appellation « non essentiels » signifie leurs effets néfastes pour l'activité biologique des organismes, ces métaux perturbent souvent le cours normal des processus physiologiques et métaboliques des espèces, même à l'état de traces de certains éléments tel que (Hg, Pb, Cd, As etc.). à l'exception de faibles doses tolérables (Bliefert et al., 2011).

Chapitre I : Synthèse bibliographique

I.3. Caractéristiques physico-chimiques des métaux traces et leurs distributions dans l'environnement

La distribution des éléments métalliques dans l'environnement marin dépend également plusieurs facteurs, notamment les paramètres physico-chimiques du milieu.

Tableau (I.2) : Caractéristiques physico-chimiques des métaux et distribution dans l'environnement (Duursma et al., 1996 ; Guéguen, 2001).

Élément	Masse mol (g/mol)	Pression de vapeur à 20 (Pa)	Solubilité à 20 °C (g/L)	Coefficient de partage eau/particules	
				log K_p (L/kg)	Type de milieu
Aluminium	26.98	-	<i>Al : Insoluble</i>	-	-
Chrome	52.00	-	<i>AlCl₃ : 69.9</i>	<i>CrVI : 2.30</i>	<i>MES Rivière</i>
			<i>CrO₃ : 625</i>	<i>CrIII : 4.50</i>	<i>MES Rivière</i>
			<i>Na₂CrO₄ : 530</i>	<i>Cr : 5.30</i>	<i>MES Rivière</i>
			<i>Na₂Cr₂O₇ : 2 355</i>		
Manganèse	54.94	-	<i>K₂Cr₂O₇ : 115</i>	3.20-7.09	<i>MES Mer</i>
			<i>0 à 3 800 selon le sel considéré</i>	3.90	<i>MES Rivière</i>
Fer	55.85	-	<i>0 à 1 600 selon le sel considéré</i>		
Nickel	58.70	-	<i>Sels très solubles</i>	3.72	<i>MES Rivière</i>
Cuivre	63.54	-		3.00-6.04	<i>MES Mer</i>
				4.03-5.10	<i>MES Rivière</i>
Zinc	65.38	-	<i>ZnSO₄ : 220</i>	4.86	<i>MES Rivière</i>
				3.18-6.77	<i>MES Mer</i>
				3.03-5.10	<i>MES Rivière</i>
Arsenic	74.92	<i>Très faible (</i>	<i>As insoluble</i>	<i>AsIII : 0.00-0.91</i>	<i>Sol</i>
			<i>As₂O₃ : 1.8×10⁴</i>	<i>AsV : 0.28-3.18</i>	<i>Sol</i>
Cadmium	112.41	-	<i>As₂O₅ : 1.5×10⁶</i>	4.93	<i>MES Rivière</i>
			<i>Cd : insoluble</i>	3.70-5.80	<i>MES Rivière</i>
			<i>CdO : 5</i>	2.32 (0.70-2.88)	<i>Sol</i>
Mercure	200.59	<i>HgCl₂ : 0.06 69</i> <i>CH₃HgCl : i 6</i>		5.23	<i>MES Rivière</i>
				2.23	<i>Sol</i>
				5.5	<i>Sed Mer</i>
				5.05	<i>Sed Riv</i>
				5.63	<i>MES Rivière</i>
Plomb	207.20	-	<i>PbCO₃ : 1.1</i>	4.27-7.00	<i>MES Mer</i>
			<i>PbO : 17</i>	5.00-6.50	<i>MES Rivière</i>

I.4. Devenir des éléments traces métalliques

I.4.1. La biodisponibilité

La biodisponibilité d'un polluant est définie comme étant la fraction de la quantité totale de ce dernier présente dans le biotope, qui est absorbée par les producteurs (végétaux), les

Chapitre I : Synthèse bibliographique

consommateurs (animaux), et/ou les décomposeurs (bactéries, champignons), et qui peut être prélevée par un organisme à partir de son biotope et être transférée, stockée ou métabolisée par ce dernier, il convient d'exclure de la fraction biodisponible, la fraction qui transite par le tube digestif sans être utilisée, (Torri et al., 2008).

I.4.2. Bioaccumulation

La bioaccumulation correspond à l'augmentation de concentration d'un contaminant dans un organisme par rapport à sa concentration dans le milieu externe (eau de mer) et est due à une vitesse d'incorporation du contaminant supérieure à son taux d'élimination (excrétion et métabolisation) (Torri et al., 2008)..

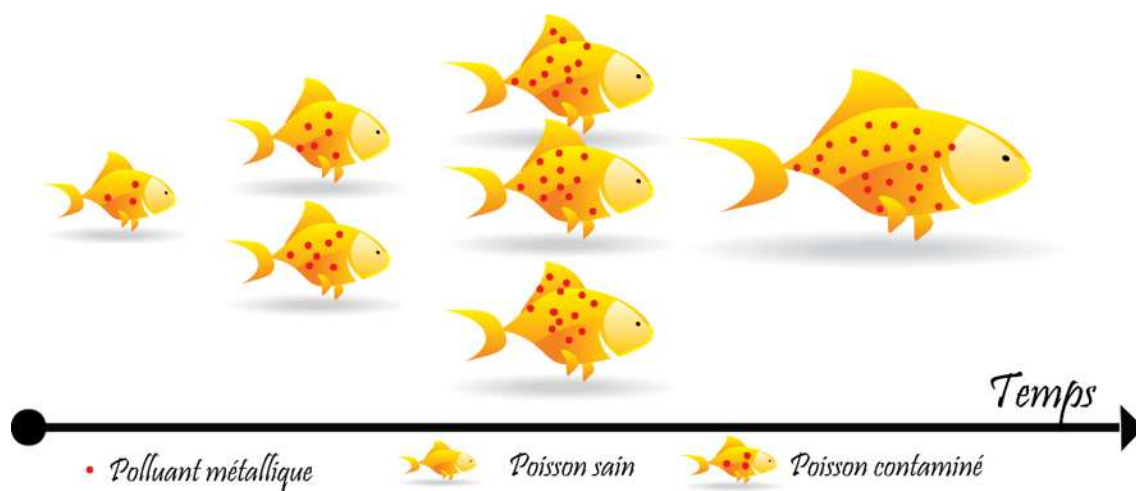


Figure (I.1) : Augmentation de la concentration des contaminants avec le temps dans la chaîne trophique (Hoggas, 2018).

I.4.3. L'assimilation

Le mode d'assimilation des métaux traces de l'eau de mer par les organismes implique une chélation compétitive de l'élément sur la surface de la cellule. Les chélates seront décomposés et les éléments traces sont transportés à travers la membrane de la cellule sous forme non chargée (neutre) ou simplement chargée sous la forme de complexe chloro ou hydroxyle (Buffle, 1988). Les concentrations des métaux traces exigées par le phytoplancton sont mal connues. Cependant, il paraît que la concentration présente dans l'océan est largement suffisante pour supporter la vitesse de la photosynthèse. On pense aussi que certaines espèces planctoniques sont typiquement côtières en raison de leur besoin important en fer (Buffle, 1988).

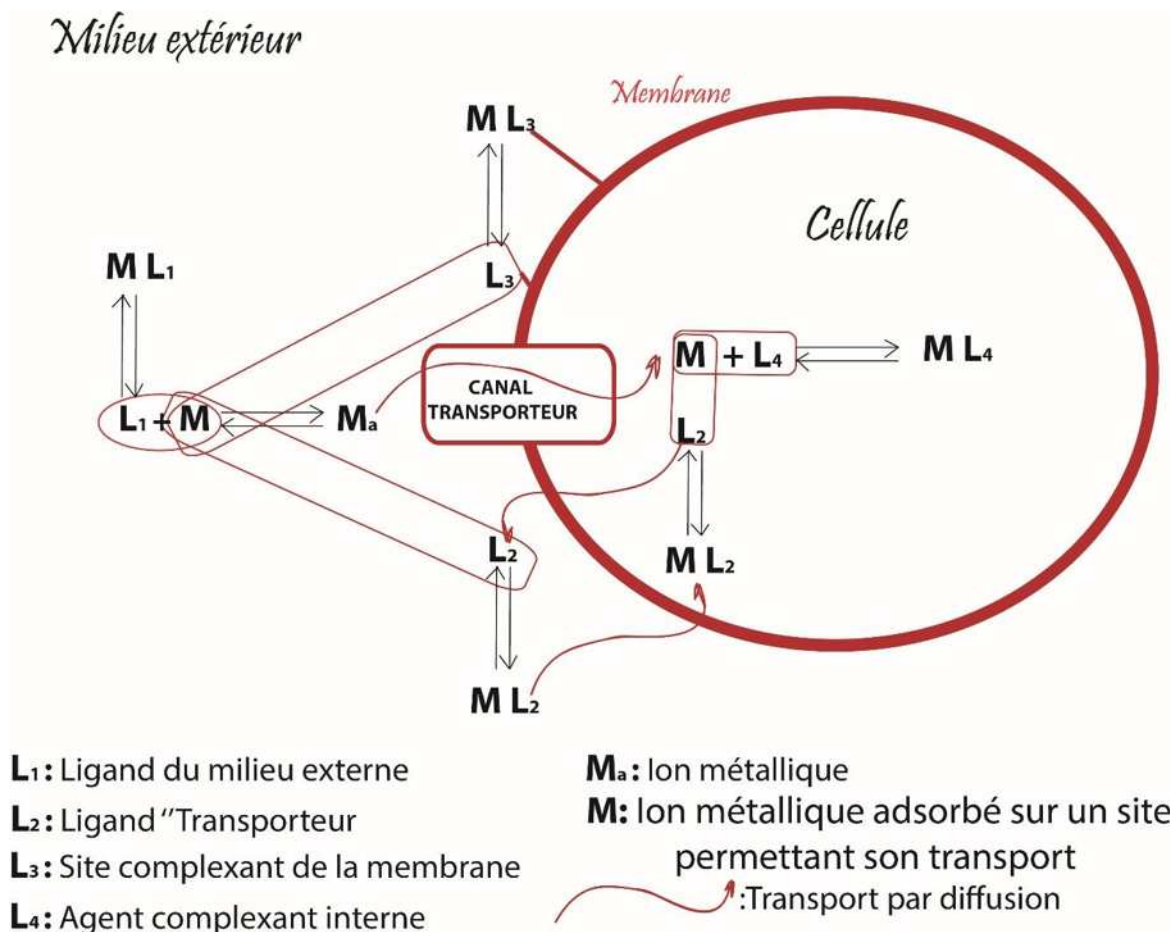


Figure (I.2) : Le rôle des agents complexants dans l'assimilation des métaux (M) par les organismes aquatiques (Buffle, 1988).

I.4.4. La bioconcentration

La bioconcentration est un cas particulier de bioaccumulation, elle est définie comme le processus par lequel une substance ou un élément se trouve présent dans un organisme vivant, à une concentration supérieure à celle de son milieu environnant. C'est donc l'accroissement direct de la concentration d'un contaminant lorsqu'il passe de l'eau à un organisme aquatique, le facteur de concentration FC est défini comme une constante issue du rapport de la concentration d'un élément dans un organisme en état d'équilibre à sa concentration dans le biotope (Ramade, 2007).

I.4.5. La biomagnification ou bioamplification

La biomagnification ou bioamplification correspond à l'augmentation de concentration le long du réseau trophique. Ainsi, la compréhension de la structure du réseau trophique et de son fonctionnement améliore la capacité de prévoir la concentration des contaminants chimiques persistants dans les différents niveaux trophiques. (Ramade, 2007).

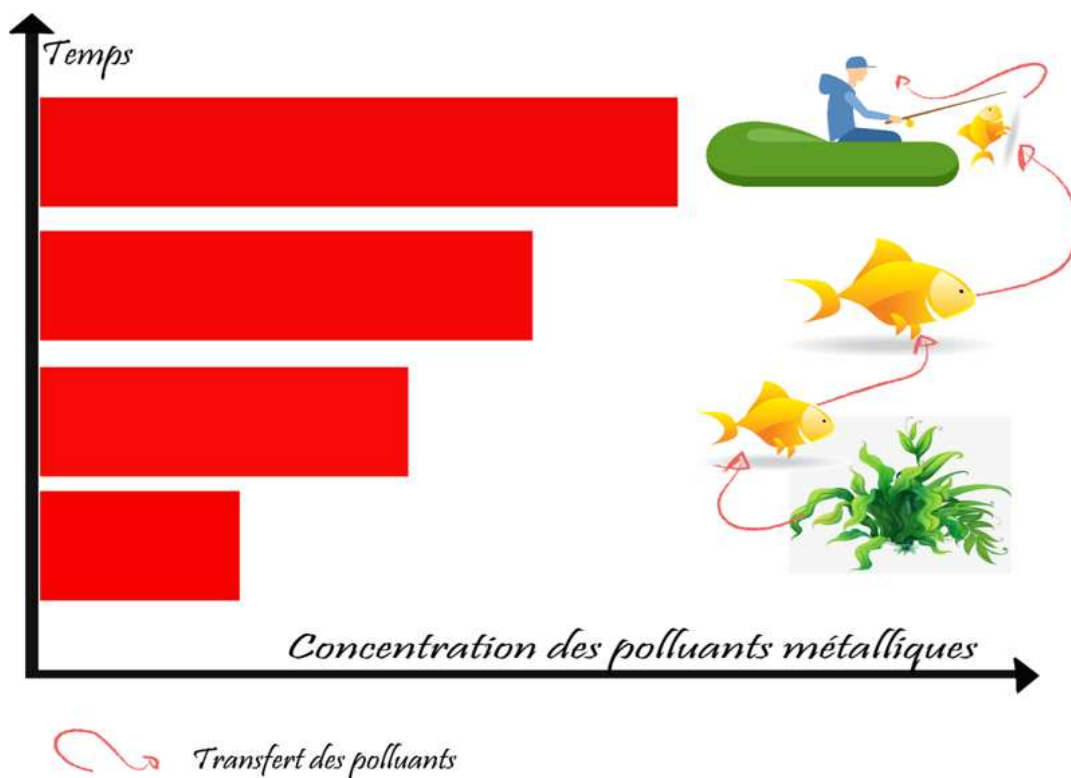


Figure (I.3) : l'Augmentation de concentration du métal le long du réseau trophique (Hoggas, 2018)

I.5. Comportement des éléments traces métalliques dans le milieu aquatique

Les métaux peuvent exister sous forme de complexes, de particules ou en solutions, tout dépend de la physico-chimie du milieu (pH, ions dissous, Eh et température). La distribution et la répartition de ces éléments dans le milieu aquatique se fait par différents processus telle que la dilution, l'advection, la dispersion, la sédimentation et l'adsorption/désorption. Certaines réactions chimiques (réduction, méthylation, dé-méthylation et oxydation) peuvent intervenir également. Ces processus sont effectués par des micro-organismes et par des algues (Zhou, 2009).

I.5.1. Spéciation

Spéciation chimique concerne l'étude des différentes espèces des éléments chimiques dans l'environnement, leur distribution, leur mobilité, leur stabilité et équilibre dans les différents compartiments et réservoirs naturels. Un métal peut être sous différentes formes (Turner, 1984 ; Buffle, 1988 ; Tessier et al., 1995 ; Stumm et al., 1996) :

- ▶ Ion libre hydraté
- ▶ Complexé par des ligands inorganiques, paires d'ions inorganiques

Chapitre I : Synthèse bibliographique

- ▶ Complexé par des ligands organiques
- ▶ Complexé à des molécules organiques de haut poids moléculaire (
- ▶ Adsorbé sur des colloïdes inorganiques (FeOOH, Fe(OH)₃, Oxydes de manganèse, Ag₂S, argiles ...) et organiques
- ▶ Précipité
- ▶ Adsorbé sur des particules organiques, restes d'organismes vivants

Tableau (I.3) : la spéciation des différents éléments traces métalliques dans le milieu aquatique (Abollino et al., 2000)

Métal	Spéciation dans le milieu aquatique
Cr	$Cr(OH)^{+2}$; $Cr(OH)_3$; $Cr(OH)^{-4}$; $Cr(OH)_2$; $HCrO^{-4}$; CrO^{-2}_4
Fe	Fe^{+2} ; $Fe(OH)_3$; $FeCO_3$; FeS_2 ; FeS ; $Fe(OH)^{+2}$; $Fe(OH)^{-4}$; $FeSO_4$ Fe_3O_4 ; Fe_2O_3 ; $FePO_4$; $Fe_3(PO_4)_2$; $FeCl^-$; Fe-Silicates
Mn	Mn^{+2} ; MnS ; $MnCl^+$; $MnCO_3$; $Mn(OH)_2$; MnO_2
Ni	Ni^{+2} ; NiS ; $NiCl^+$; $NiSO_4$; $Ni(OH)_2$
Cu	Cu^{+2} ; CuS ; CuO ; $Cu(OH)_2$; $Cu(OH)^+$; $CuFeS_2$; $Cu_2CO_3(OH)_2$; $Cu_3(CO_3)_2(OH)_2$
Zn	Zn^{+2} ; ZnS ; $ZnSO_4$; $Zn(OH)^+$; $ZnCl^+$; $ZnSO_3$; $ZnCO_3$
Pb	Pb^{+2} ; PbS ; $PbCl^+$; $PbCl_2$; $PbCl^{-3}$; $PbCO_3$; $Pb(OH)^+$; $Pb(OH)_2$; PbO_2
Cd	Cd^{+2} ; $CdCl^+$; $CdCl_2$; $CdCl^{-3}$; CdS ; $Cd(HS)^+$; $Cd(HS)_2$; $Cd(HS)^{-3}$; $Cd(OH)^+$; $Cd(OH)_2$; $Cd(HS)^{-2}$; $CdCO_3$

I.5.2. Complexation

Les métaux se trouvent sous différentes formes chimiques dans les différents compartiments environnementaux, par exemple, le (Hg, Pb, As et Se) sont sous plusieurs formes volatiles et sont présents dans des matrices solides (sédiments, sols) ou liquides. Et se trouvent sous formes des ions hydratés ou liés aux complexes organiques et inorganiques. Chlorure, carbonate, sulfate, hydroxyle et fluorure sont les principaux ligands inorganiques qui se trouvent en concentrations élevées dans les milieux aquatiques (Abasse et al., 2008).

Les complexes formés entre les ligands inorganiques et les métaux traces ont souvent des constantes de stabilité relativement faibles et les métaux ainsi complexés sont appelés métaux sous formes mobiles ou labiles (Dabrowski, 2001)

I.5.3. Adsorption

L'adsorption est définie comme la fixation des molécules de soluté à la surface d'un solide. Le processus d'adsorption conduit à l'obtention d'un état d'équilibre auquel correspond une concentration bien définie de soluté (Mcnaught, 1997) :

a) Adsorption physique :

Appelée également physisorption, elle est caractérisée par une faible énergie de liaison inférieure à 6 Kcal/mol. Dans l'adsorption physique, le temps de rétention de la substance adsorbée est court et la surface adsorbée peut être recouverte de multiples couches moléculaires de produits adsorbés (Rouquerol et al., 2014).

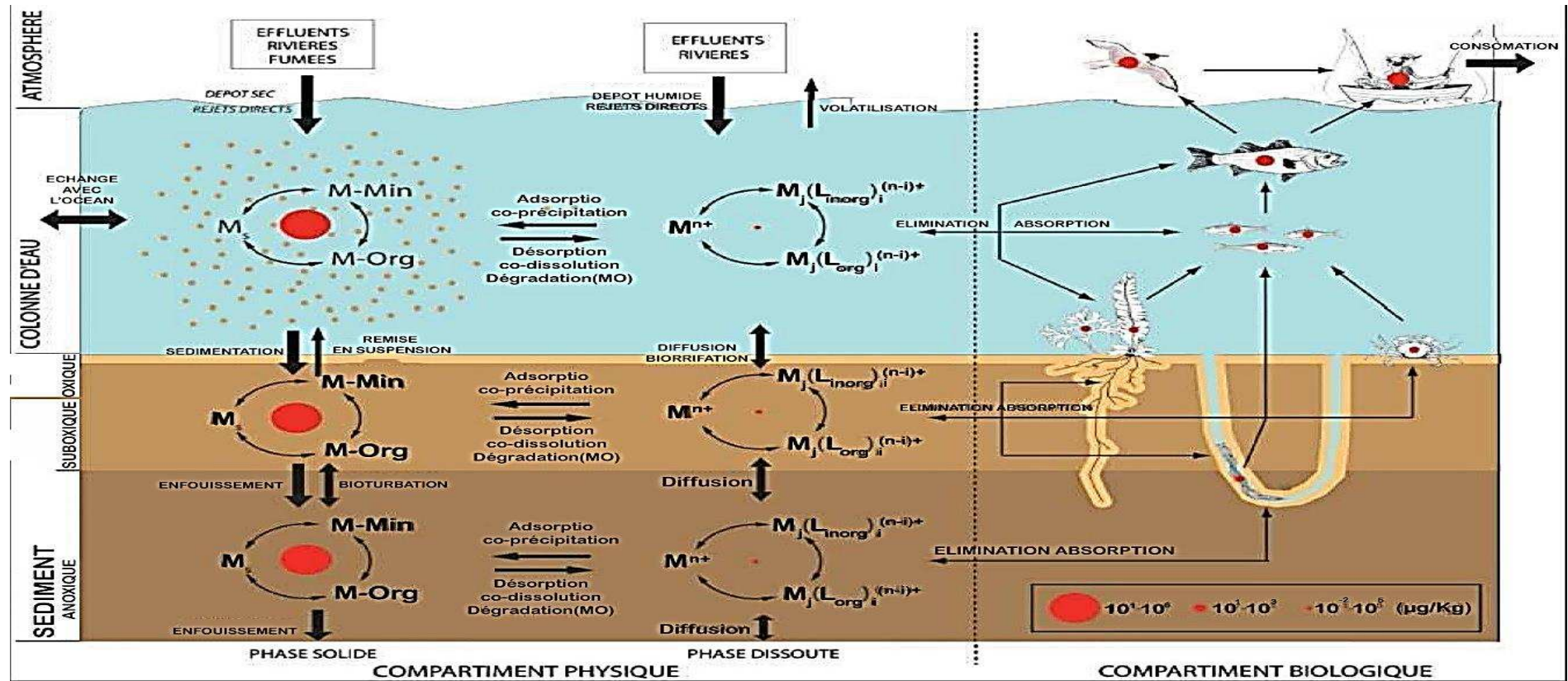
b) Adsorption chimique :

Appelé également chimisorption, elle met en jeu une énergie élevée, supérieure à 10 Kcal/mol et correspond aux liaisons covalentes entre l'adsorbant et la molécule adsorbée (Aurelie, 2004). Dans l'adsorption chimique, le temps de rétention est long et seule la première couche liée à la surface adsorbante est chimiquement adsorbée, les autres couches, dans le cas où elles existent, sont retenues par la physisorption (Sun et al., 2016)

1. Cycle biogéochimiques des éléments traces métalliques

La notion de 'cycle' signifie les phénomènes qui n'évoquent pas le retour répété à un point de départ caractéristique du cycle. (Jambon, 2009). Donc le cycle biogéochimique d'un métal explique les différents processus biologiques, géologique et chimique dont le métal peut interagir avec (Bolin, 1983).

Chapitre I : Synthèse bibliographique



- Concentration des métaux traces en $\mu\text{g/Kg}$
- M-Min** : Matière Minérale
- M-Org** : Matière Organique
- M_s** : Matière Sèche
- L_{inorg}** : Ligand inorganique
- L_{org}** : Ligand organique

Figure (I.4) : Cycle simplifié des éléments traces métalliques (ETM) dans les milieux aquatiques côtiers. (Rigaud, 2011)

I.6. Origines et devenir des sédiments

Les sédiments sont définis comme étant un ensemble de particules déposées au fond d'un bassin appelé 'Bassin sédimentaire'. Les sédiments sont très diversifiés ; ils proviennent soit du transport de particules détritiques depuis les aires d'érosion continentale, soit de l'activité biologique, soit de précipitations chimiques. Leur accumulation, leur compaction et leur éventuelle cimentation sont à l'origine des roches sédimentaires (Chamley, 2000). Dans son ensemble, la charge sédimentaire du littoral n'est qu'en transit, car la majeure partie des sédiments qui provient des continents va se retrouver surtout sur le glacis aux pieds du talus. Une partie de la charge sédimentaire du littoral est transportée vers le large (l'offshore) principalement par suspension. Il s'agit des sédiments à particules fines : les boues et les sables très fins (Clozel al., 2003)

I.6.1. Les différents apports de sédiments

Les apports fluviaux évacuent une charge importante en matière de sédiments au niveau des zones côtières là où nous distinguons deux types d'embouchures :

a) Les estuaires dans les mers à courants côtiers et courants de marées importants :

- ▶ Phase minérale inerte constituée de poudres de sable quartzes et calcaire (origine continentale et marine).
- ▶ Une phase colloïdale active qui forme le liant. Ce dernier est composé de matière organique (continentale (pollen, humus) et marine (algues, diatomée)), de fer sous forme d'hydroxydes et de sulfures (tels que la pyrite).

b) Les deltas qui se développent dans des secteurs à plus faibles courants de marées :

- ▶ Disposition favorable à la formation de réservoir par l'alternance très épaisse de sable et d'argile.
- ▶ La sédimentation très rapide favorise le piégeage de la matière organique et son évolution anaérobie en hydrocarbures.
- ▶ L'abondance des sels nutritifs dans les apports des fleuves favorise une productivité biologique très importante.

La fraction solide transportée par le réseau hydrographique constitue l'essentiel de la lignée détritique livrée à l'océan ; celle-ci est aussi constituée de la retombée de particules véhiculées par l'atmosphère (poussières volcaniques, éoliennes, et d'origine cosmique) **Figure (I.5)**. Les ions dissous livrés par le réseau hydrographique et l'hydrothermalisme sous-marin alimentent la lignée ionique à partir de laquelle les activités biologiques ou des mécanismes purement chimiques peuvent produire des particules sédimentaires (Figure (7et 8) La pente du talus est très exagérée ; généralement, elle demeure voisine de 5°.

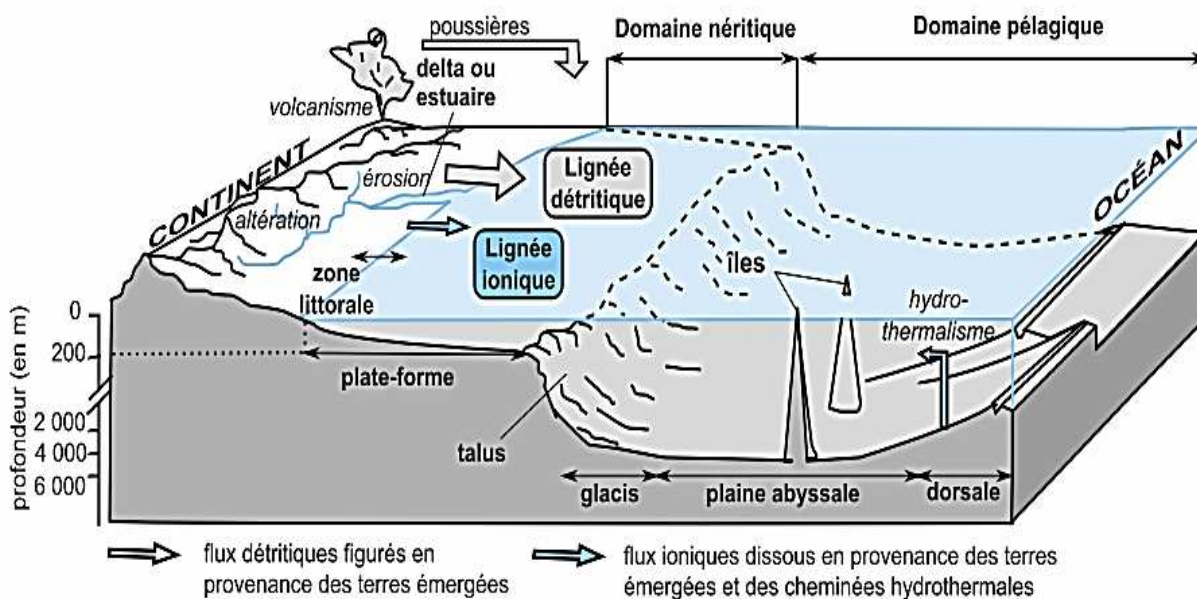


Figure (I.5) : Organisation du domaine marin en différentes aires sédimentaires en contexte de marge continentale stable ou passive, et approvisionnement du processus sédimentaire (Peycru, 2008).

I.6.2. Devenir des lignées détritiques, ioniques, et organiques

La charge détritique transmise par les fleuves ou arrachée sur les côtes par les vagues est usée, calibrée par l'action de celles-ci, et répartie par la dérive littorale (courant côtier subparallèle au trait de côte) et les courants de marée. En bout de plate-forme continentale, le talus est l'objet d'une grande instabilité sédimentaire du fait d'une pente souvent « forte » (4 à 5° en moyenne), La mise en mouvement de courants gravitaires (figure 9a) peut être déclenchée par des séismes (même des microséismes), mais le plus souvent la simple accumulation sédimentaire.

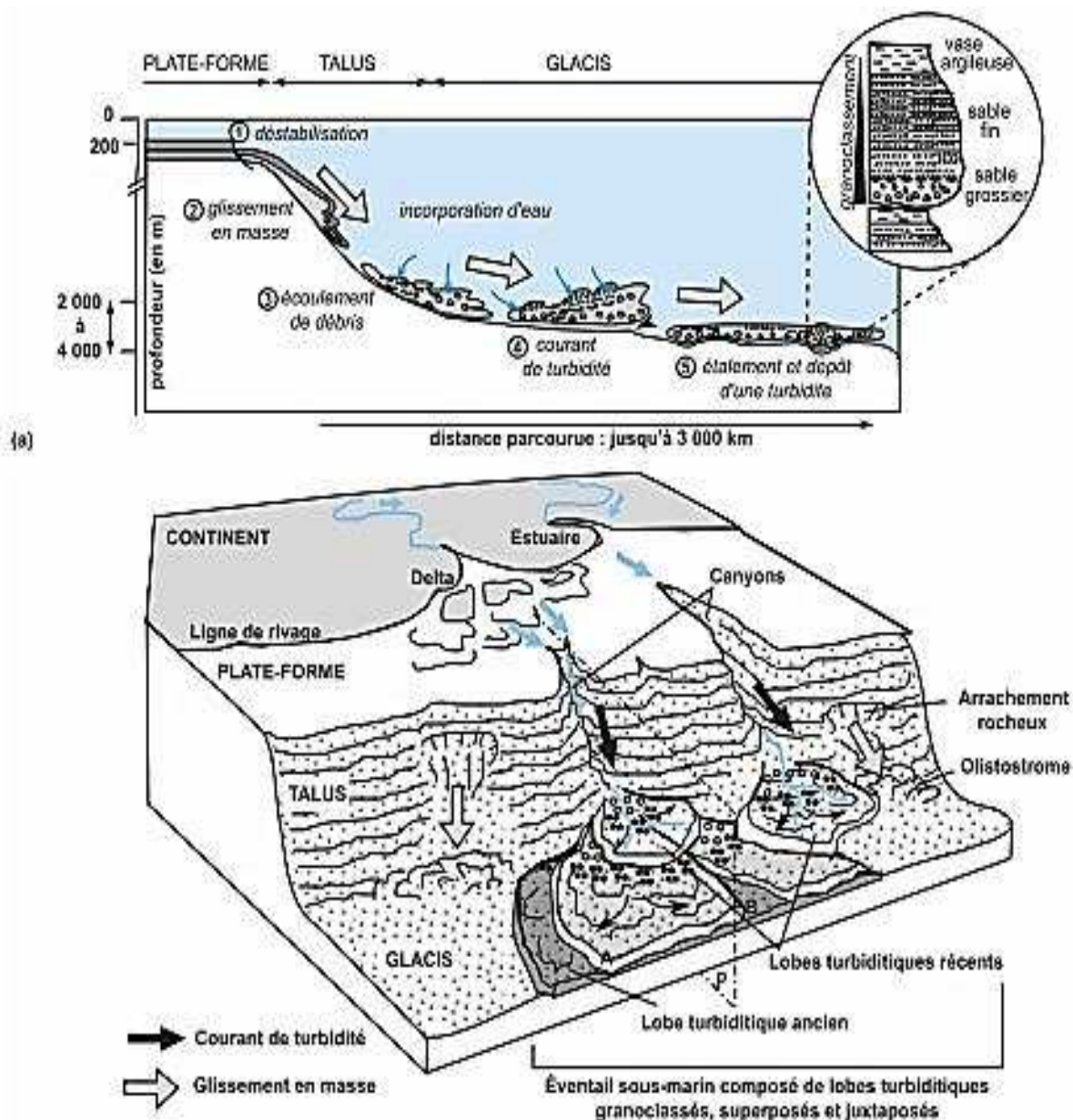


Figure (I.6) : Mécanismes et résultats d'un écoulement gravitaire (Pey cru, 2008).

I.7. Les facteurs qui influencent la dynamique spatiale des polluants métalliques

I.7.1. Dynamique sédimentaire

a) Sédimentation

La sédimentation signifie un dépôt des particules transportées par un fluide (Pey cru, 2000) :

- ▶ Sédimentation détritique.
- ▶ Précipitation de solutions : sédimentation évaporitique.

Chapitre I : Synthèse bibliographique

- Précipitation biologique : carbonates, silice. Préservation de la matière organique sédimentaire.

La sédimentation est la résultante de nombreux paramètres extérieurs au domaine sédimentaire (taille des bassins versants et vigueur de leurs reliefs, intensité de l'érosion en liaison avec le climat), et propres au domaine lui-même (morphologie de la marge, régime des courants, de la houle, ampleur etc.) (Peycru, 2008).

Le dépôt des particules détritiques transportées par l'eau dépend de leur taille et de la vitesse du courant qui détermine l'énergie hydraulique du milieu (figure I.7).

Concernant les grains détritiques dont la taille est supérieure à 0,05 mm, ils se déposent graduellement des plus grossiers aux plus fins, au fur et à mesure que la vitesse du courant diminue. Un autre facteur pouvant favoriser le dépôt des petites particules est la charge cationique de l'eau ; en effet, les particules argileuses électronégatives ont tendance à se rassembler quand la teneur en cations dans le milieu est suffisante : ces derniers s'intercalent entre les particules argileuses qui se rassemblent alors pour former des agrégats de plus grande dimension, ce qui favorise leur dépôt : on parle dans ce cas de floculation.

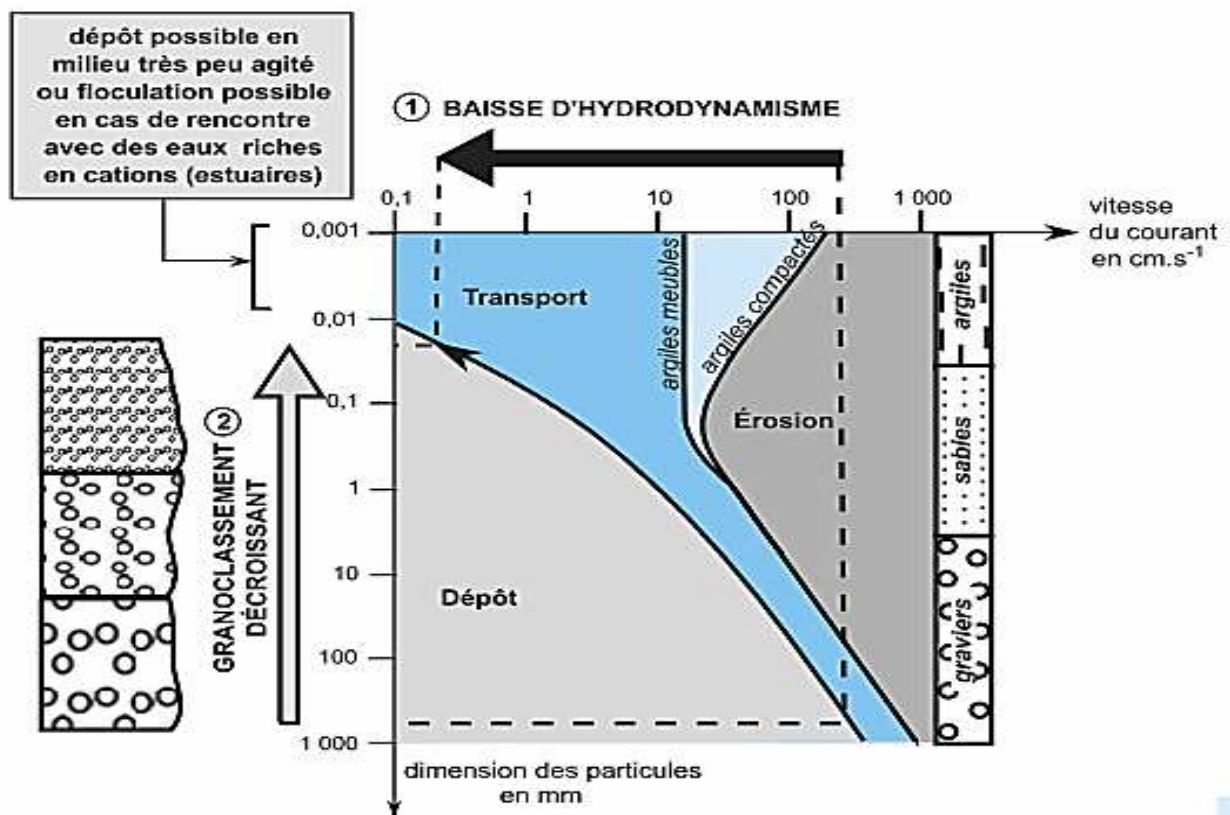


Figure (I.7) : Comportement des particules dans l'eau et capacité de sédimentation (Peycru, 2008).

b) Transport sédimentaire

Le transport sédimentaire s'agit du roulement et de la traction le long du fond ou du substrat, de la saltation (transport par bonds, suite à des chocs successifs) (figure I.8) et du transport en suspension. Les particules en mouvement par roulement, traction et saltation constituent la charge de fond "bedload", généralement formée de galets et de sable. La charge en suspension est surtout constituée d'argile et de silt (ceci étant vrai à la fois pour les écoulements d'air et d'eau). La charge en suspension des écoulements turbulents est beaucoup plus importante que celle des écoulements laminaires figure(I.10).

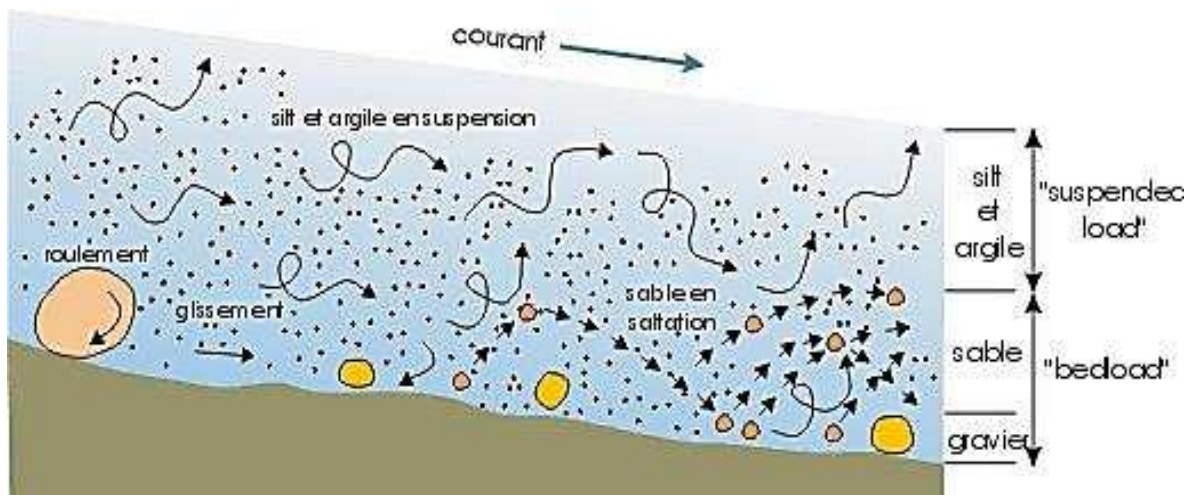


Figure (I.8) : Les différents modes de transport des particules en mer (Boulvain, 2018)

i. Transport par charriage

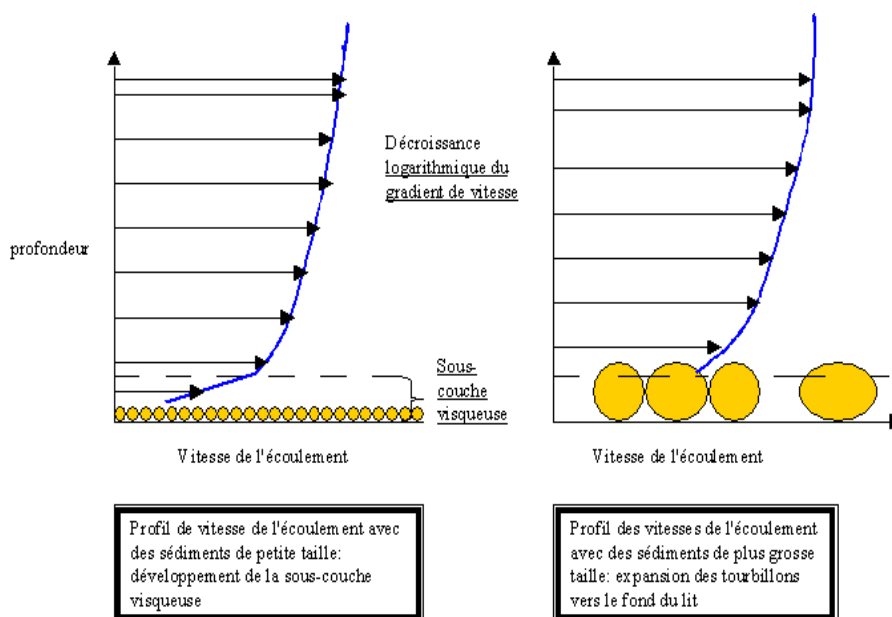
Le transport des sédiments est horizontal, et s'effectue immédiatement au-dessus du lit. Ce sont les collisions successives des particules entre elles qui sont à l'origine du mouvement du sédiment. L'écoulement turbulent influence moins le mouvement.



Figure (I.9) : Schéma explicatif de transport par charriage

ii. Transport des sédiments en suspension et/ou en saltation

Lorsque la force de sustentation est telle que les grains légers flottent entre deux eaux, il s'agit de la suspension. Enfin, là où le grain de matériau avance par bonds successifs, on parle de saltation (Boulvain, 2018)



Figure(I.10) : l'influence de la vitesse de l'écoulement sur le mode de transport

Ces transports sont beaucoup plus prononcés au niveau des sédiments de la marge continentale où la dynamique des eaux et autres phénomènes (sédimentation, activité biologiques, apport continentaux, érosion côtière, transit sédimentaire ...) sont importants.

I.8. Impacts de la contamination métallique dans le milieu marin

La contamination métallique des milieux aquatiques est devenue une préoccupation d'ampleur mondiale en raison de sa toxicité, de sa bioaccumulation et de ses effets sur la vie aquatique. Les résidus métalliques risquent de porter atteinte à la vie aquatique en s'accumulant dans les micro-organismes, la flore et la faune aquatiques, ainsi que, à travers les usages de l'eau (alimentation, baignade etc.), à la santé humaine (Cook et al., 1990 ; Deniseger et al., 1990). Une grande partie des polluants métalliques piégée dans les sédiments (Sin et al., 2001). Et l'évaluation de la contamination métallique dans le milieu aquatique se fait par l'analyse de sédiment qui représente une archive historique de la pollution métallique (Buggy et al., 2008).

Chapitre I : Synthèse bibliographique

I.8.1. Effet sur les organismes aquatiques

La toxicité des éléments traces métalliques est directement liée à la chimie réactionnelle avec les cellules vivantes (Géode., 2012). Ce grand pouvoir toxicologique des éléments traces métalliques tel que (Pb, Hg, et Cd) due à leur affinité pour les groupements -SH des enzymes qu'ils inactivent après s'y être liés (Wenqiang, 2005).

Tableau (I.4) : Effet toxique de quelques métaux sur les organismes aquatiques (Casas, 2005)

Métal	Effet toxiques sur les organismes aquatiques
Cd	Anomalies dans le développement embryonnaire et larvaire chez mollusque bivalves à la concentration 0,05 à 1,2 µg.L-1, inhibitions de croissance des mollusques
Pb	Inhibition de la croissance des moules (<i>Mytilus galloprovincies</i>) Effet sur la croissance de certaines espèces phytoplanctonique à partir 0,05 µg.L-1
Zn	Effets sur la reproduction des huîtres et la croissance des larves.
Hg	Méthyl Hg bioamplifié (thon, espadon),
Cu	Très toxique pour les formes larvaires et les végétaux ↔ anti-fouling Comportement migrateur des poissons téléostéens affecté à partir de 4µg/L

I.8.2. Effet sur la santé humaine

L'être humain se trouve au sommet de la chaîne alimentaire. C'est cette position lui confère les risques pour sa santé liés aux contaminants présents dans les organismes marins comestibles (Hayter, 1980).

Tableau(I.5) : Effet toxique des métaux lourds sur la santé humaine

Métal	Effet toxique sur la santé humaine
As	Toxique, possible cancérigène
Cd	Hypertension, dommage sur le foie
Cr	Cancérigène sous forme de Cr (VI)
Cu	Peu toxique envers les animaux, toxique envers les plantes et les algues à de niveaux modérés
Hg	Toxicité chronique et aigue
Ni	Allergies de peau, maladie respiratoires possible cancérigène
Pb	Toxique
Zn	Toxique pour les végétaux à fortes teneurs
Se	Essentielle à faible doses, toxique à doses élevées

Chapitre II :

Zone d'étude

Introduction

La connaissance parfaite des différents paramètres naturels est indispensable pour l'étude des zones d'études. Ainsi les données, et les caractéristiques des baies présentées dans ce chapitre sont importantes pour notre étude.

II.1. Présentation de la zone d'étude

II.1.1. Situation géographique

La baie de Bou Ismail occupe la partie Ouest du centre algérois, elle s'étend du méridien du Mont Chenoua à l'Ouest ($2^{\circ}25'$ E et $36^{\circ}38'$ N) à celui du Ras Acrata à l'Est ($2^{\circ}55'$ E et $36^{\circ}48'$ N). La surface de cette baie est de 350 km^2 avec une ouverture de 40 Km orientée du Sud-Ouest au Nord-Est, limitée de nord par la mer méditerranéenne, et la plaine de Mitidja et collines du Sahel du sud et Sahel d'Alger de l'Ouest.

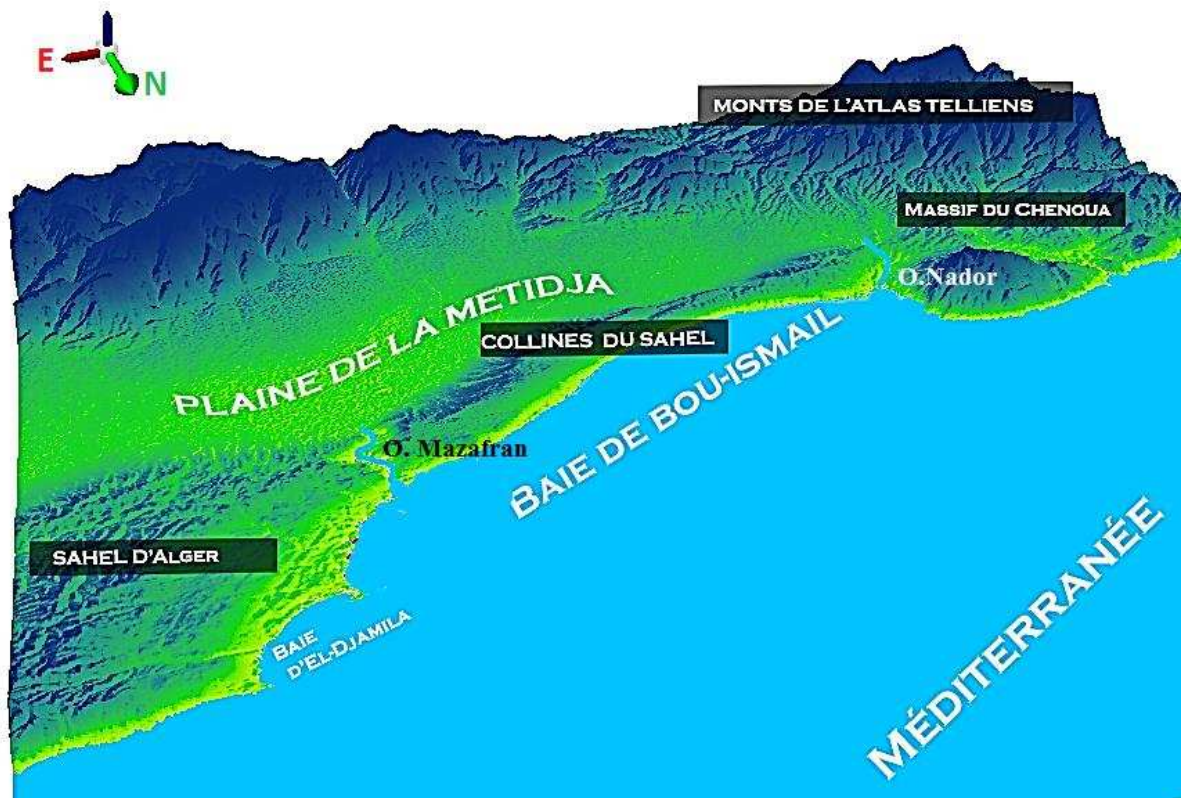


Figure (II.1) :Présentation de la zone d'étude avec ses différents reliefs 3D (Hoggas, 2018)

II.1.2. Occupation des sols

Les principales activités dans la région de centre algérois sont l'agriculture, notamment dans la plaine de la Mitidja Figure (II.1), et l'activité industrielle, qui s'est développée d'une façon accrue et, dans une moindre mesure le tourisme concentré essentiellement sur le littoral de la Wilaya de Tipaza et Alger principalement en été Figure (II.2) .

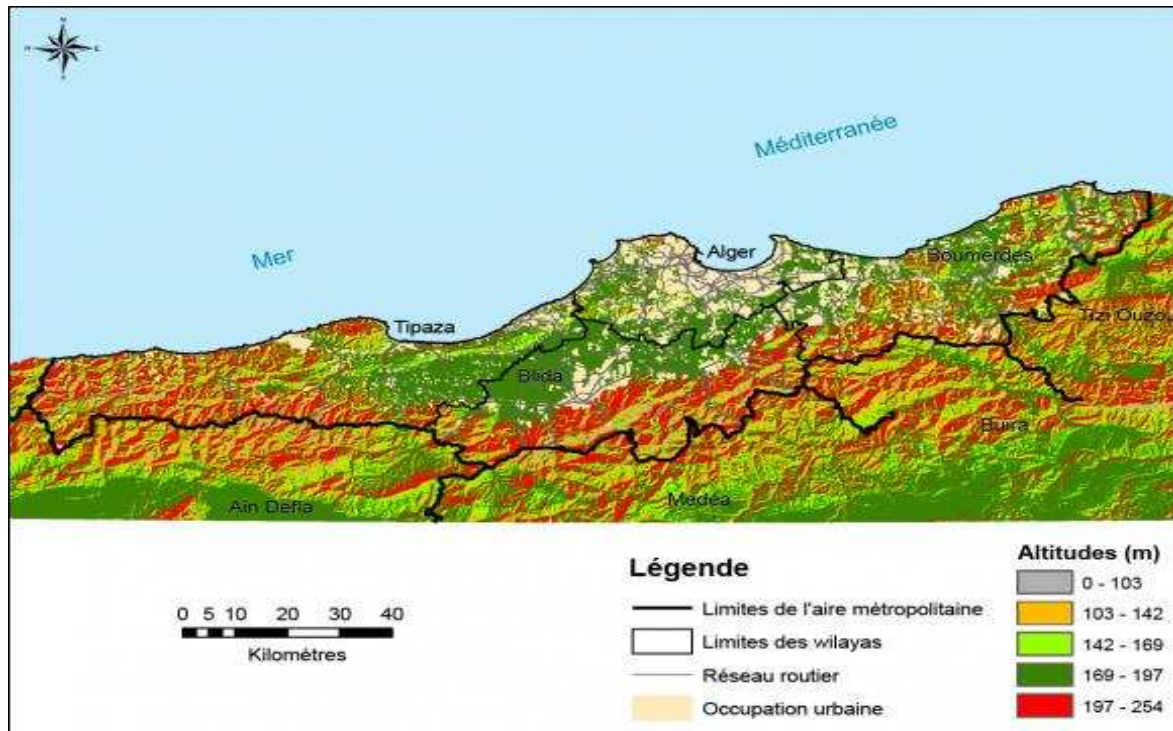


Figure (II.2) : L'aire métropolitaine algéroise selon l'étude du SDAAM 2012

II.2. Contexte géomorphologique, sédimentologique et topographique

II.2.1. Sédimentologie

La grande diversité sur la nature des sédiments des fonds de la baie de Bou-Ismaïl, neuf faciès identifiés : les sables fins, les sables fins envasés, les vases sableuses, les sables graveleux, les graviers envasés, les sables grossiers et fins graviers, les vases pures, le faciès rocheux (Grimes et al., 2004).

La répartition spatiale de ces faciès n'est pas homogène en tout point de la baie ; ainsi deux régions apparaissent : a région Est ou orientale et la région Ouest ou occidentale. Chaque région présente des caractéristiques sédimentologiques propres, fait déjà signalée par Dagorne (1973). Deux types de sédiments qui sont dominants dans la baie de Bou-Ismaïl la vases pures qui est très développée dans la partie ouest de la baie et les graviers envasés dans la partie Est de la baie.. Le faciès des sables grossiers et des fins graviers, le faciès des sables graveleux n'est présent que dans la région orientale; les sables graveleux se limitent au secteur oriental.

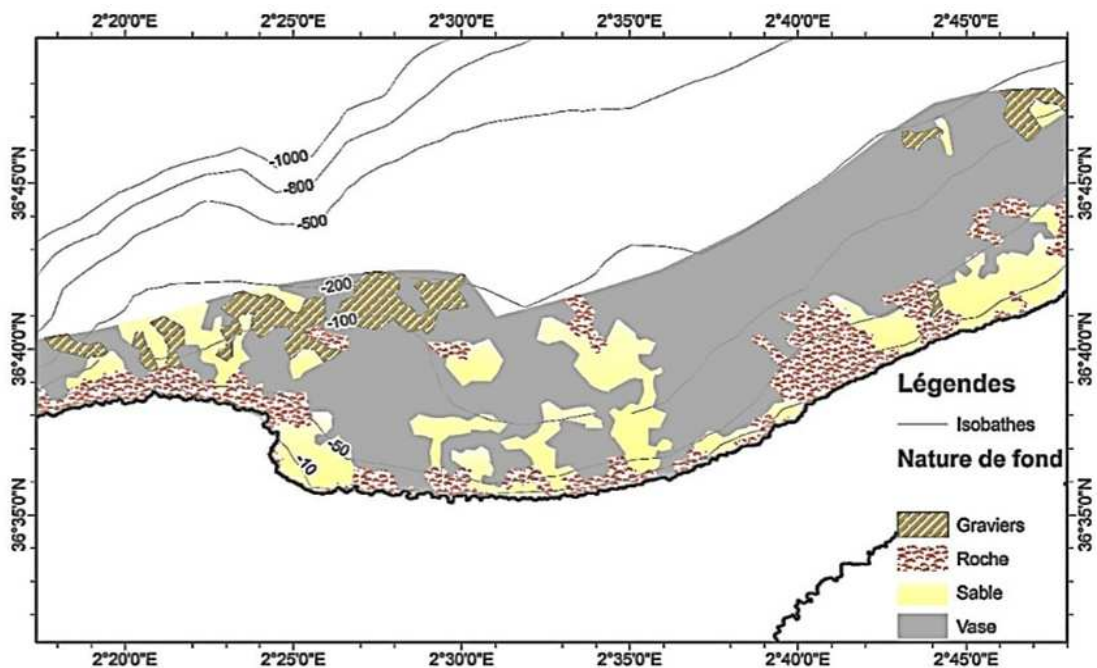


Figure (II.3): la répartition des différents types de sédiment au niveau de la baie de Bou-Ismaïl (Bachouche, 2017)

II.2.2. Topographie

Le plateau continental est, d'une manière générale, très étroit (Leclaire, 1972). La limite la plus extrême du plateau continentale au niveau du mont Chenoua atteint 13 Km. Ainsi la surface du plateau continentale de la baie de Bou-Ismaïl est de 509 Km² avec 70% de la surface chalutable (Chavance et al., 1986). Le plateau continental est caractérisé par une faible déclinaison de l'ordre 1%.

Le prolongement du massif de Chenoua, lequel rejoint la vallée sous-marine du Ras-Nador depuis la côte jusqu'à l'isobathe 180 m en direction Nord Nord-Est.

- ▶ Entre Bouharoun et Douaouda Marine, depuis la côte jusqu'à l'isobathe 100 m.
- ▶ Depuis les fonds de 110 à 150 m au Nord de Bou-Ismaïl jusqu'à la hauteur de Sidi- Fredj.

II.2.3. Géomorphologie

La géomorphologie de la zone Onshore se caractérise par deux éléments majeurs du Sud vers le Nord Fig. (II.1) :

▶ La plaine de la Mitidja

La plaine de la Mitidja correspond à une dépression plane orientée ENE-WSW, entourée de reliefs. Au sud, la plaine de la Mitidja est dominée par les Massifs de Blida représentant l'Atlas tellien et constituant une barrière orographique ne permettant des passages vers le sud qu'en de rares endroits (Oued La Chiffa) (Messaoud et al., 2006).

▶ Les collines du sahel

Ces Monts d'orientation SW- NE dominant vers le sud la plaine de la Mitidja et vers le Nord la baie de Bou Ismaïl et sont bornés à l'Ouest par le Massif de Chenoua et à l'Est par le Massif d'Alger (Messaoud et al., 2006)

II.3. Environnements bioclimatiques et hydrographiques

II.3.1. Le climat

L'Algérie est caractérisée par une variabilité saisonnière. Notamment la bande côtière qui soumit à un climat méditerranéen alors que la partie des hauts plateaux et de l'atlas saharien est dominée par un climat semi-aride et aride dans sa partie saharienne. Bien que la région septentrionale reçoive des précipitations à peu près annuelle, on distingue en général, surtout dans la partie Nord de l'Algérie, deux saisons : une saison pluvieuse durant l'automne et l'hiver avec des vents dominants de direction Ouest, et une autre sèche et ensoleillé essentiellement durant le printemps et l'été avec des vents qui viennent surtout du Nord Est et de l'Est mais qui n'apportent pas de pluie, au contact du continent chaud (Bouras, 2012). Ils entretiennent une atmosphère difficilement supportable, mais favorable à la végétation.

L'humidité est relativement élevée et constante durant presque toute l'année.

II.3.2. Environnements bioclimatiques

Le contexte bioclimatique et hydrologique l'un des outils clés pour comprendre et interpréter les différents phénomènes que nous pouvons les rencontrer dans le milieu naturel.

II.3.3. Données climatologiques

Après avoir téléchargé l'ensemble des données de (Température, précipitation, vitesse de vent, total jour de pluie et de tempête), qui débute du *01 janvier 2007* jusqu'à *31 décembre 2017* à partir des données fournies par la station météorologique 603900 (DAAG), avec les coordonnées (Latitude : **36.68°** | Longitude : **3.25°** | Altitude : **25m**), et qui sont disponible sur le site de « **tutiempo** ».

Puis, nous avons effectué un traitement statistique des données afin de calculer les moyennes mensuelles de la température et de la précipitation et du vent ainsi que les valeurs maximales et minimales de ces derniers

Tableau (II.1) : Moyennes mensuelles de 10 ans des températures de l'air, précipitation et vitesse du vent 2007-2017.

Paramètres	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Jui	Aoû	Sep	Oct	Nov	Déc
T.moy [°C]	11.04	11.64	13.35	15.90	18.94	22.87	26.06	26.52	23.65	20.19	14.97	19.02
T.max [°C]	12.8	13.6	14.5	17.1	20.6	24.8	27.5	28.1	25.9	22.8	17.4	13.3
T.min [°C]	9.6	7.5	12.4	14.3	17.3	20.6	24.8	25.3	22.5	18.7	13	10.5
P.moy [mm]	77.84	75.23	80.01	49.85	40.75	10.30	1.18	9.21	27.36	52.97	130.74	107.39
P.max [mm]	257.04	240.04	148.07	176.28	119.89	51.57	9.15	39.88	86.61	117.34	269.75	190.49
P.min [mm]	5.08	3.56	49.02	0	5.84	0.76	0	0	5.34	8.89	39.11	0
VV [m/s]	9.38	11.35	11.38	10.67	10.92	11.24	11.39	11.08	10.35	8.47	9.19	8.17

Tableau (II.2) : Total jours de pluie et de tempête durant 2007-2017

	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Total jours de pluie	113	99	99	121	105	99	119	107	86	99	94
Total jours de tempête	63	62	53	44	51	52	64	45	41	47	46

II.3.4. Température de l'air

D'après le diagramme ombrothermique, on observe que les moyennes mensuelles des températures de l'air varient entre 7.5°C au mois de Février et de 28.1°C au mois d'Aout. La courbe des données relatives aux températures montre que le mois le plus chaud est le mois d'août avec une moyenne de 28.1°C et le mois le plus froid est le mois de Février avec une température moyenne de 7.5 °C.

II.3.5. Précipitation

La baie de Bou-Ismaïl est une région à pluviométrie relativement élevée. La période pluvieuse s'étale du mois de septembre jusqu'au mois de mai avec une moyenne maximale de 269.75 mm au mois de Novembre. Les valeurs moyennes mensuelles des précipitations exprimées en millimètre mettent en évidence 3 périodes bien distincts :

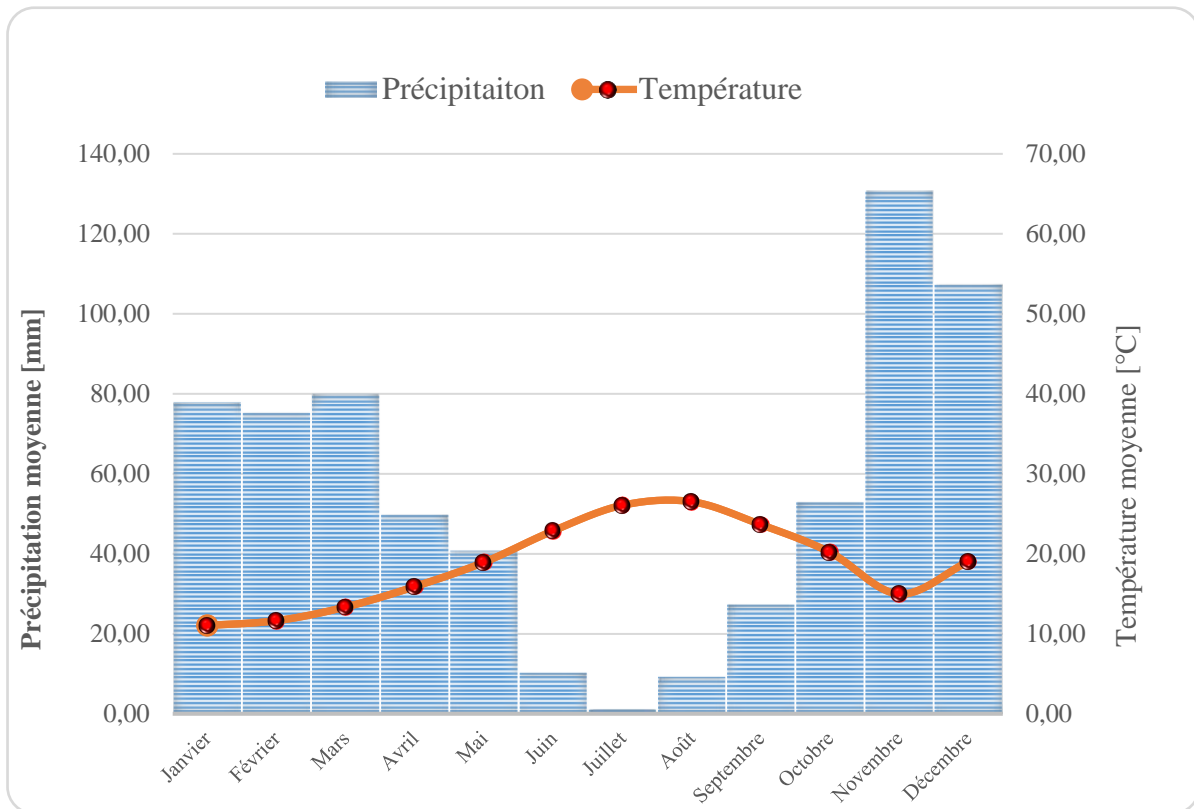


Figure (II.4). Diagramme ombrothermique d'Alger pendant 10 ans (2007-2017) (Hoggas, 2018)

- ▶ **Précipitation maximale (saison humide)** : nous remarquons que les valeurs maximales de précipitation ont été enregistrées le mois de novembre avec une moyenne de 130.74 mm/10ans, puis le mois de décembre avec 107.39mm/10ans, puis les mois de janvier, février et mars avec 77.69mm/10ans.
- ▶ **Précipitation moyenne** : le taux de la précipitation diminue par la suite graduellement jusqu'au mois d'avril et mai avec une moyenne mensuelle de 45.3 mm.
- ▶ **Précipitation faible (saison sèche)** : les faibles valeurs des précipitations ont été enregistrées durant la période estivale avec une moyenne de 10.6 durant les mois de juin et aout de 21.36 mm, et en mois de juillet les précipitations se font très rares avec une moyenne de 1.18 mm

II.3.3. Réseau hydrographique

La baie de Bou-Ismaïl est le réceptacle d'oueds à régime irréguliers :

a) L'oued Mazafran

Est caractérisé par un débit permanent et des périodes de crues en hiver et une période d'étiage durant l'été où les débits sont relativement nuls, avec un débit annuel est estimé à 320 106. m³ (Messaoud et al., 2006), ce dernier est Est considéré comme étant le plus important des oueds qui débouchent dans la baie. Formé de réunion des oueds Chiffa, Djer et Bouroumi.

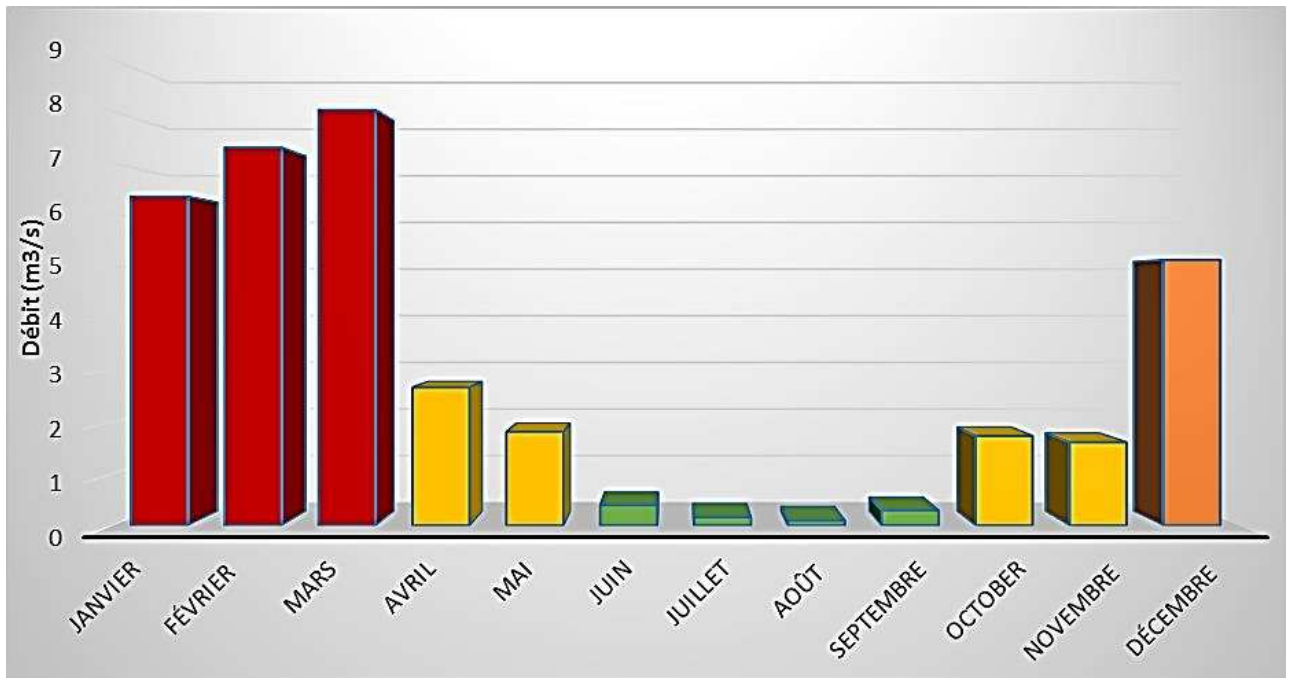


Figure (II.5) : Débits de l'Oued Mazafran entre 1980 et 2003 (ANRH., 2003)

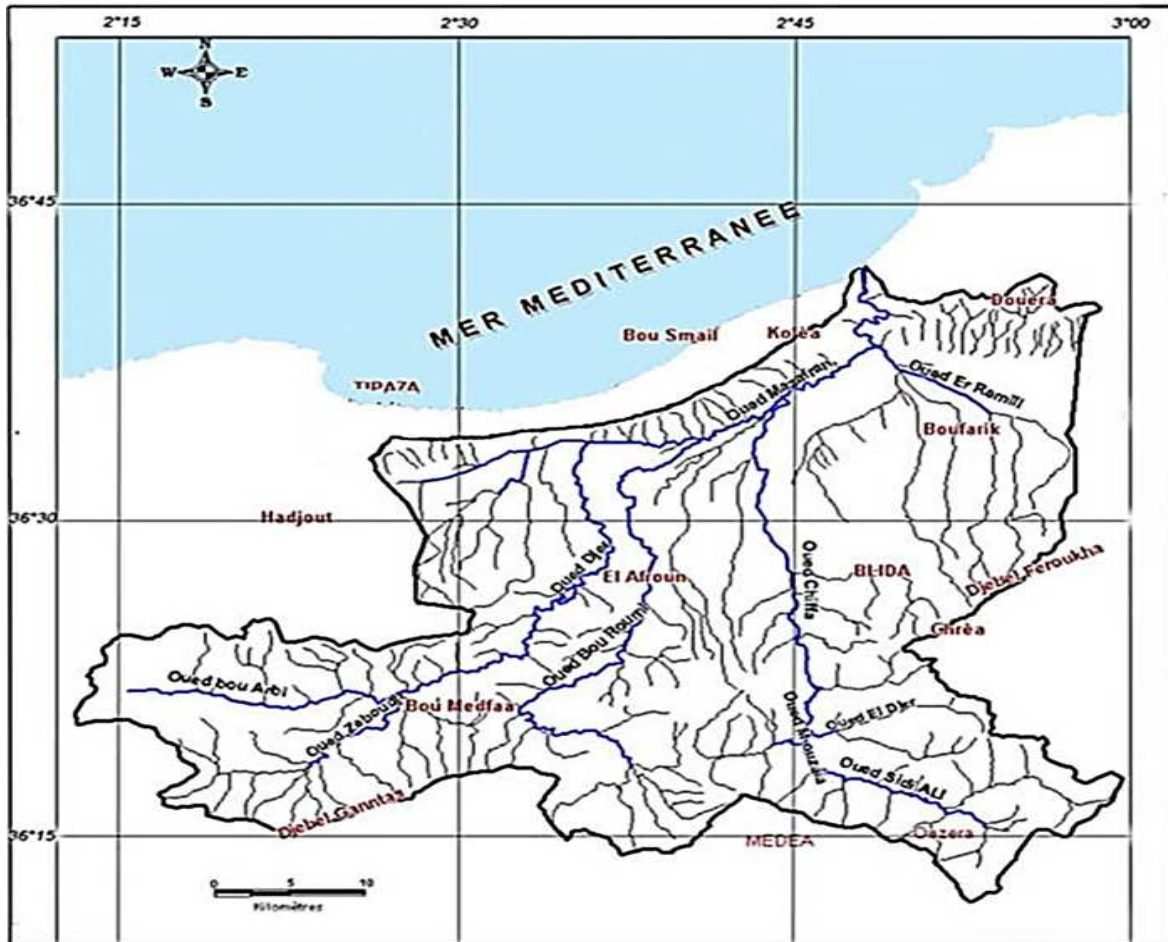


Figure (II.6) : Réseau hydrographique du bassin versant de l'oued Mazafran (ANRH., 2006)

Deux stations d'épurations sont installées au niveau du bassin versant de l'oued Mazafran. Avec une capacité de traitement 300 000 Eq/hab, est située à Beni Mered dans la wilaya de Blida, la deuxième opérationnelle avec une capacité de 30 000 Eq/hab, est située au sud de Koléa près de la rive de l'oued Mazafran dans la Wilaya de Tipaza Fig. (II.7).

II.4. Contexte hydrodynamique

Les caractéristiques des vents, de la houle et des courants doivent être connues avec autant de détail que possible (Larid, 1992), la connaissance parfaite de ces derniers nous aidera à bien comprendre la dynamique de milieu marin.

Le vent est un facteur principal qui agit directement sur la plus part des mouvements de la mer notamment les houles. Car ils sont générateurs de vagues et de courants superficiels (Guilcher, 1972). L'énergie déployée par la houle induit une dynamique sédimentaire (Moulin et al., 1978).

II.4.1. Les vents

Dans la majorité des études sur le milieu marin, la connaissance des régimes des vents est une étape indispensable pour comprendre la dynamique des eaux marines et côtières. En effet, ils sont des générateurs de vagues et de courants superficiels (Moulin, 1978).

L'analyse du régime des vents dans la région de l'ouest Algérois s'est basée essentiellement sur la base de données météorologique qui est disponible par le site Web "Réelles prévisions", (rp5.ru).

Pour comprendre la variabilité saisonnière et annuelle de régime de vent, nous avons injecté les données journalières les vitesses des vents et leurs directions dans le logiciel DHI-Mike21 afin de réaliser les plots de rose des vents saisonniers et annuels de notre zone d'étude.

► Période estivale

Est caractérisée par des vents moins faibles que les autres saisons, cette dernière est caractérisée par une dominance des vents de secteur Nord-Est, Nord-nord-Est avec une vitesse qui varie entre 4 et 16 m/s, et des vents faibles de différent secteur qui ne dépassent pas les 8 m/s,

► Période hivernale

Est caractérisée par un vent violent de secteur Est qui atteint les 20 m/s avec des vents qui soufflent dans différentes direction, avec une dominance des vents de secteurs Nord-Ouest, Ouest et Nord-Est, cette période est calme à 62.94% pendant les derniers 7 ans

► Période automnale

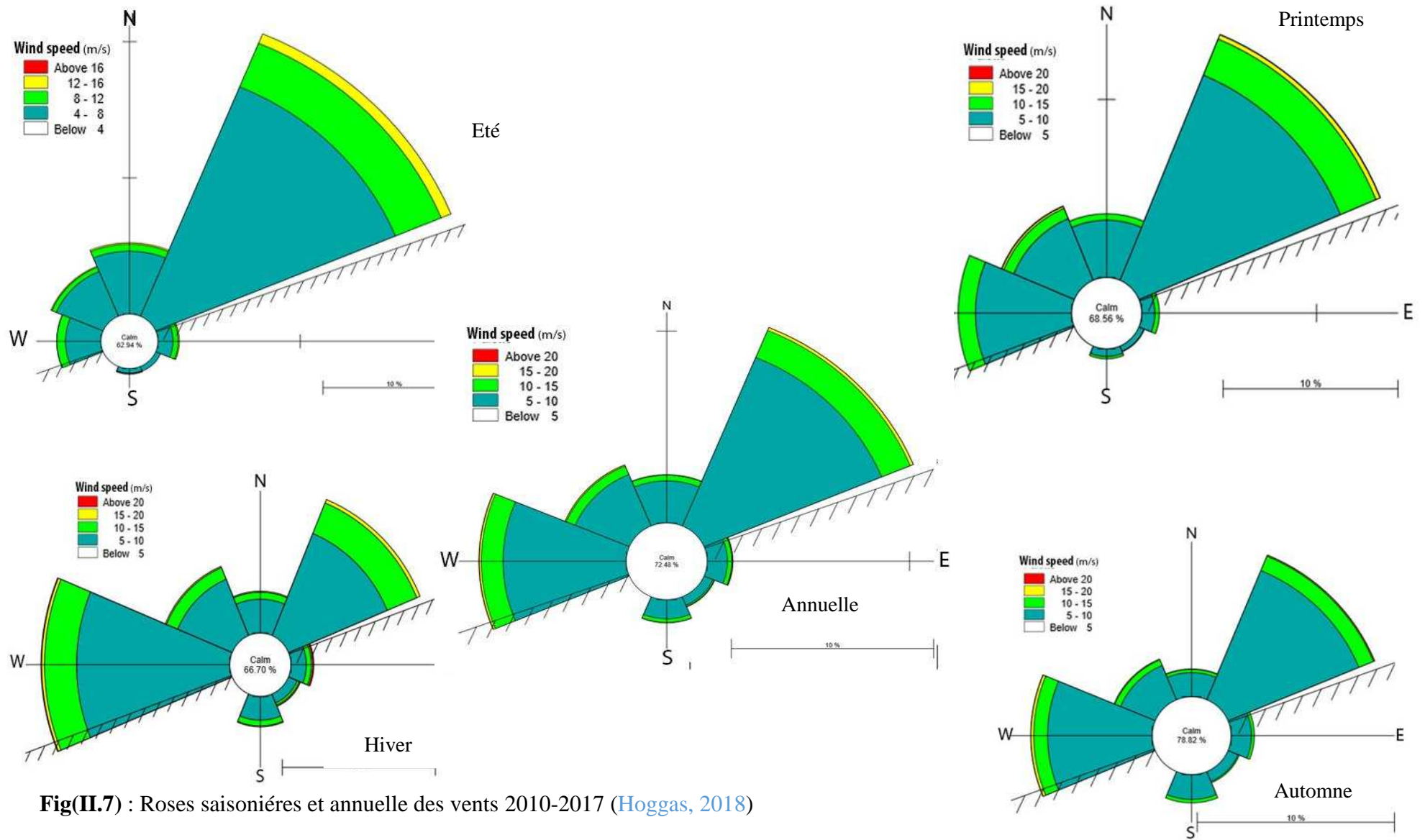
Est caractérisée par deux vents dominant de secteur Nord-Est à Nord-Nord-Est et celui de l'Ouest à Nord-Ouest.

► Période printanière

Est caractérisée par un vent dominant de secteur Nord-Est à Nord-Nord-Est qui souffle avec une vitesse de 5 à 20 m/s, et un vent moins faible de secteur Ouest.

► Régime annuel des vents entre 2010 et 2017

L'analyse globale des observations de sept années (2010 – 2017) au niveau de la station météorologique d'El Dar El-Beida est donnée dans Fig(II.8), et montre la prédominance des vents de secteur Nord-Est, Est et Nord-Nord-Ouest, Ouest.



Fig(II.7) : Roses saisonnières et annuelle des vents 2010-2017 (Hoggas, 2018)

II.4.2. La houle

La houle est le facteur le plus important dans la dynamique sédimentaire des petits fonds. La direction de propagation de la houle est liée à celle du vent et longueur d'onde de la houle (Bonafille, 1976).

Les données de la houle au large ont été prises de l'US.naval.weather service commande intitulé « Sommary of Synoptique Meteorological Observation » SSMO couvrent le secteur qui se situe entre les longitudes E 2° à 5° et entre les altitudes N 36° à 38° et s'étalent sur la période de 1963 à 1970. Le port de Bouharoun appartient aux secteurs centres de houles présentés par la SSMO.(Bachouche, 2010)

Tableau (II.3): Fréquence mensuelle (1 mois = 100%) par direction de houle, au large de Bou- Ismail (LEM., 2003)

	N	N-E	E	S-E	S	S-O	O	N-O
Janvier	8.1	12.9	18.2	5	6.5	13.2	28.8	7.3
Février	8.8	10.3	16.6	4	6.1	16.9	35.6	5.8
Mars	11.3	12.6	15.8	3.6	4.5	12.3	30.5	9.2
Avril	11.5	15.4	16	2	4.4	13.7	26.7	10.2
Mai	8.2	26.3	31.9	3	3.3	7.2	13.9	6.2
Juin	9.2	29.1	29.8	1.8	1.4	8.2	16.4	4.2
Juillet	5.9	32.5	35.1	1.4	1	5.9	16.3	2
Août	8.8	27.7	37.3	1.9	1.1	5	13.4	4.9
Septembre	6.7	26.4	40.5	2.2	2.3	4.6	14.8	2.5
Octobre	7.8	14.1	20.3	3.2	4.2	14.8	28.8	6.8
Novembre	5.5	5.8	10	5.1	8	15.9	40.4	9.4
Décembre	10.2	6.2	9.4	4.6	7.5	15	37.1	10
Moyenne	8.5	18.27	23.4	3.1	4.19	11.05	25.22	6.54

Description de la houle :

- ▶ Les houles de direction Ouest et celles Nord Est et Est sont les plus fréquemment observées.
- ▶ Durant l'année, les fréquences correspondent aux directions Est et Ouest sont sensiblement identiques avec toutefois une légère prédominance du secteur Ouest.
- ▶ En été, les houles d'Est prédominent, alors qu'en hiver les secteurs Ouest sont privilégiés.
- ▶ La direction Nord a une répartition assez régulière au cours de l'année.

Chapitre III :

Etude comparative entre les méthodes d'analyses

Introduction

Il existe plusieurs définitions et façons de calculer les différents paramètres liés à la validation d'une méthode. À l'intérieur du suivi de la qualité des résultats obtenus, il devient essentiel d'uniformiser ces définitions ainsi que les méthodes de calcul utilisées.

La validation d'une méthode d'analyse entraîne la détermination de plusieurs paramètres : la limite de détection d'une méthode (LD), la limite de quantification d'une méthode (LQ), Réplicabilité, Répétabilité, Reproductibilité et calcul de la justesse.(Ceaq., 2015)

Ce présent travail a pour but de comparer entre les méthodes d'analyses des métaux lourds en premier lieu. Cette dernière est l'un des éléments clefs qui valorise le travail, et qui donnera une idée sur la fiabilité des résultats qui seront utilisés par la suite.

III.1. Matériels & méthodes

III.1.1. Appareillage

III.1.1.1. Présentation de l'ICP-MS

La spectrométrie de masse par plasma à couplage inductif (**ICP-MS**) est aujourd'hui devenue une technique mature utilisée dans de nombreux laboratoires. Dans le domaine de la géochimie, géologie, environnement et la toxicologie etc., les applications sont diverses : contrôle des réactifs de haute pureté, eau, acides, solvants, de certaines matières premières. Le dénominateur commun à l'ensemble de ces analyses est le besoin de doser d'infimes concentrations, au niveau du ppt (ng/L), ceci impliquant une protection environnementale adéquate, la salle blanche, ainsi que la chasse à toutes les possibilités de contamination (système d'introduction spécifique, réactifs de très haute pureté) (Kishi et al., 2003). L'avènement des cellules de réaction a permis de s'affranchir des nombreuses interférences analytiques. À ce jour, l'ICP-MS offre le meilleur compromis, en termes de qualité des résultats analytiques, de facilité d'utilisation, de robustesse et de coût (Favre, 2008).

III.1.1.2. Principe, fonctionnement et composantes de l'ICP-MS

Cette technique est basée sur le couplage de deux technologies éprouvées : une torche à plasma ICP (Inductively Coupled Plasma) pour générer des ions monovalents positifs qui seront ensuite

Etude comparative entre les méthodes d'analyses

acheminés grâce à une interface, vers un spectromètre de masse quadripolaire dont le rôle est de séparer les ions en fonction du rapport masse atomique (Christophe, 1993)

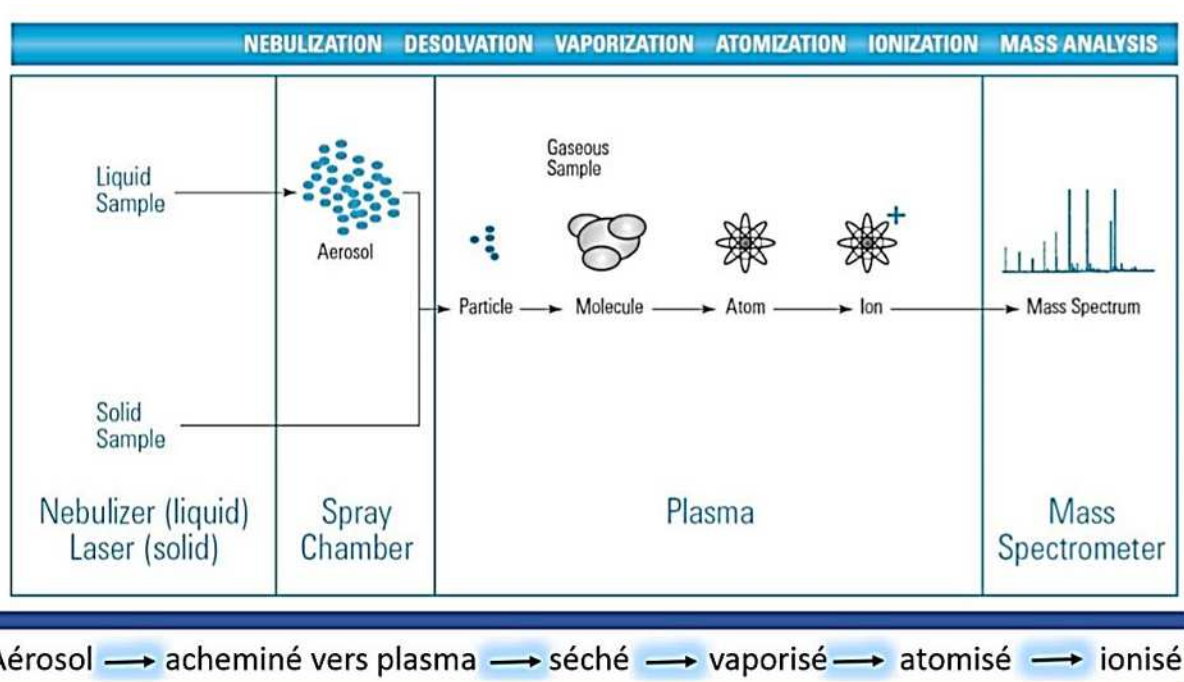


Figure (III.1) : Principe de fonctionnement de l'équipement de l'ICP-MS

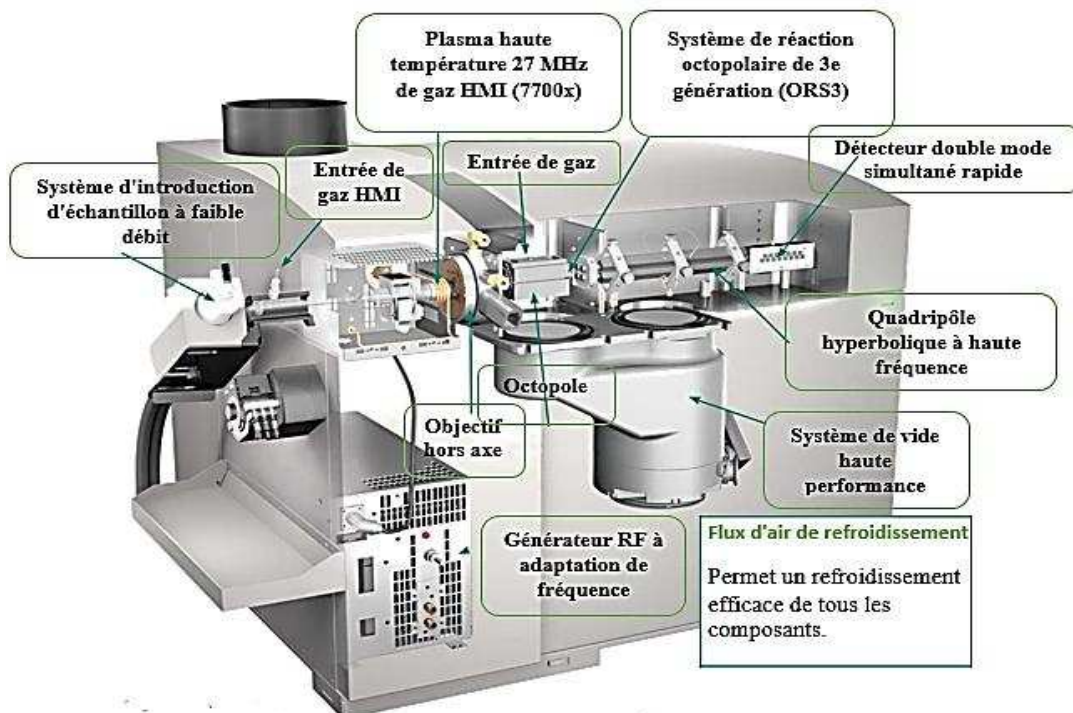


Figure (III.2) : Différentes composantes de l'ICP-MS Agilent 7700x (Source : Manuel de l'équipement).

III1.1.3. Sources d'interférences

a) Interférences spectrales

Les spectres en ICP-MS sont relativement simples puisqu'il existe seulement **211** masses atomiques pour tous les éléments de la classification périodique. Les interférences spectrales peuvent avoir plusieurs origines (Tillard, 2016) :

i. Origines spectrales

Les interférences spectrales sont de trois types (Paucot et al., 2010) :

► Isobariques

Isotope d'un élément, nous prônons un exemple pratique de : (^{64}Zn et ^{64}Ni) qui ont le même nombre de masse et ceci représente l'une des interférences que nous pouvons rencontrer lors de notre analyse.

► Polyatomiques

La combinaison d'éléments peut aussi engendrer un complexe ayant la masse molaire de l'élément cherché nous prônons l'exemple de ^{80}Se et $^{80}\text{Ar}_2$.

► Double charge

Pour certains éléments, une double ionisation peut être observée à la masse M12. Ce phénomène se produit pour des éléments présentant une énergie de deuxième ionisation inférieure ou de l'ordre de l'énergie de première ionisation de l'Argon (15,76 eV) (Gray, 1986).

ii. Origines non spectrales

► Effet de transport

Cet effet lié à la technique d'introduction de l'échantillon dans le plasma est dû à la viscosité de l'échantillon ou à la cristallisation de la matrice au sein du nébuliseur entraînant un colmatage progressif de celui-ci (Anna et al, 2016)

► Interférences d'ionisation

Ces interférences concernent toutes les modifications d'équilibre du plasma liées à l'introduction d'éléments en forte concentration. (Anna et al, 2016)

► Interférences d'échantillonnage :

Ces interférences sont localisées au niveau de l'interface (cônes et lentilles). Une forte densité ionique au niveau de l'interface engendre des forces de répulsion (type force de coulomb), qui affectent préférentiellement les ions les plus légers (Trassy et al., 1984).

III.1.2. Méthodologie

Dans un premier temps nous allons comparer les deux protocoles d'analyse (AIEA, et l'AFNOR), en utilisant deux sédiments de référence (AGLAE 17M9.1 et AGLAE 17M9.2) de l'Association Générale des Laboratoires d'Analyses et d'Essais (AGLAE).

III.1.2.1. Préparation des échantillons

III.1.2.2. Traitement des échantillons

L'échantillon de sédiments destinés à l'analyse par absorption atomique ou émission dans un plasma qui devrait être sous forme aqueuse.

a) Attaque d'acide

Nous avons effectués la mise en solution par une attaque d'acide, ce dernier agit directement sur les éléments métalliques adsorbés par les sédiments afin de libérer l'ensemble de ces derniers en solution. Dans notre travail nous allons essayer les deux attaques différentes afin d déterminer la bonne attaque qui peut effectuer une mise en solution meilleure

Tout le matériel qui nous avons utilisés a été préalablement décontaminé. Et nous avons aussi assuré que les acides utilisés lors de l'analyse soient de qualité analytique reconnue et compatible avec la limite de détection recherchée.

b) Protocole d'AFNOR X 31-147 Juillet 1996

Pour commencer le travail au laboratoire nous avons préparé le matériel mentionné ci-dessous :

- Eau déminéralisée ayant une conductivité inférieure à $0.5 \mu\text{S.cm}^{-1}$; Panreac.
- Acide chlorhydrique, à 38% (m/m) ($\rho = 1.19 \text{ g. ml}^{-1}$) ; Merck
- Acide fluorhydrique, à 48% (m/m) ($\rho = 1.16 \text{ g. ml}^{-1}$), Panreac.
- Acide perchlorique, à 70% (m/m) ($\rho = 1.67 \text{ g. ml}^{-1}$) ; Panreac

Le matériel utilisé ne doit pas contenir des interférences avec les éléments recherchés. Outre le matériel courant de laboratoire (Aissani, 2015), l'appareillage comprend :

- ▶ Un spectromètre de masse à source ionisante au plasma d'Argon, muni d'un échantillonneur automatique
- ▶ Une balance analytique METTLER AE50 avec une précision de 0.1mg
- ▶ Une étuve de marque Memmert : température contrôlée par un thermostat et capable de maintenir une température de $(105 \pm 5^\circ\text{C})$
- ▶ Un four à moufle
- ▶ Un dessiccateur, le gel de silice
- ▶ Une plaque chauffante réglée à une température de 160°C environ
- ▶ Des béchers en polytétrafluoroéthylène (PTFE)
- ▶ Des capsules en platine ou en porcelaine

c) Protocole de 'International Atomic Energy Agency 1992'

Dans ce protocole nous allons utiliser le même matériel sauf que pour les acides, nous remplaçons l'acide fluorhydrique, et l'acide perchlorique par acide nitrique, ce mélange appelé (eau rigale), comme s'est mentionné ci-dessous :

- ▶ Acide chlorhydrique,
- ▶ Acide Nitrique,

Et nous remplaçons les béchers en polytétrafluoroéthylène (PTFE) par des godets en Téflon.

d) Modes opératoires

Nous avons résumé les deux protocoles dans la figure suivante :

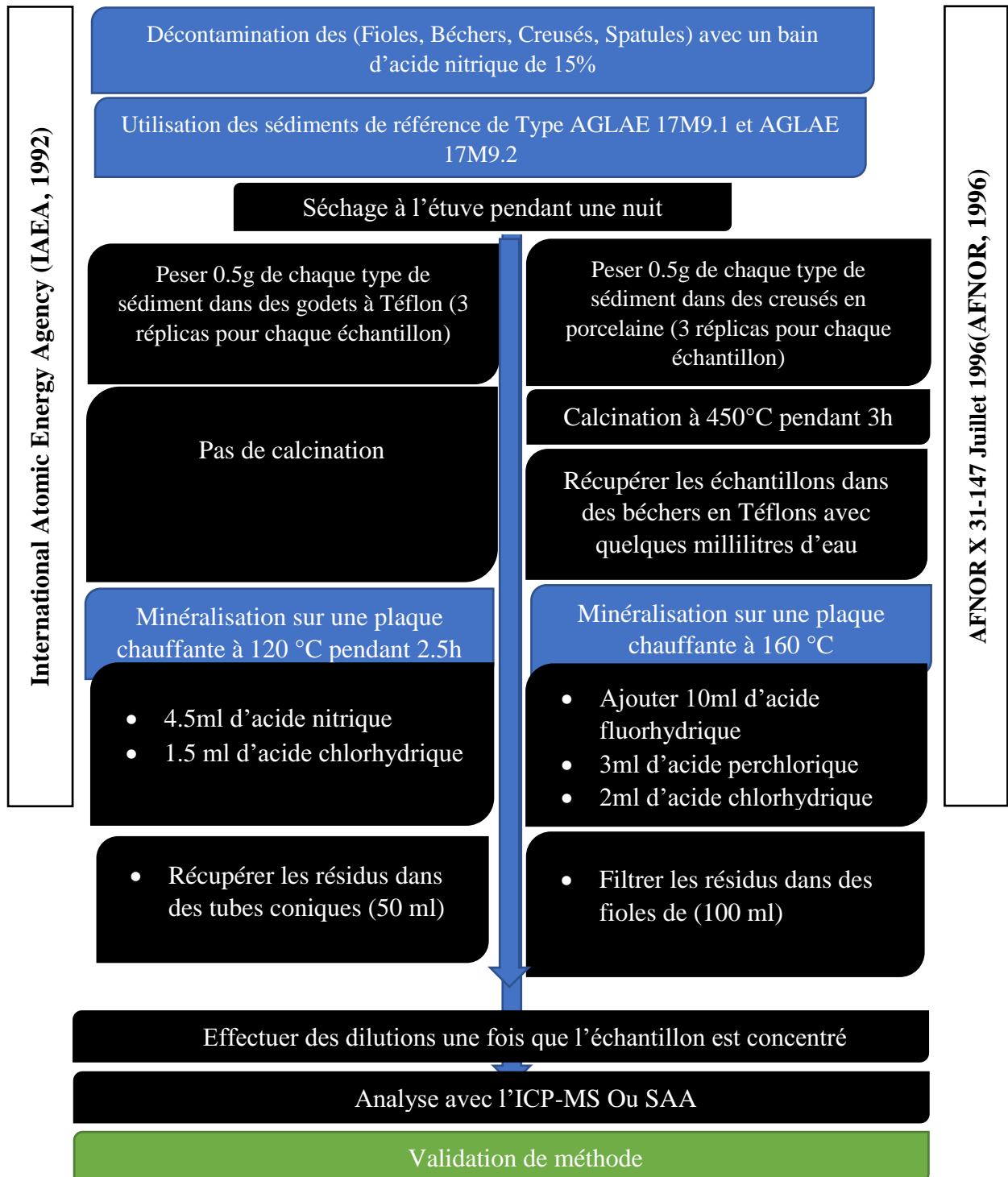


Figure (III.3) : comparaison pratique entre deux protocoles d'analyses (Hoggas, 2018)

Etude comparative entre les méthodes d'analyses

La différence entre les deux protocoles se focalise essentiellement dans la partie de la minéralisation, qui présente la partie la plus sensible dans les deux protocoles cette partie consiste à mettre en solution les métaux lourds adsorbés sur les sédiments en utilisant des acides forts, l'utilisation de ces acides se diffèrent d'une part de la façon d'utilisation et d'autre part la quantité rajoutée pour effectuer une attaque d'acide. Le deuxième point de différence est la calcination qui est indispensable dans la norme d'AFNOR, et évitable dans le protocole de l'IAEA.



Figure (III.4) : LA Minéralisation sur une plaque chauffante à 120 °C en suivant le protocole de l'IAEA



Figure (III.5) : Les différentes étapes de minéralisation, filtration, et dilution en suivant le protocole de l'AFNOR

Après avoir séché une quantité de l'échantillon de référence, nous avons pesé une quantité de 0.5 gramme approximativement destiné à la calcination. Une fois cette dernière est faite nous avons passé à la minéralisation (Attaque d'acides) en utilisant 3 acides (Acide fluorhydrique, Acide perchlorique, et l'acide chlorhydrique), dans le but d'avoir une mise en solution meilleure. Les résidus seront filtrés dans des fioles de 100ml en complétant avec de l'eau ultra pure jusqu'au trait de jauge, on verse un faible volume dans des tubes coniques qui seront placés dans l'échantillonneur automatique pour analyser.

III.1.2.7. Mesure des interférences

a) Détermination de la teneur pondérale en matière sèche

La méthode de calcul consiste à déterminer la différence de masse entre l'échantillon humide (prise d'essai) et l'échantillon séché à $105 \pm 5^\circ\text{C}$ jusqu'à l'obtention d'une constante : (masse atteinte lorsque au cours des opérations de séchage, la différence entre deux pesées successives de l'échantillon refroidi, ne dépasse pas 0.2% (m/m) par rapport à la dernière masse déterminée, il suffit en général 16 à 24h pour sécher la majorité de l'échantillon.). Cette étape nous permet de quantifier les teneurs en eau dans notre échantillon de sédiment. Ces teneur en matière sèche et les teneurs en eau sont exprimé la formule suivante :

$$\text{Teneur en matière sèche: } W_{dm}(\%) = \frac{m_2 - m_0}{m_1 - m_0} \cdot 100$$

$$\text{Teneur en eau pondérale: } W_{H_2O}(\%) = \frac{m_1 - m_2}{m_2 - m_0} \cdot 100$$

$m_0 = \text{creuset vide}$

$m_1 = \text{Creuset} + \text{échantillon avant séchage}$

$m_2 = \text{Creuset} + \text{échantillon après séchage}$

b) Détermination de la perte au feu (PAF)

La détermination de la perte au feu a été réalisée selon la norme NF EN 12879, cette méthode consiste à transformer la matière organique, et l'eau dans notre échantillon sous forme de vapeur et de CO₂ à haute température, le calcul de la perte au feu est donné par la formule suivante :

$$\text{Perte au feu: } PAF(\%) = \frac{m_2 - m_0}{m_1 - m_0} \cdot 100$$

La concentration corrigée après la perte au feu s'écrit comme suit :

$$C_{NC} = C_c \cdot \left(1 - \frac{PAF}{100}\right)$$

Où C_{NC} et C_c désignent respectivement les matériaux non calcinés et calcinés

III.1.2.3. Mise en pratique de l'équipement ICP-MS

Il est impératif de calibrer l'équipement avant de passer à l'étape d'analyse. Des différents tests sont effectués d'une façon quotidienne ce test est appelé « tune » consiste à modifier certains paramètres réglable (les débits de gaz, la vitesse de la pompe...), cette démarche aide à éviter tout dysfonctionnement de l'équipement, et optimise la réponse de l'équipement.

La tune est effectuée à partir de solution (*Tuning solution*), contenant 1µg/l des éléments Li, Y, Ti, Co, Mg, et Ce. Ces éléments ont été choisis en fonction de leur masse afin de couvrir la totalité du spectre de masse du tableau périodique, cette étape est effectuée à chaque démarrage de l'équipement.

III.1.2.4. Préparation d'une séquence d'analyse

a) Étalonnage et standards de référence

Les solutions mères que nous avons utilisées pour préparer la gamme d'étalonnage ayant servi à l'analyse des métaux lourds par ICP-MS fournie par la société Agilent technologie.

Tableau (III.1) : Composition et teneurs des solutions mères utilisées pour les gammes d'étalonnage

Nom	Type	Elément	Concentration	Matrice
Calibraiton Standard 2 A Agilenttechnilologies	Multiéléments	Ag, Al, As, Ba, Be,Ca,Cd, Co, Cr, Cs, Cu, Fe, Ga, K, Li, Mg, Mn, Na, Ni, Pb,Rb,Se,Sr,Ti,U, V, Zn.	10 mg/L	5% HNO3
Calibraiton Standard 2 A-HG Agilenttechnilologies	Multiéléments	Hg	10 mg/L	5% HNO3
Lead standard Solution Merck	Mono-élément	Pb	1000 mg/L	HNO3(0.5N)
Cadmium standard Solution Merck	Mono-élément	Cd	1000 mg/L	HNO3(0.5N)
Nickel standard Solution Merck	Mono-élément	Ni	1000 mg/L	HNO3(0.5N)
Chromium standard Solution Merck	Mono-élément	Cr	1000 mg/L	HNO3(0.5N)
Copper standard Solution Merck	Mono-élément	Cu	1000 mg/L	HNO3(0.5N)
Zinc standard Solution Merck	Mono-élément	Zn	1000 mg/L	HNO3(0.5N)

a) Mesure de la concentration

Après l'analyse de l'échantillon un spectre de masse est obtenu. La mesure du signal, et de ce fait la déduction de la concentration de l'élément obtenu par intégration du pic en retranchant l'intensité des blancs à ceux des échantillons.

Il existe une proportionnalité, entre le signal et la concentration de l'élément présent dans l'échantillon, dans une certaine plage de concentration, qui dépend des conditions d'analyses.

La linéarité doit être observée pour les solutions étalons **Fig. (III.4)**. Une droite d'étalonnage est validée lorsque le facteur de corrélation est au moins égal à 0.95.

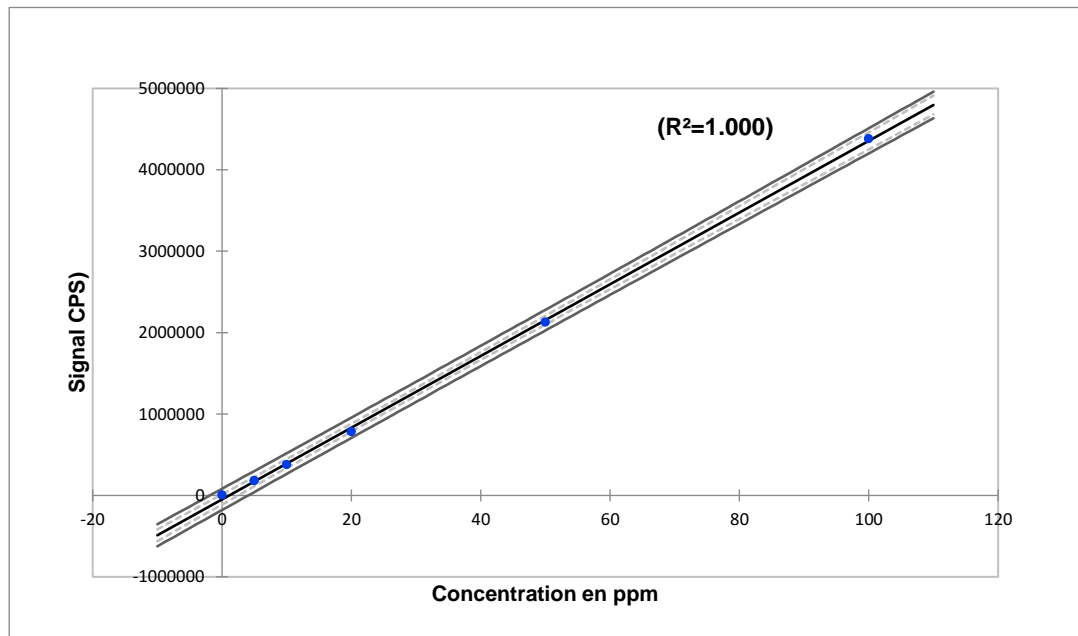


Fig. (III.6) : Exemple de courbe de calibration de Plomb (Pb).

b) Acceptation d'un résultat

Une fois la lecture des échantillons est faite, nous vérifions que les résultats sont situés dans le domaine d'analyse. Ainsi, si la concentration d'un échantillon est supérieure à la concentration étalon le plus haut de la gamme d'étalonnage, on réalise des dilutions lors de la relance de l'échantillon. Il est impératif aussi de vérifier que le RSD (Relative Standard Déviation) est inférieur ou égale 5% sachant que le RSD est défini par la formule suivante :

$$RSD\% = \frac{\sigma}{M} \cdot 100$$

σ = l'écart type sur le signal

M = la valeur moyenne de n mesures.

c) Expression des résultats

L'expression des résultats des solides sont de deux types:

i. Expression en produit brute (PB)

$$C_{\text{échantillon}} \left(\frac{mg}{kg} \right) = \frac{C_{\text{échantillon}} \cdot V_{\text{minéralisation}}}{\text{Masse de la prise d'essai}}$$

ii. Expression en matière sèche (MS)

$$C_{\text{échantillon}} \left(\frac{\text{mg}}{\text{kg}} \right) = \frac{C_{\text{échantillon}} \cdot 100}{MS \%}$$

III.1.2.5. Validation de la méthode

III.1.2.5.1. Estimation de la limite de détection et de la limite de quantification

a) Définitions normatives

i. Limite de détection (LD)

La limite de détection est la plus petite concentration ou teneur de l'analyte pouvant être détectée, avec une incertitude acceptable, mais non quantifiée dans les conditions expérimentales décrites de la méthode

ii. Limite de quantification (LQ)

La limite de quantification est la plus petite concentration ou teneur de l'analyte pouvant être quantifiée, avec une incertitude acceptable, dans les conditions expérimentales décrites de la méthode.

b) Méthode de calcul LD et LQ

Plusieurs approches permettant d'estimer les limites de détection et de quantification :

- ▶ Détermination de blanc
- ▶ Approche graphique
- ▶ Approche par l'étude de linéarité

Ces approches s'adaptent à divers situations, mais il s'agit dans tous les cas d'approches mathématiques donnant des résultats ayant qu'une valeur informative (Rosin et al., 1991)

Dans notre travail, les limites de détection et de quantification du dosage des métaux dans les sédiments par ICP-MS, sont estimées à partir des données de linéarité acquises sur une gamme de 1 à 20 µg/L, pour les éléments (Cd, Cu, Cr, Ni, Pb, As, Mn et Co), et sur une gamme de 10 à 200 µg/L, pour les éléments (As, Zn).

La limite de détection et de quantification sont estimées à partir de l'écart type de l'ordonnée à l'origine (S_0), ce dernier est calculé à partir de l'écart type résiduel (S_{res0}).

$$S_{res} = \frac{(y_i - y')^2}{NP - 2}$$

$$S_0 = S_{res} \frac{1}{NP} + \frac{M_{xi}^2}{(xi - Mxi)^2}$$

La (LD) et (LQ), seront calculés par les formules suivantes :

$$.LD = 3. \frac{S_0}{b} \quad \text{et} \quad LQ = 10. \frac{S_0}{b}$$

N : Nombre de solution étalon

P : Nombre de répliquas

yi : Valeur expérimentale

y': Valeur établie par la regression linéaire des *yi*

Mxi : Moyenne des *xi*

b : Pente *d*

c) Calcul du Z_{score}

Pour faire une comparaison correcte, il est indispensable de comparer les résultats obtenus avec plusieurs laboratoires, en utilisant des matériaux de bonne qualité (Sédiment de référence qui a prouvé ses résultats). Pour chaque matériau d'essai, sont fournis deux résultats :

- ▶ La moyenne de tous les laboratoires ayant des résultats significatifs (**m**).
- ▶ L'écart type de reproductibilité inter laboratoire **SR-inter**.

Les matériaux d'essai sont analysés avec *p* répliquas par le laboratoire, ces répliquas étant réalisées dans des conditions de répétabilité. **P** doit être au moins égale à 2.

Pour chaque matériau d'essai, le laboratoire calcule le Z_{score} donné par la formule suivante :

$$Z_{score} = \frac{m_{lab} - m}{S_{R-inter}}$$

m = La valeur de référence

m_{lab} = La valeur obtenu au laboratoire

$S_{R-inter}$ = L'écart type de reproductibilité interlaboratoires

Le Z_{score} est la position du résultat de chaque laboratoire par rapport à la valeur de référence (m), relativement à la dispersion des résultats $S_{R-inter}$. Le Z_{score} permet d'évaluer la justesse du résultat. Plus le Z_{score} est proche de 0 plus les résultats sont satisfaisants. Et plus le Z_{score} s'écarte de 0, moins les résultats sont satisfaisants.

Le signe du Z_{score} :

- ▶ (+) Le laboratoire à tendance à majorer le résultat
- ▶ (-) Le laboratoire à tendance à minorer le résultat

Intervalle de Z_{score}	Classe
$Z_{score} < 2$	Résultat satisfaisant.
$2 < Z_{score} < 3$	Résultat discutable.
$Z_{score} > 3$	Résultat non satisfaisant.

III.2. Résultats et discussions

III.2.1. Limite de détection et de quantification

Tableau (III.2) : Les limites de détection et de quantification ICP-MS Agilent 7700x

	Mode	b (Pente)	R ²	Sres	S0	LD (ppb)	LQ (ppb)
Cr	He	12544.5255	1.0000	3013.2565	1205.3026	0.2882	0.9608
Mn	He	8089.9780	1.0000	2896.8033	1158.7213	0.4727	1.4323
Co	He	19094.8589	1.0000	6425.6146	2570.2458	0.4442	1.3460
Ni	He	4803.9622	1.0000	1566.5448	626.6179	0.4304	1.3044
Cu	He	13085.6752	1.0000	5551.6655	2220.6662	0.5600	1.6970
Zn	He	2705.4650	1.0000	1758.3408	703.3363	0.8579	2.5997
As	He	1723.2017	1.0000	422.5239	169.0096	0.3237	0.9808
Se	He	53.7168	0.9990	37.3231	14.9292	0.9172	2.7793
Cd	He	3738.8538	1.0000	1182.4543	472.9817	0.4175	1.2650
Pb	-	44049.4282	1.0000	22504.2474	9001.6990	0.6744	2.0435

Pour l'ensemble des résultats obtenus de la limite de détection exprimés en ppm, nous remarquons que les valeurs de LD sont autour de [0.2882ppb et 0.9172ppb], ces résultats expliquent la capacité de détection des concentrations à l'ordre de ppm (état trace) ce qui explique la sensibilité de notre appareil, avec une détection optimale surtout pour le Cr, As, Mn, et Cu. Et pour les résultats obtenus concernant LQ, la faible concentration ou teneur de l'analyte pouvant être quantifiée dans notre cas est comprise entre [0.9608ppb et 2.7793ppb], ce qui représente une très faible erreur que nous pouvons l'avoir lors d'une analyse.

III.2.2. Résultats de Z_{score}

III.2.2.1. Méthode d'AFNOR

Pour connaître le degré de fiabilité de nos résultats et les comparer avec les valeurs des échantillons de référence (AGLAE 17M9.1 et 17M9.2), les résultats sont mentionnés dans le tableau suivant :

Tab (III.3) : Résultats de l'ICP-MS AGLAE 17M9.1 et 17M9.2 en ($\mu\text{g/g}$) avec les paramètres de Z_{score} .

Élément	AGLAE 17M9.1		AGLAE 17M9.2		m_{lab}	$m.$	$S_{R-inter}$	Z-SCORE
	Réplias 1	Réplias 2	Réplias 1	Réplias 2				
Cr	97.5436	104.7992	106.1393	92.5552	100.2593	112.9900	23.2530	-0.5475
Mn	224.4392	234.6274	239.5587	220.4465	229.7679	273.4000	17.7000	-2.4651
Co	6.2616	6.3996	6.5302	6.2020	6.3483	6.1210	0.6970	0.3262
Ni	16.1164	17.6566	18.1593	16.8383	17.1927	17.6190	1.3330	-0.3198
Cu	115.9340	134.0832	134.7178	129.3343	128.5173	111.8000	5.9100	2.8286
Zn	423.5713	378.1951	393.6918	356.5705	388.0072	427.9500	29.9300	-1.3345
As	26.2557	26.3093	25.2323	25.6669	25.8661	24.6070	1.6560	0.7603
Se	30.3995	29.9828	32.7584	32.2728	31.3534	34.6980	2.8730	-1.1642
Mo	3.4530	3.4163	3.5723	3.6300	3.5179	3.5210	0.5480	-0.0056
Cd	1.2796	1.0942	1.3299	1.1859	1.2224	1.5802	0.1572	-2.2760
Pb	491.9622	530.5428	517.4521	456.7138	499.1677	508.9400	35.8500	-0.2726

Les résultats sont très satisfaisants majoritairement ceci apparait dans les valeurs de Z_{score} qui sont comprises entre [-2.4651 et 2.8286] c'est-à-dire des résultats entre satisfaisants et discutables, avec des valeurs très proches au 0 (Résultats très satisfaisants) surtout pour (Mo, As, Co, Ni, Cr, Pb), et des résultats discutables pour (Mn, Cu, Cd).

La différence des résultats de cuivre peut être due aux interférents spectraux dues aux acides tel que l'acide perchlorique qui forme un complexe $^{35}\text{Cl}^{35}\text{Cl}^+$ qui a une masse atomique proche de celle de Zn et Ge. Et la différence des concentrations de Cadmium (^{113}Cd) peut être interférée par (^{113}I , ^{115}Sn) ceci signifie que le Cd a été détecté par l'ICP-MS comme étant ^{113}I ou ^{115}Sn . La manifestation de ces interférences dépend essentiellement des caractéristiques de l'analyte et de la matrice, en particulier de leur masse atomique et énergie d'ionisation.

III.2.2.2. Méthode de l'IAEA

Dans cette partie nous allons, appliquer le protocole de l'IAEA sur des échantillons de référence d'AGLAE 17M9.1 et 17M9.2, mais cette fois-ci nous allons éliminer l'étape de la calcination et

nous changerons les acides, donc nous allons faire la minéralisation de 0.5 gramme de l'échantillon dans des godets à Téflon avec deux acides (Acide Nitrique, Acide Chlorhydrique) les godets seront déposés sur une plaque chauffante à 120°C pendant 2h30min. Une fois la minéralisation est faite nous récupérons le résidu dans des tubes coniques de 50ml et en complétant avec de l'eau ultra pure. L'étape suivante consiste à faire passer les échantillons sur l'ICP-MS, le tableau suivant représente les résultats obtenus des répliques et de calcul statistique des (moyenne de laboratoire et inter laboratoire ainsi que l'écart type et le Z_{score}) :

Tab (III.4) : Résultats de l'ICP-MS AGLAE 17M9.1 et 17M92

Élément	AGLAE 17M9.1		AGLAE 17M9.2		m_{lab}	$m.$	$S_{R-inter}$	Z-SCORE
	Rép 1	Rép 2	Rép 1	Rép 2				
Cr	71.3627	67.8078	67.5586	70.3446	69.2684	112.9900	23.2530	-1.8803
Mn	259.7256	232.1690	225.7519	244.3397	240.4966	273.4000	17.7000	-1.8590
Co	6.3963	6.2118	6.1990	6.3730	6.2950	6.1210	0.6970	0.2497
Ni	13.9096	14.0355	13.6993	14.2382	13.9706	17.6190	1.3330	-2.7369
Cu	107.7922	106.1336	108.7820	110.0917	108.1999	111.8000	5.9100	-0.6092
Zn	441.5564	333.4568	330.3962	345.9750	362.8461	427.9500	29.9300	-2.1752
As	20.3523	20.4062	20.5777	20.6638	20.5000	24.6070	1.6560	-2.4801
Se	25.7425	26.5052	28.7261	29.0033	27.4943	34.6980	2.8730	-2.5074
Mo	3.7178	3.7724	3.5769	3.7356	3.7007	3.5210	0.5480	0.3279
Cd	1.2825	1.2362	1.2599	1.2796	1.2645	1.5802	0.1572	-2.0080
Pb	551.7386	558.0068	534.8054	564.6695	552.3051	508.9400	35.8500	1.2096

Les résultats de Z_{score} sont autour de [-2.7369 et 1.2096], la moitié de ces derniers sont dans l'intervalle des résultats qui sont satisfaisants qui ne diffèrent pas aux résultats des autres laboratoires pour les éléments suivants (Co, Cr, Ni, Cu, Mo, Pb), et les résultats de Z_{score} du (Ni, Zn, As, Se, Cd) sont inclus dans l'intervalle des résultats discutables qui sont légèrement différents aux autres.

III.2.2.3. Comparaison entre la méthode de l'AIEA et AFNOR

Le but de cette comparaison est de choisir une méthode analytique fiable et adéquate à nos besoins, pour cela nous avons effectué un autre test statistique pour savoir quelle méthode pouvons-nous la suivre pour réaliser la suite de notre étude, nous avons calculé la régression linéaire de nuage

de points (Concentration mesurée en fonction des concentrations de référence donnée par association AGLAE), les résultats sont représentés dans les deux graphiques.

Analyse graphique montre que l'ensemble des résultats sont très proches aux valeurs de références, sauf pour Zn, Mn et Cr Figure. (III.7). Cette différence ça peut avoir deux origines spectrales indépendantes de la matrice nous prenons l'exemple de $^{36}\text{ArO}^+$ qui a la même masse molaire que le Chrome ($M=52 \text{ g/mol}$) comme nous pouvons avoir des autres interférant spectrales dues à l'acide perchlorique et l'acide chlorhydrique $^{35}\text{ClOH}^+$ qui a une masse molaire est égale 52 (comme celle de chrome) et $^{35}\text{Cl}^{35}\text{Cl}^+$ qui a une masse molaire est égale 72 (comme celle de Zn) ces interférents qui ont la même masse molaire que nos métaux seront mesurés comme étant Zn et Cr et etc. En général les résultats sont acceptés à 99.3%.

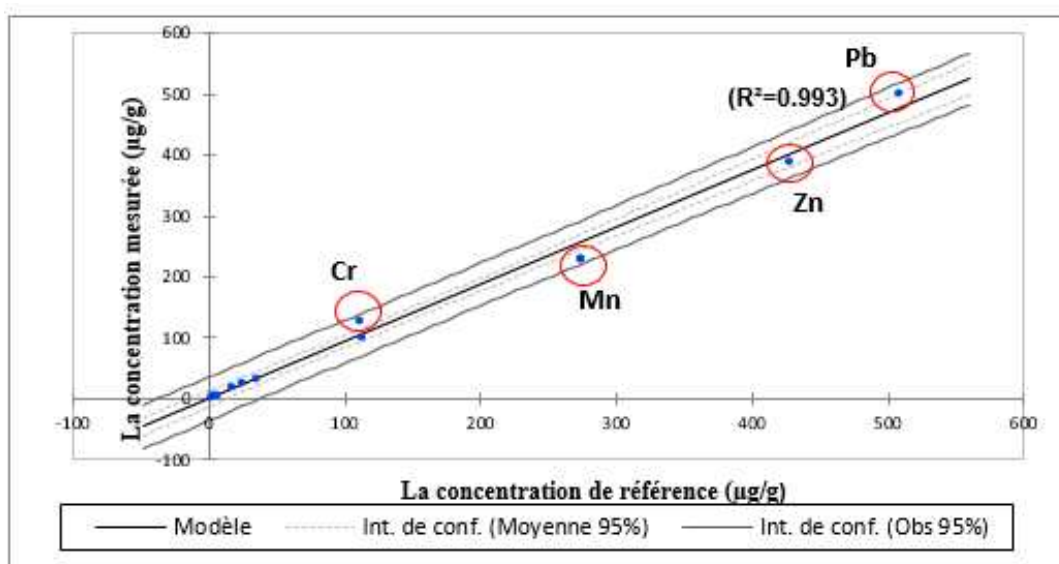


Figure (III.7) : Droite de régression des concentrations calculées (en utilisant la méthode d'ARNOR) en fonction des concentrations de référence.

La corrélation entre les concentrations mesurées et les concentrations de référence est de 97.6% cela due aux quelques éléments tels que (Pb, Zn, Mn, Cu) Figure(III.8), qui s'écarte de la droite de régression avec des valeurs faibles que celles de référence pour le Zinc (Zn), et le Manganèse (Mn) ceci signifie que la mise en solution n'était pas complète (une partie a resté adsorbé sur les sédiments de référence), et pour le Plomb(Pb) nous avons eu des résultats qui sont supérieurs à

ceux de référence ceci ça peut être induit par des interférents dues au gaz conducteur.

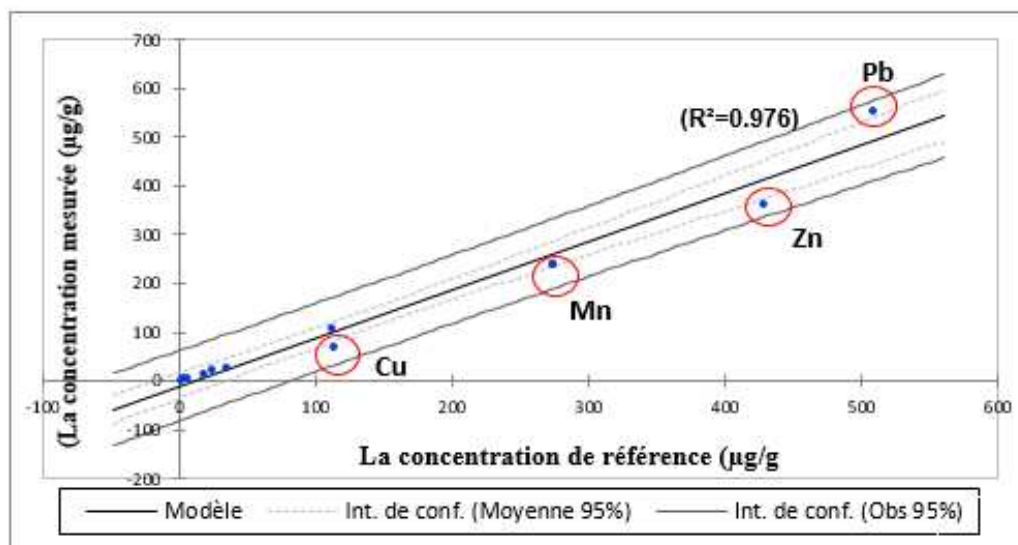


Figure (III.8) : Droite de régression des concentrations calculées (en utilisant la méthode d'IAEA) en fonction des concentrations de référence

Conclusion

Ce chapitre, était d'une part pour accéder à une connaissance approfondie dans la technologie spectrométrie de masse à plasma d'argon à couplage inductif (ICP-MS), et en exploitant cette dernière pour prouver le degré de fiabilité des protocoles d'analyses des métaux lourds, car les concentrations de ces derniers se trouvent à l'état de trace dans le milieu marin, cette étape est indispensable pour réaliser une vraie étude colossale.

Dans ce chapitre, nous nous sommes focalisés sur l'analyse qualitative des métaux lourds par l'étalonnage externe à partir des échantillons de références de bonne qualité, certifiés et prouvés par plusieurs laboratoires ces derniers sont fournis par l'association AGLAE. Les sédiments de référence (AGLAE 17M9.1 et 17M9.1) ont été traités avec deux protocoles internationaux, l'un est utilisé par (le centre de recherche et de développement CRD-SONATRACH), et l'autre utilisé par le laboratoire de recherche de l'école nationale supérieure des sciences de la mer et l'aménagement du littoral.

La démarche analytique a été faite au niveau du laboratoire de géochimie minérale au niveau du CRD-SONATRACH en utilisant l'ICP-MS de marque Agilent 7700x, et pour repérer la fiabilité de nos résultats, nous avons calculé la limite de détection(LD) et la limite de quantification (LQ) afin de les utiliser pour calculer le Zeta score. Ce dernier a montré que les deux méthodes sont classées dans le vert avec $Z_{score} < 2$ (*Résultats satisfaisant*) pour la majorité des éléments métalliques. Pour aller au-delà nous avons procédé à réaliser un autre test de corrélation entre les résultats mesurés par chaque méthode et les comparer avec ceux de référence, nous avons trouvé que la corrélation entre les résultats obtenus par l'AFNOR et les sédiments de référence a un coefficient de corrélation $R^2 = 0.993$ avec une très forte corrélation avec Cd, Mo, Co, Ni, Se et As, et des corrélation moins faible avec le Pb, Zn et Cr. Et ce qui concerne la corrélation entre IAEA-sédiment de référence a montré une corrélation de $R^2 = 0.976$ faible que celle de l'AFNOR, avec une très bonne corrélation surtout pour le Cobalt(Co), Nickel(Ni) et Molybdène(Mo), et des corrélation moins faibles pour Mn, Zn, Cu et Pb.

La différence entre les deux méthodes est faible et de l'ordre de ppm donc nous nous sommes basés sur le R^2 le plus proche au 1 qui représente un taux d'erreur plus faible pour le choix de méthode, qui sera utilisé dans le prochain chapitre pour le but d'évaluer la pollution métallique dans les sédiments marins avec une précision.

❖ **Recommandations**

Le travail sur l'ICP-MS nécessite la détermination des conditions expérimentales, ce qui pourra nous permettre de maîtriser cette technologie de façon plus approfondie.

Une fois ces paramètres fixés, un protocole de validation doit être mis en place afin de bien identifier les performances analytiques de cette technique (sensibilité, linéarité, précision, reproductibilité, fidélité, etc...).

Acquisition d'étalons interne qui s'avère nécessaire pour la correction de certaines interférences.

Une formation sur cette technique s'avère nécessaire pour maîtriser son application dans différents domaines, et pourvoir venir à bout des problèmes d'interférences qui restent le souci majeur pour générer un résultat fiable.

❖ **Perspectives**

- ▶ Faire une étude comparative entre les différentes méthodes de mise en solution (attaque d'acide, fusion, digestion à la micro-onde), pour les échantillons de sédiment, afin de mettre en évidence le meilleur processus de mise solution requis pour ce type d'échantillon.

- ▶ Valider une méthode interne pour la préparation des métaux lourds dans les sédiments, et élargir l'étude à d'autre matrice.

Chapitre IV :

Analyse, Evaluation et cartographie de la
pollution métallique

Introduction

Ce chapitre porte sur l'évaluation du niveau de contamination par les ETM des sédiments dans les sédiments marins de la partie orientale de la baie de Bou Ismail. Pour cela, nous avons effectué un échantillonnage de sédiments marins pour quinze (15) stations au niveau de notre zone d'étude sous forme des radiales. Nos investigations relatives à l'évaluation du niveau de contamination par polluants métalliques ont porté sur : le cadmium (Cd), le chrome (Cr), le cuivre (Cu), le nickel (Ni), le plomb (Pb), le zinc (Zn), le molybdène (Mo), Sélénium(Se), Arsenic(As), Cobalt(Co) et le Manganèse(Mn) qui ont été analysés par l'ICP-MS Agilent 7700x en suivant le protocole NF X 31-147 (juillet 1996). Afin d'appréhender les objectifs visés, nous nous sommes basés sur le calcul d'indices de contamination/pollution : indice de géo-accumulation (I_{géo}), facteur de contamination (FC), degré de contamination (DC), indice de pollution sédimentaire (IPS) et l'indice de charge de pollution(PLI). Ces indices ont été cartographiés en utilisant logiciel ArcGis 10.2.2. Afin de mieux le comportement des éléments métalliques entre eux-mêmes et avec la matière organique et de terminer l'état de santé de notre zone d'étude ; nous avons réalisé un traitement statistique à l'aide du logiciel XLSTAT 2018, l'analyse en composantes principales (ACP), ainsi que la matrice des corrélations entre les différentes variables analysées.

IV.1. Matériels & Méthodes

IV.1.1. Stratégie d'échantillonnage

Nous avons planifié une stratégie d'échantillonnage adéquate qui va nous aider à répondre à la problématique envisagée dans ce travail. Mais le manque de matériel d'une part et de la mauvaise gestion des sorties en mer d'autres parts, nous ont imposé à réduire notre zone d'étude et de sortir sur une embarcation qui ne possède pas un treuil, d'où un milieu côtier de profondeurs qui ne dépassent pas les 25m. Nous avons réalisé nos prélèvements en suivant des radiales (Côte-large), ceci est pour avoir une idée sur la dynamique présente dans ce site, afin d'identifier les paramètres qui agissent d'une façon directe ou indirecte sur la répartition des polluants dans les sédiments marins, donc nous avons insisté de réaliser un maximum de radial.

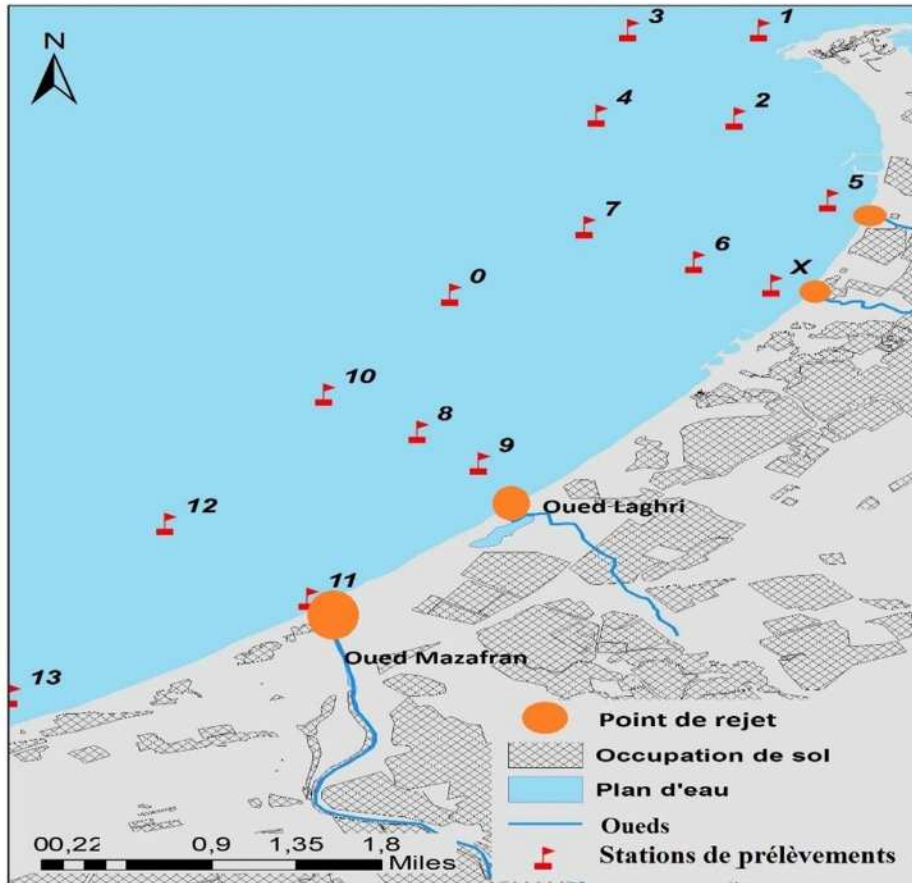


Figure (IV.1) : Présentation des stations de prélèvement et les principales sources de pollutions



Figure (IV.2) : Pollution due aux rejets de Oued Mazafran (Photo a été prise durant notre sortie 24 Avril 2018)

IV.1.2. Travaux sur terrain

IV.1.2.1. Prélèvement de sédiment

Le prélèvement du sédiment marin superficiel a été effectué à l'aide d'une benne preneuse de type « Van Veen ». Cette dernière est envoyée par gravité avec les bras ouverts. Une fois la benne remontée, les échantillons sont récupérés à l'aide d'une spatule en plastique, en évitant le sédiment qui est en contact avec les parois de la benne, et déposé dans un sac en plastique bien étiqueté. La spatule est à chaque fois lavée avec de l'eau de mer pour éliminer la partie altérée. Entre chaque prélèvement, le matériel doit être nettoyé par l'eau de mer pour éliminer les particules de sédiment (Aminot et al., 1983).

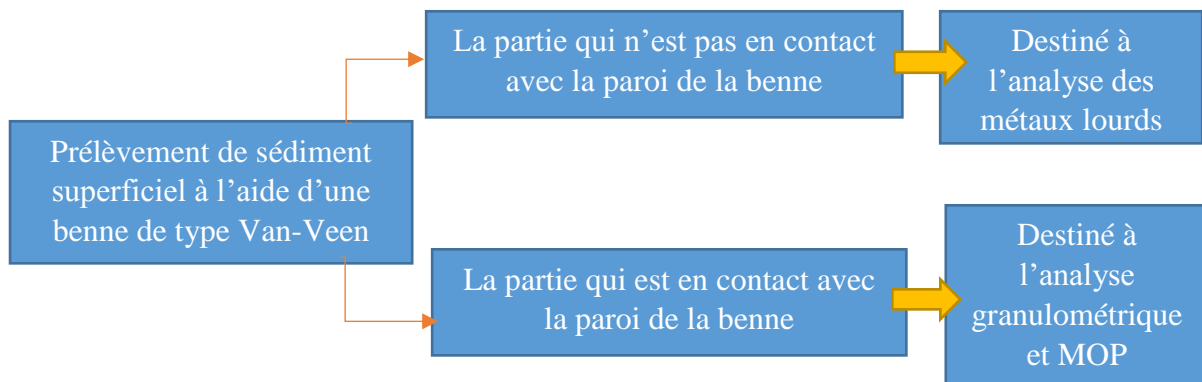


Figure (IV.3) : résumé de notre stratégie d'échantillonnage

IV.1.2.2. Mesure des paramètres physico-chimiques

Les mesures de la température, du pH, et de la salinité ont été réalisées in-situ avec une valise multi-paramètres de type HANNA-HI9828 adaptée d'une sonde de mesure pour chaque paramètre. L'étalonnage est préalablement effectué avec une solution étalon spécialisée de l'appareil. Il est à noter que la sonde d'Oxygène a été en panne..



Figure (IV.4) : Sonde multi paramètre de type HANNA-HI9828

IV.1.2.3. Analyses des polluants métalliques

Après avoir validée une méthode d'analyse fiable (*Chapitre III*), nous avons passé à la mise en pratique de cette méthode sur des sédiments marins.

Au niveau du laboratoire de géochimie minérale (Centre de Recherche et de Développement CRD-SONATRACH), tous les échantillons ont été séchés à $105\pm 5^{\circ}\text{C}$, broyés et homogénéisés. Les échantillons de sédiments ont été calcinés, pour obtenir un échantillon bien mélangé puis digéré à la minéralisation sur une plaque chauffante avec un mélange d'acide HF-HClO₄- HCl. En général, toutes les procédures d'échantillonnage ont été effectuées selon les procédés décrits par les méthodes de référence du AFNOR (ISO, 1996).

1.3. Conditionnement du matériel

Le matériel destiné à l'analyse des métaux lourds doit être conditionné et pour éviter toute contamination on procède de la manière suivante :

- ▶ Lavage aux détergents commerciaux
- ▶ Rinçage à l'eau du robinet
- ▶ Rinçage à l'eau bi distillée
- ▶ Séchage à l'étuve à 70°C pour le matériel en verre et à 40°C pour le matériel en plastique pendant 24 h
- ▶ Rinçage à l'eau acidulée à 5%, préparée à partir d'acide nitrique (HNO₃) de 68% de pureté ;
- ▶ Rinçage à l'eau bi distillée
- ▶ Séchage à l'étuve pendant 24 h

1.1.1.1. Traitement des sédiments destinés à l'analyse

Le prélèvement de l'échantillon de sédiment à bord doit s'effectuer soigneusement, pour éviter toute contamination d'échantillon, qui a été conservé à bord (pré congélation -18°C) pour subir au laboratoire le traitement suivant :

a) Broyage et homogénéisation

Les sédiments séchés sont broyés à l'aide d'un mortier en porcelaine jusqu'à l'obtention des grains fins.

b) Minéralisation

La minéralisation aide à la mise en solution des différents métaux adsorbés à la surface des particules sédimentaires pour faciliter le dosage par l'ICP-MS.

c) Protocole expérimental

Le protocole utilisé est celui adopté par (AFNOR X 31-147 Juillet 1996), en suivant les étapes suivantes :

- ▶ Peser 0,5g du sédiment sec dans chaque bécher en polytétrafluoroéthylène(PTFE).
- ▶ Ajouter 10ml d'acide fluorhydrique(HF) puis 4ml d'acide perchlorique(HClO_4)
- ▶ Mettre les béchers en PTFE sur une plaque chauffante à 160°C, laisser évaporer à sec.
- ▶ Ajouter au résidu 2ml d'acide chlorhydrique et chauffer
- ▶ Pour chaque série, on réserve un témoin blanc.
- ▶ Récupérer le résidu avec quelque goutte d'eau ultra pure dans une fiole jaugée de 100 ml en polypropylène et compléter avec de l'eau ultra pure.

1.1.1.2. Analyse par ICP-MS

L'ensemble des étapes détaillées sont mentionnées dans le *chapitre III*.

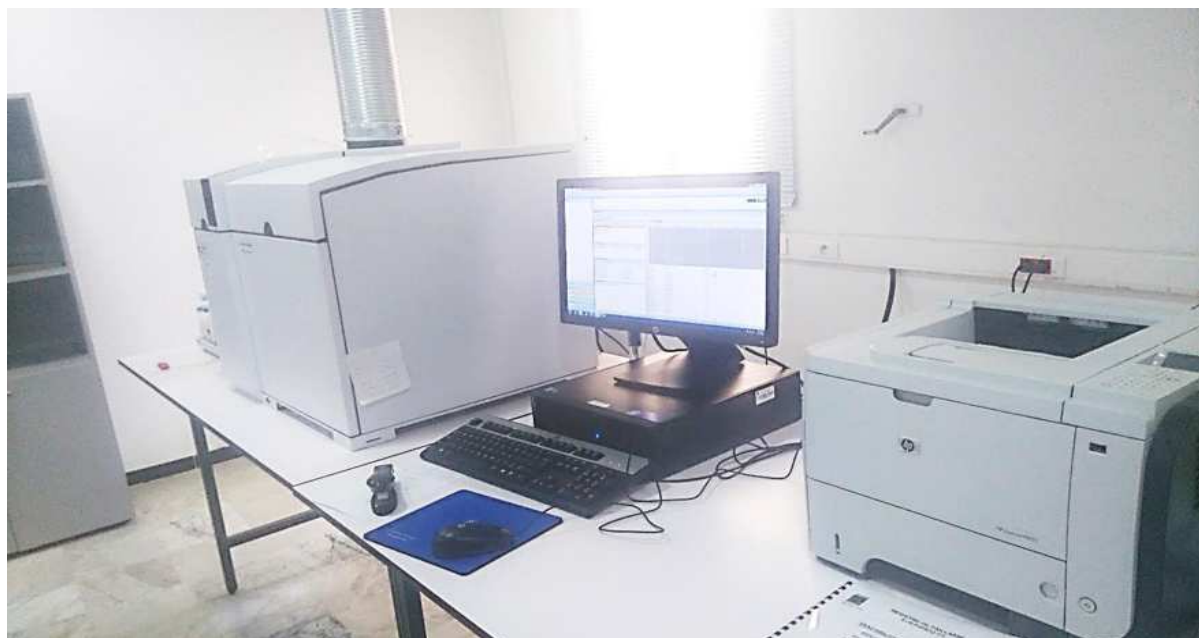


Figure (IV.5) ICP-MS Agilent technologies series 7700x

IV.1.2.4. Analyse de la matière organique particulière

La méthode consiste à calciner les filtres déjà utilisés pour la mesure de la concentration en matière en suspension. La teneur en matière organique est obtenue par la différence entre le poids du creuset en porcelaine avec le filtre avant et après calcination (Rodier et al., 2009).

Le filtre ayant servi pour la mesure des matières en suspension est déposé dans un creuset en porcelaine conditionné auparavant puis pesé, le poids est noté P₂. Le creuset est ensuite placé dans un four à moufle à 450°C pendant 2h.

Une fois refroidis, l'ensemble est pesé une autre fois, pour obtenir le poids P₃ (poids après calcination). La matière organique particulaire est donnée comme suit :

$$M_{organique} (mg) = P_2 - P_3$$

$$M_{organique} = \frac{P_2 - P_3}{P_1 - P_0} \cdot 100.$$

M_{organique}: le poids de la matière organique calcinée

P₂: poids de l'ensemble creuset et filtre avant calcination (mg)

P₃: poids de l'ensemble creuset et filtre après calcination (mg)

IV.1.2.5. Analyse granulométrique

IV.1.2.5.1. Mode opératoire

L'analyse granulométrique est l'opération consistant à étudier la répartition des différents grains d'un échantillon, en fonction de leurs caractéristiques (taille,). La granulométrie est un procédé d'analyse qui permet d'étudier la répartition des sédiments (Rivière, 1977). Pour cela nous avons analysés les 18 échantillons qui ont prélevé durant notre sortie en mer, l'analyse a été effectuée selon la méthode d'AFNOR résumé dans la figure ci-dessous :

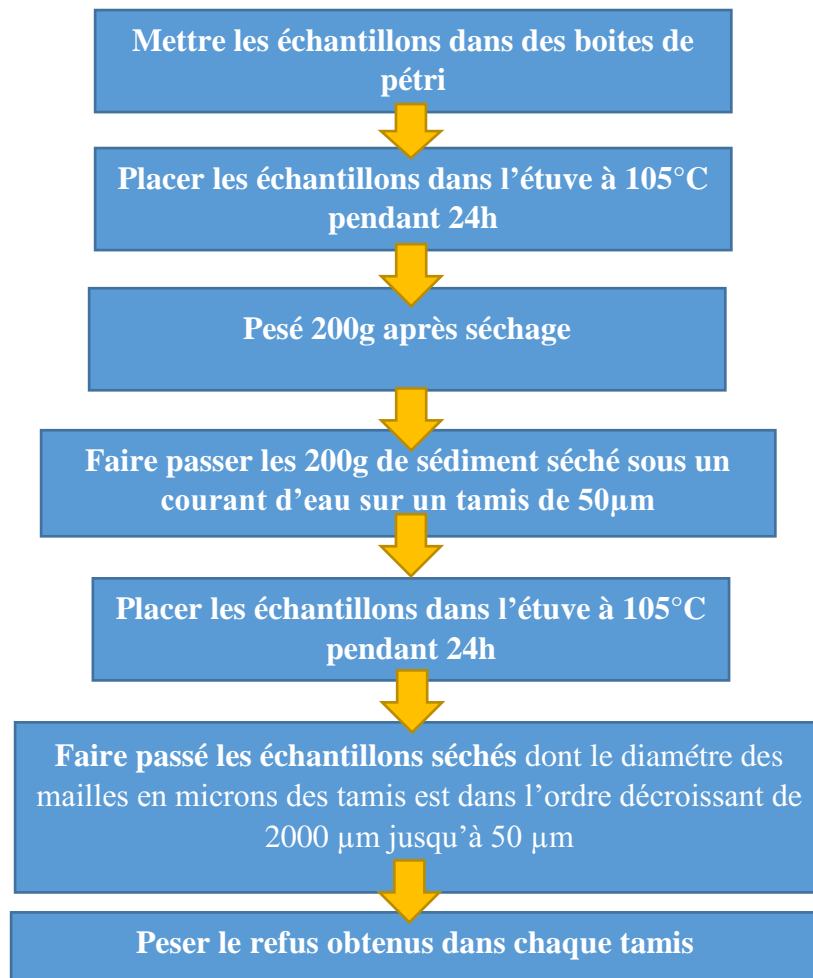


Figure (IV.6) : Résumé de protocole de l'analyse granulométrique de l'AFNOR

Les données des refus seront introduites dans une table d'Excel, pour calculer l'indice granulométrique qui vont nous aider par la suite de comprendre la relation entre la taille des grains et le taux des métaux lourds.

IV.1.2.5.2. Indice granulométrique

a) Présentation de l'outil GRADISTAT

Les indices granulométriques ont été calculés à l'aide de l'outil **GRADISTAT** (A Grain Size Distribution and Statistics Package for the Analysis of Unconsolidated Sediments by Sieving or Laser Granulometer) version 4.0, développé par Simon Blott chercheur de l'université de London, cet outil utilise Excel comme une plateforme pour effectuer l'ensemble de ses calculs, l'interface de logiciel est présentée dans la figure (IV.7).

Analyse, Evaluation et cartographie de la pollution métallique

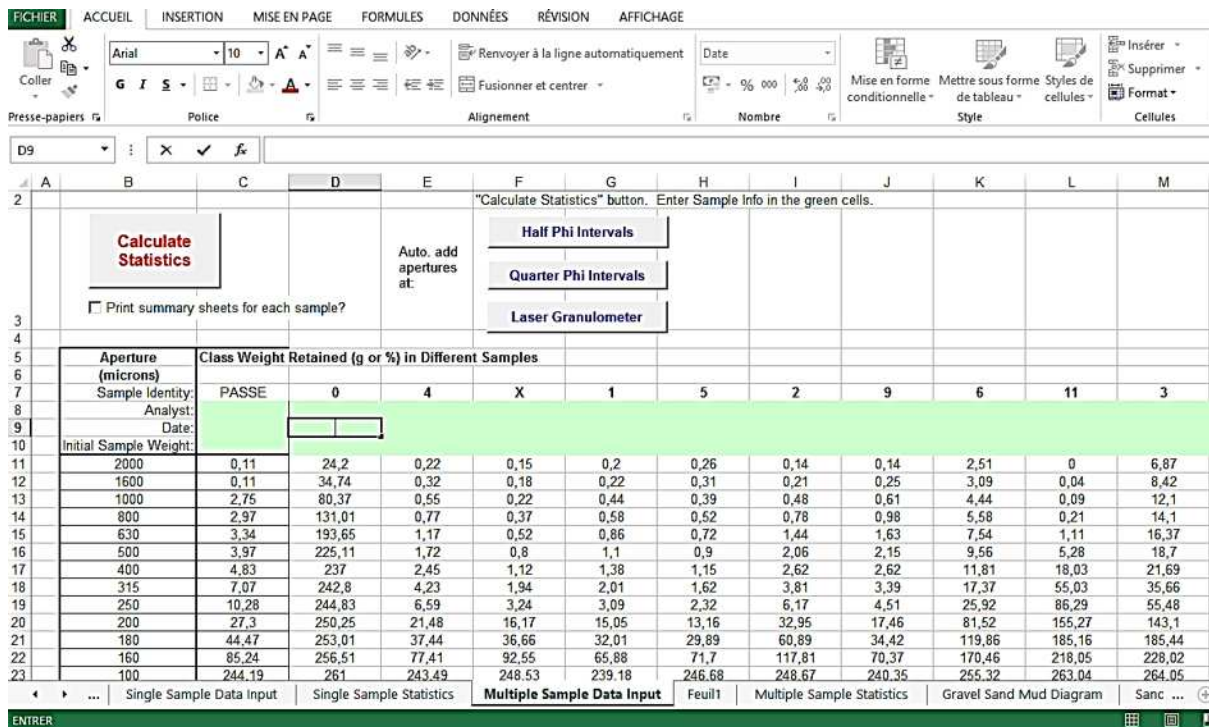


Figure (IV.7) : Interface de l’outil GRADISTAT

Pour le calcul des indices sur l’outil GRADISTAT nous avons introduit les diamètres des tamis dans la colonne (Aperture), et les refus cumulés dans la colonne (Class Weight), puis nous introduisons le nom de l’échantillon dans (Sample identity) et le poids initial 300 g dans notre cas finalement nous cliquons sur ‘Calculate Statistics’ pour avoir les résultats finaux qui sont :

- ▶ Un rapport général avec un résumé sur la taille des grains
- ▶ Classification des grains dans une pyramide
- ▶ Résultats des différents indices granulométriques (D50, D10, Sk ...)
- ▶ Diagramme de distribution de phi
- ▶ Diagramme de distribution de refus cumulés

b) Indices granulométriques utilisés par logiciel

Table 1. Statistical formulae used in the calculation of grain size parameters.

f is the frequency in percent; m is the mid-point of each class interval in metric (m_m) or phi (m_ϕ) units; P_x and ϕ_x are grain diameters, in metric or phi units respectively, at the cumulative percentile value of x .

(a) Arithmetic Method of Moments

Mean	Standard Deviation	Skewness	Kurtosis
$\bar{x}_z = \frac{\sum f m_m}{100}$	$\sigma_z = \sqrt{\frac{\sum f (m_m - \bar{x}_z)^2}{100}}$	$Sk_z = \frac{\sum f (m_m - \bar{x}_z)^3}{100 \sigma_z^3}$	$K_z = \frac{\sum f (m_m - \bar{x}_z)^4}{100 \sigma_z^4}$

(b) Geometric Method of Moments

Mean	Standard Deviation	Skewness	Kurtosis
$\bar{x}_g = \exp \frac{\sum f \ln m_m}{100}$	$\sigma_g = \exp \sqrt{\frac{\sum f (\ln m_m - \ln \bar{x}_g)^2}{100}}$	$Sk_g = \frac{\sum f (\ln m_m - \ln \bar{x}_g)^3}{100 \ln \sigma_g^3}$	$K_g = \frac{\sum f (\ln m_m - \ln \bar{x}_g)^4}{100 \ln \sigma_g^4}$

Sorting (σ_g)	Skewness (Sk_g)	Kurtosis (K_g)
Very well sorted	< 1.27	Very platykurtic < 1.70
Well sorted	1.27 - 1.41	Platykurtic 1.70 - 2.55
Moderately well sorted	1.41 - 1.62	Mesokurtic 2.55 - 3.70
Moderately sorted	1.62 - 2.00	Leptokurtic 3.70 - 7.40
Poorly sorted	2.00 - 4.00	Very leptokurtic > 7.40
Very poorly sorted	4.00 - 16.00	
Extremely poorly sorted	> 16.00	

(c) Logarithmic Method of Moments

Mean	Standard Deviation	Skewness	Kurtosis
$\bar{x}_\phi = \frac{\sum f m_\phi}{100}$	$\sigma_\phi = \sqrt{\frac{\sum f (m_\phi - \bar{x}_\phi)^2}{100}}$	$Sk_\phi = \frac{\sum f (m_\phi - \bar{x}_\phi)^3}{100 \sigma_\phi^3}$	$K_\phi = \frac{\sum f (m_\phi - \bar{x}_\phi)^4}{100 \sigma_\phi^4}$

Sorting (σ_ϕ)	Skewness (Sk_ϕ)	Kurtosis (K_ϕ)
Very well sorted	< 0.35	Very platykurtic < 1.70
Well sorted	0.35 - 0.50	Platykurtic 1.70 - 2.55
Moderately well sorted	0.50 - 0.70	Mesokurtic 2.55 - 3.70
Moderately sorted	0.70 - 1.00	Leptokurtic 3.70 - 7.40
Poorly sorted	1.00 - 2.00	Very leptokurtic > 7.40
Very poorly sorted	2.00 - 4.00	
Extremely poorly sorted	> 4.00	

Figure (IV.8) : Différents indices granulométrique et statistique qui sont inclus dans l'outil de GRADISTAT (Source : Manuel de GRADISTAT).

i. La médiane :

C'est l'indice absolu (Rivière., 1977), correspond au diamètre du grain moyen dont l'ordonnée est à 50 % du poids total du sédiment, elle est déduite à partir de la courbe cumulative. Le grain moyen est l'expression de la force d'un courant (eau, vent), capable d'avoir mis en mouvement l'essentiel d'un sédiment donné (Chamley, 1987).

ii. Indice de classement de Trask ou indice de tri (S₀) :

Appelé également indice de Trask (Sorting de Trask) et noté S₀, il représente la dispersion des tailles de part et d'autre de la médiane.

iii. Indice d'asymétrie ou indice de Skewnes (S_K)

Cet indice indique le tri d'un sédiment par rapport à la médiane, il informe sur l'homogénéité et l'évolution du sédiment.

IV.1.3. Évaluation de l'impact de la contamination métallique

IV.1.3.1. Indice de géo-accumulation (I_{geo})

Un critère d'évaluation de l'intensité de la contamination métallique est l'indice de géo-accumulation (Müller, 1969). Cet indice de caractère empirique compare une concentration donnée versus une valeur considérée comme fond géochimique. En effet, le coefficient 1,5 (facteur de correction) rend compte des variations dans les niveaux de background pouvant être causées par des effets de lithologie. L'I_{geo} est calculé selon la formule suivante :

$$I_{geo} = \log_2\left(\frac{C_x}{1.5 \cdot Bg_x}\right)$$

C_x : concentration mesurée pour un élément x ,

Bg_x : fond géochimique pour un élément x , Annexe(II) Certains auteurs utilisent les concentrations de la croûte (UCC) continentale comme fond géochimique naturel (Hofmann, 1988 ; Soto et al., 2001 ; Pekey, 2006).

Tableau (IV.1) : La classification de Müller de l'indice de géo-accumulation (Müller, 1981)

Valeurs de Classe		Qualité de sédiment
$I_{géo}$		
<0	0	Non pollué
0-1	1	Non pollué à modérément pollué
1-2	2	Modérément pollué
2-3	3	Modérément à fortement pollué
3-4	4	Fortement pollué
4-5	5	Fortement à extrêmement pollué
>5	6	Extrêmement pollué

IV.1.3.2. Facteur de contamination (Cf)

Le facteur de contamination (Cf) pour décrire la contamination d'une substance toxique donnée dans un bassin a été suggéré par (Hakanson, 1980).

$$Cf = \frac{C_e}{C_n}$$

C_e: concentration de l'élément dans les échantillons

C_n: la concentration de l'élément de référence.

C_f : calculé comme le rapport entre la teneur en métal dans le sédiment à une station donnée et les concentrations de référence.

Ce facteur calculé reflète l'enrichissement en métaux lourds dans les sédiments. (Hakanson, 1980) a classé Cf en quatre groupes :

Tableau (IV.2) : Classification d'Hakanson pour le facteur de contamination (Hakanson, 1980)

<i>C_f</i>	Catégories
<1	Faible facteur de contamination
1 < <i>C_f</i> < 3	Facteur de contamination modéré
3 < <i>C_f</i> < 6	Facteur considérable de contamination
<i>C_f</i> > 6	Très haut facteur de contamination

IV.1.3.3. Le degré de contamination (Cd)

Le degré de contamination (Cd) est défini comme étant la somme de tous les facteurs de contamination de divers métaux pour une base indiquée.

$$Cd = \sum_{n=1}^{n=8} Cf$$

Pour la description du degré de contamination, les terminologies utilisées ont été donnés dans le Tableau IV.3

Tableau (IV.3) : Classification d'Hakanson pour le degré de contamination (Hakanson, 1980)

Cd	Catégories
<7	Faible degré de contamination
1 < Cd < 14	Degré modéré de contamination
14 < Cd < 28	Degré considérable de contamination
Cd > 28	Très haut degré de contamination

IV.1.3.4. Indice de charge de pollution ou Pollution load index (PLI)

Pour mettre en exergue l'impact des activités urbaines sur la qualité des sédiments, l'indice de charge de pollution (PLI), proposé par (Tomlinson et al., 1980) a été utilisé dans la présente étude. Le PLI calculé en sédiment de surface de la Baie d'Alger et de Bou Ismail est déterminé selon l'équation suivante :

$$PLI = (Cf_1 * Cf_2 * \dots * Cf_n)^{1/n}$$

Avec :

n : Nombre des métaux utilisé pour calculer

Cf : Facteur de contamination de chaque élément

Remarque : Le Cf est le facteur de contamination et le n est le nombre d'éléments métalliques étudiés dans ce travail.

Tableau (IV.4) : Classification de PLI (Tomlinson et al., 1980)

Valeur de PLI	Qualité de site ou de secteur
0	Parfaite
1	Seulement les niveaux de ligne de base du présent de polluants
>1	La détérioration progressive du site selon la classification

IV.1.3.5. Indice de pollution sédimentaire (IPS).

L'indice de pollution sédimentaire (IPS), se définit comme une somme linéaire des FC et prend en compte la toxicité relative des ETM par un facteur pondérateur (W). Il s'agit du poids de chaque métal qui est fonction de sa toxicité relative. (Sahli et al., 2014)

$$IPS_x = \left(\frac{\sum FC \cdot W_x}{\sum W_t} \right)$$

W_x : Poids affecté au métal considéré,

W_t : $\sum W_x$

Il s'agit du poids de chaque métal qui est fonction de sa toxicité relative. Un poids de 1 est assigné au Cr et Zn car ils sont les moins toxiques ; Ni et Cu se voient affecter la valeur 2 ; Pb la valeur 5 et Cd la valeur 300 (Rubio et al., 2000 ; Singh et al., 2002).

L'IPS est associé à cinq classes de qualité :

Tableau (IV.5) : classification des différentes classes de l'IPS (Rubio et al., 2000 ; Singh et al., 2002)

Valeur de l'IPS	Classe
$0 \leq IPS < 2$	Sédiment sain
$2 \leq IPS < 5$	Sédiment faiblement pollué
$5 \leq IPS < 10$	Sédiment moyennement pollué
$10 \leq IPS < 20$	Sédiment très pollué
$IPS \geq 20$	Sédiment dangereux

IV.1.4. Cartographie de la pollution métallique

IV.1.4.1. Système d'information géographique

Les Systèmes d'Information Géographique (SIG) sont des systèmes informatiques de représentation de données sur l'espace spatial terrestre réel en associant les coordonnées géographiques et données récoltées, toutes sortes de données peuvent être ainsi représentées sur une carte (Source : ESRIfrance.fr).

IV.1.4.2. Présentation de logiciel ArcGis.

ArcGIS est un système complet qui permet de collecter, organiser, gérer, analyser, communiquer et diffuser des informations géographiques. En tant que principale plateforme de développement et d'utilisation des systèmes d'informations géographiques (SIG) au monde, ArcGIS est utilisé par des personnes du monde entier pour mettre les connaissances géographiques au service du gouvernement, des entreprises, de la science, de l'éducation et des médias. ArcGIS permet la publication des informations géographiques afin qu'elles puissent être accessibles et utilisables par quiconque.

IV.1.4.3. Les outils de l'analyse spatiale

a) Interpolation de pondération par l'inverse de la distance (IDW)

Les méthodes d'interpolation dites déterministes sont fondées sur des fonctions mathématiques qui expriment soit un facteur de pondération des valeurs d'entraînement (pondération inverse de la distance), soit une surface de tendance (polynomes, splines), voire une combinaison des deux ([Rogers, 2003](#)). La méthode dite « pondération inverse de la distance » (Inverse Distance Weighting, IDW) calcule, pour chaque point à estimer, la moyenne des valeurs expérimentales de ses voisins, en privilégiant les points les plus proches ; les facteurs de pondération sont donc calculés proportionnellement à l'inverse de la distance : $(1 \div d)$. Cette méthode permet d'obtenir des grilles très rapidement, mais crée des zones circulaires autour des valeurs observées (effet « œil de bœuf »). Cet artefact peut être lissé en jouant sur la puissance et le voisinage ([El-morjani, 2003](#)), cette méthode consiste en une somme pondérée des données :

$$\hat{Z}(s_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(s_i)$$

$Z(\mathbf{s}_i) =$ valeur relevée à l'emplacement i th

$\lambda_i =$ pondération inconnue de la valeur relevée à l'emplacement i th

$s_0 =$ emplacement de prévision

$N =$ nombre de valeurs relevées

b) L'interpolation par l'outil de KRIGEAGE

C'est une méthode géostatistique qui se base sur des modèles statistiques comprenant l'autocorrélation, c'est-à-dire les relations statistiques entre les points mesurés. Par conséquent, les techniques géostatistiques ont non seulement la capacité de produire une surface de prévision, mais elles peuvent aussi fournir des mesures quant à la certitude ou l'exactitude de ces prévisions. Le krigeage est comparable à l>IDW dans la mesure où il déduit, par pondération des relevés existants, les valeurs probables d'emplacements non métrés.

IV.2. Résultats & Discussion

IV.2.1. Analyse granulométrique

IV.2.1.1. Caractéristiques granulométriques

L'outil de GRADISTAT nous a permis de calculer les différentes fractions granulométriques (Gravier, sable, limon et vase), ainsi que l'abondance de ces derniers dans les 15 stations. Les résultats obtenus sont mentionnés dans le tableau ci-dessous :

Tableau (IV.6) : Pourcentage des différentes fractions granulométriques pour chaque station de prélèvement

	Sable			Vase			Limon		
	Gravier	Sable	Vase	V Grossier	Grossier	Moyen	Fin	V Fin	V Grossier
0	0,0%	85,2%	14,8%	4,0%	15,8%	20,8%	25,8%	18,8%	14,8%
4	0,0%	64,3%	35,7%	0,1%	0,3%	0,9%	18,5%	44,6%	35,7%
X	0,0%	64,6%	35,4%	0,0%	0,1%	0,4%	19,3%	44,7%	35,4%
1	0,0%	63,5%	36,5%	0,1%	0,2%	0,5%	17,1%	45,6%	36,5%
5	0,0%	63,7%	36,3%	0,1%	0,2%	0,4%	17,4%	45,7%	36,3%
2	0,0%	66,3%	33,7%	0,1%	0,3%	0,8%	22,7%	42,5%	33,7%
9	0,0%	63,8%	36,2%	0,1%	0,3%	0,7%	17,6%	45,1%	36,2%
6	0,0%	70,7%	29,3%	0,6%	1,3%	3,1%	28,7%	37,0%	29,3%
11	0,0%	74,6%	25,4%	0,0%	34,1%	20,1%	4,1%	32,4%	25,4%
3	0,0%	74,9%	25,1%	1,3%	2,4%	5,5%	33,6%	32,1%	25,1%
9	0,0%	78,6%	21,4%	1,5%	24,6%	22,5%	2,7%	27,3%	21,4%
7	0,0%	74,3%	25,7%	0,0%	0,7%	7,1%	33,7%	32,8%	25,7%
12	0,0%	85,3%	14,7%	4,7%	15,8%	20,2%	25,9%	18,8%	14,7%
10	0,0%	71,4%	28,6%	0,1%	1,0%	5,3%	28,8%	36,1%	28,6%
8	0,0%	84,6%	15,4%	2,7%	15,2%	20,6%	26,3%	19,7%	15,4%

D'après le tableau nous remarquons que la nature de fond de notre zone d'étude est de sable et sable vaseux, avec une absence de graviers dans l'ensemble des stations, les pourcentages les plus élevés de sable grossier qui ont été repérés dans notre zone d'étude ils étaient des stations 11, 12 et 9 qui se situent en face des oueds (Mazafran et Laghri) qui charrient des sédiments terrigènes. La répartition de ces apports se fait sous l'effet de l'hydrodynamique côtière et le débit de l'oued, et pour la fraction de sable fin se trouve avec des pourcentages aussi élevés dans le reste des stations.

Tableau (IV.7) : Résultats des indices granulométriques

FOLK AND WARD METHOD (f)							
Station	Moyenne	SORTING	SKEWNESS	KURTOSIS			
		So	Sk	K	D ₁₀ (µm)	D ₅₀ (µm)	D ₉₀ (µm)
0	2.372	1.443	-0.023	0.777	53.97	193.8	726.9
4	3.646	0.696	-0.186	0.874	45.23	75.52	162.8
X	3.643	0.690	-0.173	0.852	45.26	75.87	162.2
1	3.681	0.671	-0.177	0.909	45.10	74.35	154.9
5	3.678	0.669	-0.171	0.896	45.13	74.59	154.7
2	3.564	0.745	-0.191	0.791	45.56	78.49	173.1
9	3.665	0.683	-0.183	0.895	45.16	74.83	159.1
6	3.430	0.842	-0.182	0.706	46.46	86.74	198.8
11	3.311	0.898	-0.124	0.739	47.54	97.14	236.6
3	3.302	0.957	-0.167	0.843	47.63	98.02	243.3
9	2.974	1.139	-0.035	0.923	49.09	132.3	377.4
7	3.322	0.899	-0.134	0.746	47.44	96.16	233.6
12	2.355	1.464	-0.037	0.782	54.04	194.0	762.6
10	3.403	0.880	-0.201	0.749	46.62	88.25	214.4
8	2.427	1.411	-0.011	0.776	53.25	188.4	679.1

Nous avons essayé de déterminer les modalités de transport et de dépôt de la fraction fine et grossière dans la région ouest de la baie de Bou Ismail par une étude et analyse granulométrique.

Selon la classification de Folk and Ward Method, les sédiments marins du côté de sidi feradj sont caractérisés par des sables très fins à fins avec un indice d'asymétrie moyenne de -0,13, avec un grain moyen compris entre 74,35 µm et 194 µm. Ce grain moyen tend à décroître de la cote vers le large. Cette distribution granulométrique indique que la sédimentation dans la frange littorale de sidi feradj est à caractère vaseux qui se dépose par décantation dans un milieu peu profond et très calme.

Les sédiments sont relativement bien triés et homogènes, avec un indice de classement moyenne de 0,94. En effet les particules grossières se localisent dans la zone Ouest au niveau d'Oued Mazafran et Oued Lagheri (stations 8, 9,10, 12), ces Oueds ramènent les sédiments terrigènes vers la mer.

Concernant la zone l'Est, la répartition granulométrique révèle une hétérogénéité du matériel marquée par un mélange de sables fin à très fins : entre 74,53 µm et 98,02 µm cette hétérogénéité montre qu'il y a une tendance de perte de sédiment vers le large, les houles provenant des directions

Nord-Est et Est atteignent le site de façon plus ou moins frontale, engendrant la formation d'une dérive littorale dans la direction Est – Ouest

<u>SAMPLE STATISTICS</u>						
SAMPLE IDENTITY: 8			ANALYST & DATE: ,			
SAMPLE TYPE: Trimodal, Poorly Sorted			TEXTURAL GROUP: Muddy Sand			
SEDIMENT NAME: Very Coarse Silty Fine Sand						
	μm	ϕ	GRAIN SIZE DISTRIBUTION			
MODE 1:	190,0	2,398	GRAVEL: 0,0%	COARSE SAND: 15,2%		
MODE 2:	45,00	4,483	SAND: 84,6%	MEDIUM SAND: 20,6%		
MODE 3:	90,00	3,483	MUD: 15,4%	FINE SAND: 26,3%		
D ₁₀ :	53,25	0,558		V FINE SAND: 19,7%		
MEDIAN or D ₅₀ :	188,4	2,408	V COARSE GRAVEL: 0,0%	V COARSE SILT: 15,4%		
D ₉₀ :	679,1	4,231	COARSE GRAVEL: 0,0%	COARSE SILT: 0,0%		
(D ₉₀ / D ₁₀):	12,75	7,577	MEDIUM GRAVEL: 0,0%	MEDIUM SILT: 0,0%		
(D ₉₀ - D ₁₀):	625,8	3,673	FINE GRAVEL: 0,0%	FINE SILT: 0,0%		
(D ₇₅ / D ₂₅):	4,710	2,656	V FINE GRAVEL: 0,0%	V FINE SILT: 0,0%		
(D ₇₅ - D ₂₅):	309,0	2,236	V COARSE SAND: 2,7%	CLAY: 0,0%		
	METHOD OF MOMENTS			FOLK & WARD METHOD		
	Arithmetic	Geometric	Logarithmic	Geometric	Logarithmic	Description
	μm	μm	ϕ	μm	ϕ	
MEAN (\bar{x}):	288,2	186,2	2,398	185,9	2,427	Fine Sand
SORTING (σ):	283,4	2,618	1,336	2,659	1,411	Poorly Sorted
SKEWNESS (S_k):	2,009	-0,287	-0,132	0,011	-0,011	Symmetrical
KURTOSIS (K):	8,071	4,163	2,053	0,776	0,776	Platykurtic

Figure (IV.9) : Résumé des résultats obtenus par GRADISTAT sur les différents indices paramètre granulométrique exemple de la station 8 de l'Est de la Baie de Bou Ismail

IV.2.1.2. Teneurs des métaux lourds et de la matière organique

Les concentrations en métaux lourds (Cu, Mn, Mo, Se, As, Co, Cd, Cr, Pb, Ni, Zn) déterminé dans les sédiments provenant de chaque station de prélèvement Fig. (IV.1) et de la matière organique sont présentées dans le tableau (IV.6).

Tableau (IV.8) : Teneurs des métaux lourds en ($\mu\text{g/g}$), et de la matière organique en (g) dans les sédiments de partie orientale de la baie de Bou Ismail.

Station	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	As	Se	Mo	Cd	Pb	MOP
	$\mu\text{g/g}$	$\mu\text{g/g}$	$\mu\text{g/g}$	$\mu\text{g/g}$	$\mu\text{g/g}$	$\mu\text{g/g}$	$\mu\text{g/g}$	$\mu\text{g/g}$	$\mu\text{g/g}$	$\mu\text{g/g}$	$\mu\text{g/g}$	g
0	118.71	764.49	20.64	49.18	29.85	386.88	74.52	9.68	1.87	0.54	36.91	0.02
1	11.47	735.44	21.71	54.14	25.38	287.74	75.33	7.58	1.95	0.44	29.09	0.02
10	70.61	619.84	16.22	39.89	17.97	201.33	46.06	7.28	1.51	0.38	39.47	0.01
11	146.27	831.61	29.37	70.58	28.51	1939.91	88.37	10.87	3.27	1.65	66.65	0.02
12	83.37	641.56	21.91	51.15	29.71	260.52	56.54	5.69	2.20	0.88	51.59	0.02
13	62.28	535.68	15.07	37.20	17.85	92.66	39.12	7.18	1.23	0.31	23.87	0.02
2	121.03	758.36	27.66	63.92	178.44	178.84	79.62	9.08	2.88	0.45	40.40	0.02
3	80.12	738.65	18.52	45.61	21.98	228.63	36.92	8.18	1.63	0.48	39.82	0.01
4	64.70	679.93	13.73	28.99	17.79	73.32	68.10	8.48	1.56	0.29	23.54	0.02
5	140.73	782.89	26.30	64.55	71.58	168.05	78.52	10.47	2.56	0.42	50.49	0.02
6	107.45	885.25	32.63	72.51	30.68	240.53	87.62	12.67	3.14	0.47	53.62	0.02
7	64.86	650.06	19.23	43.33	24.66	134.11	55.61	7.68	1.95	0.58	49.09	0.01
8	68.19	428.13	15.57	39.51	17.72	88.90	40.45	6.98	1.43	0.24	25.73	0.01
9	148.40	913.60	33.78	78.35	36.38	246.23	95.43	16.96	3.38	0.58	47.92	0.02
X	195.34	1014.50	29.38	74.48	34.37	410.27	86.72	13.47	2.89	0.77	59.66	0.03

Les concentrations que nous avons déterminés dans notre cette étude varient entre 11.47 à 195.34 $\mu\text{g/g}$ pour le Chrome, 428.13 à 1014.50 $\mu\text{g/g}$ pour le Manganèse, 13.73 à 33.78 $\mu\text{g/g}$ pour Cobalt, 28.99 à 78.35 $\mu\text{g/g}$ pour Nickel. 17.72 à 178.44 $\mu\text{g/g}$ pour le Cuivre, 73.32 à 1939.91 $\mu\text{g/g}$ pour le Zinc. 36.92 à 95.43 $\mu\text{g/g}$ pour Arsenic, 5.69 à 16.96 $\mu\text{g/g}$ pour le Sélénium, 1.23 à 3.38 $\mu\text{g/g}$ pour le Molybdène, 0.24 à 1.65 $\mu\text{g/g}$ pour le Cadmium, 23.54 à 66.65 $\mu\text{g/g}$ pour le plomb. Et une variation entre 1 et 3 % de la matière organique.

Les concentrations les plus élevés des de Cr et Mn ont été enregistrées au niveau de la station **X** (*en face de l'oued qui se situe au niveau d'azur plage*), le Co, Ni, As, Se, Mo ont été enregistrées au niveau de la *station 9* (en face de oued Laghri), ces stations sont caractérisées par une abondance de sable fin et sable vaseux de taille moyenne des grains de 75 μm , et elle représente pratiquement la fraction la plus représentative pour le dosage des métaux, il existe une affinité entre les particules fines et les métaux lourds (Charlou, 1983). Et le Cu au niveau de la station 2 qui est caractérisée

par des sédiments fins de diamètre moyenne des grains qui est égale $78\mu\text{m}$, et les concentrations maximales de Pb et de Cd ont été enregistrées au niveau de l'embouchure d'oued Mazafran. Ceci est dû aux activités anthropiques telles que l'industrie de Matériaux de Construction générée par les usines suivantes (EPRC de Boufarik, ECO-OUIMI de Blida, EDIMCO de Beni Tamou et EPROMAC de Soumàa) qui rejettent des quantités énormes de Ni, Fe, Zn, Cd. Aussi nous avons d'autres sources, telles que l'industrie chimique (SAM de Boufarik et ASMIDAL de Beni Mered) qui sont actives dans la production des engrais. Cette production génère des taux très importants de métaux lourds tels que (Cd, Pb, As, Cr, Cu, Mn, Ni, Zn). Nous avons aussi l'industrie des textiles de bois et papier exercée par : ERIAD, ENAJUC, SNTA, de Blida et de ENATB, SOITEX de Boufarik, qui génèrent de (Cd, Pb, Zn, Mn, Cr, Al, As, Cu) lors de sa production. Ceci d'une part d'autre part l'activité agricole intense qui se situe au niveau de Mitidja qui rejettent des quantités énormes de Zn et Se car ces derniers sont des composants principaux dans les engrais chimiques.

Les concentrations en Molybdène (Mo) et Manganèse (Mn) se situaient entre $1.23\text{-}3.28\ \mu\text{g/g}$ et $428\text{-}1014\ \mu\text{g/g}$ respectivement. Ces concentrations de ces éléments métalliques, peuvent être influencées par des sources lithogènes (Nemr et al., 2006). Ces concentrations leur maximale ont été repérées sur des sédiments de taille moyenne des grains de $75\mu\text{m}$.

Pour une visualisation meilleure de la répartition spatiale des éléments métalliques dans les sédiments de l'Est de la baie de Bou Ismail, nous avons procédé à la cartographie des résultats obtenus à l'aide de logiciel ArcGis 10.2.2, en utilisant l'extension de l'interpolation de pondération par la distance inverse de (IDW), qui sert à générer une interpolation plus proche de la réalité, un ensemble de cartes a été réalisé et représentés dans la figure (IV.10).

La répartition spatiale des métaux lourds dans les sédiments de l'Est de la baie de Bou Ismail Figure (IV.10), montre que les concentrations les plus élevées se trouvent dans la partie côtière, qui est en contact permanent avec les sources de pollutions (Oueds, points de rejets ...), ceci qui signifie les concentrations élevées dans notre zone d'étude, les teneurs les plus élevées des métaux lourds ont été repérées sur des fonds qui sont caractérisés par la fraction fine entre $[74.35\mu\text{m}$ et $188\mu\text{m}]$ et par un indice d'asymétrie qui est entre $[-0.17$ et $-0.01]$ ceci signifie que le sédiment de la partie qui contient un maximum de pollution est un sable fin bien classé.

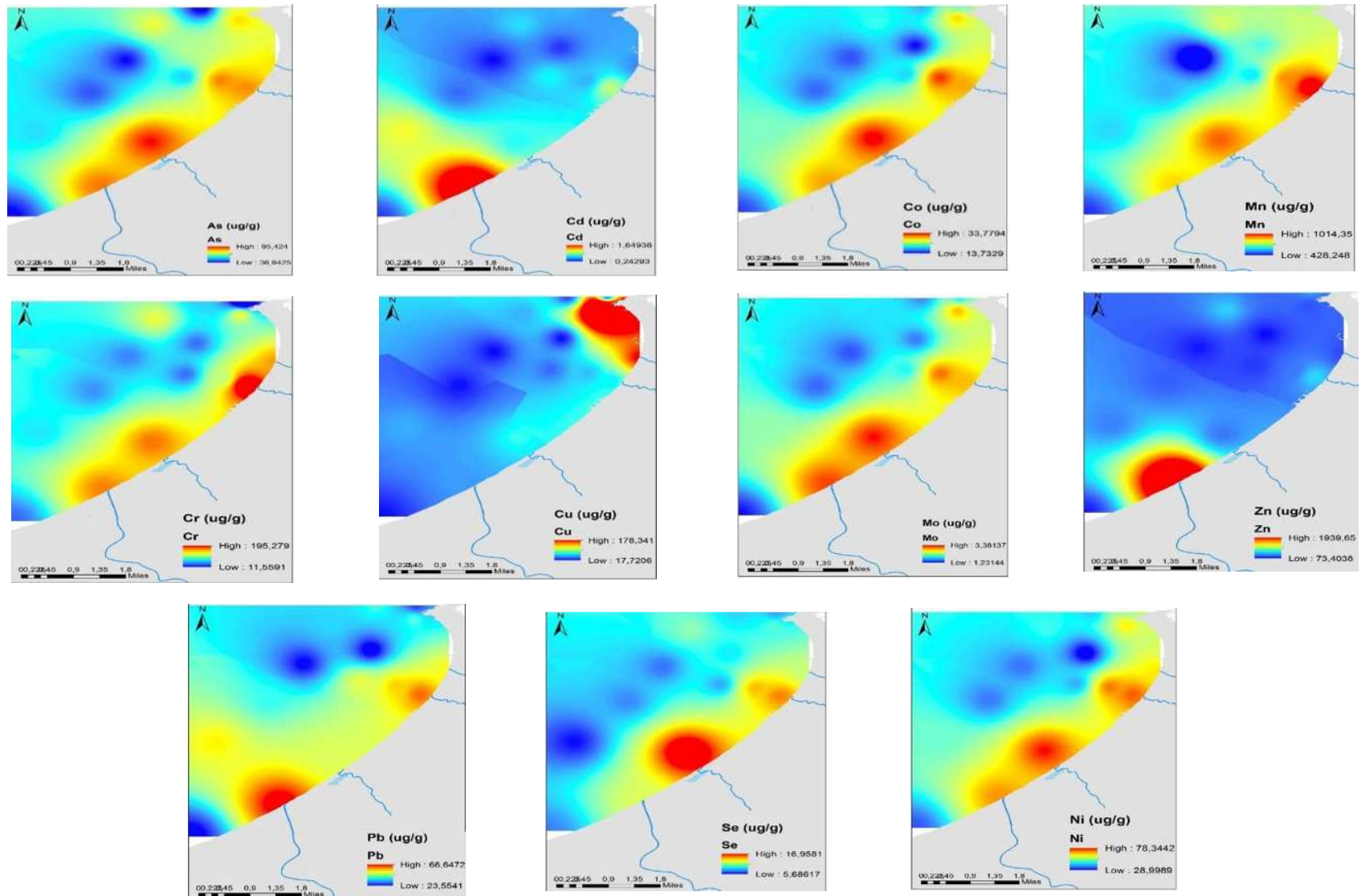


Figure (IV.10) La répartition spatiale des métaux lourds (As, Cd, Co, Mn, Cr, Cu, Mo, Zn, Pb, Se et Ni)

IV.2.2. Evaluation de la contamination métallique

IV.2.2.1. Indice de géo-accumulation

L'indice de géo-accumulation a été calculé pour l'ensemble des échantillons, ce dernier a permis d'estimer l'importance de la contamination des sédiments de la baie de Bou-Ismaïl par les polluants métalliques dont les teneurs dépassent les valeurs de références (background), Les moyennes des indices de géo-accumulation sont données dans le tableau ci-dessous

Tableau (IV.9) : Les résultats de l'indice de géo-accumulation de l'Est de Bou Ismaïl

Station	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	As	Se	Mo	Cd	Pb
0	2,26	0,97	1,19	1,76	1,39	4,96	2,48	78,67	0,89	3,50	1,45
1	1,23	0,86	0,79	1,04	0,83	0,94	2,27	68,94	0,74	1,92	0,92
10	3,72	1,28	1,69	2,67	1,60	5,26	28,91	109,49	1,38	5,02	2,34
11	2,22	0,93	1,25	1,94	1,18	3,69	25,11	61,64	0,93	2,86	1,14
12	2,68	0,99	1,51	2,31	3,34	2,15	26,17	85,16	1,22	2,75	1,98
13	2,31	0,96	1,59	2,29	8,32	2,29	26,54	73,81	1,37	2,94	1,58
2	2,83	1,16	1,94	2,81	1,70	3,16	31,81	137,88	1,61	3,82	1,88
3	2,05	1,12	1,88	2,60	1,43	3,08	29,21	103,01	1,49	3,10	2,10
4	2,79	1,05	1,69	2,53	1,33	24,87	29,46	88,41	1,56	10,78	2,61
5	1,53	0,93	1,06	1,63	1,02	2,93	12,31	66,51	0,77	3,13	1,56
6	1,34	0,78	0,93	1,43	0,84	2,58	15,35	59,21	0,72	2,46	1,55
7	1,24	0,82	1,11	1,55	1,15	1,72	18,54	62,45	0,93	3,78	1,93
8	1,19	0,68	0,87	1,33	0,83	1,19	13,04	58,40	0,59	2,03	0,94
9	1,59	0,81	1,26	1,83	1,39	3,34	18,85	46,23	1,05	5,76	2,02
X	1,30	0,54	0,90	1,42	0,83	1,14	13,48	56,77	0,68	1,59	1,01

D'après le tableau nous remarquons que les valeurs de l'indice de géo-accumulation varient entre 1.23 et 3.72 pour le Chrome(Cr), la valeur maximale a été enregistré au niveau de la station 10 qui est classé fortement pollué en Chrome, les stations 1, 5, 6, 7, 8, 9 et X ont des valeurs comprise entre 1 et 2, ces station sont classée modérément pollué en Chrome, le reste des stations ont été classée modérément à fortement pollué. L'indice de géo-accumulation pour le manganèse dans notre zone d'étude et varie entre non-pollué et modérément pollué ce qui explique l'apport faible de manganèse dans notre zone d'étude.

Pour mieux connaitre la répartition spatiale de l'indice de géo-accumulation, nous avons procédé à la spatialisation des résultats obtenus pour avoir une idée sur la surface de sédiment contaminé par chaque polluant métallique, l'ensemble des cartes a été représenté dans la **figure (IV.11)**. Les valeurs de **I-géo** ont été classées entre « Non pollué à modérément pollué et extrêmement pollué pour certains éléments ».

La figure (IV.11) montre que la distribution de l'indice géo-accumulation (Igeo) dans les sédiments. Là où nous avons remarqué que les valeurs les plus élevées en I-géo ont été observé dans les sédiments de la station 11, 12, 9, X, et 1 qui sont classés Fortement à extrêmement pollués en Cd, Zn et Cu, les autres stations ont été classées entre non polluée (dans les stations qui se trouve loin de la cote) et fortement pollué (dans station près de source de rejets).

IV.2.2.2. Facteur de contamination

La spatialisation de facteur de contamination pour les échantillons de sédiments est représentée dans la figure (IV.12). Qui montre un facteur de contamination faible et modéré pour Mo, Mn et Co, et entre contamination modérée à considérable pour le Pb, Cr et Ni, et entre contamination considérable et très forte pour le Cd, Zn et Cu selon la classification de (Hakanson, 1980).

Tableau (IV.10) : Les valeurs de facteur de contamination (C_f) au niveau des différentes stations

Station	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb
	Facteur de contamination (C_f)							
0	3,39	1,45	1,78	2,64	2,09	7,44	5,26	2,17
1	1,85	1,29	1,18	1,56	1,24	1,41	2,89	1,38
10	5,58	1,93	2,53	4,00	2,40	7,89	7,53	3,51
11	0,33	1,40	1,87	2,91	1,77	5,53	4,29	1,71
12	4,02	1,49	2,27	3,47	5,01	3,23	4,13	2,97
13	3,46	1,44	2,38	3,44	12,48	3,44	4,42	2,38
2	4,24	1,73	2,91	4,21	2,54	4,74	5,73	2,82
3	3,07	1,68	2,81	3,90	2,15	4,63	4,64	3,15
4	4,18	1,58	2,53	3,79	1,99	37,31	16,17	3,92
5	2,29	1,40	1,60	2,45	1,54	4,40	4,70	2,34
6	2,02	1,18	1,40	2,14	1,26	3,87	3,68	2,32
7	1,85	1,23	1,66	2,33	1,72	2,58	5,67	2,89
8	1,78	1,02	1,30	2,00	1,25	1,78	3,05	1,40
9	2,38	1,22	1,89	2,75	2,08	5,01	8,64	3,03
X	1,95	0,81	1,34	2,12	1,24	1,71	2,38	1,51

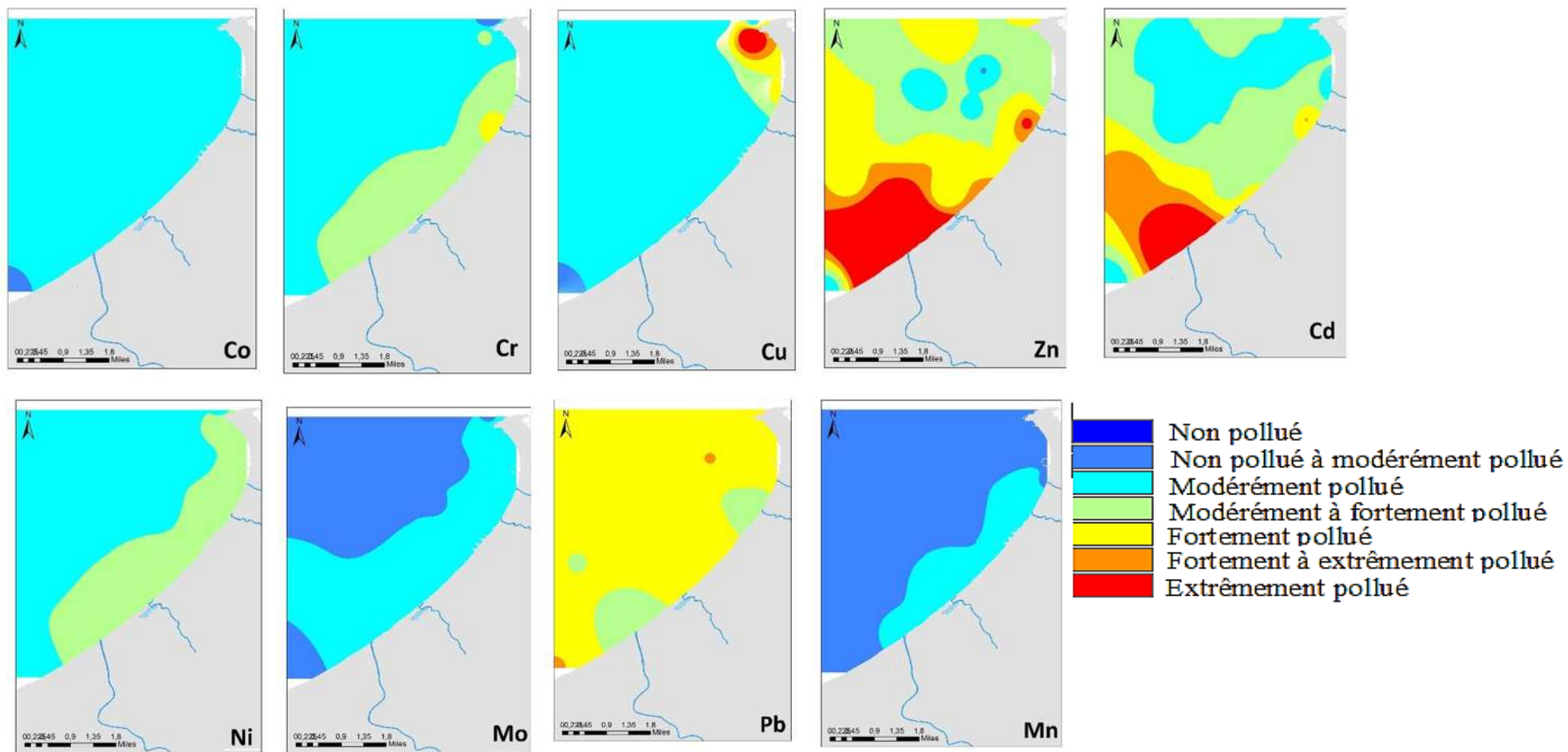


Figure (IV.11) La répartition spatiale de l'indice de géo-accumulation

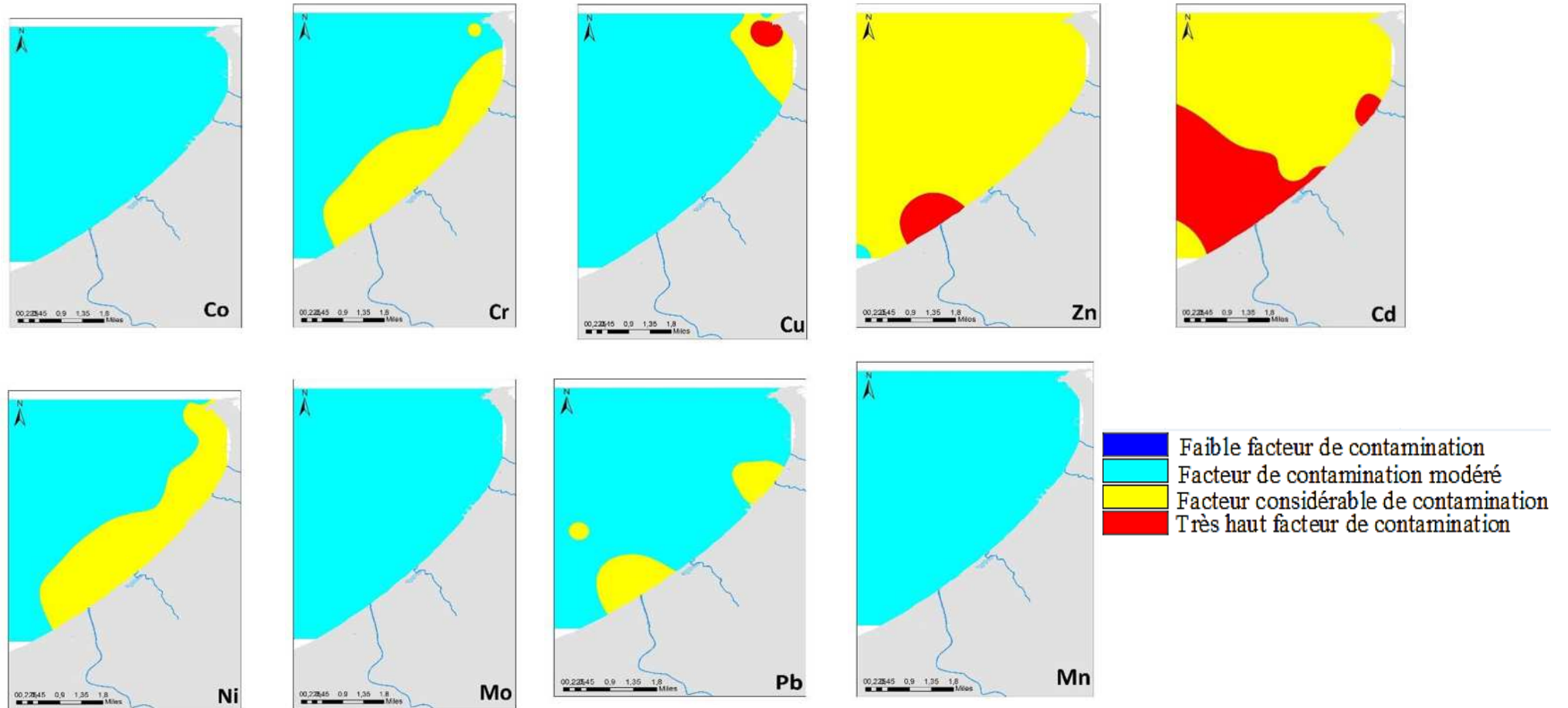


Figure (IV.12) La répartition spatiale de l'indice de facteur de contamination

1.1.2. Degré de contamination

Les valeurs de degré de contamination (Cd) sont indiquées dans le Tableau (IV.), qui montre que les stations 1, 8, X sont modérément contaminées, et la station 0, 11, 3, 5, 6, 7, 9 ont un degré de contamination considérable, et le reste des stations qui ont enregistré les valeurs les plus élevées et elles sont classées comme étant très contaminé selon la classification de (Hakanson, 1980).

Tableau (IV.11) : Les résultats de Cf, Cd, PLI et IPS de notre zone d'étude

Station	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb	<i>Facteur de contamination (Cf)</i>		
									<i>Cd</i>	<i>PLI</i>	<i>IPS</i>
0	3.39	1.45	1.78	2.64	2.09	7.44	5.26	2.17	26.22	2.829	5.17
1	1.85	1.29	1.18	1.56	1.24	1.41	2.89	1.38	12.81	1.535	2.84
10	5.58	1.93	2.53	4.00	2.40	7.89	7.53	3.51	35.38	-	-
11	0.33	1.40	1.87	2.91	1.77	5.53	4.29	1.71	19.81	1.913	4.21
12	4.02	1.49	2.27	3.47	5.01	3.23	4.13	2.97	26.58	3.134	4.11
13	3.46	1.44	2.38	3.44	12.48	3.44	4.42	2.38	33.43	3.412	4.42
2	4.24	1.73	2.91	4.21	2.54	4.74	5.73	2.82	28.93	3.393	5.63
3	3.07	1.68	2.81	3.90	2.15	4.63	4.64	3.15	26.03	3.086	4.59
4	4.18	1.58	2.53	3.79	1.99	37.31	16.17	3.92	71.48	-	-
5	2.29	1.40	1.60	2.45	1.54	4.40	4.70	2.34	20.71	2.351	4.62
6	2.02	1.18	1.40	2.14	1.26	3.87	3.68	2.32	17.87	2.037	3.63
7	1.85	1.23	1.66	2.33	1.72	2.58	5.67	2.89	19.93	2.244	5.55
8	1.78	1.02	1.30	2.00	1.25	1.78	3.05	1.40	13.58	1.608	3.00
9	2.38	1.22	1.89	2.75	2.08	5.01	8.64	3.03	27.00	2.83	8.44
X	1.95	0.81	1.34	2.12	1.24	1.71	2.38	1.51	13.07	1.556	2.35

IV.2.2.3. Indice de charge de pollution

Les valeurs indice de charge de la pollution (PLI) des sédiments superficielles dans les différentes stations de l'E de la baie de Bou Ismail sont présentés dans le Tableau IV. Les valeurs PLI varient de 0.15 à 3.9 ce qui suggère que les sédiments sont très fortement contaminés (Tomlinson et al., 1980)

IV.2.2.4. Indice de pollution sédimentaire

Les valeurs de l'IPS obtenus sont présentées dans le tableau IV, ces valeurs varient entre 2.35 et 8.44 ce qui classe cette zone entre sédiment faiblement à moyennement pollué, les valeurs les plus faibles ont été enregistrés au niveau de la station X, 1, 11, 12, 13, 5, 6 et 8, et le reste des stations ont marqué les valeurs les plus élevés qui suggèrent que sont moyennement pollués (Singh et al., 2002).

IV.2.3. Analyses en composante principale

Pour évaluer les résultats obtenus et d'extraire l'ensemble des corrélations entre les variables ont été obtenus au préalable, pour cela nous avons procédé à l'analyse en composantes principales qui été réalisé à l'aide de logiciel XLSTAT là où nous avons injectés les données obtenus de (Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Mo, Cd, Pb, MOP) des 15 stations.

Les deux principaux axes de ces composants couverts 76.32% de l'information que nous cherchons se trouvent dans l'Axe F1 qui comporte 62.4 % de l'information de (Pb, Cr, Mo, Ni, Co, Mn, As, Se, Mo et MOP) et 14.28% de l'information de (Zn, Cd et Cu) sur l'axe F2.

La répartition des variables sur les deux principaux axes sont clairement répartis en 3 groupes comme indiqué en figure ci-dessous :

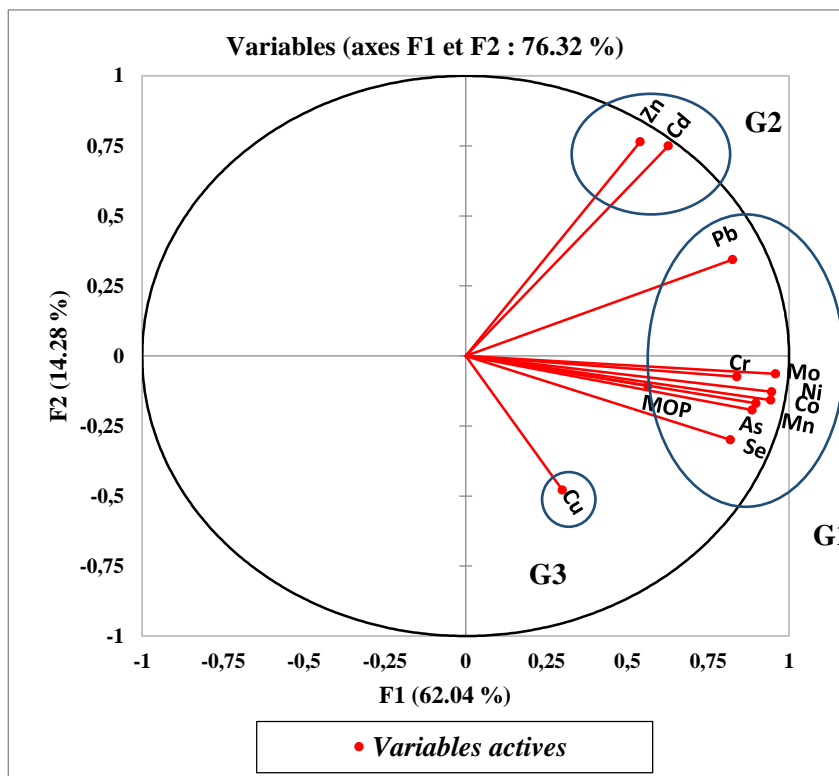


Figure (IV.13) : Projection des métaux lourds et de MOP comme variables dans le plan factoriel 1et2

- ▶ Le groupe 1 (G1) qui est affiché négativement sur l'axe F1 est représentatif de (Cr, Mo, Ni, Co, Mn, As, Se et MOP).
- ▶ Le groupe 2 (G2) qui est affiché positivement sur l'axe F2 est représentatif de (Cd et Zn), ce groupe présente une corrélation significative avec le plomb de groupe 1 et des

corrélations non significatives pour le reste des éléments de groupes 1.

- Le groupe 3 (G3) qui est affiché négativement sur l'axe F2 qui représente des corrélations négative avec le groupe 2 (G2) et des corrélations non-significatives pour le G1.

De même, le Biplot (diagramme de dispersion des stations et les réparations des variables) projeté sur les deux axes (F1 et F2), dans la figure(IV.13) montre la distribution des trois groupes distincts de métaux lourds qui ont coïncidé avec la projection de métaux comme variables dans la Figure(IV.14). Le Biplot montre que les stations X, 9, 6 sont les plus touchée par la pollution anthropique dus aux éléments suivants (Cr, Mo, Ni, As, Se, et MOP) ceci confirmé les résultats de indices qui ont été calculé auparavant. Le groupe 2 (G2) montre que la station 11 a les concentrations les plus élevées en Zn, Cd et Pb, en outre la station 0, 1, 2, 5 représente que les teneurs les plus élevées en cuivre se trouvent au niveau de ces stations

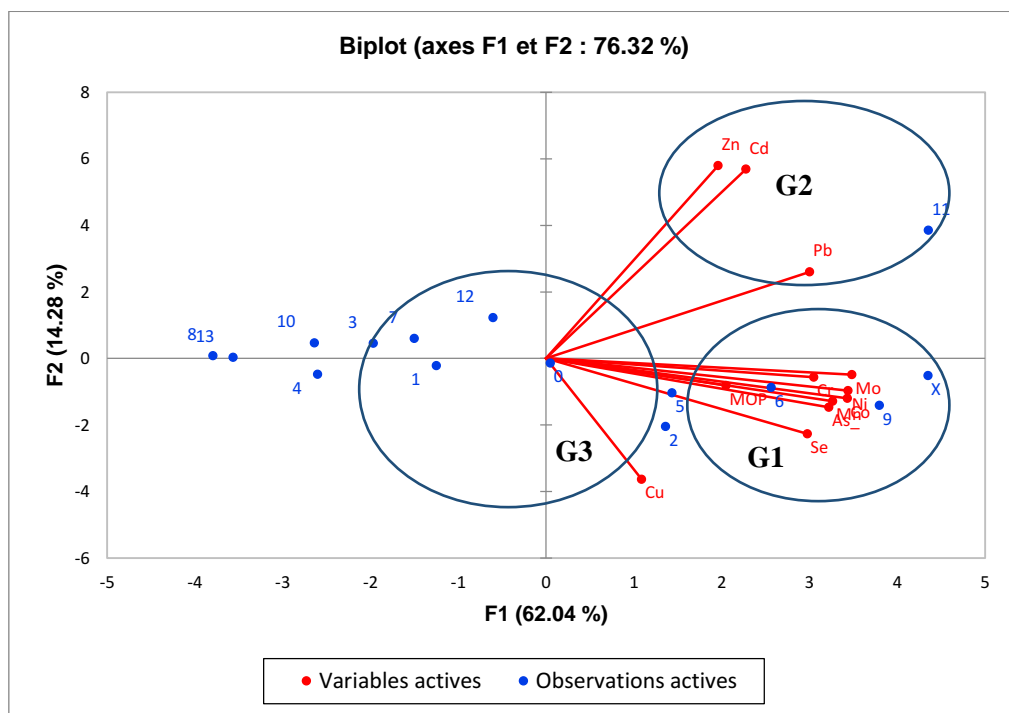


Figure (IV.14) : Projection des métaux lourds et de MOP et les stations comme variables dans le plan factoriel 1et2

Tableau (IV.12) : Matrice de corrélation pour les métaux lourds et de MOP dans les sédiments de notre zone d'étude

Variables	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	As	Se	Mo	Cd	Pb	MOI
Cr	1.00											
Mn	0.73	1.00										
Co	0.72	0.83	1.00									
Ni	0.75	0.83	0.99	1.00								
Cu	0.30	0.20	0.37	0.35	1.00							
Zn	0.38	0.33	0.37	0.40	-0.07	1.00						
As	0.63	0.83	0.85	0.82	0.33	0.39	1.00					
Se	0.74	0.82	0.82	0.80	0.10	0.21	0.78	1.00				
Mo	0.73	0.81	0.98	0.95	0.40	0.47	0.88	0.79	1.00			
Cd	0.46	0.41	0.47	0.49	-0.05	0.92	0.41	0.23	0.57	1.00		
Pb	0.71	0.68	0.75	0.76	0.11	0.59	0.56	0.50	0.79	0.77	1.00	
MOP	0.58	0.64	0.38	0.43	0.08	0.20	0.60	0.40	0.38	0.30	0.33	1.00

En exploitant les résultats obtenus par l'ACP, le Biplot et la matrice de corrélation pour mettre en évidence l'état de de pollution de notre zone d'étude afin de comprendre le comportement des métaux lourds entre eux même et avec la MOP en utilisant la matrice de corrélation.

Nous pouvons dire que les sites les plus touchés par un maximum de polluant métallique sont les stations X, 9 et 6 et qui peuvent engendrer une dégradation de l'écosystème marin de cette zone, la station 11 est caractérisé par une pollution principalement de Zn, Cd et Pb et qui sont très toxique entre autre la station 1 a une forte pollution en Cuivre. L'ordre de degré de pollution métallique dans notre zone d'étude comme suit : Zn > Mn > Cr > Cu > As > Ni > Pb > Co > Se > Mo > Cd. Et pour les groupes sont G1 > G2 > G3.

Afin d'explorer la relation possible entre les métaux lourds, la matrice des corrélations de Pearson a été réalisée, la matrice est indiquée dans le Tableau 3. 6. Les métaux présentés entre eux, une très bon corrélation à aucun. Une corrélation positive significative a été trouvée entre, Cr-Mn (0.73), Cr-Co (0.88), Cr-Ni (0.75), Cr-Se (0.74), Cr-Mo (0.73), Cr-Pb (0.71), Mn-Co (0.83), Mn-Ni (0.83), Mn-As (0.83), Mn-Se (0.72), Mn-Mo (0.81). Mn-Pb (0.68). Mn-MOP (0.62), **Co-Ni (0.99)**, Co-As (0.83), Co-Se (0.82), **Co-Mo (0.98)**, Co-Pb (0.75), Ni-As (0.82), Ni-Se (0.80), **Ni-Mo (0.95)**, Ni-Pb (0.76), **Zn-Cd (0.92)**, As-Se (0.78), As-Mo (0.88),As-MOP (0.60). Une forte corrélation entre Co avec le Mo et Ni et Ni avec le Mo et le Zn et Cd, cette coefficient de corrélation entre les métaux donne des indications sur leurs origines (Kükrer al., 2014), Soulignent qu'une forte corrélation entre deux métaux indique la même source de pollution. Si aucune corrélation est trouvée entre les éléments, cela signifie que les métaux ne sont pas contrôlés

par un seul facteur, comme indiqué par (Suresh et al., 2011). Par conséquent, cela signifie que l'origine des métaux lourds peut être des activités anthropiques

Conclusion et perspectives

Les différents indices de contamination ou de toxicité calculés ont révélés des situations préoccupantes pour plusieurs stations et plusieurs polluants métalliques. Des cas de contaminations polymétalliques dominées par deux ou plusieurs éléments ont été enregistrés (Zn, Cu, Mn, Cr et As) étant les plus préoccupants. Les indices utilisés, dans leur principe même, sont certainement utiles lorsqu'il convient d'établir un outil de gestion (valeurs guides, valeurs d'interventions, etc.), mais présentent une utilité limitée pour différencier plusieurs sources de pollution ou discriminer une source de contamination ponctuelle d'un signal de contamination diffus. Ces indices se révèlent aussi d'une efficacité limitée lorsqu'il s'agit d'évaluer l'impact réel de la contamination métallique des écosystèmes marins, car les effets dépendent davantage de la forme chimique (spéciation) des ETM plutôt que de leurs concentrations totales. C'est pourquoi, il est important que ces derniers soient complétés de surveillance biologique sur matrice solide (sédiments) afin de s'assurer de la toxicité ou l'innocuité de cette dernière.

La répartition des métaux lourds dépend plusieurs facteur notamment la nature des fonds marins ou la taille des grains plus précisément ainsi que sa texture qui joue un rôle très important dans le phénomène d'adsorption, ça ce qui a été montré dans notre étude et qui confirme les études antécédentes que les métaux lourds ont une affinité avec les fractions fines de sédiment le cas Cu, Cd, Mo, Zn, As et Se.

L'importance de coupler les méthodes statistiques, cartographiques et analytiques aident à l'évaluation de l'état de santé des écosystèmes marins avec précision, ceci est très importants lorsqu'il s'agit un vrai diagnostic de l'état de contamination.

Bien que nous ayons évalué l'état de contamination métallique dans notre zone d'étude, il nous manque de compléter notre travail par une surveillance sur matrice biologique (Biote) afin de s'assurer de la toxicité ou l'innocuité de cette dernière.

Dans le prochain chapitre nous allons essayer de comprendre l'effet de la dynamique côtière sur la dynamique spatiale des polluants métalliques, en modélisant les différents facteurs tels que l'hydrodynamique, la houle et le transport sédimentaire, en essayant d'estimer la surface qui a été impacté par cette sérieuse pollution.

Chapitre V :

Modélisation de la dynamique hydro-sédimentaire
et la diffusion des polluants

Introduction

Ce chapitre a pour vocation de présenter le contexte général de la gestion des zones côtières afin d'identifier les besoins de description des activités humaines en mer côtière. L'étude et la compréhension du monde réel repose souvent sur sa modélisation et en particulier pour l'analyse des processus et la prise de décision en environnement (Seppelt et al., 2002 ; Seppelt, 2007). Nous avons donc eu recours à la modélisation pour décrire le déroulement de différentes activités humaines en mer côtière. Dans un premier temps, nous présentons notre ancrage théorique dans les champs de la modélisation et de la modélisation spatio-temporelle par les SIG. Puis, dans un second temps, nous précisons les modalités méthodologiques que nous avons retenues pour décrire les activités humaines en mer côtière et leurs interactions.

La connaissance de la circulation des eaux (l'hydrodynamique) est indispensable pour comprendre la distribution et la dispersion des apports naturels et anthropiques dans les Eaux (Fichez et al., 2008). Au-delà des informations qui peuvent être obtenues par la mesure directe des orientations et des vitesses du vent, des courants ou des vagues, la compréhension fine de la circulation ne peut être obtenue que par des approches de modélisation numérique permettant de prévoir la force et la direction des courants à différentes profondeurs et en tout point.

L'hydrodynamique de l'océan joue toujours un rôle important pour étudier les processus physiques. Les principales attractions des études hydrodynamiques (marées et courants) sont essentielles pour comprendre les processus chimiques et biologiques, tels que le transport des polluants et le mélange des sédiments.

Les conditions océanographiques dans la baie de Bou Ismail sont très dynamiques en raison de l'interaction des courants.

L'objectif de la présente étude est de comprendre le transport des sédiments le long dans la baie de Bou Ismail et de quantifier les taux de transport des sédiments. Les données utilisées dans la présente étude comprennent la carte hydrographique (carte bathymétrique) de la zone d'étude. Un système de modélisation du transport des sédiments MIKE 21 ST [méthode de Bijker] pour les vagues et les courants combinés est utilisé pour quantifier et trouver le mouvement des sédiments le long de la côte. MIKE 21 ST est en corrélation avec les autres modules de MIKE 21 comme le module hydrodynamique (HD) et le module Wind-wave (NSW ou OSW).

Il existe une demande croissante de connaissances sur les processus hydrodynamiques, morphologiques et de qualité de l'eau dans les cours d'eau estuariens de la Gold Coast. Cette étude décrit le développement d'une série de modèles hydrodynamiques, de transport des sédiments et de qualité de l'eau pour les cours d'eau à marée de la Gold Coast. Le cadre de modélisation décrit

Modélisation de la dynamique hydro-sédimentaire et la diffusion des polluants

a été élaboré pour fournir une compréhension stratégique du comportement des voies navigables à un niveau approprié pour la planification et l'évaluation de l'impact environnemental, en plus de guider la prise de décision stratégique.

La modélisation des interactions repose sur deux hypothèses initiales :

- i. les activités potentiellement en interaction sont en interaction spatio-temporelle, C'est-à-dire qu'elles se déroulent simultanément en un même lieu ;
- ii. ces interactions peuvent être approchées par des intersections spatio-temporelles

V.1. Matériels et méthodes

V.1.1. Présentation du logiciel (Mike Zéro)

MIKE Zéro est le nom commun des implémentations Windows de DHI intégrant l'interface utilisateur graphique pour la mise en place des simulations, la pré-analyse et le post-traitement des données ainsi la présentation et la visualisation des données dans un environnement de projet orientée (DHI, 2007), le Mike Zéro comporte ainsi plusieurs outils de modélisation tel que :

- **MIKE HYDRO** : contient des modèles physiques et conceptuels pour les bassins versants, les rivières et les plaines inondables.
- **MIKE 11** : Modélisation à unidimensionnelle (1D) des réseaux hydrographiques
- **MIKE 21** : Modélisation bidimensionnelle (2D) pour les systèmes estuariens, les eaux côtières et marines
- **MIKE 3** : Modélisation tridimensionnelle (3D), pour les eaux des estuaires, mers et de milieu côtier
- **MIKE 21/3 Integrated Models** : permet un couplage entre les modèles de transport d'ondes, de flux et de sédiments.
- **MIKE FLOOD** : Modélisation uni et bidimensionnelle pour les études sur les inondations dans les milieux intérieures et urbains.
- **LITPACK** : Modélisation de la cinématique de trait de côte et les différents processus littoral
- **MIKE SHE** : Modélisation des eaux souterraines et les eaux de surfaces



Figure (V.1) : Différents domaines d'utilisation de DHI Mike Zero

V.1.2. Présentation de module (*CoupledModel_FM*)

Le module hydrodynamique MIKE 21 fournit la base pour calculs effectués dans de nombreux autres modules, mais peut également être utilisé seul. Il simule l'eau variations de niveau et les flux en réponse à une variété des fonctions, dans les lacs, estuaires et zones côtières. (Fichez R L et al., 2008)

Modélisation de la dynamique hydro-sédimentaire et la diffusion des polluants

Le module hydrodynamique peut être couplé à un Module écologique (ECO Lab) pour former la base pour des études de qualité de l'eau environnementale comprenant plusieurs composants. De plus, le module hydrodynamique peut être couplé à des modèles de sédiments pour le calcul de transport de sédiments. Le module de transport du sable et le module de transport de boue peut être appliqué à simuler le transport de non-cohésive et cohésive sédiments, respectivement.

Dans la zone côtière, le transport sédimentaire est principalement déterminé par les conditions de la houle et associé aux courants induits par les vagues. Les courants sont générés par les gradients de rayonnement qui se produisent dans la zone de surface. Le spectral Wave Module peut être utilisé pour calculer la hauteur de la vague et déterminer les conditions de rayonnements associés. (Gurumoorthi et al., 2017)

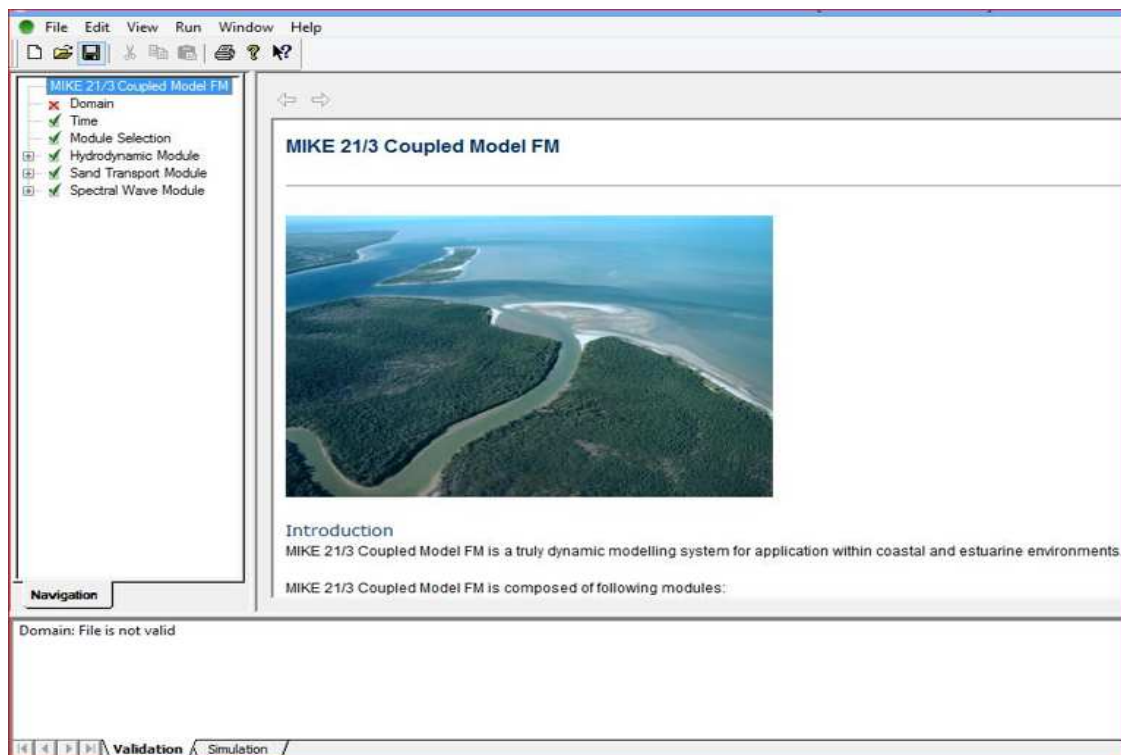


Figure (V.2) : L'interface de module de model couplé (MIKE 21/3 Coupled Model).

Modélisation de la dynamique hydro-sédimentaire et la diffusion des polluants

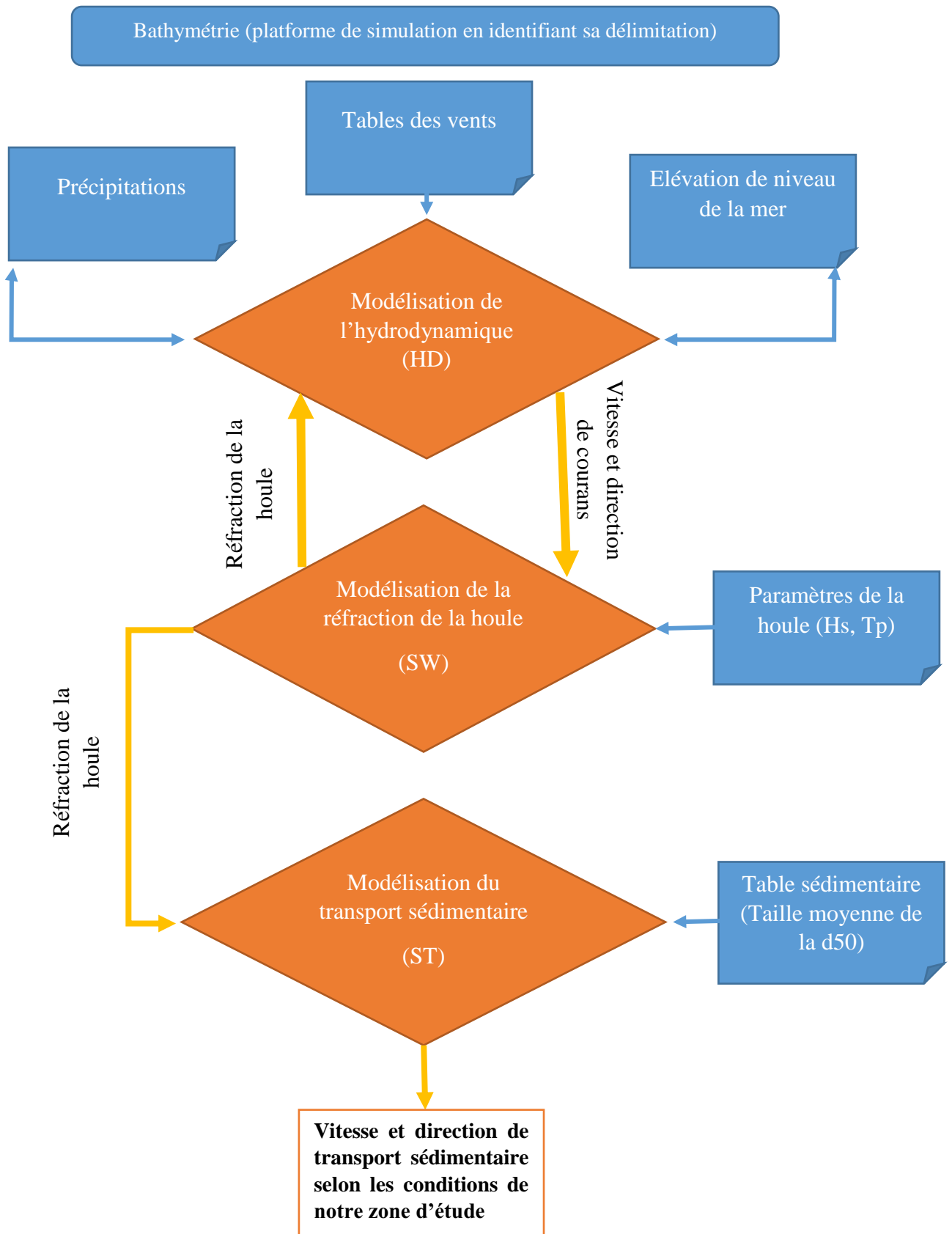


Figure (V.3) : Principe de fonctionnement de Model Couple (Hoggas, 2018)

V.2. Méthodologie de travail

V.2.1. Modélisation de l'hydrodynamique et de la houle

V.2.1.1. Principe de module HD

Le modèle hydrodynamique MIKE21 HD résolve les équations bidimensionnelles classiques de Saint-Venant par la méthode en volume fini sur une grille à maillage flexible et par la méthode des différences finies sur une grille à maillage rectangulaire. Il traite le frottement sur le fond, l'effet des événements météorologiques, vent et pression atmosphérique), la force de Coriolis, etc. ... il nous permet de simuler les courants côtiers dus à l'action de la houle dans la zone de déferlement (Wikhydro, 2014).

- Equation de Continuité de mouvement Horizontale

$$\frac{\partial h\bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}\bar{u}}{\partial y} = f\bar{v}h - gh\frac{\partial\eta}{\partial x} - \frac{h}{\rho_0}\frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{gh^2}{2\rho_0}\frac{\partial\rho_w}{\partial x} + \frac{\tau_{zx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0}\left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial x}(hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y}(hT_{xy}) + hu_z S$$

- Equation de Continuité de la profondeur.

$$\frac{\partial h\bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}^2}{\partial y} = f\bar{u}h - gh\frac{\partial\eta}{\partial y} - \frac{h}{\rho_0}\frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{gh^2}{2\rho_0}\frac{\partial\rho_w}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0}\left(\frac{\partial s_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial x}(hT_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y}(hT_{yy}) + hv_z S$$

Où :

t : le temps.

x, y et z : les coordonnées cartésiennes.

η : la hauteur de la surface

d : la hauteur d'eau.

h : la profondeur totale de l'eau, $h = \eta + d$.

u, v et w : les composantes de la vitesse dans les directions x, y et z .

f : le paramètre de Coriolis, $f = 2\Omega\sin\phi$.

Ω : la vitesse angulaire de révolution.

ϕ : la latitude géographique.

g : l'accélération gravitationnelle.

ρ_w : la densité de l'eau.

$s_{yx}, s_{xy}, s_{yy}, s_{xx}$: des composantes du rayonnement tenseur.

ν_t : le turbulent vertical (ou Eddy)viscosité.

p_a : la pression atmosphérique.

Modélisation de la dynamique hydro-sédimentaire et la diffusion des polluants

ρ_0 : la densité de référence de l'eau.

S : l'amplitude de la décharge causée par des sources ponctuelles.

u_s, v_s : la vitesse par laquelle l'eau est déchargée dans l'eau ambiante.

A : la viscosité turbulente horizontale.

τ_{sx}, τ_{sy} et τ_{bx}, τ_{by}

: composantes x et y du vent de surface et des contraintes de fond.

V.2.1.2. Principe de module SW

Le module (Spectral Wave SW) est un modèle qui a été conçu pour la modélisation des ondes spectrales générées par le vent sur un maillage non structuré. Le modèle simule la croissance, la réfraction de la houle et des vagues dans les zones côtières et au large (Wikhydro, 2014).

Ce modèle contient des modèles et à partir de ce dernier il génère des simulations selon la donnée qui a été injectée les principaux modèles de fonctionnement de SW sont :

Les composantes de l'onde de houle sont définies comme les composantes répondant au critère d'onde suivant :

$$\frac{U_{10}}{c} \cos(\theta - \theta_w) < 0.83$$

Où U_{10} est la vitesse du vent, c la vitesse de phase et θ et θ_w sont la propagation de l'onde et la direction du vent, respectivement :

L'intégrale de ce dernier donne :

a) Hauteur significative

Hauteur significative de la houle, H_{m0} (m) :

$$H_{m0} = 4\sqrt{m_0}$$

b) Période T_{01} (s)

$$T_{01} = m_0 / m_1$$

c) Direction moyenne de la houle (Degré)

$$\bar{\theta} = 270 - \tan^{-1}(b/a)$$

Où

$$a = \frac{1}{m_0} \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \cos\left(\frac{3}{2}\pi - \theta\right) E(f, \theta) df d\theta$$

$$b = \frac{1}{m_0} \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \sin\left(\frac{3}{2}\pi - \theta\right) E(f, \theta) df d\theta$$

V.2.2. Modélisation de transport sédimentaire (ST)

V.2.2.1.Principe

Le transport de sédiments est défini dans trois modes de transport : charge de lit, charge suspendue et charge de lavage. Entre autres, une description complète est donnée par Engelund & Hansen (1967) et Jansen et al. (1979), figure ci-dessous :

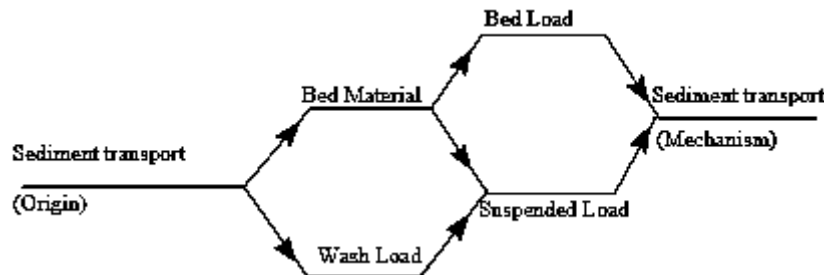


Figure (V.4) : Classification des transports sédimentaire selon (Jansen et al.,1979)

MIKE 21 est l'un des Modules de transport sédimentaire, il se base sur le calcul des taux de transport de sédiments en utilisant deux types de modèles différents :

- Courant HD et SW

Les calculs de transport des sédiments sont basés sur les conditions hydrodynamiques simulées au préalable, les propriétés des sédiments, courants et vagues combinés.

Les calculs de transport sédimentaire sont effectués en utilisant une composante de vitesse horizontale moyenne. Les calculs de transport de sable dans MIKE 21, le résultat de cette modélisation est bidimensionnel (2D).

Le module ST se base essentiellement sur deux modèles :

a) Van-Rijn (1984)

Van-Rijn (1984) a proposé les modèles suivants pour le transport sédimentaire :

$$S_{br} = 0.053 \frac{T^{2.1}}{D_*^{0.3}} \sqrt{(s-1)g \cdot d_{50}^3}$$

Où T est le paramètre de l'étape de transport non-dimensionnel et donné par:

$$T = \left(\frac{u_r}{u_{fc}} \right)^3 - 1$$

La vitesse de frottement critique u_f , c'est déterminée comme suit :

Modélisation de la dynamique hydro-sédimentaire et la diffusion des polluants

$$u_{f,e} = \sqrt{\theta_e (s-I) g d_{90}}$$

La vitesse de frottement effective est estimée à partir de:

$$u'f = V \frac{\sqrt{g}}{C'}$$

Lorsque la résistance (Chezy numbe) provenant de la friction de la surface est basée sur un profil de vitesse logarithmique en supposant une certaine rugosité du lit:

$$C' = 18 \log \left(\frac{4h}{d_{90}} \right)$$

Le paramètre de particule non dimensionnel D^* dans la formule de transport sédimentaire de fond de van Rijn est définie comme suit :

$$D^* = d_{90} \left(\frac{(s-I) g}{\nu^2} \right)^{\frac{1}{3}}$$

b) Engelund and Hansen model

Le modèle d'Engelund et Hansen (1967) est un modèle de charge totale qui nécessite des informations spécifiées par l'utilisateur afin de diviser le transport de sédiments en charge de fond et en charge suspendue. Les taux de transport sont obtenus à partir des relations.

$$S_{bt} = k_b \cdot S_{st}$$

$$S_{st} = k_s \cdot S_{bt}$$

Lorsque le transport total de sédiments est obtenu par:

$$S_{st} = 0.05 \frac{C'}{g} \theta_e^{\frac{1}{2}} \sqrt{(s-I) g d_{90}^3}$$

La concentration à l'équilibre est simplement définie comme la charge suspendue divisée par le flux d'eau et convertie de la concentration volumétrique à la concentration massique :

$$c_s = \frac{S_{st}}{V \cdot h} \cdot s \cdot 10^6$$

Tableau (V.1) : Abréviation des paramètres d'input et ses unités

Paramètres	Signification	Unité
S_{bl}	Bed load	m ² /s
k_b	Bed load calibration factor	-
S_{sl}	Suspended load	m ² /s
k_s	Suspended load calibration factor	-
s	Relative density of the sediment	-
S_{tl}	Total load	m ² /s
c_e	Equilibrium mass concentration	g/m ³
C	Chezy number	m ^{1/2} /s
V	Velocity	m/s

V.2.3. Préparation des Inputs

V.2.3.1. Préparation du maillage de la bathymétrie

Le maillage de la bathymétrie représente un élément indispensable, et elle représente le site que nous allons faire nos simulation la précision dans cette étape est très recommandé afin d'avoir des résultats qui sont compatible avec la réalité, pour cela nous avons suivi la démarche Présentée dans l'annexe (IV).

Les données de la bathymétrie ont été extraites par les cartes marines récentes qui sont disponible sur le site (webapp.navionics.com).

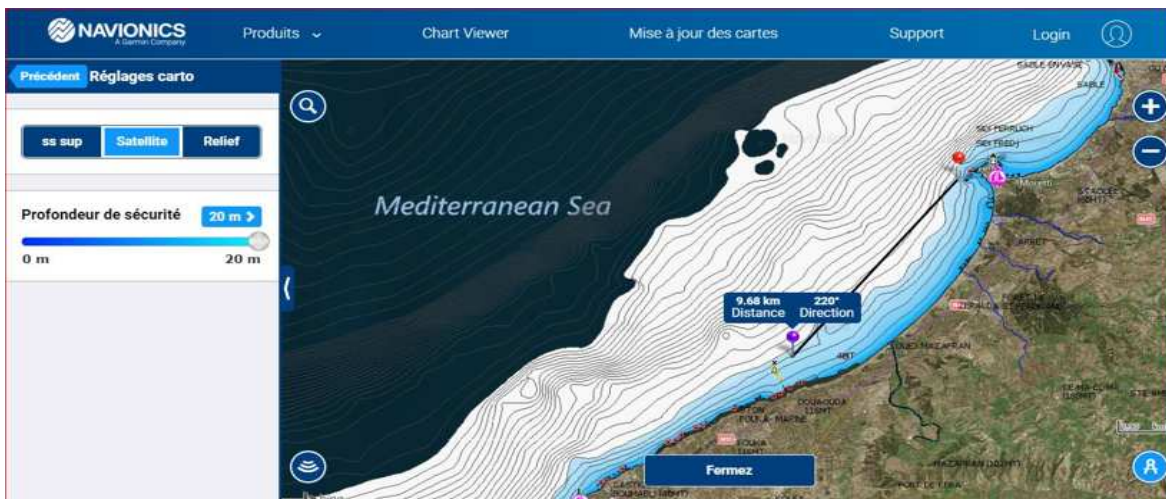


Figure (V.5) : Interface de site de navionics

Après avoir suivi les étapes présentées dans l'annexe (IV), nous avons pu avoir la carte de maillage qui explique l'interpolation de la profondeur (z) appliquée dans les zones côtières. Le module permet de résoudre les équations différentielles (dt, dz : variable) dans la baie en tenant compte de la variabilité bathymétrie et l'hétérogénéité distinguée dans notre zone d'étude

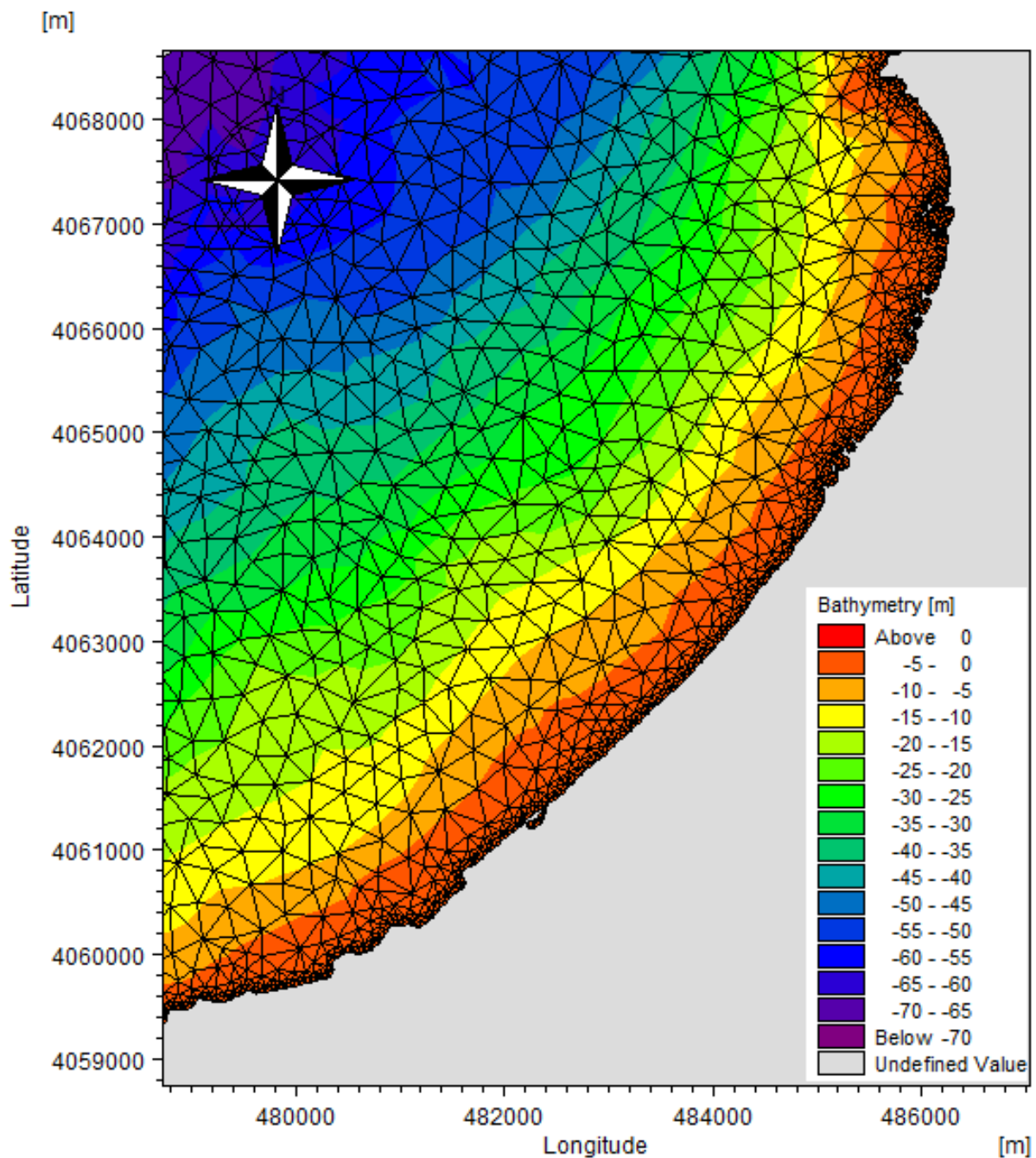


Figure (V.6) : Le maillage de la Bathymétrie de la zone d'étude (Hoggas, 2018)

La résolution des équations différentielles par la méthode de modélisation montre un maillage variable au large de la zone d'étude qui explique une bathymétrie homogène sur de grandes surfaces. Par contre dans la partie côtière de la baie, le maillage est serré et faible, ce qui explique une forte variabilité de la bathymétrie.

La détermination de la bathymétrie est en fonction de la résolution spatiale des mesures, souvent le nombre de points est limité, par conséquent l'interpolation spatiale dépend de maillage choisi.

Modélisation de la dynamique hydro-sédimentaire et la diffusion des polluants

dans le cas isobatiques nous utilisons un maillage à faible résolution par contre pour les zones à forte variabilité le maillage doit être choisi à très haute résolution (cas de la côte).

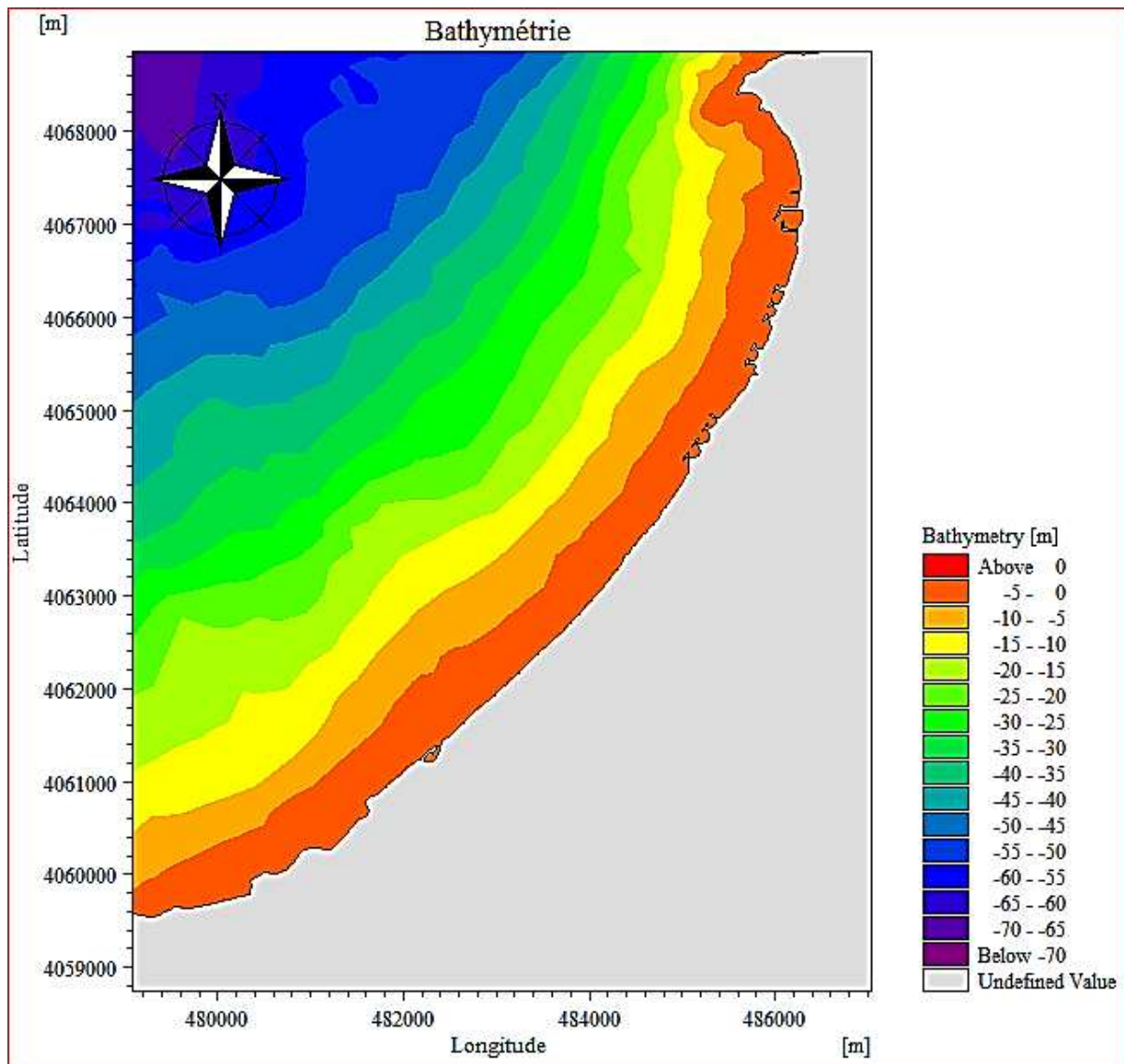


Figure (V.7) : Bathymétrie de la partie orientale de la baie de Bou Ismail

V.2.3.2. Préparation de la table des vents

Les données des vents ont été téléchargées par le site (www.rp5.ru), qui met à la disposition des consultants de site toute les données métrologiques y compris la direction des vents. Après l'acquisition des données nous avons créés une table des vents comme si présenté ci-dessous l'ensemble des étapes suivies sont mentionnées dans l'annexe (V).

Lors du processus de la création des vagues, le vent est le seul apport d'énergie à la surface de l'eau. Le transfert d'énergie est obtenu par la déformation de la surface de l'eau et la contrainte

Modélisation de la dynamique hydro-sédimentaire et la diffusion des polluants

exercée sur cette dernière La croissance des vagues dépend de plusieurs facteurs (allosurf.net)

:

- La hauteur, la période et la direction des vagues existantes,
- L'angle entre la direction du vent et celles des vagues,
- Le ratio de la vitesse du vent à la vitesse de phase (on appelle «vitesse de phase » la vitesse de déplacement des crêtes des vagues),
- La durée de l'action du vent,
- La force et la fréquence des rafales contribuent également à la croissance des vagues,

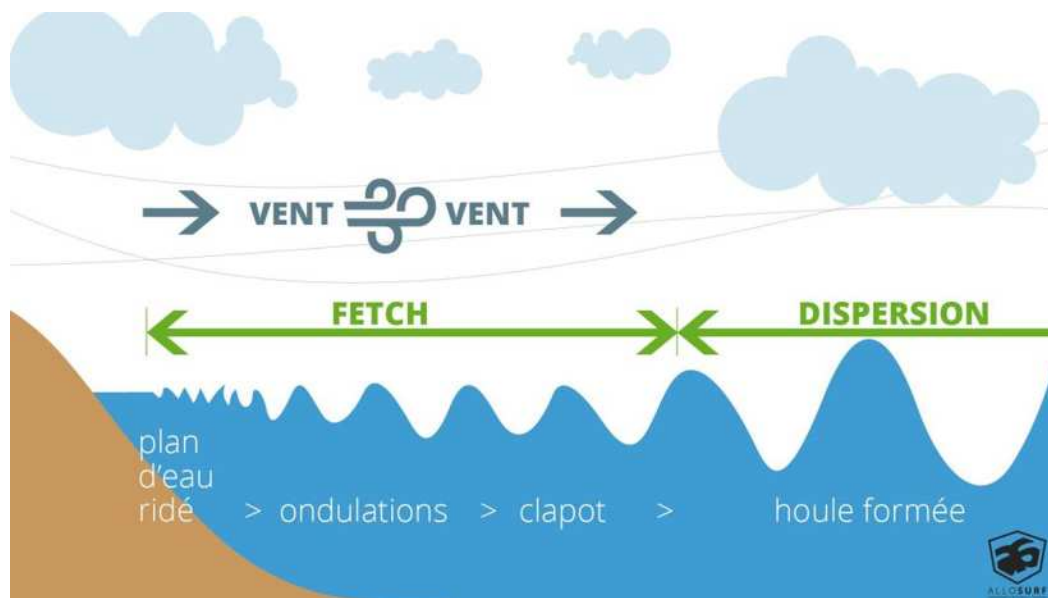


Figure (V.8) : Relation entre l'intensité des vents et les différents facteurs qui influent la houle, vague (allosurf.net)

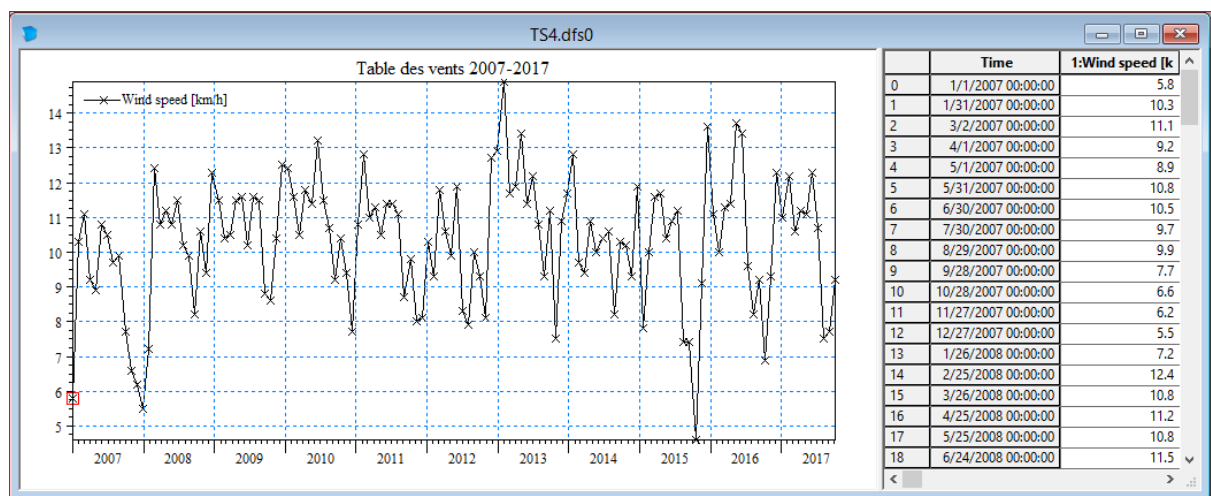


Figure (V.9) : La variation mensuelle des vents dans l'Est de Bou Ismail entre 2007-2017.

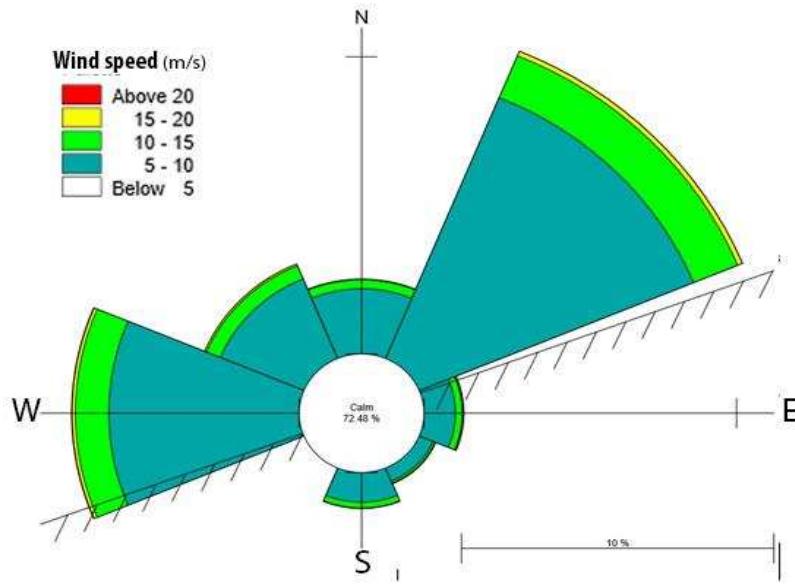


Figure (V.10) : Rose des vents de Bou Ismail 2007-2017 (Hoggas C E., 2018)

V.2.3.3. Préparation de la table sédimentaire

La préparation de la table sédimentaire représente l'étape la plus sensible, il faut connaître l'intervalle de la hauteur significative de la houle (H_s), la période de la houle (T_p), la moyenne de la taille des grains la d_{50} , ces derniers sont présentés dans la figure ci-dessous :

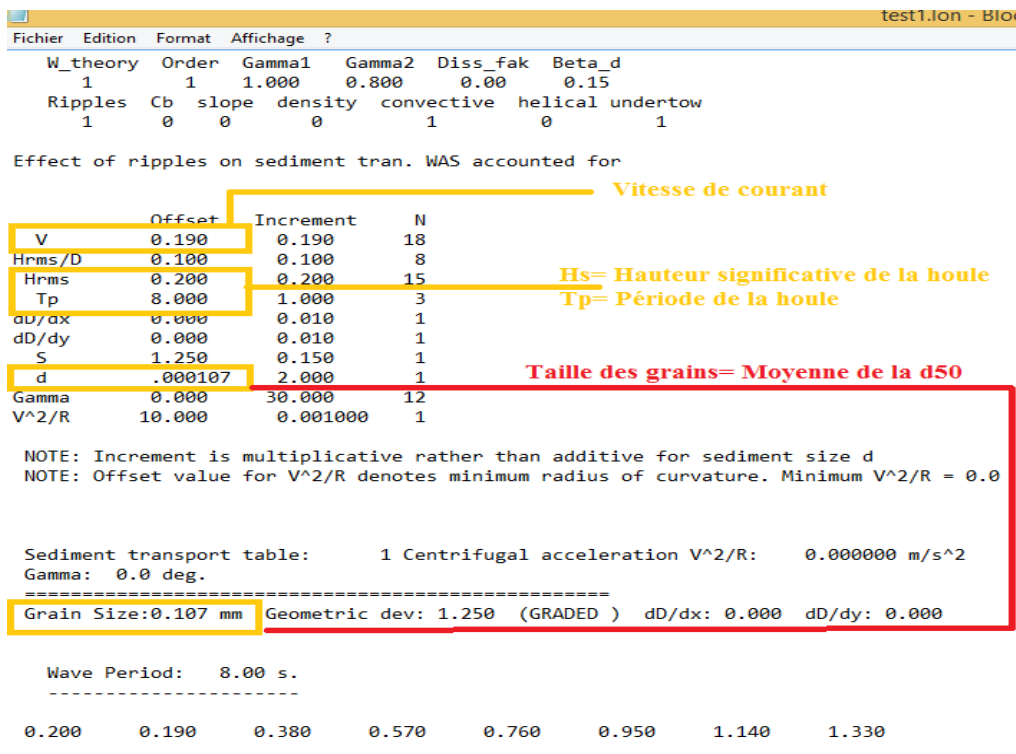


Figure (V.11) : Fichier output de la table sédimentaire qui montre la configuration de la table sédimentaire utilisée dans notre cas d'étude.

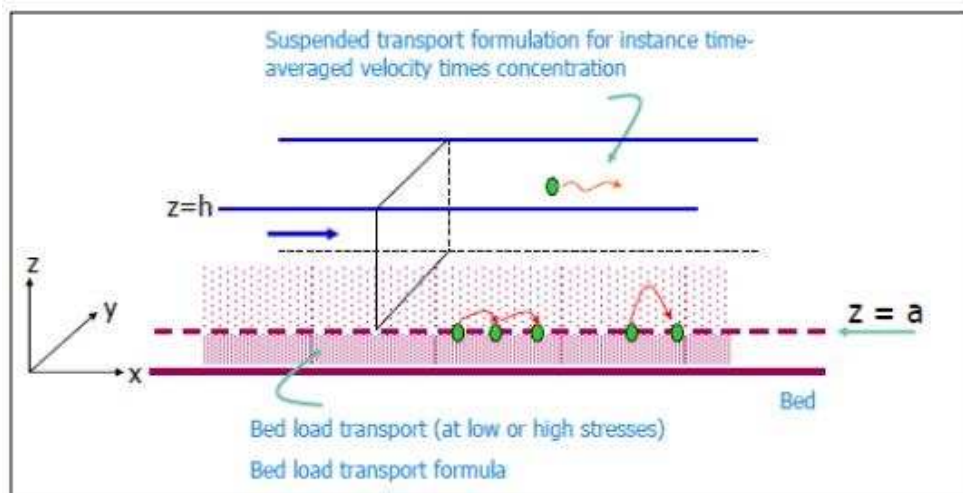


Figure (V.12) : Modélisation du transport sédimentaire

V.2.3.4. Les conditions de la houle et des vagues

En ce qui concerne les données de vagues au large, deux directions ont été privilégiées. Elles concernent les vagues du secteur WNW et NNE. Ces deux directions sont décrites dans les travaux de Leclair (1972). L'auteur montre que le centre algérois est caractérisé un régime saisonnier où apparaissent deux directions privilégiées", WNW (300°) et NNE (20-40°).

Tableau (V.2) : Condition de la houle au large de Bou Ismail (LEM)

Direction des vagues	Hs (m)	Tp(s)
Nord-Est	2.56	8
Ouest	2.67	8
Nord-Ouest	2.64	8

V.2.3.5. Paramétrage de logiciel

Dans cette étape nous allons injecter les inputs que nous avons préparé dans le model couplé
L'ensemble des paramètres sont résumé dans le tableau ci-dessous :

Modélisation de la dynamique hydro-sédimentaire et la diffusion des polluants

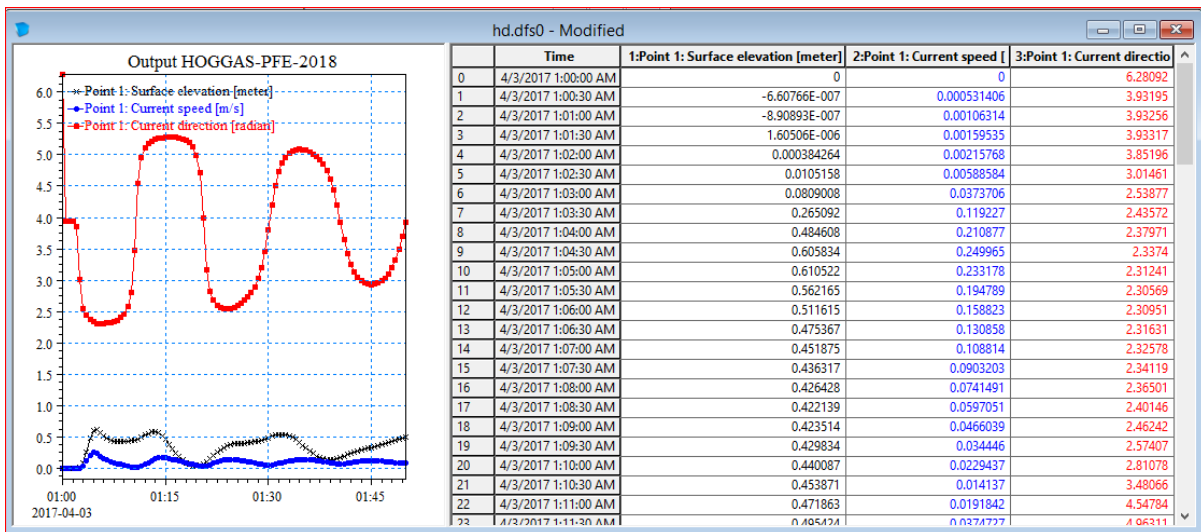
Tableau (V.2) : Résumé de paramétrage utilisé, avant la simulation (Hoggas, 2018)

Input parameters				
Domain	Maillage de la bathymétrie			
Time	No of time steps :144 /Time step interval:900s			
Module	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Sand Transport (ST) ✓ Spectral Weave (SW) ✓ Hydrodynamic (HD) 			
Hydrodynamic Model	Solution technique	✓ Low ordre, fast algorithm /Min:900s/Max:900s		
	Depth	<i>No depth correction</i>		
	Flood and Dry	✓ Include flood and dry		
	Density	✓ Barotropic		
	Eddy Viscosity	✓ Smagorinsky formulation: Constant=0.28		
	Bed Resistance	✓ Manning number: Constant=32. $\sqrt[3]{m/s}$		
	Coriolis Forcing	✓ Varying in domain		
	Wind Forcing	✓ Varying in time, constant in domain(Wind Table Bou Ismail bay 2007-2017)		
	Ice Coverage	✓ Non ice coverage		
	Weave Radiation	✓ Wave radiation from SW simulation		
	Initial Conditions	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Surface elevation=0m ✓ U-velocity=0m/s ✓ V-velocity=0m/s 		
	Boundary Conditions	West	Specified level=0.34	Soft start:900s
		Est	Specified level=0.34	Soft start:900s
	North	Specified level=0.34	Soft start:900s	
Output HD	Hydrodynamic	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Current speed ✓ Current direction 		
Sand Transport Model	Model Definition	✓ Model: Weave and current (Sediment table of B Ismail Bay)		
	Sediment Properties	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Porosity = 0.4 ✓ Grain Diameter=0.107 (Mean of d_{50}) 		
	Forcing	✓ Wave radiation from SW simulation		
Output ST	Sand Transport	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Total load, magnitude ✓ Total load, direction 		
Spectral Wave Model	Spectral Discretization	Discretization type : Directional sector <ul style="list-style-type: none"> ✓ Number of direction=10 ✓ Minimum direction=30 ✓ Maximum direction=50 		
	Water Level Condition	Water level condition from HD-Simulation		
	Current Condition	Current variation from HD-Simulation		
	Wind Forcing	From Wind table of Bou Ismail Bay 2007-2017		
	Boundary Condition	West	$H_s=4.27m$	$T_p=8s$ Direction=45°
		Est	-	
North		$H_s=4.27m$	$T_p=8s$ Direction=45°	
Output SW	Spectral Wave	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Wave height ✓ Wave direction ✓ Wave power ✓ Wave periode 		

V.3. Résultats et discussion

V.3.1. Hydrodynamique

D'après la figure (V.15), qui représente le champ des courants de l'Ouest de Bou Ismail selon les conditions de la houle ($T_p=8s$, $H_s= 2.4m$, Direction= 45°) montre des activités hydrodynamiques dans presque toute la zone côtière. Avec une propagation de courant de l'est vers l'ouest suivant une direction parallèle au trait de côte avec une vitesse majoritaire qui varie entre 0.25 m/s à 0.75 m/s, ce courant est produit principalement par le phénomène de réfraction de la houle et la vitesse de vent. Entre outre la figure (V.16), représente le champ des courants des selon les conditions de la houle ($T_p=8s$, $H_s= 2.67m$, Direction= 270°) montre un des courants de secteur ouest et de Nord-Ouest vers l'Est suivant une direction parallèle au trait de côte dans la partie ouest et perpendiculaire à la cote dans la partie Est de la baie. Avec une vitesse majoritaire qui varie entre 0.16 m/s à 0.98 m/s. Les valeurs maximales ont été enregistrées en face de l'embouchure d'oued Mazafran.



Figure(V.) : Données modélisées (Output) de l'élévation de niveau de la mer, courants et sa direction

Les courants de marées produisent des courants puissants qui permettent le détachement de sédiments au niveau de la couche supérieure du lit sédimentaire. Selon la nature et la taille des grains, le transport peut s'effectuer à différentes profondeur. La vitesse de cisaillement et la taille des grains sont les deux principaux facteurs qui détermineront les particularités du transport

V.3.2. Transport sédimentaire

Nous avons utilisé le générateur de table de sédiments qui se trouve dans la section des sédiments de la boîte à outils MIKE 21 en sélectionnant les valeurs et les intervalles pour chaque paramètre. Si les intervalles sont trop petits, les résultats seront meilleurs dans les simulations de transport sédimentaire, mais cela peut prendre beaucoup de temps.

Nous avons évité les intervalles sont trop grossiers, malgré que la table sera générée en très peu de temps, mais les résultats du MIKE 21 ST peuvent être très mauvais.

Nous avons noté que le modèle donne et calcule les taux de transport des sédiments, avec une haute résolution en considérant l'ensemble des valeurs et de tous les paramètres de chaque cellule qui permet d'établir ensuite la table des sédiments et du taux de transport sédimentaire.

De cela, nous avons obtenu une table avec des intervalles grossiers, les taux de transport considérablement lié aux conditions simulées utilisées dans le MIKE 21 ST.

Les transports des sédiments calculés dans la zone d'étude adoptent des unités de $m^3/s/m$ Ce qui est nécessaire de les convertir en $m^3/an/m$ pour mieux apprécier les résultats. Nous avons pris en considération les deux directions de houles dominantes dans notre zone d'étude dans cette partie on s'intéresse à celle de Nord-Est Figure (V.17) qui est caractérisée par une période $T_p=8s$ et un $H_{s0}=2.64$ m. Le sens du transport est suit celui des courants Figure (V.15), où on note une dérive littoral d'Est en Ouest et autre Ouest en Est. Lors de la rencontre, le courant forme un vortex et entraine le sable vers le large. Le débit sédimentaire prédit pour la période d'expérimentation, des valeurs comprises entre $252.288m^3/an/m$ et $3784.32 m^3/an/m$. Entre outre le transport sédimentaire présenté dans la figure (V.18) dues à la houle de secteur ouest caractérisée par ($T_p=8s$ et un $H_{s0}=2.67$ m), Le sens du transit suit celui des courants Figure (V.16), où on note une dérive littoral d'Ouest en Est et autre Est en Ouest. Le débit sédimentaire prédit pour la période d'expérimentation, des valeurs comprises entre $252.288 m^3/an/m$ et $3532.032 m^3/an/m$ au niveau d'oued Mazafran, Ces résultats mettent en évidence une dynamique sédimentaire importante dans le secteur d'étude pour un régime de houle.

Modélisation de la dynamique hydro-sédimentaire et la diffusion des polluants

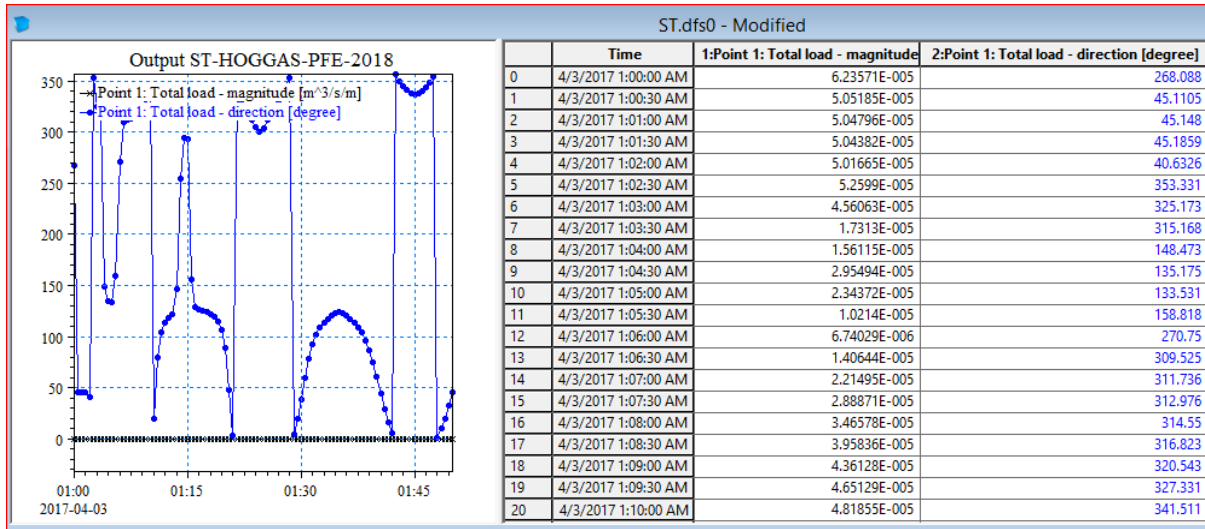
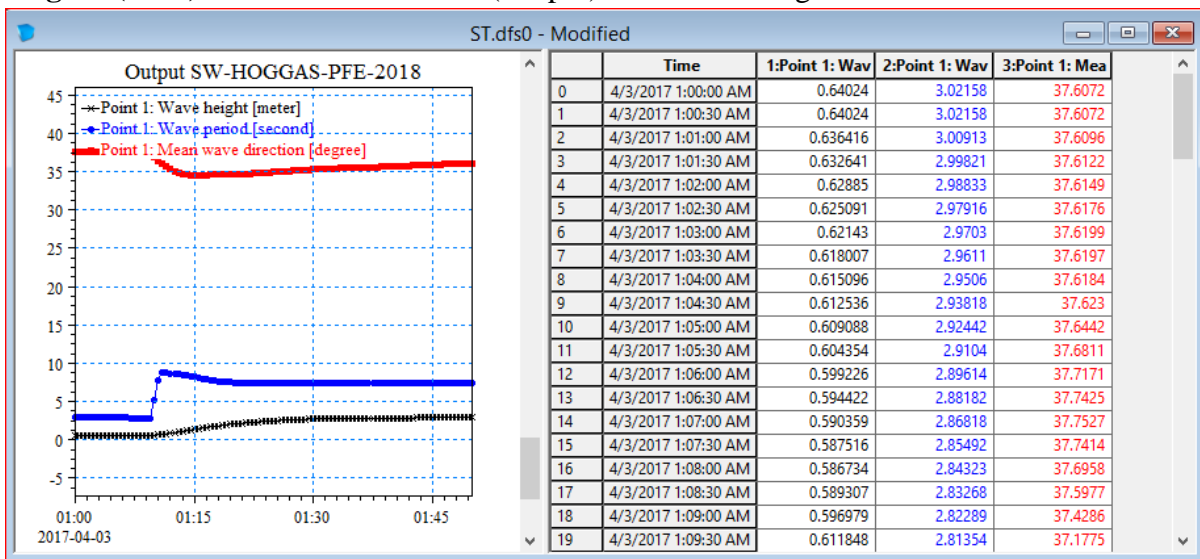


Figure (V.13) : Données modélisées (Output) de la vitesse et direction de transport sédimentaire.

Pour mieux visualiser l'ensemble des données, nous avons extrait les données sous formes un tableau et une graphique pour comprendre aussi observer la variaton temprelle de transport sédimentaire Figure (V.13). Ce dernier est lié étroitement par la houle car elle représente un facteur essentiel des mouvements sédimentaires dans la zone du littoral, lors du déferlement, l'énergie des vagues est dissipée et transformée principalement en turbulence qui remet en mouvement les sédiments qui sont transportés par les courants qu'elle engendre et/ou ceux dus aux marées et aux vents. Les interactions entre sédiments et d'eau activent en zone swash, et représente un lieu d'échange et de transport de sédiments (Butt et al., 2001 ; Mihoubi, 2008).

Figure (V.14) : Données modélisées (Output) de la hauteur significative de la houle et sa direction.



L'influence des non-linéarités de la houle sur le transport sédimentaire est étudiée, en particulier la dissymétrie de l'accélération (ou asymétrie). Elle est constatée sur la mesure de flux sédimentaire. Deux mécanismes sont identifiés.

Modélisation de la dynamique hydro-sédimentaire et la diffusion des polluants

- i. Une asymétrie hors de la couche limite conduit à une dissymétrie de vitesse dans la couche limite qui produit un transport net.
- ii. L'accélération hors de la couche limite est proportionnelle au gradient horizontal de pression et l'effort de pression qu'il suscite peut déstabiliser le lit (plug-flow).

Modélisation de la dynamique hydro-sédimentaire et la diffusion

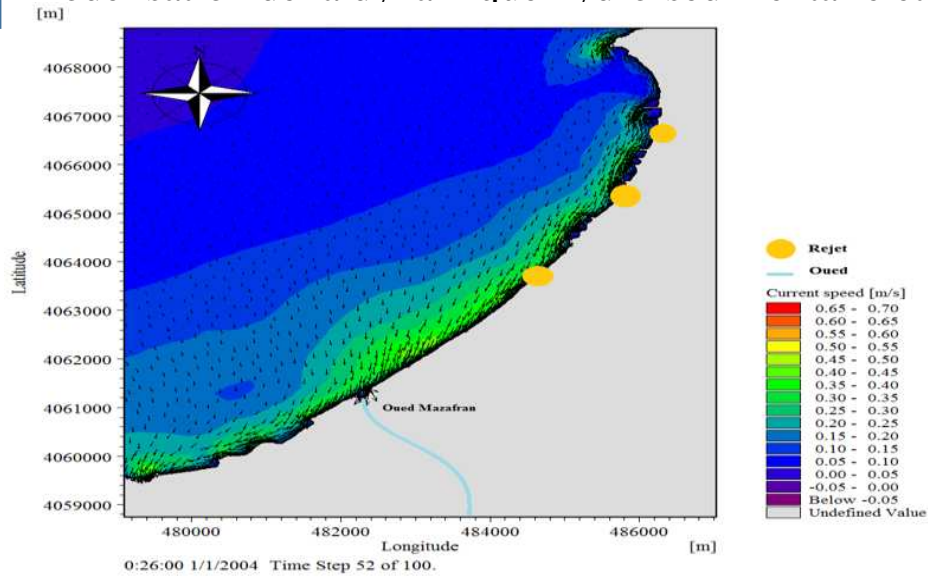


Figure (V.11) : Champs des courants de secteur Nord-Est

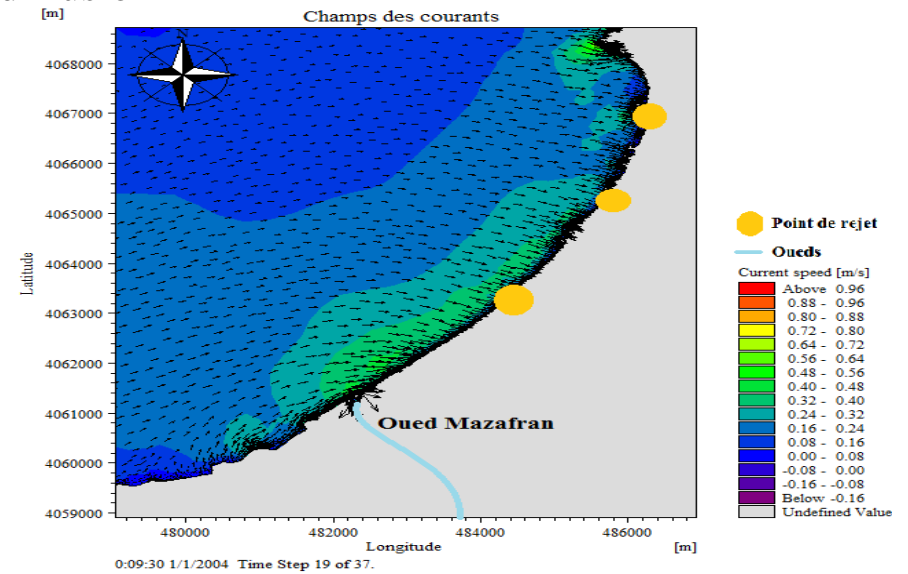


Figure (V.12) : Champs des courants de secteur Ouest

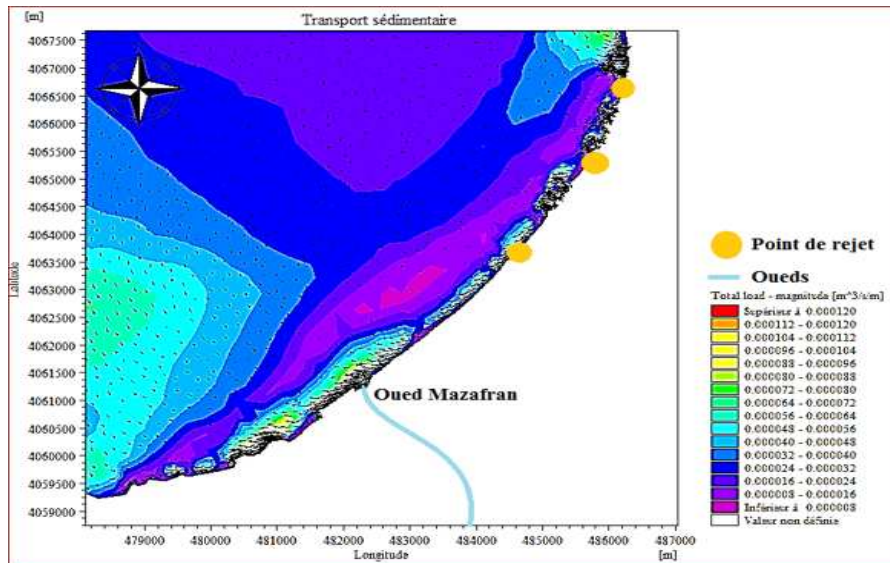


Figure (V.13) : Champs de transport sédimentaire de secteur Nord-Est

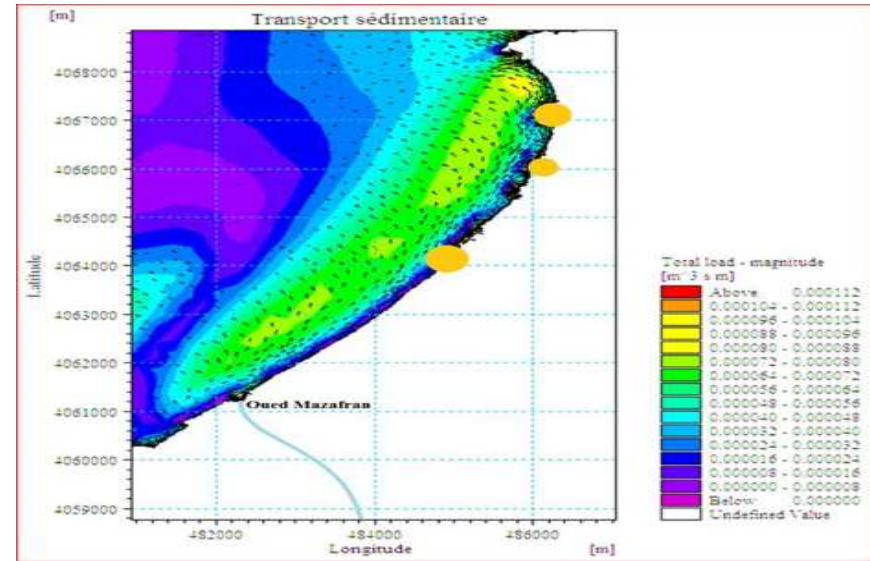


Figure (V.14) : Champs de transport sédimentaire de secteur Ouest

Modélisation de la dynamique hydro-sédimentaire et la diffusion des polluants

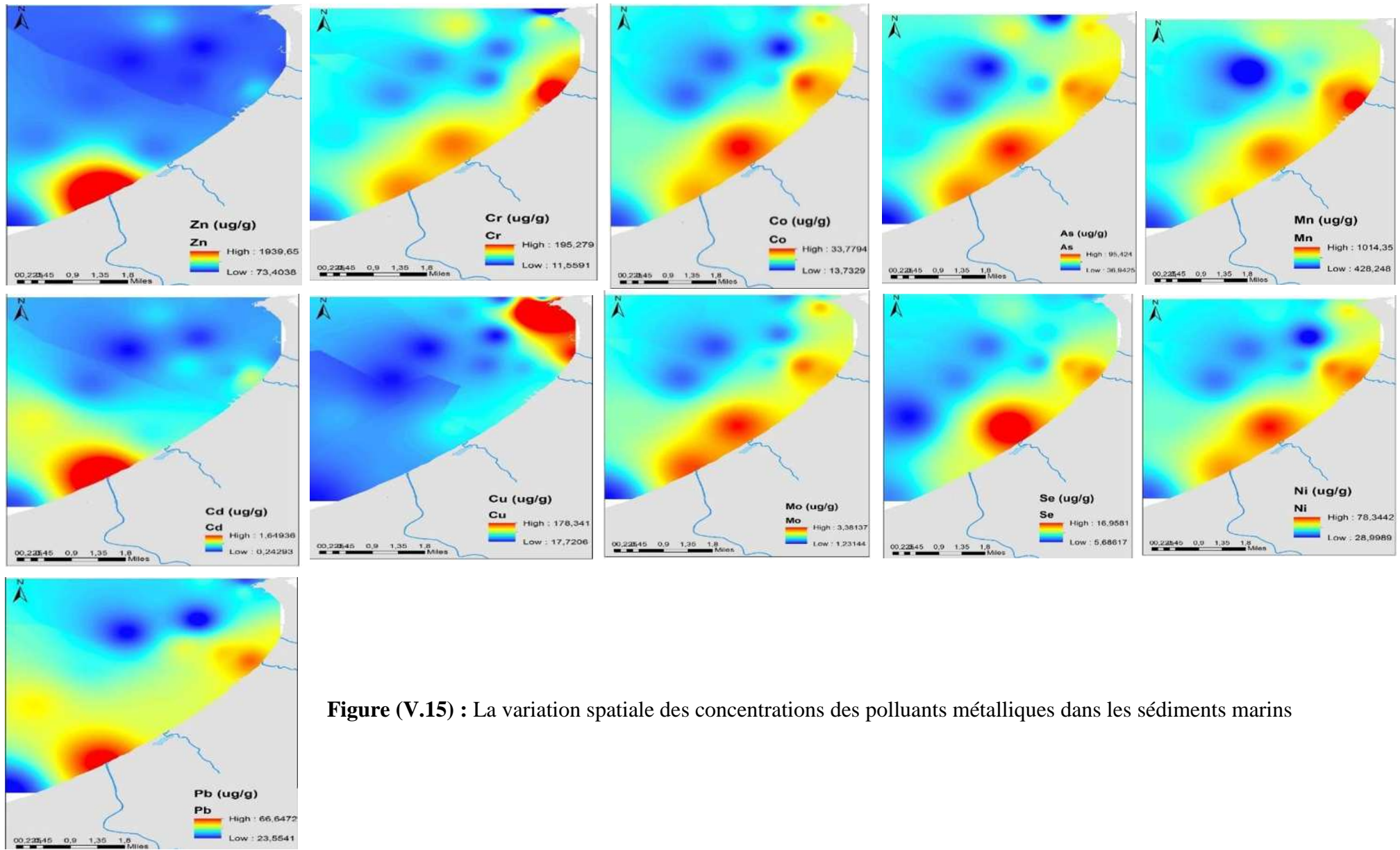


Figure (V.15) : La variation spatiale des concentrations des polluants métalliques dans les sédiments marins

V.3.3. Dynamique des polluants métalliques dans les sédiments marins

Dans les phénomènes de pollution des eaux et des sédiments par les métaux lourds, les interactions sédiments-cations métalliques jouent un rôle clé qui règle le comportement de ces métaux, leur distribution dans la phase, solide et leur transfert dans l'eau. Ces interactions font intervenir plusieurs types de phénomènes de surface ; précipitation (sous formes oxydées, réduites), co-précipitation et adsorption (par plusieurs mécanismes) sur des composés minéraux et organiques (SKGG et al., 1992).

Les processus d'échange des métaux lourds à l'interface eau-sédiments, en relation en particulier avec les équilibres d'adsorption et de désorption, sont fonction d'un certain nombre de paramètres de l'eau (température, pH, force ionique). ainsi une augmentation du pH favorise l'adsorption métallique sur la fraction réductible des sédiments. Ce qui signifie que la partie représentative des polluants métalliques est adsorbé sur les matières en suspension dans la colonne d'eau et sera accumulé dans les sédiments, ces polluants seront diffusés en fonction de l'hydrodynamique et par la dynamique sédimentaire, ces résultats ont été confirmés au fur et mesure dans notre travail. Les résultats présentés dans les figures (V.11, V.12, V.13, V.14 et V.15), montrent que la répartition spatiale des polluants métallique Figure(V.15), ressemble la répartition de champs de courant figures (V.11 et V.12) et de transport sédimentaire figures (V.13 et V.14), nous avons mets l'accensent sur les différents sources de pollution dans notre site afin de comprendre la dynamique des polluants charniers par ces sources. Dans la figure (V.11) nous remarquons que les courants induisant par le vent de secteurs ouest et nord-ouest charrient des polluants vers l'est de la baie là où nous observons des concentrations très élevées surtout en Cr, Cu, Co, As, Mn, Mo, Ni et Pb, en outre la dynamique sédimentaire est très intense dans la partie de Sidi Fredj et en face à l'embouchure de Oued Mazafran Figure V.13, ce qui explique probablement les teneurs très élevés de cuivre.

La grande partie des polluants métalliques dans les sédiments marins de Bou Ismail, transporté essentiellement dans la zone côtière, et ce transport est de direction Ouest et Nord-Ouest vers l'Est, car la baie de Bou Ismail est orienté vers le nord-ouest ce qui le met à l'exposition directe de la houle et de vent de secteur ouest et nord-ouest Figure V.14.

Conclusion et perspectives

La modélisation de transport sédimentaire et de l'hydrodynamique a montré que la répartition spatiale des métaux lourds a la même répartition de champs de courant et le champ de transport sédimentaire, ceci qui renforce notre hypothèse. Là où nous remarquons que la répartition des polluants pendant l'été, le printemps et l'automne suit les vents de secteurs Est de Nord-Est, qui transport les polluants vers l'ouest avec des fortes concentrations des polluants métalliques au niveau de oued Mazafran et oued Laghri, nous avons constaté aussi que les teneurs maximales se trouvent dans les zones qui sont caractérisées par une intensité de courant et de transport sédimentaire. Pendant l'hiver le vent dominant et de secteur ouest ce qui induit un transport vers l'est de la baie pour que les polluants soient distribués sur toutes la zone côtière de la partie ouest de la baie de Bou Ismail, avec des teneurs maximale de cuivre au niveau de la partie de Sidi fredj qui semble un site d'accumulation des polluants.

La modélisation des facteurs hydro-sédimentaire nous a aidés à comprendre d'une façon générale de la répartition spatio-temporelle des polluants métallique pour la fraction adsorbé sur les sédiments ceci d'une part d'autre part nous savons que les métaux ont d'autres caractéristiques ainsi que sa présence dans le milieu marin sous plusieurs formes dissoute, précipité, adsorbé ...etc. Ceci signifie que notre estimation elle n'est pas complète !, toujours elle reste une fraction que nous n'avons pas pu l'estimé pour plusieurs raison le manque de la donnée d'une part d'autre part le manque de matériel de terrain, ceci n'empêche pas à mettre en évidence cette nouvelles méthodes qui consiste à faire une modélisation environnementale en utilisant le module ECOLAB de logiciel DHI-Mike Zero.

ECOLAB c'est module qui contient des centaines de modèles dans le domaine de modélisation de la qualité des eaux, ce module combine plusieurs variables pour arriver à réaliser une modélisation 3-D de la dynamique des polluants. Ce module utilise 6 variable d'état figure (V.17), 16 constantes figure (V.18), 3 variable de forçage figure (V.19), 11 variables auxiliaires figure(V.20), et il prend en considération 15 processus réactionnel des métaux lourds figure(V.21), afin de générer de plus de 32 output figure(V.22), ce qui représente une quantité énormes des résultats que nous pouvons les utiliser pour l'évaluation de l'impact de pollution à court ou à long termes, mêmes faire des prévisions.

Ce mémoire est cloturé par la proposition d'une méthodologie de monitoring des écosystèmes marins avec une description des modèles obtenus en associant l'aspect de la diffusion des polluants en mer.

METHODOLOGIE D'ETUDE DES IMPACTS ET SURVEILLANCE DES POLLUANTS

La problématique développée dans ce mémoire nous a naturellement amener à proposer des solutions d'études et éclaircir l'aspect surveillance par rapport à une matrice complexe telle que le sédiment marin. Nous organisons cette partie en deux groupes d'études, l'un traitant de l'aspect environnemental et le second de l'aspect modélisation. L'organigramme suivant décrit schématiquement l'organisation des méthodes :

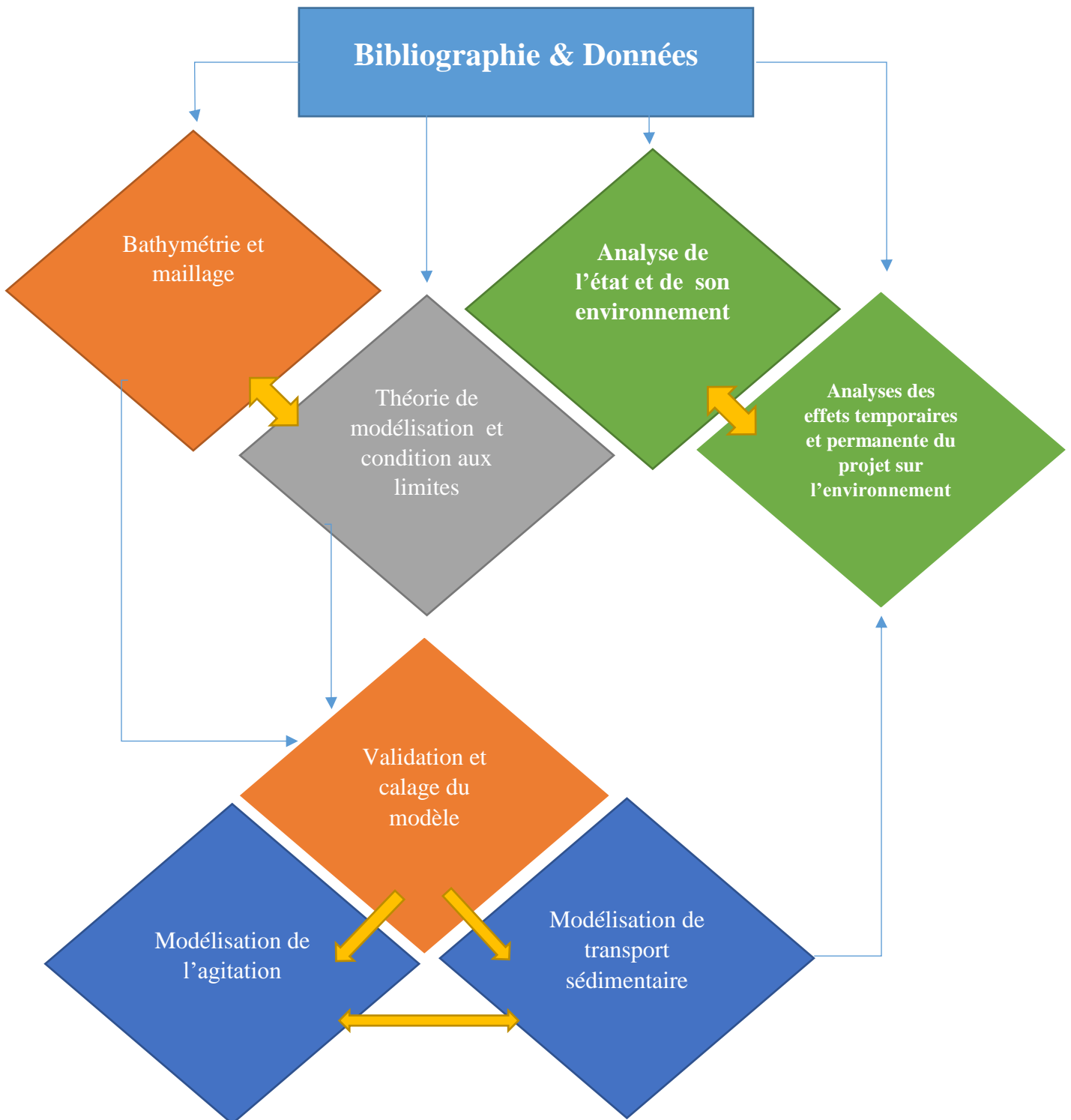


Figure (V.16) : Etapes d'étude d'impact de la diffusion de pollution

Modélisation de la dynamique hydro-sédimentaire et la diffusion des polluants

Les sédiments sont des composants essentiels de l'écosystème marin en assurant le développement de divers organismes aquatiques. Ces sédiments sont désormais en contact permanent avec les polluants engendrés principalement par les rejets industriels et la circulation des bateaux (Wenqiang et al., 2016). Les polluants piégés dans les sédiments peuvent migrer vers la faune, la flore et les individus, posant ainsi un grand danger écologique et environnemental (Gurumoorthi et al., 2017 ; Aouatif et al., 2015). Des sédiments pollués peuvent être définis comme étant un sol, des composés organiques ou des minéraux qui contiennent des matériaux toxiques ou dangereux à des concentrations qui risquent d'endommager la santé de l'homme, la faune, la flore, l'eau et l'air (Damien, 2012) . La surveillance ECOLab est une méthode numérique pour la modélisation écologique. C'est outil générique pour gérer les modèles d'écosystèmes et pour décrire la qualité des eaux et sédiments, l'eutrophisation, les métaux lourds et les processus d'écologie marine. (Guangming Z et al., 2017).

Le module est principalement utilisé pour modéliser la qualité de l'eau dans le cadre d'un impact environnemental Évaluation (EIA) de différentes activités humaines, mais l'outil est également appliqué pour la surveillance environnementale. Le besoin de descriptions d'écosystèmes sur mesure est important. La force de cet outil est la facilité de modification et de mise en œuvre des descriptions mathématiques des écosystèmes dans les moteurs hydrodynamiques de DHI. Le module peut décrire des substances dissoutes, des particules matière de matière morte ou vivante, d'organismes biologiques vivants et d'autres composants (tous appelés variables d'état dans ce contexte). Le module est développé pour décrire les processus chimiques, biologiques, écologiques, et les processus des interactions entre les variables d'état et les processus physique de sédimentation des composants.

Modélisation de la dynamique hydro-sédimentaire et la diffusion des polluants

❖ DESCRIPTION DE L'OUTIL :

Les processus sont des arguments dans les équations différentielles régissant l'état des variables d'état incluses dans les modèles ECO Lab.

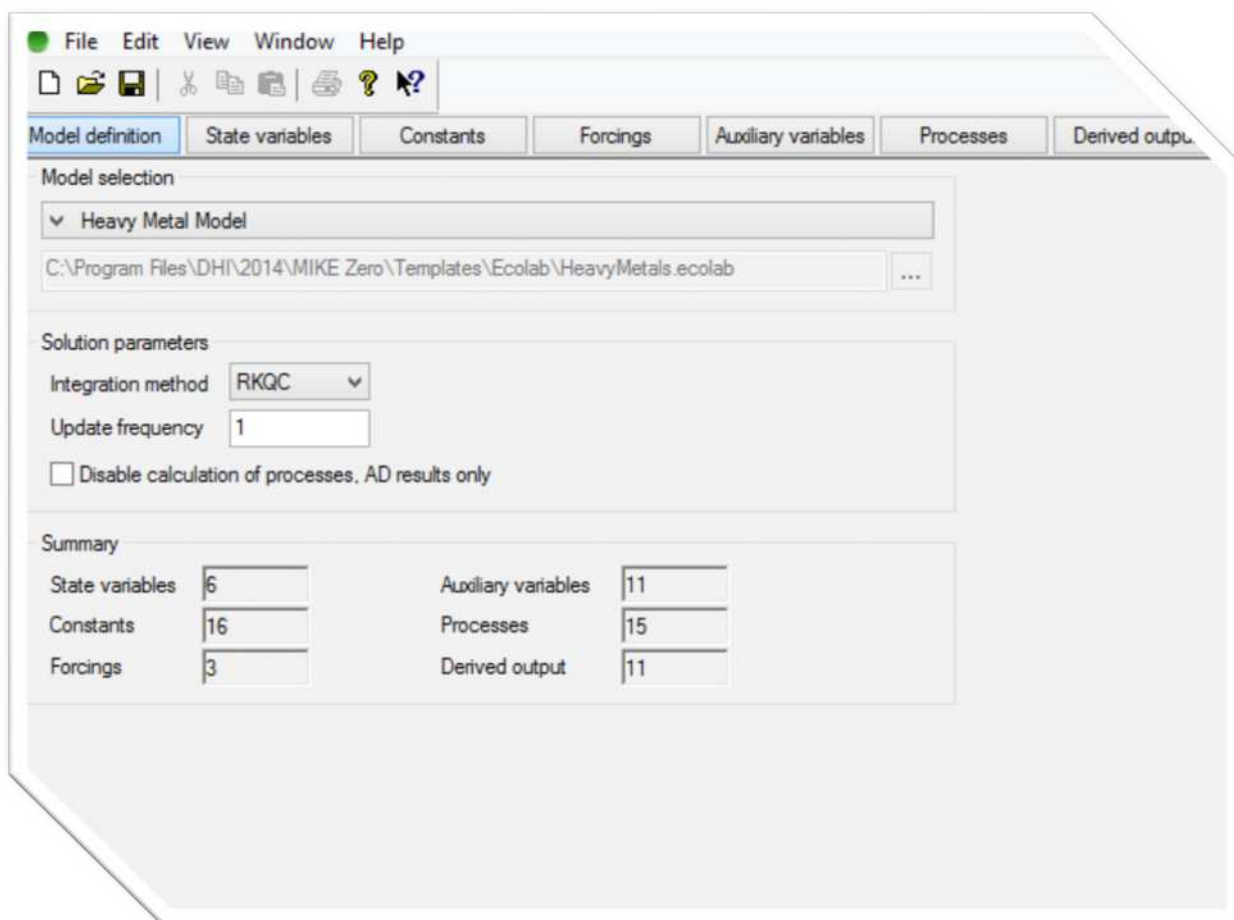


Figure (V.17) : Interface de Module ECOLAB

State Variables					
ID	Name	Description	Transport	Spatial variation	Unit
1	SHM	Dissolved Heavy Metal	AD	3D	mg/l
2	XHM	Adsorbed Heavy Metal	AD	3D	mg/l
3	SHMS	Dissolved Heavy Metal in sediment pore water		2D	g/m ²
4	XHMS	Adsorbed Heavy Metal in sediment		2D	g/m ²
5	XSS	Suspended solids	AD	3D	mg/l
6	XSED	Mass of sediment		2D	g/m ²

Figure (V.18) : Variables d'état intégrés dans logiciel avec le type de variation spatiale d'output

Modélisation de la dynamique hydro-sédimentaire et la diffusion des polluants

Model definition		State variables		Constants		Forcings		Auxiliary variables		Processes	
	Description	Unit	Value	Local							
1	Organic-carbon partitioning coefficient	l/kg	50000	Edit							
2	Desorption rate in water	per day	1								
3	Desorption rate in sediment	per day	0.1								
4	Fraction of organic carbon in suspended solids	dimensionless	0.1								
5	Fraction of organic carbon in sediment	dimensionless	0.2								
6	Thickness of water film	mm	0.1								
7	Ratio between thickness of diffusion layer in sed	dimensionless	0.2								
8	Factor for diffusion due to bioturbation etc.	dimensionless	1								
9	Moleweight of heavy metal	g/mole	92								
10	ECO Lab time step	Seconds	30								
11	Density of dry sediment	kg/m3 bulk	250								
12	Porosity of sediment	m3 H2O / m3 B	0.8								
13	Settling velocity of SS	m/day	0.1								
14	Resuspension rate	gDW/m2/day	1000								
15	Particle production rate	gDW/m2/day	1								
16	Critical current velocity for sediment resuspensi	m/s	1	Edit							

Figure (V.19) : Les différentes constantes utilisées par le module ECOLAB heavymetal

Model definition		State variables		Constants		Forcings		Auxiliary variables		Processes		Derived output	
	Description	Unit	TS Type	File / Value	TS Info								
1	Thickness of actual layer in computational grid	m	Constant	2									
2	Total water depth	m	Constant	8									
3	Current Speed	m/s	Constant	0.2									

Figure (V.20) : Les variables de forçages

Model definition		State variables		Constants		Forcings		Auxiliary variables		Processes		Derived output	
	Description	Select											
1	Diffusion coefficient water	<input type="checkbox"/>											
2	Grain density of sediment	<input type="checkbox"/>											
3	Sediment layer thickness	<input type="checkbox"/>											
4	Diffusion from sediment	<input type="checkbox"/>											
5	Current Speed adjusted for sediment build u	<input type="checkbox"/>											
6	Water fraction of bulk volume	<input type="checkbox"/>											
7	On-off switch for resuspension	<input type="checkbox"/>											
8	On-off switch for maximum SS in water	<input type="checkbox"/>											

Figure (V.21) : Les variables auxiliaires de ECOLab heavy metal

Modélisation de la dynamique hydro-sédimentaire et la diffusion des polluants

Model definition	State variables	Constants	Forcings	Auxiliary variables	Processes	Derived output
Description		Select				
1	Adsorption to suspended solids in water column per volume	<input type="checkbox"/>				
2	Adsorption to sediment per area	<input type="checkbox"/>				
3	Desorption from suspended solids in water column per volume	<input type="checkbox"/>				
4	Desorption from sediment per area	<input type="checkbox"/>				
5	Production of SS in surface layer per volume	<input type="checkbox"/>				
6	Sedimentation of adsorbed heavy metal per area	<input type="checkbox"/>				
7	Sedimentation of adsorbed heavy metal per volume	<input type="checkbox"/>				
8	Sedimentation of SS per area	<input type="checkbox"/>				
9	Sedimentation of SS per volume	<input type="checkbox"/>				
10	Resuspension of SS per area	<input type="checkbox"/>				
11	Resuspension of SS per volume	<input type="checkbox"/>				
12	Resuspension of adsorped heavy metal per area	<input type="checkbox"/>				
13	Resuspension of adsorped heavy metal per volume	<input type="checkbox"/>				
14	Diffusion to water column from sediment per volume	<input type="checkbox"/>				

Figure (V.22) : Les différents processus réactionnels intégré dans ECOLab

No	Variable	Include	Write	Handle data
1	Dissolved Heavy Metal	<input checked="" type="checkbox"/>	Current value	Default
2	Adsorbed Heavy Metal	<input checked="" type="checkbox"/>	Current value	Default
3	Dissolved Heavy Metal in sediment pore water	<input checked="" type="checkbox"/>	Current value	Default
4	Adsorbed Heavy Metal in sediment	<input checked="" type="checkbox"/>	Current value	Default
5	Suspended solids	<input checked="" type="checkbox"/>	Current value	Default
6	Mass of sediment	<input checked="" type="checkbox"/>	Current value	Default
7	Diffusion coefficient water	<input type="checkbox"/>	Current value	Default
8	Grain density of sediment	<input type="checkbox"/>	Current value	Default
9	Sediment layer thickness	<input type="checkbox"/>	Current value	Default
10	Diffusion from sediment	<input type="checkbox"/>	Current value	Default
11	Current Speed adjusted for sediment build up	<input type="checkbox"/>	Current value	Default
12	Water fraction of bulk volume	<input type="checkbox"/>	Current value	Default
13	On-off switch for resuspension	<input type="checkbox"/>	Current value	Default
14	On-off switch for maximum SS in water	<input type="checkbox"/>	Current value	Default
15	Adsorption to suspended solids in water column per volume	<input type="checkbox"/>	Current value	Default
16	Adsorption to sediment per area	<input type="checkbox"/>	Current value	Default
17	Desorption from suspended solids in water column per volu	<input type="checkbox"/>	Current value	Default
18	Desorption from sediment per area	<input type="checkbox"/>	Current value	Default
19	Production of SS in surface layer per volume	<input type="checkbox"/>	Current value	Default
20	Sedimentation of adsorbed heavy metal per area	<input type="checkbox"/>	Current value	Default
21	Sedimentation of adsorbed heavy metal per volume	<input type="checkbox"/>	Current value	Default
22	Sedimentation of SS per area	<input type="checkbox"/>	Current value	Default
23	Sedimentation of SS per volume	<input type="checkbox"/>	Current value	Default
24	Resuspension of SS per area	<input type="checkbox"/>	Current value	Default
25	Resuspension of SS per volume	<input type="checkbox"/>	Current value	Default
26	Resuspension of adsorped heavy metal per area	<input type="checkbox"/>	Current value	Default
27	Resuspension of adsorped heavy metal per volume	<input type="checkbox"/>	Current value	Default
28	Diffusion to water column from sediment per volume	<input type="checkbox"/>	Current value	Default
29	Tot ME water 3	<input type="checkbox"/>	Current value	Default
30	Tot ME water 2	<input type="checkbox"/>	Current value	Default
31	Tot ME sediment	<input type="checkbox"/>	Current value	Default
32	Total ME water+sediment	<input type="checkbox"/>	Current value	Default

Figure(V.23) : Les différents outputs générés par le module ECOLab

Modélisation de la dynamique hydro-sédimentaire et la diffusion des polluants

Le sédiment est une matrice qui constitue un compartiment dynamique et essentiel dans les écosystèmes aquatiques. Il joue un rôle important pour de nombreux animaux et végétaux en tant qu'habitat ou site de ponte. Cependant,

- il présente la caractéristique d'adsorber des polluants, pouvant être toxiques pour les organismes, et agissant alors comme un réservoir et une source secondaire de contamination à long-terme.
- Sa surveillance est donc nécessaire pour protéger l'intégrité écologique des écosystèmes aquatiques.

Ce mémoire est réalisé dans le cadre du développement des méthodes de gestion et surveillance du milieu marin et littoral.



Bibliographie

A

-
- ▶ **Abbasse, G. (2008).** La spéciation métallique : son importance et ses différentes méthodes de détermination. *Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies - Basic Sciences*. Vol. 30, n° 4, pp. 215-225.
 - ▶ **Aissani, A. (2015).** Mise en place des performances de l'équipement de l'ICP- MS sur des échantillons de sédiments. Document non publié. Boumerdès (Algérie) : CRD-SONATRACH.
 - ▶ **Abollino, O. et al. (2000).** The retention of metal species by different solid sorbents mechanisms for heavy metal speciation by sequential three column uptake. *Anal Chim Acta*, Vol. 411, pp. 223-238.
 - ▶ **Amal, S. et al. (2001).** Evaluation de la contamination métallique des sédiments du complexe zones humides de la ville de Mohammedia (Maroc) *Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, section Science de la Vie*, n° 23, pp. 77-81
 - ▶ **Antonio, C., Quimica, A. (2003).** Surveillance des métaux lourds dans les sédiments marins superficiels de l'anse potter, De Mayo (Shetland Du Sud), Antarctique. 2nd International Symposium on Contaminated Sediments.
 - ▶ **Aminot., Chaussepied. (1983).** Manuel des analyses chimiques en milieu marin. Paris : CNEXO. pp. 53-169.
 - ▶ **Anna, K. et al. (2016).** A practical approach to non- spectral interferences elimination in inductively coupled plasma optical emission spectrometry Vol. 70, n° 6, pp. 669-868.
 - ▶ **Aouatif, F., Abdelhafid, C. (2015).** Contribution à l'étude de la bioaccumulation métallique dans les sédiments et les organismes aquatiques du littoral de saidia, *EuropeanScientific Journal*. Vol.11, n° 21 pp1857- 7431.
 - ▶ **Apte, S. et Batley, G. (1995).** Trace metal modelling of labile chemical species in natural waters: Non-Electrochemical approaches. In: « Metal Speciation and Bioavailability in Aquatic Systems ». pp. 259-306.
 - ▶ **Aurelie, D. (2004).** Caractérisation des risques induits par les activités agricoles sur les écosystèmes aquatiques. Thèse de doctorat. Génie rurale. Montpellier : Ecole nationale du génie rural, des eaux et des forêts Montpellier, 269 p.

B

-
- ▶ **Bachouche, S. (2017).** Modélisation hydrodynamique et qualité des eaux et sédiments de la côte centre algérienne. Thèse de Doctorat. Pollution et environnement marin. Alger: ENSSMAL, 234 p.
 - ▶ **Bachouche, S. (2010).** Les ports d'Alger et de Bouharoun : Etude des paramètres, granulométriques, biologiques et de pollution dans les sédiments et l'eau en vue d'une opération de dragage. Thèse de Magister. Pollution et environnement marin. Alger: ENSSMAL, 182 p.
 - ▶ **Book, R. (2014).** Métaux toxiques - Métaux essentiels. Vol. 13, pp. 153-156.
 - ▶ **Baoqing, S. (2016).** Heavy metals in surface sediments of the shallow lakes in eastern China: their relations with environmental factors and anthropogenic activities. Environmental Science and Pollution Research. Vol. 23, n° 24, pp. 25364–25373.
 - ▶ **Babu, K. et al. (2003).** Modeling of sediment transport along Mangalore coast using MIKE-21.Chennai. India. 301–312 p.
 - ▶ **Benetto, D. et al. (1997).** Spectrometriques d'analyse, Distribution. pp. 1–49.
 - ▶ **Buffle, J. (1988).** Complexation Reactions in Aquatic Systems An Analytical Approach. Chickester Horwood. Vol. 25, n°12, pp. 25-29.
 - ▶ **Bliefert, C., Perraud, R. (2011).** Chimie de l'environnement : air, eau, sol, déchets.Bruxelle : De Boeck. 465 p.
 - ▶ **Bolin, B., Cook, R. (1983).** *The major biogeochemical cycles and their interactions*. Chichester. Published on behalf of the Scientific Committee on Problems of the Environment (SCOPE) of the International Council of Scientific Unions (ICSU). Wiley. 532 p.
 - ▶ **Bouras, F. (2012).** Approche géochimique d'un hydrosystème côtier Algérois. Thèse de Doctorat. Géologie marine. Alger: USTHB, 174 p.
 - ▶ **Ben-Tahar, V. (2008).** Bioaccumulation de quelques métaux lourds (Zn, Fe, Cu, Pb, Cd) chez la petite praire au niveau de l'Embouchure de la Moulouya Maroc Nord Oriental, ScienceLib Editions Mersenne, Vol 3, n° 111212, 12 p.
 - ▶ **Bruland, K. W., Lohan, M. C. (2003).** Controls of trace metals in seawater. In: Turekian, K.K. and Holland, H.D. eds., Treatise on Geochemistry, Holland : Elsevier Ltd, pp. 23–47.
 - ▶ **Buggy, C. J., Tobin, J. M. (2008).** Seasonal and spatial distribution of metals in surface sediment of an urban estuary. Environnement Pollution. Vol. 155, pp. 308-319.
 - ▶ **Bonefille, R. (1976).** Cours d'hydraulique maritime. Edition n° 1. Nancy : Institut des Spécialités Industrielles. 187 p.

C

-
- ▶ **Cartier, A. C. (2011).** Evaluation des flux sédimentaires sur le littoral du Nord-Pas-de-Calais: Vers une meilleure compréhension de la morphodynamique des plages macrotidales. Thèse de Doctorat. GEPO (Géosciences, Ecologie, Paléontologie, océanographie). Calais : Université du Littoral Côte d'Opale. 283 p.
 - ▶ **Chamley, H. (2000).** Bases de la sédimentologie. Paris : Dunod. 178 p.
 - ▶ **Chavance, P., Girardin, M. (1986).** Niveaux d'exploitation en 1982 et potentialités régionales de la pêche chalutière algérienne : application d'un modèle de production composite. Archives du CNROP n° 20. 134 p.
 - ▶ **Cheikh, D. et al. (2012).** Étude de la contamination par les éléments traces métalliques des sédiments côtiers au niveau des points d'évacuation des eaux usées à Dakar (Sénégal). Sciences de l'eau. Vol. 25, n° 3, pp. 277–285.
 - ▶ **Christophe, R. (1993).** Applications du couplage Torche à Plasma / Spectrométrie de Masse. Thèse de Doctorat. Chimie et microbiologie de l'eau. France : Université de Nancy I. 192 p.
 - ▶ **Clozel, B. et al. (2003).** Valeurs guides intervenant dans la gestion des sédiments et méthodologie d'élaboration de ces valeurs. N° 052/01. 424 p.
 - ▶ **Cook, A. et al. (1990).** Evaluation de la contamination en métaux lourds des sédiments. Water Air Soil Poll. Vol. 6, n°11, pp. 43- 54.
 - ▶ **Charlou, J., Joanny, M. (1983).** Dosage du mercure et d'autres métaux (Pb, Zn, Cu, Cd, Co, Mn) dans les sédiments marins par absorption atomique. Manuel des analyses chimiques en milieu marin. CNEXO. Brest. pp. 285-295.
 - ▶ **CEAEQ. (2015).** Protocole pour la validation d'une méthode d'analyse en chimie. Québec. Edition 6 mars 2015. 29 p.

D

-
- ▶ **Dabrowski, Z. A. (2001).** Adsorption - from theory to practice" Advances in Colloids and Interface. Science. Vol. 93, pp. 135-224.
 - ▶ **Dang, H. (2014).** Dynamique sédimentaire et mécanismes de transferts des métaux / métalloïdes dans un écosystème contaminé : la Rade de Toulon. Thèse de Doctorat Chimie de l'Environnement. l'Université de Toulon. 272 p.

- ▶ **Damien, G. (2012).** Modélisation des activités humaines en mer côtière. Thèse de Doctorat. l'Institut européen de la mer. Laboratoire Géomer. 309 p.
- ▶ **Deniseger, J. et al. (1990).** The effects of decreasing heavy metal concentration on the biota of Butle Lake. Water Res. Vol. 24, pp. 403-416.
- ▶ **Diop, C. (2014).** Etude de la contamination, de la spéciation et de la disponibilité des éléments traces métalliques dans les eaux et sédiments côtiers et estuariens au sénégal : Evaluation de la toxicité potentielle. Thèse de Doctorat. Exotoxicologie. Lille : Université de Lille. 240 p.

E

- ▶ **Elbaz-Poulichet, F. (2005).** River inputs of metals and arsenic. In: Saliot, A. ed., The Mediterranean Sea, Springer Berlin Heidelberg, pp. 211–235
- ▶ **El-Morjani, Z. (2003).** Conception d'un système d'information à référence spatiale pour la gestion environnementale : application à la sélection de sites potentiels de stockage de déchets ménagers et industriels en région semi-aride (Souss, maroc). Thèse de doctorat. Sciences de l'environnement. Genève : Faculté des sciences de l'université de Genève. 3370. 283 p.

F

- ▶ **Fichez, R. et al. (2008).** Origine, transport et devenir des apports naturels et anthropiques dans le lagon sud-ouest de Nouvelle- Calédonie. Journal de la Société des Océanistes Spécial environnement dans le Pacifique. Vol. 126-127, pp. 41-58.
- ▶ **Flemming, C., Trevors, T. (1989).** Copper toxicity and chemistry in the environment: A review. Water Air and Soil Pollution. Vol. 44, pp. 143-158.

G

- ▶ **Grimes, S. et al. (2004.).** Biodiversité marine et littorale algérienne. Oran: Université d'Es Senia. 362 p.
- ▶ **Gerard, M. (2000).** Les effets des éléments traces métalliques sur l'environnement et la santé. Rapport n° 100-261. 365 p.
- ▶ **Géode, (2012).** Suivis environnementaux des opérations de dragage et d'immersion Guide méthodologique. 133 p.

- ▶ **Guangming, Z. (2017).** Surface sediment properties and heavy metal pollution assessment in the Pearl River Estuary, China. *Environmental Science and Pollution Research*. Vol. 24, n° 3, pp. 2966–2979.
- ▶ **Gueguen, C. (2001).** Le rôle des colloïdes dans la répartition des métaux trace en milieu aquatiques contrastés. Thèse de doctorat, Sciences, Interdisciplinaire, Université de Genève. 293p.
- ▶ **Gurumoorthi, R., Venkatachala, P. (2017).** Hydrodynamic modeling along the southern tip of India: A special emphasis on Kanyakumari coast. *Journal of Ocean Engineering and Science*. Vol. 29, n°2, pp. 347-357.
- ▶ **Gregory, T. et al. (1997).** Heavy metal contamination in sediment from crane creek, florida. *Florida Scientist*. Vol. 60, N°2, pp. 81–88.
- ▶ **Gray, A. L. (1986).** Mass spectrometry with an inductively coupled plasma as an ion source: the influence on ultratrace analysis of background and matrix response. *Spectrochim. Acta*. N° 41B, pp. 151-167.

H

- ▶ **Hakanson, L. (1980).** An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach. *Water research*. N° 14, pp. 975-1001.
- ▶ **Hayter, (1980).** Trace elements: implications for nursing. *Journal of advanced nursing*. N° 5(1), pp. 91-101.
- ▶ **Hofmann, A. W. (1988).** Chemical differentiation of the Earth: the relationship between mantle, continental crust, and oceanic crust. *Earth and Planetary Science Letters*. N° 90, pp. 297-314.
- ▶ **Houma, F. (2009).** Modélisation et cartographie de la pollution marine et de la bathymétrie à partir de l'imagerie satellitaire. Thèse de doctorat. Sciences de l'Univers et Environnement. Paris : Université du Val de Marne Paris XII. 236 p.

I

- ▶ **ISO, (1996).** Qualité des sols sédiments : mise en solution totale par attaque acide. NF X 31 -146.

J

- ▶ **Jambon, T. A. (2009).** Géochimie : géodynamique et cycles. Paris : Dunod. 399p.
- ▶ **Joel, M., Thierry, C. (1990).** La qualité de l'eau. *La recherche*. Vol. 29, n° 221, pp. 598-606.

- ▶ **James, T. et al. (2018).** A comprehensive sediment dynamics study of a major mud belt system on the inner shelf along an energetic coast. *Scientific Reports*. n°8, 24p.
- ▶ **Jansen, P. H. et al. (1979).** *Principles of river engineering*. Pitman publisher. Vol. 2, n°12, pp. 17-25.

K

- ▶ **Khan, M. A. et al. (2003).** Monitoring of Concentrations of Heavy Metals in Water, Sediment and Fish in the River Ganga, India.” *Sediment Quality Assessment and Management: Insight and Progress*, edited by MohiuddinMunawar, Michigan State University Press, pp. 157–166.
- ▶ **Kükrer, S. et al. (2014).** Ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments of northern littoral zone of Lake Çıldır, Ardahan, Turkey. *Environ Monit Assess*. Vol, 186, pp. 3847-3857.

L

- ▶ **Larid, M. (1992).** *Cours d'aménagement du littoral I*. 2^{ème} édition. ISMAL, 34 p.
- ▶ **Leclaire, L. (1972).** *La sédimentation holocène sur le versant méridional du Bassin Algéro-Baléares (Précontinent algérien)*. Paris : Muséum national d'Histoire naturelle. 391 p.

M

- ▶ **Miquel, G. (2001).** Les effets des éléments traces métalliques sur l'environnement et la santé. Rapport parlementaire, n° 2979 / n° 261, Paris, Assemblée Nationale / Sénat, Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques.
- ▶ **Messaoud, N. et al. (2006).** Problématiques de pollution des eaux. Aspects méthodologiques et législatifs. Cas des eaux de surface de la plaine du Mazafran (Mitidja- Algérie). N° 5101, pp. 89-97.
- ▶ **Mohiuddin, M. (2003).** *Sediment Quality Assessment and Management : Insight and Progress*. Aquatic Ecosystem Health & Mgmt Soc. 361 p.
- ▶ **Müller, G. (1981).** Die Schwermetallbelastung der sedimente des Neckars und seiner Nebenflüsse: eine Bestandsaufnahme. *Chemical Zeitung*. N°105, pp. 157– 164.
- ▶ **Müller, G. (1969).** Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River. *Geojournal*. N° 2, pp. 109-118.

- ▶ **Murphy, T. P. et al. (2003).** Eutrophication Control by Sediment Treatment: Common Assumptions and Misconceptions.” Sediment Quality Assessment and Management: Insight and Progress, edited by MohiuddinMunawar, Michigan State University Press. 59–78 p.

N

-
- ▶ **Nemr, A Khaled, A et Sikaily, A (2006).** Distribution and Statistical Analysis of Leachable and Total Heavy Metals in the Sediments of the Suez Gulf. Environ Monit Assess. Vol. 118, pp. 89-112.
 - ▶ **Naught, A et Wilkinson, A (1997).** Compendium Of Chemical Terminology. Blackwell Scientific Publications. Oxford

O

-
- ▶ **Octorat, T., Du, D. (2014).** Dynamique sédimentaire en zone côtière dans le cas de sédiments hétérogènes : application au domaine côtier haut-normand. Thèse de doctorat en Mécanique des fluides. Université du Havre
 - ▶ **Oursel, B. et al. (2013).** Dynamics and fates of trace metals chronically input in a Mediterranean coastal zone impacted by a large urban area. Mar. Pollut. Bull. Vol. 69, pp. 137–49.

P

-
- ▶ **Paucot, H., Potin-Gautier, M. (2010).** ICP-MS : couplage plasma induit par haute fréquence – spectrométrie de masse. In : Burgot G, Durand G, Le Parlouër P. Spectrométries des rayonnements électromagnétiques. Paris : Techniques de l’Ingénieur. Vol. 71, n°3, pp. 269-28.
 - ▶ **Pekey, H. (2006).** Heavy metal pollution assessment in sediments of the Izmit Bay, Turkey. Environ Monit Assess. Vol 123, pp. 219-231.
 - ▶ **Peycru, P. (2008).** Géologie tout-en-un BCPST - 1re et 2e années. Paris : Dundo. 635 p.

R

-
- ▶ **Ramade, F. (2007).** Introduction à l’écotoxicologie. Paris : Lavoisier .978-2- 7430-0944-1. 332 p.

- ▶ **Rigaud, S. (2011).** Dynamique et biodisponibilité des ETM dans les sédiments de l'étang de Berre. Thèse de doctorat. Écotoxicologie. Marseille : Université Paul Cézanne, Aix- Marseille III. 201 p.
- ▶ **Rogers, C. (2003).** Interpolation des températures moyennes mensuelles en France métropolitaine avec l'extension Geostatistical Analyst d'ArcGis 8. Actes de la conférence Francophone ESRI. 25 p.
- ▶ **Rosin, C. et al. (1991).** L'ICP/MS : une technique analytique performante pour le dosage des micropolluants minéraux dans l'eau. *Analusis*. Vol, 12, pp. 31- 33.
- ▶ **Rubio, B. et al. (2000).** Geochemistry of major and trace elements in sediments of the Ría de Vigo (NW Spain): An assessment of metal pollution. *Marine Pollution Bulletin*. Vol, 40, pp. 968-980.
- ▶ **Rouquerol, F. et al. (2014).** Adsorption by powders and porous solids: principles, methodology and applications. Marseille : Academic Press. 455 p.
- ▶ **Rodier, et al. (2009).** L'analyse de l'eau. Paris : Dunod. 555-557 p.

S

- ▶ **Sahli, L. et al. (2014).** Utilisation D'Indices Pour L'Evaluation De La Qualite Des Sediments : Cas Du Bassin Boumerzoug (Algerie)', *EuropeanScientific Journal*. Vol, 10, n°35, pp336–346.
- ▶ **Suresh, G. et al. (2011).** Influence of mineralogical and heavy metal composition on natural radionuclide concentrations in the river sediments. *Applied Radiation and Isotopes*. Vol, 69, pp. 1466-1474.
- ▶ **Seppelt, R., Voinov, A. (2002).** Optimization methodology for land use patterns using spatially explicit landscape models. *Ecological Modelling*, Vol 151, pp. 125-142
- ▶ **Seppelt, R. (2007).** Computer-Based Environmental Management. John Wiley & Sons, 300 p.
- ▶ **Shaker, C., Ashoor, A. (2017).** Impact des éléments trace métalliques sur le milieu et apport de la cytométrie en flux dans l'étude du fonctionnement des lagunes de la décharge d'Etueffont (Territoire de Belfort, France). Thèse de doctorat. Sciences de l'environnement. France : Université de franche-comté. 261 p.
- ▶ **Sin, S. N. et al. (2001).** Assesment of heavy metal cations in sediments of Shing Mun River, Hong Kong. *Environment. International*. Vol. 26, pp. 297–301.
- ▶ **Singh, M. et al. (2002).** Heavy Metals in freshly deposited stream sediments of rivers associated with urbanisation of the Ganga Plain. *India. Water Air and Soil Pollution*. Vol. 141, pp. 35-54.

- ▶ **Soto-Jiménez, M., Páez-Osuna, F. (2001).** Distribution and normalization of heavy metal concentrations in mangrove and lagoonal sediments from Mazatlan Harbor (SE Gulf of California). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. Vol. 53, pp. 259-274.
- ▶ **Stumm, W., Morgan, J. (1996).** *Aquatic Chemistry, Chemical Equilibria and Rates in Natural Waters* Third Ed. New York. John Wiley and Sons. 1022 p.
- ▶ **Sun, L. et al. (2016).** Adsorption - Aspects théoriques et techniques de l'ingénieur. Vol. 2, 265 p.
- ▶ **Smaoui, H. (1996).** Modélisation numérique tridimensionnelle de l'hydrodynamique et des transports sédimentaires en Manche Orientale et dans le sud de la Mer du Nord, thèse de doctorat de l'Université des Sciences et Technologies de Lille, France. 223 p.

T

- ▶ **Talidi, A. (2006).** Etude de l'élimination du chrome et du bleu de méthylène en milieux aqueux par adsorption sur la pyrophyllite traitée et non traitée. Thèse de doctorat. Chimie analytique. Maroc : Université Mohammed V-Agdal Rabat, 141 p.
- ▶ **Tessier, E (2012).** Diagnostic de la contamination sédimentaire par les métaux/métalloïdes dans la Rade de Toulon et mécanismes contrôlant leur mobilité. Thèse de doctorat. Sciences de l'environnement. Marseille : Université Aix-Marseille. 205 p.
- ▶ **Tomlinson, R. et al. (2009).** Hydrodynamic, Water Quality and Sediment Transport Modeling of Estuarine and Coastal Waters on the Gold Coast Australia. *Journal of Coastal Research* .Special. Vol. 2, n°56, pp. 937-941.
- ▶ **Tillard, M. (2016).** La technique ICP-MS couplage torche plasma et spectromètre de masse Inductively coupled plasma. 120 p.
- ▶ **Tomlinson, D. et al. (1980).** Problems in the assessment of heavy-metal levels in estuaries and the formation of a pollution index. *Helgoländer Meeresuntersuchungen*. Vol 33, pp. 566-575.
- ▶ **Torri, S. et al. (2008).** Zinc distribution in soils amended with different kinds of sewage sludge. *Journal of Environmental Management*. Vol, 88, pp. 1571- 1579.
- ▶ **Trassy, C., Mermet, J. (1984).** Les applications analytiques des plasmas HF. *Technique et Documentation- Lavoisier*, Paris, 327 p.
- ▶ **Turner, D. (1984).** Relationship between biological availability and chemical measurements. In: « Metal ions in biological systems ». Sigel H. Ed. New York, Marcel Dekker. 137 p.

U

- ▶ **Uursma, E., Carroll, J. E. (1996).** Environmental Compartments - Equilibria and assessment of Processes between Air, Water, Sediment and Biota. Berlin : Springer-Verlag. 277 p.

W

- ▶ **Wenqiang, Z. et al. (2005).** Dynamique de transfert du cadmium et du zinc au sein des dépôts de sédiments de curage végétalisés. Thèse de doctorat. Génie civil. France : Institut National Polytechnique de Lorraine, 182 p.

Z

- ▶ **Zhaokai, X. et al. (2008).** Geochemical character and material source of sediments in the eastern Philippine Sea. Chinese Science Bulletin, Springer, Vol. 53, n° 6, pp. 923–931.

Annexes

Annexe I : Résultat de la matière sèche et perte au feu à 550 °C

Annexe II : Préparation des solutions étalons

Annexe III : Courbes d'étalonnages

Annexe IV : Elaboration d'une mesh de la bathymétrie

Annexe V : Elaboration d'une table des vents

Annexe VI : Elaboration d'une table sédimentaire

ANNEXES

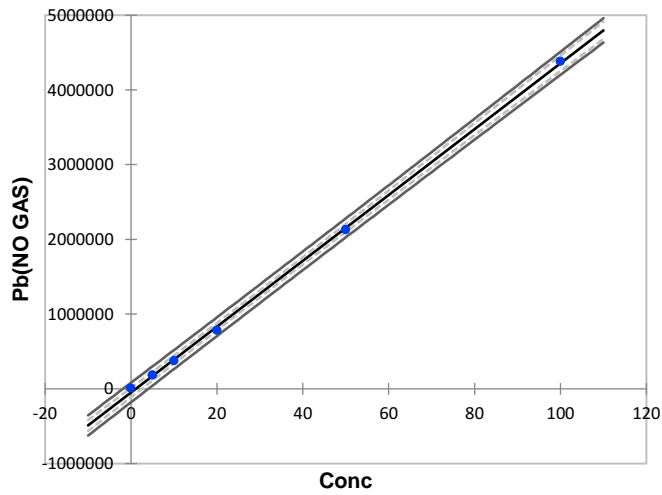
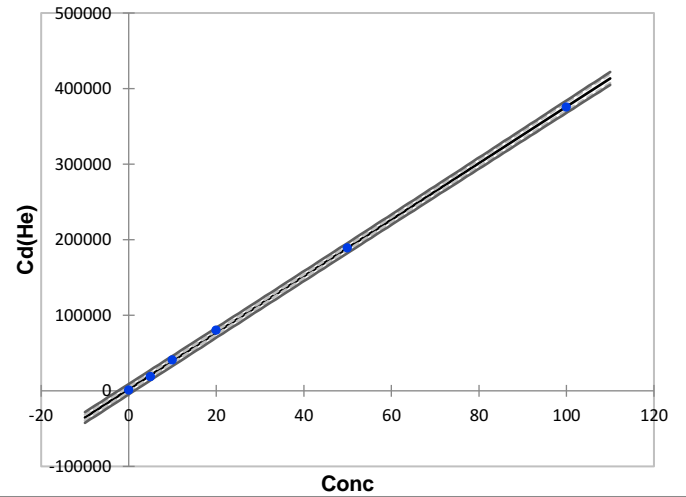
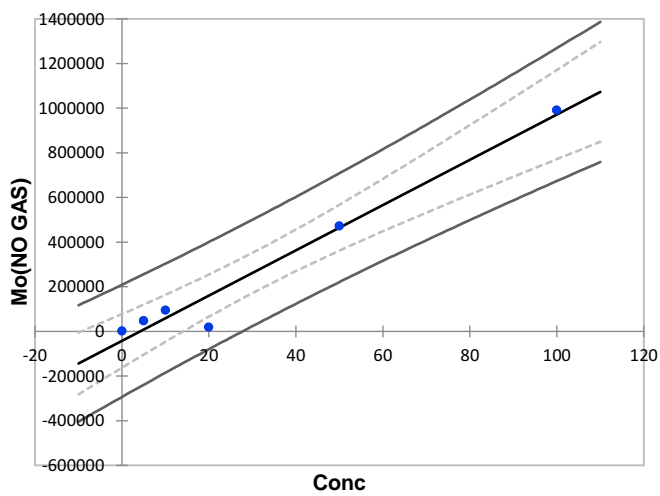
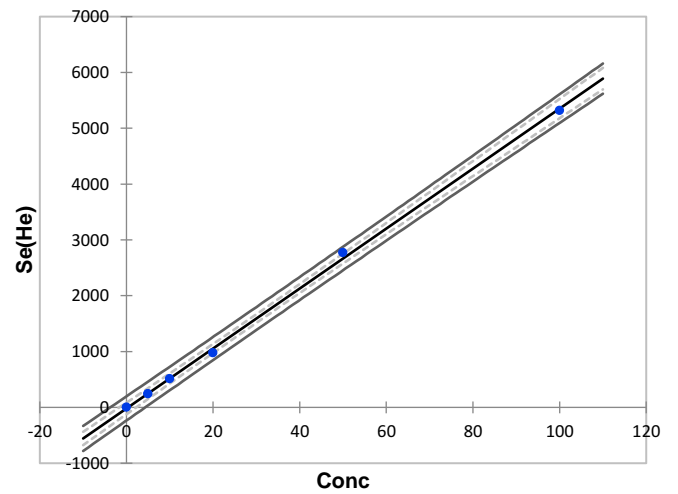
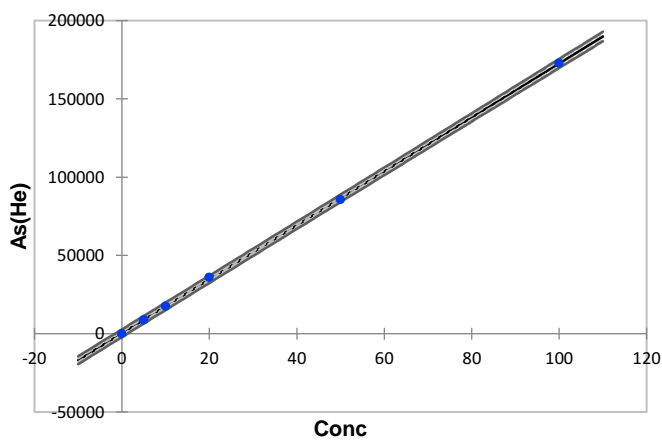
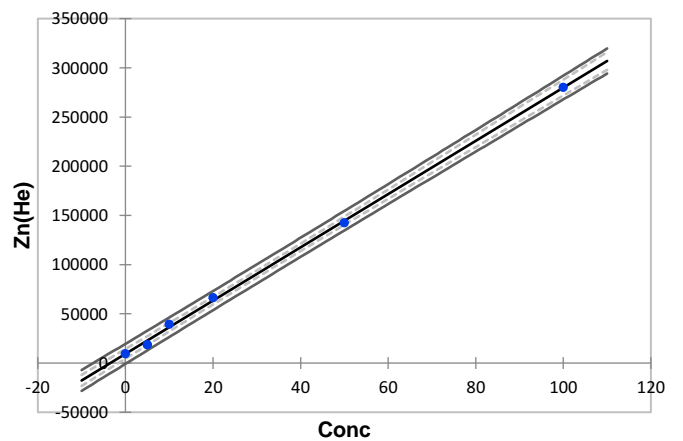
Annexe I : Résultat de la matière sèche et perte au feu à 550 °C

Élément	AGLAE 17M9.1		AGLAE 17M9.2		m_{lab}	$m.$	$S_{R-inter}$	Z-SCORE
	Rép 1	Rép 2	Rép 1	Rép 2				
Matière sèche %	99.93 2	99.945	99.900	99.909	99.92	99.880	0.067	0.4461
Perte au feu à 550 °C	0.700 2	0.7009	0.7103	0.6996	0.70275	0.696	0.119	0.0909

Annexe II : Préparation des solutions étalons pour l'ICP-MS

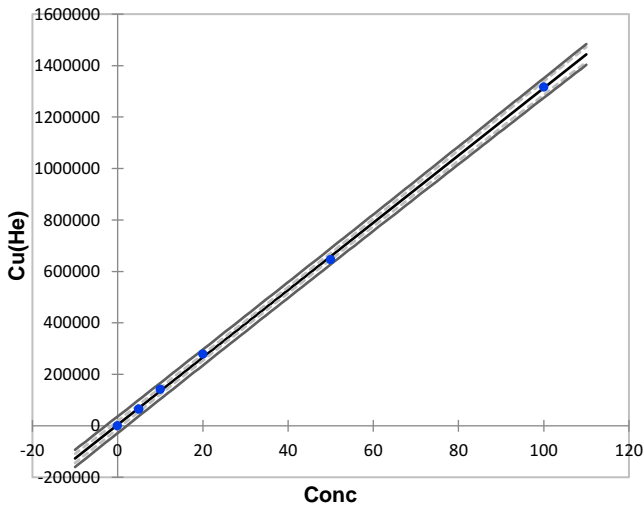
	Standard 1		Standard 2		Standard 3		Standard 4		Standard 5	
Élément	A partir de solution intermédiaire de 100ppb				A partir de solution mère de 10000 ppb					
	Conc (ppb)	Vol (µl)	Conc (ppb)	Vol (µl)	Conc (ppb)	Vol (µl)	Conc (ppb)	Vol (µl)	Conc (ppb)	Vol (µl)
Al, As, Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, Zn, Hg	1.0	500	2	1000	5.0	25	10	50	20	100
A partir de solution mère de 10000 ppb										
Al et Zn	10.0	50.0	20.0	100.0	50.0	250.0	100.0	500.0	200.0	1000.0

Annexe III : Courbes d'étalonnages

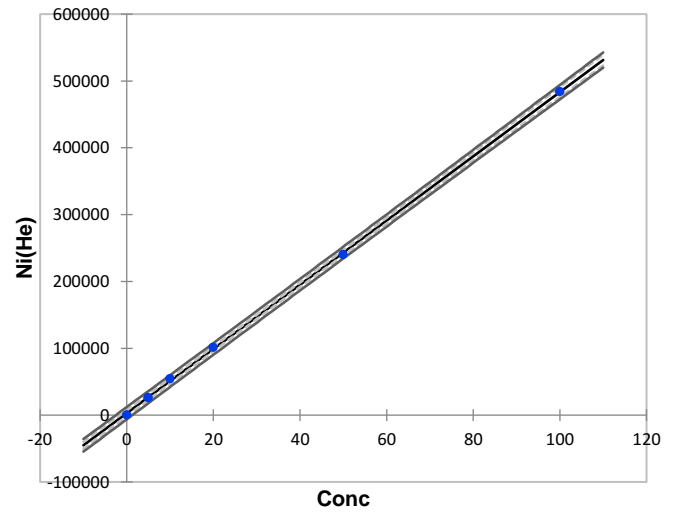
Régression de Pb(NO GAS) par Conc ($R^2=1.000$)Régression de Cd(He) par Conc ($R^2=1.000$)Régression de Mo(NO GAS) par Conc ($R^2=0.968$)Régression de Se(He) par Conc ($R^2=0.999$)Régression de As(He) par Conc ($R^2=1.000$)Régression de Zn(He) par Conc ($R^2=0.999$)

ANNEXES

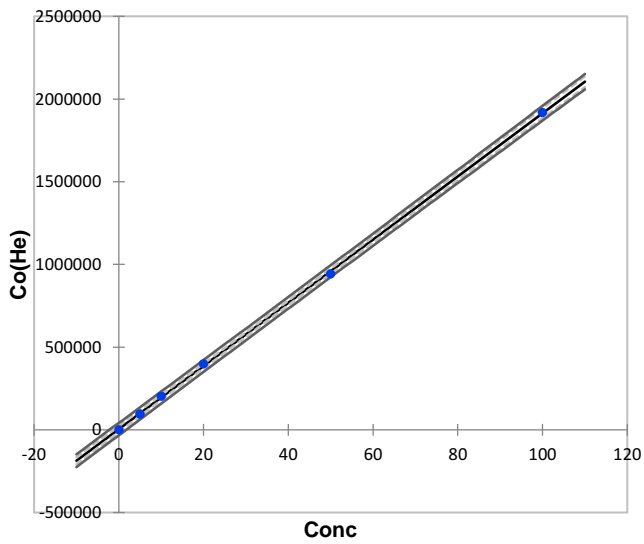
Régression de Cu(He) par Conc ($R^2=1.000$)



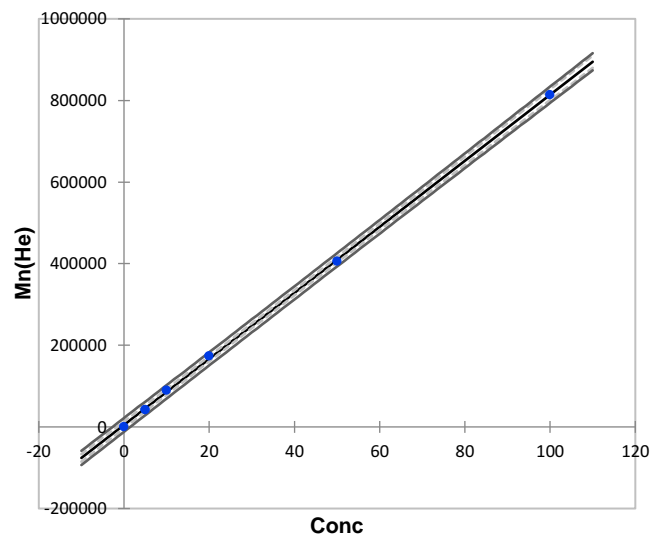
Régression de Ni(He) par Conc ($R^2=1.000$)



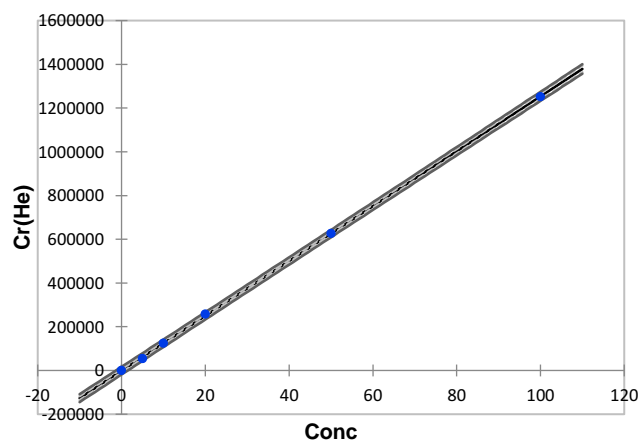
Régression de Co(He) par Conc ($R^2=1.000$)



Régression de Mn(He) par Conc ($R^2=1.000$)



Régression de Cr(He) par Conc ($R^2=1.000$)



Annexe IV : Elaboration d'une mesh de la bathymétrie

1ère étape : Les informations extraites de la carte marine seront organisé de un classeur d'Excel qui sera destiné à réaliser une mesh de la bathymétrie de notre zone d'étude

2ème étape :

- a) **New File > Mike Zéro > Mesh Generator > Select UTM ZONE 31N**
- b) **File > Options > Datum Convert**

Nous mettons nos données sur la table de conversion figure annexe (), après nous enregistrons le résultat sous l'extension '.xyz'

- a) **File > Save As**

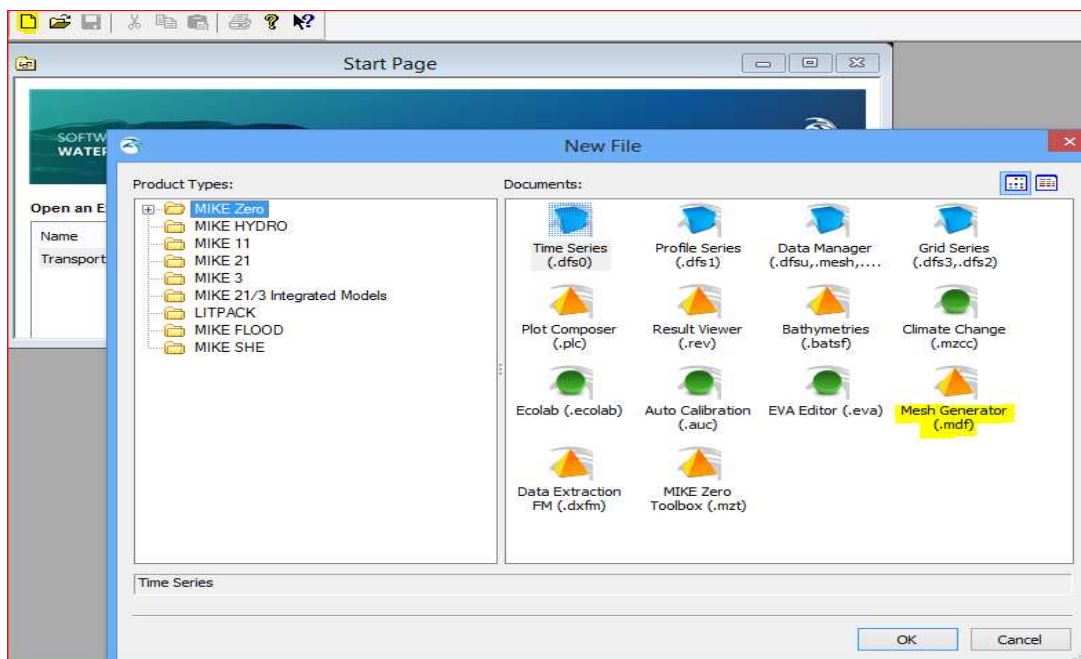
3ème : Nous revenons sur l'interface de Mesh Generator en suivant les instructions suivantes :

Pour le trait de côte nous l'introduisons en cliquant sur :

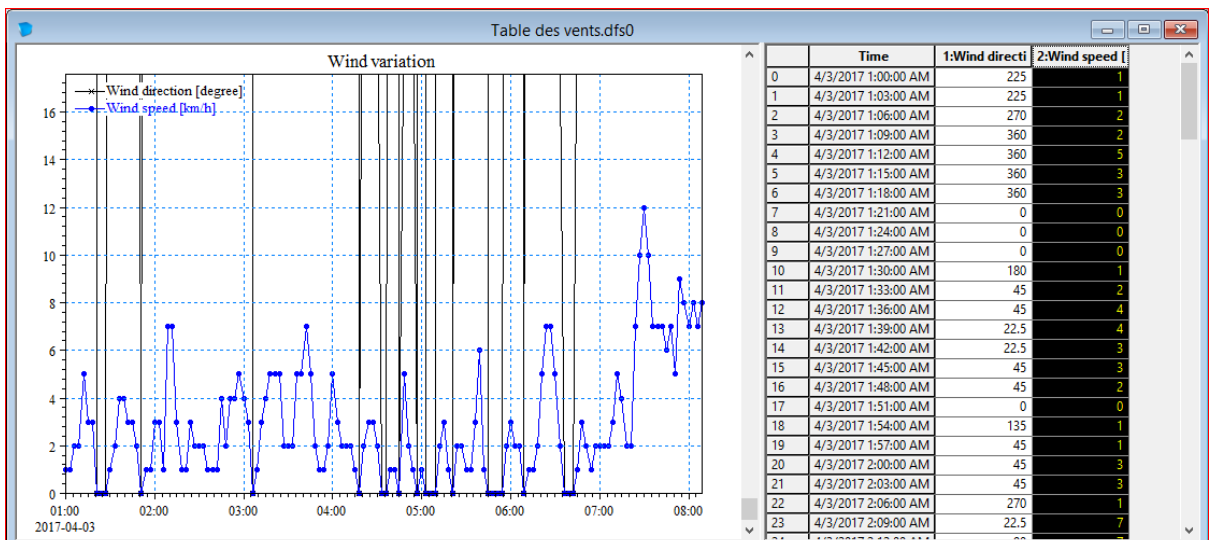
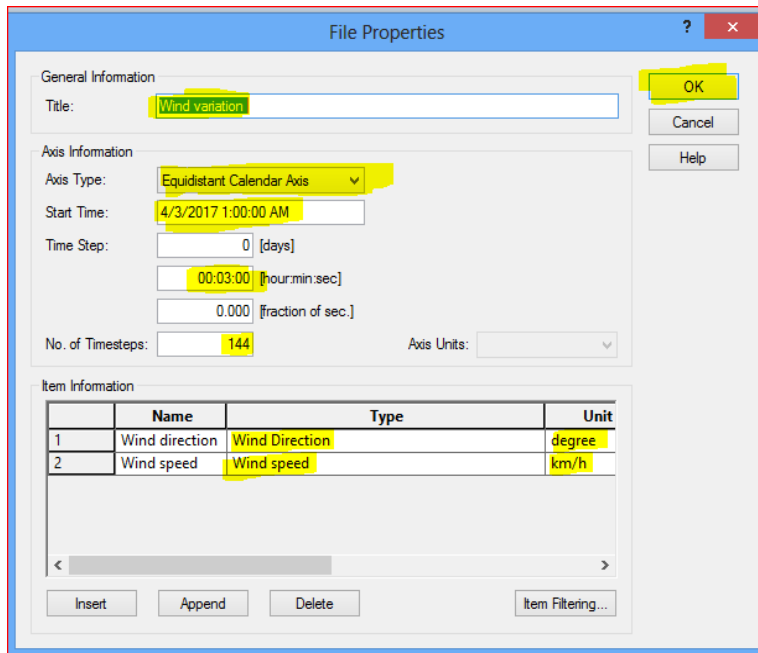
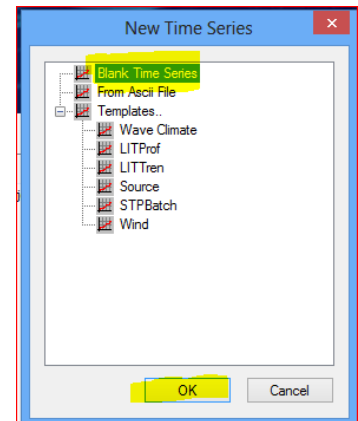
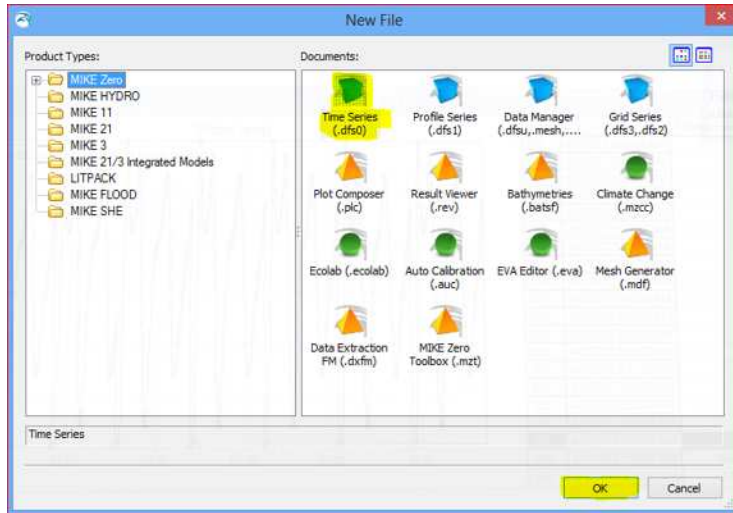
Data > Import Boundary

La bathymétrie sera introduite en cliquant sur :

- b) **Data > Mange Scatter Data > Add > Apply > Zoom > Ok**
- c) **Pour générer la mesh nous cliquons sur :**
- d) **Mesh > Generate Mesh > Ok**
- e) **Mesh > Interpolate > Start**



Annexe V : Elaboration d'une table des vents



Annexe VI : Elaboration d'une table sédimentaire

Setup Name

MIKE 21 Tool for Creating Q3D Sediment Transport Tables.

Tool for creating Q3D sediment transport tables for non-cohesive sediment transport in the marine environment.

Setup Name:

Parameters Specification

Select General Parameters

On this page you specify the general sediment transport parameters that control the calculation of the sediment transport rates by the intra-wave program STP_Q3.

General Parameters:

Tolerance in calc. of concentration:

Maximum number of wave periods:

Steps per wave period:

Relative density of sediment:

Critical value of Shields parameter:

Water temperature:

Wave Parameters

Select Wave Parameters

On this page you specify the wave theory used to describe the time variation of the near-bed velocity and the value of the breaking wave parameters.

Wave theory:

- Stokes
- Cnoidal
- Vocoidal
- Isobe & Horikawa
- Doering & Bowen

Order of solution:

Breaking wave parameters:

Gamma 1:

Gamma 2:

Sediment Transport Tables Axes

Define the Sediment Transport Table Axes

On this page you specify the first value, spacing and the number of points for each axis of the table. The table includes wave height, wave period, wave height/water depth, current speed, angle between current and waves, grain size, grading and bed slope.

Sediment table axis

	First value	Spacing	No of point
Current speed	0.190	0.1	13
Wave height	0.267	0.267	8
Wave period	8	1	3
Wave height/water depth	0.01	0.1	8
Angle current/waves	0	30	12
Grain Size	0.107	2.000	14
Sediment grading	1.1	0.15	3
Bed slope, curr. direction	-0.01	0.01	3
Bed slope, normal to curr.	-0.02	0.02	3
Centrifugal acceleration	10	0.001	1

Sediment Transport Tables Axes

Define the Sediment Transport Table Axes

On this page you specify the first value, spacing and the number of points for each axis of the table. The table includes wave height, wave period, wave height/water depth, current speed, angle between current and waves, grain size, grading and bed slope.

Sediment table axis

	First value	Spacing	No of point
Current speed	0.0190	0.1	8
Wave height	0.267	0.267	8
Wave period	8	1	3
Wave height/water depth	0.01	0.1	8
Angle current/waves	0	30	12
Grain Size	0.107	2.000	1
Sediment grading	1.1	0.15	3
Bed slope, curr. direction	-0.01	0.01	3
Bed slope, normal to curr.	-0.02	0.02	3
Centrifugal acceleration	10	0.001	1

Status

Setup Status

If you want to review or change any settings, click Back. If you are satisfied with the settings click Finish to save the setup, or Execute to generate the transport tables.

Computational status: Transport Rate 100 of 55296

Computational speed: 16 points/sec

Estimated time left: 55.18 minutes

Execute

Résumé :

Le but de ce travail est de créer une nouvelle démarche d'évaluation de la contamination métallique, commençant par la validation des deux méthodes analytiques celle de l'IAEA et celle d'AFNOR NF X 31-147 en calculant la limite de détection (LD) et la limite de la quantification (LQ) de l'équipement de l'ICP-MS Agilent 7700x afin de choisir la méthode la plus fiable. La méthode qui a été choisie sera utilisée pour l'analyse des sédiments marins qui ont été prélevés au préalable. La seconde partie de notre travail porte sur l'évaluation de la contamination métallique en calculant l'Indice de géo-accumulation ($I_{géo}$), l'Indice pollution sédimentaire (IPS), le Facteur de contamination (FC), le Degré de contamination (DC), l'Indice de charge de pollution (PLI). Les corrélations entre les métaux et la matière organique particulaire ont été étudiées en utilisant l'analyse en composante principale (ACP). L'ensemble des résultats ont été couplés à la cartographie en utilisant IDW du logiciel ArcGis 10.2 pour mieux visualiser la répartition spatiale des polluants métalliques dans les sédiments marins. Afin de les introduire dans le logiciel de modélisation DHI.Mike21 pour pré-visionner l'impact de ces pollutions ainsi que comprendre l'effet de la dynamique côtière sur la répartition de ces polluants au niveau de la partie occidentale de la baie de Bou Ismail.

Mots clés : Contamination métallique, ICP-MS, Validation des méthodes, Métaux lourds, Modélisation, Dynamique côtière, Cartographie, Analyses en composante principale ; SIG, diffusion des polluants.

Abstract :

The purpose of this work is to create a new approach to the evaluation of metallic contamination, starting with the validation of two analytical methods once the IAEA then AFNOR NF X 31-147 by calculating the limit of detection (LOD) and the Quantization Limits (LOQ) of the Agilent 7700x ICP-MS equipment to choose the most reliable method. The method that has been chosen, will be used for the analysis of marine sediments that were previously collected. The second part of this work deals with the evaluation of metallic contamination by calculating the geoaccumulation index (I_{geo}), the sediment pollution index (IPS), the contamination factor (FC), the degree of contamination (DC), the Pollution Load Index (PLI). Correlations between metals and particulate organic matter were studied using principal component analysis (PCA). All the results were coupled to the mapping using IDW on ArcGis 10.2 software for good visualizing the spatial distribution of metallic pollutants in marine sediments. To introduce them into the modeling software DHI.Mike21

then pre-view the impact of these pollutions as well as to understand the effects of coastal dynamics on distribution of these pollutants at the western part of Bou Ismail Bay.

Keywords: Metallic contamination, ICP-MS, Validation of methods, Heavy metals, Modeling, Coastal dynamics, Cartography, Principal component analyzes; GIS, diffusion of pollutants.

ملخص:

الهدف من هذا العمل هو خلق منهجية جديدة لتقييم التلوث الناتج عن المعادن الثقيلة، بدءا من مقارنة الطريقتين التحليليتين IAEA و AFNOR NF X 31-147 عن طريق حساب حد الكشف (LD) وحساب حد الكمية (LQD) لجهاز Agilent ICP-MS 7700x لاختيار الطريقة الأكثر موثوقية. تم استخدام هذه الأخيرة لتحليل الرواسب البحرية التي تم استخراجها سابقا. ويركز الجزء الثاني من عملنا على تقييم التلوث بالمعادن عن طريق حساب مؤشر التلوث التراكم، ومؤشر التلوث الرسوبية (SPI)، وعامل التلوث (CF)، ومستوى التلوث (DC)، مؤشر تحميل التلوث (PLI). تمت دراسة الارتباطات بين المعادن والمواد العضوية الجسيمية باستخدام تحليل المكون الرئيسي (ACP)، دمج جميع النتائج بالتخطيط باستخدام IDW لبرنامج ArcGis 10.2 من أجل تمثيل أفضل للتوزيع المكاني للملوثات الناتجة عن المعادن الثقيلة في الرواسب البحرية. تعريفهم ببرنامج النمذجة DHI.Mike21 لاستعراض تأثير هذه الملوثات بالإضافة إلى فهم تأثير الديناميكيات الساحلية على توزيع هذه الملوثات في الجزء الغربي من خليج بو إسماعيل.

الكلمات المفتاحية: التلوث المعدني، ICP-MS، التحقق من صحة الطرق التحليلية، المعادن الثقيلة، النمذجة، الديناميكيات الساحلية، رسم الخرائط، تحاليل المكون الرئيسي؛ نظم المعلومات الجغرافية، توزيع الملوثات.